



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

SÜNKROONGENERAATORI KADUDE
VÄHENDAMISE MEETODID
LOSS REDUCTION METHODS FOR SYNCHRONOUS
GENERATOR
MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Sergei Mihhailjuk

Üliõpilaskood 182954

Juhendaja: Ants Kallaste, professor

Tallinn 2021

(Tiitellehe pöördel)

AUTORI DEKLARATSIOON

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.

"....." 202.....

Autor:
/ allkiri /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

"....." 202.....

Juhendaja:
/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

".....".....202... .

Kaitsmiskomisjoni esimees
/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina Sergei Mihhailjuk

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose Sünkroongeneraatori kadude vähendamise meetodid, mille juhendaja on Ants Kallaste

1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

18.05.2021

¹ Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal vastavalt üliõpilase taotlusele lõputööle juurdepääsupiirangu kehtestamiseks, mis on allkirjastatud teaduskonna dekaani poolt, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil. Kui lõputöö on loonud üks või enam isikut oma ühise loomingu tegevusega ning lõputöö kaas- või ühisautor(id) ei ole andnud lõputööd kaitsvale üliõpilasele kindlaksmääratud tähtajaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.

LÕPUTÖÖ LÜHI KOKKUVÕTE

<i>Autor:</i> Sergei Mihhailjuk	<i>Lõputöö liik:</i> Magistritöö
<i>Töö pealkiri:</i> Sünkroongeneraatori kadude vähendamise meetodid	
<i>Kuupäev:</i> 18.05.2021	72 lk
<i>Ülikool:</i> Tallinna Tehnikaülikool	
<i>Teaduskond:</i> Inseneriteaduskond	
<i>Instituut:</i> Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut	
<i>Töö juhendaja:</i> professor Ants Kallaste	
<i>Töö konsultant:</i> Oleg Kudrjajtsev	
<i>Sisu kirjeldus:</i> <p>Käesolevas lõputöös tutvustatakse sünkroongeneraatori disaini optimeerimisvõimalused ja kadude vähendamise meetodid optimeerimistarkvara abil.</p> <p>Töös antakse ülevaade sünkroongeneraatori konstruktsioonist, tööpõhimõttest ja kadude liigitamisest. Teises peatükis kirjeldatakse laialt levinuid optimeerimis algoritme. Seejärel kirjeldatakse töös vaadeldud sünkroongeneraatori tehnilisi parameetreid ja nende mõju kogu disainile. Evolutsioonilise algoritmi abil toimub elektridisaini optimeerimine ja kuuendas peatükis teostatakse tulemuste analüüsi. Samuti, selles peatükis on toodud välja masina parameetrite muutuse mõju kasutegurile ning optimaalsete tulemuste mõju keskkonnale.</p>	
<i>Märksõnad:</i> sünkroongeneraator, elektrimasina disain, mitme eesmärgi optimeerimine, evolutsioonilised algoritmid	

ABSTRACT

<i>Author:</i> Sergei Mihhailjuk	<i>Type of the work:</i> Master Thesis
<i>Title:</i> Loss reduction methods for synchronous generator	
<i>Date:</i> 18.05.2021	18 pages
<i>University:</i> Tallinn University of Technology	
<i>School:</i> School of Engineering	
<i>Department:</i> Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics	
<i>Supervisor of the thesis:</i> professor Ants Kallaste	
<i>Consultant:</i> Oleg Kudrjajtsev	
<i>Abstract:</i> <p>In current thesis are presented optimization possibilities and loss reduction methods for synchronous generator using software for optimization problems.</p> <p>The work gives an overview of synchronous generator construction, working principles and types of losses. In the second chapter are described widely spread optimization algorithms. Thereafter technical parameters of synchronous generators are introduced along with their impact on machine design in general. Electrical design gets optimized using evolutionary algorithm and in the sixth chapter optimization results analysis is performed. Also, in this chapter is presented the impact of machine parameters change on efficiency and optimized results influence on environment.</p>	
<i>Keywords:</i> synchronous generator, design of electrical machine, multi-objective optimization, evolutionary algorithms	

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Lõputöö teema: Sünkroongeneraatori kadude vähendamise meetodid

Lõputöö teema inglise keeles: Loss reduction methods for synchronous generator

Üliõpilane: Sergei Mihhailjuk, 182954

Eriala: Energiamuundus- ja juhtimissüsteemid

Lõputöö liik: magistritöö

Lõputöö juhendaja: Ants Kallaste

Lõputöö kaasjuhendaja: Oleg Kurdjajtsev
(ettevõtte, amet ja kontakt) ABB AS, R&D tiimijuht,
oleg.kudrjajtsev@ee.abb.com

Lõputöö ülesande 30.06.2021

kehtivusaeg:

Lõputöö esitamise tähtaeg: 18.05.2021

Üliõpilane (allkiri)

Juhendaja (allkiri)

Õppekava juht (allkiri)

Kaasjuhendaja (allkiri)

1. Teema põhjendus

Antud teema on oluline kõigile, kes tegeleb sünkroongeneraatorite projekteerimise ning tootmisega. Kuna enamus elektrienergiast maailmas toodetakse generaatoritega, siis nende efektiivsuse tõstmine on väga tähtis samm energiasäästliku maailma loomiseks. Erinevate standardite nõuded lähevad samuti rangemaks energiatõhususe osas ning selleks, et täita vastavad nõuded tuleb pidevalt vähendada energiakadusid, mis esinevad elektrimasinates.

2. Töö eesmärk

Töö eesmärgiks on sünkroongeneraatori disaini optimeerimine vähendades kadusid ning selleläbi tõstes sünkroongeneraatorit efektiivsust.

3. Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

Kõigepealt tuleb koguda andmed vaadeldud sünkroongeneraatorite toimimise kohta ning teostada kogutud andmete analüüsi. Töö eesmärgi saavutamiseks on vaja leida või välja töötada meetodid sünkroongeneraatori toimetuse paranduseks. Seejärel tuleb teostada simulatsioone ning kalkulatsioone selleks, et leida optimaalsemat lahendust. Kõige lõpuks on vaja anda hinnangut disaini optimeerimis meetodile.

4. Lähteandmed

Püstitatud eesmärkide lahendamiseks hakkab kasutama ABB AS-i poolt antud generaatorite disainid.

5. Uurimismeetodid

Autor kavatseb lõputöö tulemusteni jõuda kasutades ABB sisemiseks kasutamiseks loodud kaasaegset simuleerimis tarkvara. Antud töö on olemas praktiline rakendus. Andmete analüüsiks kasutab autor arvutuste läbiviimiseks Excelit ning ABB sisemist tarkvara.

6. Graafiline osa

Graafiline osa on peamiselt töö põhiosas.

7. Töö struktuur

- Sisukord
- Teoreetiline osa (sh kadude ning optimeerimis meetodite analüüs)
- Sünkroongeneraatorite toimimise analüüs
- Simulatsioon
- Tulemuste analüüs
- Kokkuvõte (Kas tasub rakendada uut disaini/optimeerimis meetodit või mitte)
- Kasutatud kirjandus
- Lisad.

8. Kasutatud kirjanduse allikad

Antud töös kasutati raamatuid, teadusartikleid ning aruandeid.

9. Lõputöö konsultandid

Oleg Kudrjajtsev.

10. Töö etapid ja ajakava

1. Andmete kogumine, struktureerimine ning analüüs
 - a. Määrata uurimisobjekti
 - b. Kirjanduse läbitöötamine
 - c. Lähteandmete kogumine ja töötlemine
2. Teoreetilise osa kirjutamine (04.02.21)
 - a. Sünkroongeneraatori ülesehitus (kirjeldus) - Valmis
 - b. Kadude tüüpi kirjeldus - Valmis
 - c. Efektiivsuse arvutamise meetod - Valmis
 - d. Mitme eesmärgi optimeerimine – 04.02.21
3. Põhiosa kirjutamine (12.04.21)
 - a. Optimeerimise muutujate kirjeldus
 - b. Tulemuste analüüs
 - c. Disaini kasutuselevõtu potentsiaalse majandusliku kokkuhoiu hindamine
4. Kokkuvõtte kirjutamine ning vormistuse parandamine (30.04.20)
5. Ettevalmistus kaitsmiseks (maikuu)

SISUKORD

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE	4
ABSTRACT	5
LÕPUTÖÖ ÜLESANNE	6
EESSÕNA	11
Lühendite ja tähiste loetelu.....	12
SISSEJUHATUS	14
1. ELEKTRIMASINAD.....	16
1.1. Elektrimasinate liigitamine	16
1.2. Sünkroonmasinate konstruktsioon ja tööpõhimõte	17
1.3. Elektrimasina kaod.....	22
1.3.1. Vaseskaod	23
1.3.2. Rauaskaod.....	24
1.3.3. Mehaanilised kaod	25
2. OPTIMEERIMIS ALGORITMID.....	27
2.1. Domineerimine ja mitte domineeritud lahenduste kontseptsioon.....	28
2.2. Pareto optimaalsus	30
2.3. Evolutsioonilised algoritmid.....	31
2.4. Enim levinud algoritmid ja nende kirjeldus.....	33
2.4.1. NSGA-II (ingl k <i>Nondominated Sorting Genetic Algorithm II</i>)	33
2.4.2. SPEA2 (ingl. <i>Strength Pareto Evolutionary Algorithm 2</i>)	34
2.4.3. PAES (ingl. <i>Pareto Archived Evolution Strategy</i>).....	35
2.4.4. MOEA/D (ingl. <i>Multi-objective Evolutionary Algorithm based on Decomposition</i>)	35
2.4.5. PESA (ingl. <i>Pareto Envelope-based Selection Algorithm</i>)	35
3. SÜNKROONGENERAATORI TEHNILINE KIRJELDUS	37
3.1. Magnetahela aktiivosa pikkus	39
3.2. Staatorimähiste ja uurete disain	40
3.2.1. Voolu- ja magnetvoo tihedus.....	41
3.2.2. Paralleelharude arv staatorimähises.....	42
3.2.3. Uurete arv staatoris.....	43
3.2.4. Mähisesamm ja suhteline mähisesamm	44
3.2.5. Mähisetegur	45
3.2.6. Temperatuuritõus	46

3.3. T1 ja T2 sünkroongeneraatorite tehnilised parameetrid	47
4. OPTIMEERIMISTARKVARA	48
4.1. Optimeerimistarkvara kirjeldus.....	48
4.2. Eesmärgid, piirangud ja muutujad	49
4.3. Optimisaatori töörežiimid.....	50
4.4. Arvutusprofiil	51
4.5. Tulemuste analüüs.....	52
5. GENERAATORI OPTIMEERIMINE.....	54
6. TULEMUSTE ANALÜÜS	58
6.1. T1 masina optimeerimis tulemuste analüüs.....	58
6.2. T2 masina optimeerimis tulemuste analüüs.....	61
6.3. Optimaalsete tulemuste mõju keskkonnale	63
KOKKUVÕTE	66
SUMMARY.....	68
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	70

EESSÕNA

Antud magistritöö teema oli pakutud ABB AS poolt ja hiljem kooskõlastatud Tallinna Tehnikaülikooli elektroenergeetika ja mehhatroonika instituudi elektrimasinate uurimisrühmaga.

Autor soovib tänada lõputöö juhendajat Ants Kallastet ja lõputöö konsultanti Oleg Kudrjavitsevit juhendamise ja nõustamise eest käesoleva magistritöö kirjutamisel.

Lühendite ja tähiste loetelu

Kasutatud lühendid:

A – juhtme ristlõikepindala, mm^2

a – staatori paralleelharude arv faasi kohta

A_{Cu_St} – Staatorimähise vase efektiivne ristlõike pindala, mm^2

B_m – magnetvoo tiheduse amplituud, T

B – magnetvoo tihedus, Wb/m^2

β – suhteline mähisesamm

$Core_L$ – Magnetahela aktiivosa pikkus, mm

$Cond_Num$ – keerdude arv staatori uurdes

ΔCO_2 – CO_2 väljaheidete koguse muutus, t

$Eff100$ – kasutegur nimivõimsusel, %

f – toitesagedus, Hz

$f(x)$ – eesmärgi funktsioonide vektor

f_e – elektriline sagedus, Hz

H – magnetvälja tugevus, A/m

I – vool, A

J – voolutihedus, A/mm^2

J_St – Voolutihedus staatorimähises, A/mm^2

k – eesmärgi funktsioon (ingl. *objective function*)

k_{wv} – mähisetegur (ingl. *winding factor*)

k_d – jaotustegur (ingl. *distribution factor*)

k_{pw} – kallutustegur (ingl. *pitch factor*)

$Mass_Tot$ – kogu aktiivmaterjali kaal, kg

Mat_Cost_Tot – kogu aktiivmaterjali hind, €

m – faaside arv

μ – keskkonna magnetiline läbitavus, H/m

n – rootori pöörlemiskiirus, p/min

η – kasutegur, %

$\Delta\eta$ – kasuteguri muut võrreldes algväärtusega, %

η' – hüstereesi koefitsient, mis sõltub materjalist

p – pooluspaaride arv

$P_{väljund}$ – väljundvõimsus, W

P_{sisend} – sisendvõimsus, W

P_{kaod} – võimsuskao, mis esinevad generaatoris energia muundamisel, %

P_{Cur} – vaseskaod rootoris, W

P_{Cus} – vaseskaod staatoris, W

P_{Cu} – vaseskaod, W

P_h – hüstereesikaod, W
 P – lahenduste hulk
 P' – mitte domineeritud lahenduste hulk
 Q – uurete arv staatoris
 q – uurete arv pooluse ja faasi kohta
 R – takistus, Ω
 Rt_T – rootori keskmine temperatuuritõus, K
 S – lubatud väärtuste hulk (ingl. *feasible region*)
 $Slot_W$ – uurde laius
 $Slot_H$ – uurde kõrgus
 St_T – staatori keskmine temperatuuritõus, K
 τ_p – poolusejaotus
 V – hüstereesisilmuse ruumala, cm³
 x – muut vektor (ingl. *variable vector*)
 y – mähisesamm
 Z – uurete arv
 Z – lubatud väärtuste ala (ingl. *feasible objective region*)

SISSEJUHATUS

Elektrimasinad toodavad ligikaudu 98% ning tarbivad 60% elektrienergiast. [6] Arvestades ülemaailmse elektrienergia tarbimise kasvu ja keskkonnamõjuga, mida toob kaasa fossiilkütuste kasutamine, siis on arusaadav kui oluline roll on elektrimasinate kasuteguril ning kuivõrd kriitiline on parandada nende tõhusust. Selleks, et tõhusamalt toota elektrimasinaid on vaja minimeerida nii tootmis kulusid kui ka materjali hulka mis tootmiseks vaja on, millest elektrimasina puhul suurima osa moodustab aktiivmaterjalid: vask ja elektrotehniline teras.

Antud lõputöö eesmärgiks on tõsta diisel- ja gaasmootoriga töötavate sünkroongeneraatorite kasutegurit ning vähendada aktiivmaterjali kulu kasutades mitme eesmärgi optimeerimise evolutsioonilist algoritmi ehk MOEA.

Esimeses peatükis on vaadeldud elektrimasinate tüüpe, nende komponente ja põhiohk on pandud sünkroongeneraatorite ülesehitusele. Samas peatükis räägitakse kasuteguri arvutusest, tähtsusest ning kuidas rahvusvahelised kasuteguri nõuded mootoritele muutuvad aastast aastasse aina rangemaks. Seejärel räägitakse lähemalt elektrimasinates esinevatest kadudest, milleks on: vaseskaod, rauaskaod, mehaanilised kaod ja lisakaod. On tähtis aru saada kuidas need kaod tekkivad ja millest nad on tingitud, et pärast oleks lihtsam seostada disainimuutuse mõju kasutegurile.

Teises peatükis antakse ülevaade mitme eesmärgi optimeerimise põhimõttest ja selle teemaga seotud mõistetest. Kuna eksisteerib suur arv mitme eesmärgi optimeerimise algoritme, siis antud peatükis on kirjeldatud viis enim levinud evolutsioonilist algoritmi.

Kolmandas peatükis räägitakse lõputöös vaadeldud sünkroongeneraatori tehnilistest parameetritest ja nende muutuste mõjust kogu disainile. Samuti, mainitud peatükis on välja toodud vaadeldud sünkroongeneraatorite tüüpilised parameetrid.

Neljandas peatükis tutvustatakse mõiste mitme eesmärgi põhist optimeerimist ning seletatakse lahti selle teooria: mis on Pareto optimaalsus, kuidas saadakse optimaalsed ahendused. Samuti antud peatükis on loetletud enim levinud evolutsioonilised algoritmid EA ning seletatakse EA tööpõhimõtted ja protsessid. Neljas peatükk on vajalik eeltöö selleks, et tutvustada viiendas peatükis optimeerimistarkvara. Seal näidatakse mis kujul kasutaja saab näha ja analüüsida simulatsiooni tulemusi, mis eesmärgid, piirangud ja muutujad ta võib siduda jne.

Viiendas peatükis seletatakse lähemalt teostatud disaini muudatustest ning muudatuste seos generaatori põhiliste parameetritega nagu temperatuuritõus, kaod ja kasutegur.

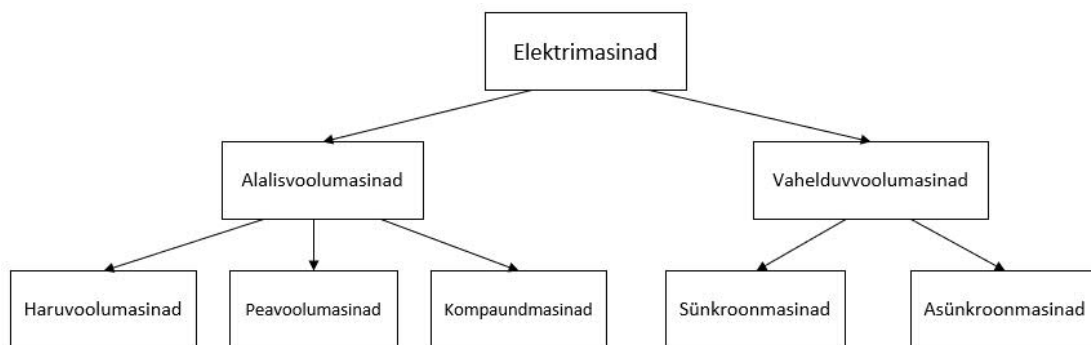
Viimases peatükis teostatakse simulatsioonide tulemuste analüüsi. Viimane peatükk on samal ajal ka kõige olulisem peatükk lõputööst. Seal räägitakse disaini muudatuste tuleviku suundadest, kuidas optimeerimine mõjutab masina põhiparameetreid ja majandusliku mõju. Samuti käsitletakse parandatud kasuteguriga generaatorite rakendamise mõju keskkonnale ja CO₂ väljaheidete vähendamisele diisलगeneraatori puhul.

1. ELEKTRIMASINAD

Elektrisüsteem koosneb mitmetest alamsüsteemidest, millest energiamuundamine omab olulist rolli. Näiteks selleks, et energia soojuselektrijaamast jõuaks lõpptarbijani tuleb seda energiat kõigepealt muundada mehaanilist energiat elektrienergiaks ning edastada elektrivõrku. Tihtipeale lõpptarbijale on vaja saada mitte elektrienergiat, vaid hoopis mehaanilist energiat. Arvestades selle vajadusega tuleb muundada elektrienergiat tagasi mehaaniliseks energiaks. Eeltoodud protsesside teostamiseks kasutatakse elektrimasinaid, mis muundavad ühte liiki energiat teiseks energialiigiks. Elektrimasinaid eristatakse selle järgi, millist tüüpi energiamuundust nemad teostavad. Generaatoriks nimetatakse elektrimasinat, mis muundab mehaanilist energiat elektrienergiaks ning mootoriks nimetatakse sellist elektrimasinat, mille väljundil saadakse mehaanilist energiat. Elektrimasinateel on oluline roll inimeste igapäevases elus, kuna nad genereerivad elektrienergiat ja muundavad elektrienergiat mehaaniliseks energiaks.

1.1. Elektrimasinate liigitamine

Elektrimasinad jagatakse alalisvoolumasinateks ning vahelduvvoolumasinateks. Neid kahte tüüpi võib omakorda jagada haruvoolu-, peavoolu- ja kompaundmasinaks alalisvoolumasinaks ning vahelduvvoolumasinad võib jagada sünkroon- ja asünkroonmasinaks. Elektrimasinate klassifikatsiooni saab näha joonisel 1.1. [1]



Joonis 1.1. Elektrimasinate liigitamine [1]

Kuna antud lõputöös käsitletakse elektrigeneraatori optimeerimist, milleks on sünkroongeneraator, siis edasi vaadeldakse lähemalt sünkroonmasinaid.

1.2. Sünkroonmasinate konstruktsioon ja tööpõhimõte

Sünkroonmasinal on kolmefaasiline vahelduvvoolumähis staatoril ja rootoril on alalisvoolumähis. Sünkroongeneraatoritel väljundpinge sagedus on sünkroniseeritud mehaanilise pöörlemiskiirusega. Seda seost väljendatakse järgmise valemiga [2]:

$$f_e = \frac{pn}{60}, \quad (1.1)$$

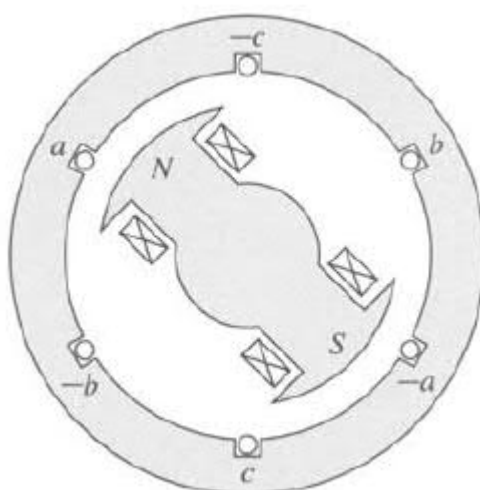
Kus f_e – elektriline sagedus, Hz

p – pooluspaaride arv

n – rootori pöörlemiskiirus, p/min

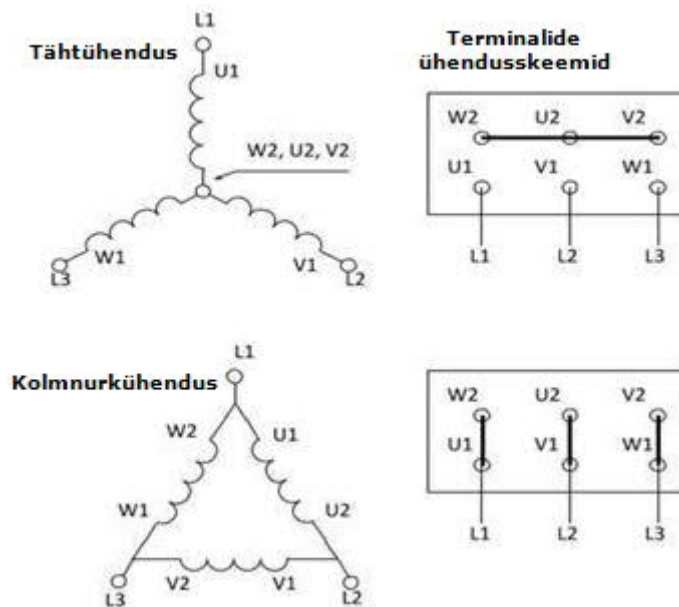
Ülaltoodud valemist saab näha, et elektrimasina pöörlemiskiirus sõltub sagedusest ning pooluspaaride arvust. Kuna elektrimasinate sagedus on enamasti 50 ja 60 Hz, siis pooluste arv on see parameeter, millega saab reguleerida elektrimasina pöörlemiskiirust. Pooluste arvu ning elektrimasina pöörlemiskiiruse vahel on otsene sõltuvus.

Maailmas on rohkem levinud just kolmefaasiline elektrisüsteem, kuna kolmfaasi on minimaalne faaside arv, mille tulemusel saab ühtlase ringliikumise. Selleks, et genereerida kolmefaasilist pinget tuleb kasutada vähemalt kolme mähisepaari, mis paiknevad üksteise suhtes 120 elektrilise kraadise vahega. [2] Joonisel 1.2 on kujutatud kolmefaasiline sünkroongeneraator, kus staatorimähises on kolm mähise paari: a ja -a, b ja -b, c ja -c.



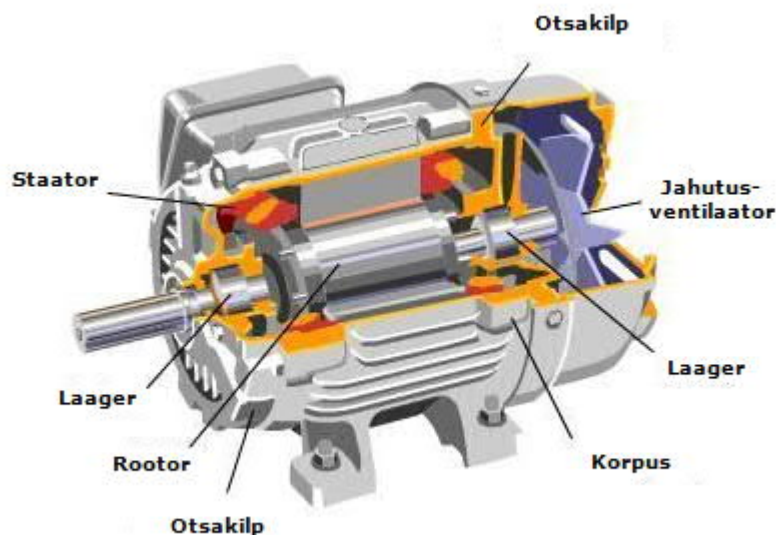
Joonis 1.2. Kolmefaasilise sünkroongeneraatori ristlõige [2]

Faasi mähised võivad olla ühendatud nii jadamisi kui ka paralleelselt ning kolm faasi võivad olla omavahel ühendatud samuti kahte moodi: tähtühendusega (joonis 1.3a) või kolmnurkühendusega (joonis 1.3b). Täht- ja kolmnurk ühenduse vahe tuleneb sellest, et milline pinge rakendatakse masina mähisele, kus tähtühenduse puhul kasutatakse faasipinget ning kolmnurk ühenduse puhul liinipinge. Siinjuures liinipinge on $\sqrt{3}$ korda suurem faasipingest.



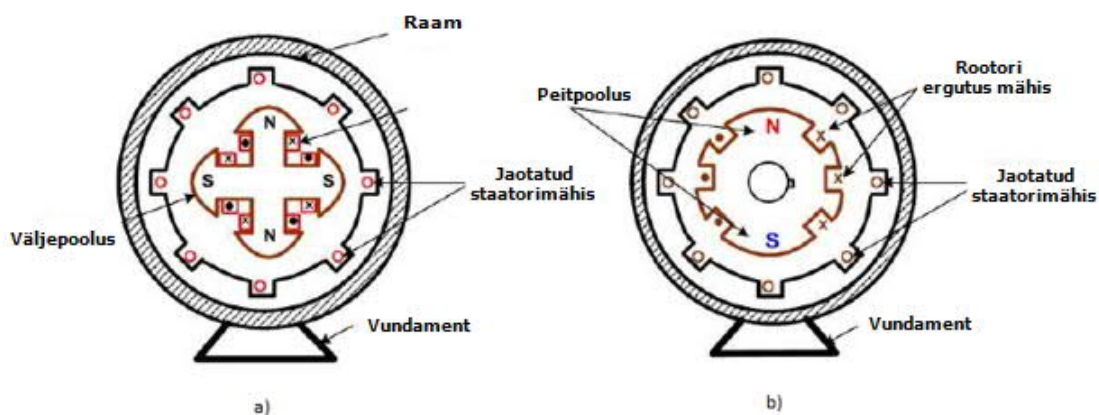
Joonis 1.3. Sünkroonmasina faaside ühendusviisid: a – tähtühendus, b – kolmnurkühendus [14]

Elektrimasinate mehaaniline konstruktsioon on sarnane, vaatamata sellele kas tegemist on mootoriga või generaatoriga, asünkroon- või sünkroonmasinaga. Joonisel 1.4 saab näha ühefaasilise asünkroonmootori kohtlõiget, kus on näidatud elektrimasina peamised komponendid. Elektrimasina staator on staatiline osa, mille südamikuga uures paigaldatakse mähiseid. Elektrimasina liikuva osa nimetatakse rootoriks. Elektrimasinal eristatakse kaht otsa: veopool (ingl. *drive end*) ning mitteveopool (ingl. *non-drive end*), kus on paigaldatud otsakilbid, millistes paiknevad laagrid. Kuna elektrimasina talitlusel eraldub soojus, mida nimetatakse soojuskadudeks, siis soojuse ära juhtimiseks paigaldatakse jahutusventilaator rootorivõlli peale. Elektrimasina raam on tavaliselt kaetud ribidega, mis parandab soojuse ära juhtimisega masina üldist jahutust.



Joonis 1.4. Ühefaasilise asünkroonmootori kohtlõige [13]

Sünkroonmasina ankruv mähis (ingl. *armatuure winding*) asub staatoril ning ergutus mähis (ingl. *field winding*) rootoril. Rootorid jagunevad konstruktsiooni järgi kahte gruppi: väljepooluste- ning peitpoolustega rootoriks. Nende rootorite konstruktiivset erinevust saab näha joonisel 1.5, kus väljepoolustega rotor on kujutatud vasakul (a) ning peitpoolustega rotor paremal (b).



Joonis 1.5. Väljepoolustega- ja peitpoolustega rootorid [3]

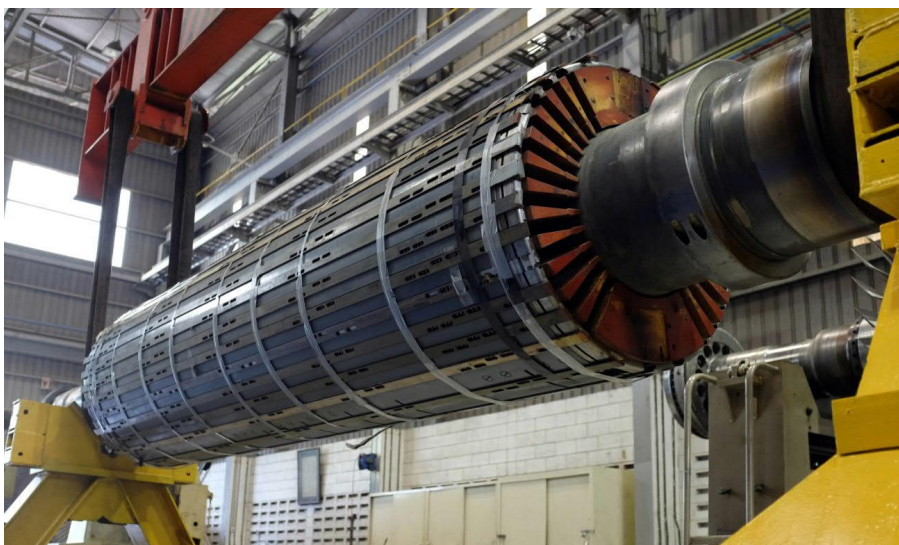
Väljepoolustega sünkroonmasinaid kasutatakse koos siseväljepõlemismootoritega (nt. diiselmootoriga), mida tihti nimetatakse diisलगeneraatoriks, kuid ka hüdroelektrijaama turbiinides, mida omal ajal nimetati hüdrogeneraatoriks. Väljepoolustega sünkroonmasinaid rakendatakse reeglina madalatel pöörlemiskiirustel. Hüdraulilise turbiini pöörlemiskiirus tavaliselt ei ületa 500 p/min. Selleks, et genereerida 50 Hz sagedust pöörlemiskiirusega 500 p/min pooluste arv peab olema 12. Kuna madala

pöörlemiskiirusega kaasnevad väikesed tsentrifugaal jõud, mis avalduvad mõju rootoril konstruktsioonile, siis midagi ei takista kasutada elektrimasinat väljepoolustega rootori konstruktsiooni kombinatsioonis suure pooluste arvuga. Joonisel 1.6 saab näha väljepoolustega rootorit. [1]



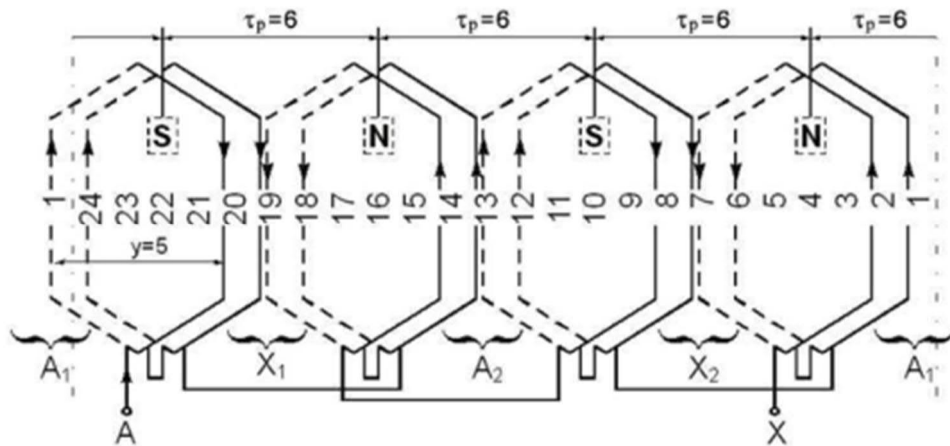
Joonis 1.6. Väljepoolustega rootor [4]

Sünkroonmasinaid, mille rootor on tehtud peitpoolustega, kasutatakse enamasti turbogeneraatorina. Sellised generaatorid on otseselt ühendatud auruturbiinidega, mille pöörlemiskiirus nelja poolusega ning 50 Hz sagedusega sünkroongeneraatori puhul on 1500 p/min. Auruturbiinide suurest pöörlemiskiirusest on tingitud peitpooluste konstruktsiooniga rootori kasutamine ning väike pooluste arv, mis on tüüpiliselt 2 või 4 poolust. Joonisel 1.7 on kujutatud peitpoolustega rootor. [1]



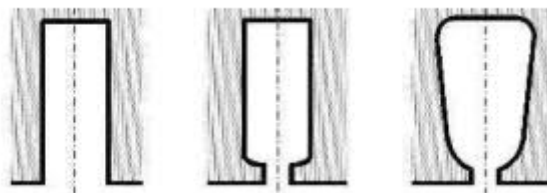
Joonis 1.7. Peitpoolustega rootor [5]

Tänapäeval sünkroonmasinates kasutatakse reeglina kahekihilist jaotatud mähist, mis on näidatud joonisel 1.8. Kahekihilisel mähisel staatori uurdes on kaks eri poolide külge. Pooli, mille külge asub uurde põhjas, nimetatakse alumiseks pooleküljeks. Sama pooli teine külge asub teises uurdes ühe teise pooli alumise külje peal ja selle pooli nimetatakse ülemiseks pooleküljeks. Poolid koosnevad tavaliselt mitte ühest keerust, vaid mitmetest keerudest. Jaotatud mähiseks nimetatakse sellist mähist, kus igas faasis ühe pooli asemel on mitu pooli. [6]



Joonis 1.8. Neljapooluselise masina A-faasi kahekihiline jaotatud mähis

Staatori uure võib olla erineva kujuga. Joonisel 1.9 on näidatud ainult mõned variandid võimalikest staatori uurete kujudest. Staatori uurdes määravad mähise moodsus ja seega osaliselt ka volutihedus juhtmes. Samas uurde moodsus peavad olema valitud vastavalt magnetvoo tihedusele staatori südamikku erinevates osades, kuna liiga suure magnetvoo tiheduse puhul elektrotehniline teras küllastub, mille tagajärjel magnetahel kuumeneb.



Joonis 1.9. Staatori uurete kujud [6]

1.3. Elektrimasina kaod

Ühe energialiigi muundamisel teiseks energialiigiks alati tekivad soojuskaod. See on tingitud erinevatest faktoritest, kas voolu läbimisest elektrijuhtmes, magnetahela hüstereesi- ja pöörisvoolust või mehaanilisest hõõrdumisest, mis esineb rootori pöörlemisel, ning jahutusõhu ringiajamisel. On äärmiselt tähtis pöörata tähelepanu masinate kadudele, kuna kaod määravad masina kasutegurit, mis avaldub mõju nii talitlushinnale kui ka keskkonnale.

Kadude suuruse hindamiseks kasutatakse sellist mõistet nagu kasutegur. Elektrimasina kasutegur on äärmiselt tähtis näitaja, mis iseloomustab masina energiamuundamise protsessis tekkivat energia kadu. Generaatori puhul kasuteguri all mõistetakse generaatori väljundist saadava võimsuse ning sisendvõimsuse omavahelist suhet. Sisendvõimsust saadakse tavaliselt auruturbiinidest, diisel- või gaasimootoritest. Väljundvõimsus on elektrivõimsus, mis jääb alles peale energiakadude mahaarvamist. Elektrimasina kasuteguri valem avaldub järgmisel kujul:

$$\eta = \frac{P_{\text{väljund}}}{P_{\text{sisend}}} \cdot 100\%, \quad (1.1)$$

Kus η - kasutegur, %

$P_{\text{väljund}}$ - väljundvõimsus, W

P_{sisend} - sisendvõimsus, W

Väljundvõimsus on võrdne sisendvõimsusega millest on võetud maha kaod:

$$P_{\text{sisend}} = P_{\text{väljund}} + P_{\text{kaod}}, \quad (1.2)$$

Kus P_{kaod} - võimsuskaod, mis esinevad generaatoris energia muundamisel, W

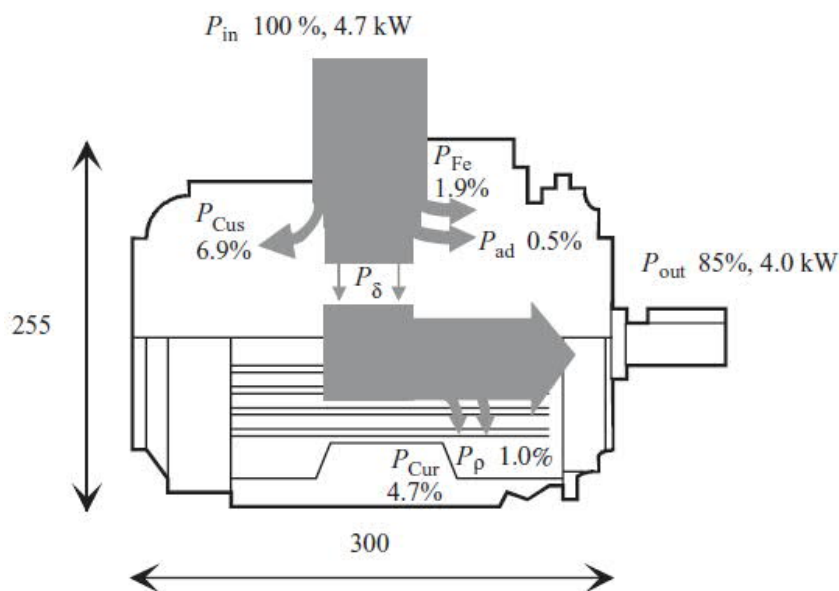
Kasutades valemit 1.2 saab teisendada valemit 1.1 järgmisele kujule:

$$\eta = \frac{P_{\text{väljund}}}{P_{\text{väljund}} + P_{\text{kaod}}} \cdot 100\%, \quad (1.3)$$

Valemist 1.3 on selgelt näha, et kasuteguri ja kadude vahel on pöördvõrdeline sõltuvus. Selleks, et tõsta generaatori kasutegurit tuleb vähendada generaatori kadusid.

Kaod jagunevad järgmisteks tüüpideks: vaseskaod, rauaskaod, mehaanilised kaod ja lisaskaod. Kuna lisaskaod on raske arvutada ja mõõta, siis eeldatakse et lisaskaod moodustavad umbes 1% tarbitavast võimsusest. [6]

Joonisel 1.10 on toodud Sankey diagramm 4 kW kahepooluselise asünkroonmootori kadude jaotusega, kus vaseskaod rootoris P_{Cur} ning staatoris P_{Cus} moodustavad 11,6% sisendvõimsusest. Rauaskaod P_{Fe} moodustavad 1,9% sisendvõimsusest ning kõik ülejäänud kaod moodustavad ainult 1,5% asünkroonmootori sisendvõimsusest.



Joonis 1.10. Sankey diagramm kadude jaotusest 4kW kahepooluselises asünkroonmootoris [9]

1.3.1. Vaseskaod

Vaseskaod, mida nimetatakse oomilisteks kadudeks (ingl. *ohmic losses*), mis tekivad kui vool läbib mähise juhet ja juhtme elektritakistuse tõttu need kaod eralduvad soojusena. Vaseskaod tekivad elektrimasina kõikides mähistes, ning moodustavad lõviosa kogukaadudest, mis esinevad elektrimasinas. Vaseskadude arvutamiseks kasutatakse järgmist valemit: [6, 9]

$$P_{Cu} = I^2 R, \quad (1.4)$$

Kus P_{Cu} – vaseskaod, W

I^2 – vool, mis läbib mähise juhtme, A

R – mähise juhtme takistus, Ω

Nagu on näha valemist 1.4 vaseskaod on otseses sõltuvuses elektrijuhtme takistusest ja ruutsõltuvuses juhtme läbivast voolust. Selleks et vähendada vaseskaod tihti peale

muudetakse staatorimähise disaini, uurde- ja juhtme mõõte. Seda saab teha selliste parameetrite muutmisega nagu: uurete arv, paralleelharude arv, efektiivkeerdude arv uurdes ja uurde mõõdud.

1.3.2. Rauaskaod

Rauaskadusid nimetatakse ka magnet südamikukadudeks (ingl. *core losses*), mis koosnevad kahest kadude tüübist milleks on hüstereesi- (ingl. *hysteresis losses*) ja pöörivoolude kaod(ingl. *eddy-current losses*)

Igas elektromagneti südamikus, peale toide väljalülitamist, eksisteerib jääkmagneetumus B_r . Sõltuvalt vaadeldava metalli magnetilistest omadustest jääkmagneetumuse suurus võib varieeruda, kuid ta on alati olemas südamikus. Iga kord kui vool muutub oma liikumissuunda tuleb kõigepealt demagneetiseerida südamik ning seejärel magneetida ta uuesti teises suunas. Teiste sõnadega südamiku magneetumuse muutumine (magnetiline induksioon) alati jääb maha vastava magnetvälja tugevusest H . Seda nähtust nimetatakse hüstereesiks ning jääkmagneetumuse vastas suunas kehtivat magnetvälja tugevust nimetatakse koertsitiivjõuks H_c . Elektrienergiat, mida kulutatakse magnetdomeenide ümbersuunamiseks nimetatakse hüstereesikadudeks. [9]

Kuna magnetmaterjal elektrimasinates ümbermangeetub pidevalt, siis selle protsessiga kaasnevad kaod tuleb arvestada kasuteguri arvutamisel mida nimetatakse hüstereesi hajuvõimsuseks (ingl. *hysteresis dissipation power*) P_h , mis sõltub sagedusest ning hüstereesisilmuse pindalast. Hüsteresi hajuvõimsust, arvutatakse järgmise valemi abil: [9]

$$P_h = \eta V f B_m^n \quad (1.5)$$

Kus P_h – hüstereesikaod, W

η – empiiriline konstant

f – toitesagedus, Hz

V – magnetahela ruumala, cm³

B_m – magnetvoo tiheduse amplituud, T

n – hüstereesi koefitsient, mis sõltub materjalist

Selleks, et vähendada hüstereesikadusid elektrimasinas, tuleb kasutada magnetiliselt pehmeid materjale, mille jääkmagneetumus on väike ning seega koertsitiivjõud, mida

tuleb rakendada, on samuti väike. Elektrimasina disaini poolt magnetahela ruumala ja magnetvoo tiheduse amplituudi vähendamiseks reeglina muudetakse magnetahela mõõdud järgmiste parameetrite abil: südamiku sise- ja välisdiameeter, uurete arv, uurete mõõdud, südamiku pikkus ning mähiste disaini. Selleks, et vähendada rauaskadusid kasutatakse elektrotehnilise terase lehti erinevate paksustega. Tüüpilised elektrotehnilise terase lehtede paksused on 0,2 – 0,35 – 0,5 – 0,65 ja 1 mm. [9]

Vahelduva magnetvoo puhul südamikus indutseeritakse elektromotoorjõud, mille tagajärjel tekivad pöörivoolud juhtivas materjalis, mille tagajärjel magnetahel kuumeneb. Juhtivas kontuuris tekib ka elektrivool. Kuna elektromotoorjõud ja vool indutseeritakse mitte ainult magnetahela ümber olevas lühiskeerus, vaid ka kõikides juhtivates kontuurides magnetahela enese sees, siis massiivse magnetahela puhul pöörivool on suur. See on tingitud suure voolukontuuri ristlõikest ja väike takistusest. [6, 9]

Pöörivoolukao P_e arvutamiseks kasutatakse järgmise valemi: [6]

$$P_e = VK_e f^2 d^2 B_m^2 \quad (1.6)$$

Kus P_e – pöörivoolu kaod, kW

K_e – mõõtühikuid ja magnetahela materjali eritakistust arvestav tegur

d – teraslehe paksus, mm

Valemist 1.6 on näha, et pöörivoolukaod on ruutsõltuvuses sageduse, teraslehe paksuse ja magnetvoo tiheduse amplituudiga. Samuti, pöörivoolukaod sõltuvad ka magnetahela ruumalast. Seega pöörivoolukadude vähendamiseks saab suurendada magnetahela ruumala kasutades samad võtmed nagu hüstereesikadu vähendamise puhul. Massiivse magnetahela asemel kasutatakse teraslehtedest magnetahela, kus on kasutatud õhukesi teraslehti, mis on isoleeritud üksteisest kas laki või mingi muu vahendi abil. Tänu sellele voolukontuuri ristlõige väike, takistus on suur ja pöörivoolu poolt tekitatud rauaskaod on samuti väikesed. [6]

1.3.3. Mehaanilised kaod

Mehaanilised kaod ehk hõõrdekaod, tulenevad laagritest, pöörlevate kehade hõõrdumisest vastu õhku ning ventilatsiooni kaod mis on vajalikud masina jahutusõhu ringiajamiseks. Tavaliselt hõõrdekaod on võrdelises seoses rootori pöörlemiskiirusega, s.t mida suurem on pöörlemiskiirus seda suuremad on hõõrdekaod, mis esinevad

masinas. Samuti, hõrdekaod sõltuvad laagri tüübist, koormusest mis avaldub oma mõju laagri ja mida laager peab taluma ning kasutatava määrdeaine omadusest. [6, 9]

Kokkuvõttes võib öelda, et vastavalt valemile 1.4 vaseskadude vähendamiseks tuleb vähendada voolu, mis läbib elektrijuhet. Voolu vähendamiseks tuleb muuta staatori disaini, uurde- ja juhtme mõõte. Rauaskaod sõltuvad magnetahela ruumalast ja magnetvoo tihedusest. Selleks, et vähendada need kaod eksisteerivad mitmed võimalused, näiteks võib suurendada südamikü diameetri, muuta uurde mõõte magnetvoo tiheduse vähendamiseks, kasutada õhukesemad elektrotehnilise terase lehte. Mehaaniliste kadude vähendamiseks tuleb valida optimaalse laagri tüübi ja vastava määrdeaine, mille omadustest sõltuvad hõrdekaod. Samuti, optimeerides ventilatsioonisüsteemi saab vähendada mehaanilised kaod, mis tulenevad pöörlevate kehade hõõrdumisest vastu õhku.

2. OPTIMEERIMIS ALGORITMID

Reaalses maailmas paljud ülesanded koosnevad mitmete eesmärkidest, mida soovitakse saavutada ning leida optimaalsemat lahendust. Mitme eesmärgi optimeerimine on eraldiseisev probleemide optimeerimiseks mõeldud lähenemine, mis omab tavaliselt kaks või rohkem eesmärki mida püütakse optimeerida samaaegselt. Samas, need eesmärgid on tihtipeale üksteisele vastukäivad. Üheks populaarsematest, kui mitte kõige populaarsem, viis lahendada erinevaid tüüpe optimeerimis probleemid on evolutsiooniliste algoritmide ehk EA (ingl. *evolutionary algorithm*) rakendamine. Selline lähenemisviis on kasutatud ka antud lõputöös.

Antud lõputöö eesmärgiks on leida probleemi lahendust, kus kaks eesmärki on konfliktis üksteisega, mis tähendab et ei eksisteeri üht õiget lahendust, vaid tulebki leida optimaalset lahendust. Mitme eesmärgi optimeerimise probleemid esitatakse järgmisel kujul: [10]

$$\begin{aligned} & \text{minimeerida } [f_1(x), f_2(x), \dots, f_k(x)] & (2.1) \\ & \text{muutuja } x \in S \end{aligned}$$

Kus $k (\geq 2)$ – eesmärgi funktsioon (ingl. *objective function*),

$f(x)$ – eesmärgi funktsioonide vektor

x – muut vektor (ingl. *variable vector*),

S – lubatud väärtuste hulk (ingl. *feasible region*) [10]

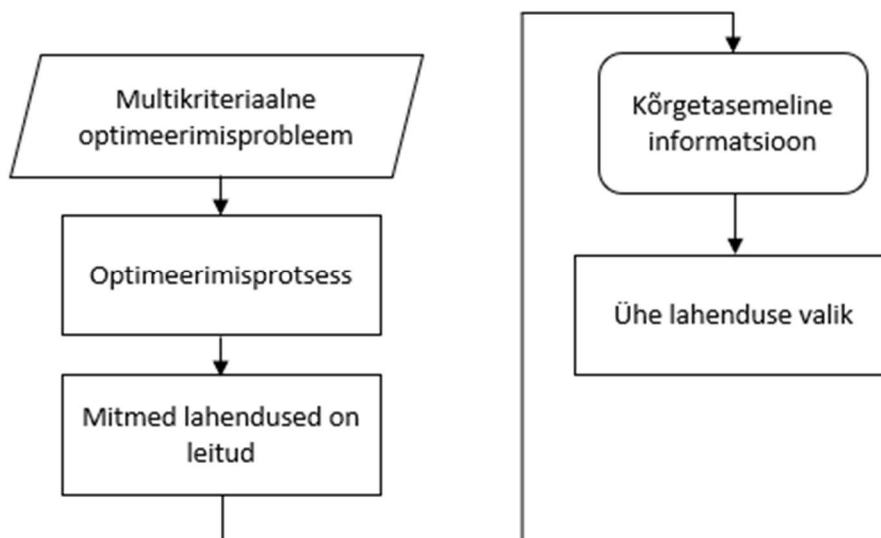
Mitme eesmärgi optimeerimisprobleemi eesmärkide määramisel tuleb arvestada eriliste nõuetega, millele need eesmärgid peavad vastama. Kui eesmärgi funktsioonide vahel ei eksisteeri vastuolu, siis lahendus on leitav punktis, kus iga eesmärgi funktsioon saavutab enda optimaalset lahendust. Kuna selline asjaolu oleks liiga triviaalne, siis selliste juhtumite vältimiseks oletatakse, et ei eksisteeri ühtegi probleemi lahendust, mis oleks optimaalne kõikide eesmärgi funktsioonide suhtes. Viimane eeldab, et eesmärgi funktsioonide vahel peab olema konflikt. Minimeerimine tähendab, et püütakse minimeerida kõiki eesmärgi funktsioone samaaegselt. Kui eesmärgi funktsioon f_i peab olema maksimeeritud, siis oletatakse, et ta peab olema minimeeritud. [10]

Kuna mitme eesmärgi optimeerimisel otsitakse lahendust probleemile, millel on kaks või rohkem vastuses olevat eesmärki, siis optimeerimise protsessi tulemusel saadakse mingi hulk sobivatest lahendustest (Pareto optimaalsete lahenduste hulk). Kui lahenduste genereerimine tehnilise poole pealt ei tohiks olla suur probleem, siis ühe

optimaalse lahenduse valik kvalitatiivsete kriteeriumite järgi on juba omaette ülesanne. Seega ideaalne mitme eesmärgi optimeerimise algoritm näeb välja järgmiselt: [15]

1. Leida mitmeid laia variatsiooniga Pareto optimaalseid lahendusi vastavalt seotud eesmärkidele;
2. Valida üks saadud lahendustest tuginedes kõrgetasemelisele informatsioonile.

Kui vaadata plokk skeemi joonisel 2.1, siis sealt võib näha esimest ja teist punkti eeltoodud algoritmist. Samuti võib öelda, et üheeesmärgiline optimeerimine on lihtsustatud versioon mitme eesmärgi optimeerimisest, kuna esimese puhul punkti nr. 1 jooksul leitakse üks globaalselt optimaalne lahendus, mis on ühtlasi ka ainuke probleemi lahendus. Seega vajadus teises punktis langeb ära. [15]



Joonis 2.1. Ideaalne mitme eesmärgi optimeerimise algoritm [15]

2.1. Domineerimine ja mitte domineeritud lahenduste kontseptsioon

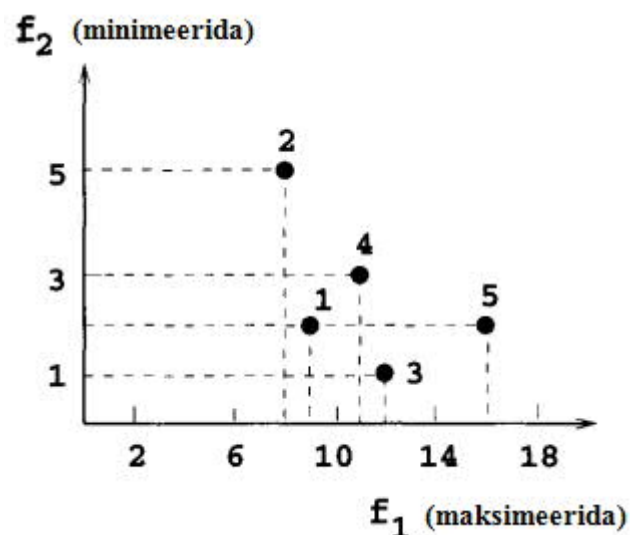
Enamustes mitme eesmärgi optimeerimis algoritmides kasutatakse sellist mõistet nagu domineerimine. Sellistes algoritmides vähemalt kaks lahendust mida siis võrreldakse omavahel ning otsustatakse kas üks lahendus domineerib teist või mitte. [15]

Eeldame, et eksisteerib M eesmärgilist funktsiooni. Siis lahendus x_1 domineerib lahendust x_2 , kui mõlemad allpool toodud tingimused on täidetud:

1. Lahendus x_1 pole halvem kui x_2 kõikide eesmärkide suhtes.
2. Lahendus x_1 on rangelt parem kui lahendus x_2 vähemalt ühe eesmärgi suhtes.

Kui vähemalt üks ülaltoodud tingimustest on rikutud, siis lahendus x_1 ei domineeri lahendust x_2 . [15]

Joonisel 2.2 on toodud kaheeesmärgiline optimeerimis probleem, kus esimene eesmärgiline funktsioon peab olema maksimeeritud ja teine eesmärgiline funktsioon – minimeeritud. Kui me võrdleme lahendusi number 1 ja 3, siis sealt on näha, et lahendus number 3 on parem kui lahendus number üks nii esimese eesmärgifunktsiooni (f_1) kui ka teise eesmärgifunktsiooni (f_2) suhtes. Ja kuna mõlemad eeltoodud tingimused on täidetud, siis saab väita et lahendus number 3 domineerib lahendust number 1. [15]



Joonis 2.2 Kaheeesmärgiline optimeerimis probleem [15]

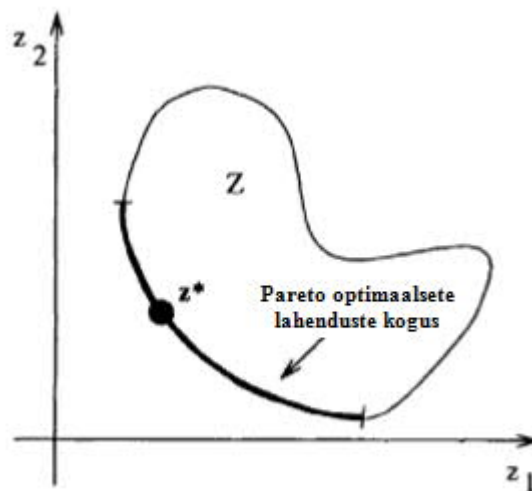
Mitme eesmärgi optimeerimise simulatsiooni lõpuks tahetakse saada teatud kogust lahendustest, mis ei domineeri üksteist. Sellise lahenduste hulga nimetatakse mittedomineeritud lahenduste hulgaks (ingl. *non-dominated set*). [15]

Seega, lahenduste hulgast P , mittedomineeritud lahenduste hulgaks P' nimetatakse selliseid lahendusi, mis pole domineeritud ühtegi teise lahenduse poolt P hulgast. Juhul kui hulk P on kogu otsinguruum, siis lõplik mittedomineeritud lahenduste hulk P' nimetatakse Pareto optimaalseks hulgaks. [15]

2.2. Pareto optimaalsus

Väljund Pareto optimaalsus oli sisse viidud prantsuse majandusteadlase Vilfredo Pareto poolt 1896. a. Mitme eesmärgi optimeerimise puhul keskendatakse eesmärkide hulgal mis on seotud selle asjaoluga, et optimaalse probleemi lahenduse leidmiseks tuleb keskenduda kompromissi leidmisel kahe (või rohkem) vastandeemärkide jaoks. Praktikas öeldakse, et x on Pareto optimaalne lahendus kui lahenduste hulgas ei eksisteeri ühtegi teist x vektorit, mis vähendaks mingit tingimust mis samal ajal ei suurendaks mõnda teist tingimust. Arvestades sellega, et tavaliselt optimeerimis protsessi jooksul tekivad mitmed lahendused, mis vastaksid Pareto optimaalsuse kriteeriumile, siis need moodustavad Pareto optimaalse hulka. Need vektorid x , mis kuuluvad Pareto optimaalse hulka nimetatakse mitte domineeritud lahendusteks. [10]

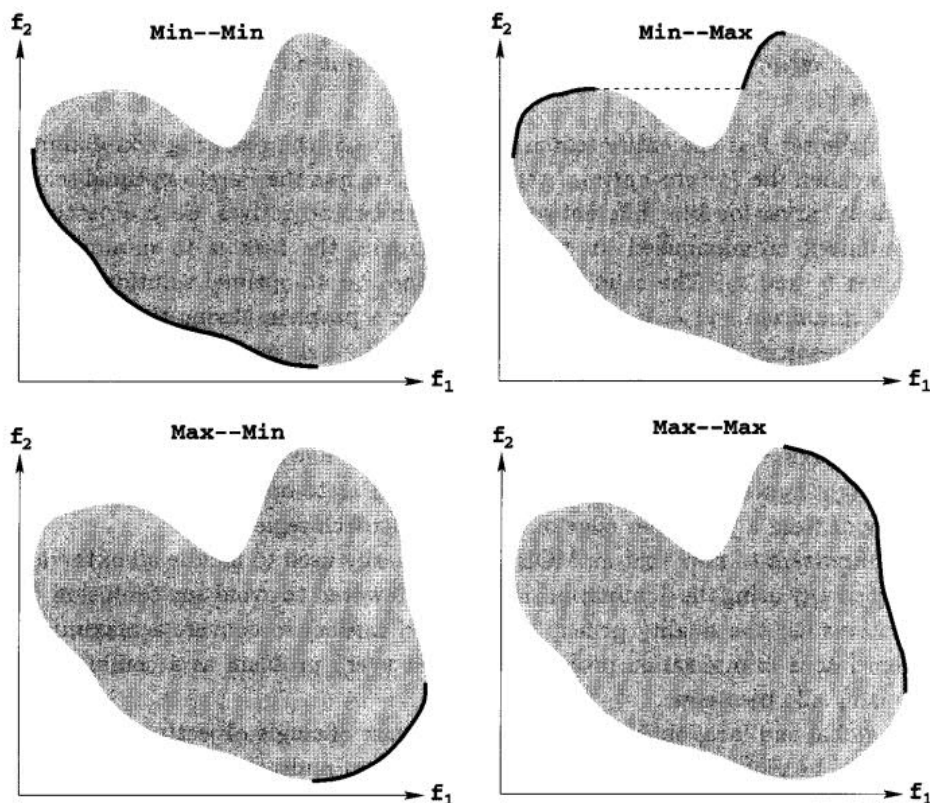
Joonisel 2.3 on näidatud lubatud väärtuste ala Z (ingl. *feasible objective region*), kus jäme joonega on märgistatud kõik Pareto optimaalsed vektorid. Vektor z^* on üks konkreetne vektor, mis vastab Pareto optimaalsuse kriteeriumile.



Joonis 2.3. Pareto optimaalsete lahenduste kogus lubatud väärtustega alal Z [10]

Enamasti Pareto optimaalsed lahendused pakuvad põhilist huvi uuringuks. Samas ülejäänud võimalikud lahendused, mis ei kuulu Pareto optimaalsete lahenduste hulka, võivad omada tähtsust juhul kui eesmärkide funktsioon on lähend teadmata funktsioonist või juhul kui eksisteerivad väljendamata eesmärkide funktsioonid. Vastavalt Pareto optimaalsuse kriteeriumile liikudes ühest lahendusest teiseni, tuleb teha kompromisse (ingl. *trade off*). Kuigi tasub mainida, et kompromiss pole alati vajalik. Teine võimalus on parendada süsteemi disaini parimate tulemuste saamise eesmärgiga. Näiteks muuta lähenemist probleemile või paremini defineerida probleemi.

Joonisel 2.4 on toodud Pareto optimaalsed lahendused nelja erineva kahe eesmärgifunktsioonide kombinatsioonidega suhtes. [10, 15]



Joonis 2.4. Pareto optimaalsed lahendused on märgitud jämejoonega nelja erineva kombinatsiooni puhul kahe eesmärgi tüübi suhtes [15]

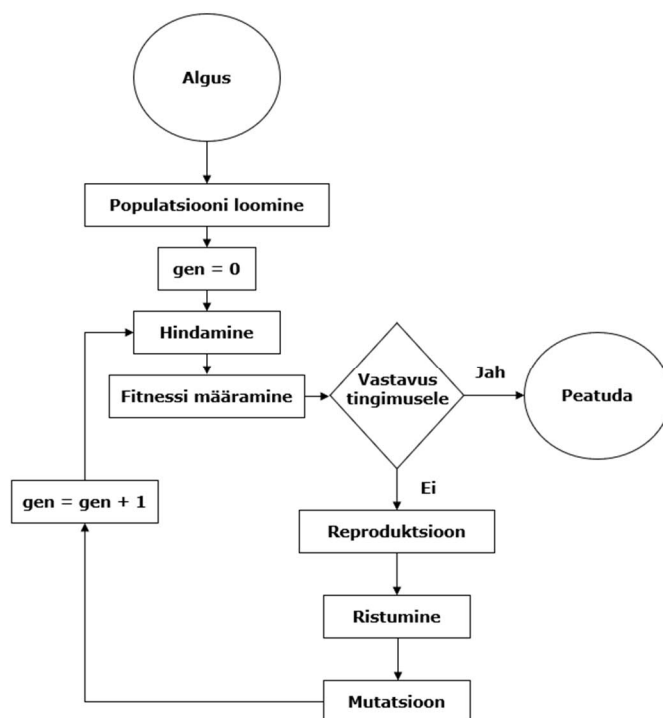
2.3. Evolutsioonilised algoritmid

Evolutsioonilised algoritmid korduvad loodusliku valiku protsessi optimaalse lahenduse otsimisel. Kõigepealt, evolutsiooniline algoritm genereerib juhusliku hulga potentsiaalsetest lahendustest, mida nimetatakse populatsiooniks. Iga lahendus populatsioonis nimetatakse individiks ning kasutaja määrab hindamiskriteeriumi igale individile. Selline hindamiskriteerium nimetatakse sobivusfunktsiooniks (ingl. *fitness function*) ja ta aitab hinnata kuivõrd üks lahendus on parem või halvem võrreldes teiste lahendustega populatsioonis. Kui igal individil populatsioonis on oma sobivusaste olemas, siis valikumehhanism peab sobivusaste alusel selekteerima järeltulija (ingl. *offspring või children*). Kui järeltulijad on genereeritud, siis nad muteeruvad, asendavad vanad individid uues populatsioonis ning neid hinnatakse uuesti järgmises iteratsioonis (iga iteratsioon optimeerimisel nimetatakse generatsiooniks). Optimeerimisprotsess tavaliselt lõpeb siis, kui etteantud generatsioonide arv on saavutatud ning siis kasutaja

saab analüüsida saadud tulemusi kasutades erinevaid meetodeid. Selline omadus nagu mitmete optimaalsete lahenduste genereerimine ühes populatsioonis teeb evolutsioonilised algoritmid sobilikuks vahendiks mitme eesmärgi probleemide lahendamiseks. [11, 15]

Rääkides mitme eesmärgi evolutsioonilistest algoritmitest (ingl. *MOEA või Multi-Objective Evolutionary Algorithm*) tuleb pidada meeles järgmisi aspekte. Esiteks, valikumehhanism peab valima mitte domineeritud lahendused ning käsitlema neid võrdselt heaks lahenduseks, kuna lõppvalik peab olema tehtud kõrgetasemelise informatsiooni põhjal 2. punktis kirjeldatud protseduuri jooksul (vt. ptk 2.1). Teiseks, kuna lõpmatu pikka simulatsiooni jooksul EA kipuvad koondama üheks lahenduseks, siis selle vältimiseks tuleb piirata valikumehhanismi teatud iteratsioonide arvu pärast. Sellega saab tagada tervisliku lahenduste variatsiooni, et mitu Pareto optimaalset lahendust saaks olla genereeritud ühes iteratsioonis. Kasutaja saab tagada viimast piirates generatsioonide arvu. [11, 15]

EA unikaalseks omaduseks võib tuua võimalust leida ja hoida mitmed lahendused samas simulatsioonis. Plokkskeemil, mis on kujutatud joonisel 2.5 on näidatud kuidas töötab geneetiline algoritm ehk GA (ingl. *genetic algorithm*), mida on hea kasutada nii GA kui ka EA tööpõhimõtteid, samuti GA on kasutatud alusena paljudes populaarsetes evolutsioonilistes algoritmides. [15]



Joonis 2.5. GA tööpõhimõtet seletav plokkskeem [15]

Eksisteerib kolm põhilist geneetilist operaatorit (ingl. *genetic operator*), mida kasutatakse uue populatsiooni genereerimisel ja selleks, et tagada mitmekesisust generatsioonides: reproduktsioon või selekteerimine (ingl. *reproduction või selection*), ristumine (ingl. *crossover*) ja mutatsioon (ingl. *mutation*)

Reproduktsiooni operaatori põhimõte seisneb selles, et luua koopiaid parimatest lahendustest eelmisest populatsioonist ning lisada neid sobivus rühma (ingl. *mating pool*). Peale seda ülejäänud kaks operaatorit modifitseeruvad valitud individid. [15]

Ristumise operaator teeb uued koopiaid, eelnevalt reproduktsiooni operaatori poolt valitud koopiatest (ta ei loo uusi lahendusi). Uued koopiaid luuakse „mitte nii heade“ koopiade arvel, mida eemaldatakse sobivus rühmast. [15]

Mutatsiooni operaator muudab parameetrite väärtused valitud lahendustes ehk siis loob uued lahendused ja tagab populatsiooni mitmekesisust. [15]

2.4. Enim levinud algoritmid ja nende kirjeldus

Eksisteerib erinevaid optimeerimis algoritme mida on võimalik kasutada masinate optimeerimiseks, kuid vaatamata erinevate MOEA vaheldusrikkusele, enimlevinud on järgmised viis algoritmi: NSGA-II, SPEA2, PAES, MOEA/D ja PESA. [11]

2.4.1. NSGA-II (ingl k *Nondominated Sorting Genetic Algorithm II*)

NSGA algoritm, mis oli pakutud välja 90ndate keskel oli arvutusliku poole pealt kompleksne ning tagas vaesemad tulemused võrreldes kõikide teiste tol ajal mitte elitaarsete MOEA-dega (ingl. *non-elitist MOEAs*). NSGA-II on uuendatud versioon NSGA algoritmist, mis omab palju tõhusama individide hindamisprotseduuri kui tema eelkäija. Arvutades välja kahe punkti omavahelist distantsi mõlemas suunas iga seatud eesmärgi suhtes NSGA-II suudab hinnata lahenduste tihedust. Selekteerimisprotsessi jooksul NSGA-II kasutab rahvarohke võrdlusoperaatori (ingl. *crowded comparison operator*). S.t. et algoritm selekteerimis etapil annab eelise mitte domineeritud lahendustele võrreldes domineeritud lahendustega, kuid juhul kui on vaja valida kahe sama

tugevusega lahenduste vahel, siis valik langeb selle lahenduse kasuks, mis asub vähem rahvastatud regioonis. NSGA-II kombineerib parimad vanemad (ingl. *parents*) lahendused parimate järeltulijatega (ingl. *offspring*), s.t. ta ei kasuta välisarhiivi nagu paljud teised levinud MOEA teevad. Tänu arvutusliku tõhususele ja märgatavale arengule võrreldes tema eelkäijale, NSGA-II algoritm muutus väga populaarseks valikuks mitme eesmärgi probleemide lahendusel tänapäeval.

[11, 17]

2.4.2. SPEA2 (ingl. *Strength Pareto Evolutionary Algorithm 2*)

SPEA2 on uuendatud versioon algoritmist SPEA, mis oli pakutud 1990. a. SPEA kasutab populatsiooni ja arhiivi (mitte domineeritud välishulk) (ingl. *external nondominated set*). Simulatsiooni alguses arhiiv on tühi ning on olemas ainult algne populatsioon erinevate indiviididega. Järgmise sammuna kõik mitte domineeritud indiviidid kopeeritakse arhiivi ning kõik domineeritud või dubleeritud indiviidid eemaldatakse arhiivist. Kui arhiivi suurus ületab etteantud limiidi, siis arhiivi liikmed kustutatakse. Kui arhiivi suurus vastab limiidile, sobivusaste määratakse nii arhiiv- kui ka populatsiooni indiviididele.

[18]

Peale sobivuse määramist algab paaritumise valiku faas (ingl. *mating selection phase*), kus indiviidid arhiivist ja populatsioonist valitakse binaarsete turniiride (ingl. *binary tournament*) alusel. Antud etapis arhiivi indiviidil on suurem võimalus olla valitud kui igal populatsiooni indiviidil. Peale rekombinatsiooni ning mutatsiooni vana populatsiooni asendatakse uue genereeritud populatsiooniga. See protsess kordub igas generatsioonis.

[18]

SPEA2 algoritmis olid lahendatud mõned probleemid, mis esinesid tema vanas versioonis - SPEA algoritmis. Kui vanas algoritmis indiviidid, mis olid domineeritud sama arhiivi indiviidi poolt omasid sama sobivuse väärtuse, siis uues versioonis see probleem sai lahendatud. SPEA2-s sobivus on määratud domineeritavate indiviidide tugevuste poolt nii arhiivist kui ka populatsioonist, kuigi SPEA-s ainult indiviidi arhiivist olid vaadeldud sobivuse määramise etapis. Tugevuse väärtus on proportsionaalne lahenduste arvule, mida antud indiviid domineerib. Samuti, uuendatud algoritmis arhiivi suurus on fikseeritud. Kui mitte domineeritud indiviidide arv on vähem kui etteantud arhiivi limiit, siis arhiivi lisatakse ka domineeritud indiviidid populatsioonist, et tagada

arhiivi sama suurust igas generatsioonis. SPEA-s arhiivi suurus võib varieeruda. SPEA2 algoritmis ainult arhiivi individid osalevad paaritumise valiku protsessis. [11, 18]

2.4.3. PAES (ingl. *Pareto Achieved Evolution Strategy*)

PAES algoritm kasutab „1+1“ evolutsioonilise strateegiat, mis seisneb selles et üks vanem genereerib ühe järeltulija rakendades mutatsiooni operaatorit vanema suhtes. PAES-il on olemas välisarhiiv, kuhu salvestatakse mitte domineeritud lahendused eelmistest generatsioonidest. Antud algoritmis välisarhiivi kasutatakse referentsina uute muteeritud lahenduste võrdlemiseks. Peale rahvarohke võrdlusoperaatori kõik lahendused paigaldatakse omale koordinaadile võrgustikul vastavalt tema eesmärkide väärtustele. Välisarhiivi suurus on piiratud, seega kui arhiiv saab täis samas uus mitte domineeritud lahendus on genereeritud, siis algoritm teostab kontrolli. Kontrollitakse kus uus lahendus asuks võrgustikul ja kui tema asukoht langeb vähe rahvastatud regioonile, siis teda salvestatakse välisarhiivi mingi teise juhuslikult valitud lahenduse asemel, mille asukoht võrgustikul asub tihedalt rahvastatud regioonis. Selle protseduuri põhimõtte on jaotada lahendused eeldades hõredalt asustatud regiooni. [11, 19]

2.4.4. MOEA/D (ingl. *Multi-objective Evolutionary Algorithm based on Decomposition*)

MOEA/D algoritmi põhimõtte seisneb mitme eesmärgi optimeerimisprobleemi liigendamiseks mitmeks alamprobleemideks, mis on optimeeritud paralleelselt. See lahendus oli pakutud Zhang ja Li poolt [20], kus autorid annavad meetodi kuidas genereerida lahenduste kaalud, mille järgi teostatakse liigendamine (ingl. *decomposition*). Iga alamprobleemi lahendusel kasutatakse informatsioon ainult teistelt alamprobleemidelt, see tagab arvutusliku lihtsust ning efektiivsust võrreldes teiste optimeerimis algoritmidega. [11, 20]

2.4.5. PESA (ingl. *Pareto Envelope-based Selection Algorithm*)

PESA algoritm erineb teistest algoritmist sellega, et PESA-s nii selektsiooniprotsessi kui ka mitmekesisus on tagatud lihtsa hüpervõrgustiku (ingl. *hyper-grid*) meetodiga. Samas, tavalised MOEA-d baseeruvad sellele kuivõrd lahendused domineerivad üksteist

PESA algoritm kasutab väikest sisemist populatsiooni ja lisaks ka suurt välispopulatsiooni. Seoses sellega välispopulatsioonile on eraldatud oluline roll optimeerimises, kuna nii seleksioon kui ka mitmekesisus on tagatud selle meetodiga. Seleksiooniprotsess baseerub rahvarohke operaatori tööol. Sama rahvusrohke operaator otsustab, mis lahendused salvestatakse välispopulatsioonis. [11, 21, 22]

Antud töös kasutatud optimeerimistarkvara lubab kasutada erinevaid algoritme, kuid käesolevas töös autor otsustas kasutada SPEA2 algoritmi tänu fikseeritud arhiivi suurusele, mis tagab, et kasutaja saab etteantud individide arvu. On tähtis saada alati üht ja sama individide arvu ja eriti massilise optimeerimise puhul, kus lõpus hakatakse võrdlema mitmeid optimeerimis tulemusi omavahel. Samuti, kuna SPEA2 algoritmis ainult arhiivis olevad individid osalevad paaritumise valiku protsessis, siis see vähendab individide valiku juhuslikkust ja teeb optimeerimis protsessi sihikindlamaks.

3. SÜNKROONGENERAATORI TEHNILINE KIRJELDUS

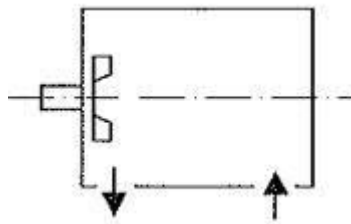
Antud lõputöös on tegemist šabloon mähistega sünkroongeneraatoriga, mis on ettenähtud töötamiseks paaris diisel- või gaasimootoritega. Need generaatorid tulevad erinevate raami suurustega T1 või T2 (tüüp 1 ja tüüp 2 vastavalt), maksimaalse näivvõimsusega 8 MVA. Mainitud generaatorid eristatakse võlli kõrguse järgi: T1 puhul võlli kõrgus on 560 mm ja T2 puhul võlli kõrgus on 630 mm. Generaatori pooluste arv võib varieeruda vahemikus 4 kuni 10 poolust. Mainitud sünkroongeneraatorid võivad töötada nimipingega kuni 15 kV ning sagedusega 50 Hz või 60 Hz. Standardse disainiga masin on võimeline opereerima kõrgustel kuni 1000 meetrit üle merepinna (ingl. *meters above sea level*), kuid vajalikke disaini muudatustega masinad suudavad talitleda ka suurematel kõrgustel. Kui rääkida kõrguse mõjust elektrimasina disainile, siis suurematel kõrgustel esitatakse rangemad nõuded masina isolatsioonile. See on seotud sellega, et suurematel kõrgustel õhk muutub hõredamaks, mistõttu jahutustingimused on viletsamad.

Käesolevas töös vaadeldud generaatorite IP kaitseaste (ingl. *Ingress Protection Class*) on kas IP23, IP44, IP54 või IP55. Jahutuse mõttes võib jagada vaadeldud masinaid avatud masinaks õhk-õhk jahutusega ICOA1 või suletud masinaks õhk-vesi jahutusega IC8A1W7.

Generaatori temperatuuritõus vastab F või B temperatuuritõusu klassile IEC 60034-1 standardi järgi, kus F temperatuuritõusu ülemine piirväärtus on 105 K ning B temperatuuritõusu puhul 80 K vastavalt [7]. Enimlevinud temperatuuritõusu klass elektrimasinatel on 155 K (F), kuid tihti peal võib näha ka 180 K (H) ning 130 K (B) temperatuuritõusu klassi. Temperatuuritõusu ja elektrimasina eluea vahel eksisteerib pöördvõrdeline seos – mida madalam on temperatuuritõus, seda pikem on elektrimasina eluiga. See on seotud sellega, et kõrgematel temperatuuridel mähiste isolatsiooni ressurss väheneb palju kiiremini kui madalatel temperatuuridel. Rusika reegel ütleb, et 10 K temperatuuritõus kahandab isolatsiooni eluiga 2 korda. [9]

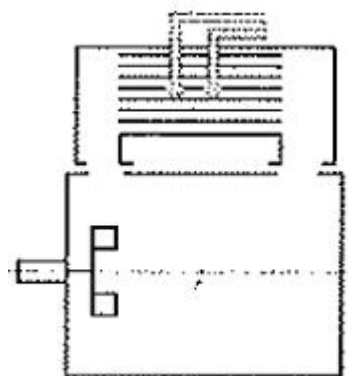
Sünkroongeneraatorites kasutatakse harjadeta ergutussüsteemi, kus ergutusvõimsus võetakse jõuahelast pingetrafo abil, või püsomagnetgeneraatoriga, mida paigaldatakse samale võllile koos peageneraatoriga. Sünkroongeneraatori talitluse juhtimiseks ning kaitse seadmiseks kasutatakse automaatset pingeregulaatorit (ingl. *Automatic Voltage Regulator*).

Vaadeldud generaatorid võib jagada jahutuse tüübi järgi kahte gruppi: avatud- või suletud süsteemiga. Avatud jahutussüsteemi puhul jahutusõhk voolab läbi masina ja juhib ära soojust, mis eraldatakse masin aktiivosade poolt, ja viib seda soojust masinast välja. Antud ülesehitus sobib hästi töötamiseks keskkonnas, kus puudub vesi, mustus või tolm näiteks suletud konstruktsiooniga elektrijaamades. Jahutusõhu tsirkuleerimine tagatakse ventilaatoriga, mida paigaldatakse samale völliile rootoriga, ning jahutusõhu temperatuur võrduv sellel juhul keskkonnatemperatuuriga. IC0A1 jahutustüübi masina põhimõtteline skeem on kujutatud joonisel 3.1. [12]



Joonis 3.1. IC0A1 jahutusega elektrimasina põhimõtteline skeem [12]

Suletud jahutussüsteemiga masinate puhul rakendatakse kahte jahutuskeskkonda. IC8A1W7 puhul on primaar jahutuskeskkonnaks õhk, mis ringleb suletud kontuuris elektrimasinas tänu rootoril paigaldatud ventilaatorile, ja sekundaar jahutuskeskkonnaks on vesi, millele primaar jahutuskeskkond edastab soojust soojusvaheti kaudu. Sekundaar jahutuskeskkonnas võib esineda mitte ainult vesi, kuid ka gaas (nt. õhk). IC8A1W7 jahutusega masina põhimõtteline skeem on näidatud joonisel 3.2. [12]



Joonis 3.2. IC8A1W7 jahutusega elektrimasina põhimõtteline skeem [12]

Vaadeldud generaatorites enamasti oli kasutatud liuglaagrit ja palju harvem veerelaagrit. Tavaliselt generaatoril on kaks laagrit ning ta on ühendatud mootoriga läbi ühendava siduri. Veerelaagrit kasutatakse tihti mererakenduste puhul, kus tekitavad

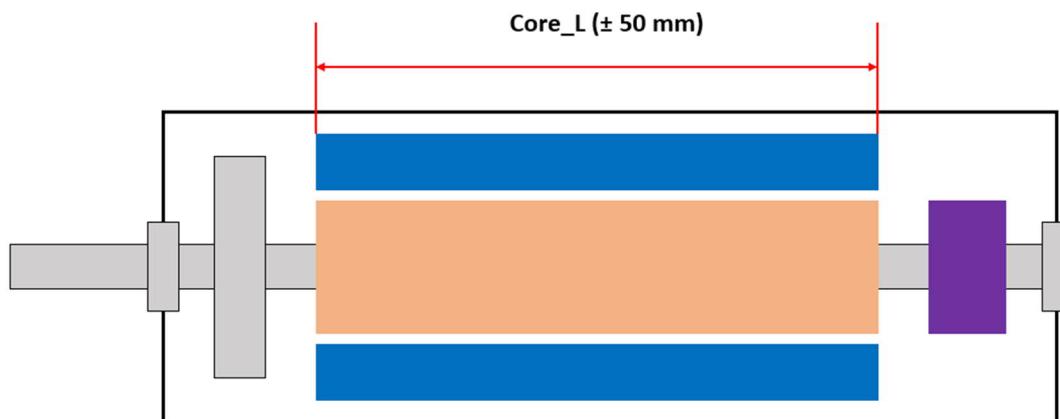
aksiaalkoormused seoses laeva- või platvormi kaldusega. Liuglaagrid aga kasutatakse enamasti maapealseks kasutamiseks.

Staatori südamik koosneb mitmetest lamineeritud lehtedest, mis on valmistatud elektrotehnilisest terasest. Sellise südamiku ülesehitusega vähendatakse rauaskaod südamikus, mis on tingitud vahelduvvoo poolt (vt. ptk. 1.3.2). Staatorimähiseks on kasutatud šabloon mähiskus on kasutatud vaigutatud isoleeritud vaske. Staatorimähise suhteline samm on tavaliselt 5/6, kuid eksisteerib ka 2/3 suhtelist mähisesammu. Rootor on väljapoolustega ning koosneb peenetest lehtedest elektrotehnilisest terasest nii nagu staatori südamik.

Edasi on toodud välja põhilised parameetrid, mida vaadeldakse simulatsiooni jooksul

3.1. Magnetahela aktiivosa pikkus

Optimeerimise jooksul oli muudetud magnetahela aktiivosa pikkus, uurete arv ja uurete mõõdud staatoris ning mähiste efektiivkeerdude- ja paralleelharude arv. Staatori- ja rootori südamiku pikkused peavad olema võrdsed omavahel, magnetahela aktiivosa pikkus on tähistatud *Core_L*. Magnetahela aktiivosa pikkus on tehtud pikkemaks ja lühemaks sammuga 50 mm ja staatori ning rootori südamiku pikkused on omavahel võrdsed. Magnetahela aktiivosa pikkus on piiratud raami pikkusega, kuna mähiste lauposade ja raami vahel peab olema tagatud piisav õhupilu läbilöögi vältimiseks. See on eriti oluline kõrgepingeklassiga elektrimasinate puhul. Lõputöös vaadeldud generaatorite raamide pikkused varieeruvad vahemikus 1000 – 3000 mm. Tavaliselt simulatsiooni jooksul Magnetahela aktiivosa pikkus oli muudetud vahemikus ± 50 mm, v.a. need juhtumid kus südamiku pikkus oli algselt lühim või pikim antud raami suurusega. Magnetahela aktiivosa pikkus *Core_L* on kujutatud joonisel 3.3.

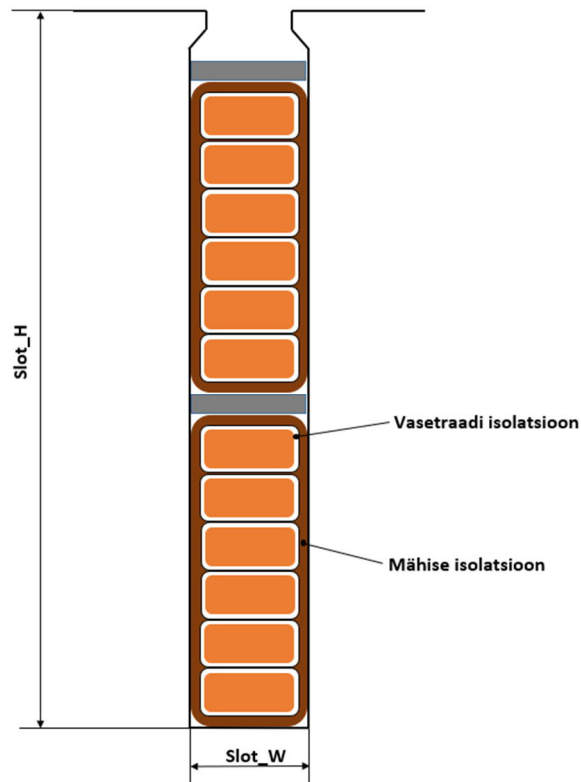


Joonis 3.3. Magnetahela aktiivosa pikkus $Core_L$

Staatori südamikus on olemas ka radiaalsed jahutuskanalid, mille arv sõltub südamiku pikkusest ning muutub vastavalt südamiku pikkusele simulatsiooni vältel.

3.2. Staatorimähiste ja uurete disain

Joonisel 3.4 on näidatud kahekihiline jaotatud mähis staatori uurdes. Mähise moodsus on määratud uurde suurusega ja muutusid simulatsiooni jooksul vastavalt uurde kõrguse ($Slot_H$) ja uurde laiuse ($Slot_W$) muutusele. Mähise moodsus on piiratud põhimõtteliselt kolme faktoritega milleks on voolutihedus, magnetvoo tihedus ning mehaanilised piirangud mis on seotud mähiste valmistamis tehnoloogiaga.



Joonis 3.4. Kahekihiline jaotatud mähis staatori uurdes

Veel üks parameeter, millest sõltuvad mähise mõõdud, on isolatsiooniklass. Isolatsiooni- või pingeklass määrab isolatsioonmaterjalikihi paksust, kuna kõrgem pinge nõuab ka tugevamat isolatsiooni läbilöögi vältimiseks. Mida suurem on isolatsiooniklass, seda väiksem on juhtme ristlõikepindala sama uurde suurusega kui väiksemal isolatsiooniklassil. See omakorda suurendab voolutihedust juhtmes, mis negatiivselt mõjutab vaseskadusid nagu oli mainitud selle peatüki alguses. Joonisel 3.4 saab näha, et poolil on tavaliselt kaks peamist isolatsioonikihti: vasetraadi isolatsioon (valge) ning mähise isolatsioon (pruun).

3.2.1. Voolu- ja magnetvoo tihedus

Voolutihedus J juhtmes sõltub voolust ning juhtme ristlõikepindalast ning see suhe on väljendatud järgmise valemiga:

$$J = \frac{I}{A}, \quad (3.1)$$

Kus J – voolutihedus, A/mm²

I – vool, A

A – juhtme ristlõikepindala, mm²

Kui voolutihedus elektri juhtmes on liiga suur, siis vaseskaod on samuti suured (vt. ptk. 1.3.1) mille tagajärjel temperatuuritõus masinas suureneb ka. Viimane vähendab masina eluiga ja lisaks kõrgetel temperatuuridel vasest juhe takistus suureneb, seega masina kasutegur langeb.

Iga juhtme ümber, mida läbib vool, tekib magnetväli. Praktikas eristatakse kahte magnetvälja tüüpi: *H-väli* ja *B-väli*. *H-väli* ehk magnetväli tekitab ruumis midagi sarnast elektripingega, mille tulemusena tekib *B-väli* ehk magnetvoog. Magnetvoo tihedust nimetatakse magnetiliseks induksiooniks ja see on leitav järgmise valemiga: [6]

$$B = \mu H, \quad (3.2)$$

Kus B – magnetvoo tihedus, Wb/m^2

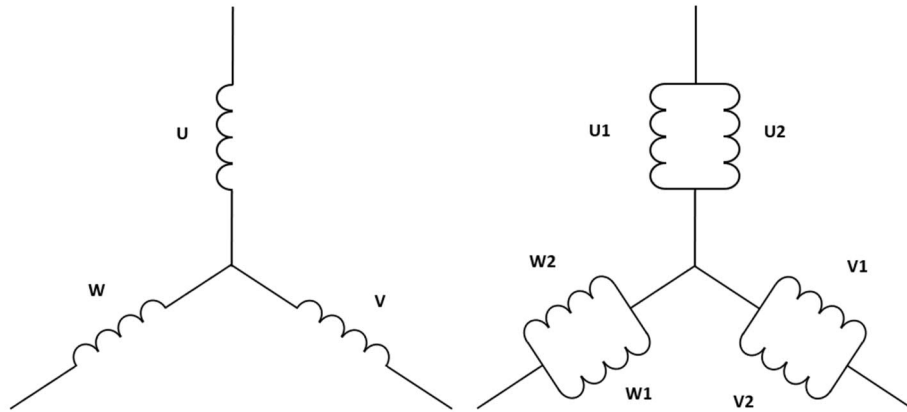
μ – keskkonna magnetiline läbitavus, H/m

H – magnetvälja tugevus, A/m

Elektrimasina staatori ja rootori südamikud on valmistatud elektrotehnilisest terasest, mida läbib magnetväli. Kuna vahelduvvoolu puhul magnetväli on muutuv, siis ta tekitab hüstereesi- ja pöörsvoolu kadusid terases. Nagu oli mainitud varem, siis rauaskaod põhjustavad magnetahela soojenemist (vt. ptk. 1.3.2). Juhul kui magnetvoo tihedus on liiga suur, siis elektrotehniline teras küllastub ning magnetvooahela takistus järsult suureneb, mis toob suuremad kaod ja äärmisel juhul viib ka magnetahela ülekuumenemisele. Elektrotehnilised terased küllastuvad magnetvoo tihedusel 1,0 ... 1,8 T sõltuvalt materjali omadustest. [6]

3.2.2. Paralleelharude arv staatorimähises

Paralleelharude arvu a võib muuta selleks, et vähendada voolutihedust mähistes. Paralleelharude arv sõltub kõigepealt pooluste arvust nii, et pooluste arv $2p$ jagamisel paralleelharude arvuga a vastuseks tuleb saada täisarvu. Joonisel 3.5 on kujutatud kolmefaasiline mähis ühe paralleelharudeta (vasakul) ning kolmefaasiline mähis kahe paralleelharuga (paremal). [9]



Joonis 3.5. Kolmefaasiline mähis paralleelharudeta (vasakul) ja kahe paralleelharuga (paremal)

Tabelis 3.1 on toodud välja lubatud paralleelharude arv 4, 6, 8 ja 10 poolustega masinate puhul, mis olid vaadeldud antud lõputöös.

Tabel 3.1. Lubatud paralleelharude arv 4, 6, 8 ja 10 poolustega sünkroongeneraatoril

Pooluste arv, $2p$	Lubatud paralleelharude arv, a
4 poolust	1, 2, 4
6 poolust	1, 2, 3, 6
8 poolust	1, 2, 4, 8
10 poolust	1, 2, 5, 10

3.2.3. Uurete arv staatoris

Veel üks viis mõjutada staatori mähiste disaini on muuta uurete arvu staatori südamikus. Tavaliselt uurete arvu suurendamine avaldub positiivse mõju kadudele, kuna suure uurete arvu puhul on mähistel väiksem pindala ning uurete sügavus on tavaliselt väiksem. Samas tuleb pidada meeles, et väiksete uurete arvu puhul skeemide ühendamine ning staatori mähise poolide paigaldamine on lihtsam ning see säästab aega ja töökulusid staatori valmistamiseks. Lisaks uurete arvu suurendamine avaldub positiivse mõju THD-le (ingl. *Total Harmonic Distortion*). Uurete arvu tähistatakse Q ja avaldatakse järgmise valmiga: [6]

$$Q = 2pmq, \quad (3.3)$$

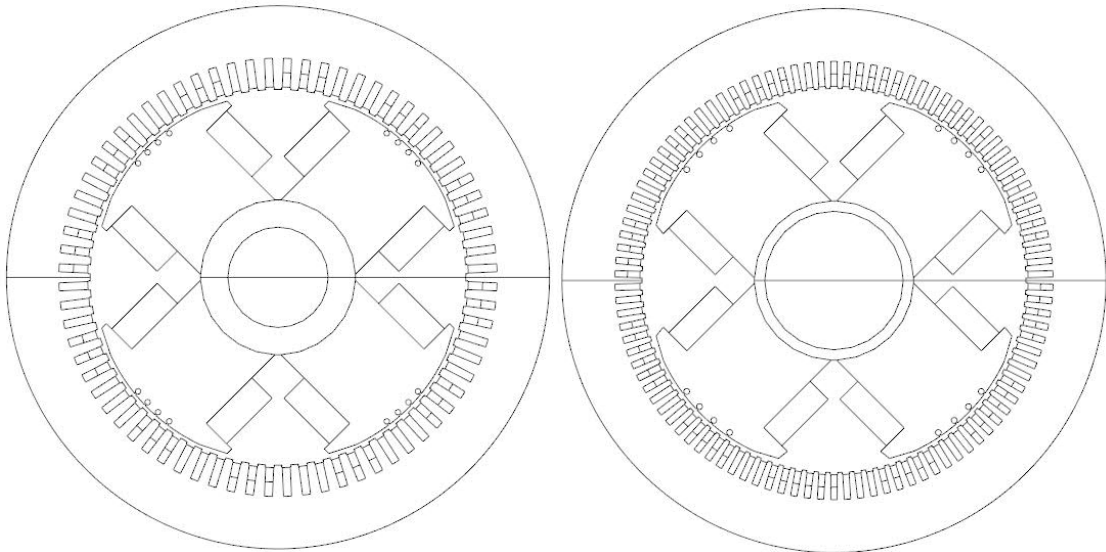
Kus Q – uurete arv staatoris

p – pooluspaaride arv

m – faaside arv

q – uurete arv pooluse ja faasi kohta

Joonisel 3.6 on näha sünkroongeneraatori staatori- ja rootori ristlõige, kus on näidatud staator 72 uurete (vasakul) ja 102 uuretega (paremal).



Joonis 3.6. Neljapooluselise sünkroongeneraatori staatori- ja rootori ristlõige 72 uurete arvu vasakult ja 102 uurete arvuga paremalt

3.2.4. Mähisesamm ja suhteline mähisesamm

Mähisesamm y on võtmeperameeter staatori mähise disainis. Mähisesamm on pooli kahe külje omavaheline distants. Mähisesammu mõiste seletamisel on tähtis mainida ka poolusejaotuse, mis näitab magnetpooluste omavahelist kaugust piki staatori sisepinda ning on leitav järgmise valemi abil: [6]

$$\tau_p = \frac{Z}{2p} \quad (3.4)$$

Kus τ_p – poolusejaotus

Z – uurete arv

$2p$ – pooluste arv

Juhul kui mähisesamm ja poolusejaotus on võrdsed, siis sellist sammu nimetatakse täissammuks. Tavaliselt jaotatud mähisel mähisesamm on lühem kui täissamm. Lühendatud mähisesammu puhul kasutatakse mõistet suhteline mähisesamm β , mille valem on avaldatud järgmisel kujul: [6]

$$\beta = \frac{y}{\tau_p} \quad (3.5)$$

Kus β – suhteline mähisesamm

y – mähisesamm

Antud lõputöös staatorimähise suhteline samm oli valitud nii, et olla maksimaalselt lähedalt sammule 5/6, mis on üldiselt kõige eelistatav suhteline mähisesamm kolmefaasilise masina projekteerimisel. [9]

3.2.5. Mähisetegur

Veel üks mõiste, millega tuleb arvestada generaatori disaini loomisel on mähisetegur. Kuna magnetvoog, mis aheldab mähist, ei löiku kõikide mähistega samaaegselt vaid teatud faasi nihkega, siis mähise elektromotoorjõud arvutatakse läbi mähiseteguri k_{wv} (ingl. *winding factor*). Mähisetegur näitab samuti ka mähise võimekust tekitada harmoonikuid. Mähiseteguri jaotatakse kolme tüüpi: jaotustegur (ingl. *distribution factor*), kõõlutegur (ingl. *pitch factor*) ja kaldetegur (ingl. *skewing factor*). Kuna antud lõputöös kõik staatori uurded on paralleelsed staatori südamikuga, siis viimast mähisetegurit ei arvesta. Harmooniku v mähiseteguri valem avaldub järgmisel kujul

$$k_{wv} = k_{p_{wv}} k_{d_{v}} = \frac{2 \sin\left(v \frac{W \pi}{\tau_p 2}\right) \sin\left(\frac{v \pi}{m 2}\right)}{\frac{Q}{m p} \sin\left(v \pi \frac{p}{Q}\right)} \quad (3.6)$$

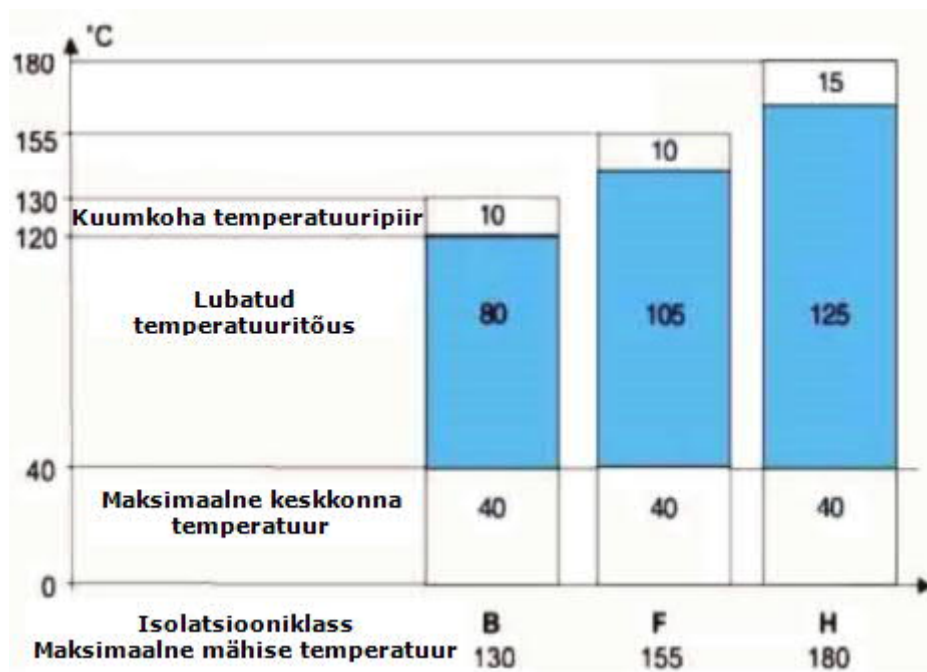
Kus k_{wv} – mähisetegur

k_d – jaotustegur

$k_{p_{w}}$ – kõõlutegur

3.2.6. Temperatuuritõus

Elektrimasina kaod väljenduvad masina temperatuuritõus ja nagu oli enne mainitud, temperatuuritõusu ja elektrimasina eluea vahel eksisteerib pöördvõrdeline sõltuvus. (vt. ptk. 6) Seega generaatori projekteerimisel tuleb arvestada ka temperatuuritõusuga, mis tekib masina talitlusel kõikide kadude tõttu. Antud töös oli vaadeldud sünkroongeneraatori disainid F temperatuuritõusu piirile. Elektrimasina temperatuuritõus $\Delta\theta$ on jahutuskeskkonna ja masina temperatuuride vahe mis on tingitud elektrimasina kadude poolt, mis tekivad masina nimikoormusega talitlusel. IEC standard spetsifitseerib isolatsiooniklasside maksimaalsed lubatud temperatuurid, mida erinevate isolatsioonmaterjalid peavad vastu pidama ja mis on näidatud joonisel 3.7. [7]



Joonis 3.7. IEC 60034-1 Isolatsioonide klassid ja vastavad temperatuuritõusude piirid [25]

3.3. T1 ja T2 sünkroongeneraatorite tehnilised parameetrid

Vaadeldud generaatorite tüüpilised parameetrid on toodud koondtabelis 3.2. Sealt saab näha põhilist infot sünkroongeneraatoritest nagu pinge, vool, võimsus, IP- ja IC-klass, temperatuuritõusu klass jne.

Tabel 3.2. Lõputöös vaadeldud sünkroongeneraatori põhiparameetrid

Parameeter	T1 parameetrid	T2 parameetrid
Võlli kõrgus	560 mm	630 mm
Raami pikkus	1000 – 2700 mm	1200 – 3000 mm
Magnetahela pikkus	300 – 1000 mm	550 – 1500 mm
Paralleelharude arv staatoris	1, 2, 4	1, 2, 4, 5, 6
Keerdude arv staatori uurdes	4 – 22	4 – 26
Uurete arv staatoris	66 – 102	66 – 120
Urde laius	10 – 17 mm	10 – 20 mm
Urde kõrgus	35 – 66 mm	35 – 72 mm
Näivvõimsus	1000 – 6000 kVA	1300 – 8000 kVA
Sagedus	50 / 60 Hz	50 / 60 Hz
Nimipinge	3,3 – 15 kV	3,3 – 15 kV
Võimsustegur	0,8	0,8
Jahutussüsteemi tüüp	IC0A1 / IC8A1W7	IC0A1 / IC8A1W7
Temperatuuritõusu klass	F / B	F / B
IP-kaitseaste	IP23 / IP44 / IP54 / IP55	IP23 / IP44 / IP54 / IP55
Pooluste arv	4 – 8	4 – 10
Suhteline mähisesamm	5/6	5/6
Keskmine generaatori kasutegur	96 - 98 %	96 - 98 %

Antud töös optimeeritakse aktiivkomponentide kogust staatorimähise-, urde disaini ja südamikü pikkuse muutuste abil. Optimeerimise eesmärgiks on parendada masina kasuteguri samaaegselt vähenedes masina aktiivmaterjali kulu. Aktiivmaterjali koguse vähendamine hinnatakse kaalu ja hinna järgi. Saadud tulemuste põhjal saab ka hinnata optimeeritud disainide mõju süsihappegaasi väljaheidetele.

4. OPTIMEERI MI STARKVARA

Tänapäeval paljud optimeerimisprobleemid vajavad simulatsiooni tarkvara kasutamist, mis sisaldab lõplike elementide meetodi LEM (ingl. *FEM - finite element method*), arvutusvedeliku dünaamika (ingl. *CFD - computational fluid dynamics*) lähenemist, mittelineaarsete võrrandisüsteemide lahendamist jne. Vaatamata sellele, et eksisteerib lai meetodite valik mitme eesmärgi optimeerimis probleemide lahendamiseks, siis kasutaja sõbralik ja hästi testitud optimeerimistarkvara valik on suhteliselt väike. Paljud lahendused on mõeldud akadeemiliseks kasutuseks, seega nende olemasolu pole nii hästi reklaamitud nagu võiks olla. [10, 15]

Enamus mitme eesmärgi optimeerimistarkvara kuulub otsuse tegemise abistava tarkvara DSS hulka (ingl. *DSS – decision support system*), mille eesmärk on abistada kasutajat otsustuse protsessis, seega muuta otsustaja tööd probleemi lahendamisel tõhusemaks. DSS tavaliselt koosneb mudelist, optimisaatorist (ingl. *optimizer*) ja kasutajaliidest. Viimane seob omavahel mudelit, optimisaatorit ja kasutajat. Mudeli all mõeldakse matemaatilist algoritmi, andmejuhtimist (ingl. *data management*) ja kasutajaliidest. [10]

Võibolla üheks tuntuimaks optimeerimistarkvara tootja võiks olla MATLAB. On olemas veel sellised kommertstarkvarad nagu OPTIMUS, modeFRONTIER, optiSLang ja teised. Kui rääkida akadeemilisest tarkvarast, siis võib tuua näidiseks Jyväskylä ülikooli mitme eesmärgi optimeerimis grupi poolt loodud optimeerimistarkvara IND-NUMBUS. [29, 30, 31, 32, 33]

4.1. Optimeerimistarkvara kirjeldus

Antud lõputöös oli kasutatud elektrimasinate projekteerimise tarkvara, mille alla kuuluvad mitmeid analüüsi programmi, mis põhinevad LEM-il. Vaatamata sellele, et kõik alamprogrammid kasutavad erinevaid arvutusmeetodeid, kõik sisendid ja väljundid käsitletakse samal viisil, s.t. sisendid ja väljundid on samad. See omadus annab võimalust muuta sisendandmed vastavalt ettekirjutatud reeglitele (algoritmile) ja pärast analüüsida saadud tulemusi harilikul kujul. Sellel tarkvaral on olemas optimisaator, mida saab kasutada mitme eesmärgi optimeerimis probleemide lahendamiseks. Optimisaator annab võimalust kasutada erinevaid EA, kuid antud töös oli kasutatud mitme eesmärgi evolutsiooniline algoritm SPEA2. Reaalses maailmas enamuses juhtudest on kaks või rohkem eesmärki, mida oleks vaja saavutada optimeerimise tulemusena ning mitme

eesmärgi optimeerimis evolutsioonide algoritmide kasutades, seda võib saavutada (vt. ptk. 2.4). Eduka simulatsiooni tulemuseks loetakse Pareto optimaalne piir, mis tähendab, et simulatsiooni lõpus tekib mitte üks vastus küsimusele vaid mitu ning pärast saab neid võrrelda. Võrdlemise käigus kontrollitakse tulemuste vastavus algsetele eesmärkidele ja kõikide disainide vahel valitakse kõige optimaalsema disaini.

Optimeerimistarkvara on kasutajasõbralik ja on lihtsasti arusaadav elektriinseneridele, kes töötasid peaprogrammiga, mille alla kuulub optimisaator. See on tingitud sellega, et optimisaator võtab, muudab ja kombineerib neid andmeid, mis on esitatud peaprogrammis ning analüüsib neid samas formaadis, seega see ei tekita mingeid takistusi arusaamiseks kasutajale.

4.2. Eesmärgid, piirangud ja muutujad

Enne simulatsiooni saab optimisaatoris määrata järgmiseid põhiparameetreid: eesmärgid, piirangud ja muutujad. Eesmärgid on nimikiri parameetritest, mida tarkvara hakkab kas suurendama või vähendama. Näiteks, pannes eesmärgiks suurendada kasutegurit programm hakkab muutma ja arendama elektrimasina disaini etteantud suunas, et masina kasutegur kasvaks ja saavutaks maksimaalse võimalikke väärtuse. Kuna tegemist on mitme eesmärgi optimeerimistarkvaraga, siis eesmäärke ise võib olla rohkem kui üks. Eesmärkide arv ei ole piiratud, kuid selle arv tihti peale ei ületa kolme eesmärki. MOEA põhimõte seisneb selles, et leida need väärtused mis osutuksid positiivseks iga eesmärgi jaoks.

Nii nagu reaalses maailmas mõned väärtused ei tohi ületada teatud limiiti, siis optimisaator lubab üles seada piirväärtused valitud parameetritele. Näiteks magnetvoo tihedus elektrimasina mingis osas ei tohi ületada teatud väärtust, et elektrimasin ei küllastuks üle normi, mis võib põhjustada magnetahela takistuse kasvu, lisakadude tekitamist ning põhjustada üleliigse temperatuuritõusu. Piirangud optimisaatoris võib kasutada mitte ainult reaalsete piirangute määramiseks, vaid ka info kogumiseks. Kuna kõik piirangute väärtused salvestatakse simulatsiooni tulemustega kausta, siis juhul kui kasutaja soovib koguda andmeid mingite parameetrite kohta on tal võimalus lisada need parameetrid piirangute hulka ja seadistada nende väärtused nii, et need realselt ei piiraks midagi. Saadud väärtusi saab analüüsida nii optimisaatori tulemuste analüüsimise tarkvaras, kui ka Excelis, sest iga simulatsiooni tulemused alati salvestatakse .csv failina. Antud lõputöös tulemuste analüüs, töödeldus ja võrdlus oli teostatud Excelis majandusliku ja keskkonna mõju hindamiseks.

Muutujad on need parameetrid, mida optimisaator hakkab muutma simulatsiooni jooksul. Muutuja võib olla kolme erineva tüübiga, mida määrab kasutaja: lineaarne, nimekiri ja perioodiline. Lineaarsele muutujale saab määrata lubatud väärtuste vahemikku ning sammu. Lineaarseks muutujaks kuulub näiteks uurde laius, mille jaoks võib määrata, et südamikus uurde laius on 10 mm, maksimaalne – 15 mm ja samm on 0,5 mm. Nimekirjaga muutujale saab määrata konkreetseid väärtusi. Seda tüüpi muutujat tavaliselt kasutatakse selliste parameetrite puhul, mille numbrilised väärtused ei oma mingit reaalsust, näiteks elektrotehnilise terase tüüp või temperatuuritõusu klass. Paralleelharude arv on hea näide perioodilise muutuja kirjeldamiseks. Juhul kui tegemist on masinaga kümme poolustega, siis lubatud paralleelharude arv on 1, 2, 5 ja 10. Ja perioodilise muutuja puhul optimisaator lubab sisestada konkreetseid muutujad (mitte väärtuste vahemik nagu lineaarse muutuja puhul), mida kasutatakse itereerimisel.

4.3. Optimisaatori töörežiimid

Optimisaator saab töötada kahes režiimis: evolutsioon- ja sundrežiimis, kuid antud lõputöös oli vaadeldud ainult evolutsioonirežiim. Esimene režiim arvutab etteantud variatsioonide arvu (populatsiooni suurus) ja siis põhinedes tulemustele ta valib ja muudab arvutatud disainid järgmiseks vooruks (generatsioonide arv). Populatsiooni suurus on fikseeritud ja peab sõltuma kombinatsioonide arvust, mis sõltud muutujate arvust. Rusikareegel ütleb: mida rohkem muutujaid kasutaja soovib kasutada, seda suurem peab olema populatsiooni suurus selleks et rohkem võimalikke kombinatsioone oleks läbi arvutatud. Suure populatsiooni puhul arvutus võtab aga rohkem aega, millega tuleb arvestada projekti raames.

Praegu optimisaator ei paku võimalust teha masskalkulatsiooni. See tähendab, et juhul kui kasutajal on olemas terve nimekiri masinatest, mille disaini ta peaks üle vaatama ja võimalus optimeerida, siis ta peab tegelema iga masina optimeerimisega ükshaaval.

4.4. Arvutusprofiil

Optimisaatori jaoks ei oma tähtsust milline baasprogramm on kasutatud kombinatsioonide läbi arvutamiseks. Tähtis on see, et kõik muutujad, piirangud ja eesmärgid oleksid arvutatud. Kasutatud analüütiline programm on kiire, mille arvutus võtab millisekundid. Mainitud analüütilise programmi puudusteks võib tuua järgmised nüansid: analüütilised programmid annavad head tulemused selliste juhtumite puhul mille arvutamiseks nad on mõeldud, vastasel juhul kui muutujate arv on liiga suur, siis simulatsioon võib lõpetada mugavustsooni väljaspool ja sel juhul simulatsiooni tulemused pole enam piisavalt usaldusväärsed. Mõned analüütilised programmid jooksvad kokku siis, kui disaini mõõdud ei vasta n.ö. „normidele“. Näiteks kui staatori hammas on liiga kitsas. Selleks, et vältida sellist olukorda kasutaja peab looma disaini kontrolli reeglid ehk valideerimis profiili (ingl. *validation profile*), mille abil programm välistab ebareaalsed kombinatsiooni tulemused lõpptulemusest. Enamuste simulatsioonide jaoks kasutatakse LEM baasprogrammina.

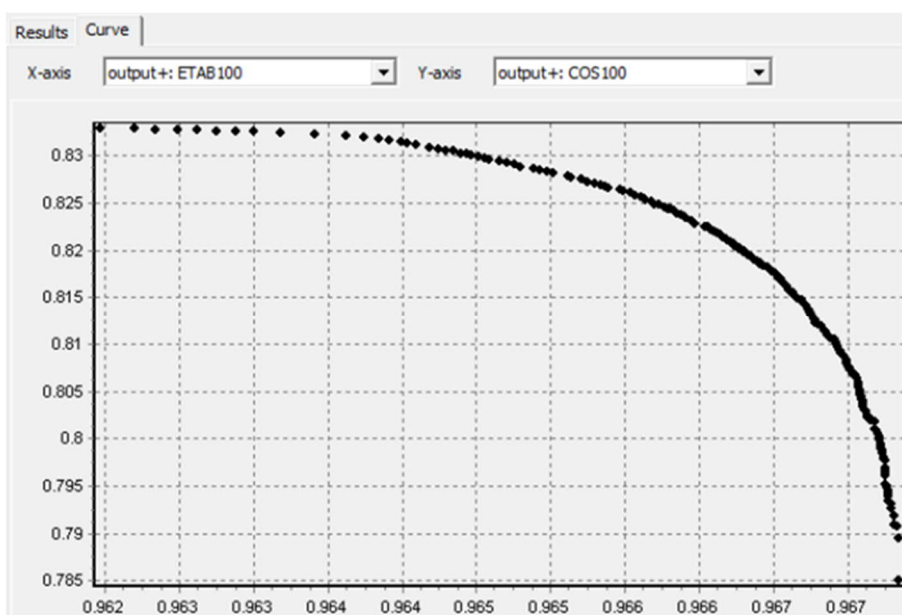
Juhul kui simulatsiooni muutujana kavatakse kasutada staatori südamikü pikkust, siis tuleb tagada, et staatori- ja rootori südamikü pikkused oleksid võrdsed omavahel. Selleks tuleb kasutada valideerimisprofiili, kuhu tuleb kirjutada ette kõik valemid ja seosed, mis on sarnased eeltoodud näitega: uurete laius sõltuvalt mähiste isolatsiooni klassist, staatori sisediameeter sõltuvalt rootori välisdiameetrist jne. Reeglid vormistatakse valemi kujul, näiteks $A04 > B02$. Valideerimis profiili üheks eeliseks on see, et seda saab salvestada, redigeerida ja kasutada korduvalt erinevates simulatsioonides. Valideerimis profiilide arv pole piiratud.

Optimisaator lubab jätkata varem peatatud simulatsiooni. Populatsioonide arv on suurus, mis määrab kui palju erinevaid variante programm arvutab läbi ühe generatsiooni jooksul. Seepärast võrreldakse simulatsiooni tulemused vastavalt seatud eesmärkidega ning järgmisel generatsioonis muudetakse parameetrid nii, et läheneda eesmärkidele ja saada paremad tulemused. Generatsioonide arv näitab mitu vooru tuleb ära teha enne kui lõpetada simulatsiooni. Populatsioonide arv on see väärtus, mida ei saa enam muuta juhul kui kasutaja soovib jätkata simulatsiooni pärast. See parameeter peab olema valitud nii, et programm saaks läbi arvutada võimalikult palju kombinatsioone ning samal ajal ei kulutaks päevi ühe generatsiooni arvutamiseks (muidu see sõltub simulatsiooni eesmärkidest ja ajapiirangust). Generatsioonide arv on see parameeter, mida saab muuta ka pärast simulatsiooni peatumisest. See annab võimaluse teha väike arvu generatsiooni, mis ei võta palju aega, ning juhul kui kasutaja on rahul saadud tulemustega esimeste generatsioonide jooksul ta võib lisada

generatsioonide arvu või vastasel juhul kui tulemused ei vasta kasutaja ootustele ta saab muuta sisend parameetrid ja säästa enda aega.

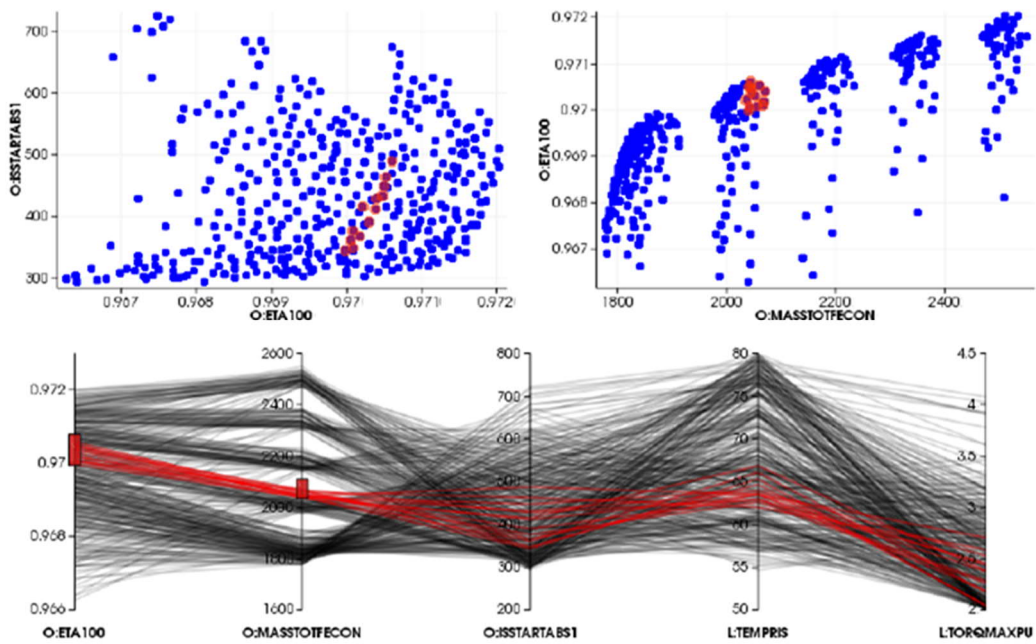
4.5. Tulemuste analüüs

Kui optimeerimine on lõppenud, siis on õige hetk vaadata läbi simulatsiooni tulemusi. Mitme eesmärgi optimeerimise põhimõte on selles, et lõpptulemuseks saadakse mitte üks vastus, vaid mitmeid tulemusi mida tuleks analüüsida ja valida nende seast parim variant konkreetses olukorras. Juhul kui simulatsiooni eesmärgiks oli ainult kaks parameetrit, siis sellise simulatsiooni tulemusi saab vaadata 2D graafikul kasutades optimeerimistarkvara tulemuste vaatlejat (ingl. *result viewer*), mis on ka näidatud joonisel 4.1. Kuna kõik simulatsiooni tulemused salvestatakse eraldi failis, siis kasutaja saab tulemuste vaatlejas ise valida mille simulatsiooni tulemusi ta tahab vaadata.



Joonis 4.1. Optimeerimistarkvara tulemuste vaatleja

Detailse andmete analüüsiks tulemusi saab vaadata ka optimeerimistarkvara tulemuste vaatleja abil. Lisaks tulemuste visualiseerimiseks ta annab võimalust ka avada suvalise .csv laiendusega faili ja analüüsida teiste simulatsiooni tulemusi. Andmed optimeerimistarkvara tulemuste vaatlejas on kujutatud nii nagu on näidatud joonisel 4.2.

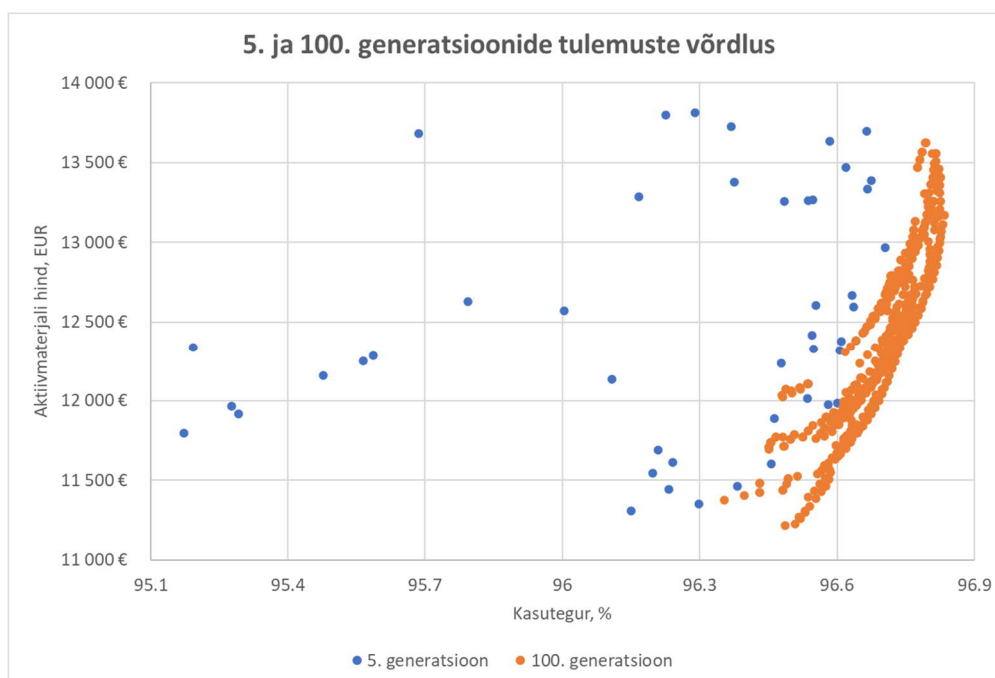


Joonis 4.2. Sisendite ja väljundite analüüs optimeerija tulemuste vaatleja abil

Antud tarkvara on sobilik püstitatud eesmärgi saavutamiseks, kuid siin juures tuleb arvestada, et optimeerimistarkvara annab alati tulemuse sõltuvalt sisendist, mida määrab kasutaja. Seega tuleb väga hoolikalt valida sisend andmed, et nemad võimaldaksid saada oodatavat tulemust. Lisaks ei piisa ainult tarkvarast, vaid on vajalik ka hilisem andmete järel töötus, et leida kasutajale sobiv tulemus.

5. GENERAATORI OPTIMEERIMINE

Antud lõputöö käigus oli kokku optimeeritud 181 erinevate sünkroongeneraatorite disaini, millest 49 disaini oli T1 masina tüübi omad ja 132 disaini - T2 masina tüübi vastavalt. Igas simulatsioonis oli kokku 100 generatsiooni populatsiooni arvuga - 500. Joonisel 5.1 on näha saadud tulemused 5. ja 100. generatsioonil. Joonisel on hästi näha EA toimimise printsiip, kus sõltuvalt eesmärkidest valitakse ainult tugevamad individid ning nemad osalevad loomuliku valiku protsessis ning arenevad geneetiliste operaatorite mõjul. Samuti, on näha et Pareto optimaalsed lahendused keskenduvad paremas alumises nurgas, mis vastab „Max – Min“ graafikule, mis oli näidatud joonisel 2.4.



Joonis 5.1. 5. ja 100. generatsioonide tulemuste võrdlus

Kõikides simulatsioonides optimeerimiseesmärkideks oli minimeerida kogu aktiivmaterjali kaalu ning maksimeerida kasutegurit nimivõimsusel, mis on ka välja toodud tabelis 5.1.

Tabel 5.1. Optimeerimise eesmärgid

Parameeter	Kirjeldus	Eesmärk	Mõõteühik
<i>Eff100</i>	Kasutegur nimivõimsusel	Maksimeerida	%
<i>Mass_Tot</i>	Kogu aktiivmaterjali kaal, kg	Minimeerida	kg

Lõpptulemuseks oli vaja saada Pareto optimaalse frondi ning võrrelda originaalse generaatori disaini 1) kõige parima kasuteguriga disainiga muutmata magnetahela pikkusega (võrdlus 1) ja 2) kõige parima kasuteguriga disainiga saadud simulatsiooni tulemusel (võrdlus 2). Esimene võrdlus on vajalik selleks, et vaadata kuivõrd saab parendada olemasolevad disainid ilma magnetahela pikendamiseta, kuna sellega reeglina kaasneb aktiivmaterjali kulu kasv. Teise võrdlusega on võimalik hinnata, mis on kasuteguri kasvamise potentsiaal magnetahela pikendamise puhul. Selleks, et hinnata majandusliku mõju disainide optimeerimisel, siis aktiivmaterjali kogus oli konverteeritud kilogrammidest eurodeks. Arvutustes oli kasutatud vasehind 2020. a keskmised vase- ja elektrotehnilise terase hinnad, mis on 5,42 €/kg ja 0,75 €/kg vastavalt. [26, 27]

Kuna optimeerimistarkvara lubab kasutada eelnevalt määratud valemite parameetrite modifitseerimiseks, siis antud lõputöös oli etteantud kokku ainult kuus muutujat, mis on näidatud ka tabelis 5.2: staatori paralleelharude arv a , keerdude arv uurdes, uurete arv staatoris Q , uurde mõõdud ja südamik pikkus. Sõltuvalt mainitud muutujate väärtustest ning muudest parameetritest läbi ettekirjutatud valemite kaudu muutusid ka sellised parameetrid nagu isolatsioonikihi paksus, vasejuhtme mõõdud, suhteline mähisesamm, mähisetegur ja õhutuskanalite arv.

Tabel 5.2. Muutujad

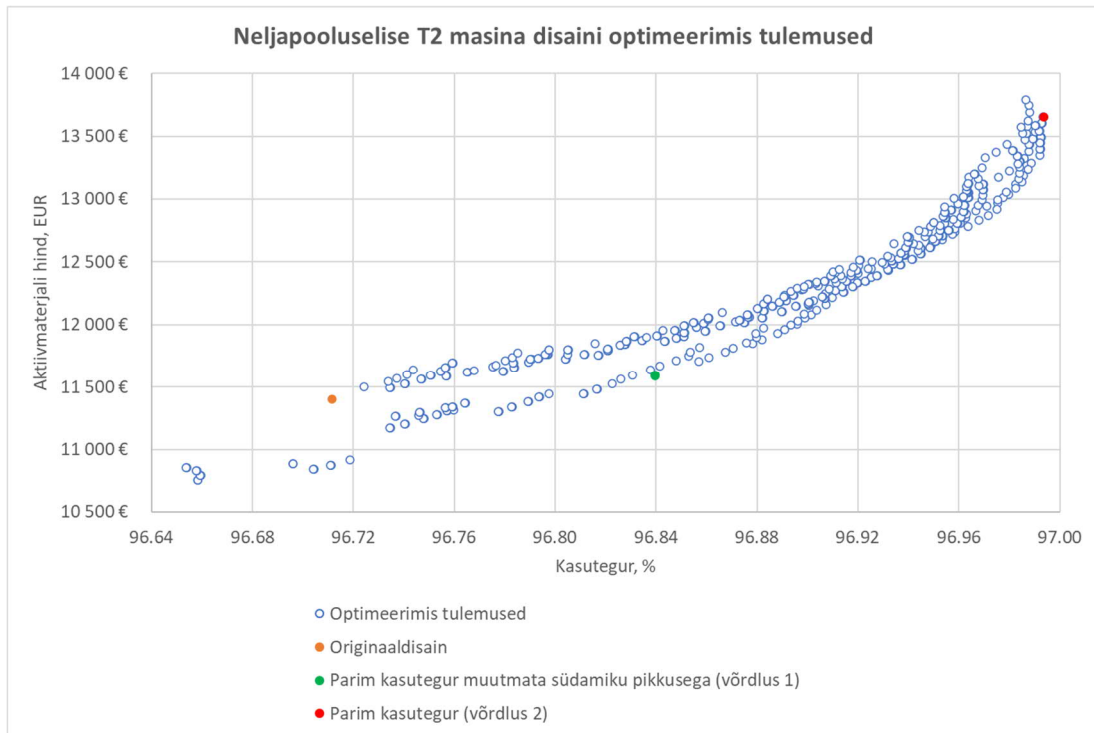
Parameeter	Kirjeldus	Mööteühik
a	Staatori paralleelharude arv faasi kohta	tk
$Cond_Num$	Keerdude arv staatori uurdes	tk
Q	Uurete arv staatoris	tk
$Slot_W$	Uurde laius	mm
$Slot_H$	Uurde kõrgus	mm
$Core_L$	Magnetahela aktiivosa pikkus	mm

Selleks, et saada usaldusväärseid tulemusi olid kehtestatud piiranguid, mis puudutavad temperatuuritõusu, mähise lauposa pikkust ja kõrgust. Mõned piiranguid olid etteantud valemitega, näiteks et ülemises ja alumises mähise kihis uurdes keerdude arv oleks täisarv, staatori- ja rootori südamik pikkused peavad olema omavahel võrdsed. Tabelis 5.3 on toodud piiranguid, mille eesmärk on elimineerima ebasoovitavad individid simulatsioonist ja saada usaldusväärset tulemust.

Tabel 5.3. Piirangud

Parameeter	Kirjeldus	Piirang	Mööteühik
St_T	Staatori keskmine temperatuuritõus	$\leq F$ temperatuuritõusu limiit	K
Rt_T	Rootori keskmine temperatuuritõus	$\leq F$ temperatuuritõusu limiit	K
$EndWind_L$	Mähise lauposa pikkus	$<$ Raami pikkus ja isolatsioonivahe	mm
$EndWind_H$	Mähise lauposa kõrgus	$<$ Raami kõrgus ja isolatsioonivahe	mm

Simulatsiooni lõpus saadud tulemused olid konverteeritud .xlsx laiendusega failiks ning edaspidine tulemuste analüüs toimus Excelis. Antud töö raames suurima huvi pakkus kõige viimane ehk 100. generatsioon, kuna viimase generatsiooni populatsioon peab sisaldama kõige optimaalsed individid. Sorteerides välja kõige suurema kasuteguriga masina disaini sama magnetahela pikkusega nagu originaal disainil (võrdlus 1) ning seepärast ka kõige suurema kasuteguriga masina disaini populatsioonis (võrdlus 2) oli võimalik kanda saadud tulemused hajuvusdiagrammile. Hajuvusdiagramm on mugav meetod saadud tulemuste visuaalseks hindamiseks. Samuti hajuvusdiagrammilt on näha, kas oli saavutatud Pareto optimaalne piir või mitte. Kui Pareto optimaalne piir pole saavutatud, siis tuleb kontrollida, kas kõik sisendid on õigesti määratud ning samuti vaadata piirangud üle. Joonisel 5.2 on näidatud neljapooluselise T2 masina optimeerimis tulemused. Joonisel 5.2 on näha, et Pareto optimaalne piir on saavutatud ning masina disain võib olla optimeeritud. Samuti, jooniselt on selgelt näha, ilma et peaks oluliselt muutma masina disaini (võrdlus 1) on võimalik saavutada 12,82% kasvu mille juures hind tõuseks ainult 1,66%. Muutes aga masina aktiivosa pikkus (võrdlus 2) on olulisel määral võimalik masina kasutegurit suurendada 28,21% kuid selle juures tuleb arvestada, et ka masina hind läheb oluliselt kallimaks 19,75%. Järgnevates peatükkides vaadatakse detailsemalt milliseid muudatusi optimeerimis tulemused masina disainis kaasa töid.



Joonis 5.2. Hajuvusdiagramm neljapooluselise T2 masina disaini optimeerimis tulemustega

Edasine analüüs toimus Excelis, kus põhilised originaaldisaini ja optimeeritud disainide parameetrid olid võrreldud omavahel. 181 disainist polnud ühtegi, mida poleks võimalik optimeerida kasuteguri ja aktiivmaterjali kulu suhtes, kuna kõikide muude disainide puhul oli saadud sarnase mustriga hajuvusdiagrammid. Viimane kinnitab, et on võimalik valmistada paremaid masinaid.

6. TULEMUSTE ANALÜÜS

Optimeeritud T1 ja T2 sünkroongeneraatorite tulemuste analüüsil põhiline tähelepanu oli pööratud parameetritele, mis on toodud tabelis 6.1.

Tabel 6.1. Tulemuste analüüsil vaadeldud parameetrid

Parameeter	Kirjeldus
a	Staatori paralleelharude arv faasi kohta
$Cond_Num$	Keerdude arv staatori uurdes
Q	Uurete arv staatoris
$Slot_W$	Uurde laius
$Slot_H$	Uurde kõrgus
$Core_L$	Magnetahela aktiivosa pikkus
$Cond_W$	Juhtme laius
$Cond_H$	Juhtme kõrgus
St_T	Staatori keskmine temperatuuritõus
Rt_T	Rootori keskmine temperatuuritõus
A_Cu_St	Staatori mähise vase efektiivne ristlõike pindala
J_St	Voolutihedus staatori mähises
$Eff100$	Kasutegur nimivõimsusel
Mat_Cost_Tot	Kogu aktiivmaterjali hind

6.1. T1 masina optimeerimis tulemuste analüüs

Edasi vaadatakse läbi optimeeritud T1 masina disainide tulemused. Kõik väärtused on keskmised väärtused, kuna pole mõistlik vaadata läbi antud lõputöö raames kõik disainid eraldi seoses suure andmete mahuga. Edasi autor toob välja kalduvused, mis olid avastatud T1 optimeerimis tulemuste analüüsimisel.

Kui vaadata tulemusi sama staatori- ja rootori südamikuga (võrdlus 1) tabelis 6.2, siis sealt on näha, et staatori mähise disainis muutus keerdude arv staatori uurdes. Kui vaadata neljapooluseliste T2 masinate disaini muutused, siis seal keskmine uurete arv suurenes, millega kaasnes uurde laiuse ja kõrguse vähenemine (8% ja 2,19% vastavalt). Juhtme laius vähenes samuti 10,7% võrra, mis on tingitud uurde laiuse vähenemisega, kuid mähise kõrgus suurenes 11,89% võrra. Viimane on seotud keerdude arvu vähenemisega, mis lubab kasutada kõrgemaid juhtmeid. Vaatamata

sellele, et staatorimähise vase efektiivne ristlõike pindala vähenes 3,08% võrra, tänu uurete arvu suurenemisele voolutihedus juhtmes vähenes peaaegu 10% võrra, mis mõjutas positiivselt staatori temperatuuritõusule. Optimeeritud disainil staatori temperatuuritõus on 11,54% väiksem kui originaaldisainis. Neljapooluseliste masinate kasutegur paranes keskmiselt 0,09% võrra samaaegselt vähenedes aktiivmaterjali kulu 6,36% võrra.

Vaatamata sellele, et kuuepooluselistel T1 masinatel uurde kõrgus suurenes, juhtme kõrgus vähenes. Viimane on tingitud lisatud keerdude arvult staatoris, kuna keerdude arvu lisamisel vase kõrgus ei saa jääda samaks. Kuid tänu märgatavale juhtme laiuse kasvule lõppkokkuvõttes staatorimähise vase efektiivne ristlõike pindala suurenes 16,54% võrra, millest tuleneb staatorimähise voolutiheduse vähenemine.

Tabelis 6.2 on toodud T1 kalduvused disainide muudatuses muutmata südamikü pikkusega (võrdlus 1). Kõigepealt tuleb vaadata neljapooluselise T1 disaini muudatusi. Uurete arvu suurenemise puhul tavaliselt uurete mõõdud vähenevad. See on seotud osaliselt asjaoluga, et suure uurete arvuga väheneb staatori hammaste mõõdud, mis suureneb magnetvoo tihedust. Kõrge magnetvoo tiheduse puhul suurenevad rauaskaod magnetahelas, mis eralduvad soojusena ning avalduvad negatiivset mõju kasutegurile. Seega see on loogiline, et neljapooluselisel T1 optimeeritud masinal uurete arvu suurenemisel - uurete mõõdud vähenevad. Selleks, et leevendada uurde ja juhtme mõju voolutihedusele, efektiivkeerdude arv staatori mähises oli samuti vähendatud 2 keerdu võrra. Kuna keerdude arv uurdes vähenes, siis see lubas suurendada juhtme kõrgust ja lõppkokkuvõttes voolutihedus staatorimähises, mis omakorda vähendab vaseskaod staatoris.

Kuuepooluselise T1 masina puhul uurete arv staatoris jäi samaks, kuid uurete mõõdud suurenesid. Vaatamata uurete mõõtude suurenemisele, juhtme mõõdud vähenesid, aga see on tingitud keerdude arvu suurenemisest uurdes. Summeerides kõikide muudatuste mõju staatori mähise vase efektiivne ristlõike pindala suurenes. Kuna vase efektiivne ristlõike pindala ja voolutiheduse vahel vastavalt valemile 3.1 eksisteerib pöördvõrdeline seos, s.t. et antud juhul voolutihedus juhtmes väheneb ja kasutegur suureneb vaseskadude vähenemise arvelt.

Kaheksapooluselise masina optimeeritud tulemuste analüüsil on näha, et vaatamata märgatavale juhtme laiuse suurenemisele, jäi peaaegu samaks kuigi kasutegur paranes 0,10% võrra. Kasuteguri suurendus on seotud uurde kõrguse vähenemisega, mis omakorda väheneb ka rauaskaod magnetahelas.

Tabel 6.2. T1 masina mõõtude muutused vastaval optimeerimis tulemusele (võrdlus 1)

Parameeter	Keskmise väärtuse muutus		
	T1, 2p	T1, 3p	T1, 4p
<i>a</i>	0	0	0
<i>Cond_Num</i>	-2 tk	+2 tk	-2 tk
<i>Q</i>	Suurenes	0	0
<i>Slot_W</i>	-8,00%	+6,75%	+7,00%
<i>Slot_H</i>	-2,19%	+2,78%	-15,10%
<i>Core_L</i>	0 mm	0 mm	0 mm
<i>Cond_W</i>	-10,70%	+23,64%	+24,70%
<i>Cond_H</i>	+11,89%	-5,73%	-3,43%
<i>St_T</i>	-11,54%	-10,43%	+2,63%
<i>Rt_T</i>	+7,46%	+5,68%	+0,95%
<i>A_Cu_St</i>	-3,08%	+16,54%	-0,92%
<i>J_St</i>	-9,56%	-14,29%	-0,86%
<i>Eff100</i>	+0,09%	+0,15%	+0,10%
<i>Mat_Cost_Tot</i>	-6,36%	+0,48%	-7,11%

Paralleelharude lisamisel reeglina lisatakse ka keerdude arvud uurdes, kuna juhtme läbiva voolutugevus väheneb. Tabelis 6.3 toodud T1 masina mõõtude muutused vastaval optimeerimis tulemusele võrdluse 2 puhul kinnitavad seda. Kui vaadata neljapooluselise masina staatorimähise disaini, siis seal on näha paralleelharude- ja efektiivkeerdude arvu kasvu. Samas kaheksapooluselisel masinal paralleelharude vähenemisel kaasneb ka efektiivkeerdude arvu vähenemine.

Tabelis 6.3 näidatud neljapooluselisel masinal seoses uurete arvu suurenemisega uurde muutub kitsamaks. Sarnane kalduvus oli tabelis 6.2 toodud neljapooluselise masina puhul.

Kõikide disainide puhul võrdluses 2 südamikü pikkused olid maksimaalsed, kuna aktiivmaterjali koguse suurenemise puhul nii rauas- kui ka vaseskaod vähenevad. Nelja- ja kuuepooluselise masina puhul tänu uurde ja mähise disaini optimeerimisele voolutihedus ja seega ka vaseskaod vähenesid tunduvalt, mis põhjustas kasuteguri kasvu 0,26% ja 0,34% võrra vastavalt. Kaheksapooluselisel masinal staatorimähise vase efektiivne ristlõike pindala suurenes tagasihoidlikult, aga uurde kõrgus vähenes märgatavalt. Viimane vähendas rauaskaod magnetahelas staatorisüdamiku ruumala suurenemise arvelt, mis soodustas kasuteguri kasvu (vt. ptk. 1.3.2)

Tabel 6.3. T1 masina mõõtude muutused vastaval optimeerimis tulemusele (võrdlus 2)

Parameeter	Keskmise väärtuse muutus		
	T1, 2p	T1, 3p	T1, 4p
<i>a</i>	+1 tk	0	-1 tk
<i>Cond_Num</i>	+2 tk	+2 tk	-2 tk
<i>Q</i>	Suurenes	0	0
<i>Slot_W</i>	-2,00%	+9,00%	+10,00%
<i>Slot_H</i>	+18,03%	+5,01%	-15,10%
<i>Core_L</i>	+50 mm	+50 mm	+50 mm
<i>Cond_W</i>	-2,67%	+27,11%	+29,22%
<i>Cond_H</i>	-3,71%	-3,09%	+4,95%
<i>St_T</i>	-32,59%	-19,19%	-0,93%
<i>Rt_T</i>	+5,91%	-3,72%	-7,21%
<i>A_Cu_St</i>	+36,19%	+30,14%	+3,41%
<i>J_St</i>	-33,10%	-22,90%	-4,40%
<i>Eff100</i>	+0,26%	+0,34%	+0,22%
<i>Mat_Cost_Tot</i>	+8,44%	+7,61	-2,75%

Võrdluse 2 puhul (vt. tabel 6.3) võrdlemisel kõige parima kasuteguriga individid originaaldisainidega on näha sarnased tendentsid nagu võrdluse 1 puhul (vt. tabel 6.2). Siin aga on näha suuremat positiivset mõju kasutegurile (0,22-0,34% kasuteguri tõus) seoses suurema magnetahela pikkusega. Samas, seesama magnetahela pikendamine ning staatorimähise vase efektiivne ristlõike pindala suurenemine tekitab lisakulusid suuruses 8,44% neljapooluselise masina puhul ja 7,61% kuuepooluselise masina puhul.

6.2. T2 masina optimeerimis tulemuste analüüs

Käesolevas peatükis on väljatoodud 2, 3, 4 ja 5 pooluspaaride arvuga masinate optimeerimis tulemused.

Tabelites 6.4 ja 6.5 toodud tulemuste järgi võib teha järeldust, et kalduvused on sarnased T1 masina optimeerimis tulemustega. Võrdlus 1 puhul (vt. tabel 6.4) staatorimähise vase efektiivne ristlõike pindala suurendamine kas uurde kõrguse, laiuse või mõlema parameetri samaaegsel suurenemisel toimub märgatav voolutiheduse vähenemine. Voolutiheduse vähenemine tähendab, et vaseskadude arvelt tagatakse kasuteguri kasv. Uurete kõrguse kasvuga suurenevad kindlasti ka rauaskaod, aga

sellegipoolest mõju kasutegurile oli positiivne samas õnnestus vähendada aktiivmaterjali kulu.

Omaette optimeerimis lähenemine oli kümnepooluselisel masinal, kus põhirõhk oli tehtud mitte staatorimähise vase efektiivne ristlõike pindala suurendamisele vaid uurde kõrguse vähendamisele. Viimasega saab avaldada positiivset mõju kasutegurile, kuna uurde kõrguse vähenemisega kaasneb ka rauaskadude vähenemine.

Tabel 6.4. T2 masina mõõtude muutused vastaval optimeerimis tulemusele (võrdlus 1)

Parameeter	Keskmine väärtuse muutus			
	T2, 2p	T2, 3p	T2, 4p	T2, 5p
<i>a</i>	0	0	0	-2 tk
<i>Cond_Num</i>	0	0	0	0
<i>Q</i>	Suurenes	Vähenes	0	Vähenes
<i>Slot_W</i>	+2,00%	+9,80%	+9,03%	+18,47%
<i>Slot_H</i>	+7,28%	-2,02%	-5,20%	-5,63%
<i>Core_L</i>	0 mm	0 mm	0 mm	0 mm
<i>Cond_W</i>	+3,91%	+14,86%	+26,60%	+25,30%
<i>Cond_H</i>	-4,22%	-8,52%	-12,26%	-12,91%
<i>St_T</i>	-13,84%	-2,95%	-1,83%	-0,24%
<i>Rt_T</i>	+7,58%	+2,31%	+0,32%	-5,90%
<i>A_Cu_St</i>	+24,72%	+9,75%	+5,44%	-0,14%
<i>J_St</i>	-15,45%	-7,17%	-5,84%	0,35%
<i>Eff100</i>	+0,09%	+0,04%	+0,10%	+0,10%
<i>Mat_Cost_Tot</i>	-0,11%	-2,19%	-3,20%	-2,69%

Võrdluse 2 puhul (vt. tabel 6.5) staatorimähise efektiivne ristlõike pindala suurenemisele lisandub ka magnetahela pikendamine, mis parandab kasuteguri veel märgatavamalt kui võrdluse 1 juhul. Kuid magnetahela pikendamisega kaasneb ka aktiivmaterjali lisakulud, mille muutus neljapooluselise masina puhul koosneb 7,55% võrreldes originaaldisainiga.

Tabel 6.5. T2 masina mõõtude muutused vastaval optimeerimis tulemusele (võrdlus 2)

Parameeter	Keskmine väärtuse muutus			
	T2, 2p	T2, 3p	T2, 4p	T2, 5p
<i>a</i>	0	0	0	-2
<i>Cond_Num</i>	+2 tk	0	0	0
<i>Q</i>	Suurenes	Vähenes	Vähenes	Vähenes
<i>Slot_W</i>	+4,95%	+14,64%	+14,54%	+21,08%
<i>Slot_H</i>	+15,41%	+5,01%	+0,10%	-5,83%
<i>Core_L</i>	+50 mm	+50 mm	+50 mm	+50 mm
<i>Cond_W</i>	+8,01%	+21,85%	+35,00%	+28,88%
<i>Cond_H</i>	-8,00%	-4,18%	-3,97%	-13,18%
<i>St_T</i>	-24,69%	-12,62%	-8,65%	-2,54%
<i>Rt_T</i>	+3,98%	-2,04%	-3,42%	-12,16%
<i>A_Cu_St</i>	+45,34%	+25,40%	+20,88%	+2,57%
<i>J_St</i>	-27,49%	-19,83%	-16,09%	-2,19%
<i>Eff100</i>	+0,18%	+0,14%	+0,20%	+0,16%
<i>Mat_Cost_Tot</i>	+7,55%	+5,97%	+3,25%	-0,05%

6.3. Optimaalsete tulemuste mõju keskkonnale

Tänapäevane energeetika laias laastus põhineb fossiilkütustest saadava energia muundamisele elektrienergiaks ning selliste protsesside jooksul eralduvad kahjulikud väljaheidet atmosfääri. Kuna elektrimasinatel on väga suur roll energeetika valdkonnas nii elektrienergia genereerimisel kui ka tarbimisel, siis üks võimalikest meetmetest leevendada fossiilkütuste mõju meie keskkonnale on luua ja kasutada tõhusamaid elektrimasinaid, mille talitluskaod on minimeeritud. Üks vahend sünkroongeneraatorite ja muude elektrimasinate kasuteguri parandamiseks ongi välja toodud antud lõputöös. Vaadeldud sünkroongeneraatorid on ettenähtud töötamiseks diisलगeneraatorina, ehk siis paaris diiselmootoriga. S.t., et generaatori kasuteguri parandamisel sama sisendvõimsuse puhul genereeritakse rohkem elektrienergiat. Teiste sõnadega väljaheidete kogus toodetud elektrivõimsuse kohta väheneb.

Näiteks diiselmootori nimikoormusega 8924 kW *SFC* (ingl. *Specific Fuel Consumption*) on 202,6 g/kWh. Võttes arvesse, et 1 liiter diislikütusest on 835 g (sõltuvalt diisli tihedusest), siis CO₂ kogus diislikütuse liitri kohta on 2640 grammi ja kg kohta see number on 2204,4 g vastavalt. Selleks, et leida sellise diiselmootori kütuse

aastatarbimine (360 päeva, 24 tundi) nimikoormusel oli kasutatud järgmine valem: [23, 24]

$$\text{Diiselmootori kütuse tarbimine} = 8924 \text{ kW} \cdot 202,6 \frac{\text{g}}{\text{kWh}} \cdot 360 \text{ p} \cdot 24 \text{ h} \cdot 10^{-6} \approx 15621,14 \frac{\text{t}}{\text{a}} \quad (6.1)$$

Ning CO₂ aastane väljaheide on leitav valemi 6.1 läbi korrutamiselega süsihappegaasi osakaaluga 2204,4 g.

Arvestades ülaltoodud numbritega ja tuginedes peatükkides 6.1 ja 6.2 toodud kasuteguri muutmise dünaamikale saab välja arvutada kuidas generaatorite tõhususlikuks muutmine mõjutab CO₂ väljaheidete vähendamisele ja diislikütuse säästule. Tabelis 6.6 on näidatud kasuteguri paranduse mõju CO₂ kogusele, arvestades kõikide masinate tüüpe ilma südamikü pikkuse muutuseta (võrdlus 1) ja tabelis 6.7 koos südamikü pikkuse muutusega (võrdlus 2). Sealt on näha, et keskmiselt CO₂ väljaheidete aastane kogus vähenes 32,37 t/a võrra ja diislikütuse tarbimine 14,68 t/a võrreldes algsete disainidega võrdlus 1 puhul. Võrdlus 2 puhul CO₂ väljaheidete aastane kogus vähenes keskmiselt 66,12 t/a võrra ja diislikütuse tarbimine 29,99 t/a, arvestades diiselmootori nimivõimsuse 8924 kW, mille SFC on 202,6 g/kWh. SFC muutus oli arvatud välja järgmise valemiga:

$$\Delta SFC = SFC - SFC(1 - \Delta\eta), \quad (6.2)$$

Kus $SFC = 202,6 \text{ g/kWh}$

$\Delta\eta$ – kasuteguri parandamine võrreldes originaal disaini kasuteguriga, %

Tabel 6.6. T1 ja T2 võrdlus 1 kasuteguri paranduse mõju CO₂ kogusele ja kütuse aastatarbimisele. Aasta tarbimine oli arvestatud 360 päeva ja 24 tunniga. Soome diislikütuse liitri hind on 1,468 €/l. [28]

Simulatsioon	$\Delta\eta$, %	Aktiivmaterjali kulu, %	ΔSFC , g/kWh	ΔSFC , t/a	ΔSFC , €/a	ΔCO_2 , t/a
T1, 2p - V1	0,09	-6,36	0,18234	14,06	17444,58	30,99
T1, 3p - V1	0,15	0,48	0,3039	23,43	29074,30	51,65
T1, 4p - V1	0,10	-7,11	0,2026	15,62	19382,87	34,44
T2, 2p - V1	0,09	-0,11	0,18234	14,06	17444,58	30,99
T2, 3p - V1	0,04	-2,19	0,08104	6,25	7753,15	13,77
T2, 4p - V1	0,10	-3,20	0,2026	15,62	19382,87	34,44
T2, 5p - V1	0,10	-2,69	0,2026	15,62	19382,87	34,44
Keskmine	0,10	-3,03	0,19	14,95	18552,17	32,96

Tabel 6.7. T1 ja T2 võrdlus 2 kasuteguri paranduse mõju CO₂ kogusele ja kütuse aastatarbimisele. Aasta tarbimine oli arvestatud 360 päeva ja 24 tunniga. Soome diislikütuse liitri hind on 1,468 €/l. [28]

Simulatsioon	$\Delta\eta$, %	Aktiivmaterjali kulu, %	Δ SFC, g/kWh	Δ SFC, t/a	Δ SFC, €/a	Δ CO ₂ , t/a
T1, 2p - V2	0,26	8,44	0,52676	40,61	50395,46	89,53
T1, 3p - V2	0,34	7,61	0,68884	53,11	65901,75	117,08
T1, 4p - V2	0,22	-2,75	0,44572	34,37	42642,31	75,76
T2, 2p - V2	0,18	7,55	0,36468	28,12	34889,16	61,98
T2, 3p - V2	0,13	5,97	0,26338	20,31	25197,73	44,77
T2, 4p - V2	0,19	3,25	0,38494	29,68	36827,45	65,43
T2, 5p - V2	0,15	-0,05	0,3039	23,43	29074,30	51,65
Keskmine	0,21	4,29	0,4255	32,80	40704,02	72,31

Ülaltoodud andmete põhjal võib öelda, et mitme eesmärgi optimeerimise abil sünkroongeneraatorite disainid võivad olla optimeeritud ning nende disainide põhjal on võimalik valmistada paremaid masinaid. Disaini optimeerimine võrdluse 1 puhul võib keskmiselt säästa diislikütust väärtusega 18 552,17 € aastas (vt. tabel 6.6) ja võrdluse 2 puhul need säästused keskmiselt kahekordistuvad (vt. tabel 6.7). Optimeeritud disaini rakendamisel saab potentsiaalselt vähendada süsihappegaasi väljaheidete keskmist kogust 32,96 t/a ja 72,31 t/a vastavalt võrdlus 1 ja võrdlus 2 disainide puhul.

KOKKUVÕTE

Antud lõputöös oli vaadeldud sünkroongeneraatorite disaini optimeerimine kasutades MOEA eesmärgiga parandada kasutegurit ning vähendada aktiivmaterjali kulu.

Tegemist on väga aktuaalse temaga tänapäeval seoses pideva elektritarbimise kasvu ja järjekestva elektrifitseerimisega. Elektrimasinad toodavad ligikaudu 98% ja tarbivad rohkem kui pool kogu elektrienergiast. Kuna maailma energeetika on tihedalt seotud fossiilkütustega see avaldub negatiivset mõju keskkonnale ohtlike väljaheidete näol k.a. CO₂. Üheks võimaluseks leevendada mõju keskkonnale ning parandada elektrienergia tootmise tõhusust on optimeerida olemasolevad sünkroongeneraatorite disainid kasutades MOEA.

Esimeses peatükis tutvustatakse elektrimasinate tüübid ja räägitakse sünkroongeneraatoritest: elektrimasinate põhiülesanne, nende jaotus tüüpidesse, mehaanilised komponendid ning sünkroongeneraatori ülesehitusest ja rootori tüüpidest. Samas peatükis räägitakse ühest võtmeparameetrist nagu kasutegur ning selle arvutamisest. Seejärel toodetakse välja põhilised kaod, mis tekkivad elektrimasinate talitlusel milleks on: vaseskaod, rauaskaod, mehaanilised kaod ja lisakaod. Vastavalt kadude jaotuse diagrammile, mis on toodud joonisel 1.10, esimesed kaks kadude tüüpi moodustavad lõviosa kogukadudest, seega võib neid pidada ka üheks tähtsamateks kadudeks, mille vähendamine toob kaasa märgatava mõju kasuteguri kasvule.

Teises peatükis tutvustatakse sellised mõisted nagu mitme eesmärgi optimeerimine ja evolutsioonilised algoritmid ehk EA. Samuti, mainitud peatükis on toodud välja viis enim levinud EA, mida kasutatakse optimeerimises tänapäeval: NSGA-II, SPEA2, PAES, MOEA/D ja PESA.

Kolmandas peatükis on toodud välja antud lõputöös vaadeldud sünkroongeneraatori tehnilised parameetrid. Seal on tutvustatud erinevad jahutussüsteemid, nimiaandmed ning on näidatud ka tüüpilised vaadeldud sünkroongeneraatorite põhiparameetrid. Samuti, antud peatükis räägitakse parameetritest, mis olid optimeeritud simulatsioonide jooksul ja nende mõjust sünkroongeneraatorite disainile.

Neljandas peatükis räägitakse lähemalt optimeerimistarkvarast, mis oli kasutatud antud lõputöös sünkroongeneraatorite disainide optimeerimiseks. Viendas peatükis seletatakse mis eesmärgid oli vaja saavutada simulatsiooni tulemusena. Selles peatükis on välja toodud ka simulatsiooni muutujad ja piirangud.

Viimases ja kõige tähtsamases peatükis olid toodud välja simulatsioonide tulemused ning oli selgelt näidatud disainide arengu kalduvused. Samuti, seal on välja toodud ka optimeerimise mõju kasutegurile, aktiivmaterjali hinnale ja keskkonnale.

Lõputöö käigus tehtud optimeerimise simulatsioonide tulemusel selgus, et olemasolevad disainid võivad olla optimeeritud tõhususe parandamiseks nii vähenedes aktiivmaterjali hinda kui ka oluliselt parandada generaatorite kasutegurit aktiivmaterjali hinna suurendamisel. Samuti viimases peatükis on välja toodud kasuteguri parandamise mõju keskkonnale CO₂ väljaheidete koguse vähendamise arvelt ning ka majanduslik mõju diislikütuse säästu abil. Lõppkokkuvõttes, püstitatud lõputöö eesmärgid on saavutatud ning vajalikud väljundid edasiseks arenduseks on samuti saadud.

SUMMARY

In current thesis design of synchronous generators has been updated using MOEA to improve efficiency and at the same time decrease active material expenses.

Due to constantly increasing electrical energy consumption and consistent electrification current topic is extremely actual nowadays. Electrical machines are producing approximately 98% and are consuming more than half of all electricity. Since energy sector worldwide is dependent on fossil fuels, it has a significant negative impact on environment in the face of CO₂ emissions. One option to mitigate negative impact on environment and at the same time improve efficiency of power energy generation is to optimize existing designs of synchronous generators using MOEA.

In the first chapter electrical machine types are introduced and more detailed information regarding synchronous generators provided like electrical machines main task, mechanical components, synchronous generators construction and rotor types. Also, such vital parameter like efficiency and its calculation is discussed in current chapter. Thereafter main power losses types are presented: copper losses, iron losses, mechanical losses and additional losses. According to the power balance, that is shown on the drawing 1.10, first two of mentioned losses types are the lion's share of all losses. That means that copper and iron losses are the most important losses which decrease will have a significant impact on machine efficiency.

The second chapter is dedicated to multi-objective optimization and evolutionary algorithms or EA. Then the top 5 most widely spread EA are listed, that are used for optimization purposes nowadays: NSGA-II, SPEA2, PAES, MOEA/D and PESA.

In the third chapter are presented technical parameters of synchronous generators that have been reviewed in that thesis. Different types of cooling systems, ratings and typical parameters of synchronous generators are shown there. Also, in mentioned chapter are discussed parameters that have been optimized during simulation and their influence on machine design in general.

The fourth chapter introduces optimization software, that has been used in current thesis for design optimization of synchronous generators. Fifth chapter describes what objectives have been set to get required results. Therefore, simulation variables and constraints are also presented in this chapter.

In the most important last chapter are presented simulation results and design optimization tendencies are defined. Also, in this chapter is shown optimization impact on efficiency, active material cost and environment.

Optimization simulation results have shown that existing designs of synchronous generators could be optimized even more to improve efficiency along with active material costs decreasing and there is a room for more significant improvement of efficiency with increasing of active material costs. In the last chapter is presented what impact mentioned efficiency improvement could have on CO₂ emissions reduction and what financial influence improved efficiency will have through saved diesel fuel. In conclusion, all thesis goals were achieved and required outputs for future researches were received.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

1. А.И. Вольдек, В.В. Попов, Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы, Питер: 2008.
2. A.E. Fitzgerald, Charles Kingsley, Jr., Stephen D. Umans, Electric machinery, sixth edition, Boston: McGraw-Hill, 2003.
3. Tonysblog kodulehekülg. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://www.tonysblog.in/wp-content/uploads/2016/08/salient-pole-vs-nonsalientpole-1-728.jpg>. [Kasutatud 20. 01. 2021].
4. TES Vsetin kodulehekülg. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.tes.cz/wp-content/uploads/2018/06/Electrical-Components-Rotor.jpg>. [Kasutatud 20. 01. 2020]
5. DELOM Services kodulehekülg. [Võrgumaterjal]. https://delomservices.ca/wp-content/uploads/2018/02/shutterstock_155527595-Large.jpg. [Kasutatud 20. 01. 2020]
6. K. Janson, A. Kallaste, Elektrimasinate alused, Tallinn: TTÜ Kirjastus, 2017.
7. IEC 60034-30-1:2014
8. Siemens kodulehekülg – mootorite kasutegur. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://w3.siemens.com/drives/global/en/motor/low-voltage-motor/efficiency-standards/pages/line-motors.aspx>. [Kasutatud 13. 02. 2020]
9. J. Pyrhonen, T. Jokinen, V. Hrabovcová, Design of rotating electrical machines, Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2008.
10. F. S. Hillier, K. Miettinen, Nonlinear Multiobjective Optimization, Boston: Springer, 1998.
11. C. A. Coello Coello, Multi-objective Optimization, Springer International Publishing AG, 2018.
12. Siemens kodulehekülg – jahutussüsteemid. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://support.industry.siemens.com/cs/document/33386716/cooling-of-electrical-machines?dti=0&lc=en-DK>. [Kasutatud 19. 03. 2020]
13. Cutaway view of motor. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://i.pinimg.com/originals/25/c6/f4/25c6f437982433ddf06fd11707fdbc95.jpg>. [Kasutatud 22. 02. 2020]
14. Star and delta connections of stator winding. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://qph.fs.quoracdn.net/main-qimg-e11f98040c68f35a3d1cd631a1976404-c>. [Kasutatud 09. 05. 2020]
15. Kalyanmoy Deb, Multi-Objective Optimization using Evolutionary Algorithms, Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2001.

16. Eckart Zitzler, *Evolutionary Algorithms for Multiobjective Optimization: Methods and Applications*, Zurich: Swiss Federal Institute of Technology, 1999.
17. K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal, T. Meyarivan, "A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II", 2002. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://ieeexplore.ieee.org/document/996017>. [Kasutatud 03. 02. 2021].
18. Eckart Zitzler, Marco Laumanns, Lothar Thiele, *SPEA2: Improving the Strength Pareto Evolutionary Algorithm*, Zurich, Swiss Federal Institute of Technology, 2001.
19. Joshua D. Knowles, David W. Corne, "Approximating the Nondominated Front Using the Pareto Archived Evolution Strategy", 2000. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6787905>. [Kasutatud 16. 11. 2020].
20. Qingfu Zhang, Hui Li, "MOEA/D: A Multiobjective Evolutionary Algorithm Based on Decomposition", 2007. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4358754>. [Kasutatud 22. 11. 2020].
21. David W. Corne, Joshue D. Knowles, Martin J. Oates, "The Pareto Envelope-Based Selection Algorithm for Multiobjective Optimization", 2000. [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://link.springer.com/chapter/10.1007/3-540-45356-3_82. [Kasutatud 23. 02. 2021].
22. Abhishek Jain, Soniya Lalwani, Mahendra Lalwani, "A Comparative Analysis of MOPSO, NSGA-II, SPEA2 and PESA2 for Multi-Objective Optimal Power Flow", 2018. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8659054>. [Kasutatud 23. 02. 2021].
23. Ecoscore kodulehekülg. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://ecoscore.be/en/info/ecoscore/co2>. [Kasutatud 14. 03. 2021].
24. Udalamattha Gamage Kithsiri, "Performance Improvement of a Diesel Engine Power Plant with Optimal Utilization of Waste Heat", 2016. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:943568/FULLTEXT01.pdf>. [Kasutatud 14. 03. 2021].
25. AVSLD International kodulehekülg. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://avslid.com.sg/insulation-class-and-temperature-rise/>. [Kasutatud 21. 03. 2021].
26. LME kodulehekülg. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.lme.com/>. [Kasutatud 16. 04. 2021].
27. Asian Metal kodulehekülg. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://www.asianmetal.com/>. [Kasutatud 16. 04. 2021].
28. GlobalPetrolPrices kodulehekülg. [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://www.globalpetrolprices.com/Finland/diesel_prices/. [Kasutatud 02. 05. 2021].

29. MathWorks kodulehekülg. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://se.mathworks.com/discovery/multiobjective-optimization.html>. [Kasutatud 05. 05. 2021].
30. NOESIS Solutions – OPTIMUS kodulehekülg. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.noesissolutions.com/our-products/optimus>. [Kasutatud 05. 05. 2021].
31. Esteco – modeFRONTIER kodulehekülg. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://engineering.esteco.com/modelfrontier/>. [Kasutatud 05. 05. 2021].
32. Ansys – optiSLang kodulehekülg. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.ansys.com/products/platform/ansys-optislang>. [Kasutatud 05. 05. 2021].
33. IND-NIMBUS kodulehekülg. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://ind-nimbus.it.jyu.fi/>. [Kasutatud 05. 05. 2021].