



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
MEHAANIKATEADUSKOND

Mehhatroonikainstituut

Mehhatroonikasüsteemide õppetool

MHK40LT

Sander Sööt

Vanal hübriidrattal põhinev elektriline sõiduk
Bakalaureusetöö

Autor taotleb
tehnikateaduste bakalaureuse
akadeemilist kraadi

Tallinn
2016

AUTORIDEKLARATSIOON

Deklareerin, et käesolev lõputöö on minu iseseisva töö tulemus.

Esitatud materjalide põhjal ei ole varem akadeemilist kraadi taotletud.

Töös kasutatud kõik teiste autorite materjalid on varustatud vastavate viidetega.

Töö valmis..... juhendamisel

“.....”.....201...a.

Töö autor

..... allkiri

Töö vastab bakalaureusetööle esitatavatele nõuetele.

“.....”.....201...a.

Juhendaja

..... allkiri

Lubatud kaitsmisele.

..... õppekava kaitsmiskomisjoni esimees

“.....”.....201... a.

..... allkiri

TTÜ mehhatroonikainstituut
Mehhatroonikasüsteemide õppetool

Bakalaureusetöö ülesanne

2016. aasta kevadsemester

Üliõpilane: Sander Sööt 103631MAHB
Õppekava: 02/09 MAHB-Mehhatroonika
Spetsialiseerumine: Mehhatroonika
Juhendaja: Märt Juurma, Noorem-teadur, Mart Tamre, Professor
Konsultandid: Gabriel Verilaskja (Disainer-Projektijuht, Süsteemitehnika OÜ), Priit Aas (Tegevjuht, Süsteemitehnika OÜ)

BAKALAUREUSETÖÖ TEEMA:

(eesti keeles) Vanal hübriidrattal põhinev elektriline sõiduk
(inglise keeles) Design of electrical vehicle based on old hybrid bike

Lõputöös lahendatavad ülesanded ja nende täitmise ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Täitmise tähtaeg
1	Mehaanikaga, anduritega ja elektrisüsteemiga seotud probleemide kaardistamine ja lahendusvariantide leidmine	25.03.2016
2.	Mootori elektrisüsteemi ja juhtimise lahenduste leidmine ja testimine	01.04.2016
3.	Mehaanika – mootori kinnituste, olemasolevate detailide töötlemise ja kogu mehaanilise süsteemi analüüs ja lahendamine	15.04.2016
4.	Juhtimissüsteemi ja potentsiaalsete lisafunktsioonide analüüs ja koostamine	01.05.2016
5.	Töö dokumentatsiooni koostamine, vormindamine	18.05.2016

Lahendatavad insenertehnilised ja majanduslikud probleemid: Luua teadmised ja süsteem, mis koosneb mootorist, kontrollierist, juhtimisest ja ehk mõnest lisafunktsioonist vanade hübriidrataste ümberehitamiseks. Lahendada mehaanikaprobleemid, kuidas olemasolevaid detaile muuta uuele süsteemile sobivaks ja võimalusel säilitada maksimaalselt olemasolev esteetika.

Täiendavad märkused ja nõuded: Ei ole.

Töö keel: eesti keel

Kaitsmistaoetus esitada dekanaati hiljemalt 16.05.2016 **Töö esitamise tähtaeg 20.05.2016**

Üliõpilane Sander Sööt /allkiri/ kuupäev.....

Juhendaja Märt Juurma /allkiri/ kuupäev.....

Sisukord

EESSÕNA.....	6
1. SISSEJUHATUS	7
2. MEHAANIKA	10
2.1. Mehaanika sissejuhatus	10
2.2. Raami valik	11
2.3. Mootori korpus (Riga D-6)	11
2.4. Halli andurite adapter	12
2.5. Karterseina tugevdusplaat	14
2.6. Treitud mootorivõll	14
2.7. Laagrite vastupidavuse hinnang	16
3. ELEKTROONIKA	18
3.1. Elektroonika sissejuhatus	18
3.2. Elektrimootori valik	19
3.3. Elektrimootori juhtimine	21
3.4. Halli andurid.....	22
3.5. Kontrolleri seadistamine	24
3.6. Mikrokontroller Arduino Uno	24
3.7. Puutetundlik 3.2“ TFT HMI ekraan Nextion	25
3.8. Akude valik	26
4. RISKIANALÜÜGMS JA MAKSUMUSE HINNANG	29
KOKKUVÕTE	31
SUMMARY	33
KASUTATUD KIRJANDUS	35
LISAD	37
Lisa 1. Enamlevinud elektrijalgrataste elektrimootorid	37
Lisa 2. Küsitlus.....	38
Lisa 3. Turningy Aerodrive SK3 6354-215 BLDC mootori andmeleht.....	39
Lisa 4. Kelly KBS-X kontrolleri standardne ühenduskeem	40
Lisa 5. Nextion Itead 3.2“ TFT ekraani andmeleht.....	41
Lisa 6. Kõige nõrgema lüli leidmine Solidworks Simulationi abil.....	42
Lisa 7. Elektrisõiduki elektriskeem.....	43

Lühendite ja tähiste loetelu

Kv – elektrimootorit iseloomustav parameeter, mis näitab mootoris olevate pöörete sagedust voldi kohta.

ESC – kontrolleri, mis muudab aku alalispinge mootori mitmefaasiliseks vahelduvpingeks; i.k. *Electronic Speed Controller*.

CAD – raalprojekteeritud; i.k. *Computer aided design*.

BEMF – tagasiside elektromotoorjõust; i.k. *Back electromotive force*.

LiPo – Liitium-ioon polümeer (aku); i.k. *Lithium-ion polymer battery*.

ADC – analoog-digitaalmuundur ; i.k. *Analog-to-digital converter*.

RAM – muutmälu ehk suvapöördusmälu ; i.k. *Random access memory*.

LFP – Liitium-raudfosfaat (aku); i.k. *Lithium iron phosphate*.

BMS – akude juhtkiip; i.k. *Battery management system*.

PLA-plastik – biolagunev plastik; i.k. *Polyactic acid*.

PTC – positiivse temperatuuriteguriga termistor; i.k. *Positive temperature coefficient*.

LED – valgusdiod; i.k. *Light emitting diode*.

TFT LCD – aktiivmaatrikskuvar; i.k. *Thin-film-transistor liquid-crystal display*.

SOC – (aku) laetuse määr; i.k. *State of charge*.

BLDC – harjavaba alalisvoolu (mootor); i.k. *Brushless Direct Current (motor)*.

PWM – pulsilaiusmodulatsioon; i.k. *Pulse width modulation*.

EESSÕNA

Lõputöö teemal „Vanal hübriidrattal põhinev elektriline sõiduk“ sündis igapäevasesst vajadusest, kus tavalise jalgrattaga klassikaline sõitmine osutus füüsiliselt liiga kurnavaks. Eesmärgiks oli luua vanaaegse väljanägemisega sõiduk, mis omaks kõige modernsemaid tehnilisi lahendusi. Tööd teostati nii Tallinna Tehnikaülikoolis kui ka Süsteemitehnika OÜ-s. Inspiratsiooni ja praktilisi nõuandeid sai töö autor eelkõige Süsteemitehnika OÜ Disainer-Projektijuhilt Gabriel Verilaskjalt, kuid innustust jagasid ka senised elektrijalgrataste omanikud Eestis ja välismaal.

Konsultatsioonide ja nõustamise eest soovib lõputöö autor tänada Mehhatroonikainstituudi töötajaid, Süsteemitehnika OÜ kollektiivi ning 3DprinterOS kollektiivi.

1. SISSEJUHATUS

Euroopas ja ka mujal maailmas on elektrijalgratate turuosa tehnoloogia arengu tõttu igal aastal jõudsalt kasvanud [1]. Elektrisõidukid on elektrimootori jõul liikuvad sõiduvahendid, mis on keskkonnasõbralikud, sest ei eralda CO₂ heitgaase. Erinevalt mootorikütustest on elektrienergiat võimalik saada taastuvatest energiaallikatest nagu näiteks päikesepaneelidest, tuulegeneraatoritest, hüdroelektrijaamadest.

Elektrijalgrattad on aastast aastasse hõivamas üha suuremat turuosa võrreldes tavaliste jalgratatega. Näiteks langes Saksamaal tavaliste jalgratate müük 2013. aastal 5,5%, kuid elektrijalgratate müük tõusis ligikaudu 8%-ni hõivates 11% turuosast. Hollandis, kus on Euroopa kõige suurem jalgratate kasutusarv inimese kohta, tõusis elektrijalgratate müük üle 9% [2].

Käesoleva projektiga alustati aastal 2012, kui turul olevate elektrijalgratate valik polnud väga suur. Tänapäevaks on olukord muutunud ning eelnimetatud tooteid on võimalik internetist ja ka Eestist lihtsalt soetada [3, 4]. Autori arvates on turul olevate rataste elektrimootorid puudustega. Nimelt on levinumateks detailideks 250 W rummumootor (Lisas 1 on välja toodud levinumad elektrijalgratate elektrimootorid), mis kaalub ligikaudu 4 kg või 1000 W rummumootor, mis kaalub ligikaudu 7,5 kg. Lisaks keskjooksumootorid, mis 350 W või 750 W nimivõimsuse juures on hetkeliselt koormatavad kuni 2 kW. Vaatamata sellele, et keskjooksumootorite kaal jääb 2 kg juurde, on miinuseks kogu ülekande kantavus üle keti tagarattale, mis tähendab üldefektiivsuses lisakadusid.

Elektrijalgrattaid valmistatakse Eestis käsitööna, näiteks kannavad Särtsuratta meeskonna poolt valmistatud tooted nime Liberator [5]. Liberatori stiil on oma olemuselt retrohõnguline, kuid kasutusel on kõige uuemad tehnoloogilised lahendused. Üha enam tekib juurde väikeseid ettevõtteid, kes loovad *vintage* välimusega elektrisõidukeid [6, 7]. Kõigi nende sõidukite puhul on kasutatud kas rummu- või keskjooksu mootorit ning imiteeritud vanaaegse bensiinimootori välimust. Käesoleva töö autor ei ole teadlik, et varasemalt oleks tehtud sarnasel viisil vanal hübriidrattal põhinevat elektrilist sõidukit.

Läbiviidud turuanalüüsi (Lisa 2) käigus selgitati välja, kas Eesti turul on piisavalt huvilisi antud töö käigus arendatava lahenduse vastu. Küsitlusel osalenud 84 vastajast 52 leidis, et elektrijalgratta idee on hea ja väärib teostamist. 17 vastajat leidis, et idee on hea, kuid mopeedid peaksid jääma sise põlemismootoritega. Erinevatel võidusõitudel näeksid elektrijalgratast võistlemas 69 küsitlusele vastanut. 37 neist arvas, et võidusõitudel võiksid elektrijalgratastel vastavalt võimsusele olla omad klassid. Küsitletavatest 26 leidis, et paralleelselt sise põlemismootorite võistlusele võiksid elektrisõidukid võistelda eraldi klassis, kuhu on lubatud ka teised elektrijõul liikuvad kahe rattalised sõiduvahendid. Küsitluse tulemusel selgus, et huvi käesolevas töös arendatava elektrijalgratta vastu on suur, sest 84 vastajast 52 sooviks sellist ümberehitatud mootorkomplekti omada. Neist 32 oleks nõus maksma ümberehitatud mootorkomplekti eest 200 eurot, 16 vastanut 300 eurot ning neli vastanut 400 eurot.

Läbiviidud turuanalüüsi tulemusel võib öelda, et antud töös arendataval elektrijalgratta oleks Eesti turul piisavalt huvilisi. Samuti võib järeldada, et elektrijalgratastel on head väljavaated osaleda erinevatel mopeedidele korraldatud võidusõitudel. See eeldab aga eraldi elektrijalgratastele loodud võistlusklassi olemasolu, kus sõiduvahendid on jaotatud võimsuse järgi.

Käesoleva töö eesmärk on välja töötada prototüüplahendus tulevaste hübriidrataste ümberehituseks, mille käigus säilib mootorsõiduki algne välimus ning bensiinimootor D-6 ehitatakse ümber elektriliseks.

Töö teeb uudseks ja oluliseks see, et sellesarnast toodet hetkel turul ei ole. Samas tõestas turuanalüüs, et huvi vanal hübriidrattal põhineva elektrisõiduki vastu on olemas ja seetõttu on see töö ka vajalik.

Töö eesmärgi saavutamiseks püstitati järgmised ülesanded:

- 1) Ümber ehitada mootori korpus D-6.
- 2) Valida sobiv elektrimootor ja sellele vastav elektroonika.
- 3) Valida õiged parameetrid ja seadistada terve süsteem.

Töö on jaotatud neljaks peatükiks. Esimeses peatükis kirjeldatakse olemasolevate mehaaniliste detailide ümberehitust, uute valmistamist ja põhjendatakse nende vajalikkust.

Teises peatükis antakse ülevaade valitud elektrimootorist, selle tehnilistest parameetritest ja efektiivsusest. Lisaks kirjeldatakse elektrimootori juhtimiseks vajalikke osasid ning nende tööpõhimõtteid. Kolmandas peatükis on analüüsitud hübriidsõiduki majanduslikke näitajaid, toodud välja antud tootelahenduse puudused ning parandusettepanekud. Neljandas ja viimases peatükis hinnatakse käesoleva töö tugevaid ja nõrku külgi ning antakse hinnang maksumusele.

Tööl on kaheksa lisa, kuhu on lisatud tooteillustratsioonid, andmelehed ning autori poolt koostatud elektriskeem ja Arduino programmeerimise kood.

Kõik mehaanilised 3D detailid loodi kasutades tarkvara Solidworks 2014, mis sobis detailide modelleerimiseks. Mudelite printimiseks kasutati 3DprinterOS ettevõtte Ultimaker 2 printerit. 3D printimiseks konverteeriti failid STL formaati, seejärel määrati programmis Cura 15.04 parameetrid, et genereerida *build* fail, mida sai printerisse sisestatud mä lupulga abil käivitada.

Töösse valiti Turnigy Aerodrive SK3 seeria 6354-215 harjavaba välispöörleja tüüpi alalisvoolumootor (*brushless direct current outrunner electric motor*) ehk edaspidi elektrimootor (Lisa 3).

Mikrokontrollerina kasutati arendusplaati Arduino Uno, mis baseerub ATmega328P AVR mikrokiibil. Arduino Uno on 14 digitaalset sisend- ja/või väljundviiku, millest kuute on võimalik kasutada PWM väljundina. Sellele lisaks on mikrokiibil kuus analoogsisendit, 16MHz taktsagedusel töötav kvartsikristall, USB väljund ja toiteallika pistik. See on piisav, et lahendada käesolevas töös nõutud ülesanded. Programmeerimine teostati Arduino kodulehelt [8] allalaetava tarkvara Arduino 1.6.9 abil.

Töös kasutati Nextion TFT LCD 3.2" ekraani, mille visualiseerimine teostati läbi tootjapoolse tarkvara Nextion Editor V0.35, mis oli kättesaadav tootja kodulehel [9].

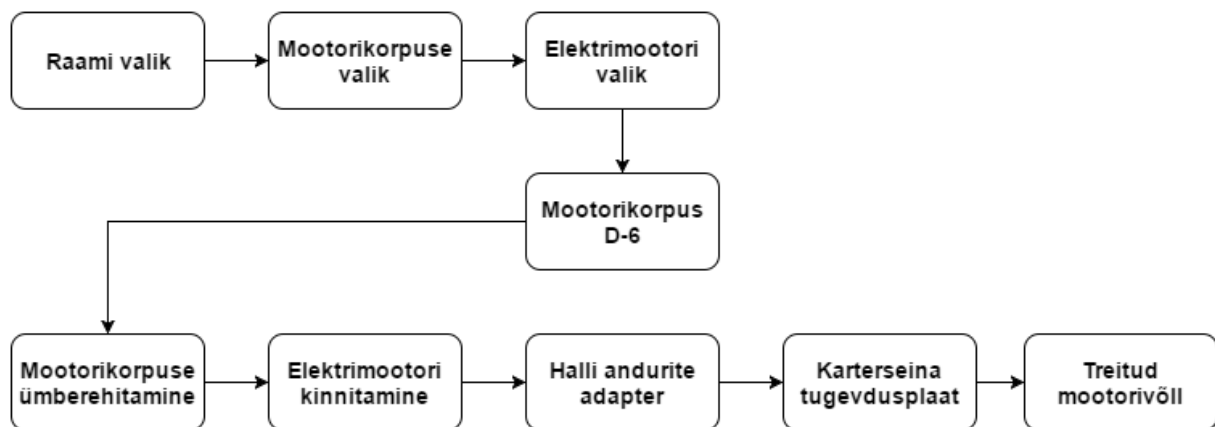
Mootori juhtimiseks kasutati selles segmendis kõige levinumat Kelly kontrolleriit KBS 48121X. Kontrolleri seadistamine teostati läbi tootjapoolse tarkvara Kelly KBS-X User Configuration Program Setup V4.5 [10].

2. MEHAANIKA

2.1. Mehaanika sissejuhatus

Projekti kõige keerukamaks osaks oli mehaanika, sest esines mitmeid takistusi detailide valmistamisel ja sobitamisel. Mehaanika osas valmistati detaile, et muuta mootori korpus D-6 elektriliseks. Sageli tekkisid vead ebatäpsetest mõõtmistest, mistõttu tuli detailid uuesti valmistada. Prototüübi ehitamise käigus prooviti erinevaid tehnilisi lahendusi, kuid eesmärk oli leida võimalikult lihtne lahendus.

Tähtsamad tööetapid on esitatud Selet 2.0. Töö esimene etapp oli valida sobiv raam. Töö teises ja kolmandas etapis valiti sobiv mootori korpus ja elektrimootor. Seejärel alustati mootori korpuse ümberehitusega, milleks tuli freesida vasakpoolse karteri seina ava. Ava tehti pidades silmas elektrimootori suurust ja kinnitusi. Järgmisena teostati ümberehitused Halli andurite adapteri paigaldamiseks. Pärast kõikide komponentide paigaldamist mootori korpusesse mõõdeti vajamineva võlli pikkus ning valmistati võll, mis teostaks ülekande elektrimootorist mootori korpuse siduri kaldhammasrattani. Järgnevates alapeatükkides on põhjalikumalt lahti seletatud töökaik, tähtsamad detailid, nende valik ja funktsioonid.



Sele 2.0 Mehaanika tööetappide plokkdiagramm

2.2. Raami valik

Projekti alustati veneaegse jalgratta raami leidmisega, mille peale oli lihtne kinnitada mopeedi mootori korpust D-6. Raam oli kerge ja praktiline, ning ruumi oli ka akude kinnitamiseks. Paljud abimootoriga jalgrattad on ehitatud standardse jalgratta raamile. Katsetamise käigus selgus, et nüüdseks vanad jalgrattaraamid ei ole siiski sobivad – raamide lühiaegsel kasutamisel tekkisid deformatsioonid, mille tõttu muutusid need kasutuskõlbmatuks. Samuti kulus sellise raami veermiku ümberehitusele palju aega ja ressursse. Seetõttu otsustati valida mopeedi Riga 13 raam, millelt on algselt pärit ka kasutusele võetud mootori korpus D-6. Antud valiku eelisteks on ülekandemehhanismide sobiv suhe, vedava ketiratta ning veetava ketiratta õige joendus ja mootori korpuse lihtne paigaldus.

Abimootoriga sõidukite mootorite kinnituskohad on üldiselt sarnased. Seega sobib D-6 mootori korpus ka paljudele teistele jalgratastele, nii abimootoriga sõiduvahenditele kui ka mopeedidele, mis ainult laiendab selle potentsiaalset kasutusvaldkonda.

2.3. Mootori korpus (Riga D-6)

Kasutusele võeti 45-kuupsentimeetrise töömahuga ühesilindrilise 1,1 hj, siduriga bensiinimootor Riga D-6. Riga D-6 mootor valiti, sest selle kinnitused on universaalsed ning antud mootorit saab paigaldada paljudele teistele toruraamiga mopeedidele ja jalgratastele. Mootorilt eemaldati väntvõll, süütesüsteem, karburaator ja summuti. Viimased kaks lisatakse töö valmimisel algse välimuse taastamiseks. Mootoris on olemas kaldhammastega ülekanne suhtega 4,1:1, mis töötab reduktorina ning aitab elektrimootori pöördeid vähendada.

Elektrimootori paigaldamiseks tuli freesida mootori vasakpoolne kartersein (Sele 2.1), mis teostati CNC pingis. See eeldas joonise tegemist – ringjoon diameetriga 61 mm. Seejärel mõõdeti ringi täpne tšenter ja freesiti. Elektrimootori X-kujuline kinnitusalus asetati freesitud ava kohale, tehti vastavad märgid ning puuriti neli kinnitusauku läbi karterseina (Sele 2.1). Elektrimootor oli oma pikkuselt liiga suur, mistõttu tuli selle kinnitusplaati nihutada karterist väljapoole, et elektrimootor karterisse mahuks. Selleks asetati karterseina välisküljele 5 mm paksusega PLA plastikust karterseina tugevdusplaat (Sele 2.5), mis tõi mootori 5 mm võrra väljapoole. PLA plastiku asemel võiks kasutada ka tugevamast materjalist toorikut. Samas ei

ole katsetustel plaadile seni kahjulikke deformatsioone tekkinud, mistõttu on PLA plastik sobiv materjal käesoleva töö teostamiseks.

Bensiinimootori D-6 reduktori külge on integreeritud ühekettaline kuivsidur lahutamaks mootorit tagarattast. Siduri olemasolu on elektrimootori puhul üldjuhul ebavajalik, kuid võib mootorit kaitsta väliskeskkonnast tingitud löökkoormuste eest, näiteks kui tagaratas blokeerub täiskiirusel. Mootori D-6 sidur on mõeldud algse 1,1 hj võimsusega töötama. Käesolevas töös kasutatav elektrimootor on ligikaudu 2,5 korda võimsam, mistõttu tuleks algne sidur tugevama vastu välja vahetada. Lihtsasti paigaldatavat ostutoodet ei ole, kuid sobivaid osasid leiab Riga võimsamatelt mopeedimootoritelt ja mootorrattalt Minsk. Võimsamatel mootoritel on mitme kettaga kuivsidurid, mis sobiksid käesoleva töö jaoks. Kui sidur peaks osutama antud töös ebavajalikuks, siis on võimalik hiljem sidur kinni keevitada.



Sele 2.1 Mootorkorpuse ümberehitatud karteri sein

2.4. Halli andurite adapter

Erinevate lahenduste katsetamistel leiti, et kõige ratsionaalsem on Halli andurid paigaldada elektrimootori kestad väljapoole, mis võimaldaks paremini reguleerida Halli andurite asendit elektrimootori suhtes. Halli andurite trükkplaadi (Sele 3.2) arendanud Equal Zero Designs [11] pakkus ka õige istuga adapterplaati (Sele 2.3).



Sele 2.3 Halli andurite adapter

Töös kasutatava elektrimootori kinnitamise jaoks tuli adapterplaat ümber disainida. Esiteks lisati õhutusavad, mis aitavad elektrimootoril paremat jahutust saada. Teiseks muudeti trükkplaadi kinnituse kõrgust, sest elektrimootorit viidi mootori korpusest väljapoole. Kolmandaks lisati Halli andurite adapteri kinnituskohtade ümber toetusmaterjal, sest poltide pingutamisel paindus läbi elektrimootori X-kujuline kinnitusalus.

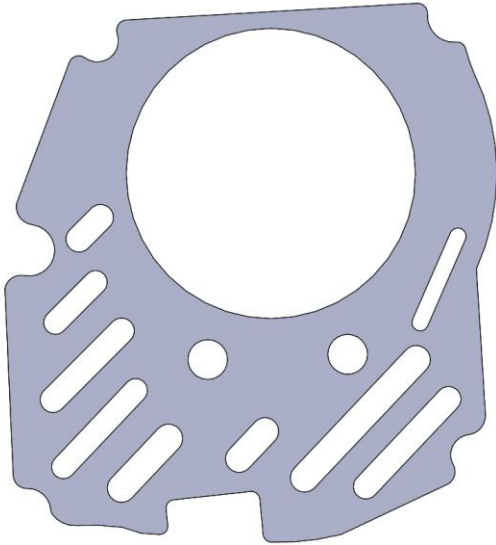


Sele 2.4 Halli anduri adapteri kinnitus elektrimootoriga

Adapterplaat kinnitub elektrimootori komplektis olnud X-kujulise kinnitusalus (Sele 2.4) abil karterseina külge. Elektrimootori alumine staatori osa on koonusega (Sele 2.3). Seda omadust silmas pidades on valmistatud adapteri siseosa, mis toetub elektrimootori alumisele osale. Adapter ja mootori vaheline ist on koostatud pinguga, et välistada adapteri liikumine elektrimootori suhtes.

2.5. Karterseina tugevdusplaat

Mootori korpuse D-6 elektrimootor kinnitub vasakpoolse karterseina külge nelja M6 kinnituspoldi abil. Karteri seinapaksus on 3 mm. Karteri seinaservale mõjuva koormuse ühtlasemaks jaotuseks asetati seinale tugevdusplaat (Sele 2.5), mis andis ühtlasi ka vajaliku nihke, et mahutada elektrimootor mootori korpusesse.



Sele 2.5 Karterseina tugevdusplaat, vasakul CAD detail ja paremal skännitud detail

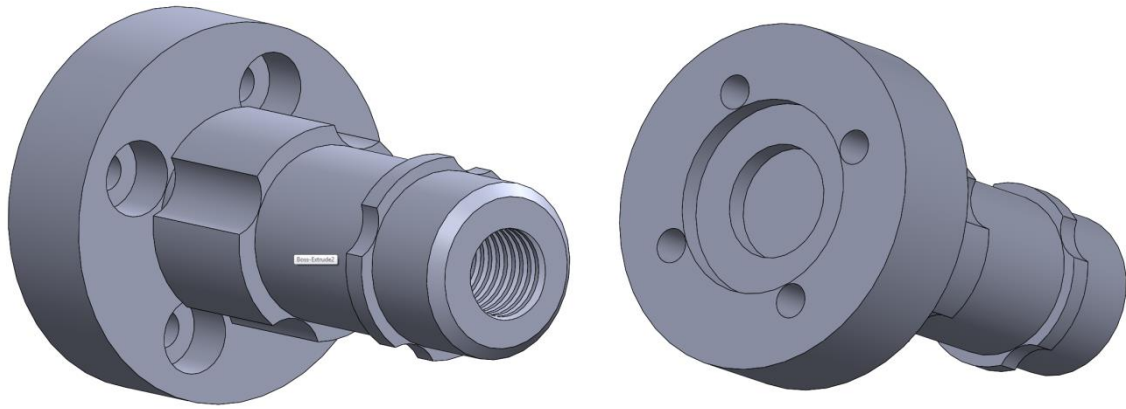
Karterseina tugevdusplaadi arvutimudeli saamiseks skaneeriti mootorkorpuse serv skanneris ning selle põhjal koostati joonis, millest sai valmistada 3D mudeli. Avaused plaadil tehti materjali säästmise ja tootmise kiirendamise eesmärgil. See ei mõjutanud detaili funktsioone ega jäikust. Karterseina plaat 3D prinditi 50% kargstruktuuri täituvust kasutades, sest sel kujul oli detail kõige vastupidavam. Servade kihtide (*shells*) arvuks määrati 5, et tagada servade tugevus ja vastupidavus. Alumisse serva tehti 1 mm faas, sest mootorkorpuse karteri ja serva vahel on valurant. Elektrimootori kinnituspoltide avad puuriti pärast elektrimootori asetamist mootori korpusesse.

2.6. Treitud mootorivõll

Elektrimootori pöörlemise kandmiseks sidurini oli mootori otsa vaja treida sobiv mootorivõll (Sele 2.6). Võlli toorikuks valiti oma tõmbetugevuse tõttu teras S355. Treimised teostati Tallinna Tehnikaülikooli V korpuse mehhatroonikainstituudi treipinkidega. Mootorivõll

valmistati analoogselt mootoriga kaasa tulnud alumiiniumvõlli järgi, et uut treitud detaili oleks võimalik elektrimootori otsa tsentreerida. Võlli ots valmistati mootori korpuses kiilliistuga kinnitatava kaldhammasratta sisediameetri järgi, mis oli 13,95 mm. Võll kinnitub elektrimootori külge nelja M3 poldiga. Poldiavade valmistamiseks tuli mööda võlli freesida, lõigata sisse hammasratta stopperi servale ning väntvõlli laagri toetuspinnale.

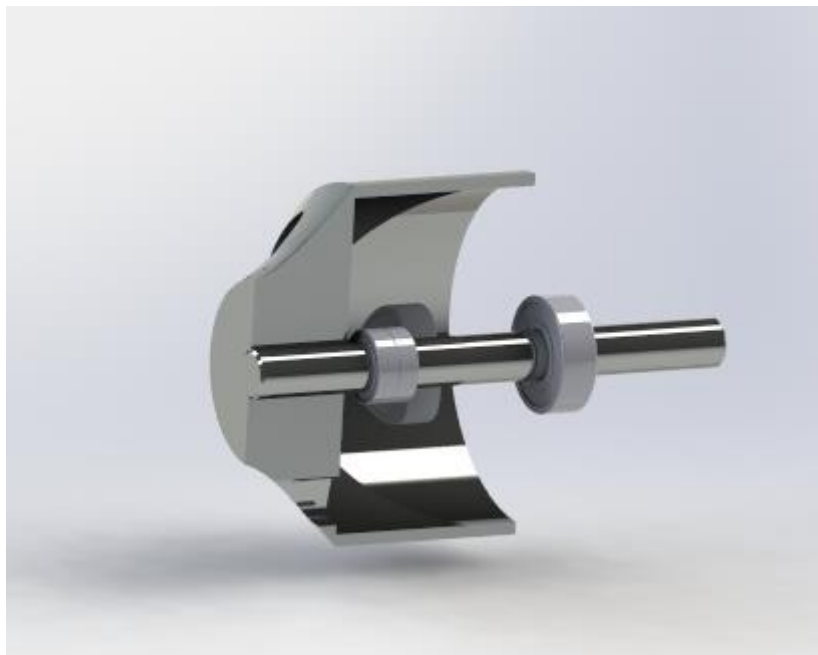
Üheks suureks probleemiks isetehtud mootorikinnituste ja võlli osas oli elektrimootori tsentreerimine mootorkorpuse suhtes. Algne idee oli lisada võllile lisalaager, et vähendada elektrimootori võllile tekkinud painutavat koormust. Kui võll toetuks mootorkorpuses olevale alsele väntvõlli laagrile, siis võlli toetumine laagrile tsentreeriks elektrimootori mootorkorpuse suhtes. Mootorkorpuse karteris polnud aga lisalaagri jaoks piisavalt ruumi, mistõttu freesiti prototüübi parempoolse karteri seinalt laagri pesa. Ruumi saaks juurde, kui nihutada elektrimootor mootorkorpusest väljapoole, mis eeldaks teiste komponentide pikendamist. Prototüübi puhul loobuti lisalaagri paigaldamisest, sest see aeglustas töö edasist käiku. Samas on lisalaager vajalik töökindluse saavutamiseks ja paigaldatakse seetõttu lõpptootele. Võlli otsa kinnitub mootorkorpuses algselt olnud kaldhammasrattas, mille kaudu teostatakse ülekanne siduri kaldhammasrattale. Võlli otsa kaldhammasratta kinnitamiseks tuli võlli otsa valmistada sisekeere M8x1.0. Selleks valmistati tsentripuuriga täpne auk ning puuriti 6,8 mm puuriga 15 mm pikkune auk. Seejärel keermestati auk 10 mm pikkuselt keermepuuriga. Kaldhammasrattas lukustati võlliga kiilliistu abil, milleks valmistati võllile liistu soon. Lõpuks paigaldati võlli ja poldi vahele lukustusseib, et polt vibratsiooni tulemusel lahti ei tuleks. Probleemiks osutus võlli tsentreerimine elektrimootori suhtes. Väikene ebatäpsus detaili valmistamisel tähendas juba lõtkuga istu, mille tulemusel oli võll elektrimootori suhtes ekstsentriline. Selle tulemusena kiilusid kaldhammasrattad igal pöördel hetkeks kinni. See aga tähendas suurenenud vibratsiooni, vähenenud efektiivsust ja suuremat detailide kulumist.



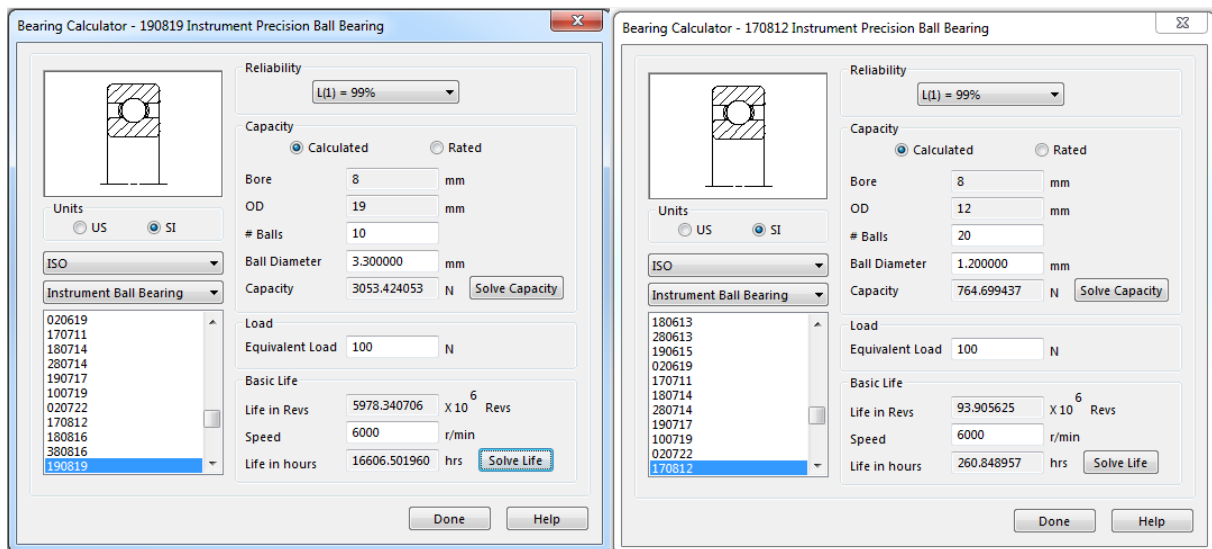
Sele 2.6 Elektrimootori otsa valmistatud võll

2.7. Laagrite vastupidavuse hinnang

Käesolevas töös tuli hinnata ka laagrite eluiga, kuna võlli otsas ei olnud enam tiivik või propeller, vaid suuremat paindemomenti tekitav mootorivõll. Seel 2.7 võib näha, et elektrimootori tootja on juba hajutanud esimesele osale mõjuvaid jõude sellega, et on asetanud mootori esimesse osasse kaks laagrit. See tagab mootorile pikema eluea ja aitab kompenseerida painutavaid koormusi. Esimese laagri mõõt on 12x8x3,5 mm.



Sele 2.7 Laagrite asetus elektrimootoris



Sele 2.8 Laagrite 8x19x6 ja 8x12x3,5 kandevõime hinnang

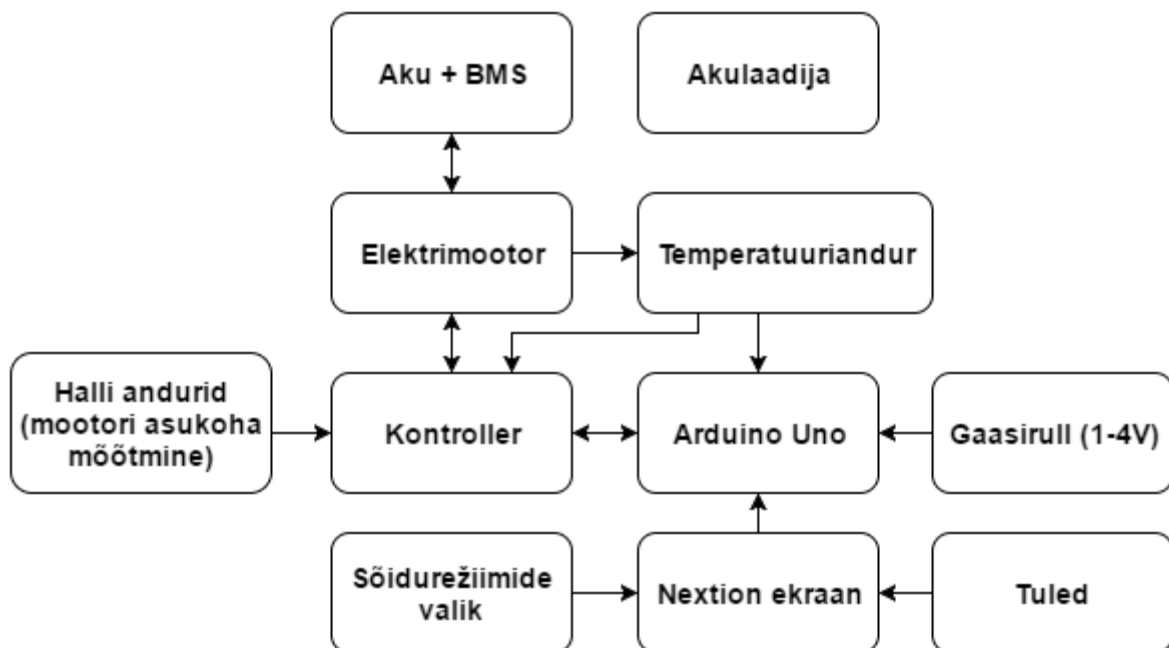
Bensiinimootor D-6 kasutab algselt väntvõlli laagreid 17x40x12, mille kandevõime on 15,9 kN [12]. Kahe laagri summeeritud kandevõime on 31,8 kN. 1,1 hj bensiinimootori D-6 väntvõll kaalub ligikaudu 2 kg. 2,1 kW elektrimootor kaalub ligikaudu 500 g. Laagrite summeeritud kandevõime on ligikaudu 4580 N (Sele 2.8). Arvestades asjaolu, et elektrimootor kinnitati vaid ühest punktist ning mootori otsa lisati võll, siis on töökindluse saamiseks vaja toetada elektrimootori võll laagriga. Mootorivõlli saaks toetada mootorikorpuse D-6 parempoolse karterseina väntvõlli laagrile. See teeb aga võlli valmistamise keerulisemaks ning lisaks tuleb elektrimootor mootori korpusest väljapoole viia. Seda saaks toetada karterseina tugevdusplaadi paksemaks tegemise teel.

3. ELEKTROONIKA

3.1. Elektroonika sissejuhatus

Käesoleva projekti elektroonika ja elektriskeemi lõpplahendused sõltusid elektrimootorist, tema juhtimisvõimalustest ning kontrollerrist. Õige elektroonika valimine, selle seadistamine ja juhtalgoritmi valik oli kriitilise tähtsusega süsteemi efektiivseks toimimiseks. Prototüübi ehitamise käigus katsetati erinevaid kontrollereid ja nende juhtimisalgoritme, et leida kõige parem kombinatsioon lihtsast, töökindlast ning efektiivsest lahendusest.

Töö jaotus seitsmeks etapiks. Tähtsamad tööetapid ja komponentide valikud on esitatud elektroonika plokkiagrammil (Sele 3.0). Töö esimene etapp oli leida sobiv elektrimootor. Teises etapis otsiti elektrimootori juhtimiseks sobivat kontrollerrit ja kolmandas etapis analüüsiti Halli andurite omadusi. Neljandas etapis esitati kontrolleri seadistamiseks vajalikud parameetrid. Viies etapis kirjeldati, kuidas integreeriti Arduino Uno mikrokontroller mootori juhtimisse. Kuuendas etapis seadistati Nextioni ekraan kuvamaks mootori parameetreid, mida on võimalik puutetundliku ekraani pealt sõidu ajal muuta. Töö seitsmendas ehk viimases etapis hinnati erinevate akude omadusi ja valiti käesoleva töö jaoks kõige sobivam lahendus.



Sele 3.0 Elektroonika plokkiagramm

3.2. Elektrimootori valik

Elektrimootori valikul olid peamisteks argumentideks füüsilised mõõtmed, võimsus, üle 90% efektiivsus ja maksimaalne pöörlemissagedus. Oluline oli, et elektrimootori võllilt oleks võimalik teostada ülekanne tagarattale, mis võimaldaks vajadusel lahutada elektrimootor tagarattast. See kaitseks elektrimootorit võimalike ülekoormuste eest.

Valikus olid erinevaid alalisvoolu harjavabad ja harjadega mootorid, reduktoritega ning ilma reduktoriteta. Harjadega mootorite peamisteks miinusteks oli elektrimootori kohta suhteliselt madal efektiivsus (75-80%) ja võrreldes harjavabade mootoritega kordades suuremad füüsilised mõõtmed (1-2 kW elektrimootorite puhul). Valituks osutus Turningy Aerodrive SK3 seeriast elektrimootor 6354-215, mis on algselt hobilennukitel kasutamiseks mõeldud harjavaba välispöörleja tüüpi alalisvoolu mootor. Mootor valiti mõõtmetega, mis sobiksid mootori korpusesse. Samuti oli oluline, et parameeter Kv oleks oma suurust arvestades kõige madalam. Kv väljendab, mitu pööret teeb mootor vastava pinge väärtuse juures. Soovitud maksimaalne mootori pöörete arv jäi analoogseks mopeedi algse bensiinimootori 6000 pöörde juurde. Sellise valiku puhul ei pea ülekandeid ümber tegema ning kasutada saab võimalikult palju originaalosi, mis teeb katsetamise ja sellejärgse ehitamise lihtsamaks.

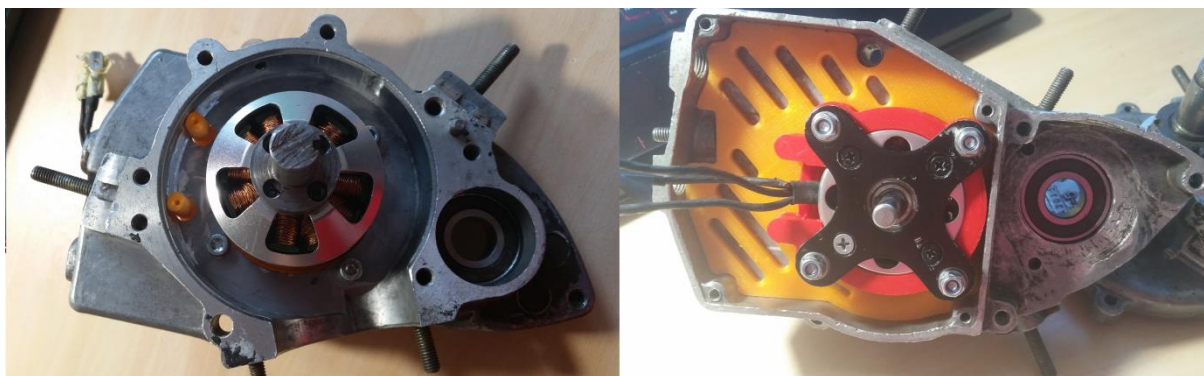
Harjavaba välispöörleja tüüpi mootori töötamisel puuduvad kokkupuutuvad osad. Pöörlevaks osaks on välimine kest, kuhu on kinnitatud 13 neodüümmagnetit. Välispöörleja tüüpi mootorid töötavad palju madalamatel pööretel kui sisepöörlejad, mistõttu toodavad välispöörlejad ka rohkem pöördemomenti, mis tuleb kasuks suure koormuse vedamisel. Lisaks on nad oma võimsuse ja massi suhte kohta ühed võimsamad mootorid turul.

Mootor ja kontrolleri koostöös töötavad kui kolme faasiline vahelduvvoolu induktsioonmootor, kus kontrolleri teeb elektriliselt kommuteerimise osa. Kontrolleri sünkroniseerib mootori tööd kasutades BEMF või Halli andurite tagasisidet. Käesolevas töös katsetati lihtsamat BEMF tagasisidega kontrolleri, kuid antud lahenduse jaoks leiti, et mootori juhtimine peab olema teostatud Halli andurite tagasisidega. Alapeatükis 3.3 on täpsemalt seletatud, miks valiti antud töös Halli andurite tagasiside BEMF tagasiside asemel.

Elektrimootori võlli diameeter on 8 mm. Selletaoliseid mootorid on mõeldud kasutamiseks lennusõidukite propelleritega või tiivikutega, mistõttu ei ole nad otseselt mõeldud vedama sellist koormust nagu elektrijalgratta puhul vaja. Hindasime Solidworks Simulation abil, kumb võll on selle koostu nõrgim lüli. Selleks rakendasime treitud mootorivõlli otsa, kuhu me kinnitame kaldhammasratta, 50 Nm koormuse, et välja selgitada selle sõlme nõrgim lüli. Lisas 6 olevalt pildilt on näha, et elektrimootori võll on selle koostu nõrgim lüli. Elektrimootori sisevõlli tugevusarvutusi oli keeruline teostada, sest polnud täpselt teada mootori väändemomenti, võlli materjali ja karastusastet.

Harjavabad välispöörleja tüüpi mootorid on mõeldud kasutamaks hobilennukitel ja hobi helikopteritel. Sellisel juhul on mootor eksponeeritud välisõhule ning on tagatud piisav jahutus ülekuumenemise vältimiseks. Antud projektis kasutatud mootori korpuses paigaldati elektrimootor vääntvõlli asemele karteri sisse, kus aga puudub vajalik jahutus. Tõde mootori jahutusvajaduse kohta selgitatakse välja alles pikemate katsetuste käigus. Kui antud mootor üle kuumeneb, siis on võimalikuks variandiks paigalda mootori rootorile plastikust ventilatsioonilabad, mis tagaksid õhu liikumise suurenemisest tekkiva jahutusvajaduse. Kui sellest ei piisa, siis on võimalus teha mootorkorpusesse avasid juurde. Mootoril ei ole ülekuumenemise vastu kaitsemehhanismi. Samas on kaitsemehhanism ülekuumenemise vastu olemas kontrollerial, mille BRK2 (Lisa 4) sisendi külge on võimalik ühendada PTC temperatuuriandur (vastavalt juhendile KTY84-130 või KTY83-122). Kontrolleri tarkvara abil saab määrata, millise temperatuuri juures mootori toiteahel katkestatakse, mis omakorda kaitseb mootorit ülekuumenemise eest.

Turningy SK3 seeria mootorite diameeter ja kinnitusalus on kõigil sama seeria mudelitel ühesugune. Soovi korral on võimalus paigaldada sama seeria võimsam mootor [13]. Võimsamad mootorid on aga pikemad, mistõttu tuleks paigaldamiseks teha paksem karterseina tugevdusplaat ja pikendada Halli andurite trükkplaadi kinnitusi (Sele 3.1).



Sele 3.1 Elektrimootori kinnitus karterseina külge

3.3. Elektrimootori juhtimine

Elektrimootori juhtimiseks oli vaja kontrollereid. Valikus olid kahte sorti kontrollereid: BEMF tagasisidega kontrollereid ja Halli andurite tagasisidega kontrollereid.

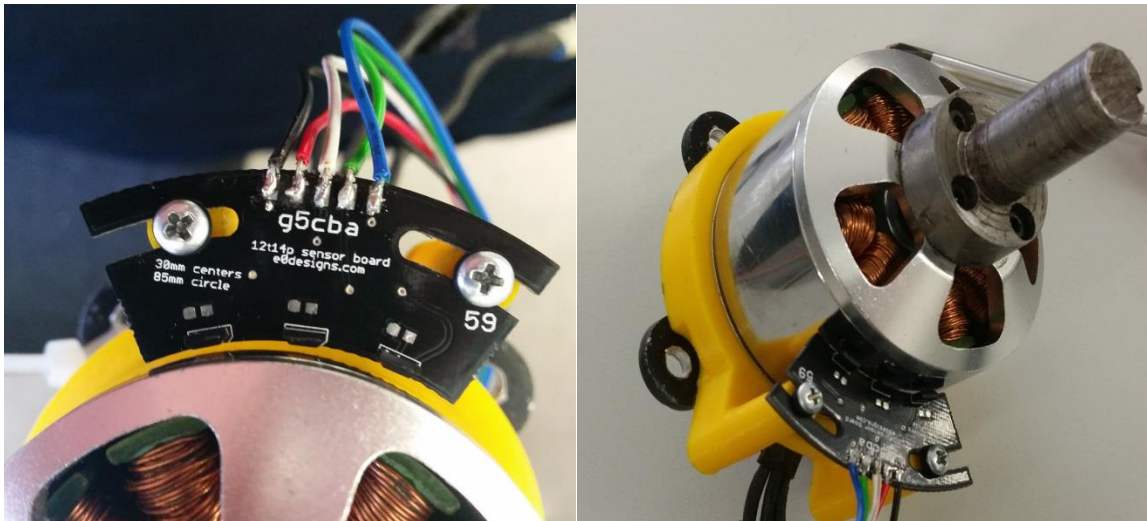
Esimesena katsetati lihtsamat ja odavamalt BEMF tagasisidega hobilennukitele mõeldud ESC-d. Sellistel ESC kontrollritel käib mootori pöörete arvutamine läbi BEMFi ning madalatel pööretel ei suuda kontrollereid tagada vajalikku pöördemomenti. BEMFi puhul ergutatakse juhuslikult mähiseid, et mootor pöörlema hakkaks. Elektrimootor hüpleb edasi ja tagasi madalatel kiirustel ning suurtel koormustel, näiteks kohapealt startides. Sageli ei ole hetkeline ergutus piisavalt võimas ning tulemuseks on värelemine ja suur voolutarbimine, mis võib rikkuda nii mootori kui ka kontrolleri. PWM juhtisignaali andmiseks kontrolleri jaoks kasutati servo testerit.

Algselt arvati, et kohapealt minekuks vajaliku pöördemomendi annab mopedimootori küljes olev sidur. Katsetuste käigus selgus, et siduri lahutamisel mootori pöörded langesid ning sõiduk ei jõudnud kohapealt startida. Mootor töötas madalatel pööretel korrapäraselt, millest tehti järeldus, et antud kontrollereid ei sobi elektrimootori juhtimiseks. Seetõttu loobuti BEMF tagasisidega kontrolleri.

Teisena katsetati keerulisemat lahendust, kus mootori juhtimine toimus läbi Halli andurite tagasiside. Nii mõõdetakse ja juhitakse mootori asukohta igal ajahetkel.

Algne ESC kontrolleri ei ühildunud Halli anduritega, mistõttu tuli leida kontrolleri, millel oleks ühilduvus olemas. Selles valdkonnas on kõige levinumad Kelly kontrolleriid, mille seast valiti Kelly KBS48121X kontrolleri. Kelly KBS48121X kontrolleri nimivõimsus on 55A ning aku toitepinge 24-48 V. Tootja väitel on kontrolleri kasuteguriks enamus juhtudel 99%. Kontrolleri parameetrid on seadistatavad kasutades Kelly kontrolleri tarkvara [10] ja RS232 andmeside liidest.

Andurite alus konstrueeriti selliselt, et oleks tagatud elektrimootori suhtes reguleerimine vähemalt 60 kraadi ulatuses. See oli oluline süsteemi peenhäälestuseks – kui Halli andur on püsिमagnetiga täpselt kohakuti, on signaalitugevus kõige suurem. Tekkinud signaali alusel ergutas mootor vastavat mähist. Halli andurite trükkplaadi reguleerimine elektrimootori suhtes andis meile võimaluse süsteem häälestada. Andurite trükkplaadi reguleerimiseks tuli kinnituskruve lahti keerata (Sele 3.2). Mootor häälestati mootori maksimaalsetel pööretel, et leida Halli andurite trükkplaadi asend elektrimootori suhtes, millal mootor tarbib kõige vähem energiat. Maksimaalsetel pööretel tarbib mootor kõige rohkem energiat ja sellest tulenevalt ka avaldub reguleerimise mõju kõige selgemini.



Sele 3.2 Halli (efekti) andurite trükkplaat adapteri küljes

3.4. Halli andurid

Halli andurid ja nende õige valik [14] on elektrimootori puhul tähtis. Õige valik ja täpne paigaldus tagavad elektrimootori efektiivsuse ja stabiilsuse. Halli andurite väljundpinge

muutub, kui nad satuvad magnetvälja. Seda omadust saime kasutada mootori juhtimiseks. Mootori püsिमagnetite lähedale paigaldatud Halli andurid andsid meile infot mootori täpse asukoha kohta, mille tulemusel oli võimalik mootorit juhtida. Antud töös kasutati bipolaarset lülitit ATS177-B-A, mis annab oma väljundisse, kas 0 või +5 V alalisvoolu signaali sõltuvalt magnetvälja polaarsusest. Andurid ATS177-B-A valiti madala hüstereesi ja kiire reageerimisvõime tõttu. Turningy SK3 elektrimootorile kohandatud Halli andurite trükkplaat osteti Equal Zero Designs [11] lehelt.

3.5. Kontrolleri seadistamine

Kelly kontrolleri seadistamiseks tuli ühendada kontrolleri sisenditesse järgmised seadmed: kolm Halli andurit, gaasirull, aku ning elektrimootor. Seejärel lülitati kontrolleri sisse. Kontrolleri tegi enda ja seadmete kaitseks ühenduste kontrolli. Kontrolleriis jäi põlema roheline LED tuli, kui kõik seadmed olid korrektselt ühendatud. Kui mõni seade ei olnud korrektselt ühendatud, andis kontrolleri veateate vilgutades punast LED tuld. Olenevalt punase LED tule vilkumise arvust oli võimalik kasutusjuhendi abil kindlaks teha veateate põhjus.

Töötava kontrolleri ühendamisel arvutiga on võimalik käivitada Kelly poolt väljastatud parametriseerimistarkvara. Tarkvara on alla laetav Kelly kodulehelt [10]. Prototüübi puhul määrati kontrolleriis võimalikult ohutud valikud, et mitte rikkuda kontrolleri ega mootori juhusliku rikke korral.

3.6. Mikrokontroller Arduino Uno

Mikrokontrollerina kasutati arendusplaati Arduino Uno, mis baseerub ATmega328P AVR mikrokiibil. Arduino Unol on 14 digitaalset sisend- ja/või väljundviiku, millest kuute on võimalik kasutada PWM väljundina. Sellele lisaks on mikrokiibil kuus analoogsisendit, 16MHz taktsagedusel töötav kvartsikristall, USB väljund ja toiteallika pistik. See on piisav, et lahendada käesolevas töös püstitatud ülesanded.

Mikrokontrollerit saab antud projektis kasutada mitmeti. Põhilisteks funktsioonideks on kontrolleriile antava kiirussignaali vastu võtmine, saatmine, muutmine ning LCD-le info kuvamine. Mikrokontroller Arduino vajab oma töötamiseks toitepinget 7-12 V ning voolutarbimine töörežiimis on 25 mA. Kelly kontrolleriil on olemas +12 V väljund, mis sobib mikrokontrolleri toiteks. Voolutarbimise saame valemist

$$P = I * U, \tag{3.1}$$

kus P = võimsus (W);

I = vool (A);

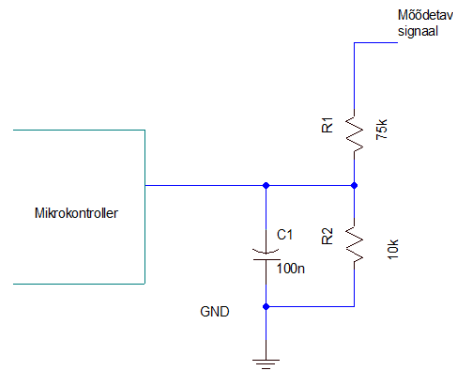
U = pinge (V);

$$0,025 * 12 = 0,3 \text{ W}.$$

Ühes tunnis tarbiks Arduino 0,3 Wh energiat.

Aku pinget mõõtmiseks kasutati Arduino analoogsisendit, mis mõõdab pinget vahemikus 0-5 V. Mõõtmaks aku pinget vahemikus 33-42 V LiPo akude puhul, oli vaja pinget alandada. Selleks kasutati pingejagurit (Sele 3.3). Takistite väärtused leiame proovimise teel valemist 3.2.

$$V_{out} = \frac{R_2}{R_1+R_2} * V_{in}, \quad (3.2)$$



Sele 3.3 Pingejagur analoogsignaale

Takistite $R_1=10 \text{ k}\Omega$ ja $R_2=75 \text{ k}\Omega$ valimisel saame väljundpingeks LiPo akude SOC 100% ehk 42 V sisendpinge puhul 4,941 V. Akude SOC 0% ehk 36 V puhul on väljundpinge 4,235 V. Arduino ADC on 10-bitine ehk 1024-1 sammu, mis annab 1023 sammu juures piisava täpsuse aku pinget mõõtmiseks. Pingejaguri signaali müra vähendamiseks kasutatakse 100nF keraamilist kondensaatorit, mis töötab sagedusfiltrina.

Elektrimootori kiirust juhitakse 1-4 V pingega gaasirulli abil. Erinevate sõidurežiimide koostamiseks juhitakse gaasirulli signaal Arduino analoogsisendisse. Signaali taasesitamiseks kasutatakse Arduino PWM digitaalväljundit, kus vastavalt sõidurežiimile on võimalik PWMi väljundpinget suurendada või vähendada. Lisal 8 on esitatud Arduino programmi kood, kus on gaasirulli signaal taasesitatud digitaalselt läbi PWMi ning kus on vajalikud käsud Arduino ja Nextioni omavahelise andmesidevahetuse töötamiseks.

3.7. Puutetundlik 3.2“ TFT HMI ekraan Nextion

Antud töös kasutati ekraani Nextion 3.2“ TFT Human Machine Interface, mille pealt oli võimalik kuvada ja lugeda erinevat infot, lülitada tulesid ning valida sõidurežiime. Ekraan Nextion valiti oma multifunktsionaalsuse tõttu. Ekraan on puutetundlik, värviline, vabalt kujundatava graafikaga, piisavalt kiire ja omab ühilduvust Arduinoga.

Ekraani Resolutsioon on 240x400 pixlit ning sellel on 65536 värvi, LED taustavalgustusega, ARM 748 Mhz protsessor, 3584 baiti RAMi, 16 MB *Flash* mälu. Ekraan on piisavalt võimekas, et rahuldada käesolevas töös esitatud nõuded. Arduino ja Nextioni omavahelise andmeedastuse töötamiseks ühendati Tx ning Rx viigud risti. Veel on vaja ühendada +5 V toide ning maandus ekraani töötamiseks (Lisa 7).

Ekraani peamiseks puuduseks on tema võimalik mittefunktsioneerimine vihmase või külma ilma korral. Puuetundlikud ekraanid töötamisel võivad vihm ning külm ilm segada ekraani tööd. Puuetundliku ekraani kasutamine ei ole kohustuslik, kuid antud töö puhul oli eesmärk kasutada kõige modernsemaid ja kompaktsmaid lahendusi, mistõttu valitigi puuetundlik ekraan.

Nextion 3.2" LCD ekraani keskmine voolutarbimine 100% taustavalgustatuse juures on 85 mA +5 V pinge juures (Lisa 5). Valemi 3.1 abil leiame energiatarbimise.

$$0,085 * 5 = 0,425 W.$$

Ühes tunnis tarbiks Nextioni displei 0,425 Wh energiat.

Elektrilise sõiduki puhul peaks ekraan kuvama kiirust, energia hetketarbimist, läbisõitu, mootori temperatuuri, aku SOCi, mootori pöördeid, häireid, lülitama tulesid ja veel teisi funktsioone.

Nextioni displei kujundamine käib läbi tema tootjapoolse programmi (Nextion Editor). Nextion editoris tuleb määrata igale muutujale nimetus, mida Arduino koodis kasutada. Ekraani programmeerimiseks oli vaja ekraanile sisestada mälukaardi peal Nextion Editoris koostatud fail. Kui mälukaart oli sisestatud, siis teostas ekraan toiteallikaga ühendamisel tarkvarauuenduse. Pärast edukat uuendust eemaldati mälukaart ning ekraan oli töökorras.

3.8. Akude valik

Käesolevas töös valiti akud elektrimootori maksimaalse tööpinge järgi, mis oli 37 V. Elektrijalgratta sõiduomadusi mõjutab kõige rohkem akude kaal, mistõttu on õige aku valimine väga oluline. Saadaval on kolme tüüpi akusid: liitium-polümeer-ioon akud (LiPo),

süvatsükli pliiakud ja liitium-raudfosfaat akud (LiFePO_4). Järgnevalt on kirjeldatud kõigi kolme aku tehnoloogiat ning seejärel põhjendatud käesolevas töös tehtud valikut.

LiPo tehnoloogia põhjal valmistatud akud on oma suure energiatiheduse, hinna, suuruse ja töökindluse tõttu elektroonikas populaarne valik. Kõik liitium-ioon akud on väga tundlikud ülelaadimise, liigkiire tühjenemise, ülekuumenemise, lühistumise, torgete ja kokkusurumise suhtes, mille tulemusena võivad akud rikneda [15]. LiPo akude elemendi nimipinge on 3,7 V, SOC 100% puhul 4,2 V.

Süvatsükli pliiakud on võrreldes LiPo akudega odavamad, madalama energiatihedusega, kaalult raskemad ning mõõtmel suuremad. Elektri jalgratta puhul on kaal väga tähtis ning seetõttu käesolevas töös pliiakusid ei kasutatud.

Liitium-raudfosfaat (LFP) baasil tehtud akudel on võrreldes teiste liitium-ioon akudega parem temperatuuritaluvus ja keemilised omadused, mistõttu on nad ohutumad. Liitium-raudfosfaadi elemendid ei sütti ülelaetuse või kiire tühjenemise korral põlema. LFP akud on ülelaadimise ja lühise puhul stabiilsemad ning taluvad kõrgemaid temperatuure. Fosfaattehnoloogial tehtud akudel on LiPo akudega võrreldes neli korda rohkem laadimistsükleid [16], mis teeb neist sarnase hinna juures parema valiku käesoleva töö jaoks.

Akude õige paigaldus sõidukile oli väga tähtis, sest jalgratas on sõites pidevalt keskkonnas, kus esineb vibratsiooni, löökkoormusi ning eksponeeritust väliskeskkonnale. Käesoleva töö puhul paigaldatakse akud algse bensiinipaagi sisse, kus nad on osaliselt kaitstud väliskeskkonna tegurite eest.

Praktikast on teada, et keskmiselt kulutab elektri jalgratas 20 Wh energiat 1 km läbimiseks. Otstarbekas on akupakk koostada selliselt, et jalgratas suudaks 20 km läbida ainult elektri jõul. Sellisel juhul oleks vaja 400 Wh energiamahuga akupakki. Tabelis 2.0 on esitatud akude kaalu ja hinna võrdlustabel.

Arvestades asjaolu, et akude soetamine on ühekordne tegevus, oli kõiki parameetreid arvesse võttes kõige kasulikum soetada liitium-raudfosfaat akud. Tabelist 2.0 on näha, et pliiakude kasutamisel tuleb arvestada kaks korda suurema massiga võrreldes liitium tehnoloogia baasil

valmistatud akudega, mistõttu neid ei valitud. 37 V nimipingega LiFePO_4 (raud-fosfaat) akupaki koostamiseks läheb vaja kümnet elementi.

Tabel 2.0. Akude võrdlus

Aku tüüp	Pinge (V)	Mahtuvus (A*h)	Energia (W*h)	Hind (€)	Kaal (kg)	Laadimistsüklite arv	Allikas
Süvatsükli pliiaku	12	12	156	39	4,2	300	Akukeskus [17]
Süvatsükli pliiaku	12	26	312	66	7,7	300	Akukeskus
Liitiumioonaku	36	10	360	315	5	600	Akukeskus
Liitiumraudaku	48	10	480	476	7	2000	Kadakas [18]

4. RISKIANALÜÜS JA MAKSUMUSE HINNANG

Iga uue toote valmistamise puhul tuleb arvestada sellega, et toode ei pruugi esimesel korral õnnestuda. Esineda võib defekte, praaki ja valesti projekteerimisest tingitud vigu.

Käesolevas töös kasutatud mopeedi Riga 13 raami puhul on oht, et raam ei ole sobilik, sest bensiinimootori algne võimsus oli 1,1 hj ja pärast mootori korpuse ümberehitamist 2,8 hj. Mopeedi Riga 13 raam ei ole algselt mõeldud sellise võimsuse jaoks ning seetõttu võivad komponendid kiiremini kuluda või lausa puruneda. Samuti ei ole pidurid mõeldud suurema võimsusega kaasnevale kiirusele vastu pidama. Alati jääb oht, et mootori korpus ei pea suurenenud võimsusest tingitud koormusele vastu.

Antud töö nõrkadeks kohtadeks on algne sidur, mis tuleb kindlasti tugevamaks ehitada; mootorivõll, mida oli keeruline valmistada; elektrimootori võimalik jahutuse puudumine; LFP akude riknemise oht; freesitud karterseina võimalikud deformatsioonid. Lisaks on kasutatud elektroonika ja elektriühendused ilmastikutundlikud ning vajavad suuremat isoleeritust.

Käesoleva töö maksumuse (Tabel 3.0) puhul arvestame ainult mootori korpuse ümberehitusega seotud kulutusi. Antud sõiduki komponentide hind jääb suurusjärku 370€. Kui võrrelda käesoleva töö komponentide maksumust turul saada olevatega, siis esimese asjana jääb silma elektrimootori suhteliselt odav hind. Rummumootorite hind on suurusjärgus 300€. Keskjooksumootorite hind jääb suurusjärku 500€. Rummu- ja keskjooksu elektrimootoritel on kontrollid integreeritud mootori sisse.

Kuna akude energiatihedus suureneb ja hind väheneb iga aastaga, siis akude hinda töö maksumuses ei arvestatud [19]. Samuti muutub kasutatud mootori korpuse leidmine järjest keerulisemaks, lisaks varieerub maksumus ja kättesaadavus. Seetõttu ei arvestatud seda antud töö hinna juurde. Samas toodetakse Hiinas Riga D-6 bensiinimootori analooge [20]. Kõiki asjaolusid arvesse võttes võib väita, et käesoleval tööl on potentsiaali konkureerida turul olemasolevate toodetega.

Tabel 3.0. Projekti komponentide hind

Detail	Hind €
Elektrimootor	80
Kontroller	150
Halliandurid	15
Gaasirull	20
Isevalmistatud detailide materjalikulu	40
Poldid, juhtmed, ühendusklemmid	10
Mittetöökorras mootori korpus (ei arvesta)	20-200
Akud (ei arvesta)	Min 388
Arduino Uno	20
Nextion 3,2" ekraan	30
Kokku	365

KOKKUVÕTE

Käesoleva töö käigus arendati vanal hübriidrattal põhinevat elektrilist sõidukit. Töö eesmärk oli valmistada prototüüplahendus vanemate hübriidratste ümberehituseks, mille käigus säilib mootorsõiduki algne välimus ning bensiinimootor D-6 ehitatakse ümber elektriliseks. Sõiduki arendamise käigus kasutati kõige modernsemaid tehnilisi lahendusi, kuid säilitati *vintage* välimus. Töö käigus ehitati ümber mootorikorpuse D-6, valiti sobiv elektrimootor ja sellele vastav elektroonika ning seadistati terve süsteem.

Elektrijalgrattad on võrreldes tavaliste jalgratstega hõivamas üha suuremat osa turust, mistõttu on elektrijalgratste arendamine oluline. Elektrijalgratste turul on aina rohkem uusi tootjaid, kes püüavad leida võimalikult efektiivseid lahendusi. Hetkel on turul saadavate elektrijalgratste elektrimootorid, kas rummu või keskjooksu mootoriga. Eestis valmistatakse elektrijalgrattaid peamiselt käsitööna. Üha enam tootjaid valmistab *vintage* välimusega elektrijalgrattaid, mille puhul on samuti kasutatud rummu või keskjooksu mootorit. Käesolevas töös arendati ka *vintage* välimusega elektrijalgrattast.

Antud töö jaotus nelja suuremasse osasse. Töö mehaanika osas valiti sobiv raam, milleks oli Riga 13 mopeedi raam. Seejärel ehitati ümber mootorikorpuse D-6 ja valmistati vajalikud detailid, näiteks karterseina tugevdusplaat, Halli andurite adapter ning mootorivõll. Elektroonika osas valiti esiteks elektrimootor Turnigy Aerodrive SK3 6354-215. Teiseks katsetati erinevaid mootori juhtimisvõimalusi, mille tulemusel valiti Kelly kontrolleri KBS48121X, mis on Halli andurite tagasisidega. Töö viimases osas häälestati terve süsteem ning integreeriti mootori juhtimiseks Arduino Uno mikrokontrolleri arendusplaat. Seejärel valiti puutetundlik ekraan, mis kuvab elektrisõiduki tähtsamaid parameetreid. Viimases etapis hinnati käesoleva töö tugevaid ja nõrku külgi ning anti hinnang maksumusele

Töö tulemusena valmis prototüüplahendus ja võimalik elektrijalgratta prototüüp vanade hübriidratste ümberehitamiseks elektriliseks. Prototüüplahendus on Riga 13 mopeedi raamile baseeruv ümberehitatud D-6 mootorikorpusega elektriline sõiduk, mille puhul kasutati kõige modernsemaid komponente.

Selle bakalaureusetöö käigus rakendati õpitud oskusi. Töö käigus disainiti, projekteeriti ja valmistati mehaanilisi detaile, mida oli vaja elektrisõiduki ehitamiseks. Töö käigus õpiti tundma elektrimootorite eripärasid, seadistama elektrimootori kontrolleri ja Nextion puuetundlikku ekraani, programmeerima Arduino Uno arendusplaati ning integreeriti erinevaid komponente. Samuti arendati treipingi ja 3D printeri kasutamiseks vajalikke oskusi.

Käesolevat tööd tuleks kindlasti edasi arendada, sest läbiviidud turuanalüüsi põhjal selgus, et selliste lahenduste vastu on inimestel huvi. Selle töö käigus ei valminud elektrisõiduki terviklahendus, sest töö autoril jäi puudu oskustest sobiva mootorivõlli valmistamiseks. Vaja oleks valmistada sobiv mootorivõll, mille järel saaks katsetada terviklahenduse töötamist. Lisaks oleks vaja leida sobivam mootorikorpust, mis nõuaks vähem ümberehitusi elektrimootoriga töötamiseks. Ühtlasi oleks vaja Halli andurite adapteri ja karterseina tugevdusplaati valmistada alumiiniumist, et soojust elektrimootori staatorilt efektiivsemalt ära juhtida.

SUMMARY

The aim of this project was to develop an electric vehicle based on an older hybrid bike. The intention of this work was to develop a prototype solution for converting older hybrid vehicles to electric with gasoline engine D-6 and to remain authentic in appearance. During the development of the vehicle, most modern technologies were applied but the vintage look of the vehicle still remained. As a result, engine case D-6 was rebuilt with a suitable electric motor, corresponding electronics were chosen with the motor and the entire system was configured accordingly to our needs.

Electric bikes have occupied an increasing share of the bike market, that is why it is important to develop electric bicycles today. In the electric bike market there are more and more new companies who are working towards finding the most efficient solutions. Most of the electric bikes on the market nowadays are using a hub or a bottom bracket motor. More and more manufacturers produce vintage-looking electric bicycles, which are also using the hub or bottom bracket motor. A vintage-looking electric bicycle was also developed in this work.

The work was divided into four major sections. A corresponding frame for the vehicle was chosen, it was Riga 13 moped frame. After that engine D-6 was rebuilt and necessary items were made like the reinforcement plate for the crankcase sidewall, the Hall sensor adapter and the motor shaft. Firstly in the electronic's section an Turnigy Aerodrive SK3 6354-215 electric motor was chosen. Secondly, the engine was tested with several algorithms, which led to the selection of the controller Kelly KBS48121X that has the Hall sensor feedback. In the third part of the work the whole system is set up and an Arduino Uno microcontroller development board is integrated into the engine control. Then a touch screen display was selected, which displays the most important parameters of the electric vehicle. In the fourth and final chapter strengths and weaknesses of this work were evaluated and an assessment of the costs was made.

The result of this work is a prototype vehicle and a possible solution was developed for converting old hybrid bikes to electric. The prototype solution is based on Riga 13 moped frame which D-6 engine was converted to electric. The vehicle uses the most advanced components and efficient control methods available.

During this bachelor's thesis the author used his knowledge to design and manufacture mechanical parts which were needed for the construction of the electric vehicle. In the work specific features of electric motors, the configuration of the controller, Nextion touch screen and the programming of an Arduino Uno development board was learnt. The knowledge of combining and integration of various components into the system was implied. The author improved his skills to work with 3D printer and to operate a lathe.

This work should certainly be developed further as was shown by the carried out market analysis which showed people have interest towards a solution like this. During this work a complete working prototype was not made because the author lacked the skills needed to manufacture the motor shaft. A motor shaft is needed to carry out the full development of the electric vehicle. In addition, it would be necessary to find a more suitable motor housing, which would require less work for integrating the electric motor. The reinforcement plate of the crankcase sidewall and the Hall sensor adapter should be made of aluminium to more efficiently dissipate the heat from the electric motor stator.

KASUTATUD KIRJANDUS

1. (2014) European Bicycle Market – *Confederation of the European Bicycle Industry*, 6. 23-24. [WWW]
https://issuu.com/conebi/docs/european_bicycle_industry___market__8e7511a5a2e3fe/11?e=18546908/14617465 15.05.2016
2. McMahon, D. (2014). Here's Why E-Bike Sales Are Booming In Europe.- *Business Insider*. [WWW] <http://www.businessinsider.com/ebike-sales-booming-in-europe-2014-8>
15.05.2016
3. Ampler bike elektri jalgrataste tootevalik [WWW] <http://www.amplerbikes.com/bikes>
15.05.2016
4. Ringomer OÜ elektri jalgrataste tootevalik [WWW]
<http://ebike.ee/tootekataloog/elektrijalgrattad> 15.05.2016
5. Liberator elektri jalgrataste koduleht [WWW]
<http://liberatorbike.blogspot.com/2014/08/who-or-what-is-sartsuratas.html> 15.05.2016
6. Italjeti *vintage* elektri jalgrattad [WWW] <http://www.italjet.com/#!e-bike/m8fur> 15.05.2016
7. Kosynier klassikalise välimusega elektri jalgrataste veebileht [WWW] www.kosynier.eu
15.05.2016
8. Arduino tootja tarkvara allalaadimise veebileht <https://www.arduino.cc/en/Main/Software>
15.05.2016
9. Nextion ekraani tootja tarkvara allalaadimise veebileht
<https://nextion.itead.cc/download.html> 15.05.2016
10. Kelly kontrolleri andmelehed ja tarkvara allalaadimise veebileht [WWW]
<http://kellycontroller.com/support.php> 18.05.2016
11. Equal Zero Designs koduleht [WWW] <http://e0designs.com> 15.05.2016
12. Laagri 7203 BEP andmeleht [WWW] <http://www.skf.com/group/products/bearings-units-housings/ball-bearings/angular-contact-ball-bearings/single-row-angular-contact-ball-bearings/single-row/index.html?designation=7203%20BEP> 15.05.2015
13. SK3 seeria mootorite valik [WWW]
[http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/__672__663__Electric_Motors-\[1263mm.html](http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/__672__663__Electric_Motors-[1263mm.html)
15.05.2016

14. Halli andurite valimine [WWW]

<http://www.mouser.com/pdfdocs/Selecting-Hall-Effect-for-DC-Brushless-Motors.pdf>

15.05.2016

15. Liitium tehnoloogia akude erinevused [WWW] <http://www.mpoweruk.com/lithiumS.htm>

15.05.2016

16. Liitium-raudfosfaat akude omadused [WWW]

<http://www.batteryspace.com/lifepo4cellspacks.aspx> 15.05.2016

17. Akukeskus pliiakude veebipood [WWW] <http://www.akukeskus.ee/suletud-vrla-akud>

20.05.2016

18. Liitium-raudfosfaat aku hind [WWW] <http://www.kadakas.ee/elektrijalgratas.html>

15.05.2016

19. (2010) The End of the Oil age – Deutsche Bank Securities Incorporated,19-20. [WWW]

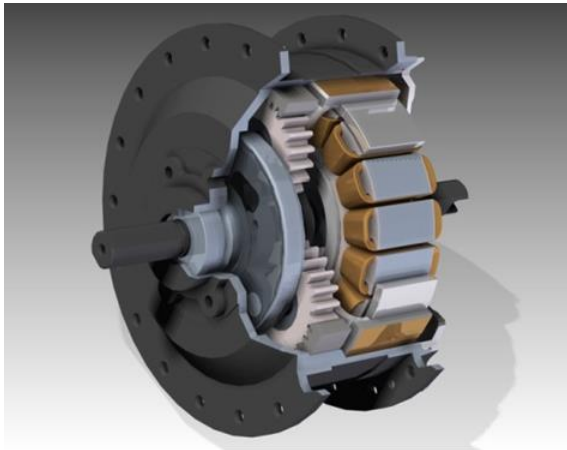
<http://bioage.typepad.com/files/1223fm-05.pdf> 15.05.2016

20. D-6 mootori Hiina analoog [WWW] <http://www.bikeberry.com/66-80cc-mega-motors-silver-bicycle-engine-kit-2-stroke.html> 15.05.2016

LISAD

Lisa 1. Enamlevinud elektrijalgrataste elektrimootorid

Rummumootor



Keskjooksumootor



Lisa 2. Küsitlus

1. Mida arvate vanaaegsel mopeedil põhineva elektrimopeedi arendusest, kus säilitatakse sõiduvahendi algne välimus?
 - a) Ei näe asjal mõtet;
 - b) Idee on hea, kuid teostus võiks parem olla;
 - c) Idee on hea, kuid mopeedid peaksid jääma sisepõlemismootoriga;
 - d) Idee on väga hea, mulle väga meeldib
 - e) Muu:

2. Kas näeksite tulevikus elektrimopeedi võistlemas erinevatel võidusõitudel?
 - a) Pigem mitte.
 - b) Jah, kuid elektrimopeedid võiksid võistelda standardsete masinatega samas klassis samadel tehnilistel tingimustel.
 - c) Jah, kuid elektrimopeedidel võiksid vastavalt võimsusele olla oma klassid (näiteks 1 kW, 2kW, piiramata).
 - d) Jah, kuid paralleelselt sisepõlemismootorite võistlusele võiksid võistelda elektrisõidukid eraldi klassis, kuhu on lubatud ka teised elektrijõul liikuvad kahe rattalised sõiduvahendid.
 - e) Muu:

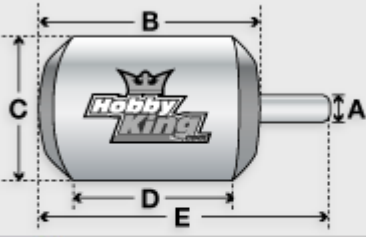
3. Kas teil oleks soov omada sellist ümberehitatud mootorikomplekti?
 - a) Ei soovi.
 - b) Jah, kui ümberehituse maksumus jääks alla 200 euro.
 - c) Jah, kui ümberehituse maksumus jääks alla 300 euro.
 - d) Jah, kui ümberehituse maksumus jääks alla 400 euro.
 - e) Muu:

Lisa 3. Turnigy Aerodrive SK3 6354-215 BLDC mootori andmeleht

Product Config Table

Kv (rpm/v)	215
Weight (g)	485
Max Current (A)	65
Resistance (mh)	0
Max Voltage (V)	37
Power(W)	2100
Shaft A (mm)	8
Length B (mm)	54
Diameter C (mm)	59
Can Length D (mm)	28
Total Length E (mm)	83

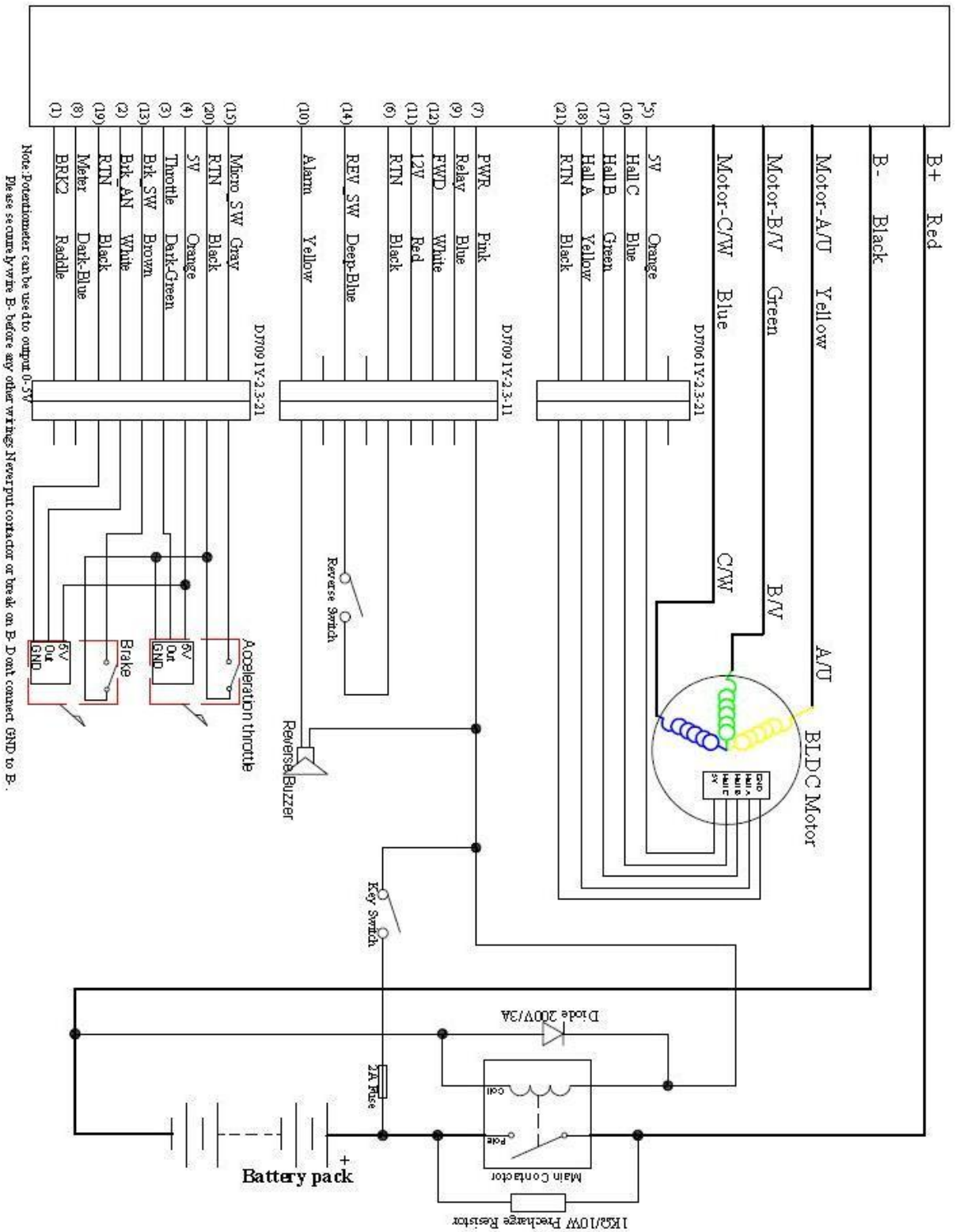
[Update/Add my own data](#)
[Customer Data](#)



COMPARE



Lisa 4. Kelly KBS-X kontrolleri standardne ühendusskeem



Lisa 5. Nextion Itead 3.2“ TFT ekraani andmeleht

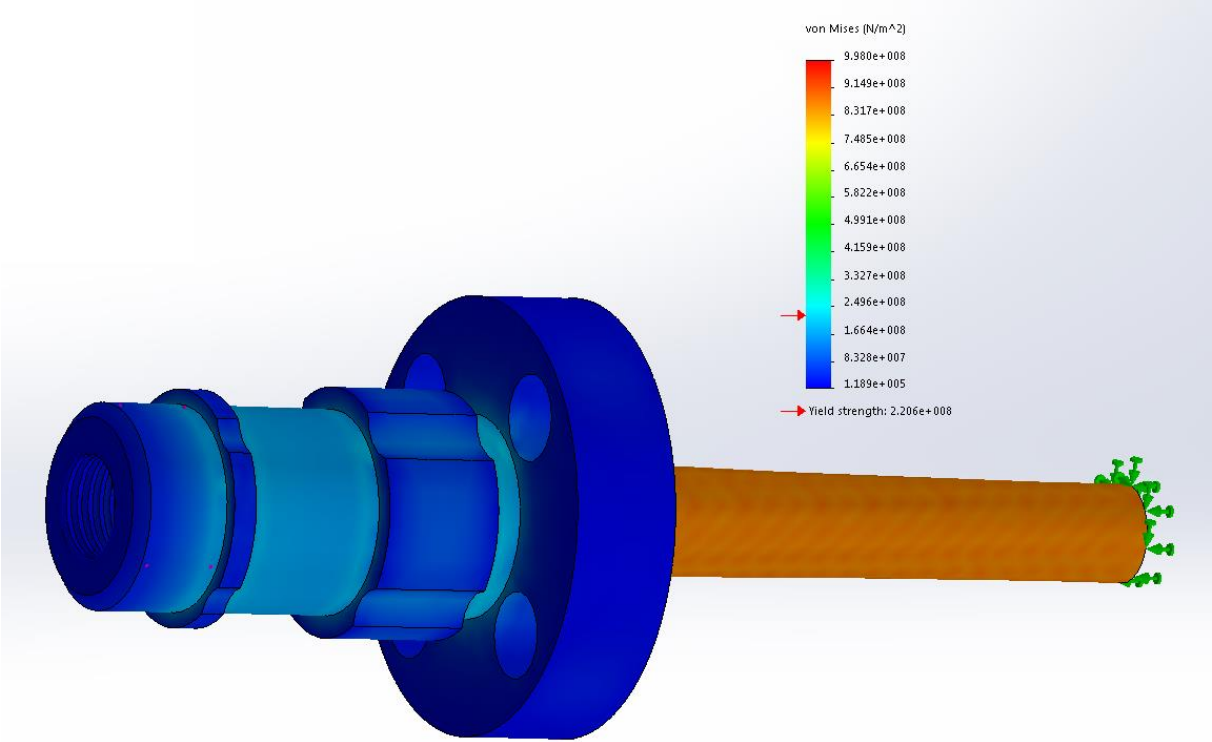
Electronic Characteristics

	Test Conditions	Min	Typical	Max	Unit
Operating Voltage		4.75	5	7	V
Operating Current	VCC=+5V, Brightness is 100%	-	85	-	mA
	SLEEP Mode	-	20	-	mA
Power supply recommend: 5V, 500mA, DC					

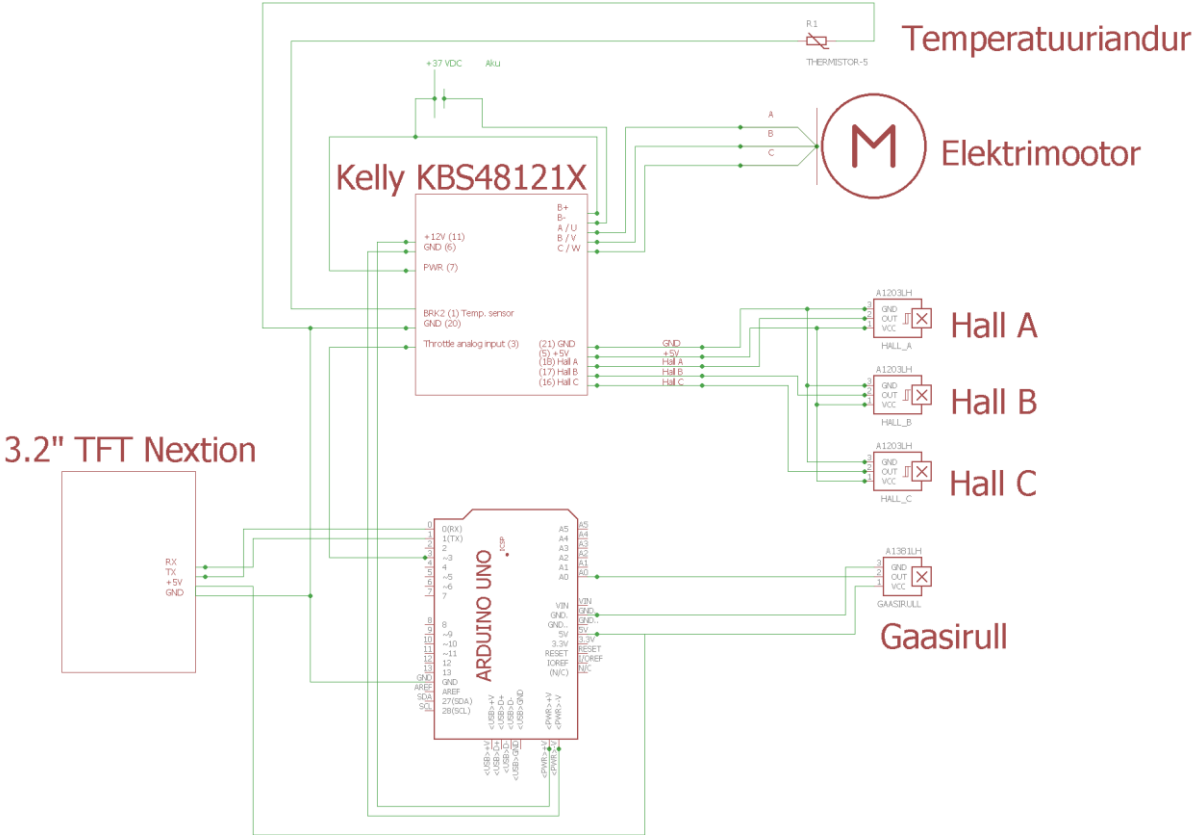
Working Environment & Reliability Parameter

	Test Conditions	Min	Typical	Max	Unit
Working Temperature	5V, Humidity 60%	-20	25	70	°C
Storage Temperature	-	-30	25	85	°C
Working Humidity	25°C	10%	60%	90%	RH

Lisa 6. Kõige nõrgema lüli leidmine Solidworks Simulationi abil.



Lisa 7. Elektrisõiduki elektriskeem



Lisa 8 Arduino programmeerimise kood

```
int value, value2, getValue, oldvalue;
// the setup routine runs once when you press reset:
void setup() {
  // initialize serial communication at 9600 bits per second:
  Serial.begin(9600);
  pinMode(3, OUTPUT);
  /* analogReference(DEFAULT); */
  /* analogReference(EXTERNAL); */
  analogReference(DEFAULT);
}
// the loop routine runs over and over again forever:
void loop() {
  int sensorValue = analogRead(A0); // read the input on analog pin 0:

  float voltage = sensorValue * (4.675 / 1023.0); // Convert the analog reading (which goes from 0 - 1023) to a voltage (0 - 5V):
  float x = sensorValue/4;
  digitalWrite(3, HIGH);
  analogWrite(3, x);
  getValue = analogRead(A0);
  if (getValue==oldvalue)
  {
  }
  else
  {
    oldvalue=getValue;
    value=getValue;
    if(value <= 284) value2 = map(value, 195, 284, 323 ,359);
    else value2 = map(value, 284, 860, 0,223);
    Serial.print("z0.val=");
    Serial.print(value2);
    Serial.write(0xff);
    Serial.write(0xff);
    Serial.write(0xff);
    Serial.print("t0.txt=");
    Serial.write(0x22);
    Serial.print(value);
    Serial.write(0x22);
    Serial.write(0xff);
    Serial.write(0xff);
    Serial.write(0xff);
  }
  delay(100);
}
```