



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
MEHAANIKATEADUSKOND

Mehhatroonikainstituut

Mehhatroonikasüsteemide õppetool

MHK40LT

Erik Tärk

**HARJADETA ALALISVOOLUMOOTORI
VOOLUPIIRAJAGA KONTROLLER
ELEKTRIJALGRATTALE**

Bakalaureusetöö

Autor taotleb
tehnikateaduste bakalaureuse
akadeemilist kraadi

Tallinn
2014

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 nooremteadur Ahti Põlder'i juhendamisel

“.....” mai 2014 a.

Töö autor Erik Tärk

..... allkiri

Töö vastab bakalaureusetööle esitatavatele nõuetele.

“.....” mai 2014 a.

Juhendaja Ahti Põlder

..... allkiri

Lubatud kaitsmisele.

..... õppekava kaitsmiskomisjoni esimees

“.....”2014 a.

..... allkiri

BAKALAUREUSETÖÖ ÜLESANNE

2013/14 aasta kevadsemester

Üliõpilane: Erik Tärk, 094288MAHB

Õppekava: MAHB02/09

Eriala: mehhatroonika

Juhendaja: nooremteadur Ahti Põlder

BAKALAUREUSETÖÖ TEEMA:

(eesti keeles) **Harjadeta alalisvoolumootori voolupiirajaga kontrolleri elektriälgrattale**

(inglise keeles) **Brushless DC motor current limiting controller for electric bikes**

Lõputöös lahendatavad ülesanded ja nende täitmise ajakava:

| Nr | Ülesande kirjeldus | Täitmise tähtaeg |
|----|--|-------------------------|
| 1. | Töö ülesande püstitus, nõuded projekteeritavale kontrolleri- ja mehaanikale. | 01.04.2013 – 08.04.2013 |
| 2. | Kontrolleri komponentide valik lähtuvalt nõuetest. Elektroonikaskeemi ning trükkplaadi esialgne projekteerimine. | 08.04.2013 – 06.05.2013 |
| 3. | Seadme korpuse ning jahutuse projekteerimine. | 13.05.2013 – 03.06.2013 |
| 4. | Kontrolleri projekti arendamine ning täiustamine. | 01.07.2013 – 10.12.2013 |
| 5. | Tehtud töö ning leitud vigade analüüs, parandused ning täpsustused. | 16.05.2014 |
| 6. | Töö lõplik vormistamine, trükkimine ja köitmine. | 21.05.2014 |

Lahendatavad insenertehnilised ja majanduslikud probleemid:

Käesolevas bakalaureusetöös tegeldakse MOSFET-tüüpi transistorite valikuga ning trükkplaadi projekteerimise iseärasustega suurte voolutugevuste korral. Samuti projekteeritakse voolujälgija ning tehakse arvutused transistoride jahutuse projekteerimiseks. Lisaks võrreldakse erinevaid PWM lülitus-algoritme ning nende sobivust antud süsteemi.

Töö keel: eesti keel

Kaitsmistaotlus esitada hiljemalt 12.05.2014 **Töö esitamise tähtaeg** 22.05.2014

Üliõpilane Erik Tärk _____ kuupäev ____ .05.2014

Juhendaja Ahti Põlder _____ kuupäev ____ .05.2014

SISUKORD

| | |
|--|----|
| BAKALAUREUSETÖÖ ÜLESANNE | 3 |
| EESSÕNA | 6 |
| SISSEJUHATUS | 7 |
| 1 MEHAANIKA | 8 |
| 1.1 Mootor | 8 |
| 1.2 Ülekanne | 10 |
| 1.3 Transistoride jahutus | 14 |
| 2 ELEKTROONIKA | 18 |
| 2.1 Nimipinge ning voolutugevuse valik | 18 |
| 2.2 Transistorid | 19 |
| 2.3 MOSFET draiverid | 22 |
| 2.4 Mikrokontroller | 23 |
| 2.5 Voolupiiraja | 26 |
| 2.6 Toite osad | 27 |
| 2.7 Trükkplaat | 28 |
| 3 JUHTPROGRAMM | 29 |
| 3.1 Programmi ülesehitus | 29 |
| 3.2 Transistoride juhtalgoritmid | 31 |
| 3.3 Kommutatsiooni programmiosa | 34 |
| 3.4 Juhtsignaalid | 35 |
| 3.5 Voolupiiraja programmiosa | 36 |
| 4 Ohutus | 38 |
| 5 VALMISTAMISPROTSESS | 39 |
| 5.1 Kasutatavad tehnoloogiad | 39 |
| 5.2 Esimene prototüüp | 40 |

| | |
|------------------------------------|----|
| KOKKUVÕTE..... | 42 |
| SUMMARY | 43 |
| KASUTATUD KIRJANDUS | 44 |
| LISAD | 46 |
| Lisa 1: Mootori lisadetailid | 46 |
| Lisa 2: Elektroonikaskeem | 50 |
| Lisa 3: Trükkplaadi joonised..... | 52 |
| Lisa 4: Pulsilaiuse arvutus..... | 53 |
| Lisa 5: Võimsuskao arvutus | 54 |
| Lisa 6: Juhtprogramm..... | 56 |

EESSÕNA

Bakalaureusetöö teema valiti isiklikust huvist elektrijalgrataste ning nende mootorite juhtimise vastu. Kontrolleri projekteerimise idee oli tekkinud juba enne selle valimist töö teemaks ning tehtud oli ka veidi uurimustööd. Projekti põhjal bakalaureusetöö kirjutamisega püüti ühendada meeldiv kasulikuga ning anda hoogu juurde projekti arengule ning selle dokumenteerimisele. Algne huvi elektrijalgrataste ajamite vastu tekkis Endless-Sphere internetifoorumit [1] sirvides.

Põhiline osa töös kasutatavatest andmetest on saadud Internetist. Kasuks tuli ka mitmetes õppeainetes, eriti elektriajamite üldkursusel ning mehhatroonika projekt-ainetes omandatu.

Bakalaureusetöö ülesehitusel ning vormistamisel oli abiks töö juhendaja nooremteadur Ahti Põlder.

SISSEJUHATUS

Käesoleva bakalaureusetöö eesmärgiks on projekteerida voolupiirajaga kontrolleri harjadeta alalisvoolumootorile, mis sobiks kasutamiseks elektrijalgratate ajamites. Töö sisaldab mootori ning ajamitüübi valikut, et anda alus projektile, mis oleks edasi arendatav terviklikuks lahenduseks jalgratta ümberehitamiseks elektriajamile.

Kuna üha enam võetakse kasutusele elektriajamitega sõidukeid, on töö teema aktuaalne. Elektrijalgratate mootorid jäävad üldjuhul võimsusvahemikku 250 – 500 W [2, 3]. Eestis võib jalgrattal olla elektrimootor, mille püsi-nimivõimsus ei ületa 250 W [4]. Suurema võimsusega, sportratate või mopeedide ajamitele mõeldud kontrollereid on aga saadaval suhteliselt vähe ning nende hind on kõrge. Selles töös projekteeritav kontrolleri on suunatud mootoritele, mille nimivõimsus on vähemalt 1000 W, samas hoides kontrolleri hinna võimalikult madala.

Elektrijalgratastel kasutatakse üldjuhul harjadeta alalisvoolumootoreid, kuna need on oma kaalu kohta suhteliselt võimsad, lihtsa ehitusega ja seega odavad ning praktiliselt hooldusvabad. Ehituse lihtsus on saavutatud sellega, et kommutatsiooniprotsess toimub väljaspool mootorit – elektroonilises kontrolleriis.

Võimsamate, üle 100 W mootorite puhul ilmneb probleeme madalatel pööretel koormuse all töötades. Kontrolleri ning mootori mähiseid läbiv voolutugevus võib kasvada sedavõrd, et ületab kontrolleri komponentide või mootori mähise lubatud maksimaalse voolutugevuse, mis võib kahjustada süsteemi ning põhjustada komponentide läbipõlemist. Seetõttu on oluline ajami voolutugevuse jälgimine ning vajadusel piiramine.

Töö on jagatud kolmeks üldisemaks osaks:

- Süsteemi mehaanika kirjeldus
- Elektroonika projekteerimine
- Kontrolleri juhtimine ning programm

Välja on toodud ka oluline info ohutuse kohta ning kokkuvõtte kontrolleri valmistamiseks kasutatavate tehnoloogiate kohta.

1 MEHAANIKA

1.1 Mootor

Sobiva mootori valikuks määrati esmalt nõuded valitavale mootorile, seejärel võrreldi kahte eri tüüpi mootorit ning valiti põhjendatult sobivam.

Valitavale mootorile esitatud nõuded:

- Harjadeta alalisvoolumootor
- Nimivõimsus vähemalt 1 kW
- Lubatav toitepinge 24 – 72 V
- Lubatav voolutugevus vähemalt 25 – 65 A, vastavalt võimsusele ja toitepingele
- Sobiv pöörlemissagedus valitud toitepinge juures, arvestades jõuülekannet
- Võimalikult madal hind
- Minimaalne kaal
- Võimalikult lihtne paigaldada

Võrreldavad mootorid valiti spetsiaalselt elektrijalgratastele toodetavate ning mudellennukitele toodetavate mootorite seast. Mootorid valiti veebikauplustest Ebike-solutions [5] ja Hobbyking [6]. Võrdluseks valiti Turnigy Aerodrive SK3-6374 [7] *outrunner*-tüüpi (välise rootoriga) mudellennuki mootor (Sele 1.1 vasakul) ning Crystalyte HS3540 rummumootor [8] (Sele 1.1 paremal). Mootorite olulisemad andmed on toodud tabelis 1.1

Tabel 1.1. Mootorite andmete võrdlus

| | Crystalyte HS3540 | Turnigy Aerodrive SK3-6374 |
|--|--------------------------|-----------------------------------|
| Võimsus (W) | 1500 | 2250 |
| Toitepinge (V) | 48 | 44 |
| Lubatud voolutugevus (A) | 31 | 70 |
| Pöörlemissagedus (min^{-1}) | 375 | 6556 |
| Kaal (g) | 7300 | 840 |
| Hind (€) | 350 | 68 |



Sele 1.1. Turnigy SK3-6374 (vasakul), Crystalyte HS3540 (paremal)

Võrdlusest selgub, et hinna-võimsuse suhte poolest on mudellennuki mootor elektrijalgratta rummumootorist selgelt üle, samuti on see kaalult üle 8 korra kergem. Kuigi rummumootorit oleks tervikliku ajamilahenduse projekteerimisel lihtsam rakendada, valiti odavama hinna ning väikese kaalu tõttu Turnigy mootor ning uuriti võimalusi selle kasutamiseks.

Turnigy Aerodrive SK3-6374 eelised:

- Väike kaal
- Suur võimsus
- Võimalus valida mootori paigutust
- Võimalik kasutada lühemaid toitejuhtmeid
- Madal hind

Puudused:

- Rummumootoriga võrdse kiiruse saavutamiseks on vajalik 17/1 ülekandearvuga ülekannet
- Väikse massi ja korpuse pindala tõttu on oht ülekuumenemiseks
- Vajab eraldi kinnitust jalgratta raamile
- Mootori korpus ei ole suletud – vajab kaitset pori ja suurema mustuse eest

1.2 Ülekanne

Elektrijalgrataste puhul, millel ei kasutata rummumootoreid, on levinuim ülekandeviis kettülekanne. Põhimõttelt on see sarnane mootorrataste kettülekandega, kuid harilikult on üle kantavad võimsused oluliselt väiksemad, seega saab kasutada väiksemaid ning kergemaid ketirattaid ja kette. [9]

Vähem levinud alternatiiv kettülekandele on hammasrihmülekanne, mida mootorratastel kasutatakse vähem kettülekandest väiksema tugevuse tõttu, kuid mis sobib hästi elektrijalgrattale. Hammasrihmülekande eeliseks on ka väiksem töömüra, mis samuti sobib elektrijalgratta kontseptsiooniga. [10]

Olemuselt kõige lihtsam ülekanne on hõõrdülekanne: mootor on ühendatud rullikuga, mis surutakse vastu ratta rehvi ning võimsus kantakse üle hõõrdejõu toimel. *Outrunner* – tüüpi mootoriga on võimalik hõõrdülekannet lahendada veelgi lihtsamalt – rulliku asemel surutakse vastu rehvi mootori korpus (rootor). Kuna hõõrdülekande korral veetava ratta joonkiirus, ja seega ka jalgratta kiirus, võrdub mootori korpuse joonkiirusega, ei vaja see lahendus redutseerivat ülekannet.

Sobiva ülekande valikul lähtuti järgnevatest omadustest:

- Soovitav ülekandearv: 18/1 – 16/1
- Piisav tugevus, et üle kanda arendatavat võimsust
- Ülekande osade kättesaadavus
- Konstruktsiooni lihtsus
- Hind

Tabel 1.2. Ülekannete võrdlus

| | Kettülekanne | Rihmülekanne | Hõõrdülekanne |
|--|--|--|-----------------------------------|
| Soovitav ülekandearv saavutatav | Jah (tagumine ketiratas väga suur) | Jah (tagumine rihmaratas väga suur) | Kiirus oleneb mootori diameetrist |
| Ülekantav võimsus | >> 1 kW | >> 1 kW | Oleneb ülekande lahendusest |
| Ülekande osad | Ketirattad, ketirataste kinnitused, kett | Rihmarattad, rihmarataste kinnitused, rihm | Ainult mootor ise |
| Suhteline hind | Kõige kulukam | Keskmine | Odavaim |

Kasutatavaks ülekande lahenduseks valiti hõõrdülekanne. Kuigi hõõrdülekanne korral on ülekantav võimsus piiratud ning oleneb nii mootori kesta pinnakaredusest kui ka ratta rehvi mustri- ja seisukorrast ja rehvirõhust, on hõõrdülekanne võrdlusalustest variantidest kõige lihtsam, kompaktsem, kergem ning odavam.

Hõõrdülekanne korral sõltub jalgratta kiirus iga diameetriga ratta korral ainult mootori korpuse diameetrist ja mootori nurkkiirusest ning on leitav joonkiiruse valemi $v = \omega \cdot r$ järgi. Valitud Turnigy mootori diameeter on 60 mm ning maksimaalne pöörlemissagedus 6556 min^{-1} . Asendades andmed joonkiiruse valemisse, saadi selle mootori korpuse maksimaalseks joonkiiruseks $20,6 \text{ m/s}$ ehk $74,1 \text{ km/h}$. Arvestades, et antud lahenduses kasutatakse ligikaudu poolt mootori nimivõimsusest, võib arvestada ka poolega leitud kiirusest, s.o $\sim 37 \text{ km/h}$, mis on elektrijalgrattale igati sobiv. Järelikult ei ole Turnigy mootori puhul vaja täiendavat redutseerivat ülekannet.

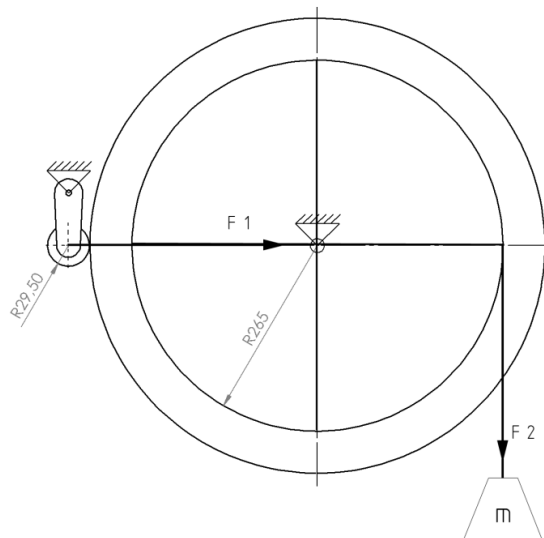
Hõõrdülekanne lahenduseks valiti Commuter Booster [11] projektil põhinev konstruktsioon, mille puhul mootor kinnitatakse lihtsa rakise abil jalgratta sadulaposti külge nii, et oleks võimalik reguleerida survet, millega mootori korpus vastu tagaratta rehvi surutakse. Lahendusest koostati 3D mudel, mida on illustreeritud seel 1.2. Mootori mõlemasse otsa kinnitatakse alumiiniumsulamist toed, mis liigendatakse omakorda istmeposti külge kinnituva klambriga võlli abil nii, et mootorit on võimalik koos tugevaga pöörata ümber võlli. Mootori ekstsentrilisus võlli suhtes lubab seada mootori survet tagarehvide. Reguleeritav surve peab tagama piisava hõõrdeteguri mootori korpuse ning rehvi vahel, et need ei hakkaks üksteise suhtes libisema ning oleks tagatud pöördemomendi ülekanne tagarattale.



Sele 1.2. Mootori paigutus

Mootori ja rehvi vahelist hõõrdetegurit aitab tõsta ka mootori korpuse pinnakareduse suurendamine. Selleks võib mootori korpuse katta vastupidava kattega liivapaberiga. Kestvama lahendusena oleks võimalik mootori korpus rihveldada või kinnitada ümber korpuse rihveldatud alumiiniumist kate.

Projekti raames viidi läbi katse lihvitud pinnaga terasrulli ning jalgratta rehvi vahelise staatilise hõõrdeteguri määramiseks. Vahendite puudumise tõttu ei olnud aga võimalik korrata katseid erinevat tüüpi rehvide ning erineva kattega rullikutega. Katse skeem on toodud seel 1.3. Jalgratta ratas ning rullik kinnitati selleks valmistatud rakisele nii, et ratas pöörleks vabalt, rullik aga mitte. Rullikut oli võimalik suruda vastu ratta rehvi. Ratta külge, määratud kaugusele tsentrist riputati kaalutud raskus. Njuutonmeetri abil tõmmati rullik vastu rehvi, kusjuures raskuse rakenduspunkti ja ratta võlli vaheline kujuteldav sirge seati paralleelseks maapinnaga. Rulliku survet vähendati, jälgides samaaegselt njuutonmeetri näitu. Märgitigi üles njuutonmeetri näit hetkel, kui rehvi hakkas rulliku suhtes libisema. Katset korrati 10 korda kuiva- ning 10 korda märja rehvi. Katsetulemused on toodud tabelis 1.3. Leiti, et staatiline hõõrdetegur μ rulliku ja kuiva rehvi vahel oli $\sim 0,54$, märja rehvi korral aga $\sim 0,67$.



Sele 1.3. Katse skeem

Tabel 1.3. Hõõrdeteguri katsetulemused

| Katse nr | | 1 (Kuiv rehvi) | 2 (Märg rehvi) |
|-------------------------------------|--------------------|--------------------|-------------------|
| Kordus | F ₂ (N) | F ₁ (N) | |
| 1 | 56,6 | 103,0 | 79,4 |
| 2 | | 112,8 | 81,4 |
| 3 | | 104,9 | 88,3 |
| 4 | | 117,7 | 88,3 |
| 5 | | 111,8 | 83,4 |
| 6 | | 100,0 | 85,3 |
| 7 | | 105,9 | 82,4 |
| 8 | | 100,0 | 85,3 |
| 9 | | 98,1 | 86,3 |
| 10 | | 93,2 | 86,3 |
| Keskmine | 56,6 | 104,8 | 84,7 |
| Hõõrdetegur μ | | 0,54 | 0,67 |

Elektrijalgratta mootor arendab suurimat pöördemomenti ratta maksimumkiirusel. Arvesse võttes veere- ja tuuletakistust üldistatud oludes, rakendub elektrijalgratta tagarattale mootori 1 kW võimsusele vastava kiiruse (~45 km/h) juures pöördemoment ligikaudu 25 Nm [12, 13]. Tagaratta puhul, mille raadius on 33 cm (26-tolline ratas), tähendab see, et rehvi pinnale on vajalik kiiruse säilitamiseks rakendada jõudu $F_2 = M / r = 25 / 0,33 \approx 75,8 \text{ N}$. Staatilise hõõrdeteguri kaudu saab leida minimaalse vajaliku jõu, millega on vaja mootorit suruda vastu rehvi, et pinnad ei hakkaks üksteise suhtes libisema. Vajalik jõud $F_1 = F_2 / \mu = 75,8 / 0,54 \approx 140,4 \text{ N}$.

Selleks, et veenduda valitud hõõrdülekande sobilikkuses, tuleks läbi viia lisakatseid, leidmaks, kas ja mis tingimustel on vajalik survejõud mootori ja rehvi vahel saavutatav. Samuti oleks kasulik leida mootori korpuse pinnakate, mille korral staatiline hõõrdetegur oleks maksimaalne. Valitud ülekanne võib olla ebasobiv väga märjal või porisel teel kasutamiseks, kuna liigne vesi ja pori ülekanne pindade vahel vähendab tõenäoliselt hõõrdetegurit ning võib põhjustada pindade libisemist.

Kuna hõõrdülekande puhul puutub mootor otseselt kokku rehvi ning see omakorda teekattega, on vajalik vältida liigse mustuse sattumist rehvil mootoris. Mootori jahutusavad asuvad selle otstes. Mootori korpusele on võimalik kinnitada epoksiitliimiga rõngad, mis takistaksid liigse mustuse ning pori sattumise mootori jahutusavadesse. Ühe võimaliku lahenduse (Sele 1.2 paremal) joonis on toodud töö lisades (Lisa 1 „Mootori mudakaitse“).

1.3 Transistoride jahutus

Harjadeta alalismootori kommuteerimiseks kasutatakse MOSFET-tüüpi transistore, mida mootori koormamise korral läbib suur voolutugevus. Transistori korpuse ja ümbritseva õhu vahel on soojusülekanne aeglane, kuna korpuse pind on väike ning selle pinna ning õhu vaheline termotakistus on suur.

Transistori hävimise vältimiseks on vajalik hoida selle korpuse temperatuur piisavalt madal, et siirdealas ei hakkaks transistori materjal sulama. Temperatuuri piiramiseks kasutatakse jahutust – vastavalt vajadusele kas passivset (ainult radiaator) või aktiivset (radiaator ning ventilaator või vesijahutuse puhul veepump).

Jahutuse projekteerimise etapid antud projekti puhul olid järgmised:

1. Jahutuse tüübi valimine
2. Hajutatava võimsuse kindlakstegemine
3. Radiaatori vajaliku termotakistuse arvutus
4. Sobiva radiaatori valik

Jahutuse tüübiks valiti passiivne jahutus ning otsustati kasutada alumiiniumradiaatorit, kuna see lahendus on teostuselt lihtsaim ning odavaim, samas töökindlaim. Selles peatükis tuuakse välja ka arvutused leidmaks, kas valitud jahutuse tüüp on piisavalt efektiivne.

Ühe transistori poolt hajutatav võimsus avatud olekus arvutati transistori avatud oleku suurima takistuse $R_{DS(on)}$ ning transistori läbiva maksimaalse voolutugevuse I_{max} korral (Tabel 1.4) valemist 1.1 [14]. Jahutuse projekteerimisel võeti aluseks punktis 2.2 valitud MOSFET-transistor IRFS3306.

Tabel 1.4. Transistori IRFS3306 arvutuste algandmed ja tulemused

| Parameeter | Väärtus | Kirjeldus |
|-----------------|----------------|---|
| $R_{DS(on)}$ | 4,2 m Ω | Takistus avatud olekus. |
| $T_{J,max}$ | 175°C | Siirdeala maksimaalne lubatud temperatuur |
| t_A | 40°C | Arvestuslik ümbritseva õhu maksimaalne temperatuur. |
| $R_{\theta JC}$ | 0,65 | Termotakistus siirdeala ja korpuse vahel. |
| I_{max} | 50 A | Maksimaalne lülitatav voolutugevus (2.1). |
| P_{on} | 10,5 W | Hajutatav võimsus avatud olekus. |
| P_{sw} | 10,9 W | Hajutatav võimsus lülituste (<i>off-on-off</i>) ajal. |
| P_t | 21,4 W | Hajutatavate võimsuste summa. |

$$P_{on} = I_{max}^2 * R_{DS(on),max} = 50^2 * 0,0042 = 10,5 \text{ W} \quad (1.1)$$

Transistori ümberlülitumisel eralduv võimsus P_{SW} arvutatakse üheks lülituseks kuluva energiahulga ja pulsisagedus-modulatsiooni sageduse korrutisena. Et arvestada nii transistori mittejuhtivast juhtivasse (*off-on*), kui ka juhtivast mittejuhtivasse olekusse (*on-off*) ümberlülitust, korrutatakse saadav tulemus kahega (Valem 1.2) [14].

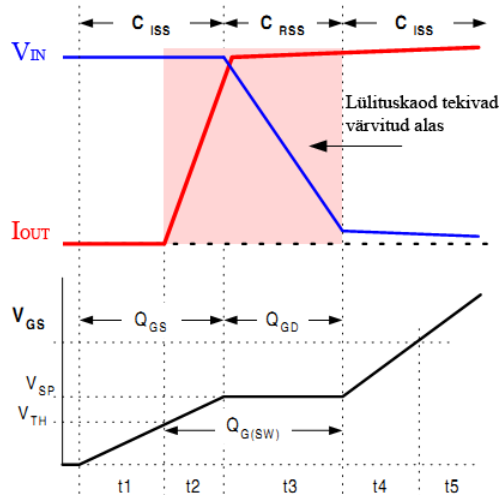
$$P_{SW} = 2 * E_{SW} * f_{PWM} \quad (1.2)$$

P_{SW} – lülitusel eralduv võimsus (W)

E_{SW} – lülitusel muundatav energia (J)

f_{PWM} – PWM sagedus (Hz)

Lülitusel muundatav energiahulk E_{SW} arvutatakse lülituseks kuluva aja ning transistori poolt lülitatava võimsuse poolväärtuse korrutisena (Valem L5.1) [14]. Poolväärtus tuleneb sellest, et ümberlülituse aja jooksul esmalt kasvab voolutugevus lineaarselt, pinge jääb aga muutumatult maksimaalsele tasemele, kui aga voolutugevus on saavutanud maksimumi, hakkab pinge lineaarselt langema (Sele 1.4). Lülitusaja keskmiseks võimsuseks $P = U * I$ järgi ongi pool maksimaalsest võimsusest.



Sele 1.4. Transistori ümberlülitus [14]

Summaarne võimsuskadu, arvestades kadu transistori avatud olekus ning ümberlülituste ajal:

$$P_t = P_{on} + P_{SW} = 10,5 + 10,9 = \mathbf{21,4\ W}$$

Ilma radiaatorita suudaks üks transistor ohutult ümbritsevasse õhku hajutada 3,37 W võimsust (P_{NC} , Valem 1.3). Empiiriliselt leiti, et selline võimsus vastab ligikaudu 12 A suurusele voolutugevusele ning maksimaalne lülitatav võimsus seega $36\ V * 12\ A = 432\ W$.

$$P_{NC} = \frac{t_{j,max} - t_A}{R_{\theta JA}} = \frac{175 - 40}{40} \approx \mathbf{3,37\ W} \quad (1.3)$$

$$I_{OUT} = 12\ A \Rightarrow P_{SW} = 36 * 12 * 1,88 * 10^{-7} * 32000 \approx 2,6\ W$$

$$P_{on} = 12^2 * 0,0042 \approx 0,61\ W$$

$$P_t = 2,6 + 0,61 = \mathbf{3,21\ W}$$

Radiaatori vajaliku radiaator-õhk termotakistuse leidmiseks tuleb leida radiaatori poolt hajutatav võimsus. Korruga lülitatakse alati kahte transistori – üht kõrge (toiteallika +) poole ja üht madala (toiteallika -) poole oma, seega on hajutatavaks võimsuseks $P_S = 2 * P_t = 2 * 21,4 = \mathbf{42,8\ W}$.

$$R_{\theta JA} = \frac{t_{j,max} - t_A}{P_S} \quad (1.5)$$

$$R_{\theta JA} = R_{\theta JC} + R_{\theta CS} + R_{\theta SA} \Rightarrow \mathbf{R_{\theta SA} = R_{\theta JA} - R_{\theta JC} - R_{\theta CS}} \quad (1.6)$$

$R_{\theta JA}$ – siirdeala-õhk termotakistus ($^{\circ}C/W$)

$R_{\theta JC}$ – siirdeala-korpus termotakistus ($^{\circ}C/W$)

$R_{\theta CS}$ – korpus-radiaator termotakistus ($^{\circ}C/W$)

$R_{\theta SA}$ – radiaator-õhk termotakistus ($^{\circ}C/W$)

P_S – radiaatori poolt hajutatav võimsus (W)

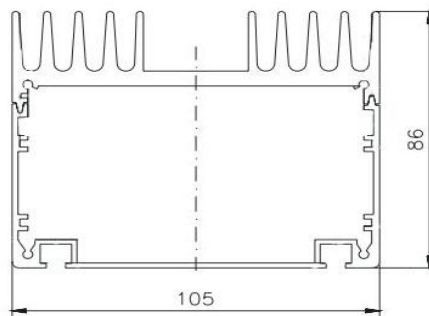
Teades kasutatava transistori siirdeala-korpus ning korpus-radiaator termotakistusi, on võimalik arvutada vajalik radiaator-õhk termotakistus $R_{\theta SA}$ vastavalt valemitele 1.5 ja 1.6.

$$R_{\theta JA} = \frac{175-40}{42,8} \approx 3,15 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}}$$

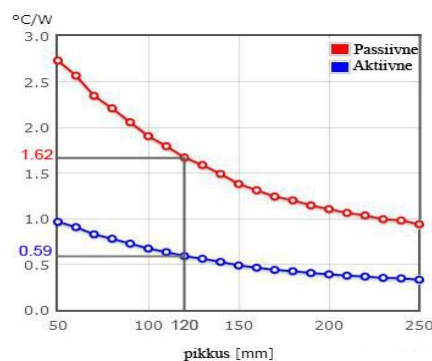
$$R_{\theta SA} = 3,15 - 0,65 - 0,50 = 2 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}}$$

Selleks, et radiaator suudaks hoida transistorite siirdealade temperatuurid lubatu piires, peab radiaatori termotakistus olema $2 \text{ }^{\circ}\text{C/W}$ või sellest väiksem.

Kuna kontrolleri elektroonika vajab kaitset väliskeskonna mõjude eest, tuleb see paigaldada korpusesse. Saadaval on alumiiniumist korpused, mille üks või mitu seinu on ribidega ning toimivad radiaatorina. Selel 1.5 on toodud Rose Multitronic 22 alumiiniumsulamist korpuse joonis. ABL Heatsinks veebikataloogi termotakistuse kalkulaatorit kasutades leiti sarnaste mõõtmetega radiaatori ligikaudne termotakistus õhuvoolu puudumisel ning $2,5 \text{ m/s}$ õhuvoolu kiiruse juures (Sele 1.6). Valitud kiirus vastab jalgratta kiirusele 9 km/h tuulevaikse ilma korral, kui õhuvool kontrolleri korpuseni ei ole takistatud.



Sele 1.5. Rose Multitronic 22 korpused [15]



Sele 1.6. Termotakistuse graafik [16]

Antud profiiliga $120 \times 100 \times 25 \text{ mm}$ radiaatori termotakistus on naturaalse õhuvoolu korral $1,62 \text{ }^{\circ}\text{C/W}$ ning $2,5 \text{ m/s}$ õhuvoolu kiiruse korral $0,59 \text{ }^{\circ}\text{C/W}$. Leitud termotakistused on väiksemad, kui määratud maksimum ($2,0 \text{ }^{\circ}\text{C/W}$), seega on valitud lahendus piisavalt efektiivne.

2 ELEKTROONIKA

2.1 Nimipinge ning voolutugevuse valik

Elektrijalgratastel kasutatavad tüüpilised süsteemi nimipinged jäävad vahemikku 24 – 72 V. Nimipinge valitakse tavaliselt 12 V sammuga. Valiku põhikriteeriumiks on mootori nimipinge. Kuna mootori kiirus oleneb selle toitepingest, valitakse see vajadusel mootori nimipingest madalam. Valikul tuleb arvestada ka sellega, et sama võimsuse saavutamiseks madalamal pingel on vaja mootorile rakendada suuremat voolutugevust kui kõrgema pinge korral.

Turnigy SK3-6374 mootori nimipinge on 44V ning maksimaalne lubatud voolutugevus 70 A (Tabel 1.1). Kuna mootorit ei plaanita käitada täisvõimsusel, oleks ka 48 V toitepinge sobilik, kuid töökindluse huvides valitakse süsteemi nimipingeks 36V.

Elektroonika komponentide valikul arvestatav voolutugevus tuleks valida suurem nimivõimsuse saavutamiseks vajalikust voolutugevusest, et arvestada toitevoolu kõikumistega ning et hoida komponentide temperatuurid töötamise ajal madalad. Toitevoolu kõikumist tekitab mootori juhtimine diskreetse signaaliga ning mootorile rakendatav koormus. Arvestades projekteerimisel suurema voolutugevusega, on sama kontrolleri võimalik kasutada ka mõnevõrra võimsamates süsteemides. Süsteemi maksimaalseks voolutugevuseks valiti 50 A, lähtudes sellest, et voolu kõikumise amplituud süsteemis võib olla kuni 50% toitevoolu väärtusest (vajalik varutegur ~1,25) [17]. 50 A korral on varutegur ~1,8.

Kontrolleri nominaalvõimsuseks valiti 1 kW, mille korral nominaal-voolutugevuseks 36 V juures on 27,8 A. Kontrollerile esitatud nõuded on toodud tabelis 2.1.

Tabel 2.1. Nõuded kontrollerile

| | |
|----------------------------|--------|
| Nimipinge | 36 V |
| Nimi-voolutugevus | 27,8 A |
| Nimivõimsus | 1000 W |
| Maks. voolutugevus | 50 A |
| Maks. pidev võimsus | 1800 W |

2.2 Transistorid

Üle 1 kW võimsusega BLDC mootorite (harjadeta alalisvoolumootor, *brushless DC*) juhtimiseks on kõige sobilikumad MOSFET või IGBT-tüüpi transistorid. Kuna IGBT transistorid leiavad kasutust pigem kõrgete, üle 1000 V pingete ja suurte, üle 5 kW võimsuste juures, tehti valik MOSFET-tüüpi transistoride seast [18].

MOSFET-transistoride põhilised omadused:

- Pais on sisuliselt kondensaator – ei vaja pidevat pais-neel voolu
- Suur ümberlülituse kiirus
- Sobilik kasutamiseks suure võimsusega ahelates
- Integreeritud vastuvoolu-diood; sobilik mootorite juhtimiseks

Transistoride valimisel võrreldi erinevaid D²PAK korpusega MOSFET-tüüpi transistore. D²PAK korpus valiti tänu selle kompaktsusele ning suhteliselt suurele piir-voolutugevusele. Valiku käigus võrreldi järgmiseid näitajaid:

- V_{DSS} – maksimaalne läte-neel (*drain-source*) pinge
- I_D – maksimaalne läte-neel voolutugevus
- $R_{DS(on)}$ – takistus avatud olekus (*drain-to-source open resistance*)
- Q_G – paisu kogulaeng (*gate total charge*)
- Hind

Valik tehti Elfa Distrelec internetikataloogist saadaval olevate transistoride seast [19]. tabelis 2.2 toodud voolutugevused on arvutuslikud ning põhinevad siirdeala maksimaalsel lubatud temperatuuril. D²PAK korpuse piir-voolutugevus on 195 A, millest kõrgema voolutugevuse korral hakkavad korpuse klemmid sulama.

Tabel 2.2. MOSFET-transistoride võrdlus

| | <u>IRFS3306</u> | IRFS3107 | IRFS3207Z | IRFS4010 | IRLS4030 |
|---|------------------------|------------------|------------------|-----------------|-----------------|
| V_{DSS} (V) | 60 | 75 | 75 | 100 | 100 |
| I_D (A) | 120 | 230 (195) | 120 | 180 | 180 |
| $R_{DS(on)}$ (mΩ) | 3,3 | 3,0 | 3,3 | 4,7 | 4,3 |
| Q_G (nC) | 120 | 240 | 170 | 215 | 130 |
| Hind (€/tk) | 2,22 | 3,26 | 3,97 | 4,69 | 4,84 |

Väikesema $R_{DS(on)}$ takistusega transistorid kuumenevad avatud olekus vähem, kui kõrgema näitajaga variandid, kuna soojusena eralduv võimsus võrdub takisti takistuse ja seda läbiva voolutugevuse ruudu korrutisega ($P=I^2 \cdot R$). Väiksema paisu mahtuvusega transistoridel on aga väiksem võimsuskadu ümberlülitusel. PWM (pulsilaiuse modulatsioon, *pulse-width modulation*) signaaliga transistori juhtides on aga olulisem ümberlülituseks kuluv aeg, kuna lülitusaja kestel on läte-neel takistus kordades suurem, kui transistori avatud olekus. Lülitusaeg sõltub aga paisu juhtvoolust ning paisu kogulaengust (Valem 2.1) [20].

$$I = C \cdot \frac{dU}{dt}$$

$$Q = C \cdot U = I \cdot t \Rightarrow t = \frac{Q}{I} \quad (2.1)$$

I – voolutugevus (A)

C – mahtuvus (F)

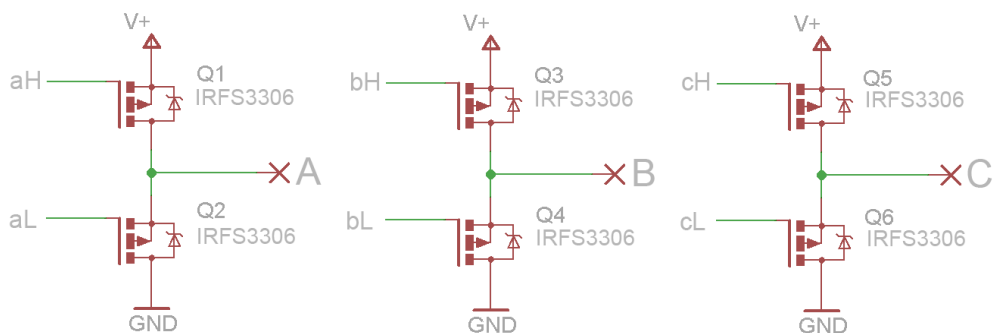
U – pinge (V)

Q – laeng (C)

Võrdlusandmete põhjal valiti kasutamiseks kõige sobivamate näitajatega variant **IRFS3306** [21], kusjuures märgiti, et selle maksimaalne lubatud pinge on väiksem, kui kahekordne süsteemi nimipinge. Kuna mootori puhul on tegemist induktiivse koormusega, tekitab diskreetse signaaliga juhtimine vooluringis parasiitseid pingetõuse, mis võivad ületada transistoride maksimaalse lubatud pinge [22]. Pingetõusude silumiseks kasutatakse toiteallikaga paralleelselt piisavalt suure mahtuvusega kondensaatoreid, et üleliigne energia neis sumbuks ning pinge tipud ei ületaks transistoride maksimaalset lubatud pinget.

Mootori juhtimiseks kasutatakse 3-faasilist inverterit. Mootori iga faasi juhitakse kahe MOSFET-transistoriga, s.t kokku on neid inverteris 6. Kuna valitud mootori mähised on ühendatud Y-skeemi järgi, kus kõigi kolme mähise ühe poole faasijuhtmed on ühendatud kokku, pingestatakse korraga alati kahte mähist. Lülitades transistore sisse või välja, on võimalik iga mähisepaari pingestada kahte pidi, ning seeläbi tekitada üht- või teistpidine magnetväli. [23]

Kasutades N-tüüpi MOSFET-transistore, tekib probleem kõrge poole transistoride (Sele 2.1 Q1, Q3, Q5) lülitamisel. Nimelt ei ole nende transistoride neel ühendatud toiteallika miinuspoolega otse, vaid läbi mootori mähiste ning ühe madala poole transistori, mille tõttu pinge transistori paisu ja neelu vahel on väiksem, kui paisu ja toiteallika miinuse vahel. Seetõttu tuleb kõrge poole transistoride lülitamiseks kasutada kõrgemat pinget, kui madala poole (Sele 2.1 Q2, Q4, Q6) jaoks. Probleemi lahendamiseks kasutatakse spetsiaalseid H-silla MOSFET-draivereid, millel on sisse ehitatud pingeregulaator kõrge poole transistoride juhtimiseks (Punkt 2.3).



Sele 2.1. 3-faasiline inverter

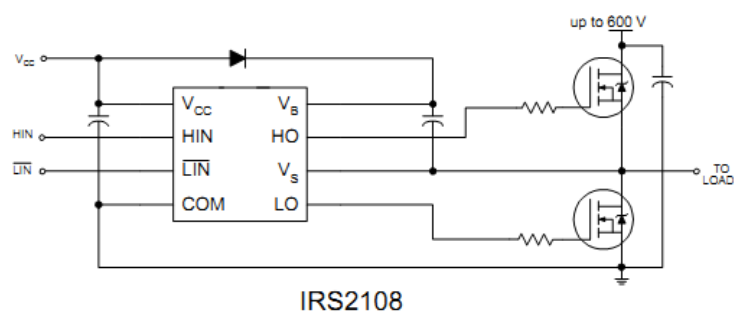
2.3 MOSFET draiverid

MOSFET-transistoride lülituskadude vähendamiseks ja seega kontrolleri efektiivsuse tõstmiseks ning temperatuuri vähendamiseks on vajalik tähelepanu pöörata nende juhtpingele ja –voolutugevusele. Suurte võimsuste lülitamiseks kasutatavad MOSFET-transistorid vajavad kiireks lülitumiseks suuremat pinget ja voolutugevust kui mikrokontrolleri väljund on võimeline pakkuma.

Punktis 2.2 kasutuseks valitud transistori IRFS3306 paisu lävi-pinge $V_{GS(th)}$ on 4,0 V ning maksimaalne paisu juhtpinge V_{GS} 20 V. Seega peab valitav juhtpinge jääma antud pingetugevuste vahemikku. Juhtpingeks valiti **12 V**, kuna see on levinud toitepinge ning vastava väljundpingega regulaatorite valik on mitmekesine. Samuti on valitud pinge piisavalt kõrge transistori kiireks lülitamiseks.

Transistoride draiveriteks valiti Elfa Distrelec'i kataloogist [19] poolsilla draiver **IRS2108** [24]. Valitud draiveril on eraldi väljundid kõrge ja madala poole transistoride juhtimiseks, sisseehitatud viivitus, mis hoiab ära olukorra, kus ümberlülituse hetkel on mõlemad transistorid avatud olekus. Selline olukord põhjustab hetkelise lühise, mis suurendab võimsuskadusid ning on kahjulik nii akudele kui transistoridele. Samuti ei ole võimalik antud draiveriga tahtlikult üheaegselt mõlemat transistori viia avatud olekusse. IRS2108 tüüp-ühenduskeem on toodud seel 2.2.

Draiveri maksimaalne madala poole juhtvool on 600 mA ning kõrge poole juhtvool 290 mA, seega valitakse kõikide transistoride juhtvooluks **255 mA**. Transistori sisendtakisti takistus valitakse seega valemist $R = U / I = 12 \text{ V} / 0,255 \text{ A} \approx 47 \Omega$.



Sele 2.2. IRS2108 tüüp-ühenduskeem [24]

2.4 Mikrokontroller

Kontrolleri juhtimiseks on erinevaid võimalusi:

- Spetsiaalne BLDC mootori juhtkiip (ei vaja mootori juhtimise algoritmide eraldi programmeerimist)
- Programmeeritav mikrokontroller (vajalik teostada ka mootori juhtimise algoritm)
- Kahe eelneva kombinatsioon (BLDC kiip juhib mikrokontrollerist saadud signaalide põhjal mootorit ning mikrokontroller tegeleb kõige muuga)

Kasutatavaks lahenduseks valiti programmeeritav mikrokontroller. Selle valiku põhilised argumendid olid:

- Kompaktsus
- Funktsionaalsus – mikrokontrolleriga on võimalik teostada kõiki funktsioone, mida BLDC juhtkiibigagi, kuid vajadusel saab neid lisada, ära jätta või muuta
- Hind – piisava võimekusega mikrokontrollerid on odavamad, kui vastavad BLDC juhtkiibid (Tabel 2.3)

Tabel 2.3 - Kontrollerite võrdlus [35]

| Seade | Hind, € |
|---------------------------------------|---------|
| Atmel ATmega328P-AU (mikrokontroller) | 2,6 |
| Trinamic TMC603-LA (BLDC kontroller) | 6,89 |

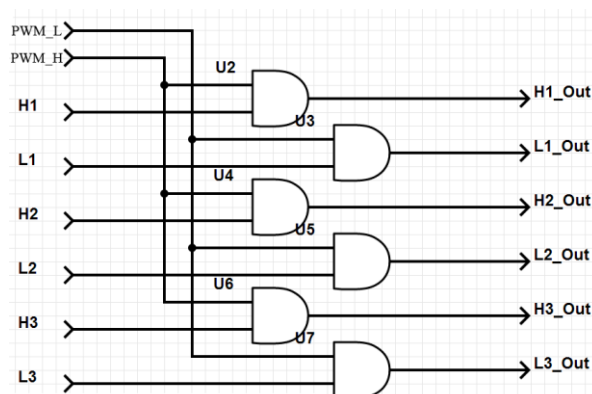
Valitud lahenduse puuduseks on see, et juhtimisprogrammi kirjutamine ning selle häälestamine on mahukas ning aeganõudev töö. Terviklik ja universaalne programm mikrokontrollerile on aga kasutatav erinevates süsteemides ning vähendab kulusid riistvarale.

Mikrokontrolleri üheks ülesandeks on PWM signaali genereerimine ning vastavalt kommutatsioonitabelile selle transistoride draiveritele jagamine. Selleks kaaluti kahte varianti:

1. Seadistada mikrokontrolleri 6 väljundit genereerima PWM signaali ning lülitada neid vastavalt kommutatsioonitabelile.
2. Seadistada kaks väljundit genereerima PWM-signaali (kõrge ja madala poole PWM eraldi), 6 väljundit digitaalseteks *high-low*-väljunditeks ning jagada PWM väljundi signaali AND-loogikaelementide abil transistoride draiveritele vastavalt digitaalsete väljundite olekule. (Sele 2.3)

Kasutuseks valiti teine, AND-loogikaelemente kasutatav variant, kuna loogikaelemendid on odavad, PWM seadistus kahele väljundile kasutab vaid üht mikrokontrolleri taimerit ning see variant sobib punktis 3.2 valitud PWM lülitusskeemi realiseerimiseks.

Kasutatav AND-loogikaelement valiti Elfa Distrelec kataloogist [19] HEF4081BT (4 AND-elementi ühes korpuses) [25].



Sele 2.3. PWM AND-loogikaelementidega

Sobiva mikrokontrolleri valimiseks tuli esmalt kindlaks teha, kui palju ja mis tüüpi sisendeid-väljundeid on vaja.

Tabel 2.4. Nõuded mikrokontrollerile

| Tüüp | Arv | Selgitus |
|------------------------------|-----|--|
| ADC (analoog-) sisend | 3 | Analoog-sisendsignaaliid: <ul style="list-style-type: none"> • Gaas • Voolutugevus • 1 x reserv |
| Digitaalne sisend | 6 | <ul style="list-style-type: none"> • 3 x hall'i andur • Pidur • 2 x reserv (nt erinevate funktsioonidega nupud) |
| PWM väljund | 2 | PWM väljundid, mida jagatakse draiveritele läbi AND-elementide |
| Digitaalne väljund | 9 | <ul style="list-style-type: none"> • 1 x LED • 2 x reserv • 6 x kommutatsiooni signaali |

Oma odavuse, lihtsa programmeeritavuse, piisava kiiruse ning vajaliku hulga sisendite ja väljundite tõttu valiti kasutuseks **Atmel ATmega328** [26]. ATmega328 tähtsamad andmed on toodud tabelis 2.5.

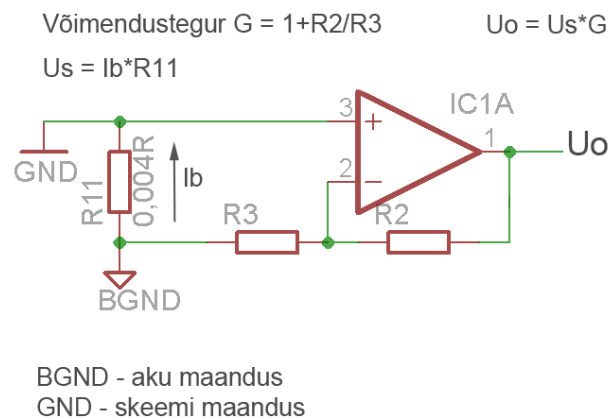
Tabel 2.5. ATmega328 tähtsamad andmed

| Klemmi tüüp | Hulk | Kirjeldus |
|-------------|-------|--|
| ADC | 6 | Analoogsisendid |
| Digital I/O | 14(8) | Digitaalsed sisend-väljund-kanalid (v.a PWM) |
| PWM output | 6 | PWM võimekusega väljundid |

2.5 Voolupiiraja

Voolupiiraja otsustati lahendada kahe signaalina: üks analoogsignaali kajastab voolutugevuse hetkeväärtust ning teine signaal on diskreetne signaal, mis on alati kõrge (+ või 1) signaal, välja arvatud juhul, kui voolutugevus ületab mingit kindlat väärtust. See piirväärtus peaks olema kõrgem kui kõiki võimalikke voolukõikumisi arvestav maksimaalne voolutugevus. Sisuliselt on tegemist lühisekaitsega, mis madala (- või 0) signaali korral tühistab PWM signaali ning viib võimalikult kiiresti kõik transistorid suletud asendisse. See kaitseb mootorit ning transistore liigvoolu tõttu läbipõlemise eest.

Selleks, et saada signaal voolutugevuse kohta, lisatakse skeemi nulli ja toiteallika nulli vahele väikese takistusega ning suhteliselt suure võimsusega takisti ning voolu jälgimiseks vajalik signaal saadakse pingena üle selle takisti. Kuna aga takisti takistus on väike, on vaja seda pinget võimendada, et signaali eraldusvõimet tõsta. Selleks kasutatakse operatsioonivõimendit, mille pinget nullpunkt (*offset voltage*) ning võimendustegur (*gain*) valitakse lähtudes süsteemi maksimaalsele voolutugevusele vastavale pingele üle takisti. Maksimaalne lubatud pinget üle takisti leitakse Oomi seadusest, lahendades selle pinget suhtes, soovitava voolutugevuse ning takisti takistuse järgi. Voolujälgija põhimõtteskeem on illustreeritud selal 2.4. Lisaks kasutatakse ülevoolu kaitseks aku ning kontrolleri vahel 63 A sulavkaitset [27].



Sele 2.4. Voolujälgija põhimõtteskeem

2.6 Toite osad

Kontrolleri toitepingeks on süsteemi nimipinge, milleks valiti 36 V, MOSFET-transistoride juhtsignaali pinge valiti 12V. Süsteemi nimipinge ja juhtsignaalide pinge valik on kirjeldatud punktis 2.1.

Kontrolleri juhtimiseks kasutatakse mikrokontrollerit, mille toitepingeks on 5V. Sama pinget kasutatakse ka voolupiiraja komponentide toiteks ning MOSFET juhtelektroonika sisendsignaali. Seega on vajalik valida sobivad 12 V ja 5 V pingeregulaatorid. 5 V pingeregulaatori sisendiks otsustati võtta 12 V regulaatori väljund, kuna 12 V sisendiga 5 V pingeregulaatorid on odavamad ning lihtsamad, kui 36 V sisendiga variandid.

Selleks, et valida sobivate parameetritega pingeregulaatorid, tuleb kindlaks teha vajalikud voolutugevused, millega regulaatorid peavad olema suutelised komponente varustama (Tabel 2.6).

Tabel 2.6. Komponentide voolutarve

| Tarbija | Toitepinge (V) | Maks. Voolutugevus (mA) |
|--|----------------|-------------------------|
| ATmega 328 (mikrokontroller) | 5 | 200 |
| 2 x LM741 (operatsioonivõimendi) | 5 | 2 x 2,8 ≈ 6 |
| 3 x SS400 (hall'i sensor) | 5 | 3 x 10 = 30 |
| 2 x HEF4081B (AND-element) | 5 | 2 x 50 = 100 |
| 2 x IRS2108 (MOSFET'i draiver) | 12 | 2 x 300 = 600 |
| 7805 (1 W 5V regulaator) | 12 | 450 |
| MOSFET-draiverite puhul on arvestatud kahe draiveri voolutarbega, kuna üheaegselt töötavad neist maksimaalselt kaks. | | |

Tabelis 2.6 välja toodud 5 V tarbijad vajavad kokku maksimaalselt 336mA toitevoolu, seega sobib nende toiteks standardne 1 A **7805**-tüüpi pingeregulaator. 12 V tarbijad vajavad voolutugevust kokku 1050 mA; 12 V regulaatoriks sobib **MC3406**, mille maksimaalne väljundvool on 1,5 A.

2.7 Trükkplaat

Trükkplaadi tüübiks valiti 35 µm paksuse vasekihiga kahepoolne variant. Kuna mootori vooluringis on tegemist suurte voolutugevustega ning trükkplaadi radade efektiivne ristlõike pindala on suhteliselt väike, tuleb ristlõike pindala suurendada, et vältida trükkplaadi vaseradade liigset kuumenemist ning sulamist. Lihtsaim viis radade voolutaluvust suurendada on joota nende peale lisaks vasktraati. Kuna standardsete läbimõõtudega vasktraatide voolutaluvused on leitavad käsiraamatutest, ei ole vaja teostada lisaarvutusi sobiva läbimõõdu leidmiseks.

Käsiraamatust [28] leiti, et 2,3 mm diameetriga üksik ja väikese pikkusega vasktraat on võimeline kandma voolutugevust kuni 47 A. Sellest lähtudes otsustati kasutada lahendust, mille puhul joodetakse trükkplaadi radadele lisaks kaks 2,5 mm diameetriga vasktraati. Valitud lahendus tõstab radade maksimaalse ülekantava voolutugevuse vähemalt 100 amprini, mis on antud süsteemi jaoks piisav.

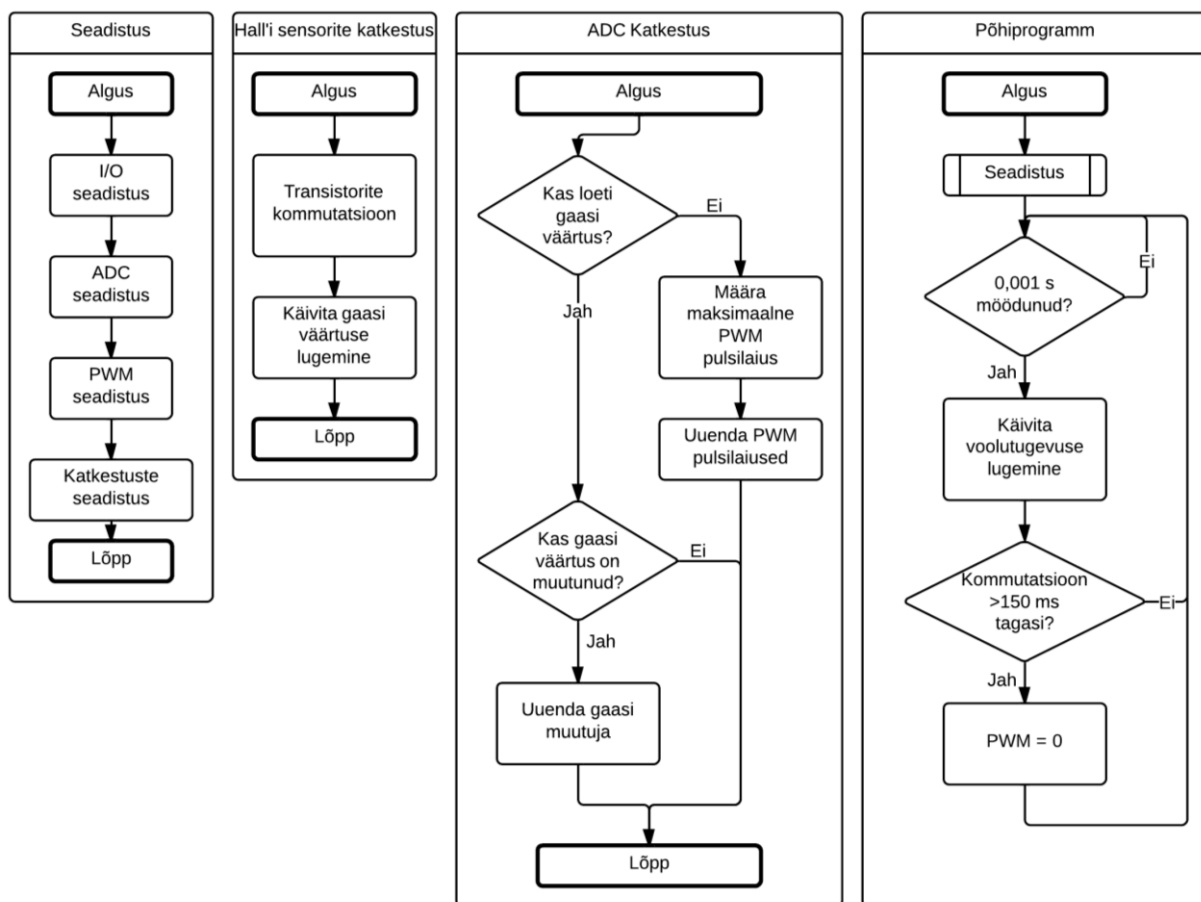
3 JUHTPROGRAMM

3.1 Programmi ülesehitus

Esialgne juhtprogramm täidab põhiliselt kolme ülesannet:

- Transistoride kommuteerimine
- Mootori faasi-voolutugevuse arvutus
- PWM pulsilaiuse seadmine vastavalt sisendsignaalile

Juhtprogrammi tööpõhimõtte skeem on toodud seel 3.1.



Sele 3.1. Juhtprogrammi ülesehitus

Kontrolleri sisselülitamisel käivitatakse mikrokontrolleris põhiprogramm. Esmalt teostatakse seadistus ning seejärel käivitatakse iga 1 ms järel voolutugevuse lugemi võtmine. Pärast seda kontrollitakse, kas viimane kommutatsioon toimus vähem kui 150 ms tagasi. Kui on möödunud rohkem kui 150 ms, nullitakse PWM väärtused. Kommutatsiooniaja kontroll kaitseb mootorit juhul, kui see mingil põhjusel kinni kiilub. Kontrolli aeg tuleks seadistada empiirilisel katsetuste põhjal.

Seadistuse osas määratakse, milliseid mikrokontrolleri klemmidest kasutatakse sisenditena ja milliseid väljunditena (Tabel 3.2). Seejärel seadistatakse analoog-digitaal muundur (ADC) võtma 256-bitiseid lugemeid. Kaks väljundklemmi seadistatakse väljutama sümmeetrilist PWM signaali, mille pulsilaiused on muudetavad üksteisest sõltumatult. Viimaks valitakse sisendklemmid, mille olekute muutumisel tehakse programmis katkestused ning seadistatakse ka katkestus ADC lugemi valmiduse korral.

Hall'i andurite sisendite oleku muutusel käivitatakse katkestus, mille käigus kommuteeritakse transistore vastavalt Hall'i andurite olekule. Lisaks käivitatakse gaasi väärtuse lugemi võtmine, mis teostatakse taustal, programmi käigust olenemata. Kui analoog-digitaal muundur on lõpetanud analoogsisendi oleku registreerimise, käivitatakse ADC katkestus. Esmalt kontrollitakse, kas viimati käivitati gaasi või voolutugevuse väärtuse lugemi võtmine. Kui viimati loeti gaasi sisendi olek ning see on muutunud, uuendatakse gaasi väärtust hoidva muutuva väärtus. Kui aga viimati teostati voolutugevuse sisendi lugemi võtmine, arvutatakse esmalt PWM pulsilaiuse maksimaalne pikkus lähtuvalt mootori kiirusest ning uuendatakse PWM signaalide pulsilaiused.

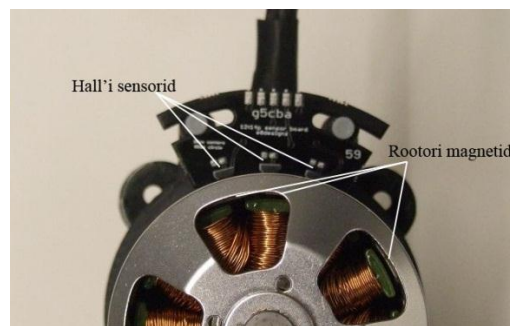
3.2 Transistoride juhtalgoritmid

Harjadeta alalisvoolumootorite puhul on kommutatsiooni põhimõte sama, mis harjadega mootorite puhul – kui rootor jõuab teatud asendisse, pingestatakse mähised, milles indutseeruv magnetväli pöörab rootorit veelgi, kuni rootor jõuab järgmisesse kommutatsiooniasendisse. Need sammud korduvad, ning rootor hakkabki pöörlema. Kui harjadega alalisvoolumootorites toimub kommutatsioon mehaaniliselt mootori korpusel, siis harjadeta mootori korral on vaja kommutatsioon lahendada elektriliselt, määrates sensorite abil rootori asend ning pingestades vastavalt sellele mootori mähiseid. Kommuteerida on võimalik ka pidevalt, muutes mähiste pingeid sinusoidselt. Viimane variant ongi mootorite juhtimise puhul eelistatud sujuva ning vaikse töö poolest, kuid seda on keeruline teostada. Lihtsam kommutatsiooniviis on levinuim 6-astmeline kommutatsioon, kus pingeid lülitatakse rootori iga 60 elektrilise kraadi pöörde järel. Valitud mootoril on 7 poolustepaari, seega teostatakse kommutatsioon iga $60^\circ / 7 \approx 8,6^\circ$ pöörde järel.

Suurimaks probleemiks BLDC mootori juhtimisel on selle rootori asendi tuvastamine. PWM signaalidega on võimalik saavutada ideaalilähedane sinusoidne pinge kõigil mootori faasidel, kuid selleks on vajalik väga täpselt teada mootori hetkelist pöördenurka. Kõige enam kasutatakse kaht tüüpi asendituvastust: andurivaba või Hall'i anduritega.

Andurivaba meetodi korral tuvastatakse asend pingestamata faasile mootori pöörlemisel indutseeruva pinge järgi. Aeglase pöörlemiskiiruse juures ei ole aga see signaal piisavalt selge, et selle kaudu asendit tuvastada.

Hall'i anduritega (Sele 3.2) variandi puhul paigutatakse 3 Hall'i sensorit rootori lähedusse 120° vahedega (mootoril on 7 poolustepaari, seega annab sama tulemuse andurite paigutus $120^\circ / 7 \approx 17,14^\circ$ vahedega). Kui rootori magnet on kohakuti sensoriga, on selle väljund kõrges-, kui magnetit läheduses ei ole, siis madalas olekus. Vastavalt signaalide kombinatsioonile ja kommutatsioonitabelile pingestatakse mootori faase. Tabelis 3.1 on välja toodud antud projektis kasutatud kommutatsioonitabel ning selle vektorkuju (andmemassiiv).



Sele 3.2. Hall'i andurite paigutus [29]

Tabel 3.1. Kommutatsioonitabel

| H2 H1 H0 | Sa Sb Sc Sa' Sb' Sc' |
|--|-----------------------------|
| 001 | 100001 |
| 010 | 001010 |
| 011 | 100010 |
| 100 | 010100 |
| 101 | 010001 |
| 110 | 001100 |
| tabel[8]={0;0x21;0x0a;0x22;0x14;0x11;0x0c} | |

Selle projekti raames valiti kasutuseks Hall'i sensoritega variant, kuna see toimib hästi terves mootori pööremiskiiruse vahemikus. Samas otsustati diskreetse 6-astmelise kommutatsiooniskeemi kasuks, kuna selle teostus on suhteliselt lihtne ning efektiivsus piisavalt suur.

Valitud 6-astmelist kommutatsiooni on võimalik teostada erinevalt. Variandid erinevad üksteisest selle poolest, kas kõrge ja madala poole transistore lülitatakse üheaegselt või ajalise nihkega, kas PWM signaaliga juhitakse ainult kõrge või madala poole transistore või mõlemaid, ning kas tühijooksu ajal on mõlemad transistorid mittejuhtivas- või on üks neist juhtivas olekus. Võimalikest variantidest võrreldi 2-kvadranti lülitust ning 4-kvadranti lülitust. [30]

2-kvadranti lülituse korral pingestatakse faase selliselt, et madala poole transistor on avatud olekus terve tsükli jooksul, kõrge poole transistorit juhitakse aga PWM signaaliga. Kuna ühe tsükli jooksul toimub ainult kaks lülitust, on lülituskaod väiksed ning tänu sellele, et PWM madala signaali korral saab vool kulgeda toiteallikasse läbi avatud madala poole transistori, on voolutugevuse kõikumine süsteemis madal. Samas ei ole selle skeemi puhul võimalik teostada mootoriga pidurdamist.

4-kvadranti lülitus erineb 2-kvadranti lülitusest selle poolest, et ühes perioodis tehakse 4 lülitust, kuna kõrge ja madala poole transistore lülitatakse eri aegadel. Iga poole PWM perioodi järel toimub lülitus. Tulemuseks on see, et ühe perioodi jooksul pingestatakse faasi kaks korda, kuid korraga poole lühemaks ajaks. Sellise lülituskeemi tulemusena on voolutugevuse kõikumine süsteemis kõrgema sagedusega, ning amplituudilt väiksem. Samuti on võimalik teostada regeneratiivset pidurdamist.

Kasutamiseks valiti 4-kvadranti lülituskeem, kuna sel puhul on voolutugevuse kõikumine vooluringis väiksem ning seeläbi väheneb ka mootorimüra. Samuti on sel juhul võimalik programmeerida kontrolleri regeneratiivse pidurdamise võimalus.

3.3 Kommutatsiooni programmiosa

Kommutatsiooni lahendamiseks kasutatakse järgmiseid signaale ning mikrokontrolleri sisendeid-väljundeid:

Tabel 3.2. Sisend- ja väljundsignaalid

| Pin | Sümbol | Sisend | Pin | Sümbol | Väljund |
|-----|--------|-----------------|-----|--------|-------------------------------------|
| PC0 | H0 | Hall'i sensor 1 | PB1 | PWML | Madala poole PWM väljund |
| PC1 | H1 | Hall'i sensor 2 | PB2 | PWMH | Kõrge poole PWM väljund |
| PC2 | H2 | Hall'i sensor 3 | PD0 | Sa | A-faasi H poole transistori väljund |
| PC4 | Th | Gaasi sisend | PD1 | Sb | B-faasi H poole transistori väljund |
| PD7 | Br | Piduri sisend | PD2 | Sc | C-faasi H poole transistori väljund |
| | | | PD3 | Sa' | A-faasi L poole transistori väljund |
| | | | PD4 | Sb' | B-faasi L poole transistori väljund |
| | | | PD5 | Sc' | C-faasi L poole transistori väljund |

Kommutatsioonijärjekord saadakse vastavustabelist, milles vastandatakse halli andurite signaalide kombinatsioonidele juhtsignaalide väljundite kombinatsioonid (Tabel 3.1). Tabel hoitakse mikrokontrolleri mälus andmemassiivina (Tabel 3.1 alumine rida). Järgnevalt on välja toodud lõik kommutatsiooni meetodist (Lisa 6).

```
void commutate (void){
    ...
    if(halls != halls_last){
        micros_last_com = micros();
        COMM_OUT &= commTable[halls];
        halls_last = halls;
        //*****Kiiruse arvutus*****
        long microsPassed = micros() - micros_last_com;
        int temp = 1000*(revConst/(microsPassed));
        RPM = temp;
    }
}
```

PWM pulsilaiused määratakse vastavalt gaasi- ning pidurisignaale ning faasivoolu suhtes arvutatud maksimaalsele pulsilaiusele (Lisa 4). Juhtprogrammis teostatakse pulsilaiuste seadmine meetodis `setPWMDuty`, millest on välja toodud lõik, kus määratakse uued pulsilaiused. Pidurdamisel on võimalik teostada regeneratiivset laadimist juhul, kui kõrge poole PWM pulsilaius on alla 50 % töötüklist (sel juhul muutuja $s = -1$).

```
void setPWMDuty (uint8_t val, uint8_t brake){
    ...
    //Pulsilaius gaasi ja maksimaalse laiuse põhjal.
    uint8_t pwm = (uint8_t)(getMaxPWM() * perc / 2);
    PWM_L = 127 - s * pwm;      //Madala poole PWM seadmine
    PWM_H = 127 + s * pwm;      //Kõrge poole PWM seadmine
    ...
}
```

3.4 Juhtsignaalid

Kasutajalt saadavad sisendsignaalid:

- Gaasi sisend: analoog-signaali
- Piduri sisend: diskreetne signaal

Gaasi sisendi põhjal määratakse PWM pulsilaius ning piduri signaali kõrge taseme korral tühistatakse gaasi signaal ning teostatakse regeneratiivset pidurdamist. Võimalik on pidurduse ajal juhtida pidurduse tugevust vastavalt gaasi sisendile.

Gaasi sisendi olek registreeritakse iga 1 ms järel ning kontrollitakse, kas uus väärtus erineb eelmisest. Kui erineb, siis gaasi oleku muutuja uuendatakse, kui ei erine, muutujat ei uuendata.

Piduri sisendi registreerimine toimub katkestusepõhiselt. Piduri sisendi oleku muutudes käivitatakse katkestusmeetod ning piduri olekut talletav muutuja uuendatakse vastavalt. PWM pulsilaiused muudetakse selliselt, et toimuks regeneratiivne pidurdamine. Näiteks on välja toodud piduri katkestuse koodilõik juhtprogrammist (Lisa 6):

```
ISR (PCINT2_vect){
    brakePressed = false;
    if (TH_CH == 1) brakePressed = true;
}
```

//Piduri katkestus (PORTD)
//Algväärtusta muutuja
//Kui vajutatakse pidurit, muuda tõseks

3.5 Voolupiiraja programmiosa

Kontrolleri esialgses juhtprogrammis realiseeritakse mootori pöördemomendi juhtimine. Kuna elektrimootori pöördemoment sõltub otseselt mootori faasivoolust, siis on vajalik teada igal hetkel faasi-voolutugevust. Kuna faasivoole otseselt ei mõõdeta, tuleb teostada arvutused nende hindamiseks.

Faasi-voolutugevus sõltub Oomi seaduse järgi faasipingest U_{PH} ning –takistusest R_{PH} (Valem 3.1). Faasi mähiste takistus on praktiliselt muutumatu ning on leitav mõõtmise teel või mootori andmelehel [7]. Mootori pöörlemisel indutseeritakse selle mähistes vastu-elektromotoorjõud, mis on alati vastupidine toitepingele. Kui mootorile rakendada näiteks pinge 10 V, siis mootori pöörlemissagedus tõuseb seni, kuni mähistes indutseeritakse vastu-elektromotoorjõud, mis on peaaegu, kuid mitte täpselt 10 V, näiteks 9,9 V. Sellises tasakaaluseisus on efektiivne faasipinge vaid 0,1 V ning faasi-voolutugevus vastavalt sellele $I_{PH} = (0,1 / R_{PH})$. Vastu-elektromotoorjõud sõltub mootori pöördesagedusest ning on mootori andmelehel antud konstandina k_v (min^{-1} / V).

Faasivoolu hindamiseks vajalikud signaalid:

- Toitepinge
- PWM pulsilaius
- Mootori pöörlemissagedus

Programmis määratakse soovitud faasi-voolutugevus maksimaalse voolutugevuse ning gaasi sisendi järgi ja seatakse PWM pulsilaius selliselt, et efektiivne faasipinge tagaks soovitud faasi-voolutugevuse. (Valem 3.4 ja Lisa 4)

Faasipinge määravad selle toitepinge ning mootoris pöörlemise tõttu indutseeritav vastu-elektromotoorjõud. Toitepinget reguleeritakse PWM signaali pulsilaiuse muutmisega. Efektiivne pinge võrdub akupinge ning PWM pulsi protsentuaalse pikkuse korrutisega (Valem 3.2) [31]. Mootori vastu-elektromotoorjõud on arvutatav mootori pöörlemissageduse ja vastu-elektromotoorjõu konstandi kaudu valemist 3.3 [7]. Eelnevat arvesse võttes on võimalik tuletada valem soovitava faasi-voolutugevusele vastava PWM pulsilaiuse protsentuaalse pikkuse leidmiseks, kui on teada akupinge, mootori faasi takistus, mootori pöörlemissagedus ning vastu-elektromotoorjõu konstant (Valem 3.4) [31].

$$I_{PH} = \frac{U_{PH}}{R_{PH}} \quad (3.1)$$

I_{PH} – faasi-voolutugevus (A)

R_{PH} – mootori kahe faasi vaheline takistus (Ω)

$$U_{PH} = (U_B * D) - E_M \quad (3.2)$$

U_{PH} – faasipinge (V)

U_B – akupinge (V)

D – PWM pulsilaius (%)

E_M – mootori vastu- elektromotoorjõud (V)

$$E_M = \frac{n}{kv} \quad (3.3)$$

n – pöörlemissagedus (min^{-1})

kv – kiiruse konstant (min^{-1}/V)

$$D = \frac{U_{PH} + E_M}{U_B} = \frac{(I_{PH,s} * R_{PH}) + \frac{n}{kv}}{U_B} \quad (\%) \quad (3.4)$$

$I_{PH,s}$ – soovitav faasi-voolutugevus (A)

4 OHUTUS

Kuna projekteeritav kontroll on mõeldud töötama suurel voolugevusel, on äärmiselt tähtis valmistamisel, testimisel ning kasutamisel tagada asjaosaliste isikute ning vara ohutus.

Kasutades üldlevinud mudelit, et inimese kahe käe vaheline takistus on umbkaudu 1000 Ω , läbiks 36 V toitepinge korral inimkeha $I = 36 \text{ V} / 1000 \Omega = 0,036 \text{ A}$ voolugevus. Kuigi 36 mA alalisvool kehas ei ole üldjuhul eluohtlik, on see tuntav ning sõltuvalt mõju kestusest võib see tekitada põletust. Kuna aga süsteemis on kasutusel PWM ning faase pingestatakse kahte pidi, on praktiliselt tegemist vahelduvvooluga. Kontroll lihaste üle hakkab inimesel kaduma vahelduvvoolu korral juba 5 mA voolugevuse korral ning üle 30 mA puhul võivad esineda hingamisraskused ning minestamine. Üle 50 mA vahelduvvool võib olla eluohtlik! [32]

Otsesest elektrišokist ohtlikumgi on kaudne vigastamine juhul, kui mõni trükkplaadi komponent läbi põleb. Võib tekkida leek ning esineda sulanud materjali pritsmed. Seepärast on oluline, et esmased testimised viidaks läbi kontrollitud, ohutus keskkonnas ning et kasutataks kaitsevahendeid (kaitseprillid, vajadusel elektrikukindad).

Kasutaja ohutuse tagamiseks on tähtis, et kontroll oleks suletud korpuses ning et toite- ja signaalijuhtmete ühenduspistikud hoiaksid ära kasutaja ning ka korpuse juhuslikku kokkupuudet klemmidega. Kontrollerile peavad olema märgitud selle toitepinge ning maksimaalne voolugevus. Kasutaja peab kontrollerit käsitlema hoolikalt, ühendama seadmega ainult sellele sobivad moodulid ning kasutama sobivat tüüpi akusid.

Töötades akudega, eriti just liitium-polümeer-akudega, tuleb jälgida, et akuvool ei ületaks selle lubatud piiri, et aku ei saaks üle kuumeneda ning et see ei saaks füüsiliselt kahjustada. Akude väärkasutus võib tekitada raskesti kustutatava leegi, ohtlikke aurusid ning võimalik on ka akupaki plahvatuslik lõhkemine.

Täpsemad kasutusjuhised koostatakse toote arenduse faasis, kus kontroll on tootmisvalmis ning esitatakse sertifitseerimiseks.

5 VALMISTAMISPROTSESS

5.1 Kasutatavad tehnoloogiad

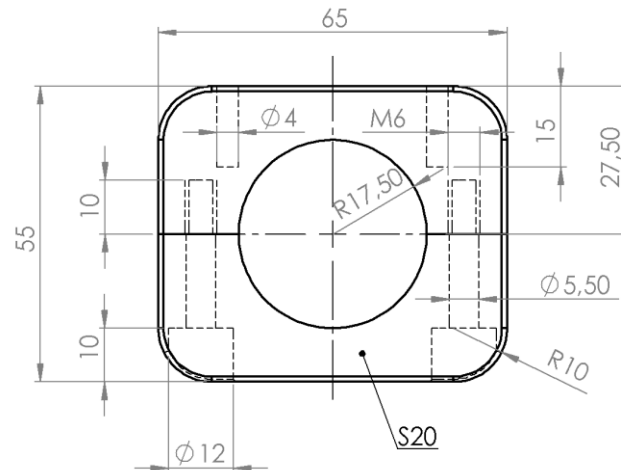
Kahepoolset trükkplaati valmistatakse tööstuses üldjuhul järgnevalt [33]:

1. Laminaadi kinnitusaukude puurimine
2. Skeemi aukude puurimine CNC freesiga
3. Skeemi kandmine laminaadile fotoaktiivse kihina
4. UV valgusega skeemi ilmutamine
5. Üleliigse vase eemaldamine söövituslahuses
6. Trükkplaadi katmine joodetava oksüdeerumisvastase kaitsekihiga
7. Trükkplaadi elektriline testimine
8. Lõpp-formaati lõikamine

Trükkplaate valmistatakse üldjuhul tellimustööna ning suures mahus. Prototüübi valmistamiseks on võimalik protsessi punktid 3-4 asemel printida skeem laserprinteriga fotopaberile ning paberit kuumutades kanda skeem üle trükkplaadi vasekihile. Võimalusel saab kasutada ka CNC-freesimist. Samuti võib esialgu ära jätta punkti 6.

Trükkplaadi komponentide jootmine käib tööstuses automaatsetel liinidel, kus radade kontaktosad kaetakse jootepastaga, komponendid jagatakse kassetidest trükkplaadile. Trükkplaat suunatakse edasi spetsiaalsesse kuumutusahju, kus jootepasta sulab ning komponendid joodetakse trükkplaadile. Sellist protsessi nimetatakse *reflow*-jootmiseks [34]. Prototüübi valmistamisel on võimalik komponendid plaadile joota ka käsitsi.

Radiaatoritega korpused valmistatakse üldiselt ekstrusiooni teel. Prototüübi puhul võib lihtsama profiiliga korpusele kinnitada lisaradiaatori näiteks epoksiit-liimiga või kruvidega. Korpuse avatud otsad suletakse alumiinium-lehtmest kaantega, mis kinnitatakse korpuse profiili külge kruvidega. Kaaned peaksid olema suletud hermeetiliselt, et takistada niiskuse ja tolmu sattumist korpusesse. Selleks tihendatakse kaante servad tihendite või hermeetilise liimiga. Korpus kinnitatakse jalgratta raami külge klambritega (Sele 5.1).

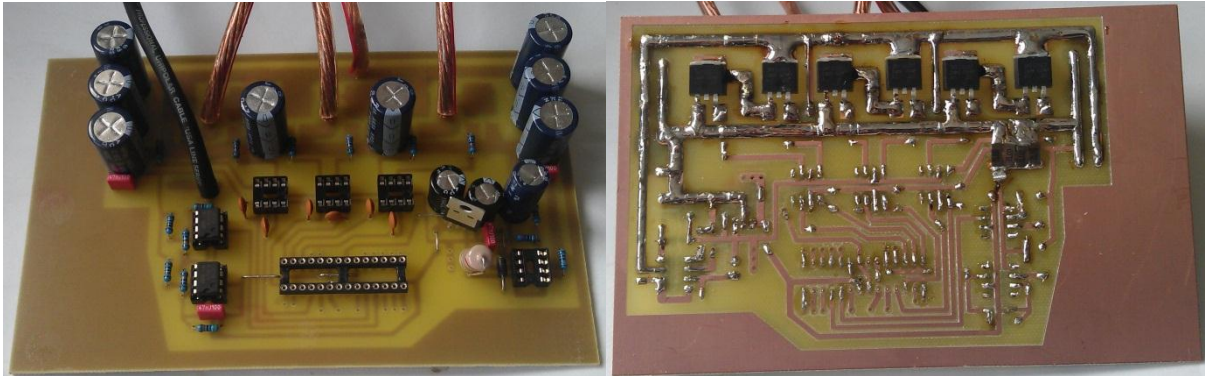


Sele 5.1. Kontrolleri korpuse kinnitusklamber

5.2 Esimene prototüüp

Käesolevas töös kirjeldatav kontrolleri skeem (Lisa 2) ja sellele vastava trükkplaadi kihtide laotused (Lisa 3) on esialgse variandi edasiarendused. Projekti raames valmis esimene prototüüp skeemi algse versiooni põhjal. Kuigi prototüübiga saadi projektis valitud mootor pöörlema, ei töötanud see siiski korrektselt, kuna kõiki transistore juhiti madalale poolele mõeldud draiveritega, ning seetõttu ei avanenud kõrge poole transistorid täielikult, põhjustades ülekuumenemist ja mootori ebaühtlase töö. Prototüübiga ei õnnestunud seega mootorit pikaajaliselt käitada. Esialgse prototüübi puhul kasutati mikrokontrolleris kuut erinevat PWM väljundit, mis tegi programmi ülesehituse uue versiooniga võrreldes tunduvalt keerulisemaks. Uues versioonis jäid prototüübiga võrreldes samaks 12 V ja 5 V toite osad.

Prototüübi trükkplaat oli ühepoolne ning see valmistati CNC-freesimise teel, isoleerides vaskrajad ülemäärase vase ärafreesimise teel. Prototüübi trükkplaat on toodud seel 5.2. Kuna mootorit ei olnud võimalik käitada koormuse all, ei olnud ka võimalust veenduda voolujälgija skeemi töökindluses ja täpsuses suure voolutugevuse korral. Sellegipoolest oli voolujälgija väljundi signaal mõõdetav ka mootori tühikäigul.



Sele 5.2. Esimese prototüübi trükkplaat

KOKKUVÕTE

Käesoleva bakalaureusetöö raames projekteeriti harjadeta alalisvoolumootori juhtkontroller, millel on nii raudvaraline voolupiiraja kui ka tarkvaralise voolupiiramise võimalus. Kontroller on mõeldud kasutamiseks elektrijalgrataste kuni 1 kW pidev-võimsusega mootoriga. Projekteeritud kontroller võimaldab ka regeneratiivset pidurdamist. Samuti on välja pakutud mootor ning ülekanne kerge ning suhteliselt odava süsteemi projekteerimiseks, mis oleks mõeldud jalgrataste ümberehitamiseks elektriajamile.

Projekteerimist alustati juhitava mootori ning kontrollerile esitatavatest nõuete valikust, seejärel tehti valik kontrolleri elektrilistele parameetritele. Parameetrite ja nõuete põhjal määrati kontrolleri ülesehitus ja põhilised osad.

Projekteerimise käigus tutvuti põhjalikult MOSFET-tüüpi transistoride valiku põhimõtetega ning tehti põhjendatud valik transistoridele, mikrokontrollerile ning voolupiiraja komponentidele. Tehti arvutused võimsuskadude määramiseks transistorides ning jahutusvajaduse leidmiseks ning pakuti välja sobiv lahendus. Lisaks uuriti harjadeta alalisvoolumootorite juhtimiseks kasutatavaid PWM lülituse variante, et võimaldada regeneratiivset pidurdamist.

Kontrolleri juhtimiseks valiti lihtsalt programmeeritav mikrokontroller ning selle juhtprogrammi on võimalik muuta ning häälestada vastavalt kasutatavale mootorile, akudele või valmistaja tahtele. Koostati ka esialgne juhtprogramm, millega on realiseeritud pöördemomendi juhtimine gaasi sisendiga ning faasivoolu piiramine.

Käesolevas töös esitatud elektroonikaskeemis võib esineda vigu, kuna skeemi antud versiooni ei ole töö kirjutamise jooksul realiseeritud ega testitud. Pärast testimist ning võimalike vigade likvideerimist on aga võimalik projekti põhjal valmistada töötav prototüüp.

Kontrolleri projekteerimine andis hea ettekujutuse väiksemõõdulise jõuelektroonika ehituse ning harjadeta alalisvoolumootorite juhtimise iseärasustest. Kasuks tuli ka erinevate juhtimisalgoritmidega ning regeneratiivse pidurdamise teooriaga tutvumine.

SUMMARY

This bachelor's thesis presents the design of a brushless DC motor controller with hardware-based current limiting and the option of monitoring and limiting battery current in software. The controller is designed for electric bicycle motors with up to 1 kW of power. The controller enables the use of regenerative braking. The thesis also presents the selection of a motor and power transmission method for one possible solution for converting conventional bicycles to electrical drive bicycles.

The design process started with setting the requirements for the controller, after which the main electrical characteristics were chosen. The controller's structure and main parts were then decided, based on the chosen parameters and requirements.

In the process of designing the controller, the principles of choosing MOSFET transistors were studied, and suitable transistors, microcontroller and current limiter components were selected accordingly. Power loss in transistors was calculated, and appropriate cooling system was selected. Different PWM switching schemes for controlling BLDC motors were also compared, and the selection was made so that regenerative braking would be possible.

A programmable microcontroller was chosen for the motor controller, to make it customizable and tunable for use with different motor models and batteries. An initial program was written for the microcontroller, which would offer torque control using throttle input and motor current limiting.

The electrical schematic presented in this thesis may contain errors, as this version of the schematic was not realized or tested during the part of the design process described in this thesis. The schematic needs testing and correction of possible errors before practical use would be possible.

The design process of the motor controller gave a good overview of small scale power electronics and the aspects of controlling BLDC motors. Learning about the different possible control schemes of BLDC motors and theory of regenerative braking was also very useful.

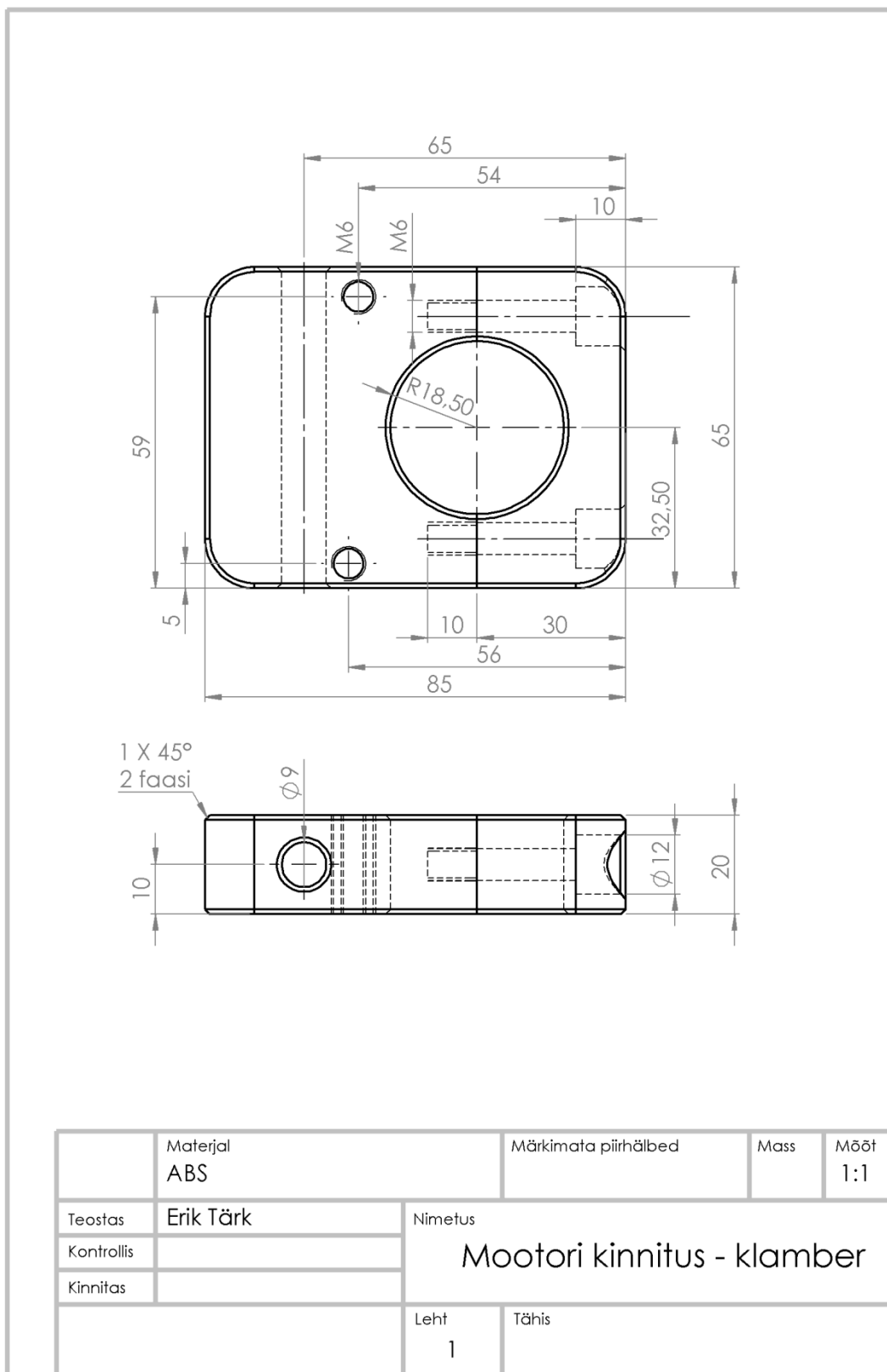
KASUTATUD KIRJANDUS

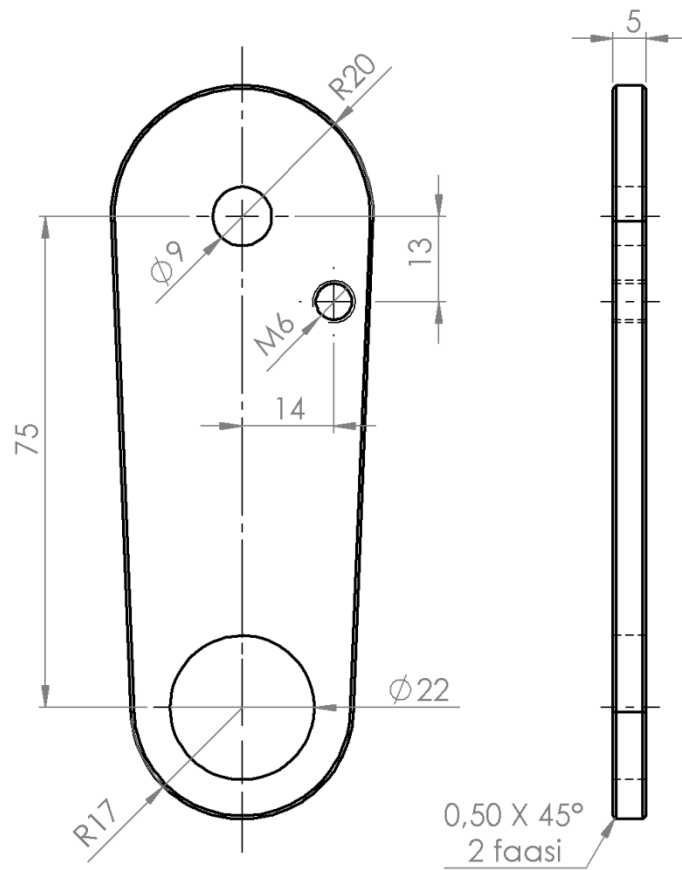
- [1] Endless-Sphere [WWW] <http://endless-sphere.com> (20.05.2014)
- [2] EN-15194 [WWW] http://www.vae-enov.com/fiches_2010/norme_en_15194.pdf (28.04.2014)
- [3] Insurance Corporation of British Columbia [WWW] <http://www.icbc.com/registration-licensing/specialty-vehicles/low-powered/motor-assisted> (28.04.2014)
- [4] Liiklusseadus §2 p14 [WWW] <https://www.riigiteataja.ee/akt/125052012009> (28.04.2014)
- [5] Electric Bike Solutions [WWW] <http://http://www.ebike-solutions.de> (01.12.2013)
- [6] Hobbyking.com [WWW] <http://www.hobbyking.com> (01.12.2013)
- [7] Turnigy Aerodrive SK3-6374-149kv [WWW] http://hobbyking.com/hobbyking/store/__36656__Turnigy_Aerodrive_SK3_6374_149kv_Brushless_Outrunner_Motor_EU_warehouse_.html?strSearch=sk3-6374-149 (28.04.2014)
- [8] Crystalyte HS3540 [WWW] http://shop.crystalyte-europe.com/product.php?productid=16447&mode=download&file_id=74 (28.04.2014)
- [9] Electric Bicycle Motor Mounting Positions [WWW] <http://www.electric-bicycle-guide.com/electric-bicycle-motor.html> (28.04.2014)
- [10] Motorcycle Final Drive Systems (Chain, Belt and Shaft) [WWW] http://www.chuckhawks.com/motorcycle_drive_systems.htm (28.04.2014)
- [11] Commuter Booster [WWW] <https://sites.google.com/site/commuterbooster> (19.05.2014)
- [12] Kreuzotter.de [WWW] <http://www.kreuzotter.de/english/espeed.htm> (19.05.2014)
- [13] Power-Torque [WWW] http://www.wentec.com/unipower/calculators/power_torque.asp (19.05.2014)
- [14] Synchronous buck MOSFET loss calculations with Excel model [WWW] <https://www.fairchildsemi.com/an/AN/AN-6005.pdf> (28.04.2014)
- [15] Multitronic Build-A-Box [WWW] http://www.rose-bopla.com/PDF_Files/Ch_03_BAB/Multitronic/MultitronicBuild-A-Box07-2012.pdf (22.04.2014)
- [16] ABL Heatsinks [WWW] <http://www.abl-heatsinks.co.uk/index.php?page=extrudedproduct&product=165> (22.04.2014)
- [17] A New Approach for Torque Ripple Minimization in Brushless DC Motor Using SEPIC Converter [WWW] <http://www.omicsgroup.org/journals/a-new-approach-for-torque-ripple-minimization-in-brushless-dc-motor-using-sepic-converter-2167-101X.1000106.pdf> (01.05.2014)

- [18] IGBT or MOSFET: Choose Wisely [WWW] <http://www.irf.com/technical-info/whitepaper/choosewisely.pdf> (01.12.2013)
- [19] Elfa Distrelec AS [WWW] <https://www.elfa.se> (03.12.2013)
- [20] Power MOSFET Basics [WWW] <http://www.irf.com/technical-info/appnotes/mosfet.pdf> (04.12.2013)
- [21] IRFS3306 [WWW] https://www1.elfa.se/data1/wwwroot/assets/datasheets/irfs3306pbf_eng_tds.pdf (04.12.2013)
- [22] Current control removes brushless DC motor commutation spikes [WWW] http://www.eetasia.com/ARTICLES/2005OCT/B/2005OCT17_CTRLD_POW_TA.pdf (03.12.2013)
- [23] Introduction to Brushless DC (EC) Motor and Gearmotor Technology [WWW] <http://gearmotorblog.wordpress.com/2013/08/06/brushless-dc-gearmotors/> (30.04.2014)
- [24] IRS2108 [WWW] https://www1.elfa.se/data1/wwwroot/assets/datasheets/irs2108_eng_tds.pdf (24.04.2014)
- [25] HEF4081BT [WWW] https://www1.elfa.se/data1/wwwroot/assets/datasheets/fq648861-648862_e.pdf (24.04.2014)
- [26] Atmel ATmega 328 [WWW] <http://www.atmel.com/Images/doc8161.pdf> (15.05.2014)
- [27] Koma.ee sulavkaitsmed [WWW] <http://koma.ee/ee/products/index/SULAV> (14.05.2014)
- [28] American Wire Gauge (AWG) & Metric Gauge Wire Sizes [WWW] http://web.hep.uiuc.edu/home/serrede/P436/Lecture_Notes/American_Wire_Gauge.pdf (14.05.2014)
- [29] Finding Motor Phase-Sensor Combinations [WWW] <http://e0designs.com/documentation/finding-motor-phase-sensor-combinations> (14.05.2014)
- [30] Influence of PWM Schemes and Commutation Methods for DC and Brushless Motors and Drives [WWW] http://www.drivetechinc.com/articles/SW_BLDCAC5.PDF (24.04.2014)
- [31] AVR493 [WWW] <http://www.atmel.com/Images/doc7658.pdf> (19.05.2014)
- [32] A Guide To Electrical Safety [WWW] <http://www.nclabor.com/osha/etta/indguide/ig18.pdf> (15.05.2014)
- [33] Single & Double Sided PTH PCB [WWW] <http://www.clarydon.com/manufacturing/single-double-sided-pcb> (15.05.2014)
- [34] Surface mount reflow soldering [WWW] http://www.nxp.com/documents/application_note/AN10365.pdf (15.05.2014)
- [35] Premier Farnell UK [WWW] <http://ee.farnell.com> (17.05.2014)

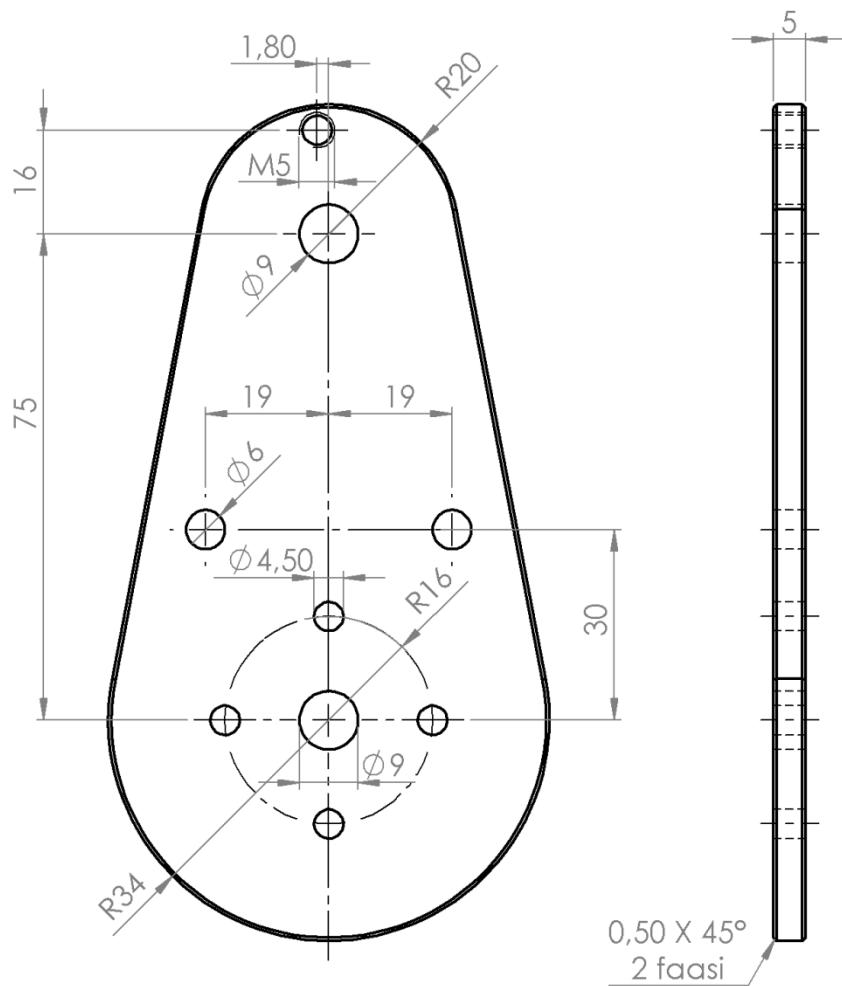
LISAD

Lisa 1: Mootori lisadetailid

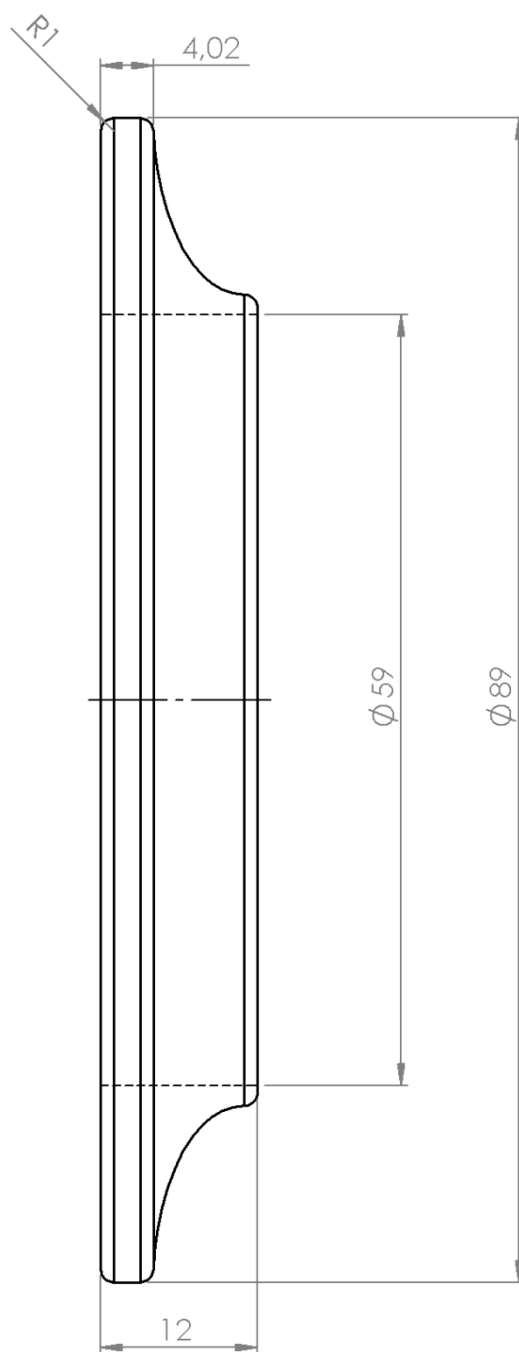




| | | | | |
|------------|-----------------------------|---|------|-------------|
| | Materjal Alumiiniumsulam | Märkimata piirhälbed | Mass | Mõõt 1:1 |
| Teostas | Erik Tärk | Nimetus Mootori kinnitus - detail 1 | | |
| Kontrollis | | | | |
| Kinnitas | | | | |
| | Leht 2 | Tähis | | |



| | | | | |
|------------|-----------------------------|---|-------|-------------|
| | Materjal Alumiiniumsulam | Märkimata piirhälbed | Mass | Mõõt 1:1 |
| Teostas | Erik Tärk | Nimetus Mootori kinnitus - detail 2 | | |
| Kontrollis | | | | |
| Kinnitas | | | | |
| | | Leht 3 | Tähis | |



| | | | | |
|------------|-----------------|--------------------------------------|-------|-------------|
| | Materjal ABS | Märkimata piirhälbed | Mass | Mõõt 2:1 |
| Teostas | Erik Tärk | Nimetus Mootori mudakaitse | | |
| Kontrollis | | | | |
| Kinnitas | | | | |
| | | Leht 1 | Tähis | |

Lisa 2: Elektroonikaskeem

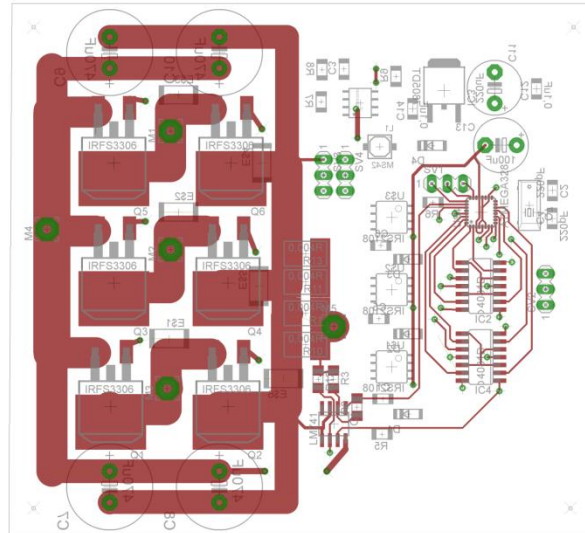
Elektroonikaskeemi joonestamiseks kasutati tarkvara CadSoft EAGLE 6.5.0.

Elektroonikaskeem ei ole lõplik – voolupiiraja takistite takistused valitakse vastavalt soovitavale piir-voolutugevusele. Samuti ei ole skeemil näidatud trükkplaadiväliseid osi, nagu mootor, gaasi potentsiomeeter, piduri lüliti ning akud koos sulavkaitsmega.

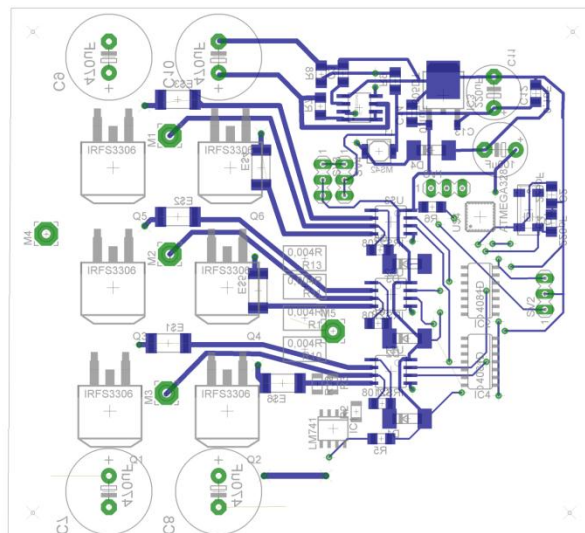
Lisa 3: Trükkplaadi joonised

Trükkplaadi jooniste koostamiseks kasutati tarkvara CadSoft EAGLE 6.5.0.

Ülemine laotus



Alumine laotus

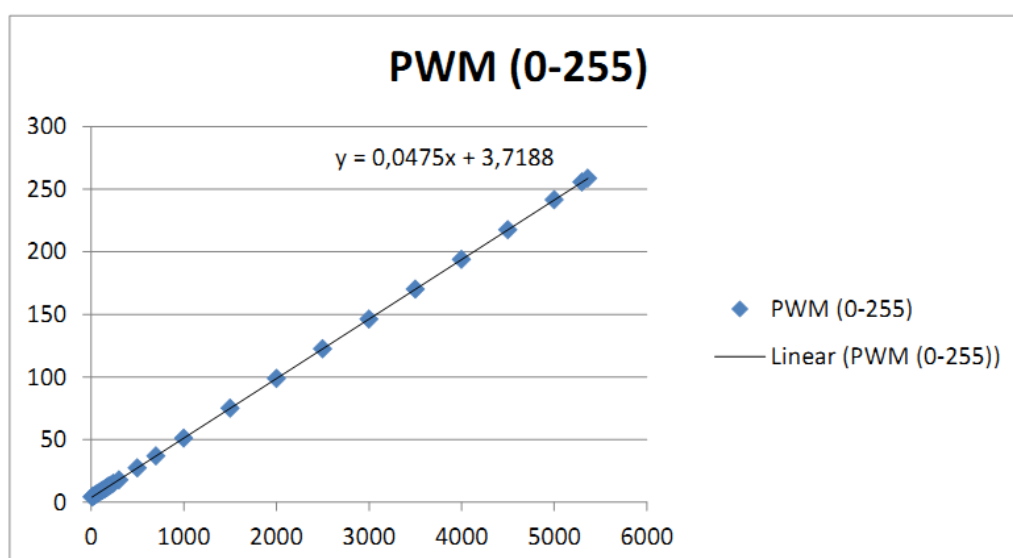


| | Materjal | Märkimata piirhälbed | Mass | Mõõt 1:1 |
|------------|-----------|----------------------|-------|-------------|
| Teostas | Erik Tärk | Trükkplaadi laotused | | |
| Kontrollis | | | | |
| Kinnitas | | | | |
| | | Leht 1 | Tähis | |

Lisa 4: Pulsilaiuse arvutus

| | |
|------------------|-------|
| R_{PH}, Ω | 0,021 |
| k_v | 149,0 |
| U_B, V | 36,0 |
| $I_{PH, max}, A$ | 25,0 |

| n, min^{-1} | E_M, V | U_{max} | $D_{max}, \%$ | PWM (0-255) |
|----------------------|----------|-----------|---------------|-------------|
| 10 | 0,07 | 0,59 | 1,64% | 4 |
| 20 | 0,13 | 0,66 | 1,83% | 5 |
| 40 | 0,27 | 0,79 | 2,20% | 6 |
| 60 | 0,40 | 0,93 | 2,58% | 7 |
| 80 | 0,54 | 1,06 | 2,95% | 8 |
| 110 | 0,74 | 1,26 | 3,51% | 9 |
| 125 | 0,84 | 1,36 | 3,79% | 10 |
| 150 | 1,01 | 1,53 | 4,25% | 11 |
| 170 | 1,14 | 1,67 | 4,63% | 12 |
| 190 | 1,28 | 1,80 | 5,00% | 13 |
| 210 | 1,41 | 1,93 | 5,37% | 14 |
| 240 | 1,61 | 2,14 | 5,9% | 15 |
| 300 | 2,01 | 2,54 | 7,1% | 18 |
| 500 | 3,36 | 3,88 | 10,8% | 27 |
| 700 | 4,70 | 5,22 | 14,5% | 37 |
| 1000 | 6,71 | 7,24 | 20,1% | 51 |
| 1500 | 10,07 | 10,59 | 29,4% | 75 |
| 2000 | 13,42 | 13,95 | 38,7% | 99 |
| 2500 | 16,78 | 17,30 | 48,1% | 123 |
| 3000 | 20,13 | 20,66 | 57,4% | 146 |
| 3500 | 23,49 | 24,01 | 66,7% | 170 |
| 4000 | 26,85 | 27,37 | 76,0% | 194 |
| 4500 | 30,20 | 30,73 | 85,4% | 218 |
| 5000 | 33,56 | 34,08 | 94,7% | 241 |
| 5300 | 35,57 | 36,10 | 100,3% | 256 |
| 5362 | 36,0 | 36,51 | 101,4% | 259 |



Lisa 5: Võimsuskaos arvutus

$$E_{SW} = \frac{V_{IN} * I_{OUT}}{2} * t_{SW} \quad (L5.1)$$

E_{SW} – ümberlülituseks kuluv energia (J)

V_{IN} – transistori lähe-suue pinge (V)

I_{OUT} – transistori poolt lülitatav maksimaalne voolutugevus (A)

t_{SW} – lülituseks kuluv aeg (s)

MOSFET-tüüpi transistori ümberlülituseks kuluv aeg sõltub selle paisu mahtuvusest ning seda laadiva voolu tugevusest (Valem L5.2) [14].

$$t_{SW} = \frac{Q_{G(SW)}}{I_{driver}} \quad (L5.2)$$

Q_G – paisu mahtuvus (C)

I_{driver} – transistori paisu juhtvool (A)

MOSFET-transistori lülitamiseks on vaja täita paisu mahtuvus, mis koosneb pais-lähe ning pais-suue mahtuvustest (Valem L5.3, Sele 1.4) [14].

$$Q_{G(SW)} = Q_{GD} + \frac{Q_{GS}}{2} \quad (L5.3)$$

Q_{GD} = pais-suue mahtuvus (C)

Q_{GS} = pais-lähe mahtuvus (C)

Paisu juhtvool lülituse ajal arvutatakse lülituse hetkel paisule mõjuva pinge ning paisu takisti ning paisu sisetakistuse summa suhtena Oomi seadusest (Valem L5.4) [14].

$$I_{driver} = \frac{V_{DD} - V_{SP}}{R_{driver} + R_{gate}} \quad (L5.4)$$

V_{DD} – paisu juhtpinge (V)

V_{SP} – paisule mõjuv pinge lülituse hetkel (V)

R_{driver} – paisu takisti takistus (Ω)

R_{gate} – paisu sisetakistus (Ω)

$$V_{SP} \approx V_{TH} + \frac{I_{OUT}}{gfs} \quad (L5.5)$$

V_{TH} – transistori paisu piirpinge (V)

I_{OUT} - transistori poolt lülitatav maksimaalne voolutugevus (A)

gfs – ülekandejuhitivus (S, A/V)

Võimsuskadu kahe lülituse (*off-on ja on-off*) vältel maksimaalse lülitatava voolutugevuse korral:

$$V_{SP} \approx 4,0 + \frac{50}{230} \approx 4,21 \text{ V}$$

$$I_{driver} = \frac{12 - 4,21}{40 + 0,7} = 0,19 \text{ A}$$

$$Q_{G(SW)} = 2,6 * 10^{-8} + \frac{2,0 * 10^{-8}}{2} = 3,6 * 10^{-8} \text{ C}$$

$$t_{SW} = \frac{3,6 * 10^{-8}}{0,19} \approx 1,9 * 10^{-7} \text{ s}$$

$$E_{SW} = \frac{36 * 50}{2} * 1,9 * 10^{-7} = 1,7 * 10^{-4} \text{ J}$$

$$P_{SW} = 2 * 1,71 * 10^{-4} * 32000 \approx 10,9 \text{ W.}$$

Lisa 6: Juhtprogramm

```
#include <avr/io.h>
#include <avr/interrupt.h>
#include <micros.h>

#define true 1
#define false 0

#define TH_DDR DDRC
#define BR_DDR DDRD
#define CU_DDR DDRC
#define TR_DDR DDRD
#define PWM_DDR DDRB
#define HALLS_DDR DDRC
#define TH_IN PINC
#define BR_IN PIND
#define CU_CH PC3 //Voolutugevuse signaali sisend
#define HALLS_IN PINC
#define HALLS_OUT PORTC
#define COMM_OUT PORTD
#define PWM_OUT PORTB
#define TH_CH PC4 //Gaasi signaali sisend
#define BR_CH PD7 //Piduri signaali sisend
#define H0_CH PC0 //Halli sensori sisendid
#define H1_CH PC1
#define H2_CH PC2
#define ADC_TH 0x04
#define ADC_CU 0x03
#define PWM_L_CH PB1 //Madala poole PWM pin
#define PWM_H_CH PB2 //Kõrge poole PWM pin
#define PWM_L OCR1A //Madala poole PWM register
#define PWM_H OCR1B //Kõrge poole PWM register
#define Sa_CH PD0 //A-faasi kõrge poole transistor
#define Sb_CH PD1 //B-faasi kõrge poole transistor
#define Sc_CH PD2 //C-faasi kõrge poole transistor
#define Sa__CH PD3 //A-faasi madala poole transistor
#define Sb__CH PD4 //B-faasi madala poole transistor
#define Sc__CH PD5 //C-faasi madala poole transistor

#define POLEPAIRS 7
#define kv 149
#define Rph 0.0021

//*****
//Globaalsed muutujad
//*****
uint8_t commTable[8]={0,0x21,0x0a,0x22,0x14,0x11,0x0c,0}; //Kommutatsioonitabel
uint8_t constantRegenBrake = true; //Väär - pidurduse tugevus oleneb gaasist
uint8_t regenBrakeVal = 64; //Konstantse pidurdustugevuse määr
uint8_t brakePressed = true;
uint8_t halls_last = 0; //Sensorite viimane olek
uint8_t throttle = 0;
uint8_t bat_current = 0;
uint8_t ADC_last_read = 0;
unsigned long micros_last_com = 0; //viimase kommutatsiooni aeg
unsigned int RPM = 0;
float Imax = 25;
float Ub = 36;
int revConst = (1000U*60)/(6*POLEPAIRS);
```



```

//*****Programmi meetodid*****

void readADC (uint8_t channel){
    if(ADCSRA & (1<<ADSC))
        return; //Kui hetkel toimub lugemine, jäta vahele

    ADMUX &= 0xf0; //Seadete nullimine
    ADMUX |= channel&0x07; //Loetava sisendi valik
    ADMUX |= (1<<ADLAR); //Tulemuse vasakjoondus
    ADCSRA |= (1<<ADSC); //Tulemuse lugemine

    ADC_last_read = channel;
}

uint8_t getMaxPWM (void){ //Arvuta maksimaalne PWM pulsilaius
    float D = 0;
    D = ((Imax*Rph)+(RPM/kv))/Ub;
    uint8_t maxPWM = 255*D;
    return maxPWM;
}

void setPWMDuty (uint8_t val, uint8_t brake){
    uint8_t val_last = 0; //Muutuja viimase olekuga
    uint8_t s = 1; //Märgimuutuja (1 või -1)
    if(val != val_last){ //Ainult juhul, kui väärtus muutub
        if(brake) s = -1; //Teosta regeneratiivset pidurdamist

        if (val==0){ //Kui gaas on 0, nulli signaalid
            PWM_L = 0;
            PWM_H = 0;
        }
        else{
            float perc = val/255;
            uint8_t pwm = (uint8_t)(getMaxPWM()*perc/2); //Pulsilaius gaasi ja maksimaalse laiuse põhjal.
            PWM_L = 127-s*pwm; //Madala poole PWM, inverteeritud
            PWM_H = 127+s*pwm; //Kõrge poole PWM
        }

        val_last = val;
    }
}

void readThrottle (void){
    readADC(ADC_TH); //Loe gaasi väärtus
}

void readCurrent (void){
    readADC(ADC_CU); //Loe voolutugevuse väärtus
}

void readBrake (void){
    if(BR_CH == 1) brakePressed = true; //Loe piduri olek
    else brakePressed = false;
}

uint8_t readHalls (void){
    return HALLS_IN & ((1<<H0_CH)&(1<<H1_CH)&(1<<H2_CH)); //Uue oleku lugemine
}

```

```

void commutate (void){
    if(micros_last_com == 0) micros_last_com = micros();

    uint8_t halls = readHalls();           //Loe Hall'i andurite olek
    if(halls != halls_last){              //Juhul, kui olek on muutunud

        micros_last_com = micros();

        COMM_OUT &= commTable[halls];     //Kommutatsioon
        halls_last = halls;                //Viimase oleku salvestamine
        //*****Kiiruse arvutus*****
        long microsPassed = micros() - micros_last_com;
        int temp = 1000*(revConst/(microsPassed));
        RPM = temp;

    }
}

ISR (ADC_vect){                          //ADC lugemine õnnestus
    if(ADC_last_read == ADC_TH){         //Kui viimati käivitati gaasi lugemine
        uint8_t temp = ADCH;
        if(throttle != temp){
            throttle = temp;             //Uuenda gaasi muutuja
            if(brakePressed & constantRegenBrake)
                temp = regenBrakeVal;    //Konstantse pidurdustugevuse korral

            float val = (temp/255)*getMaxPWM();
            setPWMDuty ((uint8_t)val, brakePressed);
        }
    }
    else if(ADC_last_read == ADC_CU){    //Kui viimati käivitati voolu lugemine
        bat_current = ADCH;              //Uuenda akuvoolu muutuja
    }
}

ISR (PCINT1_vect){                       //Gaasi ja halli andurite katkestus (PORTC)
    commutate();
    readThrottle();
}

ISR (PCINT2_vect){                       //Piduri katkestus (PORTD)
    brakePressed = false;                //Algväärtusta muutuja
    if(TH_CH == 1) brakePressed = true;  //Kui vajutatakse pidurit, muuda tõseks
}

```

```

//*****Seadistus*****

void setup (void){
  //Sisendid-väljundid
  TH_DDR &= ~(1<<TH_CH);
  BR_DDR &= ~(1<<BR_CH);
  HALLS_DDR &= ~((1<<H0_CH)&(1<<H1_CH)&(1<<H2_CH));
  CU_DDR &= ~(1<<CU_CH);
  PWM_DDR |= (1<<PWM_H_CH)&(1<<PWM_L_CH);
  TR_DDR |= (1<<Sa_CH)&(1<<Sb_CH)&(1<<Sc_CH)&(1<<Sa__CH)&(1<<Sb__CH)&(1<<Sc__CH);

  //Hall'i sensorite pull-up'id
  HALLS_OUT |= ((1<<H0_CH)&(1<<H1_CH)&(1<<H2_CH));

  //PWM seadistus
  TCCR1A |= (1<<WGM10); //8-bitine sümmeetriline PWM
  TCCR1A |= (1<<COM1A1); //Madala poole PWM, inverteeritud
  TCCR1A |= (1<<COM1B0)|(1<<COM1B1); //Kõrge poole PWM
  PWM_L = 0;
  PWM_H = 0;

  //ADC seadistus
  ADCSRA |= (1<<ADPS0)|(1<<ADPS1); //Sageduse kordaja 1/8
  ADCSRA |= (1<<ADEN); //ADC lubatud
  ADCSRA |= (1<<ADSC); //Esimene lugem

  //Katkestuste seadistus
  PCICR |= (1<<PCIE1)|(1<<PCIE2); //Luba vajalikud katkestused
  PCMSK1 |= (1<<PCINT8)|(1<<PCINT9)|(1<<PCINT10)|(1<<PCINT12); //Katkestajate valik PORTC
  PCMSK2 |= (1<<PCINT23); //Katkestajate valik PORTD (pidur)
  ADCSRA |= (1<<ADIFSC); //Luba ADC katkestus
  sei(); //Lülita katkestused sisse

  //Algväärtustamine
  micros_last_com = micros();
}

//*****Programmi põhimeetod*****

int main (void){
  setup(); //Seadistused

  static unsigned long micros_last;
  micros_last = micros();
  //*****Põhikordus*****
  while(true){
    if(micros() <= micros_last+1000){
      readCurrent(); //Loe aku-voolutugevus iga 1 ms järel

      long microsFromCom = micros() - micros_last_com;
      if(microsFromCom > 150000L) RPM = 0; //Kui kommutatsiooni ei ole toimunud, mootor seisab.
    }
  }
}

```