



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOO
INSENERITEADUSKOND

ELEKTROENERGEETIKA JA MEHHATROONIKA INSTITUUT

EE40LT

ALALISVOOLUMOOTORI ÕPPEMAKETI VÄLJATÖÖTAMINE

BAKALAUREUSETÖÖ

Üliõpilane: Kimmo Epler

Üliõpilaskood: 142914MAHB

Juhendaja: Lauri Kütt

Tallinn, 2017

AUTORIDEKLARATSIOON

Deklareerin, et käesolev lõputöö on minu iseseisva töö tulemus.

Esitatud materjalide põhjal ei ole varem akadeemilist kraadi taotletud.

Lõputöös kasutatud kõik teiste autorite tööd ja seisukohad ning materjalid on varustatud vastavate viitadega.

Töö valmis juhendamisel

“.....” 201....a.

Töö autor:

/allkiri/

Töö vastab lõputööle esitatavatele nõuetele

“.....” 201....a.

Juhendaja:

/allkiri/

Lubatud kaitsmisele

“.....” 201....a.

..... õppekava lõputööde kaitsmiskomisjoni esimees:

/allkiri/

BSc LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

2017. aasta kevad semester

Üliõpilane: Kimmo Epler, 142914MAHB

Õppekava: MAHB02/13

Eriala: Mehhatroonika

Juhendaja: programmi juht, professor Lauri Kütt

Konsultandid:

LÕPUTÖÖ TEEMA:

Alalisvoolumootori õppemaketi väljatöötamine

Development of Direct Current Motor Educational Kit

Töös lahendatavad ülesanded ja nende täitmise ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Täitmise tähtaeg
1.	Mehaanilise osa välja töötamine	25. märts
2.	Elektroonika ja IT osa välja töötamine	15. aprill
3.	Lõputöö kirjutamine	15. mai
4.	Lõputöö vormistamise lõpetamine	24. mai
5.		

Lahendatavad insenertehnilised ja majanduslikud probleemid:

Alalisvoolumootori töö parimal viisil visualiseerimine, Valgusdiodidega magnetvälja tugevuse ja polaarsuse indikeerimine, Elektromagnetitega piisavalt suure magnetvälja tugevuse tekitamine mootori pöörlema minemiseks.

Täiendavad märkused ja nõuded:

Töö keel: Eesti keel

Kaitsmistaotlus esitada hiljemalt

Töö esitamise tähtaeg

Üliõpilane Kimmo Epler

/allkiri/ Kuupäev

Juhendaja: Lauri Kütt

/allkiri/ Kuupäev

SISUKORD

SISUKORD	4
EESSÕNA	6
SISSEJUHATUS	7
1. ALALISVOOLUMOOTORI TÖÖPÕHIMÕTE	8
1.1 Elektrimasina füüsikalised alused	8
1.2 Harjadega alalisvoolumootor	11
1.3 Harjadeta alalisvoolumootor	14
2. ALALISVOOLUMOOTORI ÕPPEMAKETI MEHAANIKA	17
2.1 Õppemaketi mehaanika üldkirjeldus	17
2.2 Staator	17
2.2.1 Pooli konstruktsioon	18
2.2.2 Terassüdamiku konstruktsioon.....	20
2.3 Rotor.....	22
2.3.1 Laagrid ja võll	22
2.3.2 Harjadeta rootoripea konstruktsioon	23
2.3.3 Harjadeta rootoripea FEMM analüüs	24
2.4 Mootori korpuse konstruktsioon	25
3. POOLI ELEKTER, ELEKTROONIKA JA PROGRAMMEERIMINE	27
3.1 Solenoidid.....	27
3.2 Pooli trükkplaat.....	29
3.3 Mikrokontrolleri ATTiny 45 programmeerimine	32
4. ALALISVOOLUMOOTORI ÕPPEMAKETI EDASIARENDUSED	38
4.1 Mehaanika edasiarendused	38
4.2 Elektri ja elektroonika edasiarendused	39
4.3 Programmeerimise edasiarendused	40
KOKKUVÕTE	41
SUMMARY	42
KASUTATUD ALLIKAD	44
LISA 1 STANDARDSETE LIISTUDE TABEL.....	48
LISA 2 POOLI ELEKTROONIKAPLAADI KOMPONENTIDE NIMEKIRI	49

LISA 3 ELEKTROONIKAPLAADI ELEKTRISKEEM	50
LISA 4 TRÜKKPLAADI KOMPONENTIDE PAIGUTUSSKEEMID	51
LISA 5 SOLENOIDI MAGNETVÄLI POLDIGA JA ILMA	52
LISA 6 ATTINY 45 PROGRAMMEERIMISE ALGORITM	53

EESSÕNA

Töö teema arenes välja Tallinna Tehnikaülikooli poolt algatatud projektist ehitada õppemakett erinevate mootori tüüpide visualiseerimiseks. Projekti esimene etapp on visualiseerida alalisvoolumootorite tööd. Lõputöö koostamine ja algandmete kogumine toimus TTÜ Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituudis.

Lõputöö on valminud tänu Tallinna Tehnikaülikooli professori Lauri Kütti juhendamisele. Tänan juhendajat hea juhendamise ja tööruumi kasutamise võimaluse eest.

SISSEJUHATUS

Tallinna Tehnikaülikooli mitmetes elektriga seotud teemasid käsitlevates loengutes napib hetkel praktilisi näiteid. Käesoleva lõputöö juhendaja pakkus välja võimaluse luua projekti raames uudne õppemakett, mille abil üliõpilastele elektri seaduspärasusi paremini praktilisel teel selgitada. Kindlasti on õppemakett avatud uste päeval kasulik näide Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituudi erialade sisu illustreerimiseks. Soovisin oma lõputöö jaoks lahendada probleemi, mis on praktilist laadi ning mille käigus õpin süvendatult tundma mootorite tööpõhimõtteid ja projekteerimise põhitõdesid. Viisin läbi õppemaketi koostamise projekti esimese osa ehk alalisvoolumootori visualiseerimislahenduste välja töötamise.

Lõputöö teooria osa kirjeldab elektrimasinate füüsikalisi aluseid, seaduseid ja reegleid. Täpsemalt on välja toodud alalisvoolumootorite liigid ja ehituse põhimõtted. Praktiline osa sõnastab lahti välja töötatud alalisvoolumootori komponentide lahendused ja nende olulised omadused mootori töö visualiseerimise juures. Veel on praktilises osas kirjeldatud pooli solenoidiga seotud arvutusi, pooli trükkplaadi välja töötamist ja trükkplaadil olevale mikrokontrollerile solenoidi magnetvälja visualiseerimiseks tehtud algoritmi. Viimane peatükk räägib olulistest komponentidest, mis on vaja veel välja töötada alalisvoolumootori õppemaketti täielikuks valmimiseks.

1. ALALISVOOLUMOOTORI TÖÖPÕHIMÕTE

1.1 Elektrimasina füüsikalised alused

Elektrilist energiat mehaaniliseks energiaks või vastupidi muundavaid masinaid nimetatakse elektrimasinateks. Elektrimasinaid on kahte tüüpi: generaatorid ja mootorid. Antud töö eesmärk on ehitada elektrilist energiat mehaaniliseks energiaks muundav elektrimasin ehk mootor. Füüsikast teada olevate faktide abil on võimalik seletada, kuidas tekivad elektrimasinas jõumoment ja pöörlemiskiirus.

Füüsikalise põhja seletamist tuleb alustada sellest, et asetades kahe püsिमagneti vahele vooluga juhtme mõjub sellele juhtmele jõud olenevalt voolu suunast. Jõudu, mis mõjub juhtmes ühele magnetväljas liikuvale laenguga osakesele nimetatakse hollandi füüsiku Hendrik Antoon Lorentz'i (1853 – 1928) auks Lorentz'i jõuks. [1] Seda jõudu saab arvutada valemiga 1.1. [2]

$$F_L = q(E + v \times B) \quad (1.1)$$

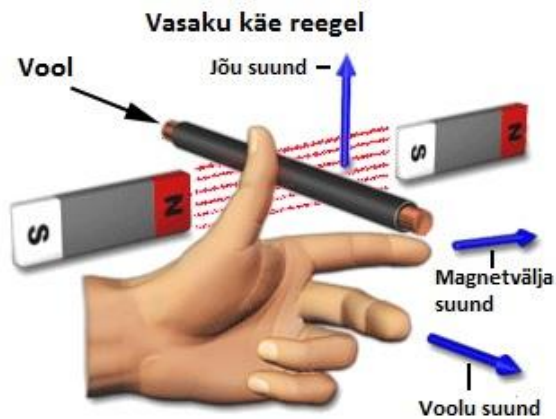
kus F_L - osakesele mõjuv jõud, N,
 q - osakese laeng, C,
 E - elektrivälja juhtmes, mida laengut kandev osake läbib, V/m,
 v - kiirus, millega laengut kandev osake läbib elektrivälja, m/s,
 B - juhet mõjutava magnetvälja magnetinduktsioon, T.

Teades Lorentz'i jõudu on võimalik arvutada tervele juhtmele mõjuvat jõudu. Selleks saab kasutada Ampere'i seadust, mis tähendab magnetväljas oleva juhtme osakeste arvu Lorentz'i jõuga korrutamist. Ampere'i seadust saab arvutada valemiga 1.2. [3]

$$F_A = B * I * l * \sin \alpha \quad (1.2)$$

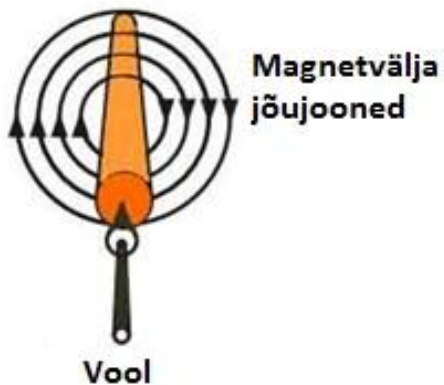
kus F_A - jõud, mis mõjub magnetväljas olevale vooluga juhtmele, N,
 B - juhet mõjutava magnetvälja magnetinduktsioon, T,
 I - juhet läbiv voolutugevus, A,
 l - juhtme pikkus, m,
 α - voolu suuna ja magnetvälja vaheline nurk, °.

Nende valemite visualiseerimiseks on pakutud välja vasaku käe reegel. Reegel näitab seda, et asetades käe nimetissõrme magnetvälja suunas ja keskmise sõrme juhtmest läbi minema voolu suunas, siis jõud mõjub juhtmele pöidla suunas (Sele 1.1).



Sele 1.1 Vasaku käe reegel [4]

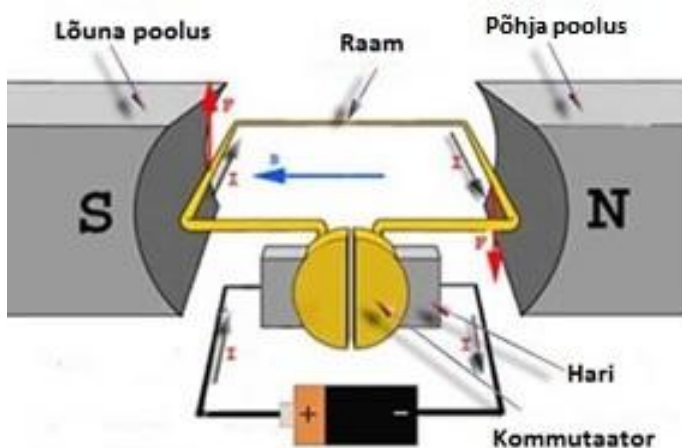
Vasaku käe reegli sisu kirjeldamiseks peab teadma, kuidas on paigutatud magnetvälja jõujooned ümber vooluga juhtme. Selleks on olemas kruvi reegel. Vaadates juhet voolu suunast, asetsevad magnetvälja jõujooned päripäeva ümber juhtme (Sele 1.2). Väline magnetväli proovib hoida magnetvälja jõujooni sirgjoonelisel. Juhtme magnetväli hakkab seda segama. Püsimagneti magnetväli saab alati juhtme magnetväljaga liituda, kas ülevalt või alt poolt juhet. Sellel poolel, kus magnetväljad on samasuunalised, on väli tugevam, kui teisel pool olev magnetväli ja lükkab juhtme püsimagnetite magnetväljast välja. Magnetvälja tugevus on proportsionaalne juhtmes oleva vooluga. Sellest saab järeldada, et andes juhtmele peale suurema voolu tekib tema ümber tugevam magnetväli. Magnetväli ümber juhtme on kõige tugevam juhtme lähedal ja kahaneb juhtmest kaugemale liikudes.



Sele 1.2 Kruvi reegel [5]

Teades magnetväljas vooluga juhtmele mõjuva jõu põhimõtet on võimalik tekitada kahe püsimagneti vahele juhtmega vooluring ehk raam (Sele 1.3). Selline voolu ringlus paneb juhtme otsima tasakaaluolekut, sest mõlemale poolele mõjuvad erinevas suunas jõud. Seades püsimagnetid horisontaalselt on juhtme tasakaaluolek vertikaalses asendis. Vahetades seejärel juhtme voolusuunda keerab juhe ennast ümber, sest mõjuvate jõudude suunad muutuvad sada kaheksakümmend kraadi. Sele 1.3 puhul toimub mootori raami voolu ümber lülitamine harjade ja

kommutaatori abil. Juhtme otsade kiirel ümber lülitamisel tekib pöörlemine, mis ongi mootoris rootori eesmärk. [6]



Sele 1.3 Mootori mudel [6]

Mootori pöörlemise suund oleneb voolu suunast raamis. Sele 1.3 puhul töötab mootor päripäeva. Muutes sellises konstruktsioonis ära vooluallika suuna hakkab mootor tööle vastupäeva.

Seisvas konstruktsioonis on väga lihtne arvutada Ampere'i seadusest tekkinud jõule jõumomenti. Kui raamile mõjub jõud, siis momendi arvutamiseks on vaja leida rootori tseenter, kust jõu tekkimise punkti saab tõmmata jõuõla vektori. Jõuõla ja jõu korrutamisel saame leida momendi.

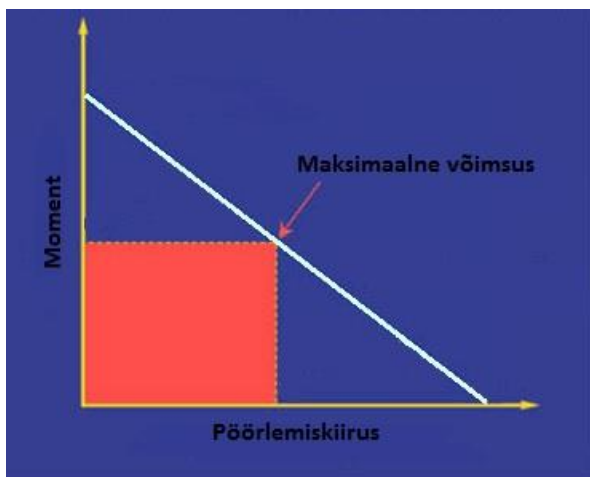
Kahjuks ei saa pöörlevas mootoris arvutada nii kergesti momenti, sest rootori pöörlemisel ja magnetväljade kokku puutumisel tekib elektromotoorjõud, mis on arvutatav valemiga 1.3. [7]

$$\varepsilon_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad (1.3)$$

kus ε_i - elektromotoorjõu suurus, V,
 $\Delta\Phi = \Delta\Phi_2 - \Delta\Phi_1$ - magnetvoo muutus, Wb,
 Δt - magnetvoo muutumiseks kulunud aeg, s.

Elektromotoorjõud mõjub vastas suunas raamile peale antava vooluga. Seega elektromotoorjõud vähendab raamis olevat voolutugevust. Eelnevalt kirjeldatud Ampere'i seadusest (valem 1.2) teame, et voolutugevus on olulisim osa valemist magnetväljas olevale raamile jõu ja jõumomendi tekkimisel. See tähendab, et elektromotoorjõu mõjul vähenenud voolutugevus avaldub mootorile mõjuvas momendis. Elektromotoorjõu suurus oleneb otseselt raami pöörlemiskiirusest, sest mida kiiremini pöörleb raam, seda suurem on teatud ajaühikus magnetvoo muutumine.

Eelmistest väidetest saab järeldada, et mootori käivitamisel on kiirus väike ja moment maksimaalne, sest ei ole tekkinud elektromotoorjõudu. Mootorile järjest suurema voolu peale andmisel suureneb ka elektromotoorjõud. Mootori pöörlemiskiirus küll suureneb, aga moment kahaneb. Sellest saamegi järeldada, et mootori maksimaalne võimsus on seal punktis, kus pöörlemiskiiruse suurenemisel väheneb moment ja momendi suurenemisel väheneb pöörlemiskiirus. Sellist seost saab seletada graafikuga (Sele 1.4).



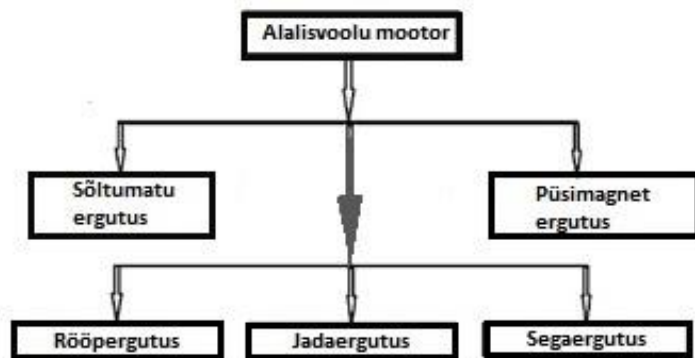
Sele 1.4 Mootori momenti ja pöörlemiskiiruse suhte graafik [8]

Need seadused ja reeglid näitavad, kuidas tekivad mootoris jõud, mis panevad rootori pöörlema. Samamoodi seletab see seda, et kindla maksimaalse voolutugevusega mootoril on teada maksimaalne võimsus.

1.2 Harjadega alalisvoolumootor

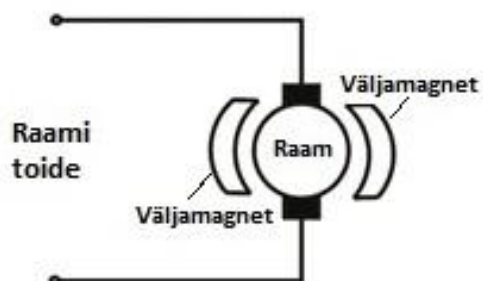
Esimesed alalisvoolumootorid leiutati üheksateistkümnenda sajandi keskel. Need mootorid olid harjadega alalisvoolumootorid. [9] Selliste mootorite eripära seisneb pöörleva kommutaatori ja selle vastu ühenduvate harjade olemasolus. Kommutaator on ühendatud rootori ankrumähistega ja harjad toitejuhtmetega. Mootori pöörlemisel käivad harjad vastu kommutaatori segmente ja neid läbib vool magnetiseerib ankrumähiseid. [10]

Harjadega alalisvoolumootoreid saab liigitada staatoril olevate magnetite magnetvälja tekkimise põhimõttel (Sele 1.5). Need magnetid võivad olla püsिमagnetid, sellisel juhul on tegu püsिमagnetergutusega, aga saavad olla ka elektromagnetid. Erinevad elektromagnetite ergutuse liigid näitavad, millise elektriskeemiga on lahendatud staatori väljamagnetitele toite andmine.



Sele 1.5 Alalisvoolumootorite ergutuste liigid [11]

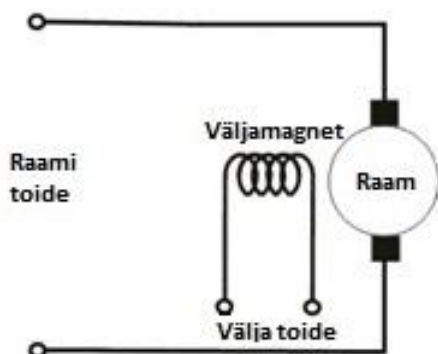
Esimeseks ergutusliigiks on püsिमagnetergutus (Sele 1.6).



Sele 1.6 Püsिमagnetergutus [11]

Püsिमagnetergutuse skeem (Sele 1.6) on ergutusskeemide hulgast kõige lihtsamini teostatav. Staatoril asetsevad püsिमagnetid ja rootoril ankrumähised, mis on ühenduses harjadega kommutaatori kaudu. Sellisel ergutusel saab jõumomenti muuta ainult rootori ankrumähistele antava voolutugevuse kaudu. Nii muutub ankrumähiste magnetväli tugevamaks ja mootori pöörlemiskiirus suureneb. Püsिमagnetite magnetväli jääb alati samaks. [11]

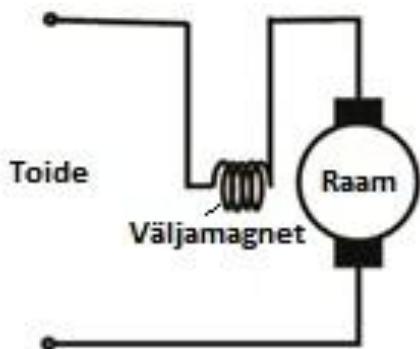
Järgmiseks ergutusliigiks on sõltumatu ergutus (Sele 1.7).



Sele 1.7 Sõltumatu ergutus [11]

Sõltumatu ergutuse puhul on staatoril ja rootoril on eraldi toiteallikad. See tähendab seda, et mootori jõumomenti on võimalik suurendada nii staatorisse antava toite abil, kui ka rootoris antava toite abil. Põhiline on see, et voolutugevuse suurendamisel ühes toiteallikas jääb vool samaks teises toiteallikas. Sellise mootori juhtimine on keerulisem, kui teistel ergutuse liikidel, sest toiteallikaid on kaks. [11]

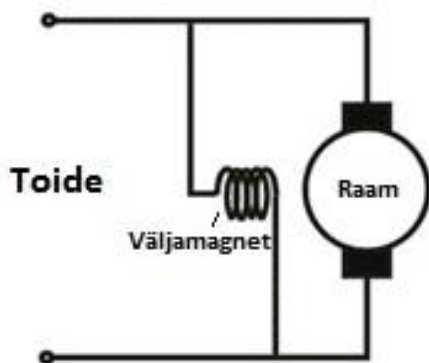
Kolmandaks ergutusliigiks on jadaergutus (Sele 1.8).



Sele 1.8 Jadaergutus [11]

Jadaergutuses on toiteallikas, staatori väljamagnetid ja rootori ankrumähised jadaühenduses. Toiteallikast süsteemile voolu rakendamisel on kogupinge staatori väljamagnetitel ja rootori ankrumähistel pinge summa. Raamis tekkiv elektromotoorjõud on jadaergutusel väiksem, kui püsimagnetergutusel või sõltumatul ergutusel. Kuna elektromotoorjõud kahandab raamis olevat voolutugevust ja sellest oleneb tekkiv jõumoment, siis sellise ergutusega mootoril on suur jõumoment. Sellise ergutuse puuduseks on mootori võllile koormuse lisamisel langev pöörlemiskiirus. Kiirus väheneb, et saavutada vajalikku jõumomenti mootori pöörlemise jätkamiseks. [11]

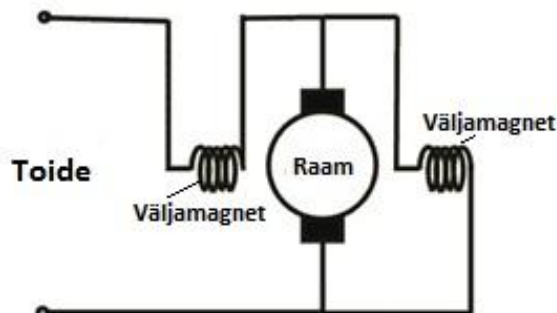
Neljandaks ergutuseks on rööpergutus (Sele 1.9).



Sele 1.9 Rööpergutus [11]

Rööpergutuses on staatori väljamagnetid ja rootori ankrumähised ühendatud toiteallikaga paralleelselt. Selline ergutus ei tooda küll nii palju jõumomenti, kui jadaergutus, aga suudab palju paremini säilitada kiirust erinevate koormuste puhul. [10]

Viimane ergutuse tüüp on segaergutus (Sele 1.10).



Sele 1.10 Segaergutus [11]

Segaergutuse mõtte on liita kokku rööp- ja jadaergutus. Sellega saavutatakse suur jõumoment ja ka pöörlemiskiiruse püsimine erinevate koormuste korral. [11]

Harjadega alalisvoolumootoritel on teatud eelised ja ka puudused võrreldes harjadeta alalisvoolumootoritega. Eelisteks on lihtsam ehitus võrreldes harjadeta alalisvoolumootoriga, sest pole otsest vajadust juhtelektroonikale, madalam hind ja vooluallika ühendamise võimalus otse mootorile. Puudusteks on väiksem tootlikkus (umbes 75-80 %) võrreldes harjadeta alalisvoolumootoritega, mis tähendab seda, et kasutatud kogu võimsusest läheb rohkem soojuseks ja vähem mootori jõumomendi tekitamisele, kommutaatori ühendamisest tekkiv müra ja piiratud eluiga harjade kulumisest, mis mingil hetkel tekitab vajaduse harjad ära vahetada. [12]

1.3 Harjadeta alalisvoolumootor

Harjadega alalisvoolumootorite puudustest tekkis võimalus leiutada tõhusam alalisvoolumootor. Esimesed harjadeta alalisvoolumootorid said elektroonika arengu tõttu leiutatud kahekümnenda sajandi keskel. Mootorid, millel polnud harju, said väga kiiresti populaarseks kohtades, kus harjade kulumine ja selle tõttu mootori töö peatumine võis tekitada suuri probleeme. Sellised seadmed on näiteks arvutitööstuses, kus mootorid peavad olema võimalikult väikesed ja seadmed kompaktsed, robootikas, kus mootori eluiga peaks olema võimalikult pikk ja lennukitööstuses, kus mootori peatumine võib tekitada väga suuri probleeme. [9]

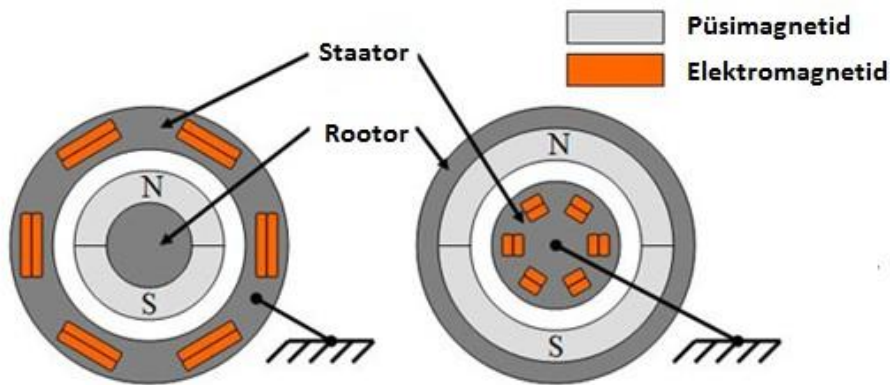
Harjadeta alalisvoolumootori tööpõhimõte erineb märkimisväärselt harjadega alalisvoolumootori omast. Kõige olulisem erinevus seisneb selles, et puudub füüsiline kommutaator ja harjad. Teiseks erinevuseks on püsिमagnetite ja väljamagnetite paiknevus. Harjadeta alalisvoolumootoril paiknevad püsिमagnetid rootoril ja väljamagnetid staatoril (Sele 1.11). [13]

Harjadeta alalisvoolumootori mehaaniline ehitus on küll lihtsam, kui harjadega alalisvoolumootoril, kuid mootori juhtimine tundub raskem. Väljamagnetitele ei saa anda toidet peale otse toiteallikast. Selleks, et saaks lülitada väljamagnetitele voolu peale õigesti ja õigeaegselt kasutatakse kontrollereid. Kontrolleri tööks on vajalikud ka sensorid, mis saavad aru, millises asendis rootor parasjagu asub. Nii saab kontroller lülitada järjest sisse väljamagneteid ja kogu aeg kontrollida rootori asukohta. Kontroller ja sensorid ongi mootori osad, mille pärast harjadeta alalisvoolumootor leiutati umbes sada aastat hiljem harjadega alalisvoolumootorist. [13]



Sele 1.11 Välise rooriga harjadeta alalisvoolumootor [13]

Harjadeta alalisvoolumootoreid liigitatakse sisemise ja välimise rooriga mootoriteks (Sele 1.12). Liigitus määrab ära mootori ehituse. Välimise rooriga mootoril asub rootor staatori ümber. Sellise ehitusega mootorid suudavad tekitada suurt jõumomenti, aga on pöörlemiskiiruse poolest aeglasemad. Sisemise rootori puhul asub rootor mootori tsesentris ja selle ümber on staator. Sellise ehitusega mootorid on vastupidiselt kiire pöörlemiskiirusega, aga suudavad tekitada väiksemat jõumomenti. [14]



Sele 1.12 Sisemise rooriga ja välimise rooriga harjadeta alalisvoolumootorid [15]

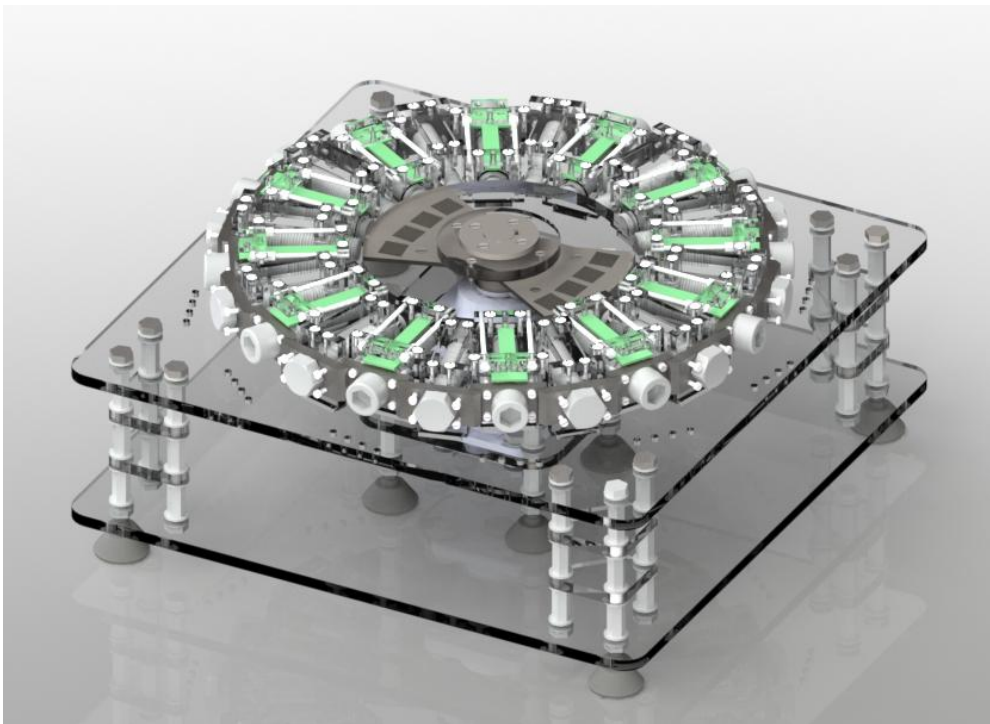
Õppemaketi harjadeta rootoripea ehitamisel kasutatakse sisemist rootori tüüpi. Selline rootori tüüp tekitab vähem jõumomenti, aga seda on õppemaketile kergem ehitada ja parem visualiseerida, kui välimist rootorit. Kuna õppemakett ei ole mõeldud suurtele mehaanilistele koormustele, siis peab jälgima ainult seda, et tekiks piisavalt suur jõumoment mootori pöörlema hakkamiseks.

Nagu harjadega alalisvoolumootoril, on ka harjadeta alalisvoolumootoritel omad eelised ja puudused. Põhilisteks eelisteks on suur tootlikkus (85-90 %), harjadest tuleneva müra ja sädemete tekkimise puudumine, väga pikk eluiga, parem täpsus ja kiiruse muutmine vastavalt vajadusele, sest lülitusi juhib kontrolleri. Harjadeta alalisvoolumootorite puudusteks on keerukam ehitus, kõrgem hind ja kontrolleri vajadus. [12]

2. ALALISVOOLUMOOTORI ÕPPEMAKETI MEHAANIKA

2.1 Õppemaketi mehaanika üldkirjeldus

Mehaanika osa kirjeldab õppemaketi mootori komponente. Tööd alustades tuli esiteks välja mõelda põhiliste mootori komponentide asetus. Staator, rootor ja ka mootori korpus projekteeriti maaga horisontaalselt. Sellise asetusega on võimalik õppemaketi tööprotsesse jälgida pealt poolt. Alalisvoolumootori tööpõhimõtete kõige paremaks visualiseerimiseks otsustati kogu mootori valmistamisel kasutada võimalikult palju pleksiklaasi. Teatud mootori osadel on metalli kasutamine vältimatu, aga seda prooviti hoida võimalikult minimaalsel tasemel, et kogu konstruktsioon oleks paremini jälgitav. Esimene õppemaketi tüüp on harjadeta ja sisemise rootoriga (Sele 1.12). Õppemaketi mehaanika komponentide projekteerimiseks kasutati programmi Solidworks.

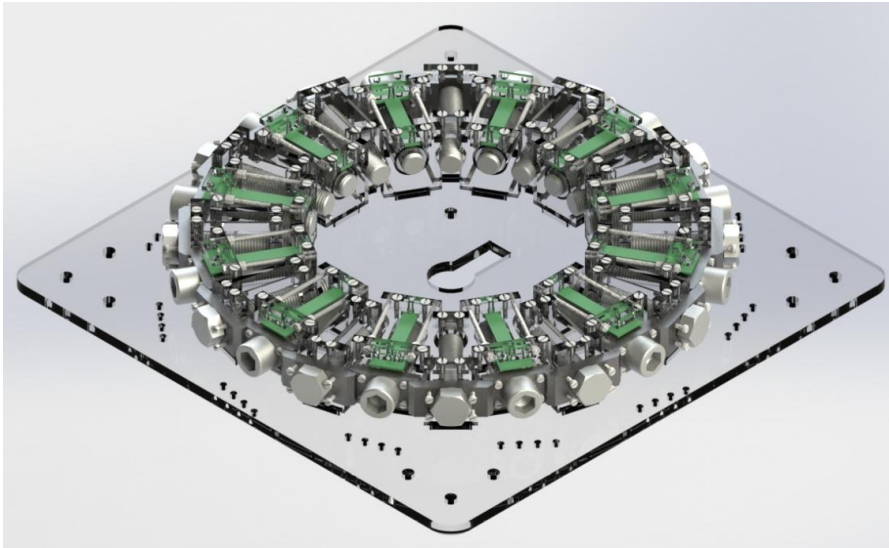


Sele 2.1 Õppemaketi Computer-aided design (CAD) mudel

2.2 Staator

Õppemaketi staatori osadeks on ringikujuliselt asetatud kaksteist pooli ja nende vahel olevad kaksteist terrassüdamikku. Poolide ülesanne on tekitada staatoril magnetväljad. Terrassüdamike

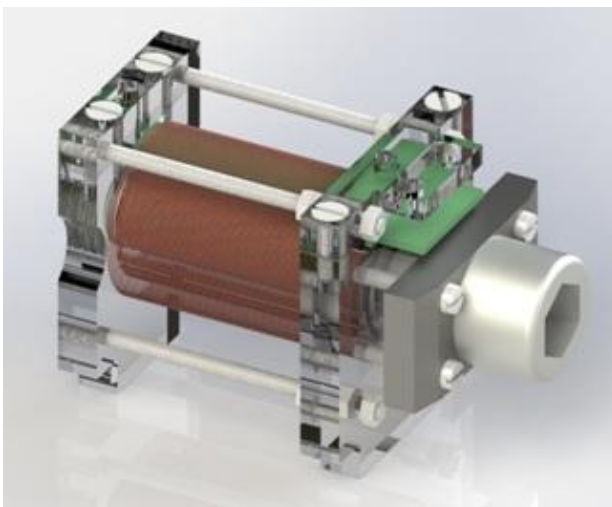
eesmärk alalisvoolumootori tüüpide näitamisel on aidata magnetvälja jõujoontel liikuda mööda staatori perimeetrit. Poolid ja terassüdamikud asuvad pleksiklaasist plaadil, mis on osa mootori korpusest.



Sele 2.2 Staatori CAD mudel

2.2.1 Pooli konstruktsioon

Poolid on mootori ehituse ühed tähtsaimad komponendid, et tekitada staatoril magnetväljad, mis hakkaksid rootorit mehaanilise jõuga mõjutama. Pooli CAD mudeli joonestamise puhul pidi tähele panema mitmeid erinevaid nüansse. Kõige tähtsamad neist olid kinnitusviis korpuse pealmisele plaadile, võimalikult lihtne ehitus ja monteeritavus, pooli pooluste hea eristatavus, terasest pooli südamiku olemasolu ja läbipaistvus.



Sele 2.3 Pooli CAD mudel

Koostatud mudeli põhiline osa koosneb kahest vertikaalsest paralleelsest pleksiklaasist plaadist ja nende vahel asetsevast horisontaalsest pleksiklaasist torust, millele saab kerida solenoidi. Mõlemad plaadid koosnevad kahest osast. Plaatide pealmised osad on eemaldatavad ja vahetatavad, et oleks võimalik kinnitada elektroonikaplaati ja seda vajadusel ümber programmeerida. Plaatide pealmistele osadele on puuritud avad, kahe Red Green Blue (RGB) valgusdiodi ja banaani-tüüpi ühendusklemmide jaoks. Plaatide ülemised ja alumised osad on kinnitatud M4 nailon kruvidega. Pooli magnetvälja tugevdamiseks on pleksiklaasist toru sisse projekteeritud sisekuuskandiga M20 osakeermega polt. Sisekuuskant on hea selleks, et vajadusel on võimalik eemaldada poldid poolidelt ja näidata, kuidas see mõjutab solenoidide magnetvälju. Polt on kinnitatud pleksiklaasi sisse keeratud keermega, mis asub pooli rootoripoolse plaadi tsentris. Pooli tagumisele plaadile on kinnitatud metallist nelinurkne detail, mille saab ühendada staatoril terassüdamikuga, et terassüdamikul ja poolil oleks otsene side läbi metalli. See side laseb magnetvälja jõujoontel liikuda mööda staatori perimeetrit. Pooli plaadid on omavahel kinnitatud M4 nailon keermelattidega.

Läbipaistvus oli üks olulisemaid omadusi, mida pool pidi omama. Kuna pooli materjaliks on enamjaolt pleksiklaas, siis on hästi näha solenoidi, südamikuks oleva poldi ja RGB valgusdiodide asukohad. Selleks, et valgusdiodid oleksid kaitstud ja nende värvid oleksid hästi eristatavad, on need paigutatud osaliselt pooli plaatide sisse. Valgusdiodi põlemisel läheb valgus mööda plaati laiali ja tänu sellele on värve hästi näha.

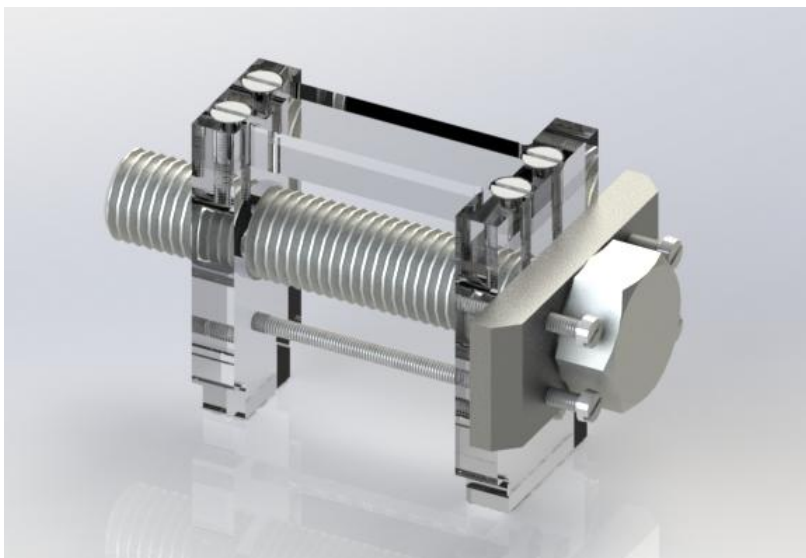
Pooli kiireks kinnitamiseks korpusele otsustati see projekteerida nii, et seda oleks võimalik ilma kinnitusvahenditeta staatorile asetada. Selleks projekteeriti pooli plaatide alumistele otstele astmed, et poole saaks asetada korpuse pealmisel plaadil asuvasse avadesse. Avad paiknevad korpuse plaadil ringis. Avade paare on kaksteist tükki, iga pooli jaoks.

Lihtsamaks monteerimiseks kasutati võimalikult palju sarnaseid kinnitusi. Banaani-tüüpi ühendusklemmide avad on läbivad avad ja need on freesitud suurusega 6,3 mm, ühendusklemmide kinnitamiseks kasutati M6 madalaid mutreid. Nii nailon keermelatid, kui ka nailon kruvid on suurusega M4. Seega on läbivad avad kruvidele suurusega 4,2 mm ja keermestatavad avad suurusega 3,3 mm. Nailon kruvid on kinnitatud plaatide sisse keermestatud avadega. Keermelatid on ühele plaadile kinnitatud M4 nailon mutritega ja teisele plaadile M4 keermetega. Nii on võimalik vajadusel korrigeerida plaatide vahelist kaugust. M20 poldi jaoks, mis läbib mõlemad plaadid ja toru, on ühele plaadile projekteeritud ava suurusega 21 mm ja teisel plaadile keermestatav ava suurusega 17,5 mm. Enamik avasid on võimalik valmistada freesimise käigus ning puurimist on vajalik rakendada nailon kruvide 3,3 mm suuruste keermestatavate avade ettepuurimisel. Pleksiklaasi sisse on võimalik keerata keermeid käsitsi. Keermestamiseks on vaja kasutada kahte keermepuuri, milleks on M20 ja M4. Kõik läbivate ja keermestatavate avade suurused on standardsed plastiku jaoks. [16]

Võimalikult lihtsaks tootmiseks üritati vältida mitmes teljes avade ja kontuuride projekteerimist, kuid see polnud alati võimalik. Mõningad mitte freesitavas sihis projekteeritud avad tuli detailide kättesaamise järel käsitsi puurida.

2.2.2 Terassüdamiku konstruktsioon

Terassüdamike ülesanne alalisvoolumootori õppemaketi korral on aidata magnetvälja jõujoontel liikuda mööda staatori perimeetrit. Seda tekitab terassüdamiku tagumise plaadi küljes olev nelinurkne metallistdetail. Terassüdamiku projekteerimisel olid olulised aspektid kinnitusviis staatorile, tagumisel plaadil oleva metallistdetaili ühendus poolil oleva metallistdetailiga, kerge monteerimine ja võimalikult lihtne ehitus.

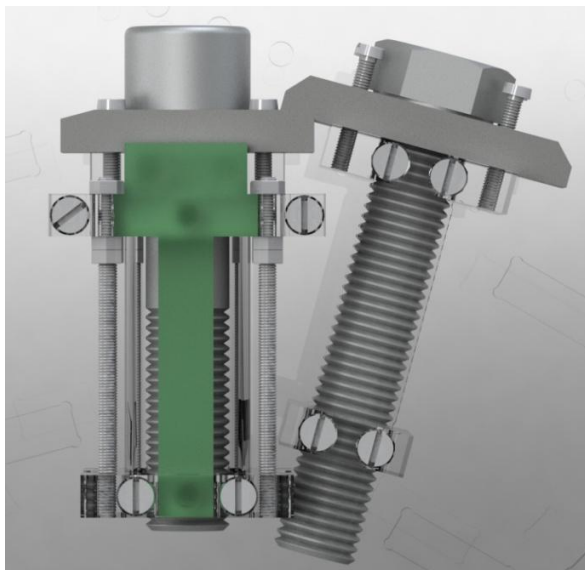


Sele 2.4 Terassüdamiku CAD mudel

Terassüdamiku koost koosneb kahest vertikaalsest paralleelsest pleksiklaasist plaadist ja neid ühendavast horisontaalsest kinnitusplaadist. Selleks, et rootori magnetväljad saaksid sulguda läbi staatori perimeetri on terassüdamiku tagumisele plaadile projekteeritud nelinurkne metallistdetail. Terassüdamikule on projekteeritud veel tsentrisse M20 täiskeermega polt, mis ei oma kindlat eesmärki alalisvoolumootori tüüpide näitamisel, kuid on vajalik teist tüüpi mootorite visualiseerimiseks. Teist tüüpi mootorite visualiseerimine on projekti hilisem etapp. Terassüdamiku kindlamaks ehituseks on plaatide alumisele osale projekteeritud keermelatt, millega on võimalik natukene muuta terassüdamiku plaatide omavahelist kaugust.

Terassüdamiku kinnitusviis staatorile on samasugune nagu poolil, ehk plaatide alumistele otstele on projekteeritud astmed. Nii saab terassüdamiku kiiresti ja lihtsalt asetada staatoril asuvatele avadele. Staatoril on terassüdamiku jaoks poolide vahel kaksteist paari avasid, iga terassüdamiku jaoks. Pooli ja terassüdamiku metallistdetailide omavaheliseks puuteks on terassüdamiku

tagumisele plaadile projekteeritud M4 poldid, mille ümber on asetatud vedrud. Asetades terassüdamiku staatorile saab tõmmata M20 polti ja metallistdetaili tahapoole. Kui terassüdamik on asetatud staatori avadesse lastakse polt lahti ja nii terassüdamikul, kui ka poolil olevad metallist detailid lähevad omavahel paralleelsete pindadega puutesse (Sele 2.5). Sellega on tagatud kindel metalne side poolide ja terassüdamike vahel, mis laseb rootorist tuleval magnetväljal läbi perimeetri sulguda.



Sele 2.5 Pooli ja terassüdamiku asetus staatoril

Kiireks ja sujuvaks monteerimiseks kasutati terassüdamikul võimalikult palju samasuguseid kinnitusi. Konstruktsiooni kinnitamiseks kasutati M4 nailon keermelatti ja M4 nailon kruve. M4 läbivad avad on suurusega 4,2 mm ja keermestatavad avad 3,3 mm. Enamik avadest valmistati freesimise käigus. Käsitsi pidi puurima horisontaalse kinnitusplaadi ja kahe vertikaalse plaadi keermestatavad avad. Nende avade puurimiseks sai kasutatud 3,3 mm puuri, mida oli vaja ka varem pooli kinnitusavade puurimiseks. Nailon keermelatt on kinnitatud rootoripoolsele plaadile M4 keermega ja välimisele plaadile M4 nailon mutritega. Terassüdamiku M20 poldi kinnitamiseks on metalldetailile projekteeritud ava suurusega 18,5 mm ja plaatidel asuvad läbivad avad suurusega 21 mm. Nailon kruvidele on keeratud keermed käsitsi M4 keermelõikuriga. Metalldetaili käsitsi keeret keerata ei saa ja selle keermestamiseks saab kasutada puurpink, mille tööriistaks oli M20 keermelõikur. Läbivate ja keermestatavate avade suurused on standardsed ja valitud tabelist vastavalt materjalile. [16]

Võimalikult väikese tootmishinna saavutamiseks projekteeriti terassüdamiku freesitavad detailid sama põhimõttega nagu poolil. Projekteerimisel jälgiti, et freesil oleks võimalik valmistada detailid võimalikult väikse operatsioonide arvuga. Operatsioonidest sõltub freesimise aeg ja ajast hind. Samamoodi prooviti vältida detailidel mitmes sihis operatsioonide tegemist, sest freesimist teostava firma freespink sai freesida ainult ühes sihis. Terassüdamikul nagu ka poolil, pidi teatud avad projekteerima mitte freesitavas sihis: need avad puuriti peale freesitud detailide valmimist käsitsi.

2.3 Rootor

Rootor koosneb mitmest erinevast osast. Rootoril on kaks erineva suurusega laagrit ja kaks laagripukki, mis kinnituvad poltidega korpusel olevate plaatide külge. Laagritele on kinnitatud treitud astmega võll. Võllile saab kinnitada vahetatavaid rootoripäid, et oleks võimalik teostada erinevaid mootori tüüpe. Rootori pead võlliga ühendav komponent on rumm. Rummu külge on kinnitatud pleksiklaasist ringi kujulised plaadid. Pleksiklaasist plaatide vahele saab projekteerida erinevaid rootori konstruktsioone.



Sele 2.6 Rootori koost

2.3.1 Laagrid ja võll

Rootori tööks on vajalikud kaks pukklaagrit, mis asetsevad korpuse erinevatel tasanditel. Sellist tüüpi pukklaagreid (Sele 2.7) on kõige parem asetada verikaalsesse asendisse. Laagrite suurused on 20 mm ja 25 mm. Võlli kinnitamiseks on mõlemal laagril olemas sisekuuskandiga poldid. Vajalikud omadused mootori laagrite juures on tööst tekkiv võimalikult väike müra, vähene vibratsioon ja suur vastupidavus. Valimisel kaaluti mitut erinevat laagrifirmat. SKF laagrid on suhteliselt kõrge hinnaga, aga Eesti poodides müüdavatest laagritest on nad kindlasti ühed täpseimad ja vastupidavamad. Arvesse sai võetud ka laagreid müüva firma Alas-Kuul töötaja arvamust.

Laagri pukki kinnitamiseks on plaatidele freesitud läbivad 10,5 mm suurused avad. Laagrid on kinnitatud pleksiklaasist plaatidele M10 poltidega, mis läbivad plaadi ja on kinni keeratud M10 madala mutriga. Poldi, laagripuki, pleksiklaasist plaadi ja mutri vahele on paigutatud M10 seibid.

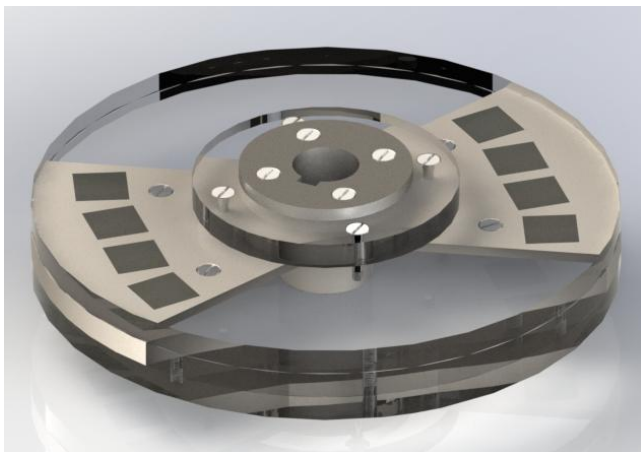


Sele 2.7 Pukklaager [17]

Võlli projekteerimisel olid tähtsamad osad rummu ja võlli kinnitus ning võlli fikseerimine laagritele. Võlli diameeter on 25 mm. Võlli fikseerimiseks pukklaagrile on projekteeritud aste diameetriga 20 mm. Aste istub alumise väiksema pukklaagri peal. Nii ei pea võlli sisestamisel laagritesse mõõtma rummu kõrgust laagrist, et rootoripea ja pooli keskkohk oleksid samal kõrgusel. Rummu ja võlli kinnitamiseks on võllile freesitud liistuava. Liist on standardne ja selle mõõtmed on võetud tabelist (LISA 1). Liistuava pikkus on 32 mm, sügavus 4 mm ja laius 8 mm. Liistuga võllile rootoripea asetamisel läheb liist rummu liistusoonde.

2.3.2 Harjadeta rootoripea konstruktsioon

Esimene rootoripea projekteeriti harjadeta alalisvoolumootori baasil. Harjadeta rootoripead on kergem ehitada ja sellega on võimalik testida, kas tekib piisavalt suur jõumoment, et mootor hakkaks liikuma. Rotoripea koosneb rummusest, neljast horisontaalsest ringi kujulisest pleksiklaasist plaadist, metallplaatidest ja nende sisse asetatud püsिमagnetitest. Projekteerimisel olid olulised omadused läbipaistvus, rummu kindel kinnitus võllile, püsिमagnetite paiknevus ja metallplaatide kuju.



Sele 2.8 Harjadeta rootoripea CAD mudel

Läbipaistvuse saavutamiseks on rootori korpus ehitatud neljast ringikujulisest kümne millimeetrise paksusega pleksiklaasist plaadist. Korpus on kinnitatud omavahel M4 kruvidega. Keermestatavad avad on korpusel suurusega 3,3 mm ja läbivad avad 4,2 mm. Kinnitused on projekteeritud nii, et pealne väiksema diameetriga plaat kinnitunud rummule ja ülejäänud kolm plaati on kinnitatud väiksemale plaadile. Läbivad ja keermestatavad avad on standardised ja vaadatud tabelist. [16]

Rummu projekteerimisel pidi mõõtma ära poolide keskkoha ja vastavalt sellele arvutama rummu pikkuse, et püsिमagnetid oleks rootoripea monteerimisel horisontaalselt poolide keskel. Rummu kinnitamiseks võlli on projekteeritud rummule liistuava. Võlli liist läheb monteerides rummu liistuavasse ja fikseerib rootori asendi. Kuna rootori pead peavad olema vahetatavad, siis sellise lahendusega on võimalik neid kiiresti monteerida. Vibratsiooni ja rootoripea üles alla liikumise vältimiseks on peale liistkinnituse veel teine fikseerimise viis. Rotoripea tugevamaks fikseerimiseks on väiksema diameetriga pleksiklaasist plaadile ja rummule puuritud standardised horisontaalsed avad kahe M4 sisekuuskandiga poldi jaoks. Rummule puuritud standardsete avade suurus on 4,2 mm ja pleksiklaasist plaatidele 3,3 mm. [16] Keermed keeratakse pleksiklaasist plaadile. Need avad tuleb pleksiklaasist plaadile ise puurida, sest neid ei ole võimalik teostada freesimise käigus.

Metallplaadid on projekteeritud pleksiklaasist plaatide vahele ja nende kuju meenutab ankrut. Selline ehitus valiti harjadega alalisvoolumootoritel olevate ankrumähiste põhjal. Püsिमagnetid on paigutatud kaares metallplaatide sisse.

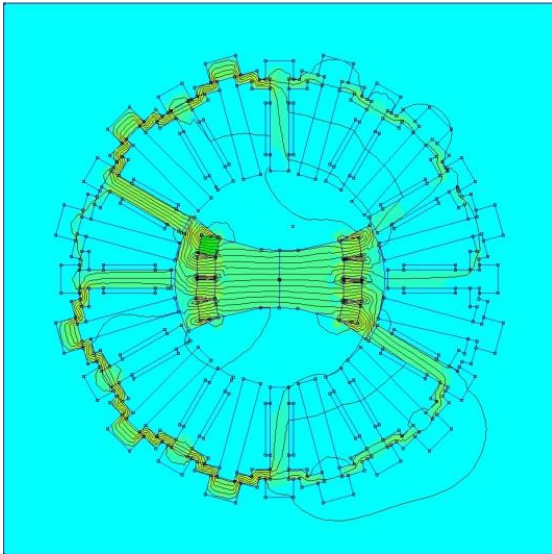
Püsिमagnetite materjaliks valiti neodüün-raud-boor (NdFeB), sest nendel magnetitel on hea energiatihedus ja jääkmagnetvootihedus võrreldes teiste püsिमagnetitega. NdFeB magnetite nõrgad kohad on purunemine suure jõu korral, sest materjal on rabe. Selleks, et materjali kaitsta on magnetil peal nikkelkate. Samuti on NdFeB magnetitel väike temperatuuritaluvus, aga õppemaketil ei lähe magnetid nii kuumaks, et hakkaksid kaotama vajalike omadusi. [18]

2.3.3 Harjadeta rootoripea FEMM analüüs

Enne rootori valmis ehitamist saab testida selle toimimist simulatsiooni abil. Finite Element Method Magnetics (FEMM) programmi abil on võimalik magnetväljadega seotud süsteemide simulatsioone teostada. FEMM pilt näitab, kui tugevat jõumomenti saab rootor selliste püsिमagnetitega ja poolidest väljamagnetitega genereerida. Katse käigus anti FEMM programmis vool peale neljale poolile (Sele 2.9), mis asuvad horisontaalse rootoripeaga viieteist kraadise nurga all. Nii oli võimalik testida rootoripea ühte sammu.

Katsete tulemusena saadi rootoripea perimeetril maksimaalseks momendiks 7,01 N*m ja minimaalseks 0,19 N*m. Minimaalne tulemus tuli rootori mõlemas suunas viieteist kraadi võrra

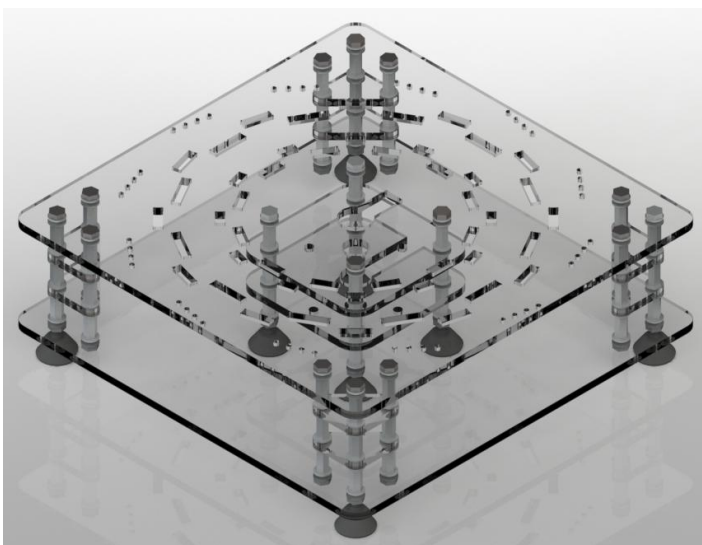
pöörämisel. Minimaalsetel väärtustel on vaja staatori järgmised poolid tööle lülitada. Kuigi veel ei ole arvatud laagrite hõõrdejõudu, siis võib teoreetiliselt järeldada, et jõumoment on piisavalt suur sellise rootori konstruktsiooni pöörlema panemiseks.



Sele 2.9 Harjadeta rootori FEMM pilt

2.4 Mootori korpuse konstruktsioon

Õppemaketi korpus koosneb neljast maaga paralleelsest tasandist, mille materjaliks on kümne millimeetrine pleksiklaas. Kümne millimeetrine pleksiklaas on piisavalt tugev, et hoida konstruktsiooni jäigana.



Sele 2.10 Mootori korpuse CAD mudel

Kõik kinnitamiseks vajalikud avad on standardsed läbivad avad ja freesitud korpuse tasanditele suurusega 10,5 mm. [16] Korpuse tasandite omavaheliseks kinnitamiseks on kasutatud kahe erineva pikkusega M10 polte. Kaheksa polti, mis läbivad kõik tasandid ja on alumisele plaadile kinnitatud madala M10 mutriga on 150 mm pikad. Teised kaheksa polti, läbivad kolme ülemist tasandit ja on pikkusega 120 mm. Distanti hoidmiseks sobivad kõige paremini distantspuksid, aga kinnitustarvikute poed ei müü standardseid distantspukse ja nende treimine oleks võtnud kaua aega, sellepärast kasutati tasandite vahel jätkumutreisid. Lühemad poldid on mõeldud selleks, et korpusele saaks kinnitada jalad. [19] Poldid läbivad kolm tasandit ja lõppevad jätkumutris. Konstruktsiooni neli jalga asuvad välimistes nurkades ja teised neli korpuse keskosas. Jalgade plastikust toed toetuvad tasapinnale ja nendest tulevad välja M10 keermega poldid. Nii saab keerata jalad kinni jätkumutritesse, mille sees on lühema pikkusega poldid. Korpuse poltide, mutrite ja jätkumutrite vahele on asetatud seibid, et kinnitamisel mitte kahjustada konstruktsiooni.

3. POOLI ELEKTER, ELEKTRONIKA JA PROGRAMMEERIMINE

Pooli elektri- ja elektroonikaosa koosneb kahest komponendist.

- 1) Solenoid, millele toite ühendamisel tekib magnetväli. Solenoidi moodustab umbes paarsada keerdu mähisetraadist ümarpooli.
- 2) Elektroonikalülitus, mille eesmärk on vastavalt solenoidile antavast voolutugevusest panna põlema indikaator valgusdiodid, mis näitavad poolis tekkiva magnetvälja polaarsust ning mille valgustugevusega antakse infot solenoidi magnetvälja tugevuse kohta.

3.1 Solenoidid

Suurema ja tugevama magnetvälja saavutamiseks vooluga juhtmele keeratakse see solenoidiks. Solenoidiks keeratud traadi keerdude magnetväljad ühinevad tekitades elektromagneti. Elektromagnetil on siin ka ferromagneetikust südamik, millega saab tugevdada magnetvälja. Selleks on pooli keskel terasest M20 polt. Elektromagnet omab põhja- ja lõunapoolust samamoodi nagu püsिमagnet. [20]

Selleks, et teada, kui suurt voolutugevust saab solenoidile rakendada, on vaja kõigepealt kaaluda sellel eralduvat soojusvõimsust. Võimsus peab solenoidis jääma umbes kolme vati piiridesse, et pleksiklaas ja elektroonikaplaat ei hakkaks sulama ka peale pikemaajalist töötamist. Solenoidilt poolile eralduvat soojusvõimsust on võimalik arvutada valemiga 3.1. [21]

$$P = I^2 * R \quad (3.1)$$

kus P - võimsus, W,
 I - voolutugevus, A,
 R - traadi kogutakistus, Ω .

Selleks, et võimsusest arvutada voolutugevust, peame teadma kõigepealt solenoidi takistust. Solenoidi takistuse saab leida valemiga 3.2. [22]

$$R = \rho * \frac{L}{A} \quad (3.2)$$

kus R - solenoidi takistus, Ω ,
 ρ - materjali eritakistus, $\Omega * \text{mm}^2/\text{m}$,
 L - traadi pikkus, m,
 A - traadi ristlõike pindala, mm^2 .

Teame, et traat solenoidi kerimiseks on diameetriga 0,3 mm ja pleksiklaasist toru pikkus 56 mm. Torule keritakse kaks täispikkust traati, keerud asetsevad tihedalt kõrvuti. Keerde tuleb sellisel juhul 2×56 mm peale 374. Toru diameeter on 30 mm. Vasktraadi eritakistus on $0,0178 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$. [22]

$$R = 0,0178 * \frac{(187 * 0,03 + 187 * 0,0303)}{\pi * 0,15^2} \approx 2,84 \Omega$$

Teades solenoidi takistust ja lubatud võimsust on võimalik arvutada võimsuse valemist välja voolutugevus.

$$I = \sqrt{\frac{3}{2,84}} \approx 1,03 \text{ A}$$

Maksimaalne voolutugevus, mida solenoidile võib rakendada on seega 1,03 A. Solenoidi traadi takistus on $2,84 \Omega$. Nende tulemustega saab arvutada maksimaalse pinget, mida tohib solenoidile rakendada. Pinget saab arvutada Ohmi seadusega (valem 3.3). [23]

$$U = I * R \tag{3.3}$$

kus U - pinget, V,
 I - voolutugevus, A,
 R - solenoidi takistus, Ω .

$$U = 1,03 * 2,84 \approx 2,93 \text{ V}$$

Saadud tulemusest teame, et poolile antav pinget ei tohi ületada 2,93 V, muidu võib tekkida solenoidile pikema aja voolu rakendamisel probleeme pleksiklaasist toru ülekuumenemisega ja sulamisega.

Teades arvutuste põhjal maksimaalset pooli solenoidile lubatud voolutugevust, saame testida pooli magnetvälja tugevust programmis FEMM. Eesmärk on näidata, millist mõju avaldab pooli magnetväljale südamikuks olev terasest polt. FEMMi tulemused (esitatud LISAs 5) on mõlemad esitatud samast poldist rootori pool olevast punktist. Ühel pildil on poldi materjaliks teras ja teisel õhk. Tulemused näitavad, et poldiga tehtud simulatsiooni magnetinduktsiooni väärtus on 0,003 T ja ilma poldita on tulemuseks 0,0003 T. Jagades tulemused omavahel saame teada, et poldiga solenoidil on magnetinduktsioon kümme korda suurem, kui poldita solenoidis. Kuna magnetinduktsioon on osa valemist, millega saab arvutada poolile tekitatavat jõudu (valem 1.2), siis terasest polt pooli ehituses suurendab oluliselt rootorile mõjuvat jõudu.

3.2 Pooli trükkplaat

Valgusdiodide eesmärk pooli korpusel on näidata solenoidis tekkiva magnetvälja tugevust ja polaarsust. Punase värviga saab näidata pooli põhjapoolust ja sinise värviga lõunapoolust. Selleks, et kahe valgusdiodiga oleks võimalik näidata erinevaid värve kasutatakse RGB valgusdioode. Magnetvälja tugevuse esinemist on ilmekas kujutada selliselt, et valgusdiodi valgusvoog muutub lineaarselt pooli arendatava magnetvälja tugevusega. Valmis poolil on näha ainult osa elektroonikaplaadist, sest solenoidi üks kiht on keritud trükkplaadi peale (katteks).

Magnetvälja tugevus on lineaarselt sõltuvuses voolust ning solenoidile rakendatav pinge omakorda solenoidi voolust. Ka valgusdiodi valgusvoog on suhteliselt lineaarselt sõltuvuses valgusdiodi voolust. Vaadates valgusdiodide pinge ja voolutugevuse graafikuid on näha, et need ei ole lineaarsed. Selleks, et valgusdiodid põleks vastavalt poolile rakendatavale pingele on vajalik täiendav arvutus ning väärtuste seadmine. Nende väärtuste analüüsimiseks ning valgusdiodide valgusviljakuse juhtimiseks on pooli sees (peidetud) elektroonikaplaat, millel vastavat aritmeetikat teostab mikrokontroller. Elektroonikaplaadile toite ühendamisel hakkavad valgusdiodid põlema vastavalt voolu suunale solenoidis.

Elektroonikaplaat on väikeste mõõtmetega ja sellepärast kasutati selle projekteerimisel võimalikult väikseid elektroonikakomponente. Tähtsamad elektroonikaplaadi komponendid on toiteregulaator, ATtiny mikrokontroller, valgusdiodid, Schottky diodid ja banaani-tüüpi test ühendusklemmid (LISA 2). Ülejäänud elektroonikaplaadi komponendid on eelpool toodud komponentide töötamiseks vajalikud, kuid elektroonikaplaadi tööpõhimõtte seletamisel vähem tähtsad.

Banaani-tüüpi test ühendusklemmid (Sele 3.1) on pooli elektroonikaplaadi kõige suuremad komponendid. Neid kasutatakse selleks, et oleks võimalik poolile väliselt toitepinget peale ühendada ja vajadusel ühendid kiiresti ja mugavalt eemaldada. Solenoidi otsad, mis on elektroonikaplaadile joodetavad läbivate avadega on jadamisi ühendatud ühendusklemmidega. Edasi on solenoidi otsad ühendatud dioodsilla ja mikrokontrolleri analoogsisenditega (LISA 3). Ühendusklemmide jootmiseks on elektroonikaplaadile projekteeritud läbivad avad (LISA 4.1).



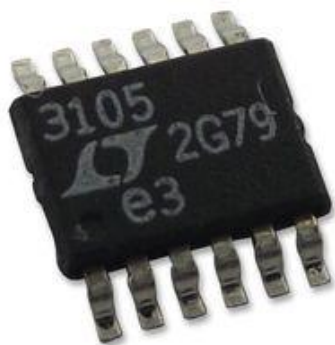
Sele 3.1 Banaani-tüüpi test ühendusklemm [24]

Pooli elektroonikaplaadile saab banaani-tüüpi test ühendusklemmidest anda voolu peale kahe eri polaarsusega. Selleks, et elektroonikaplaat saaks alati toimida sõltumata toite polaarsusest on pooli elektroonikaskeemi projekteeritud Schottky diodidest (Sele 3.2) dioodsild (LISA 3). Schottky diodid juhivad elektrit ainult ühte pidi ja neil on väike pingelang. Kasutades neid dioodsilla projekteerimisel on võimalik nelja diodiga tekitada lülitus, mille väljundi voolusuund ei sõltu sisendis olevast voolusuunast. Dioodsillas on mõlemale banaani-tüüpi test ühendusklemmidele ühendatud ühe diodi pluss- ja teise miinusots. Dioodsilla väljundil on toiteregulaatoriga ühendatud diodide plussotsad ja maaga diodide miinusotsad. Kasutatud Schottky diodid on disainitud pindmiseks jootmiseks (LISA 4.1). [25]



Sele 3.2 Schottky diod [26]

Toiteregulaator LTC3105 (Sele 3.3) suudab laias sisendpinge vahemikus hoida väljundpinge samal tasemel. Elektroonikaplaadil on toiteregulaatori ülesanne hoida mikrokontrollerit ATTiny45-20XU toitev pinge kogu aeg samal tasemel, milleks on 3,3 V. Sisendpinge võib varieeruda 225 mV kuni 5 V. Sisendpinge peab olema poolil muudetav, et saaks muuta magnetvälja tugevust solenoidis. Toiteregulaator on disainitud pindmiseks jootmiseks (LISA 4.1).



Sele 3.3 LTC3105 toiteregulaator [27]

ATTiny mikrokontroller (Sele 3.4) on elektroonikaplaadi kõige olulisem komponent. Mikrokontrollerile tuleb toide peale toiteregulaatorilt. Solenoidi otstel oleva pinge suuruse mõõtmiseks on mikrokontrolleril kaks analoogsisendit, mis on ühendatud banaani-tüüpi test ühendusklemmidega. Signaalide väärtusi saab lugeda alati ainult ühest sisendist, millele jõuab poolile antav positiivne pinge. Teades, millisesse analoogsignaali pinge ilmub, saab anda pulsilaiusmodulatsiooni kasutamisel RGB valgusdiodidele mikrokontrolleri väljunditega õiged värvid ja vastavalt mõõdetud analoogsignaalide suurustele sobivad impulsside laiused. Analooisisenditesse mineva pinge suurust on vähendatud takistite abil ja igaks juhuks ühendatud

ka zener-dioodidega, mis kaitsevad mikrokontrollerit ja ei lase takistitest edasi minevat pinget üle 2,7 V. Ületades 2,7 V taseme juhivad zener-dioodid märkimisväärse voolu maaga, piirates sellega ülepinge tekkimise võimalust sisendis. Kontrolleri programmeerimiseks on elektroonikaplaadile lisatud programmeerimisnõelade platsid (LISA 3). Mikrokontroller on disainitud pindmiseks jootmiseks (LISA 4.1).



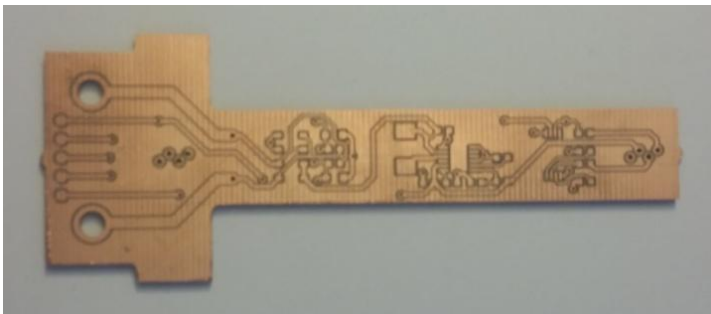
Sele 3.4 ATtiny45-20XU mikrokontroller [28]

Valgusdiodid (Sele 3.5) on elektroonikaplaadil solenoidis tekkiva magnetvälja polaarsuse näitamiseks. Diodidel on neli jalga. Elektroonikaplaadil on kasutatud nendest kolme. Kaks jalga on ühendatud mikrokontrolleriga ning panevad valgusdiodi näitama punast ja sinist valgust. Kolmas jalg (ühine katood) on ühendatud maaga. (LISA 3) Valgusdiodi jalgade jootmiseks on elektroonikaplaadile disainitud läbivad avad (LISA 4.1).

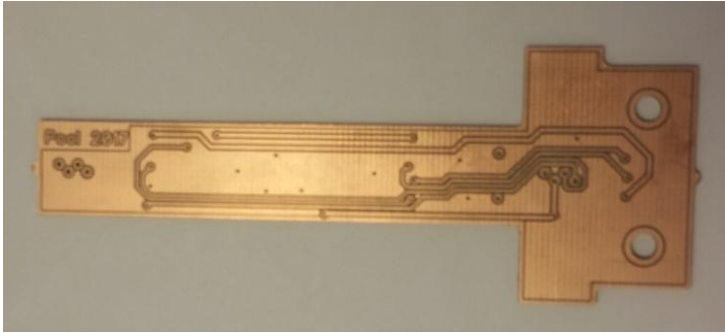


Sele 3.5 RGB valgusdiod [29]

Trükkplaadi prototüübi (Sele 3.6 ja Sele 3.7) freesimiseks kasutati TTÜ Mektory hoones asuvat trükklaadifreesi LPKF protomat S63.



Sele 3.6 Trükkplaadi prototüübi pealmine pool



Sele 3.7 Trükkplaadi prototüübi alumine pool

3.3 Mikrokontrolleri ATTiny 45 programmeerimine

Elektroonikaplaadil asuv mikrokontroller ATTiny 45 on programmeeritav Arduino Uno kontrolleri abil. Selleks, et oleks võimalik Arduino Uno ühendada ATTiny külge, on elektroonikaplaadil olemas programmeerimisnõelte ühendamiseks viis platsi, kust jooksevad rajad mikrokontrollerisse. Programmeerimisnõelte juhtmed saab ühendada Arduino Uno külge. Arduino Uno plaadi „reset“ viigu ja „ground“ viigu vahele tuleb ühendada kondensaator suurusega 10 μ F. Sellega tekitatakse Arduino Uno plaadist süsteemi-sisene mikrokontrolleri programmeerimise lülitus. [30]

Arduino Uno plaadi töötamiseks programmeerimisplaadina on vaja Arduino programmis valida näidete alt ArduinoISP näide ja see plaadile laadida. Arduino programmile on vaja internetist alla laadida laiendused erinevate ATTiny plaatide kohta. Peale laienduste allalaadimist ja tõstmist Arduino programmi failidesse saab programmist valida õige plaadi laienduse. Peale neid tegevusi on ATTiny valmis programmeerimiseks. [30]

Programmeerimise algoritmi (LISA 6) välja töötamiseks tuleb teada, kuidas liiguvad mikrokontrollerisse sisenevad ja väljuvad signaalid. Mikrokontrolleri sisendsignaalid on analoogsignaalid banaani-tüüpi test ühendusklemmidest ja väljundsignaalid impulsid valgusdiodide jalgadele. Valgusdiodi andmelehel on kirjeldatud pinget ja voolutugevuse graafikut väga laias ulatuses. [31] Selleks, et mõista pinget ja voolutugevuse suhet aktuaalses vahemikus, viidi läbi katse (Sele 3.8). Valgusdiodile rakendati voolutugevust 0,03 mA kuni 20 mA ja mõõdeti vastavad pinget väärtused. Kuna punase ja sinise valgusdiodi pinget vastavused voolutugevusele on erinevad, siis pidi katset läbi viima mõlema värvusega diodidega, ühendades peale ühte katset toite teisele RGB valgusdiodi jalale.



Sele 3.8 Valgusdiodi pingete ja voolutugevuse suhte mõõtmine

Tabel 3.1 Valgusdiodide pingete ja voolutugevuste suhted

Sinine valgusdiod		Punane valgusdiod	
Voolutugevus I, mA	Pinge U, V	Voolutugevus I, mA	Pinge U, V
30 μ A	2,41 V	30 μ A	1,62 V
100 μ A	2,47 V	100 μ A	1,69 V
300 μ A	2,53 V	300 μ A	1,73 V
1 mA	2,61 V	1 mA	1,79 V
3 mA	2,72 V	3 mA	1,87 V
10 mA	2,90 V	10 mA	2,02 V
20 mA	3,02 V	20 mA	2,18 V

Mõõdetud valgusdiodide pingete ja voolutugevuste väärtused on esitatud tabelis (tabel 3.1). Kuna valgusdiodi pingete-voolu tunnusjoone graafik (Sele 3.9) ei ole lineaarne, siis on arvutuse lihtsustamiseks võimalik vahemike punktide vahele tekitada lineaarsed lõigud, mis võimaldavad tunduvalt täpsemalt seada sisendsignaali väärtusi vastavusse väljundsignaali väärtustega.

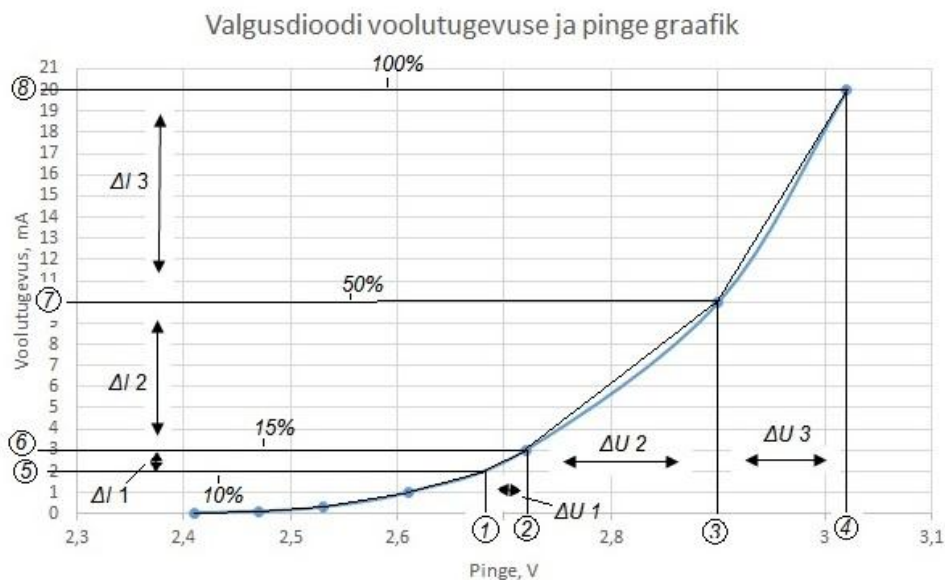
Lineaarsete lõikudega graafik (Sele 3.9) näitab valgusdiodi voolutugevust ja pinget. Graafikul on ka välja toodud vahemike piiridel olev proportsioon nimivoolu suhtes (protsentides).

Jooned 1-4 näitavad valgusdiodide keskmiste pingeväärtuste vahemikke

- Joon 1 = $U1_{\text{miinimum}}$,
- Joon 2 = $U1_{\text{maksimum}}$ ja $U2_{\text{miinimum}}$,
- Joon 3 = $U2_{\text{maksimum}}$ ja $U3_{\text{miinimum}}$,
- Joon 4 = $U3_{\text{maksimum}}$.

Jooned 5-8 näitavad valgusdiodide voolutugevusi

- Joon 5 = $I_{1\text{miinimum}}$,
- Joon 6 = $I_{1\text{maksimum}}$ ja $I_{2\text{miinimum}}$,
- Joon 7 = $I_{2\text{maksimum}}$ ja $I_{3\text{miinimum}}$,
- Joon 8 = $I_{3\text{maksimum}}$.



Sele 3.9 Valgusdiodi voolutugevuse ja pingega graafik

ATTiny sees on analoog-digitaalmuundur, mille eraldusvõime on 10 bitti ning mis saab kasutada sisemist 2,56 V tugipinget. See tähendab, et analoogsisendist saab lugeda väärtusi 0-1023, mis vastavad pingele sisendis vahemikus 0 ... 2,56 V. Vähim eraldussamm on sellisel juhul arvutatav valemiga 3.4.

$$U_{LSB} = \frac{U_{tugi}}{2^{10}} \quad (3.4)$$

kus U_{LSB} - ühe analoogväärtuse pingega, V

U_{tugi} – ATTiny sisemine tugipinge, analoogsisendi maksimum väärtus, V

$$U_{LSB} = \frac{2,56}{1023} = 0,0025 \text{ V} = 2,5 \text{ mV}$$

Arvutuste tulemusena saab teada, et analoogsisendi ühele väärtusele vastab 2,5 mV. Seades kontrolleri käivitumispiiriks 0,256 V, on võrreldes kogumõõteulatusega (2,56 V) vaja tagada lineaarne valgusviljakus, ehk tasemel 10%. Valgusdiodi nimivalgusvoog esineb voolu 20 mA korral [31]. See tähendab, et 10% juures on vastav voolutugevus 2 mA. Analoogsisendi pingega, protsendi ja väärtuse vastavusi valgusdiodi voolutugevusega näitab tabel 3.2. Teades neid

vastavusi on võimalik igale analoogsisendi väärtusele arvutada välja protsent, mis jääb teatud valgusdiodi voolutugevuse vahemikku.

Tabel 3.2 Analoogsisendi väärtused vastavuses valgusdiodi voolutugevusega

Valgusdiodi voolutugevus I, mA	Analoogsisendi protsent, %	Analoogsisendi pinge U, V	Analoogsisendi väärtus, 0-1023
20 mA	100%	2,56 V	1023
10 mA	50%	1,28 V	511
3 mA	15%	0,384 V	153
2 mA	10%	0,256 V	102

Valgusdiodi voolu saab juhtida läbi valgusdiodile antava pinge. Selleks saab rakendada kontrolleri sisemist pulsilaiusmodulatsiooni funktsiooni. Kontrolleri digitaalväljundpinge on võrdne toitepingega (3,3 V). Selleks, et tagada väljundviigul keskmine pingeväärtus, mis erineb toitepingest, saame rakendada pulsilaiust töösükliga, mille pikkus on väiksem 100%-st. Pingeväärtust väljundpingele saab arvutada valemiga 3.5.

$$U_{kesk} = U_{toide} * \frac{D\%}{100} \quad (3.5)$$

kus U_{kesk} - keskmine pingeväärtus väljundviigul, V,
 U_{toide} - kontrolleri digitaalväljundpinge, V,
 $D\%$ - pulsilaiuse töösükkel, %.

Vajaliku pinge saame, kui rakendame väljundi lülitamisel pulsilaiust töösükliga D%

$$D\% = \frac{U_{kesk}}{U_{toide}} * 100\%.$$

Näiteks selleks, et tagada valgusdiodi valgusviljakus tasemel 50%, tuleb valgusdiodile rakendada vool 10 mA. Sellisele voolule vastab pinge väärtus sinise diodi puhul 2,9 V ning punase puhul 2,02 V (vt. tabel 3.1). Sinise diodi puhul on vajalik rakendada seega pulsilaiuse töösüklit

$$D\% = \frac{2,9}{3,3} * 100\% = 88\%.$$

Punasele diodile tuleb rakendada pulsilaiust

$$D\% = \frac{2,02}{3,3} * 100\% = 61\%.$$

Seega tuleb täpse pulsilaiuse töösükli pikkuse jaoks leida seosed valgusdiodi voolu ning temale rakendatava pinge vahel. Et seos on mittelineaarne, siis programmis paremaks realiseerimiseks kasutame lõigu kaupa lähenemist sirgetega (vt. Sele 3.9).

Selleks, et määrata analoogsisendi proportsioonile vastavat valgusdiodile rakendatavat pinge väärtust, peab kõigepealt teadma analoogsisendile vastavat proportsiooni skaalas 0-100% maksimumväärtusest. Analooisendi proportsiooni väärtus on ühtlasi ka diodile rakendatava voolu proportsioon nimivoolu suhtes. Seejärel asetades tabelis 3.1 näidatud valgusdiodi voolutugevuse vahemikku, teades vahemiku suurust, vahemiku miinimum pinget ja voolutugevust, vahemiku pingete vahet ning vahemiku analoogsignaali protsendile vastavat voolutugevust on võimalik arvutada välja keskmine pingeväärtus väljundviigule valemist 3.6.

$$U_{diod} = U_{miinimum} + \frac{\Delta U}{\Delta I} * (I_{kogu} - I_{miinimum}) \quad (3.6)$$

kus U_{diod} - keskmine pingeväärtus väljundviigule, V,
 $U_{miinimum}$ - vahemiku miinimum pinget, V,
 ΔU - vahemiku pingete vahe, V,
 ΔI - vahemiku voolutugevuste vahe, mA,
 I_{kogu} - analoogsignaali protsendile vastav voolutugevus, mA,
 $I_{miinimum}$ - vahemiku miinimum voolutugevust, mA.

Näiteks analoog-sisendsignaali, mille tase on 70% saab arvutada temale keskmise pinget väljundviigule järgmiselt. 70% nimivoolust 20 mA vastab vool 14 mA.

Tabeli 3.1 abil teame, et 14 mA suurune valgusdiodi voolutugevus jääb vahemikku 10-20 mA. Keskmise pinget arvutamiseks vajalikud väärtused on võimalik võtta tabelist vahemiku alusel. Sinisele valgusdiodile keskmine pinget arvutamiseks on vaja teada

- vahemiku miinimum pinget $U_{miinimum} = 2,9$ V, maksimum pinget 3,02 V (tabelist 3.1),
- vahemiku pingete vahet $\Delta U = 3,02 - 2,9 = 0,12$ V,
- vahemiku voolutugevuste vahet $\Delta I = 20 - 10 = 10$ mA,
- vahemiku miinimum voolutugevust $I_{miinimum} = 10$ mA.

Selliste väärtuste rakendamisel saame sinisele diodile vajaliku keskmise pinget ligikaudseks väärtuseks

$$U_{diod} = 2,9 + \frac{0,12}{0,01} * (0,014 - 0,01) = 2,95 \text{ V.}$$

Keskpinget teadmisel on võimalik arvutada välja sinisele diodile pulsilaiuse töösükkel.

$$D\% = \frac{2,95}{3,3} * 100\% = 89\%$$

Arvutame pulsilaiuse töötssükli välja ka punasele valgusdiodile. Punasele valgusdiodile keskmise pinge arvutamiseks on vaja teada

- vahemiku miinimum pinget $U_{miinimum} = 2,02 \text{ V}$, $U_{maksimum} = 2,18 \text{ V}$ (tabelist 3.1),
- vahemiku pingete vahet $\Delta U = 2,18 - 2,02 = 0,12 \text{ V}$,
- vahemiku voolutugevuste vahet $\Delta I = 20 - 10 = 10 \text{ mA}$,
- vahemiku miinimum voolutugevust $I_{miinimum} = 10 \text{ mA}$.

Selliste väärtuste rakendamisel saame punasele diodile vajaliku keskmine pinget ligikaudseks väärtuseks

$$2,02 + \frac{0,16}{0,01} * (0,014 - 0,01) = 2,08 \text{ V}$$

Teades keskmist pinget on võimalik arvutada punasele valgusdiodile pulsilaiuse töötssükkel

$$D\% = \frac{2,08}{3,3} * 100\% = 63\%$$

Näitest saab järeldada, et keskmise väljundpinge arvutamiseks sobib valem 3.6. Nii on võimalik vahemike abil arvutada sisendsignaali igale pingele vastav keskmine väljundpinge ja selle kaudu pulsilaiuse töötssükkel. Programmi programmeerimisel tuleb ära defineerida väljundpingete vahemikud ja nendele vastavad valgusdiodi voolutugevused ning sisendsignaali pinged vastavuses protsentidele. Peale seda tuleb seada väljundsignaalide protsendid vastavusse valgusdiodi voolutugevustele vastavate pingete saamiseks pulsilaiusmodulatsiooni töötssükklite pikkusega. Algoritmi täpne ülesehitus vt. Lisa 6.

4. ALALISVOOLUMOOTORI ÕPPEMAKETI EDASIARENDUSED

Õppemaketi edasiarendused seletavad üldiselt projekti komponente, mis pole veel valminud. Edasiarendused on liigitatud mehaanilisteks, elektri ja elektroonilisteks ja programmeeritavateks.

- Mehaanika osa kirjeldab harjadega rootoripea ehitust.
- Elektri ja elektroonika osa räägib mootori juhtelektroonika põhimõttest, nii harjadega kui ka harjadeta rootoripea korral.
- Programmeerimise edasiarendused seletavad üldiselt juhtelektroonika programmeerimise algoritmi.

4.1 Mehaanika edasiarendused

Alalisvoolumootori kahe tüübi teostamisel pole veel projekteeritud harjadega rootoripead. Mehaanika edasiarendused räägivad harjadega rootoripea projekteerimise põhimõttest ja komponentidest, mida harjadega rootoripea teostamiseks vaja läheb.

Harjadega rootoripea konstruktsiooni projekteerimise aluseks saab võtta harjadeta konstruktsiooni (Sele 2.8). Kõigepealt tuleb välja mõelda ankrumähiste asetus. Ankrumähised võib asetada rootoripeale püsिमagnetite asemele. Püsिमagnetite plokk on harjadeta rootoril neli, aga ankrumähiseid võiks olla samasuguse puhtast rauast plaadi sees kolm või kaks, et oleks iga ankrumähist võimalik toita ühelt poolilt tuleva vooluga. Harjad tuleb projekteerida rootori peale nii, et need ulatuksid poolide välimisele diameetrile. Nii saab poolile antavat toidet kasutada ära harjadega rootoripea ankrumähiste magnetiseerimiseks.

Kommutaatori osa tuleb projekteerida poolide banaani-tüüpi ühendusklemmide peale. Selleks saab konstrueerida väikese karbi, mis on ühendatud toiteliiniga. Karbi küljes on banaani-tüüpi test ühendusklemmidega ühendatavad otsad, millega saab pool oma toite. Karbi peale tuleb projekteerida kommutaatori klemmid, mis on jadaühenduses pooli ja toiteliiniga (Sele 1.8). Kommutaatori klemmid ja harjad peavad olema omavahel ühenduses, et ankrumähistele vool peale anda.

Harjadega rootoripea magnetväljade tekkimise poolused ja harjade üleminek ühelt poolilt teisele pole täielikult läbi mõeldud. See on õppemaketi mehaanika ehitamise edasiarendus peale seda, kui on olemas töötav harjadeta rootoripea.

4.2 Elektri ja elektroonika edasiarendused

Elektri ja elektroonika edasiarendused keskenduvad juhtelektroonika väljatöötamisele. Juhtelektroonika asub mootori korpuse alumisel tasandil ja toiteliin pealmise plaadi alumisel küljel. Juhtelektroonika olemasolul saab anda mootorile vastavalt tüübist peale õigesti ja õigeaegselt elektri. Kahe alalisvoolumootori tüübi näitamiseks peab saama lülitada juhtelektroonikat kolme režiimi. Üks nendest režiimidest on mõeldud harjadega alalisvoolumootori juhtimiseks, teine harjadeta alalisvoolumootori juhtimiseks ja kolmas katkestab voolu, mis tähendab, et poolideni ei jõua elektrit. Režiimide ümberlülitamist saab teostada lülitiga.

Harjadeta rootori juhtimiseks peab kindlasti kasutama kontrolleri, sest on vaja lugeda sensorite väärtuseid ja lülitada staatori poole sisse õigeaegselt. Sensoriteks on mootoril Halli tajurid. Kuna meie mootoril on kaksteist pooli, siis on vaja kahteteist Halli tajurit, et teada rootoripea asendit. Tajurite info analüüsimisel kontrolleriis saab läbi MOSFET transistoridega lülitada neljale õigele poolile peale rootoripead tõmbavad ja lükkavad jõud. Iga transistorile on paralleelselt ühendatud diodid, mis juhivad voolu maha võtmisel inertsist tekkiva elektromotoorjõu transistoridest mööda. Magnetväljade rakendamine toimub vastavalt sellele, mis pidi tahetakse rootorit pöörlema panna. Transistoridele antakse kontrolleriist peale vastav pulsilaiusmodulatsiooni signaal, et poolid saaksid peale soovitud pinget. [10]

Harjadega rootoripea juhtimine on lihtsamini teostatav, kui harjadeta rootoripea juhtimine. Selline juhtimine ei vaja sensoreid ja otseselt ka kontrolleri. Andes kõikidesse poolidesse voolu peale hakkab harjadega rootor ringi käima. Selleks, et oleks võimalik muuta pinget poolides ja mootori pöörlemise suunda, peab siiski kasutama juhtimiseks kontrolleri. Mootori pöörlemise suuna muutmiseks on vaja projekteerida H-sild. Sellist elektroonikalülitust on võimalik teostada nelja MOSFET transistoriga. Transistoridega paralleelselt on ühendatud diodid, mis toite lahti ühendamisel juhivad mootoris inertsiga tekkiva elektromotoorjõu transistoridest mööda, et see ei läheks kontrolleriisse. Andes transistoridele peale pulsilaiusmodulatsioon signaale saab kontrollida pinget pooli solenoidides. [10]

Juhtelektroonika teostamiseks pole veel välja valitud kontrolleri. Selleks, et oleks võimalik juhtelektroonika välja töötada tuleb kõigepealt valmistada elektriskeemid mõlemale alalisvoolumootori tüübile ja seejärel osta või projekteerida elektroonikaplaad, mis suudaks süsteemi juhtida.

4.3 Programmeerimise edasiarendused

Programmeerimise edasiarendused hõlmavad juhtelektroonika programmeerimist. Kuna juhtelektroonika elektri ja elektroonikaosa pole veel täielikult välja töötatud, siis on väga raske rääkida konkreetse mikrokontrolleri programmeerimise algoritmist. Võimalik on sõnastada lahti mõlema alalisvoolumootori programmeerimisalgoritmide põhimõtted.

Harjadega alalisvoolumootori juhtelektroonika transistoridest H-sild peab olema ümberlülitatav elektroonilise lülitiga. MOSFET transistoridele antavad pulsilaiusmodulatsiooni signaalid peavad olema muudetavad potentsiomeetriga, et saaks muuta poolidele peale antava pinge suurus. Lülitades H-silla ümber peab olema programmeeritud sisse viivitus, mis ei lülitaks kohe teistpidi voolu peale, sest kiirel ümberlülitamisel hakkab mõne aja pärast inerts lõhkuma rootoripead. Mootori pöörlemiseks päripäeva on korraga programmeeritud töötama kaks transistorit ja vastupäeva töötamiseks teised kaks transistorit. [10]

Harjadeta alalisvoolumootori juhtprogrammi välja töötamine on tunduvalt raskem. Selleks on vaja tuvastada halli tajuritega, millises asendis on rootor. Peale rootori asendi tuvastamist saab lülitada sisse vastavad MOSFET transistorid, mis lülitavad voolu peale neljale poolile. Rootori liikumisel peavad Halli tajurid kogu aeg töötama ja tuvastama rootori asukohta, nii saab kontrolleri lülitada järjest uusi poole tööle. MOSFET transistoridele antakse peale pulsilaiusmodulatsiooni signaalid. Selleks, et poolile antavat pinget saaks reguleerida peab olema kontrolleri ühendatud potentsiomeeter, millega saab muuta pulsilaiust. [10]

Programmeerimise edasiarendused sõltuvad juhtelektroonikast, mis pole veel valminud. Juhtelektroonika projekteerimisel tuleb arvestada, et see oleks hiljem võimalikult lihtsalt programmeeritav. Erinevate mootoritüüpide juhtimine ühe kontrolleri on kindlasti üks raskemaid teemasid projekti edasiarendamisel.

KOKKUVÖTE

Koostatud bakalaureusetöö sisu moodustab projekt Tallinna Tehnikaülikooli Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituudis. Projekti eesmärk oli modelleerida ja valmis ehitada mootorite visualiseerimise õppemakett. Lõputöö kirjeldas projekti esimest etappi ehk alalisvoolumootori õppemaketi välja töötamist.

Käesoleva töö esimeses osas kirjeldasin alalisvoolumootorite tööpõhimõtteid ja tüüpe. Õppemaketi välja töötamisel polnud ees sarnast lahendust, mis tegi praktilise töö alustamise raskeks. Teooria kaudu sai täpsema ettekujutuse sellest, mis on olulised faktorid mootori projekteerimisel ning selle põhjal arendati välja õppemaketi lahendus.

Mehaanika osas valmisid lahendused mootori põhilistele komponentidele - mootori korpus, rootor, harjadeta rootoripea ja staator. Mootori korpus projekteeriti paralleelseks maaga, et mootori tööprotsesse oleks võimalik hiljem pealt poolt vaadelda. Välja töötatud rootori komponendid on võll, pukklaagrid ja harjadeta rootoripea. Oluline omadus rootori lahenduses on rootoripeade vahetatavus, mis tekitab võimaluse visualiseerida õppemaketiga erinevate mootorite tööd. Testimaks rootoripea funktsioneerimist enne valmis ehitamist sooritati programmiga Finite Element Method Magnetics analüüs. Tulemuseks saadud jõumomendi väärtus oli piisavalt suur, et järeldada mootori tööle hakkamist välja arendatud rootoripea lahendusega. Õppemaketi staator koosneb kaheteistkümnest poolist ja nende vahel asetsevatest terassüdamikest. Poolid projekteeriti staatorile magnetväljade tekitamiseks ja terassüdamikud magnetvälja jõujoonte sulgumiseks mööda staatori perimeetrit.

Lõputöö elektri ja elektroonika osa lahenduses on välja arvatud pooli solenoidi maksimaalne toitepinge ja näidatud, kuidas valgusdiodidega on võimalik indikeerida tekkivat magnetvälja tugevust. Visualiseerimaks paremini staatori tööd projekteeriti poolile kaks valgusdiodi, mis näitavad tekkiva magnetvälja polaarsust. Pooli toitepinge ja valgusdiodi valgustugevuse mittelineaarsest sõltuvusest tekkis vajadus koostada trükkplaat, mis suudaks väärtused seada lineaarsesse vastavusse.

Trükkplaadil olev mikrokontroller suudab programmi abil tekitada vastavuse, mis toitepinge suurendamisel paneb valgusdiodid eredamalt põlema. Programmeerimise osas töötati välja trükkplaadil oleva mikrokontrolleri algoritm pooli toitepinge ja valgusdiodide valgustugevuse vastavusse seadmiseks.

Lõputööülesannet võib lugeda peamises osas täidetuks, sest suur osa alalisvoolumootori õppemaketi mehaanilisest, elektrilisest, elektroonilisest ja programmeerimise osast on juba välja arendatud ja teatud komponentide prototüüplahendused on ka valmis ehitatud. Projektiga tegelemist jätkatakse ka peale lõputöö esitamist ja kaitsmist, et valmiks lõplik lahendus, mida oleks hiljem võimalik õppejõududel õppetöös kasutada.

SUMMARY

The current bachelor's thesis was based on a project in the Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics of Tallinn University of Technology. The aim of the project was to model and build a teaching maquette for the visualization of motors. This thesis described the first part of the project – the development of a direct current educational kit.

In the first part of my thesis I described the working principles and types of direct current motors. There was no similar example to base the work upon and this made the start of the practical work more difficult. The theory gave me a better overview of the most important aspects for designing a motor and based upon that the solution for the educational kit was developed.

For the mechanical part the solutions for the main parts of the motor were developed – housing for the motor, rotor, the brushless rotor head, and the stator. The housing of the motor was designed to be parallel to the Earth in order to enable the observation of the motor processes from above. The rotor parts developed during the project are the shaft, Y-bearings, and the brushless rotor head. It is an important attribute that the rotor heads can be replaced and thus the functions of different motors can be visualised with the same educational kit. Before construction process the functioning of the rotor head was analysed with the program Finite Element Method Magnetics. The resulted torque was enough to conclude that the motor will function with the constructed solution for the rotor head. The stator of the educational kit is composed of twelve poles and the steel cores between each of them. The poles were planned in order to create the magnetic field for the stator and the steel cores for closing the lines of force of the magnetic field along the perimeter of the stator.

During the development of the electrical and electronic part of the solution the maximal supply voltage of the solenoid was calculated and it was demonstrated how it is possible to use light-emitting diodes for indicating the magnitude of the magnetic field that emerges. In order to visualise the work of the stator, two light-emitting diodes showing the polarity of the magnetic field were added. The non-linear relationship between the supply voltage and the light intensity of the light-emitting diode made it necessary to develop a printed circuit board that would create a linear dependence.

The programmed microcontroller on the printed circuit board can create a dependence so that the increase in supply voltage makes the light-emitting diodes burn brighter. In the programming part of the thesis the algorithm for the microcontroller described above was created.

The main task of the current thesis can be considered fulfilled because most of the mechanical, electric, electronical, and programming components for the direct current educational kit have been already developed and prototypes for some components have been already constructed. The

project will be continued also beyond this thesis paper in order to create a final solution that can then later be used by the lecturers for teaching purposes.

KASUTATUD ALLIKAD

1. Lorentzi jõud

<http://opik.fyysika.ee/index.php/book/section/1447>

(03.05.2017)

2. Lorentzi jõud

<http://opik.fyysika.ee/index.php/book/section/1447>

(03.05.2017)

3. Ampere'i seadus. Magnetinduktsioon

<https://www.taskutark.ee/m/amperei-seadus-magnetinduktsioon/>

(03.05.2017)

4. Fleming Left Hand rule and Fleming Right Hand rule

<https://www.electrical4u.com/fleming-left-hand-rule-and-fleming-right-hand-rule/>

(04.05.2017)

5. Maxwell's Right Hand Grip Rule And Right Handed Cork Screw Rule

<http://www.electrical4u.com/2014/03/right-hand-grip-cork-screw-rule.html>

(04.05.2017)

6. Working or Operating Principle of DC Motor

<https://www.electrical4u.com/working-or-operating-principle-of-dc-motor/>

(06.05.2017)

7. Faraday induktsiooniseadus

<https://www.taskutark.ee/m/faraday-induktsiooniseadus/>

(06.05.2017)

8. Understanding D.C. Motor Characteristics

<http://lancet.mit.edu/motors/motors3.html>

(07.05.2017)

9. History of Brushless DC motors

<http://www.nmbtc.com/brushless-dc-motors/brushless-dc-motors/>

(07.05.2017)

10. Scarpino, M. Motors for Makers: A Guide to Steppers, Servos, and Other Electrical Machines.

first ed. Indianapolis: Que Corporation, 2015

11. Types of DC Motor Separately Excted Shunt Series Compound DC Motor

<https://www.electrical4u.com/types-of-dc-motor-separately-excited-shunt-series-compound-dc-motor/>

(08.05.2017)

12. Brushless Motors and Brushed Motors, what`s the difference?

<https://quantumdevices.wordpress.com/2010/08/27/brushless-motors-vs-brush-motors-whats-the-difference>

(08.05.2017)

13. Brushless DC Motor, How it works ?

<http://www.learnengineering.org/2014/10/Brushless-DC-motor.html>

(09.05.2017)

14. THE BASICS OF ELECTRIC POWER:BRUSHLESS MOTORS

<http://www.rclab.info/2014/01/the-basics-of-electric-power-brushless.html>

(09.05.2017)

15. Синхронный двигатель с постоянными магнитами

<http://engineering-solutions.ru/motorcontrol/pmsm/>

(09.05.2017)

16. Metric Tap & Clearance Drill Sizes

<http://www.littlemachineshop.com/reference/tapdrillsizes.pdf>

(11.05.2017)

17. Y-bearings (insert bearings)

<http://www.skf.com/ph/products/bearings-units-housings/ball-bearings/y-bearings/index.html>

(20.04.2017)

18. Kallaste, A. Aksiaalvooga püsimagnetitega toroidmähisega generaator: magistritöö, Tallinna Tehnikaülikool, Tallinn, 2006

19. Nu-Tech Engineering Zinc Plated Steel Adjustable Feet A040/014 50mm PA Reinforced Nylon 61mm 500kg 38mm M10 10°

<http://se.rs-online.com/web/p/adjustable-height-mounts-feet/0686761/>

(20.04.2017)

20. Elektromagnet

<https://et.wikipedia.org/wiki/Elektromagnet>

(12.05.2017)

21. Võimsus

<https://et.wikipedia.org/wiki/V%C3%B5imsus>

(12.05.2017)

22. Eritakistus

<https://et.wikipedia.org/wiki/Eritakistus>

(12.05.2017)

23. Ohmi seadus

https://et.wikipedia.org/wiki/Ohmi_seadus

(12.05.2017)

24. MULTICOMP 24.247.2 Banana Test Connector, 4mm, Receptacle, Panel Mount, 32 A, Nickel Plated Contacts, Black

<http://ee.farnell.com/multicomp/24-247-2/receptacle-32a-4mm-panel-black/dp/1698951>

(25.04.2017)

25. Sildalaldi

<https://et.wikipedia.org/wiki/Sildalaldi>

(12.05.2017)

26. STMICROELECTRONICS STPS0520Z Schottky Rectifier, 20 V, 500 mA, Single, SOD-123 2 Pins, 320 mV

http://ee.farnell.com/stmicroelectronics/stps0520z/diode-schottky-2a-20v-smd/dp/1467545?ost=1467545&anyFilterApplied=false&searchView=table&isrcfnonsku=false&ddkey=http%3Aet-EE%2FElement14_Estonia%2Fsearch

(24.04.2017)

27. LINEAR TECHNOLOGY LTC3105EMS#PBF DC-DC Switching Boost (Step Up) Regulator, Adjustable, 225mV-5Vin, 1.5V-5.25Vout, 400mAout, MSOP-12

<http://ee.farnell.com/linear-technology/ltc3105ems-pbf/ic-dc-dc-convertor-msop-12/dp/1898601>

(24.04.2017)

28. Atmel ATTINY45-20XU, 8bit AVR Microcontroller, 20MHz, 4 kB Flash, 8-Pin TSSOP

<http://se.rs-online.com/web/p/microcontrollers/8149223/>

(23.04.2017)

29. LED5 RGB 5mm 5000mcd 4-viiku CA

https://www.oomipood.ee/product/500rgb4e_led5_rgb_5mm_5000mcd_4_viiku_ca?q=RGB%20led
(23.04.2017)

30. ATTINY : PROGRAMMING

<http://www.kobakant.at/DIY/?p=3742> (vaadatud kuupäev)
(13.05.2017)

31. 500RGB4E

<http://data.oomipood.ee/kasutusjuhend//500RGB4E.pdf>
(13.05.2017)

32. Liist-, kiil- ja tihvtliited

http://www2.hariduskeskus.ee/opiobjektid/masinaelemendid/?KURSUSE_TEEMAD:P%D6%D6RD%20EMOMENTI_%DCLEKANDVAD_LIITED:Liist-%2C_kiil-_ja_tihvtliited.%26nbsp%3B
(11.05.2017)

LISA 1 STANDARDSETE LIISTUDE TABEL

Tabel L1 standardsete liistude tabel [32]

võlli läbimõõt d , mm	liistu ristlõike nimimõõde, mm		süvise sügavus, mm	
	laius b , mm	kõrgus h , mm	võlli, t_1	rummu, t_2
$12 < d \leq 17$	5	5	3	2,3
$17 < d \leq 22$	6	6	3,5	2,8
$22 < d \leq 30$	8	7	4	3,3
$30 < d \leq 38$	10	8	5	3,3
$38 < d \leq 44$	12	8	5	3,3
$44 < d \leq 50$	14	9	5,5	3,8
$50 < d \leq 58$	16	10	6	4,3
$58 < d \leq 65$	18	11	7	4,4
$65 < d \leq 75$	20	12	7,5	4,9
$75 < d \leq 85$	22	14	9	5,4
$85 < d \leq 95$	25	14	9	5,4
$95 < d \leq 110$	28	16	10	6,4
$110 < d \leq 130$	32	18	11	7,4

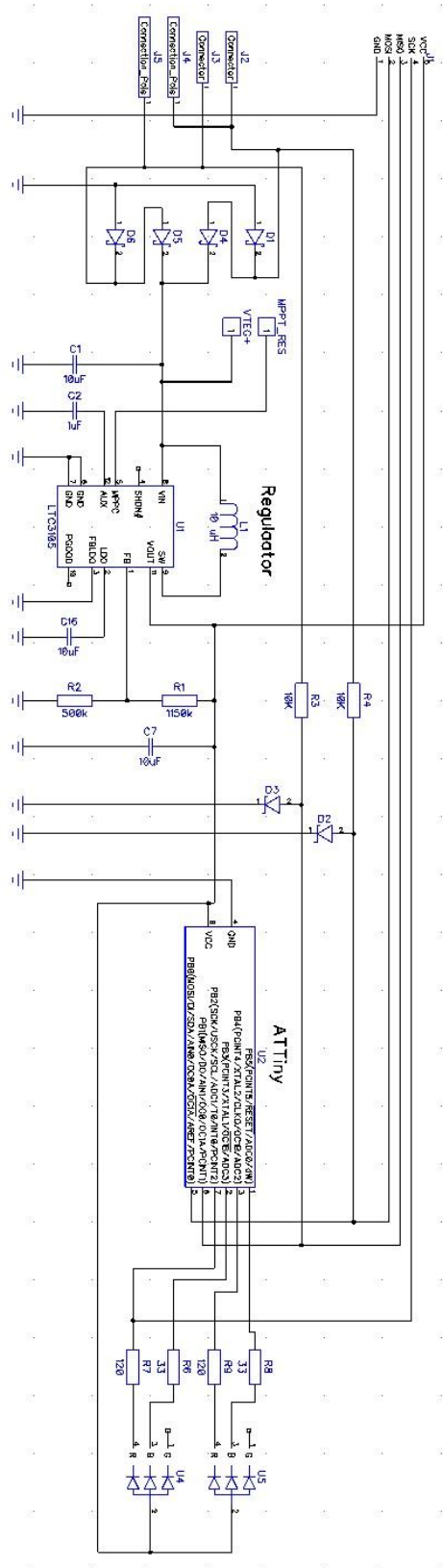
Märkus. Liistu pikkus valitakse kasutades alljärgnevat arvrida: 6; 8; 10; 14; 16; 18; 20; 22; 25; 28; 32; 36; 40; 45; 50; 56; 63; 70; 80; 90; 100; 110; 125; 140; 160; 180; 200; 250; 280; 315; 335; 400; 450.

LISA 2 POOLI ELEKTROONIKAPLAADI KOMPONENTIDE NIMEKIRI

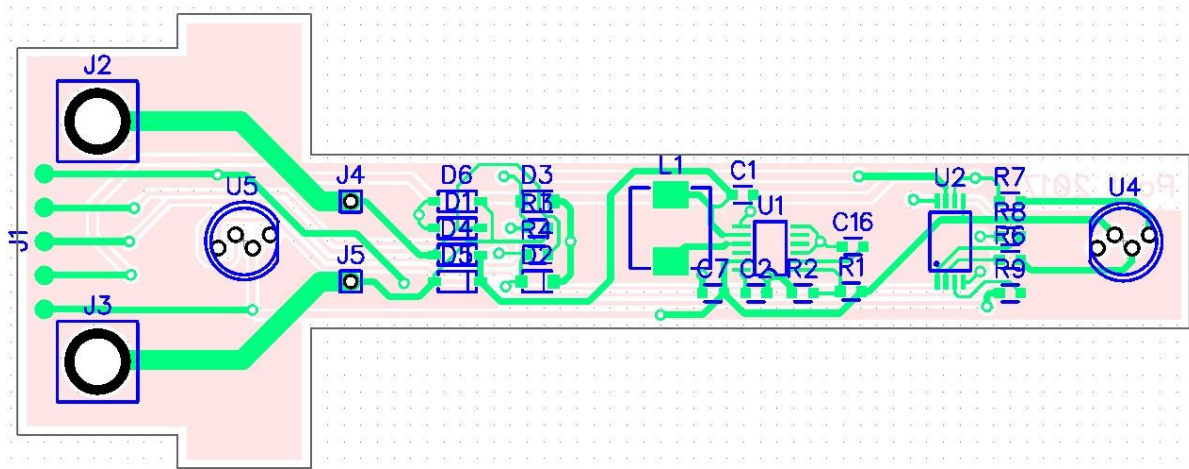
Tabel L2 Elektroonikaplaadi komponentide nimekiri

Komponent	Kogus
Kondensaator 1 μ F	1
Kondensaator 10 μ F	3
Schottky diood 20 V 500 mA	4
Stabilitor ehk zener-diood 2,7V 200 mW	2
Programmeerimisnõelad	5
Banaani tüüpi test ühendusklemm 4mm	2
Induktor pool 10 μ H	1
Takisti 33 Ω	2
Takisti 120 Ω	2
Takisti 10 k Ω	2
Takisti 500 k Ω	1
Takisti 1150 k Ω	1
Regulaator LTC3105	1
Mikrokontroller ATTiny 45 TSSOP	1

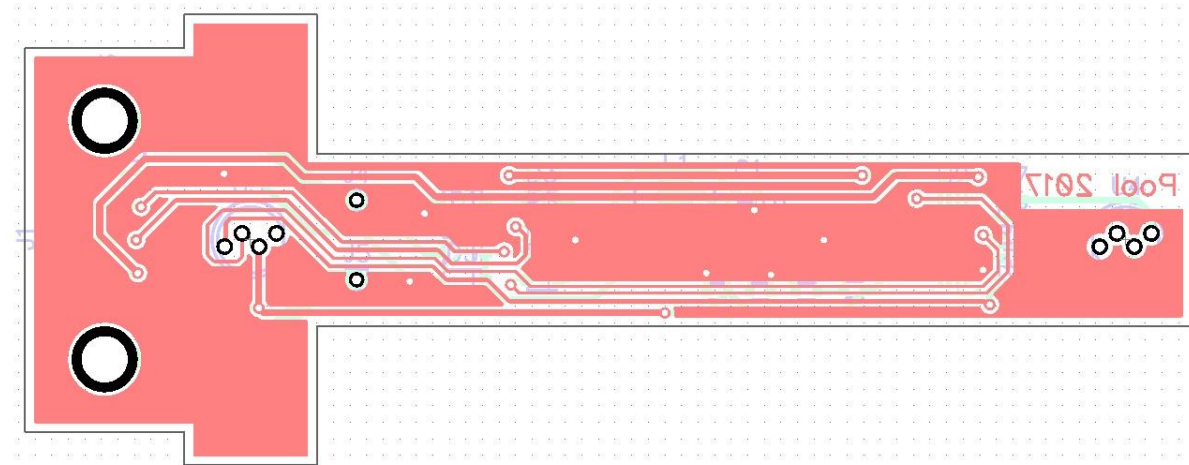
LISA 3 ELEKTROONIKAPLAADI ELEKTRISKEEM



LISA 4 TRÜKKPLAADI KOMPONENTIDE PAIGUTUSKEEMID

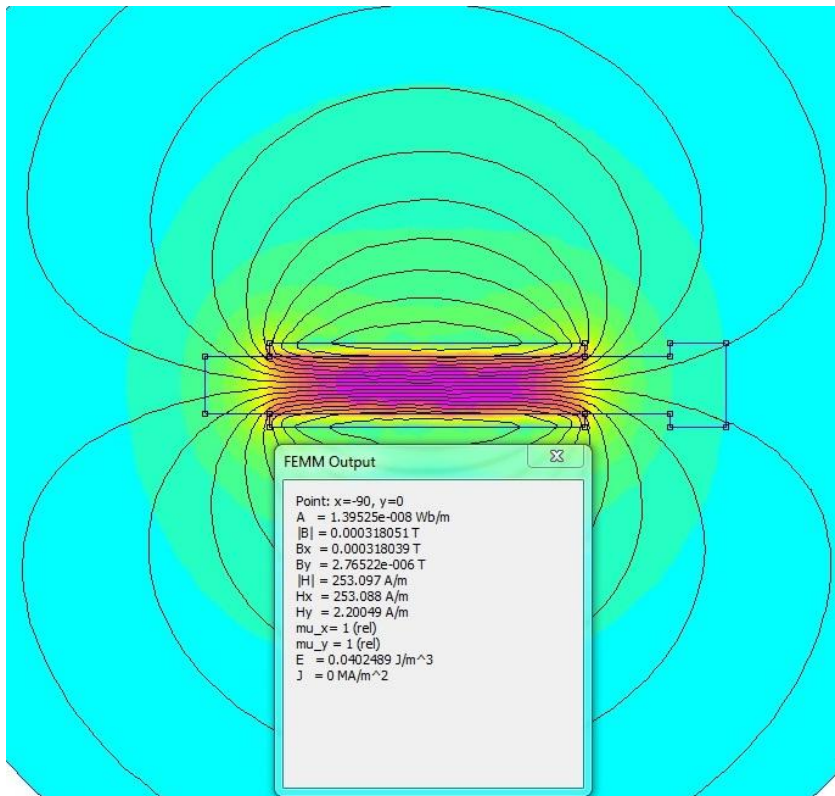


L4.1 Trükkplaadi pealmine pool

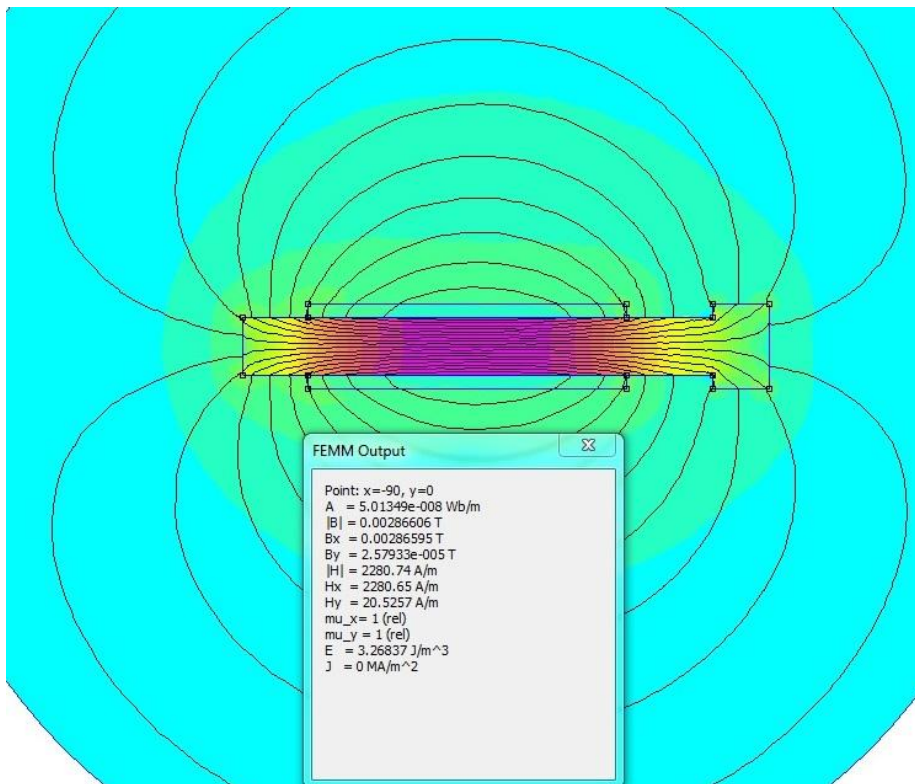


L4.2 Trükkplaadi alumine pool

LISA 5 SOLENOIDI MAGNETVÄLI POLDIGA JA ILMA



L5.1 Solenoidi magnetväli poldita



L5.2 Solenoidi magnetväli poldiga

LISA 6 ATTINY 45 PROGRAMMEERIMISE ALGORITM

