



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

ALALISVOOLUMOOTORI ÕPPEMAKETI
VÄLJATÖÖTAMINE
DEVELOPMENT OF DIRECT CURRENT MOTOR EDUCATIONAL KIT
BAKALAUREUSETÖÖ

Üliõpilane: Aleksei Poltoratski

Üliõpilaskood: 164393MAHB

Juhendaja: Lauri Kütt, professor

Tallinn 2019

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

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

“.....” 201.....

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

“.....” 201.....

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“.....”201....

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Aleksei Poltoratski, 164393MAHB

Õppekava, peeriala: MAHB02/13, Mehhatroonika

Juhendaja: professor Lauri Kütt, 620 3806

Lõputöö teema:

Alalisvoolumootori õppemaketi väljatöötamine

Development of Direct Current Motor Educational Kit

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Mootori õppemaketi täiendamine ja valitud tüüpi mootorite tööpõhimõtete realiseerimine antud maketil.
2. Maketil mootorite tööpõhimõtete näitamiseks sobiva elektroonilise süsteemi väljatöötamine ja realiseerimine.
3. Mootori õppemaketi juhtprogrammi koostamine, kasutajaliidese kujundamine ja programmeerimine.

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Alusandmetega tutvumine, lähteparametrite valik	15.03
2.	Mootori mehaanilise osa kujundamine	01.04
3.	Mootori elektroonikasüsteemi struktuuri kirjeldamine ja komponentide valik	10.04
4.	Mootori elektroonikasüsteemi programmeerimine	25.04
5.	Kasutajaliidese kujundamine	10.05
6.	Tulemuste vormistamine ja lõputöö valmimine	21.05

Töö keel: eesti keel

Lõputöö esitamise tähtaeg: "21" mai 2019

Üliõpilane: "....."201....a

/allkiri/

Juhendaja: "....."201....a

/allkiri

SISUKORD

EESSÕNA	5
SISSEJUHATUS	6
1. ALALISVOOLUMOOTORI TÖÖPÕHIMÕTE	8
1.1 Mootorite üldine ehitus.....	10
1.2 Harjadega alalisvoolumootor.....	11
1.3 Harjadeta alalisvoolumootor	14
2. ÕPPEMAKETI MEHAANIKA OSA	17
2.1 Õppemaketi üldehitus	17
2.2 Staatori ehitus	17
2.3 Rootori ehitus	20
3. ÕPPEMAKETI ELEKTRI JA PROGRAMMEERIMISE OSA.....	23
3.1 Lihtsaim elektriskeem lülititega	23
3.2 Magnetite polaarsuse indikatsioon	25
3.3 Draiverimoodul mikrokontrolleriga juhtimiseks	28
3.4 Arduino-põhine juhtimine	29
4. ALALISVOOLUMOOTORI ÕPPEMAKETI EDASIARENDUSED.....	32
4.1 Mehaanika edasiarendused.....	32
4.2 Elektri ja programmeerimise edasiarendused.....	32
KOKKUVÕTE	33
SUMMARY	35
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	37
LISA 1 MAKETI KOMPONENTIDE NIMIKIRI.....	40
LISA 2 MOOTORI AJAMI MOODULI SKEEM	41

EESSÕNA

Lõputöö eesmärgiks on alalisvoolumootori õppemaketi väljatöötlemine. Lõputöö on eeskujuks oli Kimmo Epleri bakalaureusetöö, millel oli kirjeldatud mehaanilise osa projekteerimine. Käesoleva töö põhiline osa on mootor maketi lihtsustatud ehitus ja juhtimissüsteem. Selline õppemakett võimaldab seda kasutada visuaalseks tööpõhimõtete esitamiseks. Maketi abil saab näidata mootori tööprintsibiid ning paremini selgitada üliõpilastele elektri seaduspärasusi. Käesolevas töös käsitletakse ka olemasolevaid mootortüüpe ning ehituse põhimõtted.

Lõputöö on valminud tänu Tallinna Tehnikaülikooli professori Lauri Kütti juhendamisele.

SISSEJUHATUS

Mehhatroonikasüsteemides on elektrimootor üks olulisim komponent. Elektrimootorid muundavad elektrilist energiat mehaaniliseks energiaks. Peamiselt kõik mehhanismid töö elektrimootorite abil.

Mootorite kasutatavaid tüüpe on väga palju. On olemas erinevate ehituse, suuruse, juhtimisega mootorid. Igal tüübil on nii eelised kui ka puudused, mida tuleb silmas pidada kui projekteeritakse seadmeid või soovitakse asendada juba olevat mootori teisega. Enim kasutatavad on harjadega ja harjadeta alalisvoolu-, vahelduvvoolu-, sünkroon- ja asünkroonmasinad, samm-mootorid. Mootorite õige valik sõltub tööpõhimõtte alusest, süsteemi hinnast ning ülesannete omadustest.

Ülikooli õppijatel ei ole tihtipeale piisavalt teadmisi elektrimootoritest, et tunda hästi rakendada. Lisainfot saab otsida internetist ja raamatutest, et parem aru saada mootorite tööpõhimõttest. Siiski, visuaalne ja lihtne esitus ja iseseisvalt mootori kokkupaneku võimalus annaks suure panuse mootorite tundmaõppimise arendamisele.

Tänapäeval muutub järjest olulisemaks teemaks üliõpilastele elektriga seotud teemade selgitamine praktilisel teel. Selleks on mõeldud ka alalisvoolumootori koostamine. Sellisel kujul ei ole veel olemas maketi, mis selgitas hästi mootori töövõimekust. Lisaks on raske leida sellist maketi mis oleks piisav illustratiivne ning iseseisvalt koostatav. Maketid, mis on praegu maailmaturul olemas, on suhteliselt keerulised ja peaaegu alati väga kallid.

Selle töö eesmärgiks on:

1. Mootori õppemaketi koostamine ja valitud tüüpi mootorite tööpõhimõtete demonratsiooni realiseerimine antud maketil.
2. Mootori tööpõhimõtte näitamiseks sobiva elektroonilise süsteemi väljatöötamine ja realiseerimine.
3. Mootori õppemaketi juhtprogrammi koostamine ja programmeerimine.

Selleks et valmistada mootori, mida võiks kasutada nii loengutes, praktikumides kui ka avatud üritusel oli mõeldud teha järgmised etapid:

1. Valmistatakse väikese mootori makett;
2. Proovitakse juhtimist primitiivsel viisil;
3. Arendatakse maketi peal programmiga juhtimine.

Mootormakett on ehitatud sellistest osadest:

1. Igal mootoril on kohustuslikult elektromagneetiline osa.
2. Staator - elektrimootori statsionaarne osa, elektromagnetid mähistega.
3. Rotor – elektrimootori liikuv osa, paiknevad püsिमagnetid
4. Juhtimise süsteem - mikrokontroller

Peamist rolli mootori liikumisel mängib pöörlev magnetväli. See sunnib pöörlema elektrimootoril rootori. Vahetades voolu suunda saab muuta pöörlamise suunda.

Tüüpilised mootorid:

1. Asünkroonmootor (lihtne ehitus, väike hooldusvajadus)
2. Sünkroonmootor (sünkroonne kiirus, kallis)
3. Harjadega alalisvoolumootor (lihtne kiiruse kontroll, vajab hooldust)
4. Harjavaba alalisvoolumootor (vähe hooldust, suur efektiivsus)

Selles töös valiti harjavaba mootori, millel on lihtne ehitus, see on vajalik visualiseerimiseks. Kõik põhilised mootori osad on kättesaadavad lihtsalt ja odavalt.

1. ALALISVOOLUMOOTORI TÖÖPÕHIMÕTE

Elektrimootorid on elektromehaanilised täiturmehhanismid, mis muundavad elektrienergiat mehaaniliseks energiaks. Elektrimootorid on tänapäeval kõige levinumad elektromehaanilised täiturmehhanismid. [1]

Jõud mis mõjub juhtmes magnetväljas liikuvale laengule nimetatakse hollandi füüsiku Hendrik Antoon Lorentz'i (1853 – 1928) auks Lorentz'i jõuks. [2] Seda jõudu saab arvutada valemiga 1.1. [3]

$$F_L = qvB\sin\alpha \quad (1.1)$$

kus F_L - osakesele mõjuv jõud, N,
 q - osakese laeng, C,
 v – laengu liikumiskiirus, m/s,
 B - magnetvälja magnetinduktsioon, T,
 α - nurk magnetvälja suuna ja laengu liikumise suuna vahel, °.

Ampere' sõnastas seaduspärasuse, mille abil on võimalik kirjeldada vooluga juhtmele mistahes magnetväljas mõjuva jõu suurust. Ampere'i seadust saab arvutada valemiga 1.2. [4]

$$F_A = BIl\sin\alpha \quad (1.2)$$

kus F_A - jõud, mis mõjub magnetväljas vooluga juhtmele, N,
 B - juhete mõjutava magnetvälja magnetinduktsioon, T,
 I - juhete läbiv voolutugevus, A,
 l - magnetväljas asuva juhtmelõigu pikkus, m,
 α – nurk, voolu suuna ja magnetvälja vahel, °.

Elektromagnetilise jõu tekkimise ja arvutamise füüsikalised võtted on järgmised. Üldiselt on ankrule mõjuv jõud F võrdeline pooluste ristlõike pindalaga ja õhupilu magnetilise induktsiooni ruuduga:

$$F = \frac{B^2 S}{2\mu_0} \quad (1.3)$$

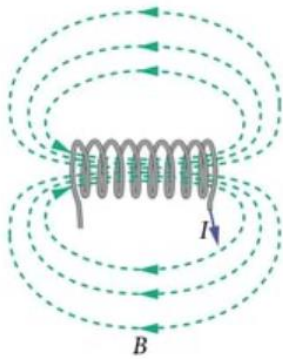
kus F - jõud njuutonites, N,
 B – induktsioon teslades, T,

S – pooluste ristlõikepindala ruutmeetrites, m^2 .

Tõmbejõudu saab reguleerida voolutugevuse muutmisega mähises. [5] Magnetväli solenoidi südamikus on otseselt proportsionaalne voolava solenoidi vooluga ja pöörete arvuga solenoidi pikkusühiku kohta. [6]

$$B = \mu_0 I n \quad (1.4)$$

kus μ_0 - magnetiline konstant,
 I – voolutugevus, A,
 n - keerdude arv solenoidi pikkusühiku kohta.

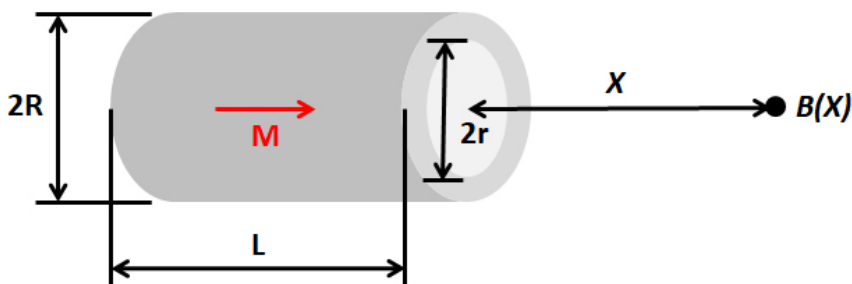


Joonis 1.1 Solenoidi magnetväli [7].

Püsिमagneti B väärtuse leidmiseks saab rakendada valemit [8].

$$B(X) = \frac{Br}{2} \left[\left(\frac{L+X}{\sqrt{R^2 + (L+X)^2}} - \frac{L-X}{\sqrt{r^2 + (L+X)^2}} \right) - \left(\frac{X}{\sqrt{R^2 + X^2}} - \frac{X}{\sqrt{r^2 + X^2}} \right) \right] \quad (1.5)$$

kus Br - magneti jääinduktsioon;
 X - katsepunkti ja magneti pinna vahelise õhupilu kaugus.



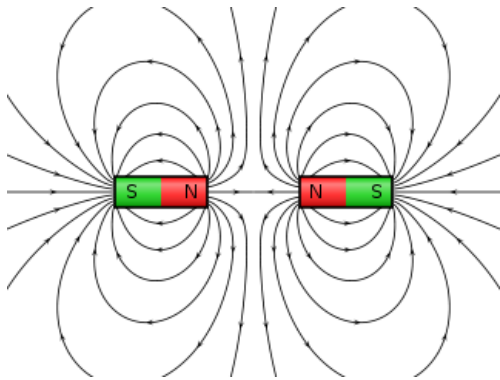
Joonis 1.2 Püsिमagneti magnetväli arvutus: L -magneti laius, R - magneti välisläbimõõt, r - magneti siseläbimõõt. [8]

Kahe silindrilise magnetiga, mille raadius on R ja pikkus L , mille magnetiline dipool on joondatud, saab jõudu leida ligikaudse valemiga (1.6). [9]

$$F(x) \simeq \frac{\pi\mu_0}{4} M^2 R^4 \left[\frac{1}{x^2} + \frac{1}{(x+2L)^2} - \frac{2}{(x+L)^2} \right] \quad (1.6)$$

kus M - magnetite magnetiseerimisvälja tugevus (magnetvälja tugevus),

x - magnetite vaheline kaugus. [9]



Joonis 1.3 Kahe töökuva silindrikujulise magneti väli [9]

Mootori tööpõhimõte on selles, et perioodiliselt muudetakse selle magnetvälja allika asukohta ja polaarsust, mis teise magnetvooga kombineerumisel põhjustab tõmbejõu või tõukejõu. Magnetväli, mille telg pöörleb ruumis, kus on konstantne nurga sagedus, nimetatakse pöörlevaks magnetväljaks. Kui induksiooni suurus magnetvälja telje mis tahes punktis jääb konstantseks, siis nimetatakse seda välja ümmarguse pöörleva magnetväljana. See on tingitud asjaolust, et seda saab esindada konstantse pikkuse vektoriga, mis pöörleb ruumis ning mille lõpp kirjeldab ringi ajal ringi. Kolme staatori mähise telg on üksteise suhtes nihutatud 120° võrra. [10]

1.1 Mootorite üldine ehitus

Alalisvoolumootorid koosnevad õhupiluga üksteisest eraldatud staatorist ja rootorist. Staatoril (ikkel) paiknevad magnetvälja poolused, milles tekitatakse magnetväli. Pöörlevat osa nimetatakse ankruks, mis koosneb mitmetest mähistest. Alalisvoolumootorites kasutatakse magnetvälja

tekitamiseks staatoril paiknevat ergutusmähist või püsिमagnetid. Mootori pöörlemiseks on vajalik tekitada pöördemoment. Pöördemomendi tekitamiseks on vaja vooluga juhti ja magnetvälja. [1] Kontaktrõngaste ja harjade abil juhitakse pöörlevasse raami alalisvool. Selleks et rootor pöörleks püsivalt ühes suunas, tuleb ankruvoolu suunda iga poolperioodi tagant reverseerida. Ankruvoolu suuna muutmiseks kasutatakse alalisvoolumootorites mehaanilist või pooljuhtidega töötavat kommutaatorit. [1]

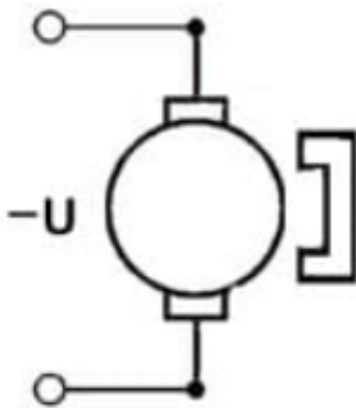
1.2 Harjadega alalisvoolumootor

Mootori harjadeks nimetatakse kontakte, mille kaudu juhitakse elektrivool mootori rootoril olevatesse mähistesse. Tüüpilises harjadega alalisvoolumootoris on rootoris magnetvälja tekitamiseks mähis ja staatoris kas mähis või püsिमagnetid. Põhiline niisuguse lahenduse miinus on kontaktharjade kulumine. Harjadega alalisvoolumootor pöörleb ka ilma juhtelektroonikata, lihtsalt alalisvooluallikaga ühendamise järel. [11]

Sõltuvalt magnetvälja tekkimise põhimõttel võib see olla püsिमagnetitel või erilistel ergutusmähistel. Need on mõeldud pöördemomendi moodustamiseks vajaliku magnetvoo loomiseks. Harjadega alalisvoolumootor mis kasutab ergutusseadet, eristub mähiste tüübi järgi, need võivad olla:

- sõltumatu;
- paralleelsed;
- järjestikused;
- segatud. [13]

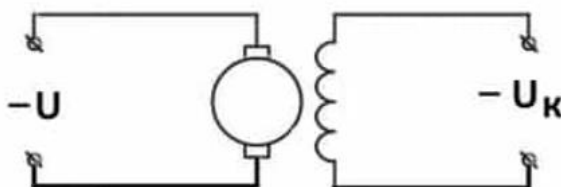
Esimeseks on püsिमagnetergutus (Joonis 1.4)



Joonis 1.4 Püsिमagnetergutusega mootori tingmärk [12]

Erinevus on selles, et ergastusrullide asemel kasutatakse püsिमagneteid. See on tingib konstruktsiooni lihtsuse, pöörlemiskiiruse lihtsa juhtimise (sõltuvalt pingest) ja selle suuna muutusest (on piisav polaarsuse muutmiseks). Mootori võimsus sõltub otseselt püsिमagnetite tekitatud väljatugevusest, mis toob kaasa teatud piirangud. Nende seadmete peamiste puuduste kõrvaldamiseks (magnetite vananemine) ergastussüsteemis kasutatakse spetsiaalseid mähiseid. [13]

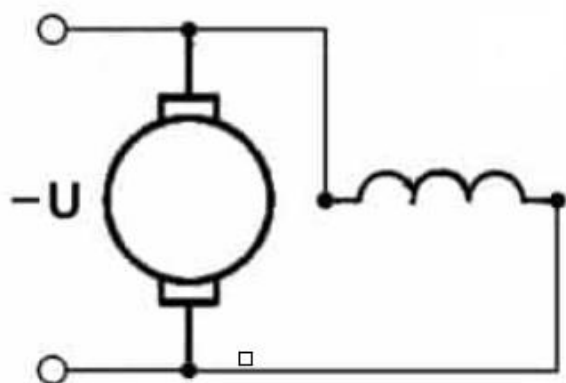
Teiseks on sõltumatu ergutus (Joonis 1.5)



Joonis 1.5 Sõltumatu ergutusega mootori tingmärk [12]

Seda tüüpi ergastuse korral on mähis ühendatud välise toiteallikaga. Sellisel juhul on mootori parameetrid sarnased püsिमagnetmootoriga. Pöördeid reguleeritakse ergutusmähise välja juhtimisega. Kiirust reguleerib näiteks ergutusreguleerimisreostaat, mis on lisatud ergutusmähise ahelasse. Ergutusahela katkemise või ergutusvoolu olulise vähenemise korral tõuseb mähise pinge ohtlikele väärtustele. [13]

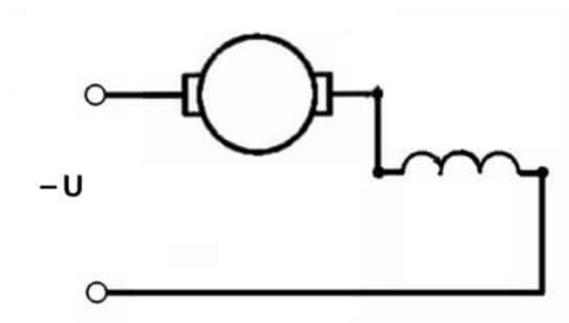
Kolmandaks on paralleelne ergutus (Joonis 1.6)



Joonis 1.6 Paralleelse ergutuseega mootori tingmärk [12]

Ergutuse ja rootori mähised on ühendatud paralleelselt ühise toiteallikaga. Sellel skeemil on ergutusmähise vool oluliselt madalam kui rootori vool. Mootori pöörlemissageduse reguleerimine toimub reostaadiga, mis koosneb jadavooluringist, millel on ergutusmähised või rootori ahel. [13]

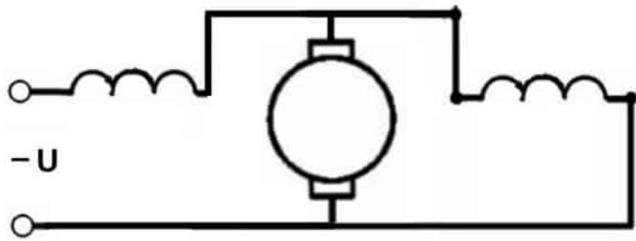
Neljandaks on järjestik ergutus (Joonis 1.7)



Joonis 1.7 Järjestik ergutus [12]

Sel juhul on ergutusmähis ühendatud ankruga, mille tulemusena voolab nende mähiste kaudu sama vool. Sellise mootori pöörlemiskiirus sõltub selle koormusest. Selle tulemusena, kui staatori mähises olev vool väheneb nimiväärtusest, väheneb ergutusmagnetvoo tugevus. Seega, kui koormus suureneb, suureneb võimsus proportsionaalselt kuni magnetsüsteemi täieliku küllastumiseni, mille järel see sõltuvus enam ei kehti. See tähendab, et voolu edasine kasv ergutusmähises ei suurenda magnetvoogu. [13]

Viiendaks on sega-ergutus (Joonis 1.8)

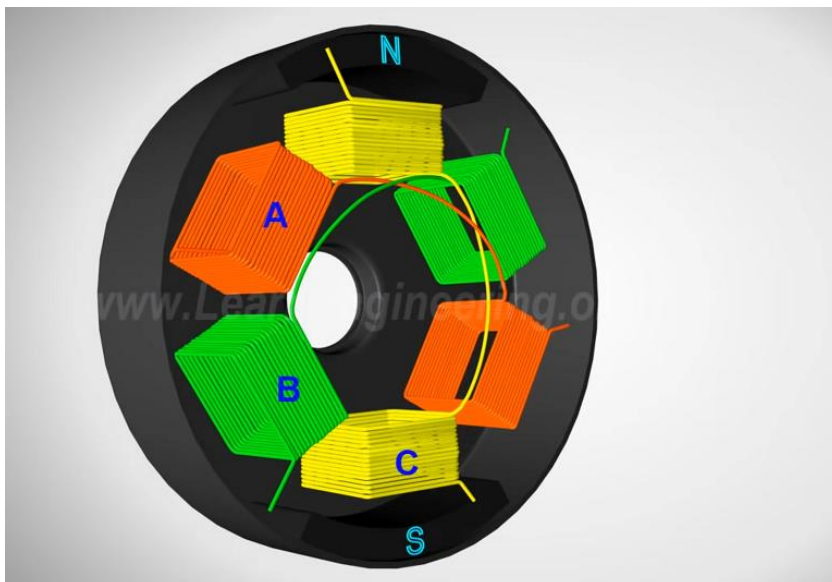


Joonis 1.8 Sega-ergutusega mootori tingmärk

See skeem hõlmab kahe ergastusmähise kasutamist iga mootori pooluspaari juures. Neid mähiseid saab ühendada kahel viisil: voolude summeerimisel või nende lahutamise. Selle tulemusena võib elektrimootoril olla samad omadused kui paralleelsete või jadaergutustega mootorite puhul. [13]

1.3 Harjadeta alalisvoolumootor

Iga mootor koosneb liikuvas osast - rootorist ja liikumatust osast - staatorist. Harjavabas alalisvoolumootoris tekitatakse rootori magnetväli ainult püsिमagnetitega. Seetõttu ei ole liikuv as mingit mähist ning puudub igasugune vajadus harjade järele (Joonis 1.9). [11]



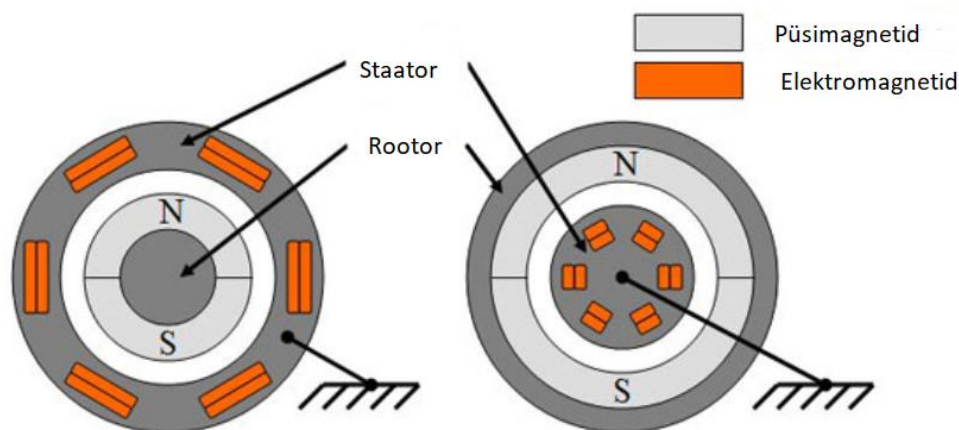
Joonis 1.9 Välise rooriga harjadeta alalisvoolumootor [14]

Harjadeta alalisvoolumootor erineb harjadega mootorist nii ehituse kui ka juhtimise osas. Kuigi mehaaniline ehitus on lihtsam, aga mootori juhtimine on tunduvalt raskem. Kuna harjadega mootorid sõltuvad metallist harjade füüsilisest kokkupuutest lülitiga mähistega, nad kalduvad kokkupuutest tingitud hõõrdumise tõttu efektiivsust ning nagu ka kõik mehaanilised osad kuluvad

pärast pikaajalist kasutamist. Kuna harjadeta mootorid soojenevad vähem (hõõrdumise puudumise tõttu) võivad nad töötada suurel kiirusel (kuna palju soojust häirib magnetvälju).

Mootori juhtimine toimub õigesti ja õigeaegselt lülitades sisse või välja pooluste mähiste voolu. Selleks kasutatakse kontrollereid, mis juhivad seda protsessi. Lisaks sellele on vajalikud ka sensorid. Nende abil saab teada, millises asendis asub rootor. Niimoodi kontrolleri lülitab järjest sisse pooluste mähiseid ja kogu aeg kontrollib rootori asukohta. Kui pinget rakendatakse ühe mähiste paarile tekib magnetväli. See toimib püsomagnetitega, mis põhjustab rootori pöörlemist. Selle tulemusena edastatakse võimsus teisele mähisele ja tsükkel kordub. Rotori pöörlemiskiirus sõltub otseselt magnetvälja intensiivsusest, mis omakorda on pinge suhtes otseselt proportsionaalne. See tähendab, et kiiruse suurendamiseks või vähendamiseks piisab toite tõstmisest või vähendamisest. Vastupidiseks pöörlemiseks on vaja vahetada polaarsust.

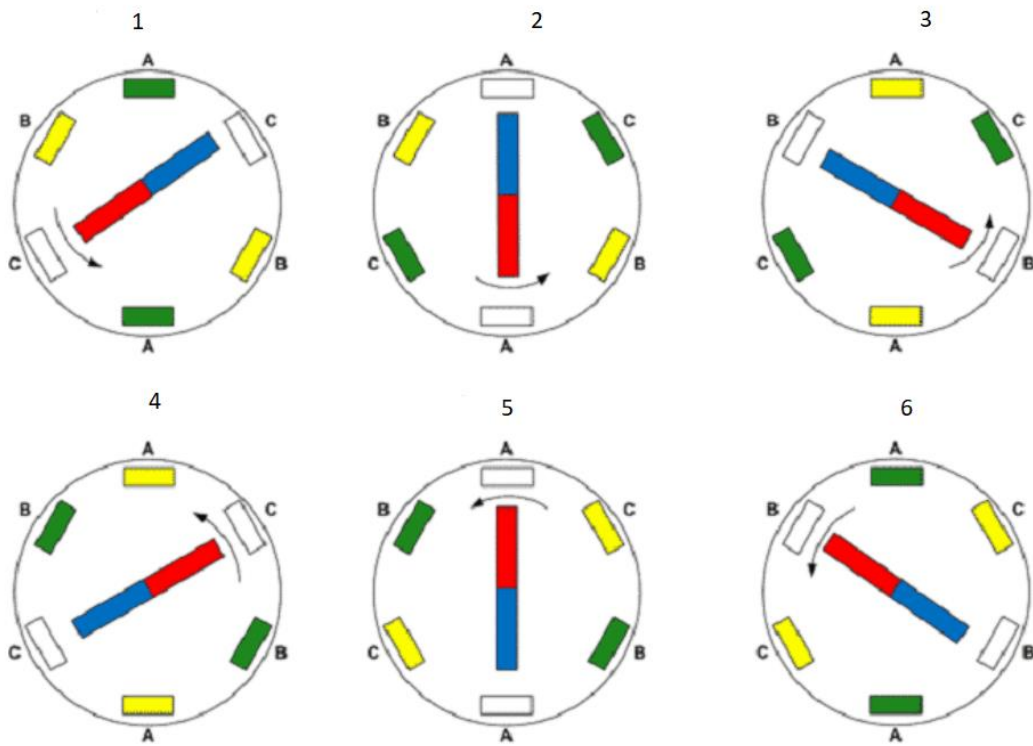
Harjadeta alalisvoolumootorid erinevad omavahel rootori asukohast mootoril. Peamiselt on kaks liiki: sisemise ja välimise rootoriga mootorid (Joonis 1.10). Rotori asukoht määrab ära mootori ehituse. Sisemise rootori puhul asub rootor mootori tsentris ja selle ümber on staator. Välimise rootoriga mootoril asub rootor staatori ümber. Seega igal ehitusel on oma spetsiifilised omadused. Sisemise rootori seadmetel on suur pöörlemiskiirus, mistõttu neid kasutatakse jahutussüsteemides, dronides, jõujaamades. Välimise rootori mootoreid kasutatakse kus on nõutav täpne positsioneerimis- ja pöördemomendi ülekoormus (robotika, meditsiiniseadmed, CNC-masinaid).



Joonis 1.10 Sisemise rootoriga ja välimise rootoriga harjadeta alalisvoolumootorid [15]

Mootormakett ei ole ehitatud suurte mehaaniliste koormuste ja täpse positsioneerimise jaoks, sellepärast harjadeta rootoripea ehitamisel kasutatakse sisemist rootori tüüpi. Selline rootori tüüp on kergem ehitada ja parem visualiseerida, kui välimist rootorit.

Kontroller lülitab mähiseid nii, et rootori ja staatori magnetväljade vektorid on üksteise suhtes oleksid ortogonaalsed (Joonis 1.11).



Joonis 1.11 Alalisvoolu mootori tööfaasid [16]

2. ÕPPEMAKETI MEHAANIKA OSA

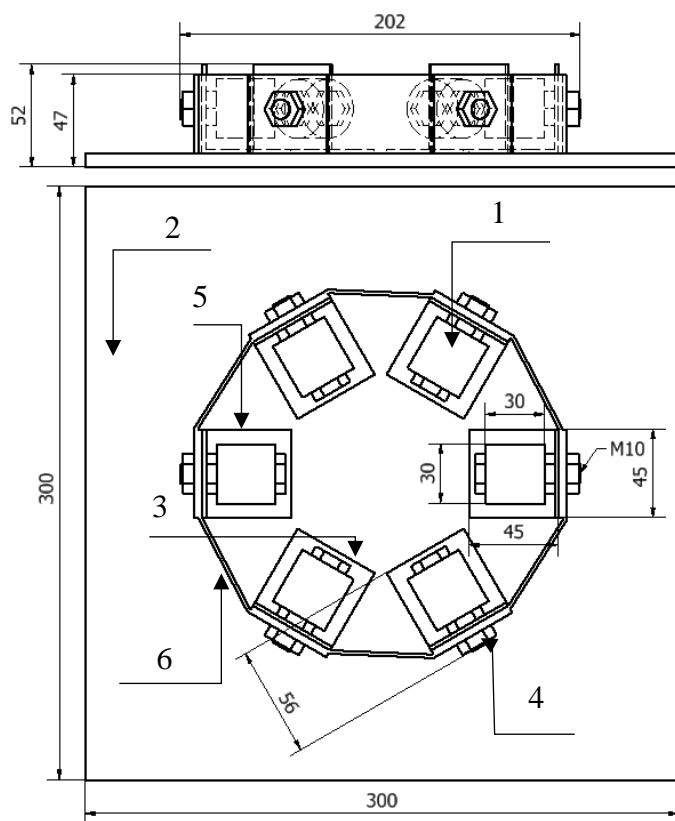
Maketi mehaanika osa kujundamisel oli üheks olulisemaks eesmärgiks tagada selle valmistamine võimalikult käepärastest ja odavatest vahenditest. Selleks kasutatakse 3D prinditud plastdetailid, tavalised poldid, seibid, mutrid ning terasest nurgad.

2.1 Õppemaketi üldehitus

Mootori valmistamise aluseks oli valitud harjadeta alalisvoolumootor sisemise rootoriga. Elektrimootor koosneb paigal seisvast staatorist ja pöörlevast rootorist. Staator, rootor ja mootori korpus ehitatud horisontaalselt. Rootoril on paigutatud kaks magnetit. Voolu suuna visualiseerimiseks kasutatakse kahe värvi valgusdiodi (sinine ja punane).

2.2 Staatori ehitus

Õppemaketi konstruktsioon on ehitatud kuuest ringkujuliselt paigutatud mähistest (Joonis 2.1). Need osad on asetatud ja ühendatud paari kaupa sümmeetriliselt selleks, et tagada rootori sirget asendit ning täpsust. Mähis on kinnitatud nurgaga plaadile ning kujutab ennast poldi M10 millel on kinnitatud kaks seibi läbimõõduga 30 mm. Seibide vahele on keeratud mitukümmend keerdu traati. See kõik on vaja, et tekitada staatoril magnetväljad, mis hakkaksid rootorit mehaanilise jõuga mõjutama. Mähised on omavahel ühendatud terasplaatidega, et suurendada magnetväljõu. Poldid on suunatud peaga rootorile, et magnetilise materjaliga pind oleks suurem.



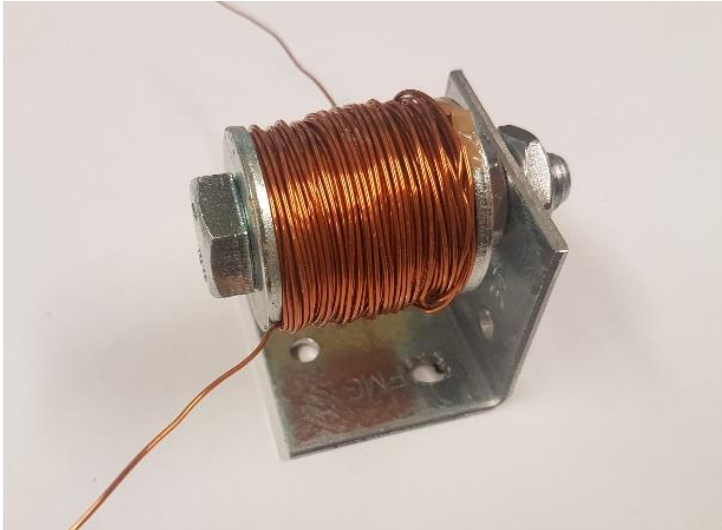
1. Mähis
2. Puiduplaat
3. Polt M10
4. Mutter M10
5. Terasnurk
6. Terasplaat

Joonis 2.1 Staatori ehitus

Ühe mähise jaoks kasutatakse järgmisi komponente (Tabel 2.1).

Tabel 2.1. Ühe mähise komponentide nimikiri

Komponendid	Kogus
Terasnurk	1 tk
Seib 10x30 mm	2 tk
Mutter M10	4 tk
Polt M10	1 tk
Mähisetraat	26 m
Terasplaat 120x40x2	1 tk



Pilt 2.1 Kokkupandud mähise ülevaade

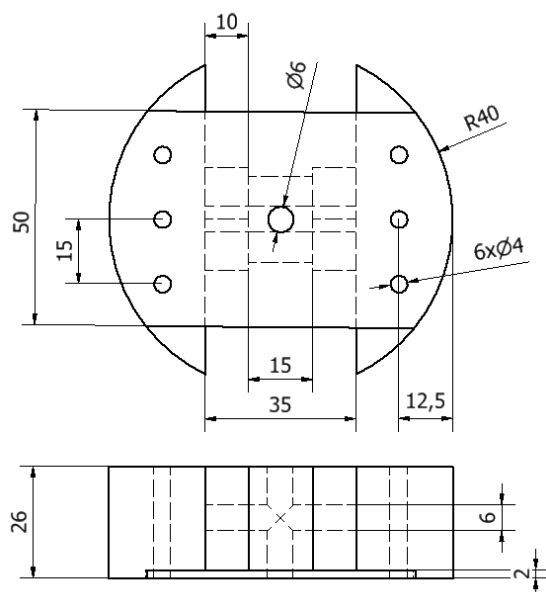
Kokku üks mähis koosneb 10 detailist. Need osad on kättesaadavad ja ei ole kuigivõrd kallid. Kokkupanemisel on vajalik võti 19 ja 17. Traati keerutamiseks kasutatakse tavalist elektridrelli või keeratakse käsitsi.



Pilt 2.2 Mähise kokkupanekus vajalikud komponendid

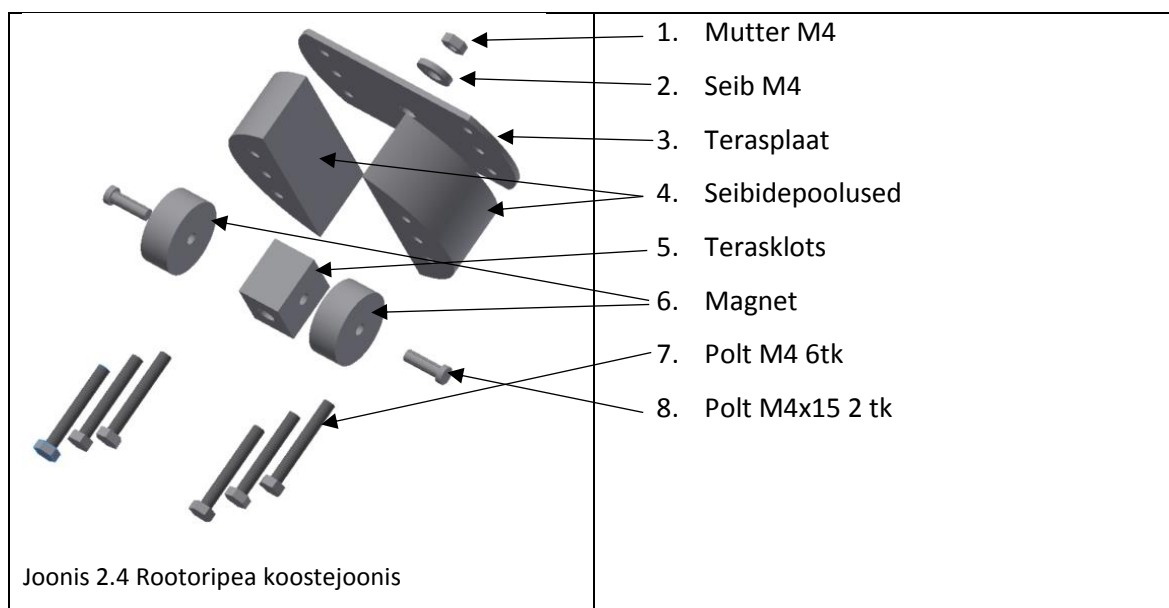
2.3 Rootori ehitus

Õppemaketil on kasutusel rootor kahe püsिमagnetiga (Joonis 2.2).



Joonis 2.3 Rootoripea

Pilt 2.3 Rootoripea

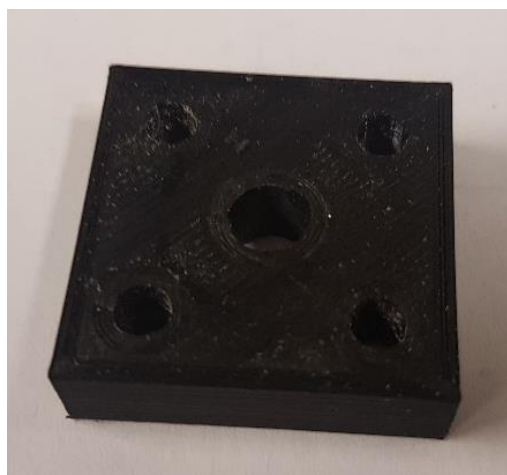
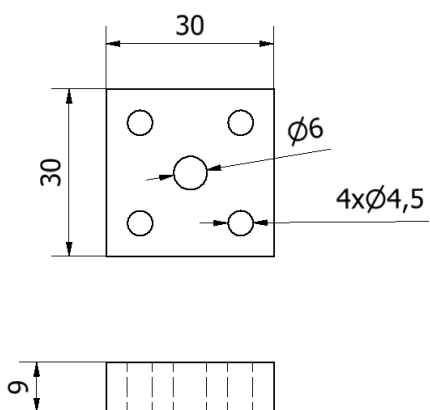


Võlliks on võetud polt M6, mille peale on kinnitatud terasest klots. Magnetite kõrval on poolus. Iga osa on lõigatud 6 mm plaatidest ning kinnitatud omavahel kolme poldiga M4. Rootori tööks on vajalik laager, mis asetseb kahe kinnituse vahel. Esimesel kinnitusel on tehtud ümmargune soon laagri jaoks (Joonis 2.6). Teine kinnitus katab esimest. Laagri välisläbimõõt on 19 mm. Rootoripea on horisontaalselt poolide keskel. Selleks kõrguse muutmiseks ja täpsemaks paigutamiseks kasutatakse seibe. Kogu rootoripea läbimõõt on 80 mm. Püsिमagnetite materjaliks valiti neodüüm-

raud-boor magnetid (NdFeB). Nendel on kõrgem jääkmagneetumus, palju kõrgem koertsiivsus ja energiatihedus kui teist tüüpi magnetitel. [17]

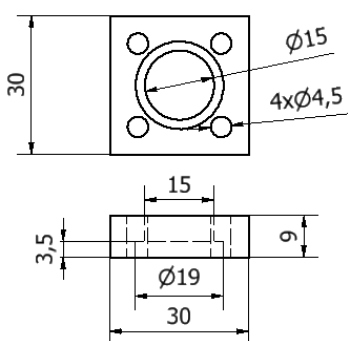
Tabel2.2 Rootoripea komponentide nimikiri

Komponendid	Kogus (tk)
Mutter M4	1
Seib M4	1
Terasplaat	1
Seibidest poolused	2
Terasklots	1
Ümar püsimagnet	2
Polt M4x35	6
Polt M4x15	2



Joonis 2.5 Laagri alumine kinnitus

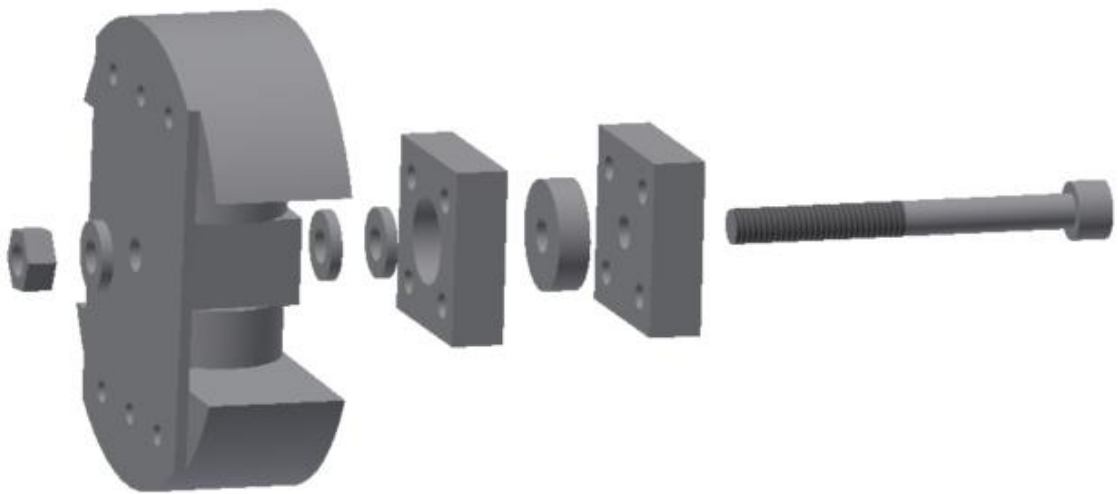
Pilt 2.4 Laagri alumine kinnitus



Joonis 2.6 Laagri ülemine kinnitus

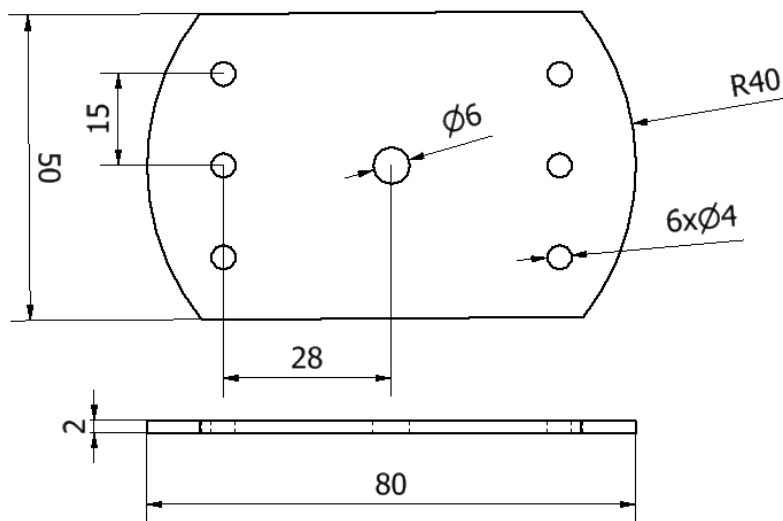
Pilt 2.5 Ülemine kinnitus koos laagriga

Kinnitused koos laagriga kinnitatakse plaadile puukruvidega.



Joonis 2.7 Rootori osa koostejoonis

Rootori pea kõikide osade omavahel ühendamiseks valmistati ka klaastekstoliidist ühendusplaat. See katab magneteid, seibide pooluseid ning metallklotsi ülevalt. Need osad on kinnitatud kuue poldiga M4x35. Kogu rootori osa kõrgus on 85 mm.



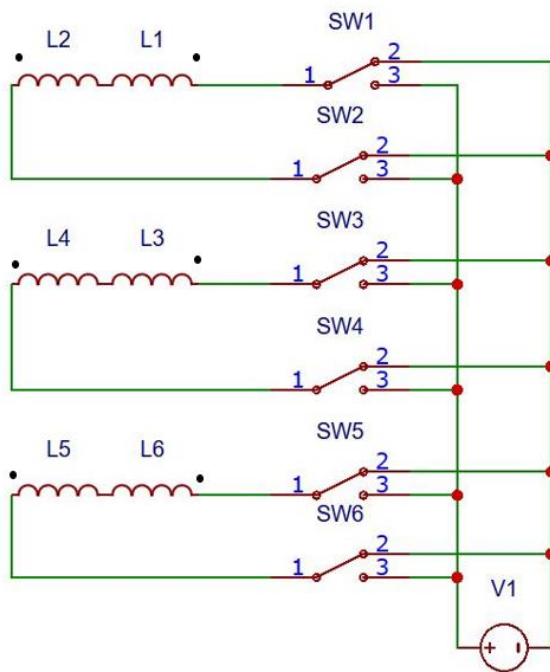
Joonis 2.8 Rootori katteplaat

3. ÕPPEMAKETI ELEKTRI JA PROGRAMMEERIMISE OSA

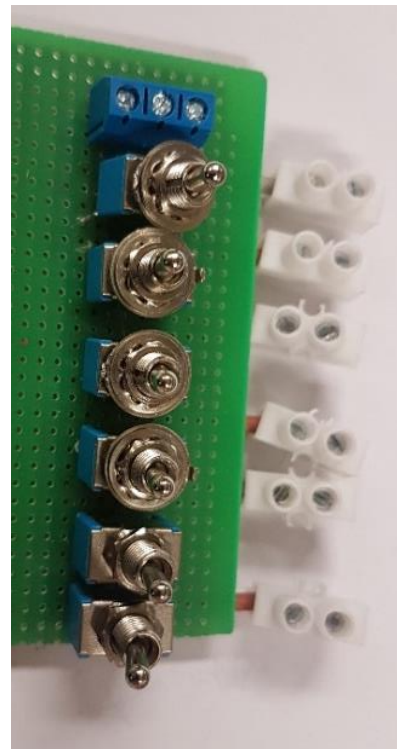
Oluline osa selle lõputöös oli mootori elektri osa koostamine ning juhtimisprogrammi kirjutamine. Kogu töö jooksul prooviti erinevaid juhtimise lahendusi. Selleks valmistati elektriskeeme ja kirjutati programme.

3.1 Lihtsaim elektriskeem lülititega

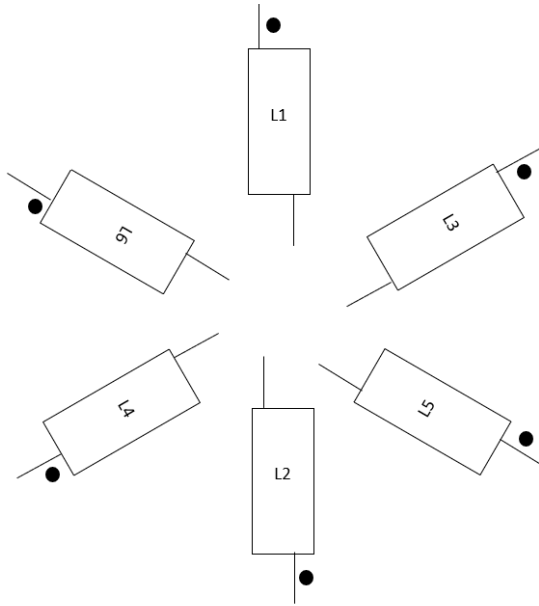
Kuna töö eesmärgiks on ehitada odava hinnaga ja tavakasutusest komponentidest maketi. Prooviti valmistada lihtsamat juhtimiskeemi tavalise lülititega (Joonis 3.1). Iga paari mähiste jaoks on kaks lülitit. Juhtimisel kasutatakse H-silla töö põhimõtet. Kui mõlemad lülitid on samas asendis siis vool ei pääse mähistele. Juhul kui üks nendest on vastupidi asendis siis vool liigub. Selleks, et suunata teise suunda on vaja mõlemad lülitada ümber.



Joonis 3.1 Lihtsaim elektriskeem lülititega



Pilt 3.1 Lihtsaim elektriskeem lülititega



Joonis 3.2 Mähiste traadi keerdude algused.

Koostatud käsijuhtimisega skeem töötab ning juhtimine toimub korralikult. Ainult puuduseks võiks nimetada rootori aeglase liikumist. Kuna ümberlülitamine toimub käsitsi, siis kasutaja ei jõua kiiresti lülitada sisse ja välja vajalikke lülitite kombinatsioone. Selle põhjusel saab edasi liikuda juhtimissüsteemi arendamisega. Kasutusele võeti Arduino arendusplaadi baasil arendatud juhtimisprogramm. See võimaldab oluliselt suurendada rootori pöörlemise kiirust ning sujuvat pöörlemist.

Tabel 3.1 6-sammuline mootori juhtimise konfiguratsioon

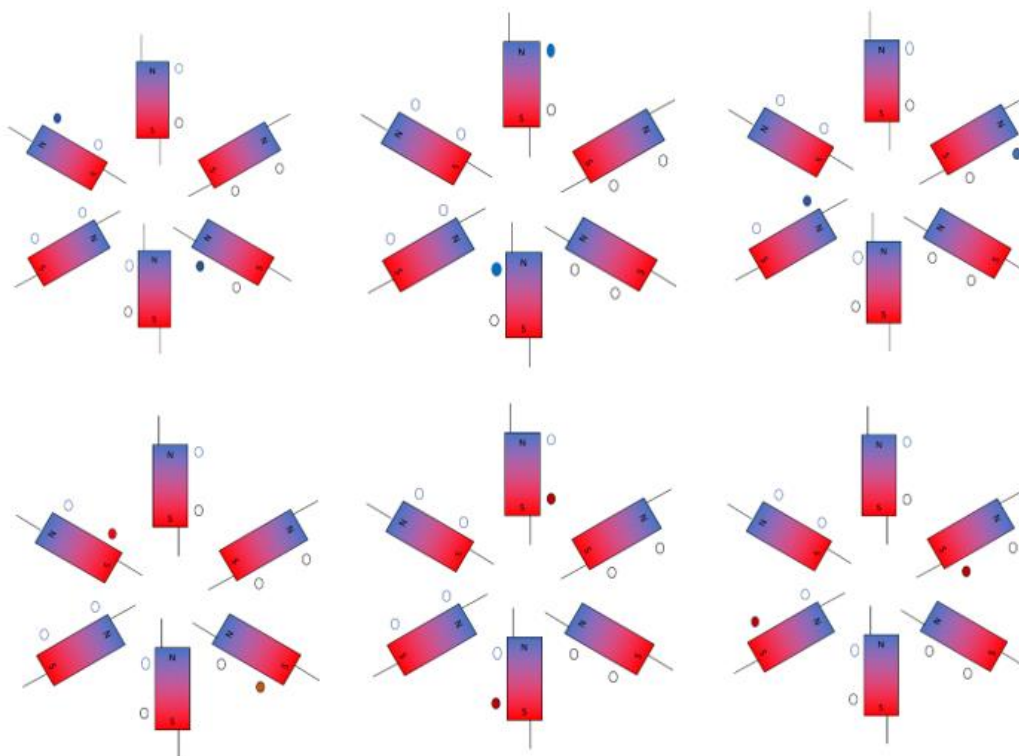
Mähis 1	+	0	0	-	0	0
Mähis 2	0	+	0	0	-	0
Mähis 3	0	0	+	0	0	-

Tabel 3.2 12-sammuline mootori juhtimise konfiguratsioon

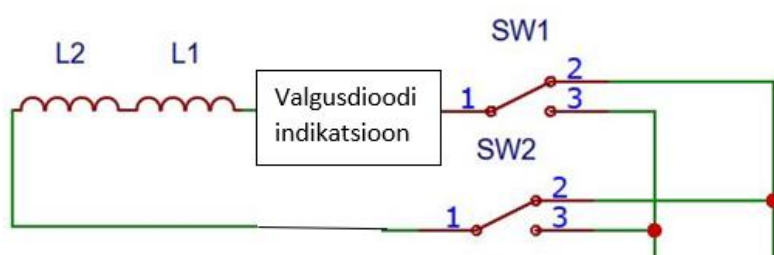
Mähis 1	+	+	0	0	0	-	-	-	0	0	0	+
Mähis 2	0	+	+	+	0	0	0	-	-	-	0	0
Mähis 3	0	0	0	+	+	+	0	0	0	-	-	-

3.2 Magnetite polaarsuse indikatsioon

Voolu suuna visualiseerimiseks kasutatakse maketil valgusdiodide indikatsiooni. Punane valgusdiod määrab lõunapoolust, sinine valgusdiod - põhjapoolust. Lihtsaim indikatsioon on võimalik ehitada selliselt, et see paikneb mähise ahelas järjestikku ühendatult.

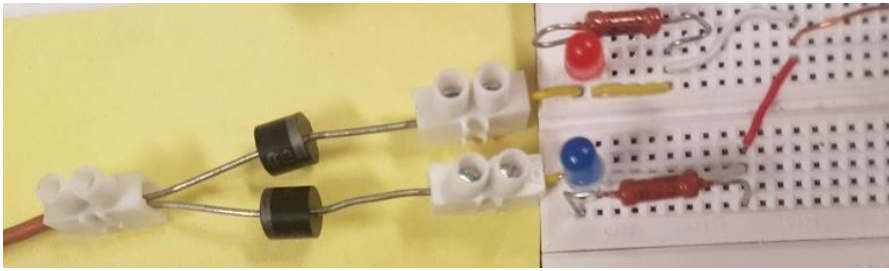


Joonis 3.3 Valgusdiodide indikatsioon sõltuvalt sammudest 6-sammulise skeemi korral

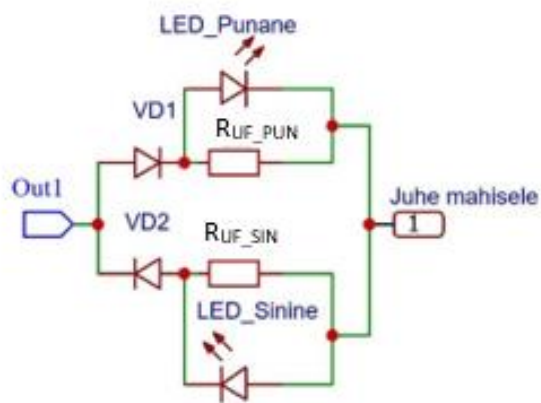


Joonis 3.4 Indikatsiooni ühendus

Elektriskeemil on kahe värvi valgusdiodi (sinine ja punane). Sinise valgusdiodi jaoks on kahe oomiline takisti. Punase valgusdiodi jaoks on kolme oomiline takisti. Mõlema ahela jaoks on alaldusdiodid. Need diodid on nähtud selektiivseks voolu suuna järgi eristamiseks ehk lasevad voolu läbi ainult ühe suunas. Elektriskeemil üks ots on ühendatud draiveri mooduliga L298N, teine ots mähisega. Iga mähiste paari jaoks on koostatud järgmine elektriskeem (Joonis 3.5).



Pilt 3.2 Valgusdioididega elektriskeem



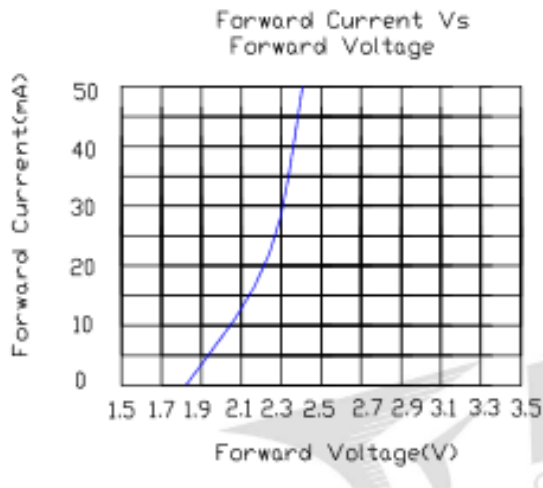
Joonis 3.5 Valgusdioididega elektriskeem

Kahe mähise vahel läbib vool 1A. Selleks et teada eeltakisti väärtust, kasutatakse põhiseoseks.

$$R_{UF_PUN} = \frac{U_F}{I_{mähis}} \quad (3.1)$$

Kus U_F on diodi päritööpinge ja $I_{mähis}$ on mähist läbiv vool.

Kuna $I_{koormus}$ on soovitatav väärtus, siis U_F saab leida valgusdiodi andmelehel tootja kodulehelt.



Joonis 3.6 Punase valgusdiodi päripinge ja pärioolu graafik [18]

Andmelehelts leitakse graafikust, millel on kujutatud nii valgusdiodi päriool (I_F) kui ka päripinge (U_F) väärtused.

Punane LED:

Päripinge on 2.0V.

Nimi-päriool 20 mA. [15]

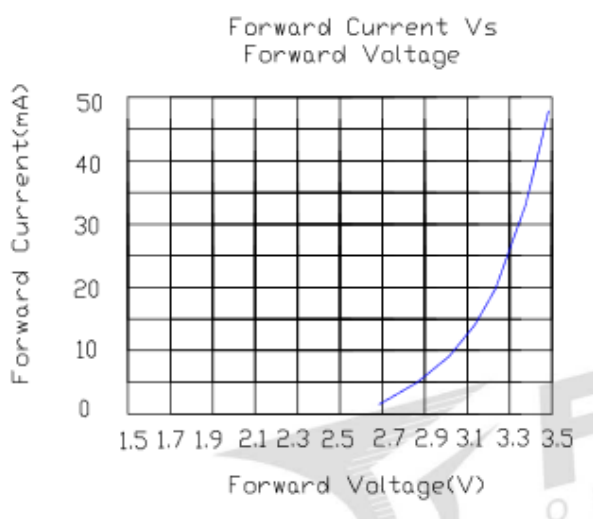
Graafikult leitakse ligikaudse diodi päripinge väärtuse soovitud koormusvoolu korral ($I_{koormus} = 20$ mA), antud juhul on selleks 2,2V. Leiame selle alusel vajaliku takisti väärtuse vastavalt valemile (3.1).

$$R_{UF_PUN} = \frac{U_F}{I_{mähis}} = \frac{2,2}{1} = 2,2 \sim 2 \Omega$$

Sinine LED:

Päripinge on 3.2V.

Nimi-päriool 20 mA.



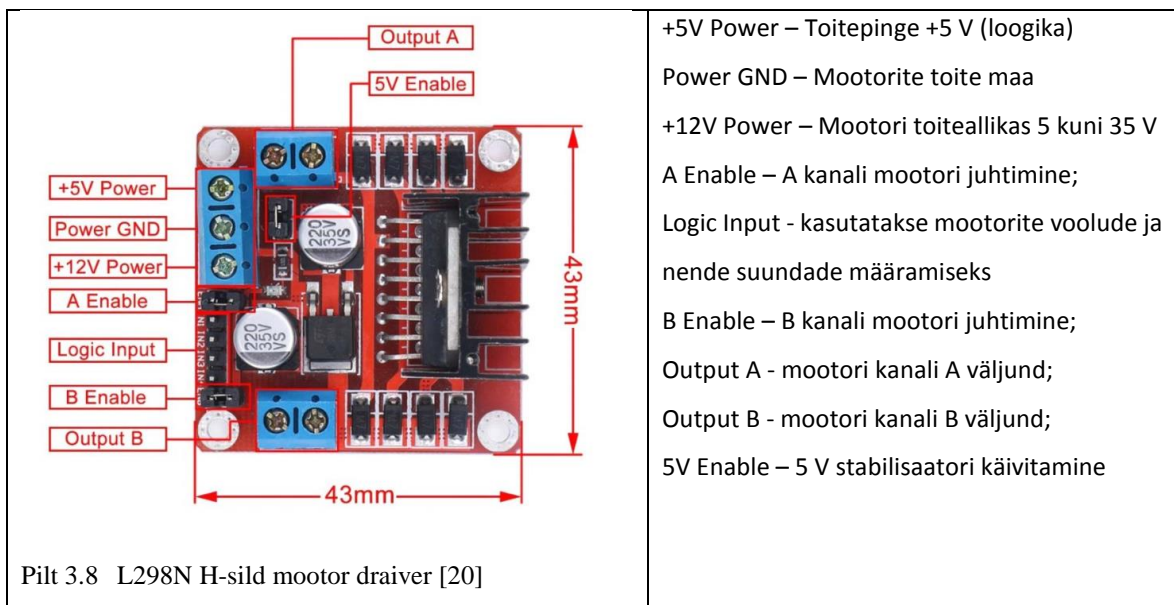
Joonis 3.7 Sinise valgusdiodi päripinge ja pärioolu graafik [19]

Graafikult leitakse ligikaudse diodi väärtuse soovitud koormusvoolu korral ($I_{\text{koormus}} = 20 \text{ mA}$), antud juhul on selleks 3,2V. Leiame selle alusel vajaliku takisti väärtuse vastavalt valemile (3.1).

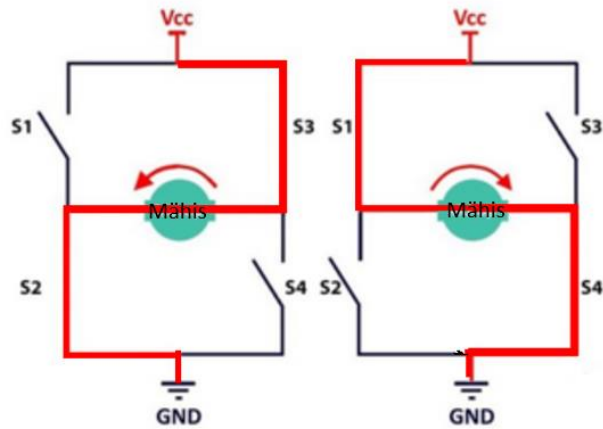
$$R_{UF_SIN} = \frac{U_F}{I_{\text{mähis}}} = \frac{3,2}{1} = 3,2 \sim 3 \Omega$$

3.3 Draiverimoodul mikrokontrolleriga juhtimiseks

Arduino mikrokontrollerimooduli klemmid ei võimalda saavutada väga suure tugevusega voolu. Selleks, et tagada mähiste varustamise nende tööks tugeva vooluga (1 A) on vaja rakendada täiendavat draiverlülitust.



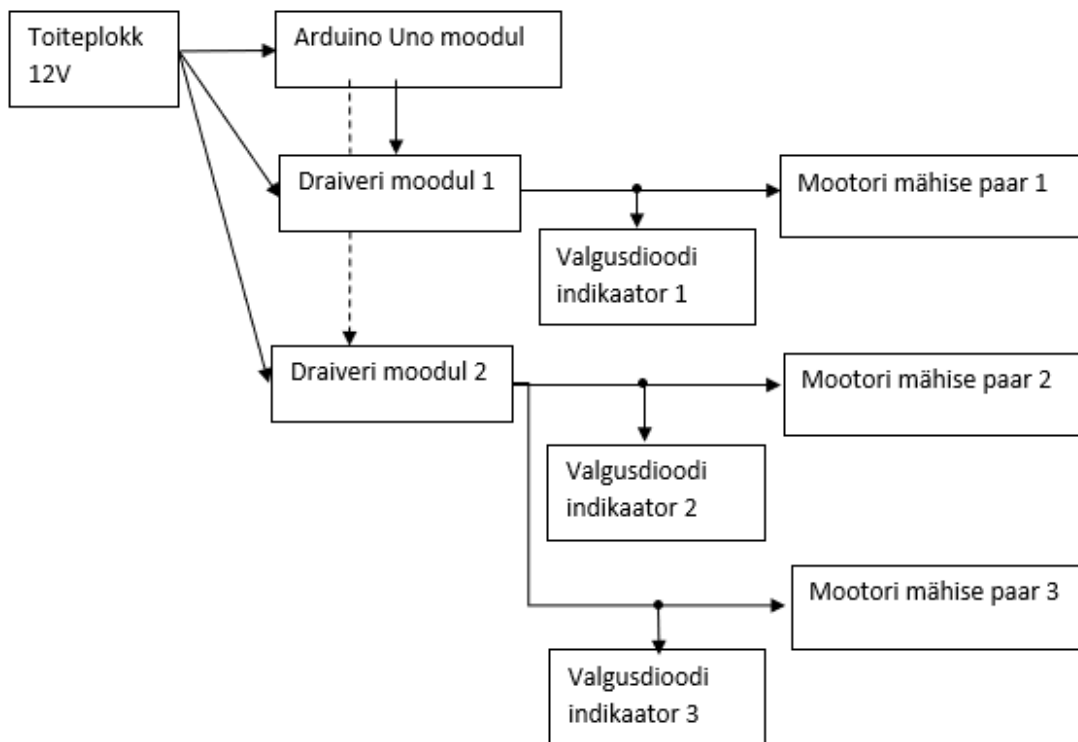
Mooduli peamine kiip on L298N-tüüpi kiip, mis koosneb kahest H-sildast, üks väljundkanalile A, teine väljundkanalile B. H-sild on laialdaselt kasutusel elektroonikas ja seda kasutatakse mootori pöörlemise muutmiseks, H-sild sisaldab nelja transistorit keskel asuva mootoriga, moodustades H-tüüpi paigutuse. Toimumise põhimõte on lihtne, sulgedes samal ajal kaks erinevat transistorit, muutub mootorile rakendatava pingepolaarsus ja sellega ka voolu suund. See võimaldab muuta mootori pöörlemissuunda. Allolev joonis näitab H-silla vooluahela tööd (Joonis 3.9). PWM (Pulse Width Modulation) võimaldab juhtida alalisvoolumootori kiirust. [21]



Pilt 3.9 Mootori juht L298N, H-Sild lülitus [21]

3.4 Arduino-põhine juhtimine

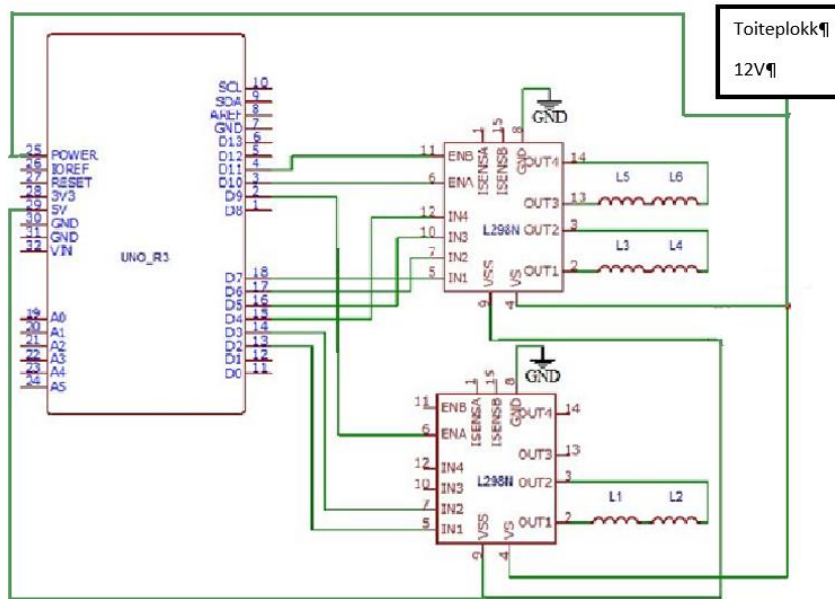
Komponentide ühendus ja tööpõhimõte on esitatud järgmisel plokk skeemil (Joonis 3.10).



Joonis 3.10 Komponentide ühenduse plokk skeem

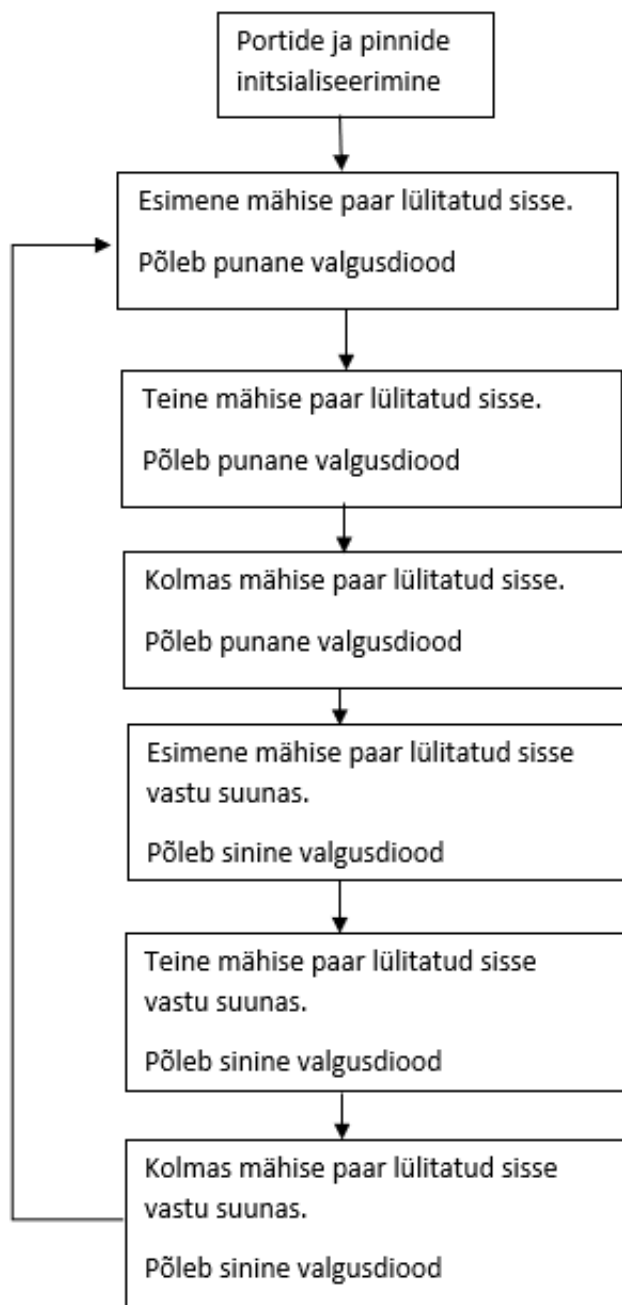
Kasutamisel on kaks mootori draiveri L298N mille otsadele on ühendatud mähiste paaridena. Toiteplokk annab toite draiveritele ja Arduino moodule. Selle ploki kasutamine võimaldab

reguleerida voolu ja pinget ning hoida kogu aeg samal tasemel. Juhtimise põhimõte on selles, et mähiste ümberlülitamine toimub ühekaupa.



Joonis 3.11 Arduino baasil koostatud elektriskeem

Rootori pöörlemise kiiruse muutmise ning sujuva pöörlemise jaoks Arduino baasil oli koostatud elektriskeem (Joonis 3.11).



Joonis 3.12 Mootori pöörlemise algoritm

Mootori juhtimisel kasutatakse 6 sammu. Esimese kolme sammu jooksul voolu suund on samasugune, kuid tööle lülitatakse eri mähised. Ülejäänud sammudel on voolu suund vastupidine. See võimaldab pöörata rootori täis ringile, kasutades samu mähiseid.

4. ALALISVOOLUMOOTORI ÕPPEMAKETI EDASIARENDUSED

Mootor maketi arendamine võimaldab oluliselt täita vajalikke parameetreid.

Edasiarendusi võib jagada järgmisteks punktideks: mehaanilised, elektri ja programmeerimise edasiarendused.

4.1 Mehaanika edasiarendused

Alalisvoolumootori edasiarendamiseks on võimalik parandada mähiste paigutamise asendit. Praegu Arduino moodul, draiverid ja valgusindikatsioon on paigutatud staatori ümber. Parem oleks kui kogu elektroonika osa asetseb ühes karbis. Visuaalseks ja tavakasutamiseks on see mugav kui makett on kompaktne.

4.2 Elektri ja programmeerimise edasiarendused

Alalisvoolumootori maketi peamine osa on mootori juhtimine, sellepärast juhtelektroonika edasiarendamine oluliselt parandab maketi kvaliteedi. Esimeseks täiustuseks võiks teha mootori pöörlemise reguleerimist. Kiirendus ja aeglustus muutub mugavamaks. Selleks võimaluseks saaks kasutada potentsiomeetrit. Mähiste ümberlülitamise aega saab siduda potentsiomeetri väärtuste muutmisega.

Järgmiseks arenduseks võiks pakkuda mootori pöörlemise suuna vahetamist. Suuna ümberlülitamist saaks teostada lülitiga. See muutub mootori kasutamist interaktiivsemaks ning suurendab kasutuste alasid.

Rootori täpse asendi määramiseks on võimalik kasutada asendiandureid. Sensorite väärtuseid loetakse ja lülitatakse mähised sisse õigeaegselt. Praeguses maketis pöörleb rootor 6 sammuga. Parema pöörlemise jaoks saab kasutada 12 sammulist juhtimist. Sellisel juhul rootori pöörlemise jaoks töötavad juba kaks mähise paari. Kui üks mähis tõmbab magnetid, siis teine mähis tõukab neid.

KOKKUVÕTE

Koostatud bakalaureusetöö sisu moodustab projekt Tallinna Tehnikaülikooli Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituudis. Projekti üheks olulisemaks eesmärgiks oli tagada mootori maketi valmistamise võimalikult käepärastest ja odavatest vahenditest. Lõputöö kirjeldab alalisvoolumootori maketi välja töötamist, juhtimist ning pakub mootori edasiarendusi.

Käesoleva töö esimeses osas on kirjeldatud alalisvoolumootorite tööpõhimõtteid ja tüüpe. Kuna on olemas erinevate ehituse, suuruse, juhtimisega mootorid ning igal tüübil on nii eelised kui ka puudused, uuriti olemas olevaid mootoreid. Maketi välja töötamisel arvestati probleemidega, mida võiksid tekitada töö jooksul. Teooria andis ettekujutuse sellest, millele tuleb rohkem pöörata tähelepanu ja mida võiks võtta rohkem aega.

Mehaanika osas valmistati mootori põhilised komponendid – rootor ja staator. Rotoor on projekteeritud vertikaalsena. Rotoripea valmistamisel on välja töötatud erinevatest komponentides ühine lihtne koost. Maketi staator koosneb kuuest mähisest. Terasplaadid on kasutatud magnetvälja jõu suurendamiseks.

Lõputöö elektri ja elektroonika osas arendati ja valmistati erinevaid juhtimise lahendusi ning valiti sobivamaid komponente. Esimeseks oli võetud väga lihtne ja vähem kulukas lahendus. Kasutusel on 6 lülitit. Iga mähise paari jaoks on kaks lülitit. Ümberlülitamine toimub käsitsi. Töö jooksul oli mõeldud voolu suuna määramiseks valgusdiodi indikatsioon. Selleks projekteeriti ning valmistati elektriskeemi, kus on kahe värvi valgusdiodid.

Põhiliseks lahenduseks võeti kasutusele mootori juhtimine Arduino baasil. Selleks valmistati elektriskeem ning programmeeriti kuue sammulise mootori liikumine. Komponentide valik ning nende õige kasutamine on oluline osa kogu töös.

Viimaseks osaks on tehtud ettepanekud maketi edasiarendamiseks. Need täiustused annavad võimalusi oluliselt suurendada maketi kasutusalasid ning teha mootor rohkem interaktiivseks. Mootori kasutamise ala võib-olla nii kodus meisterdamise kui ka ülikooli ainete raames või avalikes ürituses.

Lõputööülesannet võib lugeda täidetuks, sest peamiselt kõik alalisvoolumootori maketi osad on arendatud ja valmistatud. Kõikides osades on tehtud joonised ja elektriskeemid, kirjeldatud komponentide arv. Selle järgi saab valmistada alalisvoolumootori maketi ja seda edasi arendada.

SUMMARY

The content of the bachelor thesis is formed by the project at the Institute of Electrical Engineering and Mechatronics of Tallinn University of Technology. One of the most important aims of the project was to ensure that the engine model was made of the most affordable and inexpensive things. The thesis describes the design and the control of the DC motor model.

The first part of this work describes the operating principles and types of DC motors. Since there are different engines of construction, size, control and each type have both advantages and disadvantages, the information of the engines were searched. The design of the model considered the problems that could be faced during the work. The theory gave an idea of what more attention needs to be paid and which could take more time.

In mechanical part, the main components of the engine were made - the rotor and the stator. The rotor was designed to paralyze the ground. The preparation of the rotor head is a common composition of the processed different components. The model stator has six windings. Steel plates are used to increase magnetic force.

Various management solutions were developed and prepared for electrical and electronics in the thesis and more suitable components were selected. The first solution was a very simple and less expensive. There are 6 switches in use. There are two switches for each coil pair. Switching is done manually. During the work, the LED indication was used to determine the flow direction. For this purpose, an electric circuit with two colour LEDs was designed and manufactured.

The main solution of the work was based on Arduino. For this purpose, an electrical scheme was prepared, and the movement of the six-step motor was programmed. The choice of components and their proper use is an important part of the whole work.

The final part is the suggestions for further development of the model. These enhancements provide opportunities to significantly increase the use of the model and make the engine more interactive. The area of use of the engine may be not only at home but in university subjects or at a public event as well.

The task of the thesis can be considered fulfilled, because all the parts of the DC motor model are mainly developed and manufactured. In all parts drawings and diagrams are made, the number of components described. According to this, the DC motor can be modelled and further developed.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

1. Elektomehaanilised täiturid
https://www.tthk.ee/MEH/Taiturid_3.html#ala
(10.02.2019)
2. Lorentzi jõud
<https://opik.fysika.ee/index.php/book/section/1447>
(10.02.2019)
3. Lorentzi jõud
<https://füüsikaleksikon.ee/artikkel/elektromagnetnahtused/lorentzi-joud/>
(10.02.2019)
4. Ampere'i seadus. Magnetinduktsioon
<https://www.taskutark.ee/m/amperei-seadus-magnetinduktsioon/>
(10.02.2019)
5. Elektromagneti tõmbejõud
http://www.ene.ttu.ee/leonardo/elektro_alused/3Elektromagnetism.pdf
(15.02.2019)
6. Magnetic Field of a Solenoid
<http://farside.ph.utexas.edu/teaching/302l/lectures/node76.html>
(16.02.2019)
7. Homogeenne magnetväli
<https://opik.fysika.ee/index.php/book/view/15#/section/1440>
(17.02.2019)
8. Сила магнитного поля постоянного магнита
<https://ru.magnet-sdm.com/2017/08/01/магнитное-поле-прочность-с-постоянными-магнитами>
(18.02.2019)
9. Magnetostatic interactions and forces between cylindrical permanent magnets Vokoun, David; Beleggia, Marco; Heller, Ludek; Sittner, Petr: Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2009
10. Вращающееся магнитное поле
http://ets.ifmo.ru/usolzev/SEITEN/u2/as/2_1.htm
(27.02.2019)
11. Alalisvoolumootorid

- <https://sisu.ut.ee/elektroonika/83-alalisvoolumootorid-lisamaterjal>
(11.03.2019)
12. Коллекторный двигатель: виды, принцип работы, схемы
<https://www.asutpp.ru/kollektornyj-dvigatel.html>
(14.03.2019)
13. Электродвигатели постоянного тока. Устройство и работа. Виды
<https://electrosam.ru/glavnaja/jelektrooborudovanie/ustrojstva/elektrodvigateli-postoiannogo-toka/>
(16.03.2019)
14. Brushless DC Motor, How it works ?
<https://onebyzeroelectronics.blogspot.com/2015/08/brushless-dc-motor-how-it-works.html>
(18.03.2019)
15. Синхронный двигатель с постоянными магнитами
<http://engineering-solutions.ru/motorcontrol/pmsm/>
(18.03.2019)
16. Бесколлекторный двигатель постоянного тока: принцип работы, устройство, применение
<https://www.asutpp.ru/chto-takoe-beskollektornyj-dvigatel-postoyannogo-toka-i-ego-princip-raboty.html>
(20.03.2019)
17. Neodüümmagnet
<https://et.wikipedia.org/wiki/Neod%C3%BC%C3%BCmmagnet>
(21.03.2019)
18. PRODUCT SPECIFICATION FYL-5013SURC1C
<https://www.tme.eu/Document/8f8b213facf1ef0d52927375c67828ce/FYL-5013SURC1C.pdf>
(18.02.2019)
19. PRODUCT SPECIFICATION FYL-5014UBC1C
<https://www.tme.eu/Document/794b407ad5d928454d8a390b93862681/FYL-5014UBC1C.pdf>
(18.02.2019)
20. L298N Dual H-Bridge Motor Driver
<http://www.handsontec.com/dataspecs/L298N%20Motor%20Driver.pdf>
(18.02.2019)

21. Обзор драйвера мотора на L298N

<http://robotchip.ru/obzor-drayvera-motora-na-l298n/>

(18.02.2019)

22. Motor Driver Module-L298N

http://wiki.sunfounder.cc/index.php?title=Motor_Driver_Module-L298N

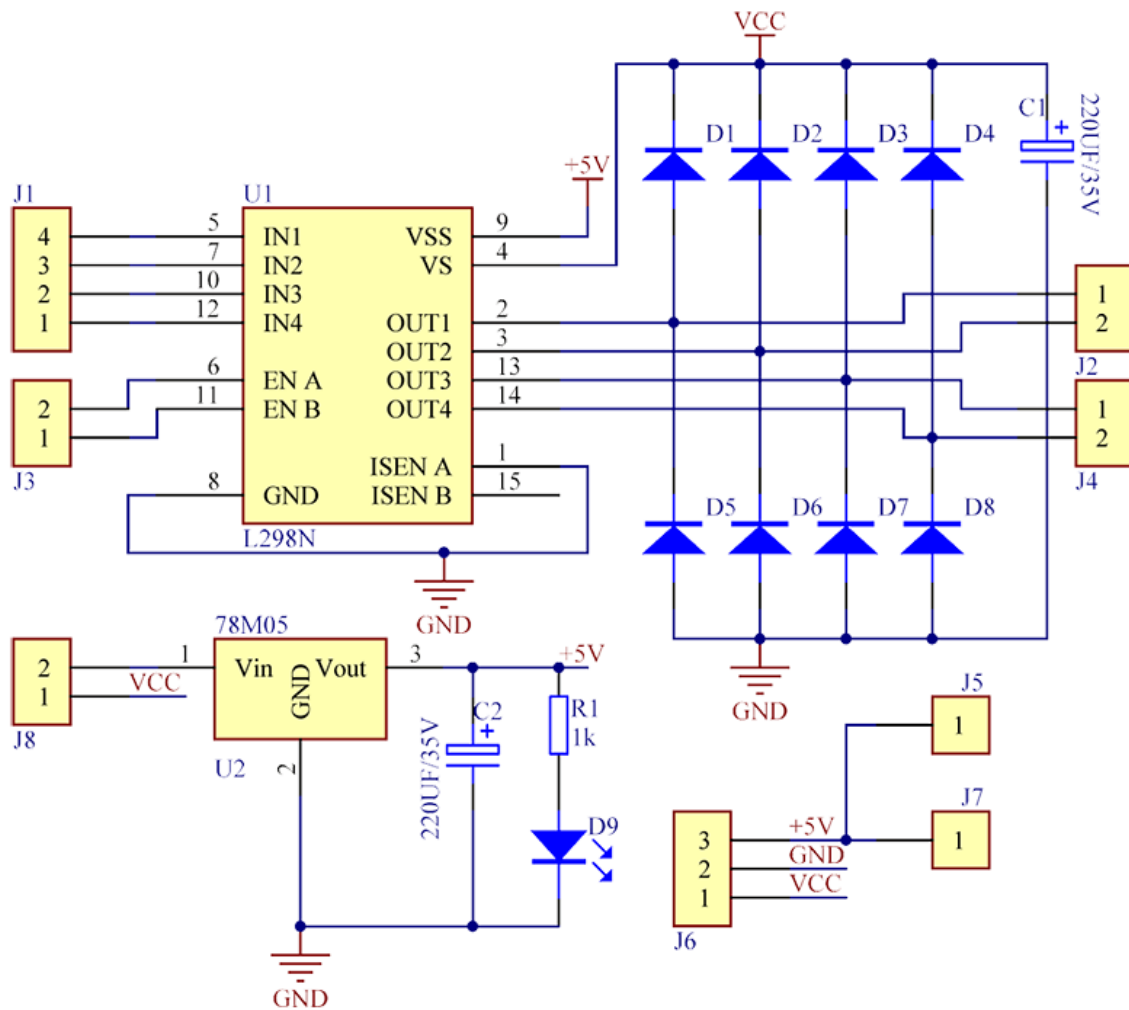
(18.02.2019)

LISA 1 MAKETI KOMPONENTIDE NIMIKIRI

Tabel L1.1 Komponentide nimikiri

Komponent	Kogus (tk)
Polt M10	6
Seib 10x30 mm	12
Mutter M10	24
Traat	156 m
Terasnurk	6
Puidukruvi	12
Laager	1
Polt M6	1
Puiduplaat 300x300 mm	1
Klemmliist	3

LISA 2 MOOTORI AJAMI MOODULI SKEEM



Joonis L2.1 Mootori ajami mooduli skeem [22]