



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
TALLINN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

EE40LT

KOLMEFAASILISE AKSIAALVOOGA  
SÜNKROONGENERAATORI ÕPPEMAKETI  
VÄLJATÖÖTAMINE

BAKALAUREUSETÖÖ

Üliõpilane: Karl Leibur

Üliõpilaskood: 142672MAHB

Juhendaja: Lauri Kütt

Tallinn, 2017.a.

## 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 /

TTÜ inseneriteaduskond  
**BSc LÕPUTÖÖ ÜLESANNE**  
2017. aasta kevadsemester

Üliõpilane: Karl Leibur 142672  
Õppekava: MAHB  
Eriala: Mehhatroonika  
Juhendaja: professor, Lauri Kütt  
Konsultandid: Ants Kallaste, vanemteadur, 620 3802

**LÕPUTÖÖ TEEMA:**

Kolmefaasilise aksiaalvooga sünkroongeneraatori õppemaketi väljatöötamine  
Development of Three Phase Synchronous Generator Educational Kit

**Töös lahendatavad ülesanded ja nende täitmise ajakava:**

Nr	Ülesande kirjeldus	Täitmise tähtaeg
1.	Generaatori mudeli väljatöötamine, komponentide valimine.	20.03.2017
2.	Generaatori mehaanilise osa ehitus. Komponentide valmistamine.	24.04.2017
3.	Generaatori koormamisviiside kujundamine ning kasutusfunktsioon. Elektroonika skeemi koostamine, trükkplaadi valmistamine.	01.05.2017
4.	Arduino juhtprogrammi algoritmi koostamine.	10.05.2017
5.	Generaatori katsetamine.	22.05.2017

**Lahendatavad insenertehnilised ja majanduslikud probleemid:** generaatori konstruktsioonilise läbipaistvuse ning tugevuse tagamine, mähise südameke kinnitamine staatoril, rootori kinnitamine völliil, generaatori koormamise vahendite kujundamine, väljundparameetrite arvutamine.

**Täiendavad märkused ja nõuded:**

**Töö keel:** eesti keel

**Kaitsmistaotlus esitada hiljemalt:** 15.05.2017

**Töö esitamise tähtaeg:** 25.05.2017

**Üliõpilane** Karl Leibur /alkiri/ .....

Kuupäev .....

**Juhendaja** Lauri Kütt /alkiri/ .....

Kuupäev .....

## Sisukord

1.	ÜLEVAADE PÜSIMAGNETITEGA ELEKTRIGENERAATORITEST .....	8
1.1	Elektrigeneraatori ajalugu.....	8
1.2	Elektrigeneraatori üldine tööpõhimõte.....	9
1.3	Vahelduvvoolugeneraatori füüsikalised alused .....	10
1.4	Vahelduvvoolu generaatorite jagunemine .....	12
1.4.1	Radiaalvooga püsomagnetgeneraatorid.....	13
1.4.2	Aksiaalvooga püsomagnetgeneraatorid .....	14
1.5	Püsomagnetmaterjalid .....	14
1.5.1	Põhilised magnetilised suurused.....	15
1.5.2	Enam levinud magnetmaterjalid elektrimasinates .....	17
2.	AKSIAALVOOGA TOROIDMÄHISTEGA SÜNKROONGENERAATORI TÖÖPÕHIMÕTE....	19
2.1	Generaatori komponentide töö.....	19
2.2	Magnetahel.....	22
2.3	Elektriahel.....	23
3.	TÜHIKÄIGUL MÄHISEL INDUTSEERUVA ELEKTROMOTOORJÕU ARVUTAMINE.....	25
4.	AKSIAALVOOGA TOROIDMÄHISEGA DEMONSTRATSIOONGENERAATORI EHITUS....	27
4.1	Rotor .....	29
4.2	Staator .....	33
4.3	Generaatori geomeetrilised parameetrid.....	36
5.	ELEKTROONIKA.....	38
5.1	Generaatori kasutusvõimalused ja koormamine .....	38
5.2	Trükkplaat.....	41
6.	LCD KASUTAJALIIDES.....	43
7.	ARDUINO JUHTPROGRAMM .....	45
7.1	Arduino ühendusskeem elektroonikaseadmestikuga.....	46
8.	TOROIDMÄHISTEGA GENERAATORI KATSETAMINE, JÄRELDUSED.....	47
	KOKKUVÕTE .....	49
	SUMMARY .....	50
	Kasutatud kirjandus .....	51
	LISA 1 Generaatori staatori ja mähiste mõõtmed .....	53
	LISA 2 Püsिमagnetі Neorem 476a demagnetimiskõver .....	54
	LISA 3 Püsिमagnetі N52 demagnetimiskõver .....	55
	LISA 4 Kinnituspoltide keermete mõõtmed millimeetrites .....	56
	LISA 5 Akude laadimisskeem.....	57
	LISA 6 Projekteeritud trükkplaadi üks pool .....	58
	LISA 7 Projekteeritud trükkplaadi teine pool .....	59
	LISA 8 Elektroonika skeem .....	60

## EESSÕNA

Käesoleva töö teema arenes välja Tallinna Tehnikaülikooli elektroenergeetika ja mehhatroonika instituudi vajadusest demonstratiivse elektriseadme järele, mis demonstreeriks elektrigeneraatori olemust ning tööpõhimõtteid. Töö teema pälvis isikliku huvi seetõttu, et väljatöötatav seade tuleb ka praktiliselt ellu tuua. Käesolev bakalaureusetöö on valminud Tallinna Tehnikaülikooli elektroenergeetika ja mehhatroonika instituudi professor Lauri Kütt juhendamisel. Siinkohal tänab käesoleva töö autor professor Lauri Kütti lõputöö teema pakkumise, meeldiva koostöö, tööruumide kasutusvõimaluse ning projekti finantseerimise eest.

## SISSEJUHATUS

Käesoleva töö eesmärgiks on valmistada demonstratiivne generaator, mille eesmärgiks on visuaalselt atraktiivselt anda edasi energiatootmise mõiste tunnetus. Turul pakutavate demogeneraatorite puhul on tegemist väikesemõõtmeliste seadmetega, mis küll annavad ülevaate mehaanilise energia muundamisest elektrienergiaks, kuid suudavad demonstreerida üldjuhul vaid elektripirni põlema panekut. Sarnase funktsiooniga generaatoreid on liikvel mitmeid, kuid kirjeldatud seadmed on pigem sobilikud põhikooli füüsikatundi demonstreerimaks elektromagnetilise induktsiooni nähtust, mitte kõrgkooli eksponaadiks.

Käesolev töö baseerub Tallinna Tehnikaülikoolis 2004. aastal Ants Kallaste poolt valmistatud puitgeneraatorile, mis omas uuenduslikku konstruktsioonilist lahendust, kuid mille kasutamisel ilmnisid probleemid. Käesoleva töö autori eesmärgiks on edasi arendada A. Kallaste poolt valmistatud generaatorit, kasutades väljatöötatud püsिमagnetitega generaatori kontseptsiooni ning arvutuste aluseid projekteerimaks ning valmistamaks Tallinna Tehnikaülikooli elektroenergeetika ja mehhatroonika instituudile demo elektrigeneraatori.

Ants Kallaste püsिमagnetgeneraatori peamiseks probleemideks olid rootori ebatäpne kinnitusviis, generaatori prototüüp-välimus, mittesobivate laagrite kasutus ning ainult ühe faasi korrasolek planeeritud kolme asemel.

Käesolev töö on edasiarendus olemasolevale puitgeneraatori lahendusele, mille eesmärkideks on tagada:

1. generaatori väline atraktiivsus – korrektsus, terviklikkus, kaasaegsus;
2. rikevaba kestev töö;
3. ohutus;
4. huvipakkuv konstruktsioon;
5. konkreetne väljundfunktsioon.

Edasiarenduse käigus saavutatakse eelnevalt loetletud eesmärgid uute materjalide valikuga, uue konstruktsioonilise lahendusega, komponentide asendamisega ning kaasaegseid elektroonikakomponente ning seadmeid kaasates. Arvestades, et tegemist on demonstratiivse elektrimasinaga, otsustati alles jätta puidust generaatori üks faas selleks, et näidata konstruktsioonimaterjalide mitmekülgust.

Käesoleva töö esimeses peatükis tutvustatakse püsिमagnetitega generaatoreid, milles käsitletakse generaatorite ajalugu, üldist tööpõhimõtet, füüsikalisi aluseid, generaatorite jagunemist ning püsिमagnetite omadusi. Teises peatükis selgitatakse konkreetselt käesolevas töös käsitletud generaatori tööpõhimõtteid ning omadusi. Kolmandas peatükis arvutatakse Ants Kallaste poolt kirja pandud arvutuslikel alustel generaatori prognoositavad väljundparameetrid erinevate püsिमagnetite

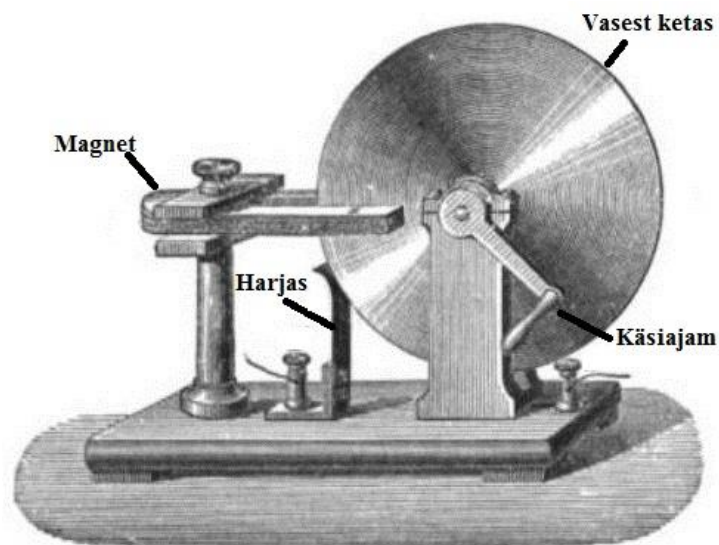
kasutamisel. Töö neljandas peatükis selgitatakse konstruktsioonilisi lahendusi, olemasolevate detailide modifitseerimist ning kasutatavate materjalide valikut. Viiendas peatükis tuuakse välja projekteeritud elektroonikaseadmestik koos selgitustega. Kuuendas peatükis tutvustatakse generaatorile kavandatud kasutajaliidest ning seitsmendas peatükis selgitatakse kuidas lahendatakse elektroonikaseadmestiku juhtimine Arduino kontrolleri abil. Viimases, kaheksandas peatükis, tuuakse välja generaatori katsetulemused ning sellest tulenevad järeldused.

Töö valmimisel on kasutatud generaatori 3D mudeli loomiseks programmi nimega SolidWorks; magnetvälja kirjeldamiseks ning analüüsimiseks generaatori magnetahelas programmi nimega FEMM; elektroonika skeemi, nende komponentide sisestamiseks ning trükkplaadi projekteerimiseks programmi Diptrace; plokkiagrammide loomiseks yEd tarkvara ning Arduino kontrolleri programmeerimiseks Arduino tarkvara.

# 1. ÜLEVAADE PÜSIMAGNETITEGA ELEKTRIGENERAATORITEST

## 1.1 Elektrigeneraatori ajalugu

Esimese elektrigeneraatori leiutajaks peetakse inglise füüsikut ja keemikut Michael Faraday'd, kes oli inglise füüsik ja keemik. Faraday arendas eelkõige elektromagnetismi valdkonda. Eksperimentide käigus valmistas ta 1831. aastal esimese elektrigeneraatori, mida nimetatakse Faraday kettaks (vt sele 1.1). Generaatori põhikomponentideks olid vasest ketas, püsimagnet, harjas ning käsiajam. Käsiajamiga vasest ketas ringi ajades hakkas püsimagneti magnetvoog vasest ketta suhtes muutuma, magnetvoo muutus juhtivas kehas toob kaasa potentsiaalide vahe, mille tulemusel tekib vasest kettas potentsiaalide vahe. Harjas on selleks, et juhtida elektrivool klemmi otsale. Katsest generaatoriga sõnastas Faraday elektromagnetilise induktsiooni nähtuse ehk Faraday seaduse, mis on aluseks kõigile tänapäevastele elektrimasinatele. [1]



Sele 1.1. M. Faraday loodud elektrigeneraator. [2]



## 1.2 Elektrigeneraatori üldine tööpõhimõte

Elektrigeneraatoriteks loetakse seadmeid, mis muundavad mehaanilist energiat elektrienergiaks. Energeetikas on kasutusel pöörlevad elektromagnetilised generaatorid, mis põhinevad elektromotoorjõu tekkel juhul, millele mingil viisil, olenevalt generaatori ehitusest mõjub muutuv magnetväli. Pöörlevad elektrimasinad, sealhulgas generaatorid, on pööratavad elektromehaanilised energia muundurid. Generaatorit ringi ajades toodab masin ise voolu, kui ühendada generaator vooluallikaga hakkab masin pöörlema, seega muundab vastupidiselt elektrienergiat mehaaniliseks energiaks. [3]

Energia muundamine ühest liigist teise toimub läbi magnetvälja. Kahe magnetvälja vastastikmõju vahendusel kantakse mehaaniline võimsus  $P_{meh}$  üle elektriliseks võimsuseks  $P_{el}$ . Sel juhul pannakse mehaaniliselt rootor pöörlema ning rootori magnetväli hakkab liikuma. Rootori liikuv magnetväli indutseerib mähises elektromotoorjõu, mille mõjul tekib mähises vool ning vool edastatakse läbi juhtme tarbijale.

Generaatori osa, mis tekitab magnetvälja nimetatakse induktoriks ning osa, milles indutseerub elektromotoorjõud nimetatakse ankruks. Üldiselt on generaatori pöörlevaks osaks rootor, seisvaks staator. Staator koosneb staatori kerest, millel paiknevad ferromagnetsüdamikud ning südamike vahele keritud mähisest. Südamike paigutus sõltub generaatori tüübist ja otstarbest, samuti on mähisega. Üldiselt paiknevad rootoril elektromagnetid või püsिमagnetid pöörleva magnetvälja tekitamiseks. [8]

### 1.3 Vahelduvvoolugeneraatori füüsikalised alused

Kõikide elektrigeneraatorite töö lähtub samadel füüsikalistel alustel. Generaatori tööpõhimõtteid saab selgitada kolme põhilise seadusega elektromagnetismist, need on järgnevad:

- Faraday seadus;
- Lenzi reegel;
- Ampere seadus;
- Lorentzi jõud.

Faraday seadus kirjeldab, kuidas tekib elektrivool juhtmekeerus magnetvälja toimel. Seaduse kohaselt sõltub elektromagnetilise induksiooni elektromotoorjõud sellest, kui kiiresti muutub kontuuri läbiv magnetvoog: [5]

$$\varepsilon = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} [\text{V}], \quad (1.1)$$

kus  $\Delta\Phi$  – magnetvoo muutus  $\Delta\Phi = \Delta\Phi_2 - \Delta\Phi_1$  (lõpphetk lahutatud alghetk),  $\Delta t$  – magnetvoo muutumiseks kulunud aeg.

Generaatori puhul sõltub kui kiiresti muutub rootori poolt tekitatav pöördmagnetväli, mille tulemusel indutseerub staatori mähise juhtmekeerdudesse elektromotoorjõud. Elektromotoorjõud mõjub mähise juhtmekeerdudes olevatele laetud osakestele, mis tekitab juhtmekeeru otstel pinge ning laetud osakeste liikumine tekitab mähises elektrivoolu.

Elektromagnetilise induksiooni elektromotoorjõu valemis olev miinusmärk väljendub Lenzi reeglist. Reegli kohaselt toimib induksioonivool alati vastupidiselt seda voolu esile kutsuvale põhjusele. Seetõttu loetakse juhtmekeerdu läbiva magnetvoo kasvamisel induksiooni elektromotoorjõudu ja vastavat voolutugevust negatiivseks, sest induksioonivoolu magnetväli takistab magnetvoo kasvu ehk on vastassuunaline. Juhtmekeerdu läbiva magnetvoo kahanemisel loetakse induksioonivoolu positiivseks. [6]

Lenzi reegli sõnastusi: [6]

- 1) induksioonivoolu suund on selline, et tema magnetväli kompenseeriks muutust, mis voolu põhjustab;
- 2) induksioonivool toimib alati vastupidiselt seda voolu esile kutsuvale põhjusele;
- 3) kui välismõju tingib magnetvoo kasvu kontuuris, siis on induksioonivoolu magnetväli välise magnetvälja suhtes vastassuunaline. Kui välismõju põhjustab magnetvoo kahanemist, siis on induksioonivoolu magnetväli välise magnetväljaga samasuunaline.

Ampere'i seadus määrab vooluga juhtmele välises magnetväljas mõjuva jõu suuruse ja suuna. Ampere'i seaduse kohaselt eristatakse kahte olukorda: [7]

1) esimesel juhul asub vooluga juhe välise magnetinduktsiooniga risti, sel juhul kehtib valem:  
$$F = I * B * l \text{ [N]}, \quad (1.2)$$

Kus  $F$  – juhtmele mõjuv jõud,  $I$  – voolutugevus juhtmes,  $B$  – väline magnetinduktsioon,  $l$  – magnetväljas oleva juhtme pikkus.

2) teisel juhul ei asu vooluga juhe välise magnetinduktsiooniga risti, sel juhul kehtib valem:

$$F = I * B * l * \sin\alpha \text{ [N]} \quad (1.3)$$

Kus  $F$  – juhtmele mõjuv jõud,  $I$  – voolutugevus juhtmes,  $B$  – väline magnetinduktsioon,  $l$  – magnetväljas oleva juhtme pikkus ning  $\alpha$  – nurk juhtmes liikuva voolu suuna ja välise magnetinduktsiooni vahel.

Magnetvälja kirjeldatakse üldiselt Lorentz'i jõu põhjal, mis avaldab mõju liikuvatele laengutele. Lorentz'i jõu kohaselt laengut  $q$  omavale osakesele, liikudes magnetväljas välja tihedusega  $B$  ning kiirusega  $v$  mõjub jõud  $F$ , mida nimetatakse Lorentz'i jõuks. Lorentz'i jõu valem: [21]

$$F = q * v * B, \text{ [N]} \quad (1.4)$$

Rakendades generaatorile koormuse, tekib mähises vool, voolu ja magnetvälja jõujoonte suuna alusel saab kindlaks teha Lorentz'i jõu suuna parema käe reegli abil.

## 1.4 Vahelduvvoolu generaatorite jagunemine

Käesolevas bakalaureusetöös käsitletakse aksiaalvooga püsिमagnetitega toroidmähistega vahelduvvoolugeneraatorit. Nimetatud generaatori tööpõhimõtte selgitamiseks vaadeldakse järgnevalt kahte erinevat generaatori tüüpi:

- sünkroongeneraator;
- asünkroongeneraator.

Sünkroon- ning asünkroongeneraatorid liigitatakse ühte kategooriasse – vahelduvvoolu generaatorid.

Sünkroongeneraatoril paiknevad magnetid rootoril ning rootori pöörlemisel tekib muutuv pöördmagnetväli, mille tulemusel indutseerub elektromotoorjõud staatori ehk ankru mähises. Staatoril indutseeritud elektromotoorjõud on sõltuvuses rootori poolt tekitatud pöörleva magnetvälja kiirusega. Kirjeldatud ehitusega sünkroongeneraator on oma tüübilt liikumatu ankruga. Käesolevas töös käsitletakse liikumatu ankruga sünkroongeneraatorit. Edaspidi nimetatakse sünkroongeneraatoreid püsिमagnetgeneraatoriteks. [8]

Asünkroongeneraatori puhul tekitatakse pöörlev magnetväli rootori suhtes staatoril asetsevate elektromagnetitega. Sellest tulenevalt indutseeritakse rootorisse elektromotoorjõud, rootoril tekib vool, mis põhjustab omakorda rootoril magnetvälja tekke. Juhul, kui rootori magnetvälja pöörlemise kiirus ületab staatori magnetvälja pöörlemise kiiruse, siis indutseeritakse lisaelektromotoorjõud staatori mähistesse. [8]

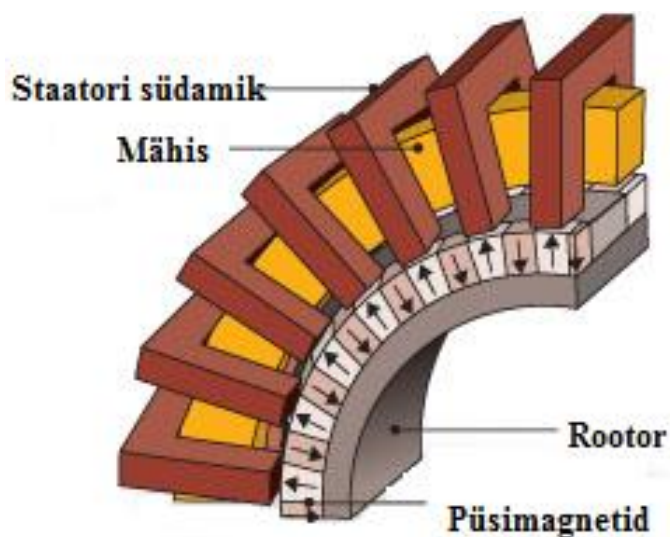
Sünkroongeneraatorid, käesolevas töös püsिमagnetgeneraatorid, jagunevad järgnevalt: [8]

- völli asetuse alusel:
  - 1) horistontaalne völli;
  - 2) vertikaalne völli
- magnetvoo suuna alusel:
  - 1) radiaalmagnetvoog;
  - 2) aksiaalmagnetvoog;
- magnetite asetuse alusel:
  - 1) pinnapealsed magnetid;
  - 2) pinnasesse süvistatud magnetid.

## 1.4.1 Radiaalvooga püsomagnetgeneraatorid

Radiaalvooga püsomagnetgeneraatorites läbib magnetvoog ferromagnetsüdamiku ja püsimagneti vahelist õhupilu generaatori võlliga ristisuunas. Tüüpilise lahendusena ümbritseb staator rootorit (vt sele 1.2). Radiaalgeneraatorit on võimalik valmistada ka vastupidise konstruktsiooniga – staator rootori sees. Mähis paikneb staatoril ning rootor tekitab püsimagnetitega liikuva magnetvälja. Enamus radiaalvooga generaatoritel on sarnase ehitusega staator, olenemata generaatori konstruktsioonist. Erineb ainult staatoril asuvate uurete paigutus ja sellega seonduvalt mähise kuju, asetus ning keerdude arv.

Vaadeldes rootorit radiaalvooga generaatorite puhul, erineb see ainult magnetite paigutuse poolest. Magnetite asetus mõjutab väga suurel määral generaatori omadusi. [8]

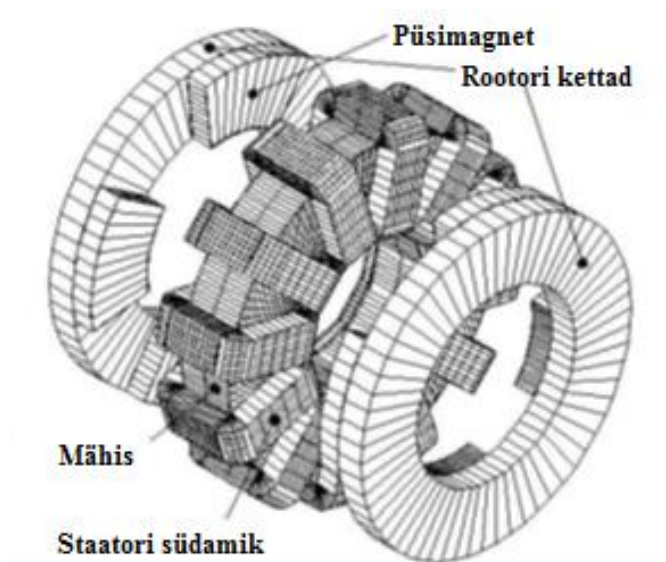


Sele 1.2. Radiaalvooga generaatori konstruktsioon.

## 1.4.2 Aksiaalvooga püsिमagnetgeneraatorid

Aksiaalvooga püsिमagnetgeneraatorites läbib magnetvoog õhupilu generaatori völliga samasuunaliselt ehk paralleelselt. See määrab generaatori konstruktsiooni - staatori ja rootori kõrvuti asetsemise (vt sele 1.3). Aksiaalvooga generaatorite puhul on vöimalik suhteliselt lihtsalt faase lisada ning eemaldada, sellega kaasneb vaid generaatori geomeetriliste parameetrite muutus ning omaduste muutus. Käsitleva generaatori tüübi puhul puudub standardlahendus, leidub väga erinevaid konstruktsioonilisi lahendusi, mis on eelkõige tingitud sellest, milline on generaatori otstarve. [8]

Kuna elektromagnetite kasutamine aksiaalvooga generaatorite puhul on raskendatud, siis nende põhjalikum uurimine sai alguse vöimsamate püsिमagnetite välja töötamisega. [8]



Sele 1.3. Aksiaalvooga generaatori konstruktsioon. [11]

## 1.5 Püsिमagnetmaterjalid

Püsिमagnet on oma olemuselt keha, mille magnetilised omadused püsivad ka ilma elektrivooluta. Magnetvälja tekitavad magnetite sees olevad osakesed, mis omavad laengut, neid nimetatakse spinniga osakesteks. [7]

Püsिमagnetite ajalugu ulatub väga kaugesse aega. Legendi kohaselt varaseim teadaolev magnetnähtuse kirjeldus pärineb üle 4000. aasta tagusest ajast, kui lambakarjus nimega Magnes jalutas Põhja-Kreeka aladel ning tema jalanõu kinnitusnaelad haakusid maapinna külge. Tegemist oli magnetiidiga, mis on looduslik magnetiliste omadustega metallisulam. [20]

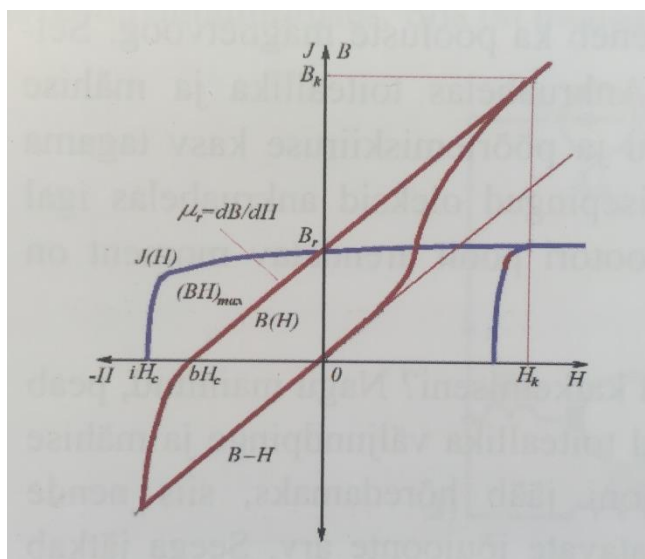
Alates 12. sajandist hakati magneteid kasutama kompassidena, esmajoones merel ning kõrbetes. Põhjalikumalt hakati magnetite omadusi uurima alles 17. sajandil. Suurimaks sammuks magnetismis peetakse inglise teadlase William Gilberti eksperimente. Gilbert oli esimene, kes avastas, et Maa on hiigelmagnet ning rauda töödeldes on võimalik saada magnet. [20]

### 1.5.1 Põhilised magnetilised suurused

Püsimagneteid kirjeldab peamiselt hüstereesisilmuse teine veerand, mida nimetatakse veel lahtimagneetimiskõveraks (vt sele 1.4). Lahtimagneetimiskõvera järgi on võimalik määrata püsimagneti põhilised parameetrid. [11]

Järgnevalt tuuakse välja põhilised püsimagnetit kirjeldavad parameetrid: [11]

- Magnetvootiheduse küllastuspunkt  $B_k$  ja magnetvälja küllastuspunkt  $H_k$ , selles punktis on kõik magneti doomenite magnetmomendid orienteeritud välise magnetvälja suunas;
- Jääkvootihedus  $B_r$  on magnetvoo tiheduse väärtus, mis püsib magnetil, kui puudub väline magnetväli. Mida suurem on jääkvootihedus, seda suurem magnetvootihedus saab olla magnetahela õhupilus;
- Vootiheduse koertsetiivjõud  $bH_c$  on väärtus, mis näitab kui suurt välist väljatugevust tuleb rakendada, et magneetitud magneti vootihedus nulli viia. Mida kõrgem koertsetiivjõud, seda õhemat magnetit saab kasutada demagneetiva toime vastu.
- Magneti suhteline magnetiline läbitavus  $\mu$  on magnetvoo tiheduse ja magnetvälja tugevuse suhe igas demagnetiseerimiskõvera punktis;
- Magneetuvuse koertsetiivjõud ehk  $iH_c$  on väärtus, mis näitab, kui suurt välist väljatugevust on vaja rakendada, et magnet lahti magneetida. Mida suurem on  $iH_c$  väärtus, seda suuremat välja tuleb rakendada, et magnet täielikult magneetida;
- Maksimaalne magneti energiatihedus  $(BH)_{max}$  vastab punktile demagneetimiskõveral, kus  $B \times H$  tootlikkus on maksimaalne.



Sele 1.4. Magneti lahtimagneetimiskõver. [11]

Püsimagneti lahtimagneetimiskõvera puhul eristatakse  $BH$ -kõverat, mis on magnetvälja energiatiheduse ning koertsetiivjõu vaheline sõltuvus ning  $J$ -välja, mis kujutab magneti magneetuvust (vt sele 1.4).



## 1.5.2 Enam levinud magnetmaterjalid elektrimasinates

Kõige enam elektrimasinates kasutatavad magnetmaterjalid on samaariumkoobalt, baarium ferriit ning neodüüm-raud-boor.

Ajalises järjestuses kõige varasemalt, 1960. aastatel, võeti kasutusele keraamilised magnetid, mis on valmistatud baarium ferriidist või strontsiumist. Keraamilistel magnetitel on hea temperatuuritaluvus. Lisaks on keraamilised magnetid täiesti roostevabad, kuid materjal on väga habras ning ei talu painutamist ega suuri pingeid.

1970. aastatel ilmusid turule samaariumkoobalt sulamist valmistatud püsिमagnetid. Materjal on omadustelt tugev, talub kõrget temperatuuri ning omab head roostekindlust. Samaariumkoobalt magnetite omadused on suhteliselt sarnased neodüümmagnetitele, kuid nende hind on väga kõrge toormaterjali erilise tõttu. 1983. aastal tutvustati esmakordselt suure energiatihedusega magnetmaterjali neodüüm-raud-boori sulamit (NdFeB). Peale neodüümmagnetite turule tulekut algas püsिमagnetitega elektrimasinate laialdasem kasutamine. Alguse sai laiaulatuslik tööstuslik kohaldamine ja suurema kasuteguriga püsिमagnetmasinate konstruktsioonide väljatöötamine. Neodüümmagnetid on turul olevatest magnetitest kõige võimsamad. Miinuseks on see, et neodüümmagnetid korrodeeruvad kergelt, seetõttu vajavad pinna katmist. Korrodeerumise vältimiseks kaetakse magnetid enamasti nikli kihiga. [12]

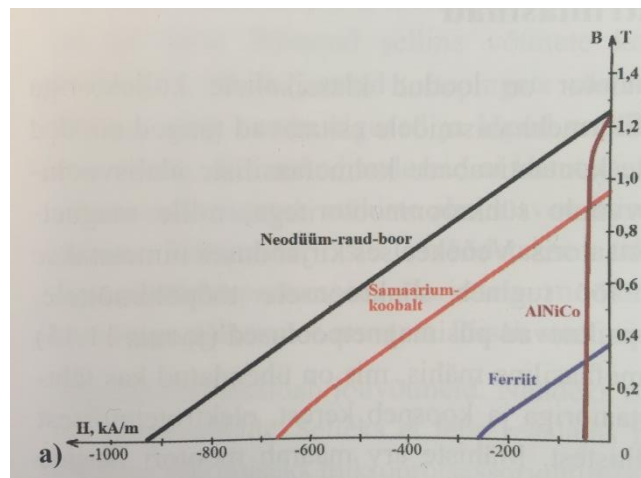
Tabel 1.1. Kolme enam levinud magnetmaterjali parameetrid [13]

Tüüp	Materjal	$B_r$ (Gauss, kG)	$iH_c$ (kOe)	$(BH)_{max}$ (MGOe)	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	$T_{max}$ (°C)
Neodüüm	Neodüüm, raud, boor	130,0	11,5	42,0	7,4	80
Ferriit	Keraamiline, raudoksiid	3,9	2,95	3,5	5,0	180
Samaarium koobalt	Peamiselt samaarium ja koobalt	11,0	9,7	28,0	8,4	350

Tabeli suurused:

- $B_r$  – jääkvootihedus;
- $iH_c$  - magneetuvuse koertsitiivjõud;
- $(BH)_{max}$  - magneti maksimaalne energiatihedus;
- $\rho$  – materjali tihedus;
- $T_{max}$  – maksimaalne töötemperatuur;

Selel 1.5 on kujutatud eelnevalt võrreldud püsिमagnetmaterjalide jääkvootihedusi graafiliselt.



Sele 1.5. Erinevate püsिमagnetmaterjalide jääkvootiheduse võrdlus. [11]

## 2. AKSIAALVOOGA TOROIDMÄHISTEGA SÜNKROONGENERAATORI TÖÖPÕHIMÕTE

### 2.1 Generaatori komponentide töö

Rootori pöörlemisel nurkkiirusega  $\omega$  hakkab mähise keerdusid läbima muutuv magnetvoog, ajaühiku  $\Delta t$  vältel indutseeritakse juhtmes elektromotoorjõud, mis on leitav valemiga 2.1. Mähise juhtmekeerudega ahelduv magnetvoog tekitab kasvades miinusemärgiga elektromotoorjõu indutseerimise ning kahanedes positiivse elektromotoorjõu mähise juhtmekeerus. Aheldusvoog on võrdne mähise keerdude arvuga ja keerde läbiva magnetvoo suuruse korrutisega, valem: [16]

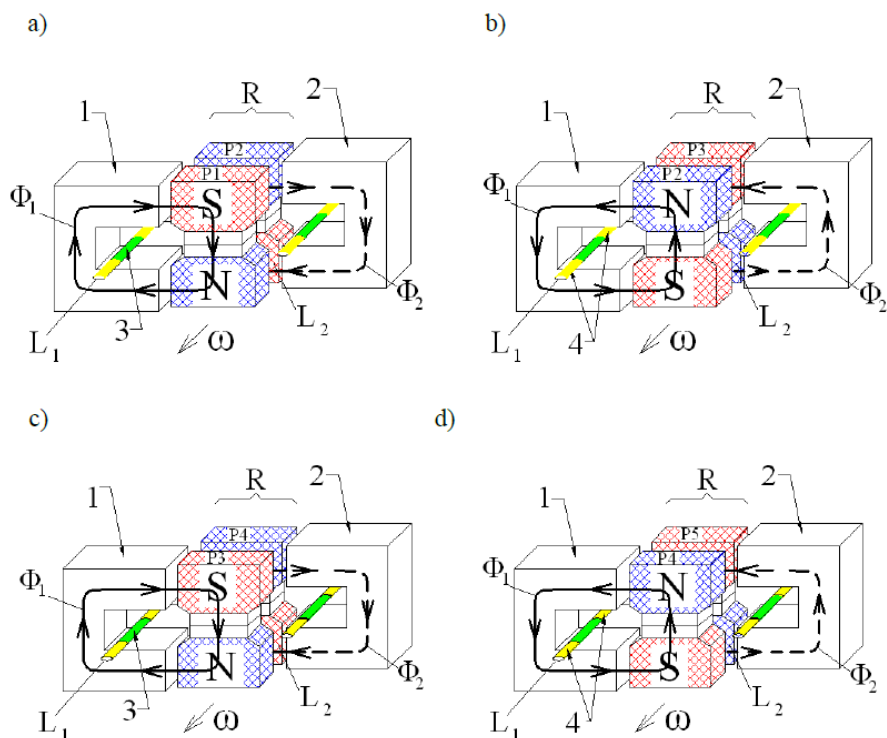
$$\Psi = w * \Phi \text{ [Wb]}, \quad (2.1)$$

kus  $w$  tähistab mähise keerdude arvu,  $\Phi$  – magnetvoo tugevust (Wb).

Järgnevalt vaadeldakse ühe generaatori faasi tööd:

Rootori  $R$  liikumisel selel 1.6 näidatud suunas algab rootori magnetvoo ümberlülitamine 1 staatori ja 2 staatori südamikul. Ajahetkel  $t_1$  sulgub rootori pooluspaarilt  $P_1$  pärinev magnetvoog maksimaalselt staatori 1 magnetsüdamikul, sest nad asetsevad kohakuti (vt sele 1.6a). Samal ajahetkel läbib staatori nr 2 südamiku staatori nr 1 südamikule vastassuunaline magnetvoog. Ajahetkel  $t_2$  on rootor liikunud edasi poole aktiivosa pikkuse, selle tulemusena vähenevad magnetvoo tugevused staatorite 1 ja 2 mähistel  $L1$  ja  $L2$  ning rootori edasisel liikumisel on magnetvoo väärtused südamikul võrdsed nulliga. Ajahetkel  $t_3$ , mida kujutab sele 1.6b, on rootor liikunud edasi ning magnetvoo suunad staatori 1 ja 2 südamikul on vastassuunalised ajahetkel  $t_1$  magnetvoogudele  $\Phi_1$  ja  $\Phi_2$ . Seled 1.6c ja 1.6d kujutavad eelnevatele kirjeldustele analoogseid ajahetki, muutuvad ainult rootori liikumisel pooluspaaride orientatsioonid ning nendest tulenevate magnetvoogude suunad magnetsüdamikul.

Staatorite 1 ja 2 mähiste aheldusvood on samal ajahetkel omavahel vastassuunalised, seega on ühe faasi staatorid vastasfaasis. Sellest tulenevalt on võimalik ühe faasi staatorid ühendada nii jadamiis kui ka rööbiti.

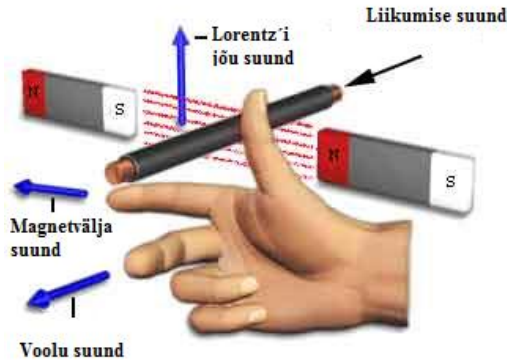


Sele 1.6. Rootori pooluspaaride ning kahe staatori töö. 3 – mähise aktiivosa, 4 – mähise laupühendus. [8]

Mida kiiremini rootor pöörleb, seda kiiremini muutub aheldusvoog ning vastavalt aheldusvoog muutumise kiirusele muutub elektromotoorjõu hetkväärtus Faraday elektromagnetilise induksiooni valemi kohaselt (valem 1.1). Indutseeruv elektromotoorjõud on maksimaalne, kui pooluspaar on kohakuti staatori südamikuga ning indutseeruv elektromotoorjõud on minimaalne, kui pooluspaar on kohakuti mähise passiivosaga.

Elektromotoorjõu hetkväärtuse muutusega kaasneb ka mähises indutseeritud elektromotoorjõu apmlituudväärtus  $E_m$ . Kuna pooluspaarid paiknevad rootoril vaheldumisi N-S, S-N, N-S muutub südamikus sulguva magnetvoo suund rootori pöörlemisel. Vaheldumisi paigutatud pooluspaaride puhul muutub magnetvoog õhupilus koosinusseaduse kohaselt – rootorit pöörates muutub aheldusvoog staatori mähises vastavalt pöördenurgale. Selle tulemusel peaks tekkima siinussagedusega vool mähises. [8]

Teades, et magnetvälja jõujooned liiguvad põhjapooluselt lõunapoolusele on magnetilise induksiooni suund alati teada. Samas on teada ka rootori liikumissuund ning neid asjaolusid arvestades on võimalik määrata voolu suund mähises Flemingz'i parema käe reegli abil (vt sele 1.7).



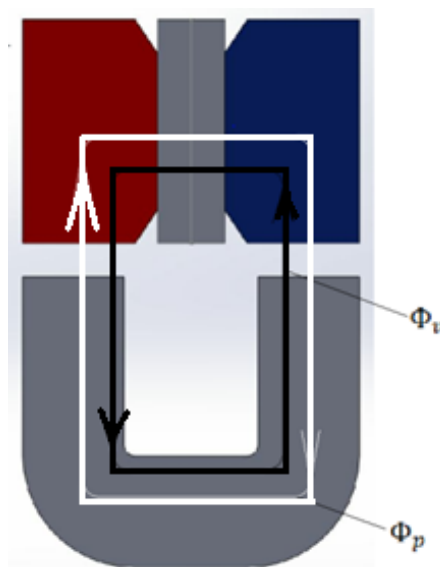
Sele 1.7. Juhtmes liikuva voolu suunda määrav Flemingz'i parema käe reegel. [24]

Ühendades generaatorile koormuse, siis mähistes tekib koormusvool, mis tuleneb Ohmi seadusest:

$$I = \frac{E}{Z} \text{ [A]}, \quad (2.2)$$

kus  $I$  – on koormusvool,  $Z$  – on kogu ahela takistus, milles sisaldub ka generaatori sisetakistus,  $E$  – tähistab elektromotoorjõudu.

Vastavalt Lenz'i reeglile tekib magnetsüdamikke läbivale magnetvoole vastassuunaline induksioonvoolu magnetvoog -  $\Phi_v$ , mis kahandab kogu mähise aktiivosas ahelduvat põhimagnetvoogu -  $\Phi_p$  (vt sele 1.8). Selle tulemusel on koguvoo magnetahelas väiksem kui püsimagnetilt tulenev magnetvoog. Koguvoo vähenemine tähendab ka seda, et mähises indutseeruva elektromotoorjõu väärtus langeb.



Sele 1.8. Püsimagneti magnetvoo ehk põhimagnetvoo ning vastassuunalise magnetvoo kulgemise suunad magnetsüdamikus.

## 2.2 Magnetahel

Käesolevas töös käsitletava generaatori magnetahel koosneb staatoritel asuvatest ferromagnetilisest lehtterasest keritud magnetsüdamikest, rootoril asuvatest püsimagnetitest ning püsimagnetite ümbritsevatest pooluskingadest. Rootoril asetsevad püsimagnetid tekitavad magnetvoo, mis sulgub staatoril paiknevates magnetsüdamikes. Õhupilu suurus on vaadeldava generaatori puhul 3 mm.

Saavutamaks vajalikku elektromotoorjõudu staatori mähises, tuleb täita kaks tingimust: [11]

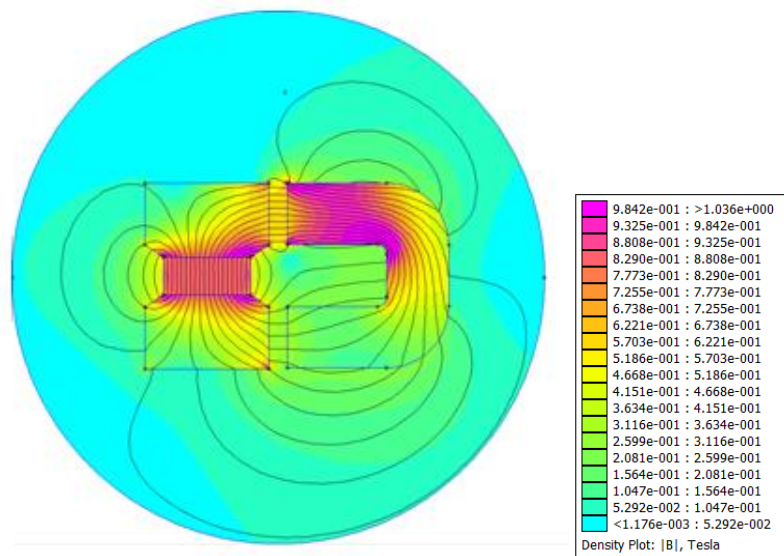
1. Magnetahela magnetiline takistus peab olema võimalikult väike;

2. Püsimagneti poolt tekitatud magnetvoog peab sulguma soovitud magnetahelat mööda.

Eelpool toodud tingimusi arvestades, generaatorit projekteerides, on vajalik optimeerida magnetsüdamike suurus, südamike materjali paksus ning pooluskingade ja magnetsüdamike vahele jääv õhupilu. Ideaalses generaatori magnetahelas ei eksisteeriks õhupilusid, sest õhu magnetiline läbitavus on väga madal, mis kujutab endast magnetvälja levikule väga suurt magnetilist takistust. Võrreldes õhu magnetilist läbitavust magnetpehmete ferromagnetiliste materjalidega on see mõnel juhul isegi rohkem kui 4000 korda suurem. Ideaalse magnetahela puhul sulgub magnetite poolt tekkiv magnetvoog täielikult mööda ettenähtud radasid. Reaalsuses ei suudeta magnetvoo sulgumist täielikult reguleerida, kuna magnetvoog sulgub alati ka soovimatuid teekondasid pidi. Magnetvoo sulgumist 3 mm õhupilu korral kujutab sele 1.9. [8]

Pooluskingade funktsioon on magnetvoo juhtimine rootorilt staatorile, suurendades ülekandva pinna ristlõiget ning sellest tulenevalt suuremat magnetvoogu. Pooluskingad on valmistatud magnetpehmetest materjalist, kuna magnetpehmetel materjalidel on suur magnetiline läbitavus, madal koertsetiivjõud ning kitsas hüstereesisilmus, mis tähendab madalaid hüstereesisikadusid. [11]

Järgnevalt vaadeldakse magnetvälja tugevust südamikul ning magnetvoo tihedust pooluspaari ümbritsevas õhus 3 mm õhupilu korral pooluspaari ja magnetsüdamiku vahel. Selleks kasutatakse programmi nimega FEMM, mis kuvab vastavalt sisestatud parameetritele magnetvälja tugevuse ning magnetvälja jõujoonte liikumistrajektoori. Selet 1.9 on simulatsioon püsimagnetiga N52 ning pooluspaari ja magnetsüdamiku vahelise õhupilu suuruseks on 3 mm. Selet 1.9 on näha, kuidas magnetvoog siseneb põhjapooluse kingast ning sulgub magnetsüdamikus. Arvestada tuleb, et FEMM simulatsioon on genereeritud ideaalsete materjalide ja sellest tulenevalt kõrgemate parameetritega võrreldes reaalse generaatori magnetahelaga.



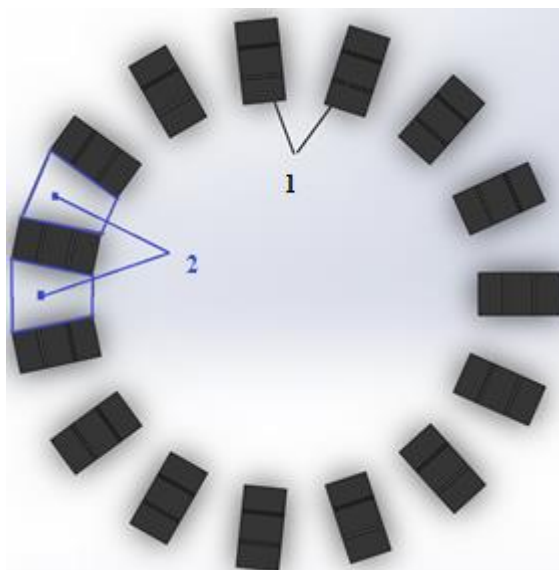
Sele 1.9. Poolspaari ja magnetsüdamiku vahelised jõujooned ning magnetvälja tugevuse väärtused regiooniti.

## 2.3 Elektriahel

Antud töös käsitletava generaatori elektriahel koosneb kuuest ringikujulisest mähisest. Igat mähist saab vaadelda kui eraldiseisvat ahelat. Kuna rootori pöörlemisel magnetvoo suund muutub vaheldumisi sõltuvalt püsimagnetite poolustest, tekib mähises vahelduva suunaga elektromotoorjõud, mille käigus laengut omavad osakesed vahetavad positsioone mähise otstel. Sellest tulenevalt tekib mähises vahelduva suunaga elektrivool.

Elektriahel koosneb aktiivsest ning passiivsest osast (vt sele 2.0). Aktiivne osa on mähise lõik, mis jääb magnetsüdamiku sisse ning milles indutseerub elektromotoorjõud. Passiivne osa on lõik mähisest, mis ei paikne magnetsüdamiku sees. Passiivse osa eesmärk on ühendada kõik mähise aktiivosad, et moodustuks terviklik elektriahel. Passiivosades liigub aktiivosade kaudu indutseerunud elektromotoorjõud.

Käesoleva generaatori puhul moodustab suurema osa mähisest passiivosa. Passiivosa ja aktiivosa on kujutatud staatori peal asetsevate südamike kaudu selel 2.0.



Sele 2.0. Staatori südamikud. 1 – Mähise aktiivosa, 2 – mähise passiivosa.

Järgnevalt leitakse mähise aktiivtakistus toatemperatuuril pleksiklaasist staatorite puhul. Mähise aktiivtakistus sõltub juhtme eritakistusest, juhtme pikkusest, keerdude arvust ning juhtme ristlõike pindalast, valem mähise takistuse leidmiseks on järgmine:

$$R = \rho * \frac{l_{jk} * w}{A_j} [\Omega], \quad (2.3)$$

Kus  $R$  – mähise takistus,  $l_{jk}$  – juhtmekeeru pikkus,  $w$  – mähise keerdude arv,  $A_j$  – juhtme ristlõike pindala,  $\rho$  – juhtme eritakistus.

Kuna käsitletaval generaatoril on mähised kahest erineva paksusega vaskjuhtmest arvutatakse mõlema mähise aktiivtakistus. Vaskjuhtme eritakistus on  $\rho = 1,7 * 10^{-8} \Omega$ , juhtmekeeru pikkus tuleb mähise keskmise raadiuse kaudu  $l_{jk} = 0,57 \text{ m}$ . Juhtme ristlõike pindala on  $A = 0,64 * 10^{-6} \text{ m}^2$ . Pleksist staatori mähise takistus on  $R = 2,3 \Omega$ . Ühendades ühe faasi mähised omavahel jadamisi, takistused liituvad ning faasi aktiivtakistus on  $4,6 \Omega$ .

Vineerist staatori mähised on keritud peenemast vaskjuhtmest ning keerdude arv on erinev võrreldes pleksist staatori mähistega. Seega nende faasi aktiivtakistus on suurem,  $R = 8,32 \Omega$ . Faasi aktiivtakistuste vahe erinevate mähiste puhul tuleneb eelkõige mähise juhtmekeeru ristlõike pindalast – mida väiksem on juhtme ristlõike pindala, seda suurem on takistus. Käesoleva generaatori puhul on mõistlikum kasutada suurema takistusega mähist, milles indutseerub suurem elektromotoorjõud.



### 3. TÜHIKÄIGUL MÄHISEL INDUTSEERUVA ELEKTROMOTOORJÕU ARVUTAMINE

Elektromotoorjõud indutseerub mähises ainult mähist ümbritseva muutuva magnetvoo korral. Järgnevalt leitakse generaatori mähisel indutseeruv maksimaalne elektromotoorjõud vastavalt Ants Kallaste poolt välja töötatud lahenduskäigule. Võttes arvesse, et mähisel ahelduv magnetvoog muutub vastavalt koosinusfunktsioonile on magnetvoog leitav järgeva valemiga: [8]

$$\Phi = \Phi_{pm} * \cos\omega * t \text{ [Wb]}, \quad (3.1)$$

Asendades eelneva valemi Faraday induksiooniseaduse valemisse ning võttes sellest tuletise saadakse seos elektromotoorjõu ning püsिमagnetі magnetvoo hetkväärtuse vahel:

$$e = \omega * \Phi_{pm} * \sin\omega * t \text{ [V]}. \quad (3.2)$$

Vaadeldes ajahetke, mil mähise juhtmekeerdu läbib maksimaalne magnetvoog ehk  $\sin\omega * t$ , saadakse elektromotoorjõu maksimaalne väärtus:

$$E_m = \omega * \Phi_{pm} \text{ [V]}. \quad (3.3)$$

Arvestades elektromotoorjõu efektiivväärtuse  $E$  ja amplituudväärtuse  $E_m$  vahelist seost: [8]

$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} \text{ [V]}, \quad (3.4)$$

nurksageduse ja sageduse vahelist seost:

$$\omega = 2 * \pi * f \left[ \frac{rad}{s} \right], \quad (3.5)$$

saadakse mähisesse indutseeritud elektromotoorjõu ning püsिमagnetі magnetvoo vaheliseks seoseks:

$$E = \sqrt{2} * \pi * f * \Phi_{pm} \text{ [V]}. \quad (3.6)$$

Käsitledes magnetvoo maksimaalset väärtust püsिमagnetі magnetvoo tiheduse ja pinda läbiva ristlõike korrutisena:

$$\Phi_{pm} = B * A \text{ [T]}, \quad (3.7)$$

ning arvestades mähise keerdude arvu tekib seos:

$$E = \sqrt{2} * \pi * f * w * A * B \text{ [V]}. \quad (3.8)$$

Saadud valemist järeldub, et maksimaalne elektromotoorjõu väärtus generaatoris sõltub püsिमagnetі magnetvoo tihedusest, õhupilu ristlõike mõõtmetest, mähise keerdude arvust ning magnetvälja muutumise sagedusest.

Järgnevalt leitakse maksimaalne indutseeruv elektromotoorjõud N52 püsिमagnetiga 3 mm õhupilu korral pleksiklaasist staatori mähisel (vt tabel 4.1):

magnetvoo tihedus õhupilus arvutatakse vastavalt valemile: [8]

$$B_{\delta} = \frac{B_m}{\frac{A_{\delta}}{A_{pm}} + \frac{\mu_{pm} * 2 * l_{\delta}}{l_{pm}}} \text{ [T]}, \quad (3.9)$$

Kus õhupilu magnetvoog sõltub püsिमagnetiga jääkvootihedusest, püsिमagnetiga ja õhupilu pindalade ja pikkuste suhtest ning püsिमagnetiga magnetilisest läbitavusest.

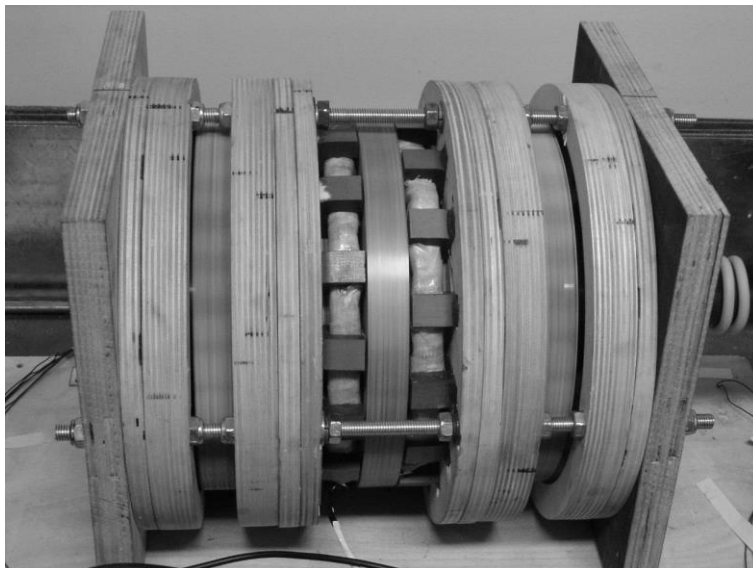
magnetvoo tihedus õhupilus 3 mm korral N52 püsिमagnetiga puhul  $B_{\delta} \approx 0,35 \text{ T}$ , ristlõike pindala on  $A = 0,019 * 0,0099 \approx 0,00016 \text{ m}^2$ . Mähise keerde on pleksist staatoril 150. Vaatleme maksimaalset elektromotoorjõudu 30 Hz sagedusel. Määratud õhupilu korral kujuneb elektromotoorjõu väärtuseks vastavalt valemile 3.8 ühes mähise aktiivosas ligikaudu 1,1 V. Arvestades, et ühel staatoril on 15 südamikku, mille tulemusel indutseeritakse mähises ühel ajahetkel sama suunalist ning võrdsete väärtustega elektromotoorjõudu. Ühes toroidmähises indutseeruv elektromotoorjõud on seega  $E = 15 * 1,5 \approx 16,5 \text{ V}$ . Samal ajal, mil 1. faasi ühes mähises indutseerub maksimaalselt 16,5 V elektromotoorjõud, indutseerub sama faasi 2. mähises vastassuunaline, kuid võrdse väärtusega elektromotoorjõud. Seega ühes faasis indutseerub  $2 * 16,5 \approx 33 \text{ V}$  sagedusel 30 Hz.

Järgnevalt leitakse maksimaalne indutseeruv elektromotoorjõud Neorem 476a püsिमagnetiga 3 mm õhupilu korral vineerist staatori mähisel (tabel 4.1):

õhupilu magnetvoo tihedus vastavalt valemile 3.9 on  $B_{\delta} \approx 0,27 \text{ T}$ . Õhupilu ristlõike pindala on  $A = 0,00016 \text{ m}^2$ , mähise keerde on vineerist staatoril 180. Mähise ühel aktiivosal indutseerub ligikaudu 1 V. Faasi ühel mähisel indutseerub  $E = 15 * 1 \approx 15 \text{ V}$  ning vastasfaasis oleva mähise vastasmärgiline elektromotoorjõud jadaühenduses liitub, seega ühes faasis indutseerub  $2 * 15 \approx 30 \text{ V}$  30 Hz sagedusel.

## 4. AKSIAALVOOGA TOROIDMÄHISEGA DEMONSTRATSIOONGENERAATORI EHITUS

Käsitletava generaatori ehitus on edasiarendus Ants Kallaste bakalaureusetööst, mille tulemusena valmis vineerist ühefaasiline käsiajamiga elektrigeneraator, mis on toodud seel 2.1.



Sele 2.1. Ants Kallaste poolt valmistatud elektrigeneraator.

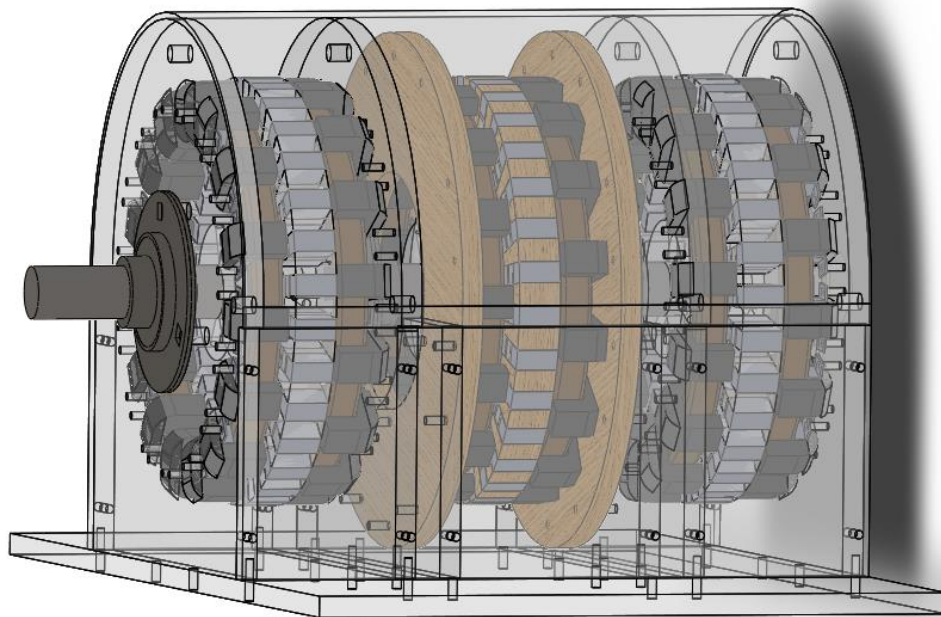
Generaatori töötav osa koosneb kahest staatorist, rootorist, võllist, külgplaatidest, kahest laagrist, käsiajamist ning kolmest keermelatist. Selel 2.1 kujutatud generaatori rootor on kinnitatud võllile kiiluga, staatorid on fikseeritud keermelatidele keeratud M8 mutritega.

Vineer on omadustel väga hea materjal - hästi töödeldav, piisava tugevusega ning väga levinud ja kättesaadav, kui ilmneb ka puudusi, mis mängivad suurt rolli seel 2.1 toodud generaatori puhul. Kõige suurem probleem toodud lahenduse puhul on rootori ebapiisav tsentrilisus. Staatori südamikke ja rootorit eraldab Kallaste generaatori puhul ligikaudu kahe millimeetrine vahe, seetõttu peab rootor olema paigaldatud staatorite vahele väga suure täpsusega ning rootori ringi ajamisel ei tohi ilmnedagi suuri hälbeid. Kuna vineer koosneb puidust ja puit on materjal, mille pinna kõvadus ilma täiendava töötluseta on väga madal, siis mitmekordsel kiilu paigaldamisel toimub materjali plastne deformatsioon. Selle tulemusel ei kinnitu rootor tihedalt võllile ning lisaks valedele laagritele rootori võllil tõmbuvad püsिमagnetid staatori südamike poole ning generaatorit ringi ajades kleepuvad rootoril olevad püsिमagnetid staatori südamikele, kokkupuute käigus saavad magnetsüdamikud viga ning edasine generaatori töö on häiritud.

Käesolev bakalaureusetöö on A. Kallaste poolt valminud püsिमagnetgeneraatori edasiarendus, mille eesmärgiks mehaaniliselt poolelt on tagada rootori piisav täpsus, et vältida staatori magnetsüdamikele kleepumist, välja ehitada kolm faasi, leida optimaalne lahendus ferromagnetsüdamike kinnitamiseks staatorile, tagada detailide läbipaistvus visualiseerimaks generaatori sisemust ning tagada konstruktsioonile piisav tugevus arvestades ka kasutajate ohutust. Käesoleva töö raames väljatöötatud generaatori 3D mudel on toodud seel 2.2.

Tagamaks konstruktsioonilist läbipaistvust ning tugevust valmistatakse generaator pleksiklaasist, täpsemalt polümetüülmetakrülaadist (PMMA). Generaator koosneb võlli suhtes järjestikku asetatud kolmest faasist, üks faas koosneb kahest staatorist ja ühest rootorist. Oluline on, et ühe faasi staatorid ei asetseks omavahel peegelpildis, kuna sel juhul rakenduvad magnetsüdamike ning pooluspaaride vahel jõud samades punktides ning indutseeruv elektromotoorjõud kahaneb. Kõik statsionaarsed osad kinnituvad ühtsele põhjaplaadile ning kahele külgseinale poltliidetega.

Staator koosneb ferromagnetsüdamikest, mähisest ning võlli fikseerivast laagripesast koos laagriga. Rotor koosneb vaheldumisi paigutatud põhja- ja lõunapooluselistest püsिमagnetitest, mida ümbritsevad mõlemalt poolt pooluskingad ning võllist, mis pöörleb koos rootoritega.

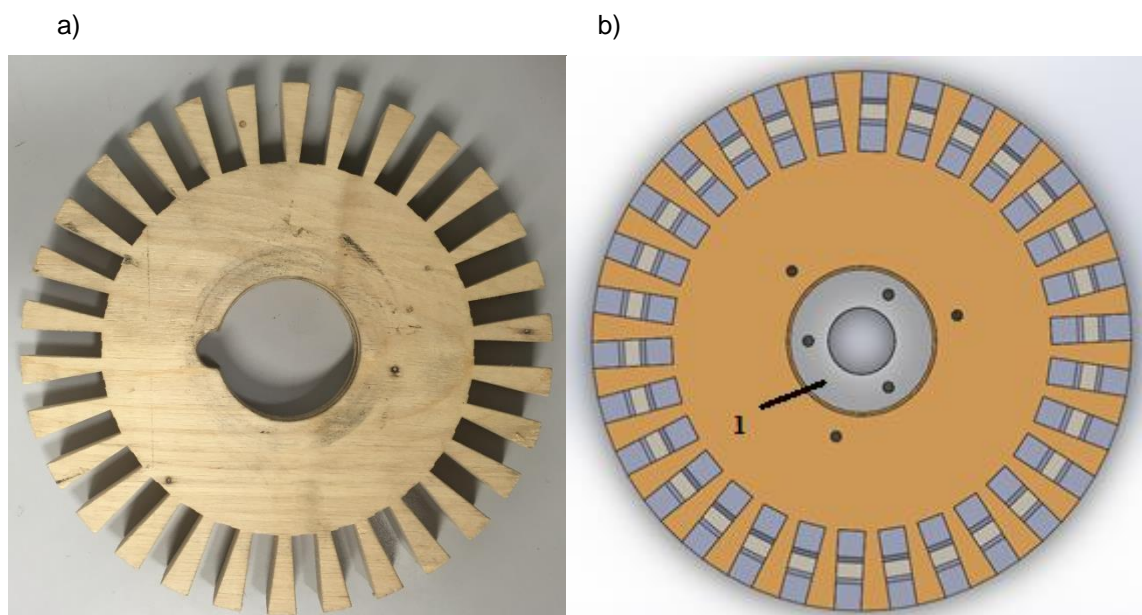


Sele 2.2. Väljatöötatud õppemaketi 3D mudel.

## 4.1 Rotor

Väljatöötatud generaatoril on iga faasi kohta üks rotor. Rotorid fikseeritakse võllile, mille ühes otsas on vänt. Generaatori konstrueerimisel on kasutusse võetud juba eelnevalt valminud vineerist rotor. Seda just seetõttu, et tegu on demonstratiivse elektrimasinaga ning suurema huvi tekitamiseks generaatori vastu jäetakse generaatori üks faas vineerist detailidest, mis on valminud Ants Kallaste bakalaureusetöö tulemusena.

Vineerist rotor on ümar ketas, mille sisse on freesitud pesad ning pesadesse paigutatud püsimagnetitest ning pooluskingadest koosnevad pooluspaarid. Freesitud pesa sisemine diameeter peab olema võrdne staatori magnetsüdamide sisemise diameetriga, samuti peab ühtima ka välimine diameeter. Vineerist generaatori puhul kinnitus rotor 56 mm võllile kiiluga, vaadates vineerist generaatori mõõtmeid ja konstruktsiooni ei olnud nimetatud jämedusega võll vajalik. Seetõttu ei olnud võimalik uue generaatori konstruktsiooni juures vineerist rotorit ilma modifikatsioonideta ära kasutada, sest uue lahenduse juures kasutatakse 25 mm diameetriga võlli. Selleks, et tsentreerida ning korralikult rotor võllile fikseerida oli vaja freesida mõlemale poole rotorit 3 pleksiklaasist ketast. Üks ketas tsentreeris rotori võllile, ketta mõõdud on  $D_s = 25,1$  mm,  $D_v = 56$  mm. Teine, suurema läbimõõduga ketas kinnitus rotorile selleks, et ühendada kõik flantsid omavahel kolme M4 poldiga ning suurendada kontaktpinda rotoriga, ketta sisemine diameeter  $D_s = 25,1$  mm ning välimine diameeter  $D_v = 105$  mm. Kolmas flants fikseerib rotori võllile – kolme M4 sisekuuskant poldiga, mis läbivad fikseerimisketast vertikaalselt, surutakse rotor võllile nii, et see ei saa üle libiseda ega võllil liikuda. Vineerist rotor on toodud seel 2.3.

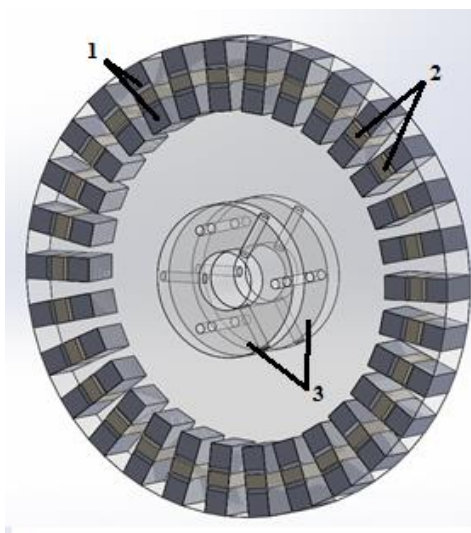


Sele 2.3. a) A. Kallaste poolt valmistatud vineerist rotor. b) Käesolevas töös projekteeritud rotori mudel koos pleksiklaasist tsentreerimiskettaga - 1.

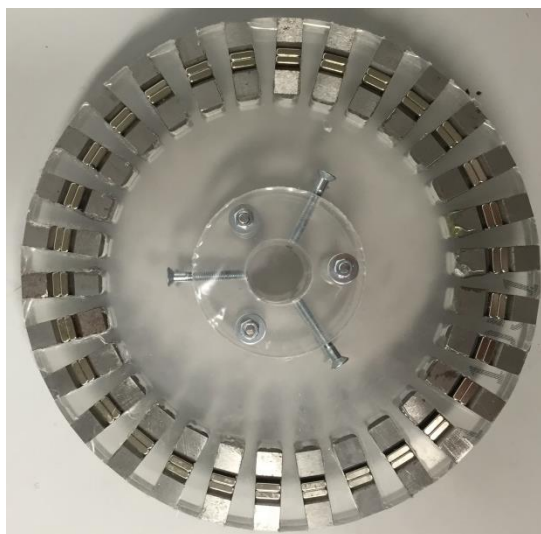
Uuendatud generaatori ajamiseks on 25 mm diameetriga võll, mis on valmistatud pindkarastatud terasest. Kuna tegemist on käsiajamiga generaatoriga, kus võll ei pöörle suurtel kiirustel ning suurte jõudude tekkimine on välistatud, siis 25 mm diameetriga 490 mm pikkuse võlli puhul ei esine läbipaindumist ega ohtliku väändemomendi tekkimist. Võll on piisavalt suure tugevusvaruga.

Edasiarenduse ühe eesmärgi kohaselt, valmistada läbipaistev generaator, on kahe faasi rootorite kered valmistatud pleksiklaasist, mis on elektriliselt mittejuhtiv ning mittemagnetiline materjal. Pleksiklaasist rootorid fikseeritakse võllile kahe 10 mm pleksiklaasist välja freesitud kinnituskettaga sarnaselt vineerist rootoriga, mille välisdiameeter on 65 mm ning sisemine 25,1 mm (vt sele 2.4a). Kinnitusketta ning rootori sisemine diameeter on võlli diameetrist vaid 0,1 mm suurem, et detailid sobituksid võllile võimalikult tihedalt ning fikseeriks rootori võimalikult täpselt tsentrisse. Kinnituskettasse on puuritud ning keerrestatud 3 võlli teljega ristuvat ava ning 3 ava rootori ja kinnitusketta omavaheliseks kinnitamiseks. Rotor fikseeritakse kinnituskettaste vahele ning kinnitusketast vertikaalselt läbivate poltidega pigistatakse rootor võllile kahelt poolt, kokku kuue M4 sisekuuskant poldiga. Keermete valmistamise parameetrid on toodud Lisas 4.

a)



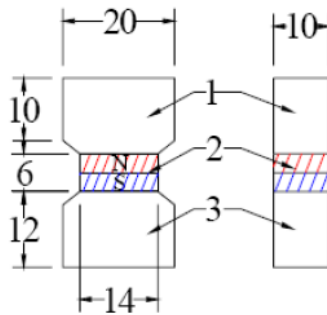
b)



Sele 2.4. a) Pleksiklaasist kerega rootor. 1 – pooluskingad, 2 – püsिमagnetid, 3 – kinnitusflantsid.

b) Pleksiklaasist rootori koost.

Generaatori ühes faasis on kaks staatorit, seega 2x15 staatori uuret. Iga uurde kohta paikneb rootoril pooluspaar, kokku kolmkümmend pooluspaari. Pooluspaar koosneb püsिमagnetist ning kahest pooluskingast (vt sele 2.5). Pooluskingad on valmistatud terasest. Oluline on, et pooluskingad ja püsिमagnetid oleks omavahel nii lähestikku kui võimalik, sest väiksemagi õhupilu korral püsिमagneti magnetväli nõrgeneb. Pooluspaarid on paigutatud rootorile freesitud pesadesse sümmeetriliselt. Pooluskingad ja püsिमagnetid on omavahel koos magnetjõu toimel ning pooluspaarid kinnitatakse pesadesse mõlema rootori materjali korral epoliimiga, mis talub kuni 80 °C temperatuuri. Pooluspaarid asetsevad rootoril sammuga  $2\pi/30 = 12^\circ$ . Iga  $12^\circ$  sammu järel on pooluspaari orientatsioon vahetunud – N-S, S-N, N-S. [8]



Sele 2.5. Rooril paiknevad pooluspaarid koos mõõtmetega. 1, 3 – pooluskingad, 2 – püsिमagnetid. [8]

Rooril paiknevaid püsिमagneteid on kahte sorti:

- 1) vineerist roooril on kasutusel Neoremi poolt valmistatud püsिमagnetid, mudel 476a (vt Lisa 2);
- 2) pleksiklaasist roooril kasutatakse klassikalisi N52 tüüpi püsिमagneteid (vt Lisa 3).

Tabel 4.1. Käesolevas töös käsitletava genereeraatori kahe erineva püsिमagnetid andmed [14,15]

Tüüp	Neorem 476a		N52	
Koertsetiivjõud				
$bH_c$	910 kA/m	11,4 kOe	796 kA/m	10 kOe
$iH_c$	1750 kA/m	22,0 kOe	876 kA/m	11kOe
Jääkvootihedus				
$B_r$	1,2 T	12,0 kG	1,4 T	14,3 kG
Maksimaalne energiatihedus				
$(BH)_{max}$	270 kJ/m <sup>2</sup>	34 MGOe	398 kJ/m <sup>2</sup>	50 MGOe

Generaatoris kasutati erinevaid magnetid kuna vineerist roooril olid Neoremi magnetid juba olemas ning pleksiklaasist roooritele tuli magnetid otsida. Pleksiklaasist rooorile magnetid otsides arvestati, et magneti omadused oleksid kasutatud Neoremi magnetitele sarnaste omadustega, või veel suurema jääkvootihedusega. N52 magnetid valiti, sest need vastasid soovitud parameetritele ning maksumus võrreldes Neoremi magnetitega oli ligi 4 korda soodsam. Võrreldes erinevaid generaatori ehitusel kasutatud püsिमagnetid selgub, et Neoremi magnetid vajavad demagneetuvuseks kõrgemat välist magnetvälja kui N52 tüüpi magnetid (vt Lisa 2 ja Lisa 3). Samas N52 tüüpi magnetitel on suurem väljatugevus, seega magnetahela õhupilus on nende magnetite puhul kõrgem magnetvootihedus ja kõrgem maksimaalne energiatihedus.

Kolmefaasilise generaatori jaoks vajalik faasinihe saadakse rootorite omavahelise nihkega. Faasinihe kujutab erinevust volutugevuse ja pinge vahel. Sellest tulenevalt ei ole pinge ja volutugevuse väärtused maksimaalsed ühel ja samal ajahetkel. Kui kolme faasi vaheliste elektromotoorjõudude nihe peab olema:

$$e_1 = E_m * \sin \omega t \text{ [V];} \quad (4.1)$$

$$e_2 = E_m * \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3});$$

$$e_3 = E_m * \sin(\omega t + \frac{4\pi}{3});$$

siis rootorite pooluspaarid peavad üksteise suhtes olema nihutatud  $2\pi/(30 * 3) = 4^0$  võrra. [8]

Järgnevalt on tabelis 4.2 välja toodud erinevast materjalist rootorite põhiparameetrid.

Tabel 4.2. Rootori põhiparameetrid

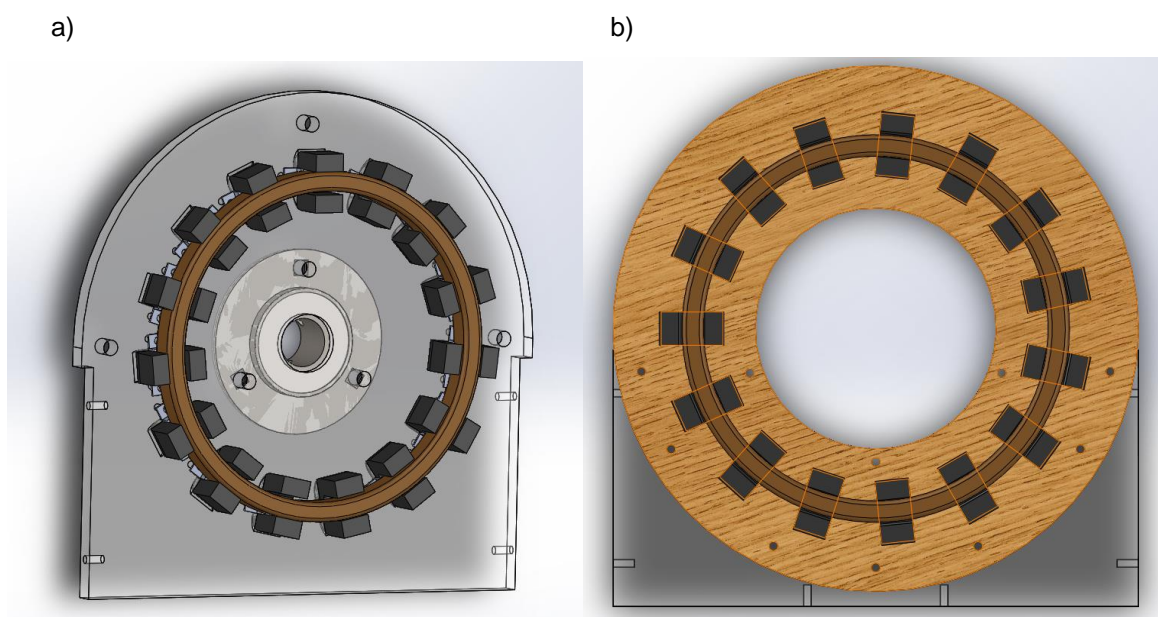
Nimetus	Mõõtmed
Rootoreid faasi kohta	2
Rootori pooluspaari sisemine raadius	71 mm
Rootori pooluspaari välimine raadius	101 mm
Pooluste arv rootoril	30 tk
Pooluste samm	12°
<b>Püsimagnet</b>	
Arv vineerist rootoril	30 tk
Arv pleksist roooril	60 tk
Kõrgus vineerist rootoril	6 mm
Kõrgus pleksist rootoril	3 mm
Laius vineerist rootoril	14 mm
Laius pleksist rootoril	20 mm
Paksus	10 mm
<b>Poolusking</b>	
Arv ühel rootoril	60 tk
Kõrgus	12 mm
Laius	20 mm
Paksus	10 mm



## 4.2 Staator

Püsimagnetitega generaatori edasiarendusel otsustati kasutada vineerist osasid ühe faasi ehitamiseks. Seega on väljatöötatud generaatoril 2 vineerist staatorit. Staatorile freesiti pesad, millesse liimiti epoliimiga magnetsüdamikud. Magnetsüdamike uured kujundasid mähisele toroidi kujulise pesa. Mähisel puuduvad eraldi kinnitused staatoril, sest mähised valmistati vastavalt uurde mahutavusele nii, et need sobituksid uurdesse võimalikult tihedalt.

Vineerist staatori mõõtmed on toodud tabelis Lisas 1. Ants Kallaste poolt valmistatud vineerist generaatoris fikseeriti staatorid keermelattidega (vt sele 2.1). Uue generaatori konstruktsiooniga taoline kinnitusviis ei sobinud, seega tuli vineerist staatorile valmistada kinnitusplaat. Kinnitusplaat valmistati 10 mm pleksiklaasi lehest, staator kinnitatakse kinnitusplaadile 10. M4 poldiga (vt sele 2.6b). Kinnitusplaat polditakse omakorda kuue M5 poldiga generaatori kahe külgeina vahele ning põhjaplaadile.



Sele 2.6. a) Projekteeritud pleksiklaasist staatori CAD (*Computer Aided Design*) mudel koos 15. magnetsüdamikuga, toroidmähise ning laagri ja laagrikorpusega. b) Täiustatud vineerist staator koos magnetsüdamikega, toroidmähisega ning pleksiklaasist kinnitusega.

Väljatöötatava generaatori puhul on staatori kere valmistatud pleksiklaasist, kere geomeetria on teine ning staatori kere on elektriliselt mittejuhtivast ning mittemagnetilisest materjalist. Iga generaatori faasi kohta on generaatoril 2 staatorit. Staatori kered kinnitatakse kahe M5 poldiga alusplaadile ja nelja poldiga külgeinte vahele. Lisaks kinnitub generaatori 3 mm pleksiklaasist kaas pleksist staatoritele. Avade ja keermete parameetrid on toodud Lisas 4.

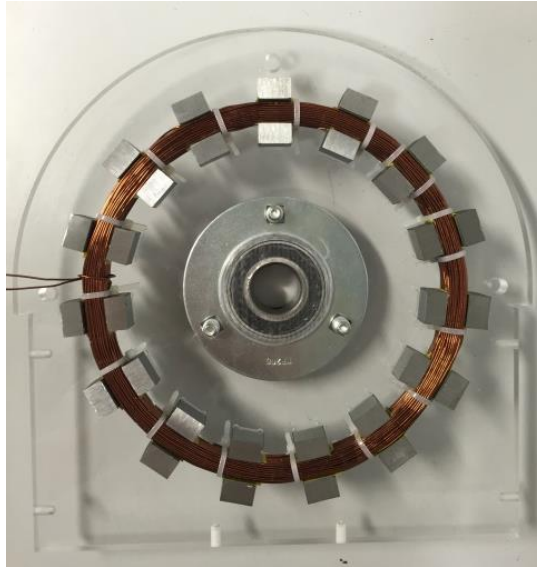
Pleksiklaasist staatori keredele kinnituvad laagrid koos laagripesadega. Laagripesad kinnitatakse staatorile kolme M8 väliskruuskant poldiga. Laagripesa koosneb kahest lehtmaterjalist valmistatud

kettast, mille vahel asub laager. Laagripesa kinnitamisel staatorile surutakse laager kahe ketta vahelisse pessa ning on seeläbi fikseeritud. Laagrite eesmärk on fikseerida rootoritega võll staatorite suhtes. Laagripesadel on 2 polti, millega fikseeritakse võll nii, et võllil ei oleks võimalik liikuda horisontaalselt. Pleksiklaasist staatoritel kasutatud laagripesa koos laagriga on toodud seel 2.7.



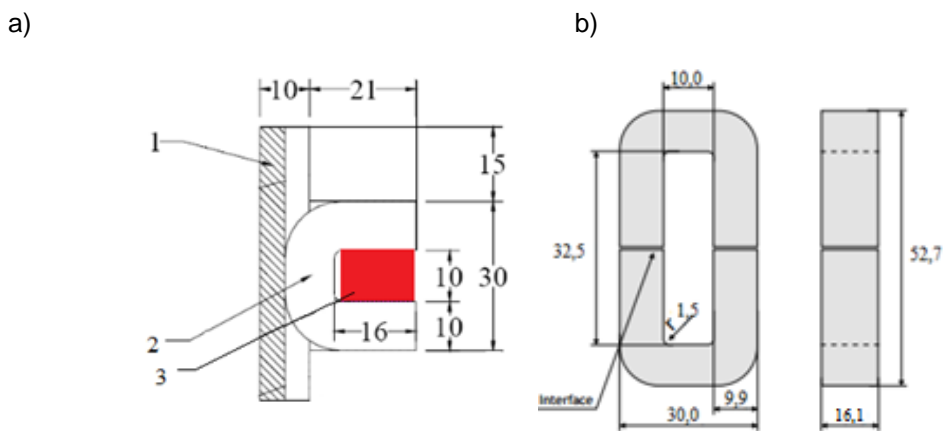
Sele 2.7. Rotori võlli fikseeriv laagripukk, mis kinnitub pleksiklaasist staatori kerele. [26]

Pleksiklaasist kui ka vineerist staatori kettal paikneb 15 U – kujulist ferromagnetsüdamikku. Südamikud koosnevad kokku keritud 0,3 mm kergelt magnetiseeruvast lehtmaterjalist. Südamikud paiknevad staatori kerele freesitud pesades sümmeetriliselt ühel raadiusel, seega on südamike samm  $360/15 = 24^\circ$ . Pleksiklaasist staatori pesade sügavus staatori kerel on 5 mm ning laiuselt on pesad 0,6 mm kitsamad võrreldes südamike laiusel, seetõttu kinnituvad südamikud tihedalt staatorile. Lisaks on iga südamik kinnitatud pleksiklaasist staatorile eraldi 1 mm paksuse roostevabast materjalist plekkribaga, mis omakorda kinnitub staatori kerele kahe M4 nailonpoldiga (Lisa 4). Väljatöötatud pleksiklaasist staator on toodud seel 2.8.



Sele 2.8. Pleksiklaasist staatori koost.

Ühe faasi kohta on generaatoril 30. magnetsüdamikku ja 2 toroidkujulist mähist. Staatori ühe pooluse lõige on näha seel 2.9a, kus on kujutatud magnetsüdamik ning südamiku uure, millesse on paigutatud mähis. Staatorite puhul on oluline see, et ühe faasi staatorid ei asetseks teineteise suhtes peegelpildis selleks, et ühe faasi mähised oleksid vastasfaasis.



Sele 2.9. a) Staatori lõige külgvaates: 1 – pleksiklaasist plaat, 2 – magnetsüdamik, 3 – mähis. [8]  
b) Firma Waasner tootekataloogist tellitud lehtmetailist keritud U – südamiku mõõtmed. [19]

Käesoleva generaatori konstrueerimisel kasutati firma Waasner tootekataloogist valitud standardseid lintsüdamikke – SU30b. Seel 2.9b on toodud magnetsüdamiku mõõtmed. Iga staatoril paiknev magnetsüdamik moodustab uurde. Uurdeid läbib vasktraadist keritud mähis.

Vineerist staatoritele on mähis keritud 0,75 mm vasktraadist, millest 0,01 mm moodustab lakikiht. Selleks, et tekiks võimalikult suur elektromotoorjõud, tuleb uurded täita maksimaalselt, ehk elektromotoorjõu väärtuse üheks parameetrik on uurde täitetegur ehk mitu traati uurdesse suudetakse mahutada. Vineerist staatorite puhul on uurdesse mahutatud 180 vasktraadi keerdu.

Järgnevalt arvutatakse uurde täitetegur vineerist staatori puhul jagades kogu mähise pindala uurde pindalaga:

mähise ristlõike pindala,

$$S_m = \pi * r^2 * n \text{ [mm}^2\text{]}, \quad (4.2)$$

$r$  – vasktraadi raadius (mm) ,  $n$  – keerdude arv.

Antud generaatori puhul on mähise ristlõikepindala  $S_m=79,5 \text{ mm}^2$ . Uurde pindala  $S_u = 16 * 10 = 160 \text{ mm}^2$ . Asendades saadud väärtused täiteteguri valemisse:

$$k_t = \frac{S_m}{S_u}, \quad (4.3)$$

Mähise täiteteguriks saadi  $k_t = 0,5$ .

Pleksiklaasist valmistatud staatori mähiste valmistamiseks kasutati 0,9 mm lakikihiga vasktraati. Mähise kerimiseks freesti spetsiaalsed vineerist rakised. Valitud traadiga mahutati 150 keerdu staatori uurdesse. Järgnevalt leitakse täitetegur pleksist staatori mähistele. Mähise ristlõikepindala vastavalt valemile ... on  $S_m = 95,4 \text{ mm}^2$ . Seega mähise täitetegur vastavalt mähise täiteteguri arvutamise valemile on  $k_t = 0,6$ .

Vineerist staatori mähiste täitetegurit kahandab väike raadius magnetsüdamikuga põhjas, raadiuse tõttu ei sobitu mähis täpselt uurde põhja. Pleksist staatori mähiste puhul kahandab täitetegurit südamikute kinnitus, mida ei ole eelnevas arvutuses arvestatud.

Staatorite ja mähiste mõõtmed on toodud Lisas 1.

### 4.3 Generaatori geomeetrilised parameetrid

Käesolevas töös käsitletava generaatori ehitusel on kasutatud peale puidust faasi ainult 10 mm pleksiklaasi. Pleksiklaasist osad on välja freesitud. Kuna detailid freesiti ühes tasapinnas, siis külgedele puuriti augud puurpingis. Kõik vajalikud avad keerdestati käsitsi keermelõikuriga – M4, M5 ja M8 (vt Lisa 4). Generaatori mudeli mõõtmed on toodud alljärgnevas tabelis 4.3 ning seel 3.0.

Tabel 4.3. Generaatori peamised geomeetrilised parameetrid

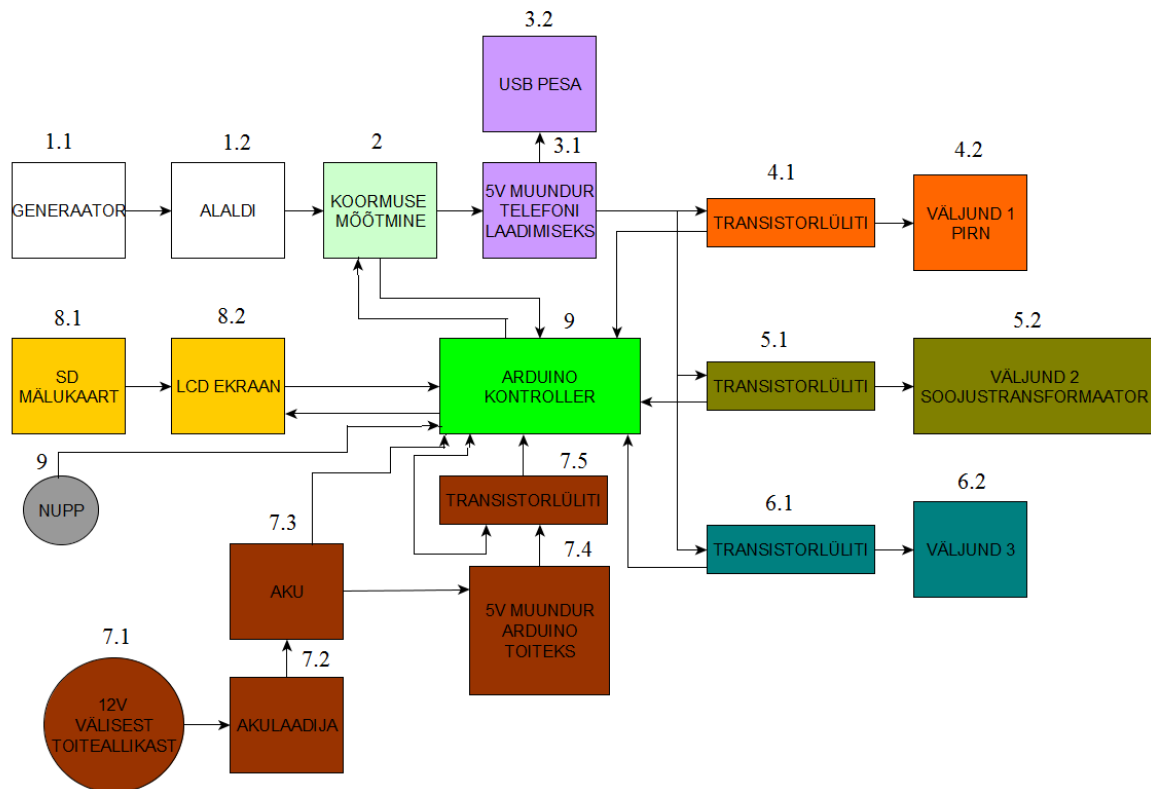
Nimetus	Mõõtmed
Kõrgus	271 mm
Laius	308 mm
Pikkus ilma võllita	352 mm
Võlli pikkus	490 mm
Võlli paksus	25 mm
Põjaplaadi laius	528 mm



## 5. ELEKTROONIKA

### 5.1 Generaatori kasutusvõimalused ja koormamine

Demogeneraatori eesmärk on visuaalselt atraktiivselt anda edasi energiatootmise mõiste tunnetus, milleks siin on rakendatud näiteks mobiiliaku laadimine. Selleks, et teostada nimetatud funktsioon, on vaja mitmekülgse funktsionaalsusega elektroonikaseadmestikku (vaata sele 3.1). Elektroonikaseadmestiku juhtimiseks on valitud Arduino Uno kontrolleri seetõttu, et Uno on mõõtetelt piisavalt väike, kuid omab piisaval hulgal digitaal sisendeid ja väljundeid ning samuti piisaval hulgal analoogsisendeid.



Sele 3.1. Elektroonikaseadmestiku skeem, värvidega on tähistatud erinevate funktsioonide seotud seadmed.

Järgnevalt vaadeldakse seel 3.1 toodud elektroonikaseadmestiku eraldi jaotatuna alapunktideks, selgitamaks skeemi komponentide funktsioone.

1.1 – Generaatori mähistelt siseneb süsteemi koormusvool ning –pinge.

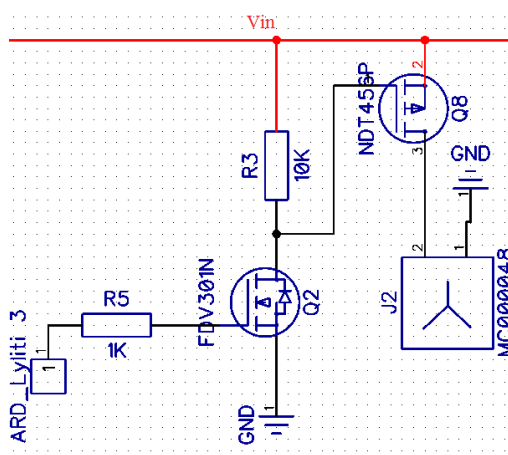
1.2 – Generaatori mähiste otstelt juhitakse vool läbi alaldi, et muundada vahelduvvool ülejäänud elektroonikaseadmestiku jaoks sobivaks alalisvooluks. Induktsiooni vähendamiseks ning toitepinge silumiseks on alalditest väljuv vool juhitud 470  $\mu\text{F}$  kondensaatorile otstele.

2 - Generaatorilt tulev koormusvool ja –pinge mõõdetakse spetsiaalse kiibi poolt (INA220) 0,01  $\Omega$  šunttakisti otstelt, mis on ühendatud toiteliiniga. Kiibi sisenditel on 10  $\Omega$  filtertakistid ning 1  $\mu\text{F}$  siluv kondensaator. Kiip on ühenduses Arduino I/O-dega läbi andme- ja taktiliini, mille nimetused on vastavalt SDA ja SCL. Sellist kahe juhtme andmevahetust nimetatakse I<sup>2</sup>C, mida vaadeldakse täpsemalt 7. peatükis. Kiibile antakse sisendpinge 5 V Arduino toiteliini kaudu, seega koormuspinge ja –voolu mõõtmine toimub ainult siis, kui Arduino on sisse lülitatud.

3.1 - 5 V muundur telefoni aku laadimiseks saab toite generaatorilt tulevalt voolult. Muundur on vajalik laadimisparameetrite kohandamiseks - 1 A, 5V. Selleks on valitud step-down tüüpi muundur, mis annab USB pesa pideva 5. voldise pinge 0,4 ampri juures. Regulaator töötab nimetatud väljundparameetrite puhul minimaalselt 12. voldi pealt. Kuna regulaator saab toite otse toiteliinilt on induktsiooni vähendamiseks ning pinge stabiliseerimiseks ühendatud toiteliini ning muunduri sisendi vahele 10  $\mu\text{F}$  kondensaator. Regulaatori üks klemm on ühendatud LED indikaatortulukesega, mille süttimine annab kasutajale märku laadimisvalmidusest.

3.2 - 5 V muundurist läheb vool USB pesasse, mille kaudu on võimalik laadida kõiki telefone USB kaabli kaudu.

4.1, 5.1, 6.1 - Generaatorilt tulev vool juhitakse transistorile ning iga transistor on ühenduses ühe Arduino digitaalväljundiga, kui Arduino tõstab väljundbiti kõrgele lülitub transistor ning vool juhitakse väljunditesse (vt sele 3.2). Arduino tõstab väljundbiti kõrgele juhul, kui programmis arvatatud hetkeline generaatori võimsus on piisavalt suur juhtimaks toitevoolu väljundisse.



Sele 3.2. Transistorlüli elektroonikaskeem.

4.2, 5.2, 6.2 - Väljundid, kuhu ühendatakse näiteks LED valgusti, soojustransformaator või hoopis muu funktsiooniga alalisvooluseade.

7.1 – 12 V toiteallikas akude laadimiseks. Selleks võib kasutada näiteks sülearvuti laadijat.

7.2 – 12 V toide juhitakse laadimiskiibile, mis reguleerib akude laadimisprotsessi. Akusid laetakse kiibilt antava laadimisvoolu 2 A korral 8,3 V. Kiip on tüübilt step-down regulaator, mis töötab sarnaselt pingejagurile. Akude ülekuumenemise vältimiseks on akude juurde paigutatud termistor, mis edastab NTC andmeliini kaudu kiibile termistori läbivat pinget. Pinge väärtusega annab termistor edasi akude temperatuuri, vastavalt temperatuurile kas laetakse akusid või mitte. Selleks on laadimiskiibil spetsiaalsed klemmid, kuhu ühendatakse 2 LED indikaatorit, 1 punane ja 1 roheline. Punane LED sümboliseerib aku laadimisel tekkinud viga, rohelise LED-i süttimisel antakse märguanne, et akusid laetakse.

7.3 – Aku on ühendatud Arduinoga analoogliini kaudu, et anda edasi väärtust akude laetusest. Akudelt antakse toide 5 V muundurile. Aku eesmärgiks on tagada pideva 5. voldine toide Arduino ning LCD ekraani töös hoidmiseks.

7.4 – 5 V muundur on Arduino toiteallikaks.

7.5 – Transistorlülitit kasutatakse süsteemi osade, mis ei saa toidet generaatori mähistelt, sisselülituse haldamiseks. Nupule 9 vajutades juhitakse aku pinge läbi pingejaguri, pingejagurilt Arduino analoogsisendisse väärtus, mida võrreldakse aku minimaalse lubatud pingega. Kui pinge akul on suurem kui minimaalne seadistatud väärtus tehakse transistoril lülitus Arduino digitaalväljunisse signaali andmisega. Näiteks, kui minimaalseks sisselülituseks vajalik aku pinge peab olema 5 volti, siis pingejagurilt tulev pinge väärtus peab olema:

$$U_v = U_s * \frac{R_1}{(R_1 + R_2)} [V], \quad (5.1)$$

Kus  $U_v$  – väljundpinge,  $U_s$  – sisendpinge, takistid  $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$  ja  $R_2 = 20 \text{ k}\Omega$ .

Sisendpinge 5 voldi korral ning eelnevalt kirjeldatud takistite väärtuste kohaselt jõuab Arduino analoogsisendile väärtus 3,3 V. Selline funktsioon on akude pika eluea säilitamiseks vajalik.

8.1 – SD kaart sisaldab ekraanile kuvatavaid pilte, menüüsid ning ekraanile kuvatavaid puuetundlikusele reageerivaid alasid ehk nuppe.

8.2 – LCD ekraan on ühendatud TX ning RX andmeliinidega. Puudutuse tegemisel ekraanil antakse vastav info Arduinole ning Arduino viib läbi enda operatsiooni – antakse signaal ekraanile pildi vahetamiseks või uue menüü kuvamiseks. LCD ja Arduino vahelist suhtlust vaadeldakse täpsemalt peatükis 6.

9 – Sisselülitusnupp, aktiveerides juhitakse akudelt vool Arduino analoogsisendisse ning piisava aku pinge korral tagatakse skeemi komponentidele toide

Elektronika skeemid on toodud Lisades 5 ja 8.



## 5.2 Trükkplaat

Trükkplaat on projekteeritud programmis nimega Diptrace. Trükkplaadina on kasutatud kahepoolse vaskkattega mittejuhtivast materjalist plaati, milleks on antud juhul klaasfiiber. Trükkplaadi rajad on välja freesitud spetsiaalse prototüüpide valmistamiseks loodud CNC pingiga – LPKF S63, mille eripäraks on automaatne tööriistavahetus ning vaakumiga töölaud.

Trükkplaadi projekteerimisel on kasutatud võimalikult palju SMD ehk pindmontaažikomponente just selleks, et kasutada ära trükkplaadi mõlemad pooli ja saada väiksemate mõõtmetega plaat. Enamus plaadil olevatest kondensaatoritest ning takistitest vastavad standardile 0805 .

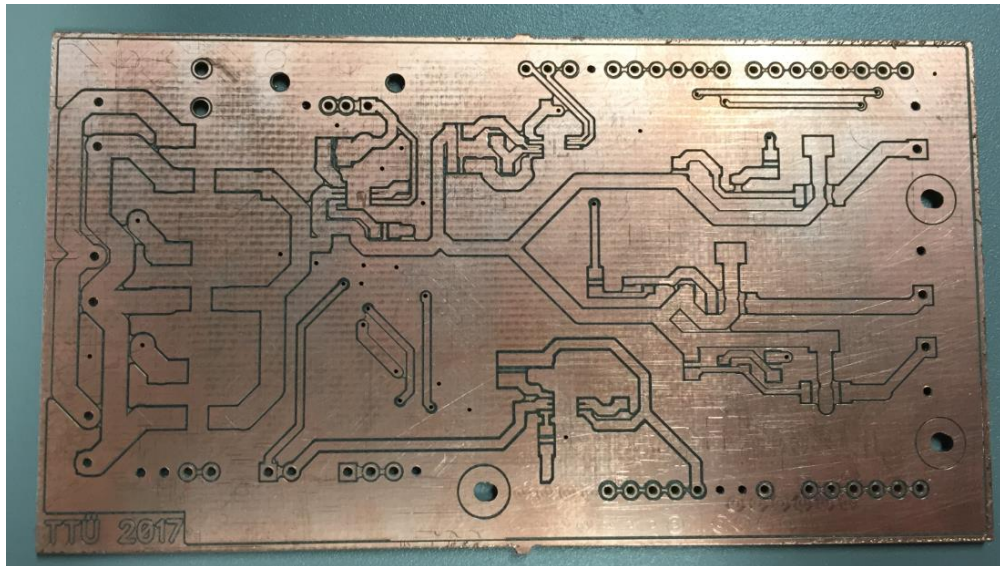
Ühel pool trükkplaati on kõik komponendid, mis kuuluvad akude laadimisfunktsiooni juurde - kaks LED tulukest, LCD ekraani pistik, Arduino sisselülituspult, akude pistik, laadimispiistik ning kõik vajalikud komponendid (vt Lisa 7).

Trükkplaadi teisel poolel paiknevad faasiliinide sissetulekud, alaldid, transistorlülitused, USB laadimispesa, koormusvoolu ja –pinge mõõtmine ja kõik loetletud funktsioonidega kaasnevad komponendid. Lisaks kinnitub Arduino Uno otse plaadile (vt Lisa 6)

Trükkplaati projekteerides on silmas peetud järgmisi asjaolusid:

1. Ühte funktsiooni täitvad komponendid on üksteisele lähedal, mille tulemusel on radade pikkused minimaalsed;
2. Sisendid ja väljundid on selgelt eraldatud;
3. Radade laiused on määratud vastavalt rada läbivale voolutugevusele.

Trükkplaadi mõõtmed on: pikkus 106 mm, laius 58 mm ning paksus 1,5 mm. Vasekihi paksus mõlemal plaadi poolel on 18 µm. Plaadil on kokku 75 komponenti, 32 läbiviiku ühelt plaadi poolelt teisele ning 3 ava trükkplaadi ja Arduino Uno omavaheliseks kinnitamiseks. Trükkplaadi pool kuhu ühenduvad generaatori mähise otsad on toodud seel 3.3.



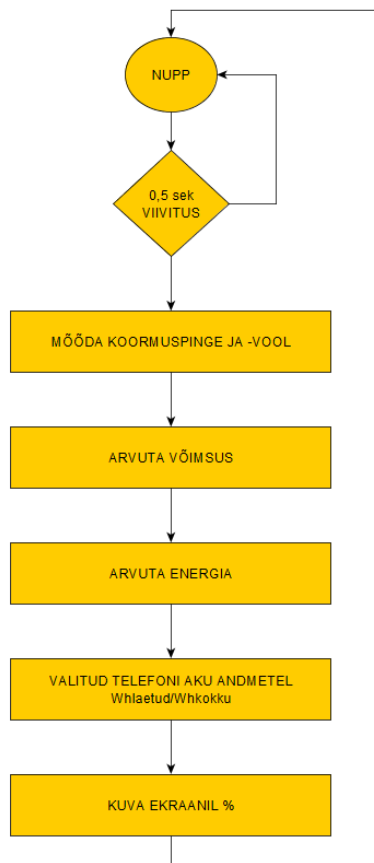
Sele 3.3. Välja freesitud trükkplaat.

## 6. LCD KASUTAJALIIDES

Generaatori küljele kinnitatakse 7. tolline Nextion poolt valmistatud LCD ekraan. LCD ekraan on puuetundlik, resolutsiooniga 800 x 480, omab mikro-SD mälukaardi pesa ning ekraani heledust on võimalik korrigeerida. Voolu tarbib 5. voldil 510 mA.

Ekraan on ühenduses trükkplaadile kinnitatud Arduinoga kahe digitaalliini kaudu – TX, RX. TX on andmeedastusliin ning RX andmete vastuvõtuliin. Ekraanil on SD kaardi pesa, mis toetab kuni 32 GB mälukaarti. Arvuti abil kujundatakse programmis Nextion Editor ekraanile menüüd, taustpildid, nuppude ikoonid ja asukohad jne. Kõik info salvestatakse SD mälukaardile, mis pannakse ekraani tagaküljel asuvasse mälukaardi pesa. Arduino ja ekraan vahetavad omavahel infot, vastavalt puuetundlikul ekraanil tehtud puudustele antakse Arduinole signaal, mille korral Arduino vastab ekraanile kindla signaaliga, mille tulemusel avaneb rippmenüü, vahetub ekraanile kuvatav pilt või andmed. Koormusvoolu ja –pinget loeb Arduino selleks ettenähtud peatükis 5.2 kirjeldatud kiibilt.

Kasutajaliides toimib vastavalt alljärgneval seel 3.4 olevale algoritmile:



Sele 3.4. Kasutajaliidese algoritm.

Algoritm näeb ette järgnevaid toiminguid:

Kasutaja vajutab trükkplaadile ühendatud nuppu, kui Arduino sisse lülitab hakkab Arduino iga poole sekundi tagant lugema andmeid koormuspinge ja –voolu kohta mõõtvast kiibilt. Koormuspinge ja koormusvoolu alusel arvutab Arduino võimsuse ning selle kaudu leiab tehtud töö ehk energia hulga. LCD ekraanile kuvatakse rippmenüü, kus on enam levinud telefonitootjate nimistu, valides sealt endale kuuluva telefoni tootja kuvatakse ekraanile järgmine menüü kust peab kasutaja valima tootjapoolse mudeli. Valides mudeli, laekub Arduinole info valitud telefoni mudeli kohta ning eelnevalt sisestatud andmebaasist otsitakse vastava telefoni aku parameetrid ning iga poole sekundi võrreldakse mitu protsenti aku koguenergiast on tehtud tööga täidetud ning kuvatakse ekraanile protsentuaalselt vastavalt valemile:

$$x = \frac{Wh_{laetud}}{Wh_{kokku}} * 100 [\%]. \quad (6.1)$$

## 7. ARDUINO JUHTPROGRAMM

Arduino juhib trükkplaadil paiknevat elektroonikat vastavalt programmile – annab signaale transistorlülituste tegemiseks, võtab vastu andmeid, võrdleb ning edastab infot.

Trükkplaadil asuv nupp on süsteemi sisselülitamiseks. Nuppu all hoides võrdleb Arduino analoogsisendi kaudu saadavat pingejaguri väärtust akude laetuse kohta programmi sisestatud minimaalse väärtusega. Vastavalt peatükis 5.1 leitud minimaalsele väärtusele teisandatakse see digitaalväärtuseks, sest lülitus transistorile antakse digitaalsignaalina. Juhul kui pingejagurilt tulev väärtus on suurem programmis defineeritud minimaalsest väärtusest lülitub Arduino sisse ning sellega kaasneb ka toite andmine LCD ekraanile ning mõõtekiibile. Arduino sisselülituseelne aku laetuse kontroll programmeeritud koodina on kujutatud seel 3.5.

```
int batteryVoltage = A1; // sisend aku pinge väärtuse jaoks
int outPin = 3; // digitaalväljund toite sisselülitamiseks
int batteryValue = 0; // muutuja aku pinge väärtuse jaoks
int batteryValueMin = 682; // aku pinge minimaalne digitaalväärtus

void setup() {
  pinMode(outPin, OUTPUT); //deklareeritakse outPin väljundiks
  batteryValue = analogRead(batteryVoltage); // loetakse aku pinge digitaalväärtust ja defineeritakse muutujaks
  if(batteryValue >= batteryValueMin) // võrdlus, kas aku pinge väärtus suurem võrdne minimaalväärtusega
  {
    digitalWrite(outPin, HIGH); // võrdlus vastab tõele, siis väljundbitt kõrgeks
  }
  else // kui võrdlus ei vasta tõele
  {
    digitalWrite(outPin, LOW); // väljundbitt jääb maha
  }
}
```

Sele 3.5. Arduino programm süsteemi sisselülituseks.

Arduino kasutab koormusvoolu ja –pinget mõõtvat kiibiga suhtlemiseks kahe juhtme liidest, mida tuntakse lühendina I<sup>2</sup>C, mis on akronüüm inglisekeelsele mõistele *Inter-Integrated Circuit*.

Kahe juhtme liides kujutab endast kahte liini – SDA, SCL. SDA on kahesuunaline andmeliin ning SCL on taktiliin. Kahe juhtme liides võimaldab andmevahetust paljude seadmete vahel. Iga seade, mis on siiniga ühendatud omab kindlat 7- või 10-bitist aadressi. Seadmete arv siinil on määratud aadressruumist ehk bittide arvust.

I<sup>2</sup>C protokollil kohaselt jagunevad siinil olevad seadmed ülemateks ja alamateks, selle kohaselt on võimalikud järgmised neli operatsiooni:

- Ülem saadab andmeid;
- Alam võtab vastu andmeid;
- Alam saadab andmeid;
- Ülem võtab vastu andmeid

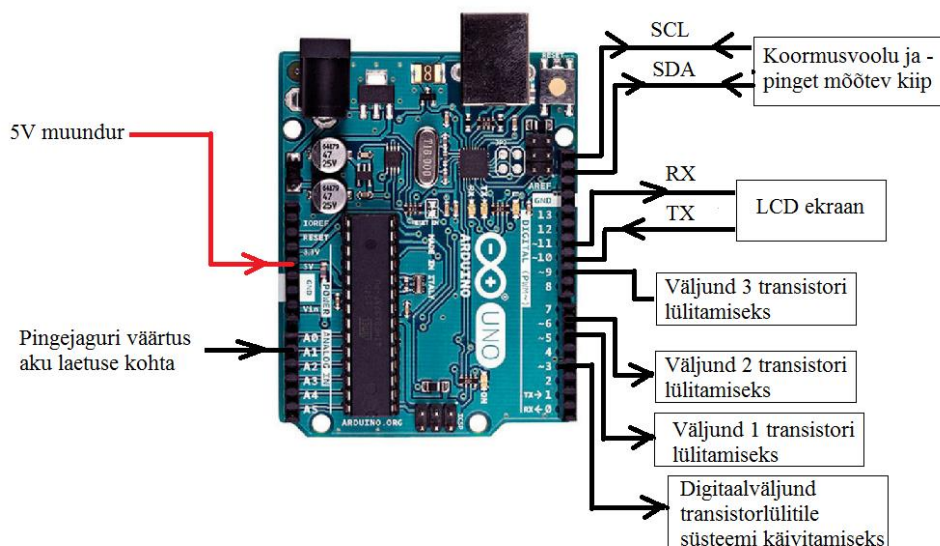
Vajaliku funktsiooni täitmiseks on ülemaks Arduino, mis võtab andmeid vastu ning mõõtev kiip alamaks, mis saadab andmeid välja. Suhtlus kahe seadme vahel on järgnev:

Arduino pöörduv kiibi poole saates välja start biti, sellele järgneb antud juhul 7-bitine alammoduli aadress ning lugemise bitt. Juhul, kui Arduino pöörduv õige aadressiga alama poole, vastab alam hoides SDA liini maas. Seejärel pöörduv Arduino alama poole registri aadressiga, alam annab uuesti märku, kas info saadi kätte ning saadab Arduinole soovitud andmed. Arduino vastab omapoolse signaaliga kinnitamaks kas andmed saadi kätte ning saadab alamale stop biti.

Pärast Arduinole info laekumist, edastatakse see digitaalliini kaudu LCD ekraanile. Transistorlülitid, mille funktsioon on suunata generaatorilt tulevat voolu, viiakse läbi Arduino programmis *if* lausetega. Arduinole laekub pidevalt generaatorilt tuleva võimsuse väärtus ning seda võrreldakse määratud minimaalsete väärtustega kolmel juhul. Kui toodetav võimsus ületab minimaalset väärtust tehakse lülitus ning lubatakse vool väljundisse, kui toodetav võimsus ei ületa etteantud parameetrit, siis lülitust ei toimu.

## 7.1 Arduino ühendusskeem elektroonikaseadmestikuga

Elektroonikaseadmestiku juhtimiseks kasutatakse Arduino Uno kontrolleri. Uno omab kokku 14. digitaalsisendit/ -väljundit ning 6. analoogsisendit. Peatükis 5.1 toodud elektroonikaseadmestiku juhtimiseks on vaja kasutada kokku 8. digitaalliini ning 1. analoogsisendit. Lihtsustatud skeem Arduino ühendamiseks on toodud selal 3.6, kus paremal pool on digitaalliinid, vasakul analoogsisend ning 5 V toitesisendisse ühendatakse 5. voldi muundur.



Sele 3.5. Arduino ühendusskeem elektroonikaseadmestikuga.

## 8. TOROIDMÄHISTEGA GENERAATORI KATSETAMINE, JÄRELDUSED

Käesolevas töös käsitletava generaatori projekteerimisele ning ehitamisel kulus rohkem aega kui eeldati. Sellega seoses, jõuti katsetada generaatori tööd planeeritud kolme faasi asemel ühe faasiga. Vineerist staatorite modifikatsioonid ning vineerist rootori fikseerimine võllil võimaldasid viia läbi katsetuse, kas generaator töötab kujundatud konstruktsiooni puhul, kas tehtud rootori ja staatorite täiendused toimivad ning millised on sel juhul generaatori väljundparameetrid.

Rootori pooluskingade ning staatori südameke vahelise õhupilu suuruseks oli katsetamisel 3 mm. Koormust generaatorile ei rakendatud. Mõõdeti generaatori mähistes indutseeruvat elektromotoorjõudu, ehk mähiste otstel olevat pinget. Vineerist staatori mähis koosneb kolmest osast. Mähise kolm osa ühendatakse omavahel jadamisi, et saada ühe mähise komplekti otstel suurem pinge. Samuti ühendatakse teine mähis ning mähised ühendatakse omavahel veelkord jadamisi.

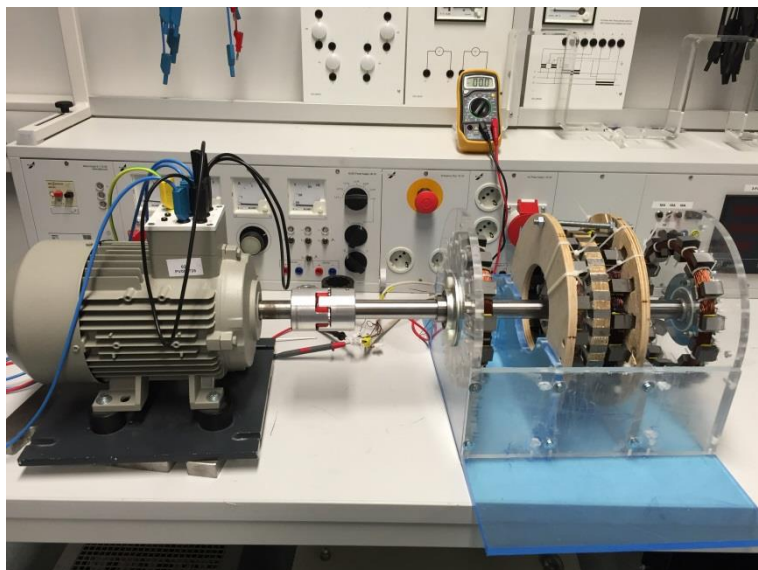
Generaatori tühijooksu katsel ühendati generaatori võll ajamiga, milleks kasutati asünkroonmootorit (vt sele 3.6). Mootorit pingestati läbi sagedusmuunduri, et sujuvamalt mootori pöördeid tõsta. Kuna mootori ja generaatori ühendamine oli raskendatud ajami kõrguse erinevuse ning võllide erinevate jämeduste tõttu ei peetud otstarbekaks minna üle 30 Hz sagedusest. 30 Hz mootori toitesagedusel saadi generaatori vineerist faasi otstele 13,2 V.

Arvutuslikult leiti peatükis 3 maksimaalsed elektromotoorjõu väärtused nii vineerist faasile Neoremi magnetitega kui ka pleksiklaasist faasile N52 püsिमagnetitega. Tulemuseks saadi vastavalt 33 V ja 30 V 30 Hz sagedusel.

Võrreldes arvutuslikku väärtust (30 V) katse tulemusega (13,2 V) on vahe enam kui kahekordne. Einevus arvutusliku ning katse tulemusel saadud väärtuse vahel tuleneb õhupilu magnetvoo tiheduse arvutuslikul leidmisel, milles ei ole arvestatud puisteväljade teket. Puisteväljad tekivad tihedalt paigutatud magnetsüdameke vahel, selle vähendamiseks tuleks staatoril asuvate magnetsüdameke vahesid suurendada.

Kuna käesolevas töös tehti katsed 30 Hz sagedusel ning 3 mm õhupilu korral, siis ei ole võimalik tulemusi otseselt võrrelda Ants Kallaste magistritöö katse tulemustega. Kallaste magistritöö arvutuslike ja katsete tulemustel on märkimisväärne see, et õhupilu puudumise korral oleks elektromotoorjõu maksimaalne väärtus mähiste jadaühenduse korral 50 Hz juures 160 V ühe vineerist faasi korral, 1 mm õhupilu korral langeb elektromotoorjõu väärtus 59% ning 2 mm õhupilu korras on võimalik kätte saada vaid 26% ehk ligikaudu 40 V. Võib väita, et õhupilu kasvades

toodab generaator vähem energiat ning käesolevas töös tehtud katse 3 mm õhupilu korral näitab, et õhupilu suurendamisel ei annaks generaator praktiliselt mitte mingit pinget välja.



Sele 3.4. Generaatori vineerist faasi katsetus tühijooksul.



## KOKKUVÕTE

Käesoleva generaatori edasiarenduse eesmärgid said osaliselt täidetud. Generaatori atraktiivsus ning huvipakkumus saavutati pleksiklaasist konstruktsiooniga, mis tagab generaatori konstruktsioonile ka piisava tugevuse. Käesolevas töös ei jõutud aja puuduse tõttu generaatori ehitamisel nii kaugemale, et tegemist oleks tervikliku kolmefaasilise generaatoriga.

Edasiarenduse käigus täiendati vineerist rootori kinnitust võllile, selleks kasutati pleksist kinnitusflantse. Uue konstruktsiooni puhul valmistati puidust staatoritele pleksiklaasist kinnitusplaadid, millega kinnituvad staatorid generaatori külgsseitele ning põhjaplaadile, mis on valmistatud samuti pleksiklaasist. Lisaks on kasutatud pleksist rootoritel uusi püsिमagneteid, mis on suurema jääkvootihedusega kui puidust rootoril, selle tulemusel peaks indutseeruma suurem elektromotoorjõu väärtus mähisel sama keerdude arvu juures. Pleksiklaasist staatoritel kasutati liimivaba südamekinnitamist staatori kerele, mille puhul võib kindel olla, et südamekinnitust staatori küljest vabaneda ei saa.

Generaatori puidust faasi testiti asünkroonmootoriga rootori võlli ringi ajades, maksimaalne pöörlemiskiirus küündis katsetamisel 800 p/min andes välja 13,2 V ning seda pikaajaliselt. Sellest võib järeldada, et generaator on piisavalt töökindel ja vastupidav, ning rootori kinnitusviis on sobilik ka pleksiklaasist rootorile. Katse tulemus näitab, et valemid elektromotoorjõu leidmiseks generaatori mähisel ei ole piisavalt täpsed.

Generaatorile mõeldi välja koormamine ning kasutusfunktsioonid. Generaatori poolt toodetav energia kasutatakse ära telefoni aku laadimiseks või näiteks LED valgustite toiteks. Lisaks on kujundatud ka kasutajaliidese algoritm, mille kohaselt saab kasutaja generaatori küljel paikneval puutetundlikul ekraanil valida laetava telefoni mudeli ning vastavalt toodetud energiale kuvatakse Arduino vahendusel ekraanile mitu protsenti akusse mahtuvast energiast on kasutaja tootnud generaatorit ringi ajades.

Käesolevas töös ei jõutud töö esitamistähajaks nii kaugemale kui plaaniti, seega tuleb edasiarendust jätkata. Kahe puuduoleva staatori kättesaamisel on võimalik generaatori kolm faasi tööle saada. Tühijooksu katse tulemusel saadi teada elektromotoorjõu väärtus 3 mm õhupilu korral ning sellest tulenevalt peab õhupilu suurust vähendama, kuna käsiajamiga generaatori pöörded on katsega võrreldes palju madalamad. Kasutajaliides tuleb lõpuni valmis teha, mis seisab trükkplaadi jootmise taga. Ohutuse tagamiseks generaatori kasutajale tuleb muretseda 3 mm pleksiklaasist leht, millest painutada generaatorile kaas.

## SUMMARY

The objectives of the present development were partially filled. The attractiveness of the generator was achieved by using plexiglass as construction material which also provides sufficient strength for the generator. Due to lack of time, the scheduled scope of work could not be reached, therefore the undivided three phase generator was not completed.

During the development, fastening of the plywood rotor was complemented using plexiglass flanges. According to new generator construction plywood stators got plexiglass mounting plates, which are fastened to the generator side and base plates. Furthermore, plexiglass rotors have more powerful permanent magnets which result in a higher value of electromotive force induced in stators coils with the same number of windings. Split tape cores were fixed without adhesive to plexi stators body.

The modified wooden phase of the generator was tested by using asynchronous motor which attained up to 800 rotates per minute. The motor was supplied through frequency converter to avoid sharp changes in rotational speed. Generator gave out 13,2 V idling at 800 rpm. It can be concluded that the generator is sufficiently robust and durable. The rotor mounting method is also suitable. Test results show that the formulas for finding induced electromotive force are not sufficiently precise.

Load and application functions were conceived. The energy produced by generator is used to charge mobile phone battery or, for example, to power LED lights. In addition, algorithm for the user interface was designed, whereby the user can choose model phone model from the touch screen which locates on the side of the generator. According to the quantity of produced energy, Arduino displays the ratio between phones battery capacity and produced energy in percents to the screen.

The thesis was not reached as far as planned before the submission deadline, so the development goes on afterwards. As a result of the generator test it is clear how great electromotive force is induced according to 3 mm air cap. Consequently the size of the air gap must be reduced, because comparing the test parameters to manually driven generator working speeds, there would not induce any considerable electromotive force. For last but not least, to provide safety for the users a 3 mm thick plexi sheet must be fastened on top of the plexi stators to cover up moving parts.

## Kasutatud kirjandus

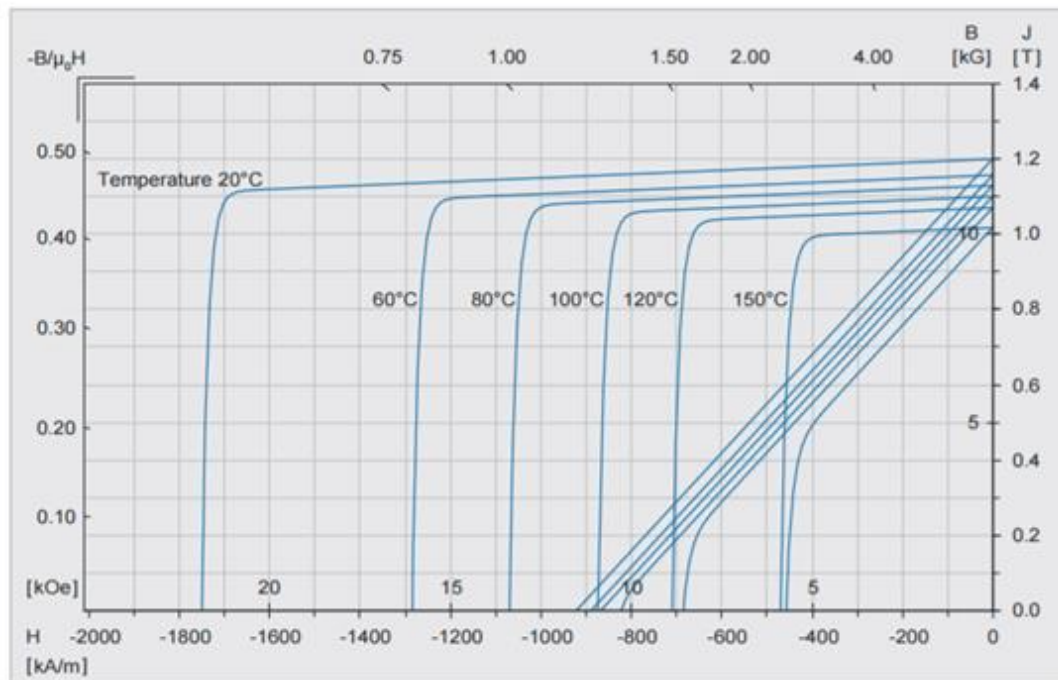
1. Michael Faraday. [WWW] [https://et.wikipedia.org/wiki/Michael\\_Faraday](https://et.wikipedia.org/wiki/Michael_Faraday) (02.05.2017)
2. Homopolaarne generaator. [WWW] [https://en.wikipedia.org/wiki/Homopolar\\_generator](https://en.wikipedia.org/wiki/Homopolar_generator) (02.05.2017)
3. Energiatehnika. [WWW]  
<http://www.ene.ttu.ee/elektriamid/oppeinfo/materjal/AAV3300/Energiatehnika2-4.pdf> (03.05.2017)
4. Kuno, J. Elektrimasinad. Loengukonspekt. [WWW]  
<http://petz.planet.ee/elekter/sissejuhatus.pdf> (04.05.2017)
5. Faraday induksiooniseadus [WWW] <https://www.taskutark.ee/m/faraday-induksiooniseadus/> (05.05.2017)
6. Elektromagnetism. [WWW] [http://opik.fyysika.ee/index.php/book/section/1461\\_](http://opik.fyysika.ee/index.php/book/section/1461_) (05.05.2017)
7. Magnetism. [WWW]  
[http://www.teaduskool.ut.ee/sites/default/files/teaduskool/oppetoo/fys\\_magnetism.pdf](http://www.teaduskool.ut.ee/sites/default/files/teaduskool/oppetoo/fys_magnetism.pdf) (06.05.2017)
8. Kallaste, A. Aksiaalvooga püsimagnetitega toroidmähisega generaator; magistritöö, Tallinna Tehnikaülikool, 2006.
9. Püsimagnetid. [WWW] <http://opik.fyysika.ee/index.php/book/section/8028> (03.05.2017)
10. Magnetid. [WWW] [https://et.wikipedia.org/wiki/Magnet\\_](https://et.wikipedia.org/wiki/Magnet_) (04.05.2017)
11. Järvik, J. Üldelektrotehnika. Tallinn : Tallinna Tehnikaülikool, 2014.
12. Neodüüm- ja samaariummagnetite võrdlus. [WWW]  
<https://www.jobmastermagnets.com/The-Difference-Between-Neodymium-Samarium-Cobalt-Ceramic> (09.05.2017)
13. Magnetmaterjalide võrdlus. [WWW] <http://www.first4magnets.com/tech-centre-i61/information-and-articles-i70/a-comparison-of-magnetic-materials-at-a-glance-i79> (09.05.2017)
14. Neodüümmagnetite klassid. [WWW]  
[http://e-magnetsuk.com/neodymium\\_magnets/neodymium\\_grades.aspx](http://e-magnetsuk.com/neodymium_magnets/neodymium_grades.aspx) (09.05.2017)
15. Neorem koduleht. [WWW] <http://neorem.fi/> (10.05.2017)
16. Induksioon. [WWW] [http://www.ene.ttu.ee/leonardo/elektro\\_alused/4Induksioon.pdf](http://www.ene.ttu.ee/leonardo/elektro_alused/4Induksioon.pdf) (10.05.2017)
17. Waasner veebikataloog. [WWW]  
[http://www.waasner.de/fileadmin/Assets/PDFs/Waasner\\_Katalog.pdf](http://www.waasner.de/fileadmin/Assets/PDFs/Waasner_Katalog.pdf) (08.05.2017)
18. Akrüülklaas. [WWW] <http://www.physic.ut.ee/materjalimaailm/Kirjed/Akruulklaas.html> (06.05.2017)
19. Waasner tootekataloog firma kodulehelt. [WWW] <http://www.waasner.de/> (04.05.2017)
20. Magnetite ajalugu. [WWW] <http://www.howmagnetnetwork.com/history.html> (04.05.2017)
21. Lorentz'i jõud. [WWW] <https://www.siyavula.com/science/grade-12/11-electrodynamics/11-electrodynamics-02.cnxmlplus> (02.05.2017)

22. Tallinna Tehnikaülikool. Mehaanikainseneri käsiraamat. Tallinn : Tallinna Tehnikaülikool, 2012.
23. Fleming'i parema käe reegel. [WWW] <https://www.electrical4u.com/fleming-left-hand-rule-and-fleming-right-hand-rule/> (20.05.2017)
24. Tööriistamarket veebikataloog. [WWW] <http://www.tooriistamarket.ee/> (23.05.2017)
25. Kallaste, A. Püsimagnetiga (PM) väljatöötamine; bakalaureusetöö, Tallinna Tehnikaülikool, 2004.

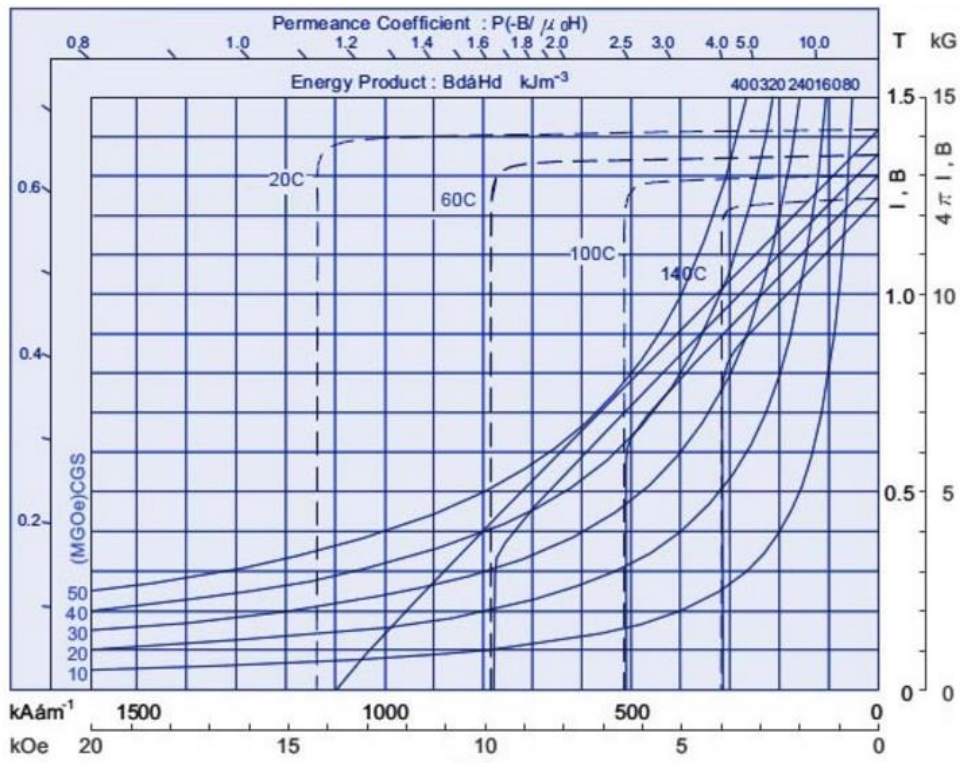
## LISA 1 Generaatori staatori ja mähiste mõõtmed

<b>Detaili nimetus</b>	<b>Väärtus</b>
Staatorite arv ühe faasi kohta	2
Sisemine raadius	76 mm
Välimine raadius	106 mm
<b>Magnetsüdamik</b>	
Südamike arv ühes faasis	2x15=30
Südamiku kõrgus	30 mm
Südamiku laius	16 mm
Südamiku pikkus	26 mm
Südamike samm	24°
Urde sügavus	16 mm
Urde laius	10 mm
<b>Vineerist staatori mähis</b>	
Mähiste arv faasi kohta	2
Mähise sisemine raadius	86 mm
Mähise välimine raadius	96 mm
Mähise keerude arv	180
Mähise traadi paksus	0,75 mm
Mähise täitetegur	50 %
<b>Pleksist staatori mähis</b>	
Mähiste arv faasi kohta	2
Mähise sisemine raadius	86 mm
Mähise välimine raadius	96 mm
Mähise traadi paksus	0,9 mm
Mähise keerude arv	150
Mähise täitetegur	60 %

## LISA 2 Püsimagneti Neorem 476a demagneetimisköver



# LISA 3 Püsimagneti N52 demagneetimisköver

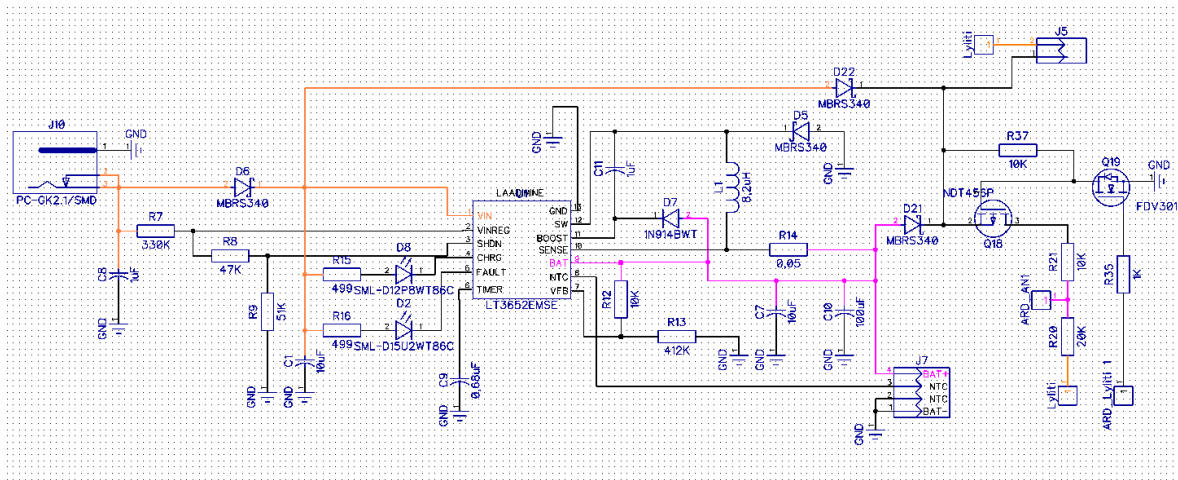


## LISA 4 Kinnituspoltide keermete mõõtmed millimeetrites

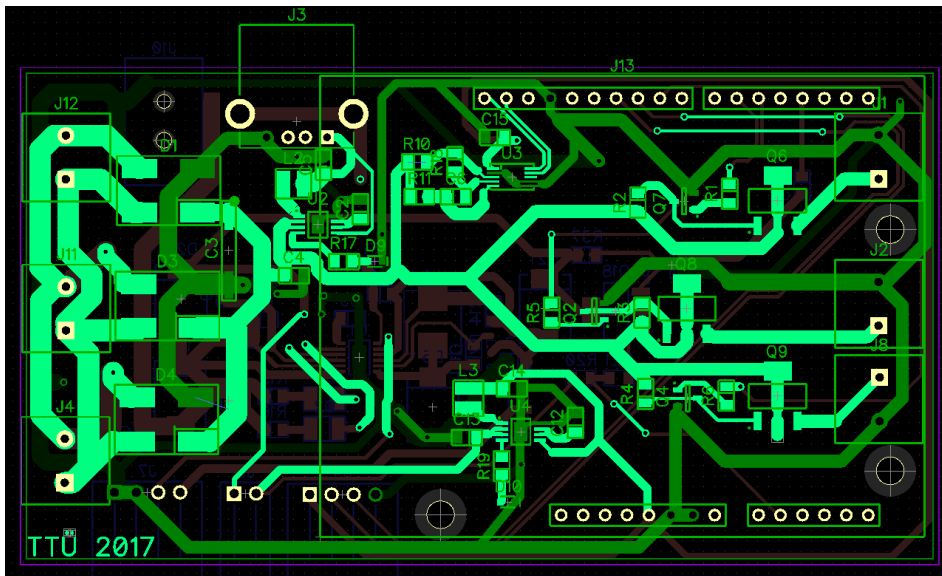
Keerme tähis $d=D$	Samm $P$	Väliskeerme Sügavus $h_3$	Sisekeerme Sügavus $H_1$	Keermeava puuri läbimõõt	Kuuskantpea võtmemõõt
M 4	0.7	0.43	0.38	3.3	7
M 5	0.8	0.49	0.43	4.2	8
M8	1.25	0.77	0.68	6.8	13



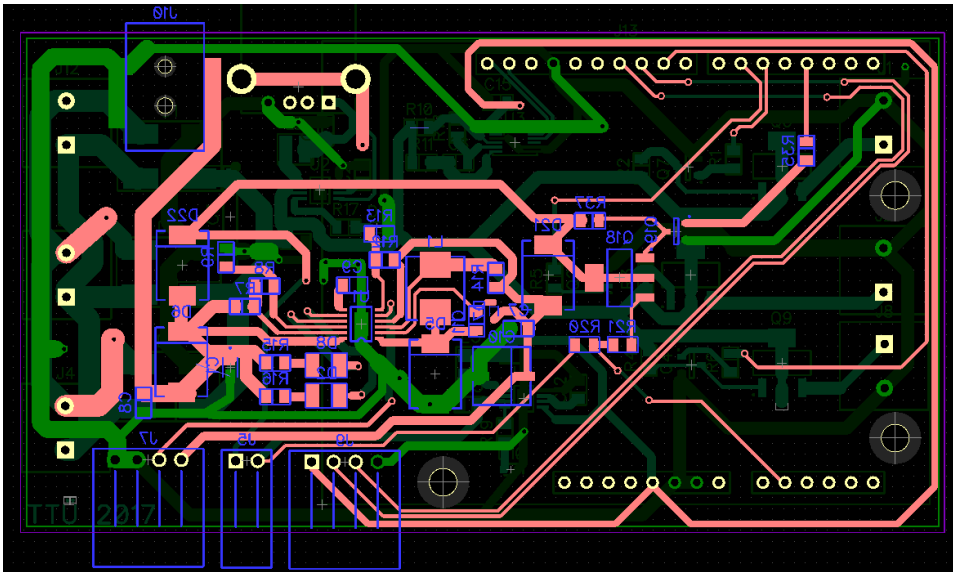
# LISA 5 Akude laadimisskeem



## LISA 6 Projekteeritud trükkplaadi üks pool



## LISA 7 Projekteeritud trükkplaadi teine pool



# LISA 8 Elektronika skeem

