



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND
Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

SAGEDUSMUUNDURKABINETI SISSE SIINUSFILTRI VÄLJATÖÖTAMISE ANALÜÜS

ANALYSIS OF DEVELOPMENT OF A SINE WAVE FILTER
FOR A FREQUENCY CONVERTER CABINET

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Karl Kesküla

Üliõpilaskood: 192424AAAM

Juhendaja: Ants Kallaste, professor

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.

"....." 2021.

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

"....." 2021.

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

"....."2021.

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina, Karl Kesküla

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose Sagedusmuundurkabineti sisse siinusfiltri väljatöötamise analüüs,

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.

21.12.2021

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 kaks või enam isikut oma ühise loomingulise 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> Karl Kesküla	<i>Lõputöö liik:</i> Magistritöö
<i>Töö pealkiri:</i> Sagedusmuundurkabineti sisse siinusfiltri väljatöötamise analüüs	
<i>Kuupäev:</i> 21.12.2021	<i>71 lk (lõputöö lehekülgede arv koos lisadega)</i>
<i>Ülikool:</i> Tallinna Tehnikaülikool	
<i>Teaduskond:</i> Inseneriteaduskond	
<i>Instituut:</i> Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut	
<i>Töö juhendaja(d):</i> professor Ants Kallaste	
<i>Töö konsultant (konsultandid):</i> Muhammad Usman Naseer, Martin Jaanus, Martin Sarap	
<i>Sisu kirjeldus:</i> <p>Lõputöö eesmärk on analüüsida võimalusi siinusfiltri projekteerimiseks kompaktsesse sagedusmuundurkabinetti. Vajadus on tingitud sellest, et nõuded elektri kvaliteedi ja häiringute kõrvaldamise osas on ajas üha karmistuvad ning siinusfiltri roll kasvab võrreldes dU/dt filtriga. Siinusfiltri tavapärase kasutamise leiab aset väljaspool sagedusmuundurkabinetti, filtri jaoks eraldi loodud kabinetis. DU/dt filter see-eest paikneb tavapäraselt sagedusmuunduriga samas kabinetis ning sellega kaasneb ruumi sääst.</p> <p>Töö esimeses osas on kirjeldatud elektriagamites aset leiduvaid häiringuid ning on välja toodud nende põhjused. Töö teises osas on kirjeldatud üksikuid sagedusmuundurkabinette, toodud mõned näited konkreetsetelt tootjatelt ning hinnatud nende poolt kasutatavate filtrite ruumalasid ja muid olulisemaid parameetreid. Lõputöö kolmas osa keskendub filtri väljatöötamisele, kus põhirõhk on pandud kolmefaasilise induktiivpooli projekteerimisele ja sellega kaasas käivatele arvutustele. Selgitatakse välja hinnangulised mõõtmised ja kaod ning saadud info põhjal teostatakse ka simulatsioonid programmis FEMM. Kolmanda osa lõpus on filtrile valitud juurde kondensaatorid, mis määravad ära filtri lõpliku resonantssageduse.</p> <p>Töö tulemusena on võimalik järeldada, et siinusfilter mahuks ära üksikusse kabinetit paigutatuna, kuid see eeldab esmalt filtri täpsemat lõpuni projekteerimist. Selle käigus on vaja täpsustada induktiivpooli mähise isolatsiooni materjal, mis peaks kõrgele temperatuurile vastu. Teine põhiline eeldus oleks filtri jahutusmeetodi määramine ja kogu süsteemile juurde projekteerimine. Optimaalseim meetod oleks ventilaatorjahutus, mis tagaks autori hinnangul filtri töö ka suurima võimsuse juures.</p>	
<i>Märksõnad:</i> sagedusmuundur, häiring, siinusfilter, filter, induktiivpool, kondensaator.	

ABSTRACT

<i>Author:</i> Karl Kesküla	<i>Type of the work:</i> Master Thesis
<i>Title:</i> Analysis of Development of a Sine Wave Filter for a Frequency Converter Cabinet	
<i>Date:</i> 21.12.2021	<i>71 pages (the number of thesis pages including appendices)</i>
<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(s) of the thesis:</i> Professor Ants Kallaste	
<i>Consultant(s):</i> Muhammad Usman Naseer, Martin Jaanus, Martin Sarap	
<p><i>Abstract:</i></p> <p>The aim of the thesis is to analyse the possibilities of designing a sine filter in a compact frequency converter cabinet. The need is due to the fact that the requirements for power quality and troubleshooting are becoming more strict over time and the role of the sine filter is increasing compared to the dU/dt filter. The normal use of a sinusoidal filter takes place outside the frequency converter cabinet, in a cabinet specially designed for the filter. The dU/dt filter, on the other hand, is usually located in the same cabinet as the frequency converter, which saves space.</p> <p>The first part of the thesis describes the disturbances that occur in electric drives and their causes. The second part of the work describes single frequency converter cabinets, provides some examples from specific manufacturers, and evaluates the volumes and other important parameters of the filters they use. The third part of the thesis focuses on the development of a filter, where the main emphasis is on the design of the three-phase inductor and the accompanying calculations. Estimated dimensions and losses are determined and simulations are performed in the FEMM program based on the information obtained. At the end of the third part, capacitors are selected for the filter, which determine the final resonant frequency of the filter.</p> <p>As a result of the work, it can be concluded that the sine filter can fit in a single cabinet, but this first requires a more accurate design of the filter. In doing so, it is necessary to specify the insulation material of the inductor coil that can withstand high temperatures. Another basic prerequisite would be to determine the cooling method of the filter and to design an additional system. The most optimal method would be fan cooling, which, in the author's opinion, would ensure the operation of the filter even at the highest power.</p>	
<i>Keywords:</i> frequency converter, disturbance, sine filter, filter, inductor, capacitor.	

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Lõputöö teema: Sagedusmuundurkabineti sisse siinusfiltri väljatöötamise analüüs

Lõputöö teema inglise keeles: Analysis of Development of a Sine Wave Filter for a Frequency Converter Cabinet

Üliõpilane: Karl Kesküla, 192424AAAM

Eriala: Energiamuundus- ja juhtimissüsteemid

Lõputöö liik: magistritöö

Lõputöö juhendaja: Ants Kallaste

Lõputöö kaasjuhendaja: -
(ettevõtte, amet ja kontakt)

Lõputöö ülesande kehtivusaeg: 2021/2022 kevad

Lõputöö esitamise tähtaeg: 21.12.2021

Üliõpilane (allkiri)

Juhendaja (allkiri)

Õppekava juht (allkiri)

Kaasjuhendaja (allkiri)

1. Teema põhjendus

Valitud teema olulisus on põhjendatud vajadusest disainida olemasolevasse sagedusmuundurkabinetti siinusfilter, kuna hetkel standarddisainis olevad du/dt filtrid on lähiaastate jooksul nõuetele mittevastavaks muutumas. Siinusfiltrite lisamine on oluline eriti sellistes rakendustes, kus vahemaad sagedusmuunduri ja elektrimootori vahel on pikad nagu näiteks pumbarakendustes. Siinusfiltriga on võimalik saavutada parem sagedusmuunduri väljundsignaal, mille tulemusel on häiringud väiksemad ja mootori isolatsioon püsib tervemana. Eriti oluline on see niisketes tingimustes. Du/dt filtri välja vahetamine siinusfiltri vastu võib põhjustada aga probleeme, kuna siinusfilter on üldiselt oma mõõtmetelt suurem. Sellest tulenevalt on vaja leida sobiv siinusfiltri lahendus mis oleks piisav, et vastata uutele, nii elektrilistele kui mehaanilistele, nõudmistele. Antud magistritöö eesmärk on määrata vajalikud nõuded, mis kehtiksid siinusfiltrile ning teostada siinusfiltri projekteerimine. Töö eesmärgiks on jõuda tulemuseni, mis aitaks ettevõttel jõuda toote prototüübini.

2. Töö eesmärk

Töö eesmärgiks on täpsustada projekteerimistingimused ning luua hea alguspunkt tootjale, kes valmistaks siinusfiltri töös aluseks võetud sagedusmuundurkabinettidesse.

3. Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

1. Kui palju induktiivsust on vaja ja võimalik antud ruumi piires ära mahutada?
2. Millise mahtuvusega kondensaatoreid on tarvis kasutada?
3. Mis materjalist peavad olema induktiivpoolide südamikud?
4. Mis on disainitava filtri efektiivsus?
5. Kuidas elektriliselt dimensioneeritud lahendust ära paigutada olemasolevasse kabinetti?

4. Lähteandmed

Lähteandmeid on võimalik saada sagedusmuundurkabinettide tootjalt ning nendeks on olemasoleva sagedusmuundurkabineti sees olev ruum hetkel seal asetseva du/dt filtri jaoks, mis peab olema ka piisav disainitavale siinusfiltrile. Olulisemad andmed on veel sagedusmuunduri väljundpinge, voolutugevus ning sagedusvahemik.

5. Uurimismeetodid

Töö tulemusteni plaanin jõuda arvutuste ja modelleerimise teel. On parameetrid, mis on vaja vastava tarkvaraga läbi simuleerida, et veenduda disainitava filtri toimimises. Vahenditeks on valemid, vastavad tarkvarad ja mudeli simuleerimine.

6. Graafiline osa

Filtri sisend- ja väljund pinge. Filtri sisend- ja väljundvoolutugevus. Kasutatavate komponentide erinevad graafikud. Filtri elektriskeem. Graafiline osa kajastub peamiselt töö põhiosas, kuid osa võib minna ka lisadesse.

7. Töö struktuur

- Filtrid
 - Häiringud elektriagamites
 - Defektid
 - Madalpääsfiltrid
 - Siinusfilter
- Lähteandmed
 - Sagedusmuundurkabinett
 - Vaba ruum kabinetis
 - Elektrilised nõuded
- Filtri väljatöötamine
 - Induktiivpooli arvutus
 - Kondensaatorite valik
 - Filtri väärtuste optimeerimine
 - Magnet- ja temperatuuriväljade arvutus

- Järeldused

8. Kasutatud kirjanduse allikad

Raamatud, teadusartiklid, lõputööd, tootekataloogid.

- [1] V. Vodovozov, D. Vinnikov, R. Jansikene (2008). Elektriajamite elektroonsed süsteemid. Tallinn.
- [2] V. Dzhankhotov (2009). Hybrid LC Filter for Power Electronic Drives: Theory and Implementation. Lappeenranta.
- [3] A. Baggini (2008). Handbook of Power Quality. Chichester.
- [4] S. Baek, D. Choi, H. Bu, Y. Cho (2020). Analysis and Design of a Sine Wave Filter for GaN-Based Low-Voltage Variable Frequency Drives. Seoul.
- [5] C. W. T. Mclyman (2004). Transformer and Inductor Design Handbook. Idyllwild.

9. Lõputöö konsultandid

Filtritega seondult nõustab Martin Jaanus, Matlabi arvutuste osas on võimalik konsulteerida Muhammad Usman Naseeriga.

10. Töö etapid ja ajakava

Lähteandmete kogumine – 02.11.2021

Kirjanduse läbi töötamine – 03.11.2021

Teoreetilise osa kirjutamine – 04.11.2021

Arvutuste teostamine – 24.11.2021

Järelduste teostamine - 01.12.2021

Töö esimene versioon valmis – 07.12.2021

SISUKORD

LÖPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE	4
ABSTRACT	5
LÖPUTÖÖ ÜLESANNE	6
SISUKORD.....	10
Lühendite ja tähiste loetelu.....	12
SISSEJUHATUS	13
1. FILTRID	14
1.1 Häiringud elektriajamites.....	14
1.1.1 Peegelpinged	15
1.1.2 Uitvoolud	19
1.1.3 Samafaasne pinge ja vool.....	21
1.1.4 Mahtvuslikud voolud	22
1.1.5 Elektrostaatilised sädelahendused	24
1.1.6 Kõrgsageduslikud uitvoolud	25
1.2 Defektid	26
1.3 Madalpääsfiltrid	27
1.4 Siinusfilter	30
1.4.1 Olulisemad parameetrid	31
2. LÄHTEANDMED	34
2.1 Sagedusmuundurkabinett	34
2.2 Elektrilised nõuded.....	36
3. FILTRI VÄLJA TÖÖTAMINE.....	37
3.1 Filtri arvutused	37
3.2 Induktiivpooli arvutused	38
3.2.1 Induktiivpooli ligilähedaste mõõtude määramine	40
3.2.2 Analüütilised arvutused	44
3.2.3 Simulatsioonid FEMM-is.....	49
3.3 Kondensaatorite valimine.....	55
3.4 Filtri lõplikud väärtused	56
4. JÄRELDUSED	58
KOKKUVÕTE	59
SUMMARY.....	61
LISAD	65
Lisa 1. Magnetväljade arvutuste MatLab-i kood	65

Lisa 2. Temperatuuri väljade arvutuste MatLab-i kood	68
Lisa 3. Voodiagramm projekteerimise protsessist	71

Lühendite ja tähiste loetelu

dU/dt – pinge kasvu kiirus

ESR – summaarne jadatakistus

IEC – rahvusvaheline elektrotehnikakomisjon (*International Electrotechnical Commission*)

FEMM – *Finite Element Magnet Method Magnetics*. Tarkvara nimi, tuletatud FEM-ist ehk *Finite Element Method* – lõplike elementide meetod tõlkes

IGBT – isoleeritud paisuga bipolaartransistor (*isolated gate bipolar transistor*)

MLT – keskmine juhtmekeeru pikkus (*Mean Length Turn*)

MPL – magnetahela keskmine pikkus (*Mean Path Length*)

NEMA – riiklik elektriseadmete tootjate liit (*National Electrical Manufacturers Association*)

SISSEJUHATUS

2015. aastal prognoosis ABB, et maailmas on kasutusel umbes 300 miljonit asünkroonmootorit ning iga-aastaseks juurdekasvuks prognoositi 10%. 2020. aasta prognoos oli 480 miljonit asünkroonmootorit. Ligi 51% elektriagamite rikestest on seotud laagritega ning neist umbes 9% on põhjustatud uitvooludest. [1]

Maailmas aina enam kasutust leidvad elektrimootorid nõuavad täpset ja kuluefektiivset juhtimist, et nende kasutegur oleks võimalikult kõrge. Levinud juhtimisseadmeteks saab pidada sujuvkäiviteid ja sagedusmuundureid, antud töö keskendub viimaste kasutamisest tingitud muredele. Sagedusmuunduri tööpõhimõttest tulenevalt tekivad erinevad häired, mis mõjutavad kogu elektriagami tervikuna ning võivad viia riketeni. Kuna tööstuses on reeglina töökindlus olulisel kohal, siis lisainvesteeringud häiringute vähendamiseks või kõrvaldamiseks on igati õigustatud.

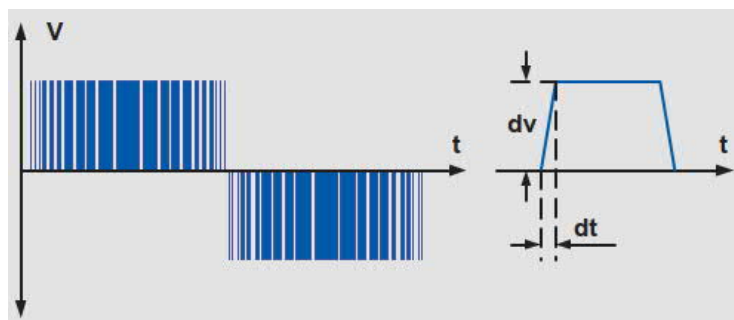
Pulsilaiusmodulatsiooni teel sagedusmuunduri väljundis tekkivad pinged impulsid avaldavad negatiivset mõju elektrimootorile ja koormusele. Uitvoolude ja kehva maandamise tulemusena võivad tekkida laagrivoolud, mis pika aja või kriitilise pinge ületamise peale kahjustavad laagreid. Seetõttu on ajapikku hakatud kasutama igasuguseid filtreid, et oleks vähem saastet ja müra nii sagedusmuunduri tarbija pool kui ka võrgu poolel. Käesolevas lõputöös on tähelepanu all sagedusmuunduri tarbija ehk elektrimootori poolsed häired ja nende kõrvaldamine siinusfiltri abil. Põhiline rõhk on selle uurimisel, milline oleks siinusfiltri minimaalne ruumala suurte võimsuste juures ning kas soojuskadusid arvesse võttes õnnestuks sel asendada laiemalt levinud dU/dt filtrit. Peamine murekoht siinusfiltritega seoses ongi nende kompaktne ära mahutamise, mis on raskendatud suurema induktiivsuse ehk suurema induktiivpooli tõttu ja ka nõudlikumate jahutustingimuste pärast. Erinevalt siinusfiltrist, mis on tavaliselt eraldi kabinetis, pole dU/dt filtri puhul üldjuhul eraldi kabinetti vaja. Käesolevas magistrیتööös uuritakse, kas siinusfilter võiks olla standardlahendusena paigaldatav üksikusse sagedusmuundurikabinetti, ilma ühegi lisakabinetita.

Selleks on antud töös tehtud vajalikud arvutused, et saada esialgsed andmed kolmefaasilise induktiivpooli projekteerimiseks ning välja on arvatud ka pooli kaod. Mahtuvuse lisamiseks on valitud filtrile sobivad kondensaatorid. Kogu saadud info põhjal on võimalik teha esmaseid järeldusi filtri sobivusest üksikusse sagedusmuundurikabinetti ning väljaspool käesolevat magistrیتööd jätkata filtri lõpuni projekteerimist.

1. FILTRID

1.1 Häiringud elektriagamites

Elektrimootoreid kasutatakse maailmas üha enam ja nende kasutusvaldkond on suurenenud. Kuna elektrimootoreid rakendatakse paljude eri rakenduste jaoks, lisandub ka vajadus neid täpsemini juhtida, kasutades näiteks sagedusmuundurit. Aina olulisemaks on muutumas ka elektri kvaliteet ning seadmete tundlikkus kvaliteedi kõikumiste suhtes, mis lõpptulemusena avaldab mõju elektriagamile kui tervikule. Kui elektriseadet toidetakse ebakvaliteetse elektrienergiaga, võib see esile kutsuda rikketalitluse, põhjustades kogu süsteemi avariitalitluse. Elektromagnetilise ühilduvuse seisukohalt ei tohi elektriseade talitluse vältel genereerida elektromagnetilisi häireid, mis segavad teiste seadmete normaalset talitlust ning ei tohi seade ise olla tundlik elektromagnetiliste häirete suhtes.



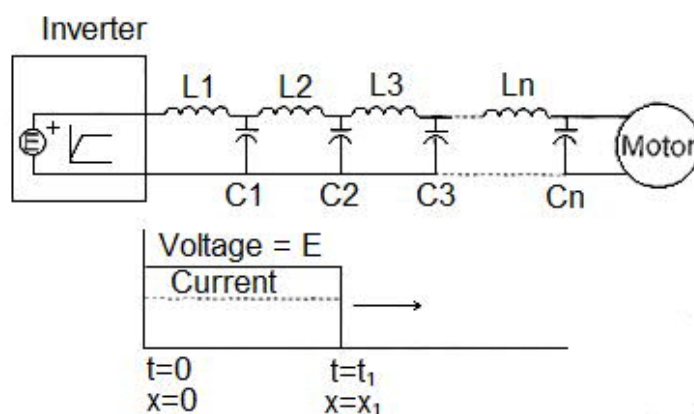
Joonis 1. Pulsilaiusmodulatsiooni väljund [2]

Elektromagnetiliste ja muude häirete vähendamiseks saab kasutada erinevaid meetmeid. Neid probleeme saab vähendada filtrite kasutamisega, millega vähendatakse häiringuid ja tõrkeid elektriliinides ja elektriseadmetes. Filtrid pikendavad elektrimootorite eluiga, kaitstes nende isolatsiooni ja vähendades uitvoolusid. Elektrimuundurid kasutavad elektri muundamiseks pulsilaiusmodulatsiooni, mis põhjustab pingepulsse. Antud impulsid kutsuvad aga esile rikkeid elektriagamites (Joonis 1). Toites elektrimootorit kiiresti muutuva pingega, siis see võib põhjustada viimase mähiste kiiret vananemist ja muid rikkeid. Taolisi kiireid pingepulsse võimendab pikk toitekaabel sagedusmuunduri ja elektrimootori vahel.

1.1.1 Peegelpinged

Sagedusmuundurid, mis kasutavad isoleeritud paisuga bipolaartransistore (IGBT) alalisvoolu muutmiseks vahelduvvooluks, omavad reeglina lülitussagedusi kuni 20 kHz. Paraku on kiiretel lülitustel ka negatiivne mõju, sest pinge tõuseb miinimumist maksimumini vähem kui 0,1 mikrosekundiga. On tõestatud, et pingepulss liigub kaablis ligikaudu poolel valguskiirusel ja kui pingelaine saavutab pool oma maksimumväärtusest enne, kui laine ise jõuab mootorini, toimub mootoriklemmidel täielik pingepeegeldus ja impulsi amplituud võib kahekordistuda. [3]

Muunduri ja mootori vahelist kaablit saab vaadelda kui mitut jadamisi kokku ühendatud induktiivsuse ja mahtuvuse (LC) ahelat (Joonis 2). Kui toita kaablit kiirelt muutuva pingega, siis hakkab vool liikuma esimesse induktorisse L_1 ja laadima esimest mahtuvuslikku elementi C_1 pingele E . Seejärel vool liigub läbi järgmiste induktiivsete elementide ja laeb ka järgnevad mahtuvuslikud elemendid pingele E . Sellist nähtust võib kirjeldada kui lainena, mis liigub mööda kaablit ning iga järgnev mahtuvuslik element saavutab pingele E . [4]

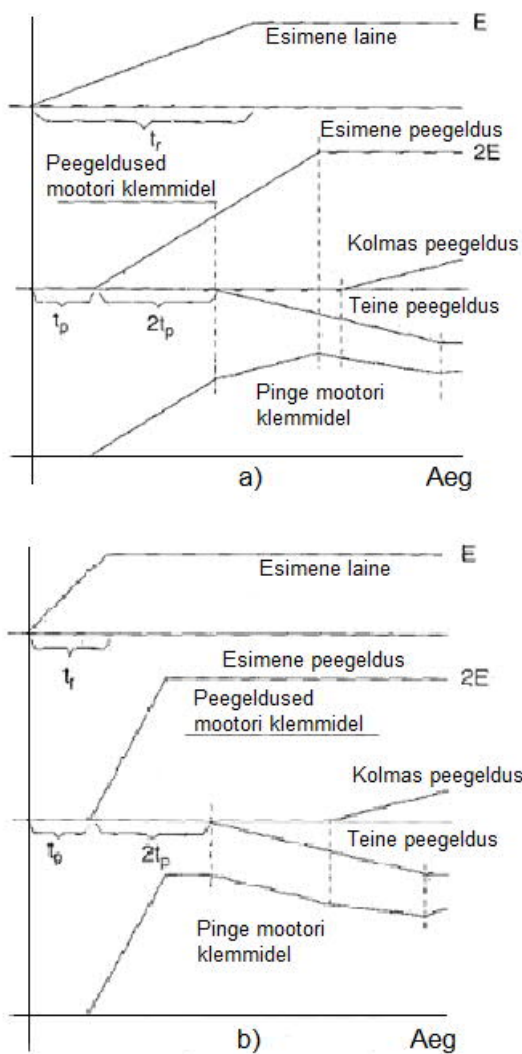


Joonis 2. Mootori toitekaabli lihtsustatud vooluahel [4]

Kui pingelaine jõuab punkti x_1 , mis on ka märgitud joonisel 2, siis muunduri poole jäävad mahtuvuslikud elemendid on pingega E ning sellest punktist mootori poole pole veel laetud. Kui viimane mahtuvuslik element C_n on laetud pingele E , siis vool on veel läbimas viimast induktiiv elementi L_n . Kuna mootori näivtakistus on väga suur võrreldes kaabli näivtakistusega, siis liigub vool elemendist L_n jätkuvalt kondensaatorisse C_n , kuni enamik magnetvälja salvestatud energiast on üle viidud mahtuvuslikku elementi. See põhjustab elemendis C_n üle laadimise pinge teoreetilisele maksimumile, milleks on $2E$. Kui C_n on saavutanud pinge taseme $2E$, siis vool muudab oma suunda ja hakkab liikuma tagasi allika suunas ning laeb iga tee peale jääva mahtuvusliku elemendi kõrgemale

pinge tasemele. Jõudes muundurini, peegeldub see laine taas, kuid seekord mõjutab peegeldust muunduri peegelduse tegur (ing. k. - *inverter reflection factor*), mis on alati -1. Negatiivne peegeldus alustab liikumist taaskord mootori suunas. Juhul, kui mainitud negatiivne peegelpinge jõuab mootorini enne, kui esimene peegeldus jõuab tagasi muundurini, siis ta lahutub esimest peegeldusest maha ning selle tulemusena on mootori klemmidel vähem ülepinget. See seostub nn. kriitilise kaabli pikkuse fenomeniga, mis ütleb, et kui laine levimise aeg muundurist mootorisse on suurem kui $\frac{1}{2}$ pingeimpulsi kasvamise ajast, siis leiab aset täielik pinge peegeldus. Antud fenomeni tähendus on see, et kui teine negatiivne peegeldus jõuab mootori klemmideni liiga hilja, siis ta ei lahuta end maha esimesest peegelpingest, mis nagu eelnevalt mainitud, võib mootori klemmidel olevat pinget kahekordistada. [4]

Joonisel 3, graafikul a) on võimalik näha, milles eelmainitud fenomen seisneb. Propagatsiooni ehk levimise aeg on joonisel toodud kui t_p ja pulsi kasvamise aeg on t_r . On näha, et muunduri esialgne signaal pole jõudnud saavutada oma lõppväärtust, kuid laine on levinud mootori klemmideni, kust ta peegeldub tagasi muundurini väärtusega $2E$. Teine peegeldus, mis on negatiivne, lahutub maha esimesest peegeldusest ning seeläbi vähendab summaarset pinget mootori klemmidel. Joonisel 3, graafikul b) võib näha peegelpingeid siis, kui laine levimise aeg on suurem kui pool pulsi kasvamise ajast. Järjekorras teine peegeldus, mis on negatiivne, ei lahutu maha esimest peegeldusest, sest esimene peegelpinge laine on jõudnud oma lõppväärtuseni ehk pulsi kasvamise kiirus on oluliselt suurem kui laine levimise kiirus. [4]



Joonis 3. a) - pinge peegeldused kui $t_p < \frac{1}{2}t_r$; b) – pinge peegeldused kui $t_p > \frac{1}{2}t_r$ [4]

Peegelpingete tulemusena on mootori klemmidel olev pinge hüppekajaga, ent sumbub, kuni on stabiilne. Signaali võnkumise sagedus sõltub kaabli pikkusest ja laine levimise kiirusest, viimane omakorda on sõltuvuses kaabli omadustest. Laine levimise kiiruse valem on:

$$v_{laine} = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \quad (1.1)$$

kus L – kaabli induktiivsus meetri kohta, H/m,

C – kaabli mahtuvus meetri kohta, F/m.

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}, \quad (1.2)$$

$$V_2 = V_1 \frac{R-Z_0}{R+Z_0}, \quad (1.3)$$

kus V_2 – peegeldunud pinge, V ,

V_1 – muunduri väljundpinge, V ,

R – koormuse takistus, Ω ,

Z_0 – kaabli lainetakistus, Ω .

Mida suurem vahe on mootori ja kaabli lainetakistustel, seda suurem on ka pingelaine peegeldus. Kiiresti muutuvate pingeimpulsside ehk kõrgemate sageduste puhul ilmneb mootori näivtakistus peamiselt mahutuvuslikuna, kuid palju väiksemana, kui kaabli näivtakistus ning seetõttu mootor oleks justkui avatud ahel. Seetõttu võib peegeldunud pinge väärtus olla kuni $2V_1$. [4]

Arvestades, et muunduri väljundpinge peegeldumine sõltub kaabli lainetakistuse ning koormuse takistuse suhtest, siis on võimalik vaadelda kolme äärmuslikku olukorda [3]:

- Kaabel on mootori poolel lühistatud – peegeldunud pinge on võrdne magnituudilt, kuid negatiivne, mistõttu ta lahutub esimesest signaalist maha ja lõpptulemus on 0 V.
- Kaabel on mootori poolelt lahtine/avatud – peegeldunud pinge on võrdse magnituudiga ja samamärgiline. Seetõttu on lõpptulemuseks kahekordne pinge väärtus mootori klemmidel.
- Kaabel on mootori pool summutatud näivtakistusega, mis vastab kaabli lainetakistusele – esialgne pingesignaal ei peegeldu, kuid toimub signaali refraktsioon.

Elektriam on keeruline seade või seadmete hulk, mis tekitab soovimatuid häiringuid oma sisendis ja väljundis. Filtreid saab rakendada elektriamis nii sagedusmuunduri ette kui ka järele. Neid kasutades on üldiselt garanteeritud elektriamis pikem eluiga ja suurem häiringukindlus. Peamised häiringud, mida filtrid kõrvaldavad on [2]:

- kõrgema sagedusega harmoonilised
- uitvoolud
- vähendavad pinge tõusu kiirust dU/dt

- laagrivoolud
- akustiline müra
- samafaasne vool ja pinge
- mahtuvuslikud voolud/sädelahendused
- kõrgsageduslikud uitvoolud

1.1.2 Uitvoolud

Uitvoolude olemasolu elektrimasinates ja nendega kaasnevate probleemide olemust hakati uurima enam kui sada aastat tagasi. Sagedusmuundurite poolt põhjustata vaid uitvoole hakati põhjalikumalt uurima 1990ndatel. Alates 1994. aastast viidi USAs vibratsioonimeetodi abil läbi suuremahuline elektrimootorite uuring, milles analüüsiti kuue aasta jooksul kokku 1000 sagedusmuunduriga juhitavat ja 150 otsetoitega elektrimootorit. Analüüsist selgus, et sagedusmuunduriga juhitavatest mootoritest 25%-l tuvastati uitvoolud ning 65% põhjustasid uitvoolud kahe aasta jooksul laagrite riknemise. Otsetoitega elektrimootoritest vaid 0,65%-l ilmnisid uitvoolud. [1]

Olemuslikult on uitvoolusid tekke põhjuste järgi kahte tüüpi:

- Klassikalised uitvoolud
- Sagedusmuunduri poolt põhjustatud uitvoolud

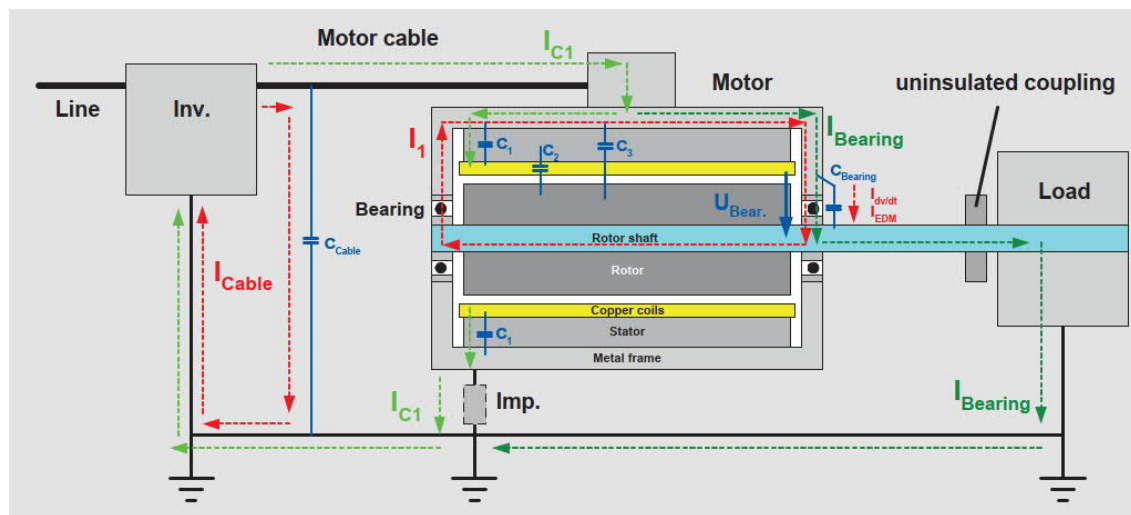
Klassikalised uitvoolud on põhjustatud mootorite asümmeetriast. Seetõttu on ka magnetväli ebasümmeetriline, mille tulemusel indutseeritakse mootori võllis pinge, mis ringleb mootoris võlli suhtes piki suunas ja tekitab mootori võlli otste vahele mõõdetava potentsiaalide vahe. Laagrite seisukohalt on uitvoolud ohutud kuni pinge väärtuseni 300 mV. Enim mõjutab sellist pinget mootori pikkus. Klassikaline uitvool on võrgusageduslik ning mootori ja koormuse maandustingimustest olenevalt võib uitvoolude teekond pikeneda läbi mootori poolt veetava koormuse. Joonisel 3 ilmestab I_1 voolu, mis läbib mootori laagreid ning mis on tekkinud võlli pinge tulemusena. Ajapikku sellise voolu tõttu laagri määrdeaine kuivab ning seetõttu tekib laagri kiirem riknemine. [1]

Sagedusmuunduri poolt põhjustatud uitvoolud on tingitud kiirest samafaasse pinge muutustest mootori klemmidel (dU/dt) ja mahtuvuslikest sidestustest mootori sees (joonisel 4 C_1 , C_2 ja C_3). Selle tulemusena leiavad aset elektrostaatilised sädelahendused

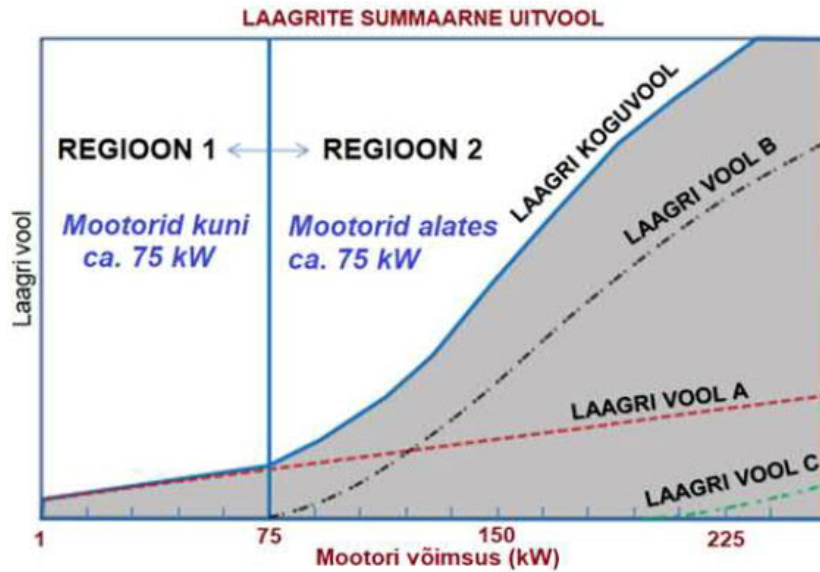
ja mahtvuslikud laagrihood. Läbi maandusvoolu võivad esineda ka kõrgsageduslikud ringlevad uitvoolud ning võlli maandusvoolud. [1]

Mootorisiseselt saab uitvoolude tekkemehhanismi jagada veel omakorda kahte suuremasse gruppi: [1]

- Uitvoolud, mis tekivad mootori komponentide mahtvusliku sidestuse tõttu (mahtvuslikud voolud ja sädelahendused). Sihtgrupiks on kõik mootorid.
- Uitvoolud, mis tekivad mootori komponentide induktiivse sidestuse tõttu (ringlevad uitvoolud). Sihtgrupp on eelkõige suuremad mootorid.



Joonis 4. Elektriagamis esinevad uitvoolud ja parasitmahtuvused [2]



Joonis 5. Erinevad laagrivoolud [1]

Mootori laagrites tekkivaid voolusid on võimalik lihtsustatult esitada nii nagu on tehtud joonisel 5. Välja on toodud erinevat tüüpi laagrivoolud ning nende suurused vastavalt mootori võimsusele. Laagri vool A on samafaasest pingest tingitud vool laagris, mis omakorda viib elektrostaatiliste sädelahenduste ja mahtuvuslike laagrivooludeni. Laagri voolu B võib nimetada ka maandusvooluks, mis jaguneb kõrgsageduslikuks ringlevaks uitvooluks ja võlli maandusvooluks. Laagri vool C on põhjustatud mootori enda asümmeetriast. [1]

1.1.3 Samafaasne pinge ja vool

Samafaasne pinge teket mõjutab suuresti sagedusmuunduri vaheldi ehitus ja tööpõhimõte, kus üldiselt on kasutatud kuue transistori erinevate lülitamiskombinatsioonide, mille kiirete pingepulsside abil moduleeritakse väljundpinge. Antud pinge keskvärtus on võrdeline impulsside laiusel ja kujult sarnaneb see siinuspingele. Pulsilaiusmodulatsiooni abil mootori toitepinge tekitamiseks võrdleb sagedusmuunduri komparaator kolmnurkset kandesagedussignaali siinusega ja lülitab vastavalt mõõtetulemustele vaheldi väljundtransistore sisse ja välja. Tulenevalt asjaolust, et transistore lülitatakse sisse ja välja vahelüli toitesiooni negatiivsele või positiivsele pingele, ei saa tekkiva väljundpinge faaside vektorsumma olla null. Sagedusmuunduri faaside pingektorite summat, mis muutub neutraali suhtes sagedusmuunduri kandesagedusest kuus korda kiiremini, nimetatakse kokkuleppeliselt samafaasne pingeks. [1]

Samafaasset pinget saab defineerida lihtsustatult algsignaali pingele lisanduv soovimatu pingeosana, mida saab mõõta sisendpunkti ja maa vahel. Matemaatiliselt avaldub kahetasandilise sagedusmuunduri samafaasne pinge U_{cm} järgmiselt: [1]

$$U_{cm} = \frac{U_{ug} + U_{vg} + U_{wg}}{3}, \quad (1.4)$$

kus U_{ug}, U_{vg} ja U_{wg} - liini pinge hetkväärtused maa suhtes.

Siis, kui sagedusmuunduri väljundpinge muutmiseks lülitatakse vaheldi transistore sisse või välja, sunnitakse kaasneva pingemuutuse suurusega proportsionaalne vooluhulk läbima kõiki vooluringis olevaid maaga mahtuvuslikult sidestatud komponente. Selle tulemusena tekib kiiresti muutuv maandusvool, mis jookseb läbi mahtuvuslike komponentide nagu mootori õhupilu, laagrid ja kaablid, maha. Selline vool on mõõdetav kui mõõta kõigi faaside voolusid üheaegselt ning kokkuleppeliselt on sellise nimetatakse seda sünfasi- ehk nulljärgnevusvooluks. [1]

Nulljärgnevusvoolu allikas on sagedusmuundur, kuid selle suurust mõjutavad ka mootori ja muunduri vahelise toitekaabli pikkus ning mootori toitepinge ja võimsus. Mida pikem on mootori toitekaabel ja mida kõrgem on toitepinge ning mootori võimsus, seda suurem on nulljärgnevuskomponent. Matemaatiliselt avaldub nulljärgnevusvool ehk mootori maandusvool I_{cm} järgmiselt: [1]

$$I_{cm} = I_u + I_v + I_w \approx I_g + I_{gr}, \quad (1.5)$$

kus I_u, I_v ja I_w - faasi voolud, A,

I_g - staatori maandusvool, A,

I_{gr} - rootori maandusvool, A.

1.1.4 Mahtuvuslikud voolud

Mahtuvuslik sidestatus esineb elektrimootoritel mitmel eri moel. Oma definitsioonist tulenevalt, et mahtuvus iseloomustab elektrit juhtiva keha võimet salvestada elektrilaengut, tekib mahtuvus alati seal, kus kaks juhti on omavahel eraldatud isolatsiooniga. Seepärast on omavahel mahtuvuslikult sidestatud näiteks mootori toitekaabli faasijuht ja neutraal või mootori mähis ja korpus. Mootori õhupilu ja veerelaagrite kaudu tekib mahtuvuslik sidestatus ka rootori ja staatori vahel. Selle eelduseks on veerelaagrite sees tekkinud dielektrilise määrdekile olemasolu laagri saale

ja veerekehade vahel. Mida väiksem on mahtuvus, seda suuremat takistust ta omab madalatel sagedustel ning mootoris ja toitekaablites tekkivad parasitvoolud on suhteliselt väikesed. Sageduse suurenedes aga mahtuvuslik takistus väheneb ning ringlevate uitvoolude sagedusalas, mis ulatub 100 kilohertsist mõne megahertsini, on ka näivtakistus uitvooludele oluliselt väiksem. [1]

Sagedusmuunduritega juhitud mootorites tekivad mahtuvuslikud sädelahendused samafaasse pingetõttu, mille kiired muutused ehk dU/dt põhjustavad kõrgsagedusliku mahtuvusliku voolu, mis liigub staatorist rootorisse läbi veerelaagrite. Sellest hoolimata, et mootori rootor on korpusest dielektriliselt eraldatud, pääseb kõrgsageduslik uitvool ikkagi läbi laagri üsna kergesti rootorist korpusesse.

Mahtuvusliku laagrivoolu I_b suurus sõltub laagri pinget muutumise kiirusest dU_b ja mahtuvusest C_b [1]:

$$I_b = C_b * \frac{dU_b}{dt}, \quad (1.6)$$

kus I_b – mahtuvuslik laagrivool, A,

C_b - mahtuvus, F,

dU_b – laagri pinget muutumise kiirus.

Tavapäraselt jääb mahtuvuslik vool vahemikku 5 mA kuni 10 mA, mistõttu on see laagrite seisukohast ohutu. Kasutades maandusrõngaid või maandusharjasid, väikseid mahtuvuslike uitvoole mootoris ei esine.

Lisaks kõrgsageduslikule väiksele mahtuvuslikule laagrivoolule on samafaasne pinget lähteallikaks ka laagrites toimivatele elektrostaatilistele sädelahendustele. Mahtuvuslikke voole esineb igas suuruses mootoris, mis on sagedusmuunduriga juhitud, kuid sellest hoolimata muutuvad nad koos mootori võimsuse ja suurusega ning samafaasse pinget kasvamisega aina suuremaks ja ohtlikumaks. Kui mootoris sädelahendusi ei toimu, kopeerib mootori võlli pinget samafaasest pinget. Mida kõrgem on samafaasne pinget, seda kõrgem on ka võlli ehk laagri pinget. Võlli pinget on leitav läbi mootori mahtuvuslike pingete jaguri, mida kutsutakse laagri pinget suhteteguriks BVR ehk *Bearing Voltage Ratio*. [1]

$$U_B = U_{CM} * BVR = U_{CM} * \frac{C_{WR}}{C_{WR} + C_{RS} + 2C_B}, \quad (1.7)$$

kus U_B – laagri ehk võlli pinget, V,

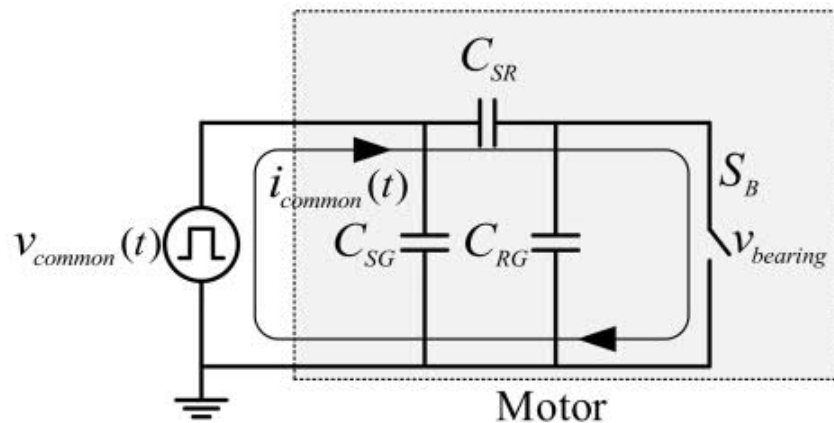
U_{CM} – samafaasne pinge, V,

C_{WR} – staatori mähise ja rootori vaheline mahtuvus, F,

C_{RS} – rootori ja staatori vaheline mahtuvus, F,

C_B – laagri ja võlli vaheline mahtuvus, F.

Jooniselt 6 on näha, kuidas samafaasse pinge poolt indutseeritud vool liigub läbi parasiitmahtuvuste. Joonisel on C_{SG} staatori ja maa vaheline mahtuvus, C_{SR} staatori ja rootori vaheline mahtuvus, C_{RG} rootori ja maa vaheline mahtuvus ning S_B näitab dielektrilist läbilööki laagri välimise ja sisemise saale vahel. [5]



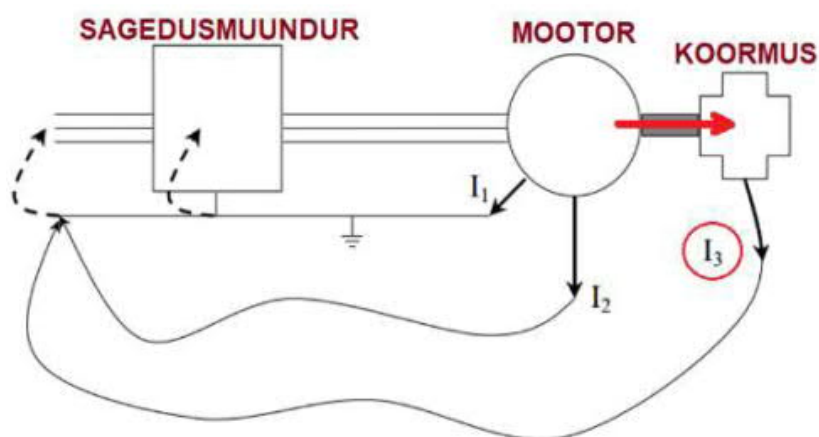
Joonis 6. Samafaasse voolu lihtsustatud elektriahel [5]

1.1.5 Elektrostaatilised sädelahendused

Seni kuni ületatakse määrdeaine dielektriline tugevus 15 kV/mm, saab mootori võllil pinge kasvada, sest laagrites veerepindadele tekkiv mõne mikroni paksune määrdekile on madalsageduslikule pingele isolaator. Kui ületatakse dielektriline tugevus, toimub laagris elektrostaatiline sädelahendus. Kuna määrdekile keskmiseks paksuseks on 2 μm ja toitepingeks 400 V, siis võlli pinge suhe ei tohi olla suurem kui 7,5% ehk 30 V. Kui võlli pinge tõuseb üle 30 V, ületab pinge määrdeaine dielektrilise tugevuse ja laagrites hakkavad toimuma sädelahendused. Selliste sädelahendusi põhjustavate voolude amplituud sõltub lisaks määrdeaine dielektrilisele tugevusele ka mootori toitepingest, kiirusest ja laagrite temperatuurist. Staatori mähise ja rootori omavaheline mahtuvus on eelmainitud voolu lainekuju suurim mõjutaja. [1]

1.1.6 Kõrgsageduslikud uitvoolud

Võlli maandusvoolud mootoris on põhjustatud sagedusmuunduri tõttu tingitud kiiretest pingemuutustest ehk dU/dt -st, mis tekitavad mootoris kõrgsageduslikke uitvoole. Mootori võlli maandusvoolud tekivad vaid siis, kui mootori võlliga ühendatud koormus on paremini maandatud, kui mootori enda korpus. Sellist olukorda võib sagedamini kohata näiteks ventilaatorite ja pumpade puhul, mille raam on koormusest eraldatud ja vibratsiooni vähendamiseks paigaldatud kummipuksidele (Joonis 7). [1]



Joonis 7. Uitvoolud [1]

Võlli maandusvoolud tekitavad probleeme eelkõige mootoriga ühendatud seadmetes ja andurites, kus voolude tõttu saavad kahjustatud mootori laagrite asemel koormuse laagrid. Kuna võlli maandusvoolud on kõrgsageduslikud, siis sagedusmuundurisse tagasi otseteed mitte leides võivad nad põhjustada elektromagnetilisi häiringuid. Korrekse maanduse puhul esineb maandusvool I_1 . Vool I_2 esineb kehva maanduse korral, kus vool jõuab sagedusmuundurisse tagasi läbi alternatiivse teekonna. I_3 on võlli maandusvool, mis läbib tagasiteel koormust, kuna koormus on paremini maandatud kui mootori korpus. [1]

Kõrgsageduslikud ringlevad uitvoolud on enim levinud võimsamates sagedusmuunduritega juhitud asünkroonmootoreis. Võrreldes kahe ülejäänud uitvoolu liigiga, millest üks on samafaasest pingest tingitud ja teine mootori asümmeetriast tingitud laagri vool, võivad just kõrgsageduslikud ringlevad uitvoolud osutada kõige suuremateks, kuna laagrites saavad tekkiva võimsad sädelahendused. Mootori ja laagrite elueast lähtuvalt on ringlevate uitvoolude tekkimise takistamine või vähendamine oluline. Enim avaldab kõrgsageduslike ringlevate uitvoolude suurusele mõju mootori mähise ja staatori vaheline mahtuvus C_{WS} , mis võrreldes teiste mootori komponentide vaheliste parasitmahtuvustega on suurim. Oluline on ka mootori toitekaabli pikkus, kuna kaabli pikkuse suurenedes kasvavad ka ülepinge impulsid

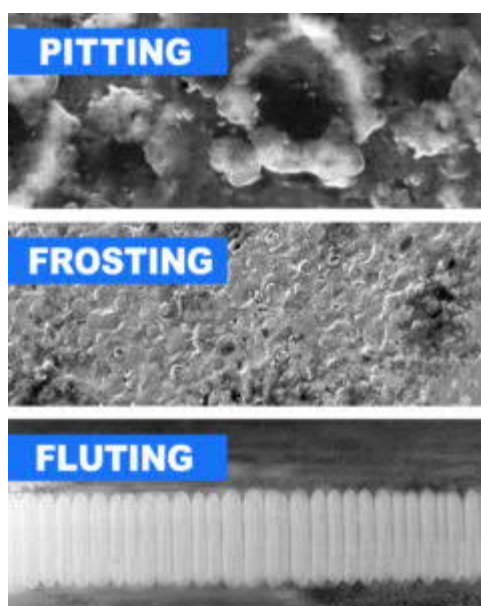
mootori klemmidel. Toitekaabli pikkus mõjutab enim staatori maandusvoolu. Kõrgsageduslikud ringlevad uitvoolud kaabli pikkuse suurenemisel oluliselt ei muutu. Ka mootori töötingimused mõjutavad ringlevaid uitvoole – mida suurem mootori pöörete arv, seda väiksemad kõrgsageduslikud ringlevad uitvoolud. [1]

1.2 Defektid

Uitvooludest tingitud laagrite kahjustused on teistest niivõrd erinevad, et neid on üpris lihtne visuaalsel vaatlusel tuvastada, soovitatavalt iga kord, kui laagreid vahetatakse. Oksüdeerimisest mustaks muutunud määrdeaine on vaid esimene vihje uitvoolude poolt tekitatud kahjustustest, millest enim levinud on: [1]

- „*Fluting*” – laagri saaledel tekkivad rööpjooned, mis on tekkinud madala pinge ja ühtlase kiirusega; käib kaasas laagri veerekeha matistamisega.
- „*Pitting*” – juhusliku mustriga väikesed kraatrid laagri saaledel, mis leiavad aset kõrge pinge ja madala kiiruse juures.
- „*Frosting*” – juhusliku mustriga laagri saaledel pindade matistamine.

Joonisel 8 on ära näidatud kolme enam levinud uitvooludest tingitud laagri defektide välimuse näited.



Joonis 8. Defektid laagri saalel [6]

1.3 Madalpääsfiltrid

Alalis- ja vahelduvpingete ning voolude soovimatute väärtuste vältimiseks kasutatavaid seadmeid nimetatakse filtriteks. Neid koostatakse reaktiivkomponentide baasil, sest nende näivtakistus sõltub sagedusest. Filtreid on palju eri tüüpe, mida kasutatakse erinevatel eesmärkidel. Neid võib jagada aktiiv- ja passiivfiltriteks. Kui passiivfiltrid kasutavad ainult passiivkomponente nagu näiteks induktiivpoolid, kondensaatorid ja takistid, siis aktiivfiltrid hõlmavad endas ka aktiivkomponente, näiteks operatsioonivõimendi. [7]

Olenevalt otstarbest, on mõnede jõuelektronika seadmete disainis on oluline pärssida kõrgemaid harmoonilisi või hoida neid lubatud piires. Vooluharmoniliste vähendamiseks rakendatakse filtritena induktiivpoole või kondensaatoreid muunduri sisendis ja väljundis. Induktiivpool tuleb välisahelas ühendada muunduri toiteklemmidega või muunduri sees alalisvoolu vahelüliliga. Lisaks on kõrgemate harmooniliste vähendamine võimalik väljundkaabli soonte ümbritsemine ferriitrõngaga, mis läheks faasijuhtide, kuid mitte neutraaljuhi ümber. [7]

Kondensaatorfiltrid koosnevad harilikult kahest kondensaatorist: elektrolüüt-kondensaator, mis vähendab vooluharmonilisi ja keraamiline kondensaator, mis vähendab lülitussageduse harmoonilisi. Sisendkondensaator paikneb tavaliselt alalisvoolumuunduri sisendi ja toitevõrgu vahel, salvestades nõutava kõrg- ja madalsagedusliku energia pingele iga perioodi vältel tänu suurele mahtuvusele. [7]

Üldiselt loetakse filtriks sellist häiringutevastast seadet, millel on ka kondensaatorid juures, lisaks induktiivpooli olemasolule. Põhilised filtrid, mida kasutatakse tööstuses on kõrgemate harmooniliste vähendamiseks mõnede summutustakistitega varustatud jada LC-filtrid. Neil võib olla suhteliselt lihtne ehitus, kuid palju keerulisemad teist ja kolmandat järku filtrid filtreerivad tavaliselt laiemat sagedusvahemikku. Toitevõrgu ja muunduri vahelised LC-filtrid omavad tavaliselt kahte otstarvet. Esiteks nad vähendavad resonantsahelatega juhtivushäireid ja sellise filtri lõikesagedus ei pea olema rohkem kui 2 või 3 korda kõrgem toitevõrgu sagedusest. Kondensaator valitakse vastavalt toitevõrgu pingele ning tüüpiliselt jäävad mahtuvused on vahemikku 100 nF kuni 2,2 µF. Teine lahendus on väikese näivtakistuse lisamine toiteliini ja suure mahtuvusega kondensaatori vahele. Seeläbi vähendatakse kõiki siirdepingeid, liigpingeimpulsse või pingetippe. Oluline on kasutada tootja poolt ette nähtud filtrit ning tuleb arvestada kaabli pikkuse, mahtuvuse ja lülitussagedusega. Alalisvoolu koormuse korral kasutatakse väljund LC-filtrina koormusega jadamisi ühendatud drosselit ja seda

täiendatakse rööpselt ühendatud kondensaatoriga, mille ülesandeks on energia salvestamine ajavahemikul, kui lülitid on avatud. [7]

Induktiivpoolid ja kondensaatorid on reaktiivkomponendid, mille näivtakistus sõltub sagedusest. Kuna induktiivtakistus kasvab koos sageduse kasvuga, siis jadamisi ühendatud drossel on märkimisväärne takistus kõrge sagedusega harmoonilistele komponentidele, rööpselt ühendatud drossel aga võib suurendada neid.

$$X_L = 2\pi f * L, \quad (1.8)$$

kus f – sagedus, Hz,

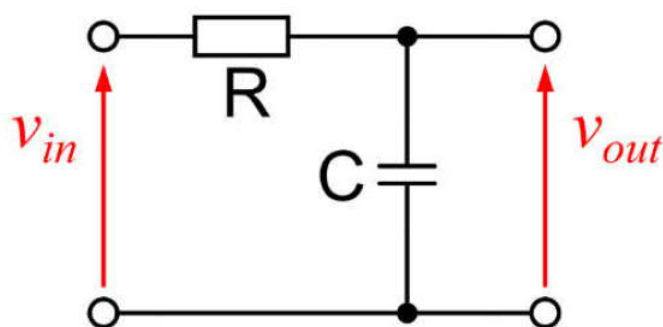
L – induktiivsus, H.

$$X_C = \frac{1}{2\pi f * C}, \quad (1.9)$$

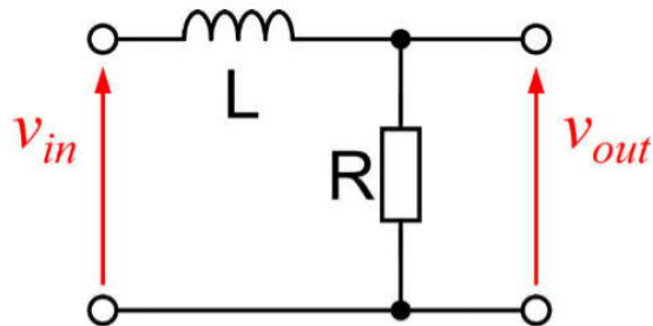
kus f – sagedus, Hz,

C – mahtuvus, F.

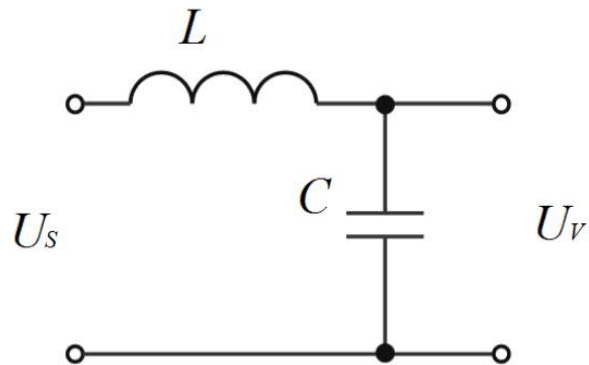
Induktiivsusele vastupidiselt vähendab rööpselt ühendatud kondensaator kõrge sagedustega harmooniliste osakaalu, sest tema takistus väheneb sageduse kasvades. Jadamisi ühendatud kondensaator suurendab seda. Siis kui ühendada toiteallika ja koormuse vahele jadamisi induktiivpool koos rööpselt ühendatud kondensaatoriga, võib seda pidada madalpääsfiltri, sest ta vähendab kõrge sagedusega harmooniliste osakaalu ning laseb läbi signaali madalsagedusliku osa.



Joonis 9. RC-madalpääsfiltri skeem [8]



Joonis 10. LR-madalpääsfiltri skeem [8]



Joonis 11. LC-madalpääsfiltri skeem [8]

Madalpääsfiltrite lõikesageduse saab arvutada valemitega:

$$f_{LR} = \frac{R}{2\pi L} \quad (1.10)$$

$$f_{RC} = \frac{1}{2\pi RC} \quad (1.11)$$

$$f_{LC} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1.12)$$

kus R – filtri aktiivtakistus, Ω ,

C – filtri mahtuvus, F,

L – filtri induktiivsus, H.

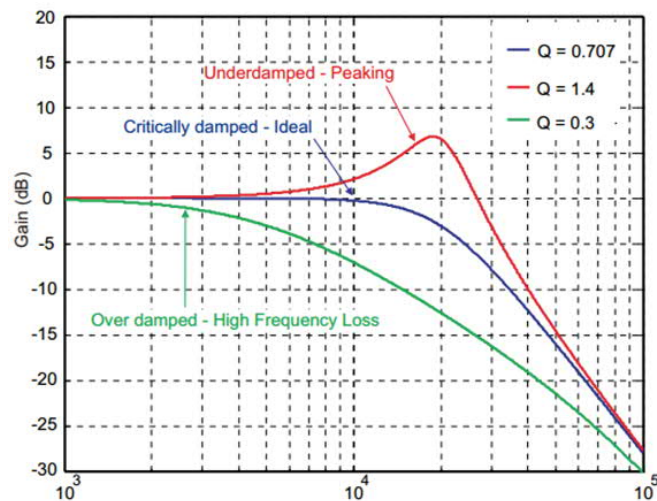
Selleks, et vähendada pinget kasvukiirust ja liigpinge impulsse, ühendatakse sagedusmuunduri väljundisse erinevaid madalpääsufiltreid, mille kolm topoloogia näidet on toodud joonistel 9, 10 ja 11.

RC-filtrid on eelkõige mõeldud kaabli näivtakistuse sobitamiseks, et vältida pingelainete peegeldumist mootori sisendklemmidelt, RLC-filtrid summutavad resonantsi ja LC-filtrid genereerivad siinusele lähedast väljundpinget. [7]

Lisaks madalpääsfiltritele on olemas veel ka kõrgpääsfiltrid ja ribapääsfiltrid. Nagu nimi ütleb, tõkestavad kõrgpääsfiltrid madala sagedusega harmoonilisi komponente ja lasevad läbi neid, mis on kõrgema sagedusega. Ribapääsfiltrid ehk ribafiltrid koostatakse resonantsahelate baasil, kus väga madalatel ja väga kõrgetel sagedustel

väljundsignaal puudub. Kahe piirilukorra vahel saavutab väljundpinge resonantssageduse puhul maksimaalväärtuse. Analoogselt madal- ja kõrgpääsufiltrile leidub ka ribafiltri vastand – ribatõkkefilter ehk tõkkefilter. Selline filter laseb läbi vaid signaale, mille sagedus on suurem või väiksem löikesagedusest. [7]

Filtri sageduskarakteristikuid on projekteerimisel tarvis arvesse võtta, sest selle järgi käib ka tema komponentide valimine. Tema väljundit mõjutab koormuse takistus ning ka filtri enda takistust tuleb arvesse võtta. Sellest sõltub tema signaali sumbuvus, mis võib olla ülesumbuv, kriitiliselt sumbuv või alasumbuv. Ideaaljuhul on filter kriitiliselt sumbuv (Joonis 12). [9]



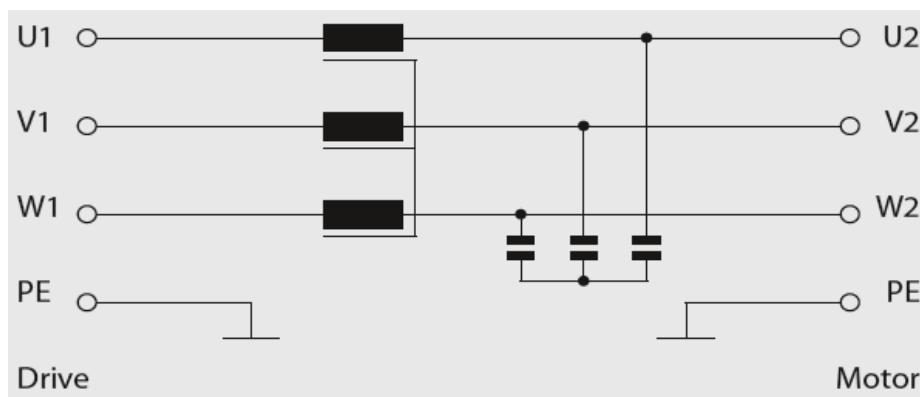
Joonis 12. Madalpääsufiltri sageduskarakteristik sõltuvalt sumbuvusest [9]

1.4 Siinusfilter

Siinusfilter on oma ehituselt sarnane dU/dt filtriga. Mõlema filtri topoloogias on olemas jadainduktor ning ahelasse on ühendatud ka rööpkondensaator ja mõnel juhul summutustakisti. Siinusfiltri elektriskeem on toodud joonisel 13. Suurim vahe kahel filtril on komponentide väärtuste osas, mis siinusfiltri puhul on üldjuhul suurem. Komponentide väärtused mõjutavad omakorda filtri resonantssagedust, mis siinusfiltril jääb üldiselt muunduri väljundssageduse ja lülitussageduse vahele. DU/dt filtril on resonantssagedus tavaliselt muunduri lülitussagedusest suurema väärtusega. Seeläbi on ka filtrite väljund erinev – dU/dt filter peamiselt silub pulsilaiusmodulatsiooni sisse lülitusest tulenevat hüppekaja signaali, muutes pinget muutumise kiirust aeglasemaks. Siinusfilter see-eest muudab nelinurkse pingesignaali siinuseliseks. Siinusfilter laseb läbi ainult põhissagedusega ja sellest madalama sagedusega voolud, mis läbi mootorini jõuab peaaegu ideaalne siinussignaali nii pinget kui ka voolu poolest. Siinusfilter täidab ka dU/dt

filtri ülesannet ning kõrvaldab sagedusmuunduri kiirest lülitamisest tingitud hüppekaja mootori klemmidel, mis omakorda on lahenduseks mitmele järgmisele probleemile nagu näiteks mootori mähiste isolatsiooni liigne vananemine, akustiline müra ja sagedusmuunduri poolt põhjustatud uitvoolud. Läbi erinevate häiringute eemaldamise, ei teki mootori üle kuumenemist ning pikeneb tema eluiga. Siinusfilter võimaldab kasutada ka pikemaid mootori kaableid, sest peegelpinged on viidud minimaalsele tasemele või pea olematuks. Juhul, kui mootori tööpinge on oluliselt kõrgem kui muunduri pinge, võimaldab siinusfilter kasutada sagedusmuunduri väljundis ka transformaatorit.

Põhilised eelised dU/dt filtril siinusfiltri ees on tema odavus, kompaktsus ja komponentide väärtuste väiksus. Kuna siinusfilter vajab suuremat induktiivsust ja mahtuvust, siis ta võib osutada küllaltki suureks lisainvesteeringuks. Samuti on suurtest füüsikalistest väärtustest tingitud ka seadme suuremad mõõtmed ning tõsiasi, et ta tarbib palju energiat ning suurendab kadusid kogu süsteemis.



Joonis 13. Siinusfiltri elektriskeem [2]

1.4.1 Olulisemad parameetrid

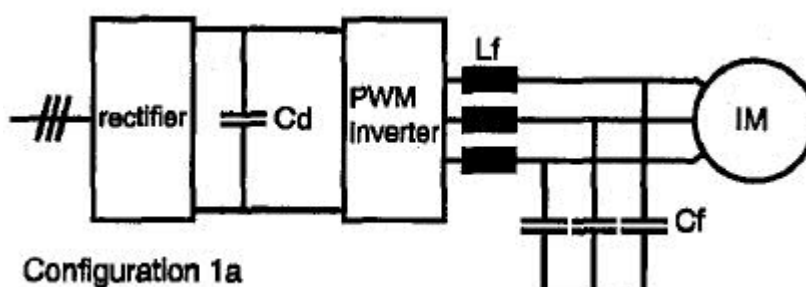
Siinusfiltri olulisemateks parameetriteks on:

- Sisendpinge
- Reaktiivvõimsus
- Voolutugevus
- Sagedusvahemik

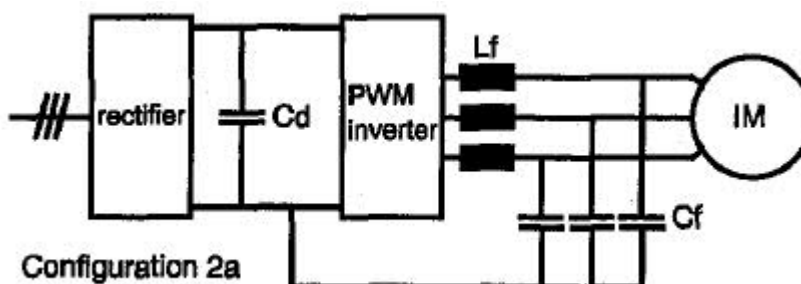
Siinusfiltri resonantssageduse määrab ära filtri induktiivsus ja mahtuvus ning reeglina jääb see mootori töösageduse ja muunduri lülitussageduse vahele. Üldjuhul on

siinusfiltri resonantssagedus 2 kuni 4 korda väiksem sagedusmuunduri lülituskiirusest. Mida suurem on sagedusmuunduri lülitussagedus, seda suurem saab olla ka filtri resonantssagedus ning filter saab olla selle võrra väiksemate komponentidega. Siinusfiltri puhul tuleb arvestada lisanduvate kadudega, sest küllaltki suur induktiivsus lisatakse süsteemi juurde.

Siinusfiltril on mitu võimalikku topoloogiat, mis jagatakse kahte gruppi. Esimesel grupil on muunduri ja filtri vahelised ühendused ainult muunduri väljundi ja filtri sisendi vahel (Joonis 14). Teisel grupil on lisaühendus teostatud filtri ja muunduri alalisvoolulüli vahele (Joonis 15). [10]



Joonis 14. Kondensaatorite neutraalpunkt ei ole ühendatud [10]



Joonis 15. Kondensaatorite neutraalpunkt on ühendatud alalisvoolulüliliga [10]

Kuigi üleüldiselt on topoloogiad sarnased, siis elektrilised omadused on kahel grupil erinevad. Esimese grupi filtrite kondensaatorite pinged on vahelduvpinge, kuid teisel grupi kondensaatoritel on segu vahelduv- ja alalispingest. Esimese grupi kondensaatorite maksimaalne pinge väärtus on võrdne mootori mähise maksimaalse pingega. Pinge maksimumväärtus teisel grupi kondensaatoritel on võrdne alalisvoolulüli pingega. Kolmeefaasilise sümmeetrilise koormuse korral, millel on tähtühenduse neutraalpunkt avatud, ei esine samafaasest pingest tulenevaid voolusid. Seega on teise grupi siinusfiltritel eelis esimese grupi ees, sest nad filtreerivad ka nulljärgnevusvoolu. [10]

Kui kasutada siinusfiltrit sagedusmuunduri ja elektrimootori vahel, siis on oluline veenduda, milline on muunduris sätestatud mootori juhtimise viis ning kas filtrit on võimalik antud võimalikul juhul rakendada.

2. LÄHTEANDMED

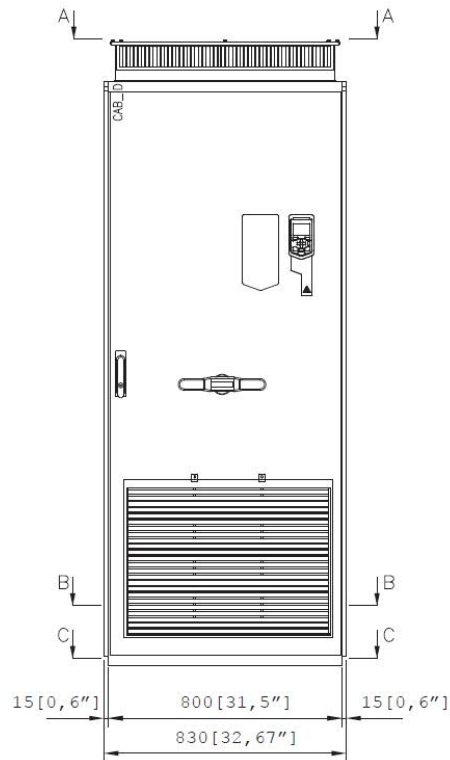
Töö üheks peamiseks eesmärgiks on uurida siinusfiltri projekteerimist üksikusse sagedusmuundurkabinetti. Selleks, et antud tulemuseni jõuda on vajalik määrata projekteerimise algtingimused. Algtingimused võib jagada kaheks, esiteks füüsiliste piirangud, mis tulenevad sellest, et filtrit soovitakse paigalda sagedusmuunduri kabinetti, teiseks elektrilised väärtused mis tulenevad seadme rakendustes.

2.1 Sagedusmuundurkabinett

Mehaanilised piirangu tulenevad filtri paigalduse kohast milleks on sagedusmuundurkabinett. Sõltuvalt konfiguratsioonist ja vajadusest leidub erinevaid kabinette, üldiselt kahte tüüpi: üksikud kabinetid ja kabinettide rivi. Kui on rakendatud kabinettide rivi (ingl. k. *line-up*), siis võib sagedusmuunduri, kaitseseadmete, juhtseadmete ja filtrite jaoks olla olemas eraldi kabinetid, kus ruumipuudust esineb vähe. Kui on rakendatud üksikut kabinetti, siis on kõik muunduri juurde kuuluvad komponendid kompaktsemalt paigutatud ning vajavad mehaanilisest aspektist vaadatuna tõsisemat läbimõtlemist. Käesolevas töös on võetud aluseks üksik sagedusmuundurkabinett, kuhu siinusfilter mahutada.

Antud töö lähtepunktiks oleva oletatava sagedusmuundurkabineti koosseisu kuuluvad kabineti toite pealüliti, sulavkaitsmed, sagedusmuundur ning juhtahelate komponendid. Lisaks eelnimetatule on kabineti ka juhtmed ning latid, mille kaudu liigub mootori toiteks kasutatav vool. Käesolevas töös keskendutud ühe kindla võimsusega sagedusmuundurile, millest sõltuvalt saab kindlaks määrata vaba ruumi kabineti sees. Eelnevas lahenduses on kabineti kasutatud dU/dt filtrit, mis reeglina on siinusfiltritest kompaktsemad ning seeläbi paremini ära mahutatavad, kuna induktiivsuse väärtus on üldjuhul väiksem. Siimaaani on antud sagedusmuunduriga kombinatsioonis levinud taoline siinusfiltri rakendamise lahendus, kus siinusfilter on eraldi korpuses ja asub väljaspool sagedusmuundurkabinetti. Selle töö üks peamisi eesmärke on disainida etteantud elektrilistele nõudmistele vastav siinusfilter, mis mahub sagedusmuundurkabineti sisse.

Üksiku sagedusmuundurkabineti referentssuuruseks on valitud 2000x800x600mm suuruses kabinett. Illustreeriva näitena taolisest sagedusmuundurkabinest on toodud ära ABB muunduri ACS580 raamide R10 ja R11 kabinett joonisel 16:



Joonis 16. ABB ACS580 R10/R11 raamiga sagedusmuundurkabinett [11]

ACS580-07 kabineti omadusi on võrreldud kahe konkureeriva tootja kabinettidega – Vaconi kabinet NX ja Schneider Electricu Altivar Process ATV660. Kabinetis oleva vaba ruumala, mille raames projekteeritakse siinusfilter, on võimalik oletada lähtuvalt kabinettides olevatest dU/dt filtritest. Ühegi tootja kasutusjuhenditest ega andmelehtedest ei selgu, et siinusfiltreid kasutataks samas kabinetis, kus on muundur ise, kuid dU/dt filtreid küll. Ligikaudsed arvestuslikud ruumalad, mille dU/dt filtrid enda alla hõlmavad on toodud tabelis 2.1.

Tabel 2.1. Erinevate tootjate filtrite võrdlus [12], [13], [14], [15], [16]

Tootja, sagedusmuundur	ABB, ACS580		Danfoss, VACON NXC		Schneider Electric, Altivar Process ATV600	
	Siinus	Du/dt	Siinus	Du/dt	Siinus	Du/dt
Filter	B84143V-0390S229	BOCH-0880A-7	SIN-0840-5-0-P	DUT-0820-6-0-P	VW3A5210	VW3A5107
Nimivool [A]	390	880	840	820	600	759
Ruumala [dm ³]	93	45	157	38	126	17,6

Selgelt joonistub andmetest välja, et siinusfiltrid on oma mahult mitmekordselt suuremad ning nõuavad sellist vaba ruumi, mida kabineti sees ei pruugi leida. Kuna konkreetselt ei ole teada vaba ruum kabinetis ega ka projekteeritava siinusfiltri ruumala, võib piiritleda tema poolt hõivatava ruumi tabelis 2.1. toodud andmete põhjal. Välja arvatav siinusfilter tuleb ära mahutada sellise ruumi sisse ära, et teda oleks võimalik kasutada standardlahenduses ja paigutada muunduriga samasse kabinetti. Seetõttu on võetud eesmärgiks, et projekteeritav filter oleks väiksem kui tabelis toodud väiksem siinusfilter, ehk ruumala peab jääma alla 93 dm³.

2.2 Elektrilised nõuded

Siinusfiltri välja töötamise seisukohast on väga oluline teada, missuguste elektriliste parameetrite väärtustega tuleb arvestada. Eeskätt on vaja arvestada, mis võimsusega sagedusmuundur ja tema poolt juhitud elektrimootor töötavad, sest filter peab olema samasuguse võimsustaluvusega ning sealjuures andma mootori sisendklemmidele piisavalt puhta signaali, et täita ära enda eesmärk. Elektrotehniliste parameetrite osas sätestavad nõudeid ülemaailmsed standardid, milles on ära defineeritud elektriagamites aset leidvad häired, nende põhjused ning kuidas neid ära hoida.

- IEC 60034 on pöörlevate elektrimasinate rahvusvaheline standard. Antud töö seisukohast kirjeldab see standard aspekte, mis seostuvad elektrimootoriga.
- IEC 61800 keskendub reguleeritava kiirusega elektriagamissüsteemidele ning nendega seonduvatele nõuetele. Selles leidub väga põhjalikku infot häiretest kogu elektriagamis.
- NEMA MG1 on Ameerika Ühendriikides kohalduv standard elektrimootoritele- ja generaatoritele.

Peatükis on välja toodud projekteeritavale siinusfiltrile rakenduvad piirangud, mis määravad ära tema põhilised elektrilised parameetrid ja ka kabineti mahutavusest tingitud ruumala piirangud. Eesmärgiks on võetud mahutada filter kabinetti mõõtmetega 2000x800x600 mm. Tüüpilise selliste mõõtmetega erinevate tootjate poolt pakutavaid kabinette võrreldi ning nende filtrite ruumalad on ära näidatud. Selle info kohaselt võis järeldada, et siinusfiltri koguruumala võiks jääda alla 93 dm³.

3. FILTRI VÄLJA TÖÖTAMINE

Filtri väljatöötamise võib jagada erinevateks etappideks. Filter koosneb kahest komponendist: induktiivpoolist ning kondensaatorist. Esmalt on vaja määrata induktiivsuse ja mahtuvuse väärtused. Vastavalt antud väärtustele saab hakata määrama filtri mõõtmeid, leides vajaliku induktiivpooli mõõtmed ning mahtuvuspanga mõõtmed. Kuna induktiivpool on plaanis ise projekteerida siis esmalt on vaatluse all induktiivpooli projekteerimine ning vastavalt sellele parimate mõõtude leidmine. Kondensaatori valikul on lähtunud filtri resonantssagedusest, mis on sätestatud algandmetes.

3.1 Filtri arvutused

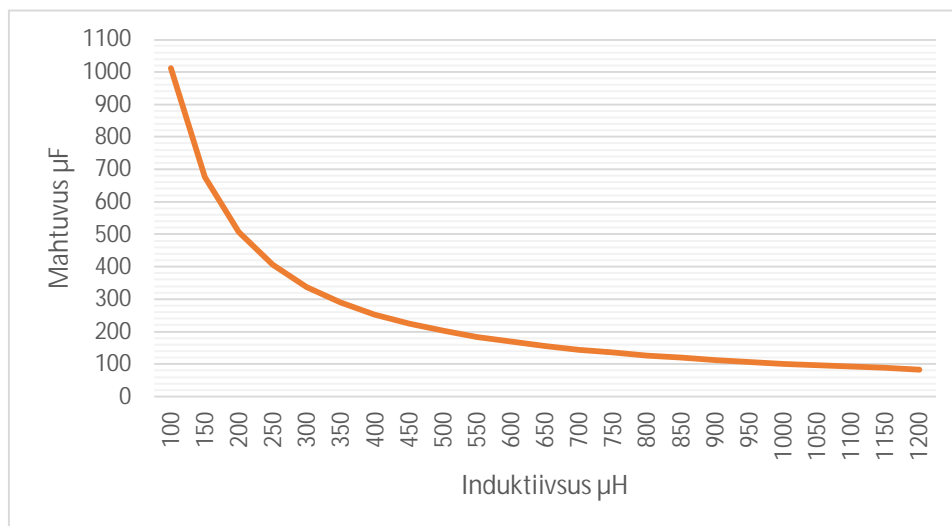
Siinusfiltri disainis on oluline paika panna, milliste mõõtmete ja proportsioonide juures suudab filter täita vajalikud elektrilised nõudmised. Antud töös on eriti oluline see, et mõõtmed oleksid optimeeritud ning seda on võimalik saavutada läbi kordusarvutuste, mis läbi lõpptulemusena tuleb leida optimaalseim lahendus. Esimese asjana on tarvis ära määratleda resonantssagedus f_r , mille järgi on võimalik hakata arvestama filtri induktiivsuse ja mahtuvuse väärtuseid. Kuna siinkohal on juba resonantssagedus teada – 500Hz, siis saab uurida induktiivsuse ja mahtuvuse omavahelist suhet antud sagedusel.

Vastavalt valemile (3.1) on koostatud graafik, mis on näha joonisel 17. Sealt on näha, et induktiivsuse kasvades väheneb vajalik mahtuvuse suurus ja vastupidi. Nendest väärtustest sõltub ka hiljem välja arvutatav minimaalne filtri ruumala. Kui resonantssagedus on püsiv, siis mahtuvuse saab välja arvutada vastavalt induktiivsuse väärtusele:

$$C = \frac{1}{(2\pi f_r)^2 * L} \quad (3.1)$$

kus f_r – resonantssagedus, Hz,

L – induktiivsus, H.



Joonis 17. Induktiivsuse ja mahtuvuse väärtused resonantssagedusel 500Hz

Kuna ei ole teada induktiivpooli määrad, siis järgnevalt leitakse vajalikud pooli väärtused. Selleks teostatakse kordusarvutusi, et veenduda, milline lahendus on optimaalseim, et tagada nõutud elektrilised tingimused minimaalsete kadudega. Arvutades olulisemad väärtused välja, on võimalik teostada magnet- ja temperatuuriväljade arvutused.

3.2 Induktiivpooli arvutused

Selleks, et saaks filtrit projekteerida ning määrata tema füüsilised parameetrid on vaja teada, millistele elektrilistele parameetritele filter peab vastama. Parameetrite määramiseks on lähtutud eespool tabelis 2.1. toodud filtrite nimivooludest, mille kohaselt ligikaudse üldistusena on projekteeritava filtri nimivooluks 800 A. Filtri tööpinge väärtus 400 V on üks levinumaid nimiväljundpingeid sagedusmuunduritel. Sagedusmuunduri lülitussageduse vahemik ja väljundsagedus on oletatud enim levinumate IGBT põhiste sagedusmuundurite järgi. Filtri resonantssageduse väärtus tuleneb muunduri minimaalsest lülitussagedusest. Reeglina on siinusfiltrite resonantssagedus valitud olema umbes 2-4 korda väiksem muunduri lülitussagedusest. Antud töös on arvestatud 3 korda väiksema lülitussagedusega.

Alljärgnevas tabelis 3.1 on ära toodud elektrilised lähteandmed, mis on valitud projekteeritavale filtrile:

Tabel 3.1. Lähteandmed filtrile

Tööpinge [V]	400
Voolutugevus [A]	800
Muunduri min. lülitussagedus [kHz]	1,5
Muunduri väljundsagedus [Hz]	50
Filtri resonantssagedus [Hz]	500

Induktiivpooli kõik kolm faasi on mõeldud olema ühisel EI-kujulisel südamikul. Kuigi filtri rakenduses on induktiivpool kolmefaasiline, on mõistlik tema arvutused teostada ühte faasi arvestades ning hiljem saadud tulemused arvutada kolmefaasilisele süsteemile vastavaks. Selleks, et määrata südamiku materjalist tulevad piirangud ja lähteandmed, on vaja valida välja konkreetne elektrotehnilise terase leht.

Induktiivpooli südamiku materjaliks on antud töös valitud *JFE Steel Corporation*-i toodetud elektrotehniline teras JG CORE 35JG135, mis leiab kasutust näiteks suurtes pöörlevates elektrimasinates ja jõutrafodes, kuid samuti ka induktiivpoolides. Esmatähtsad andmed valitud terase kohta on toodud tabelis 3.2. [17]

Tabel 3.2 Elektrotehnilise terase andmed [17]

Lehe paksus [mm]	0,35
Tihedus [kg/dm ³]	7,65
Maksimaalne magnetvootihedus [T]	1,7
Võimsuskaod 50 Hz juures [W/kg]	1,35
Minimaalne laminaatide täitetegur	0,96
Magnetvälja tugevus [A/m]	800

Kuna andmelehel ei ole elektrotehnilise terase suhtelist magnetilist läbitavust μ_r antud, on vaja see välja arvutada. Seda saab teha kasutades valemit:

$$B = \mu_0 * \mu_r * H, \quad (3.2)$$

kus B – magnetvootihedus, T,

μ_0 – magnetiline konstant,

H – magnetvälja tugevus, A/m,

Teades maksimaalset magnetvootihedust ja magnetvälja tugevust, saab valemi (3.2) kaudu avaldada μ_r :

$$\mu_r = \frac{B}{\mu_0 * H} = \frac{1,7}{4\pi * 10^{-7} * 800} = 1691 \quad (3.3)$$

3.2.1 Induktiivpooli ligilähedaste mõõtude määramine

Selleks, et oleks lihtsam määrata induktiivpooli südamiku mõõtmeid, on mõistlik kasutada arvutuskäiku, mis on toodud *Transformer And Inductor Handbook*-s. Arvutuskäik näeb ette seadme võimsustaluvuse järgi õige südamiku valikut ning raamatus on ära toodud südamike standardmõõtmed, mida on võimalik üle kanda antud töö rakendusse. [18]

Lähteandmed arvutuse teostuseks on toodud tabelis 3.3.

Tabel 3.3. Induktiivpooli lähteandmed.

Pinge [V]	400
Voolutugevus [A]	800
Sagedus [Hz]	500
Voolutihedus [A/mm ²]	4
Suhteline magnetiline läbitavus	1691
Magnetvootihedus [T]	1,7
Akna täitetegur	0,4
Lainekuju faktor	4

Esmalt on vaja arvutada induktiivpooli näivvõimsus S :

$$S = U * I = 400 * 800 = 320\,000 \text{ W} \quad (3.4)$$

Kasutades näivvõimsust saab leida südamiku pindala koguprodukti A_p :

$$A_p = \frac{S * 10^4}{K_f * K_u * f * B * J'} \quad (3.5)$$

kus K_f – lainekuju faktor,

K_u – akna täitetegur,

f – sagedus, Hz,

B – magnetvootihedus, T,

J – voolutihedus, A/cm².

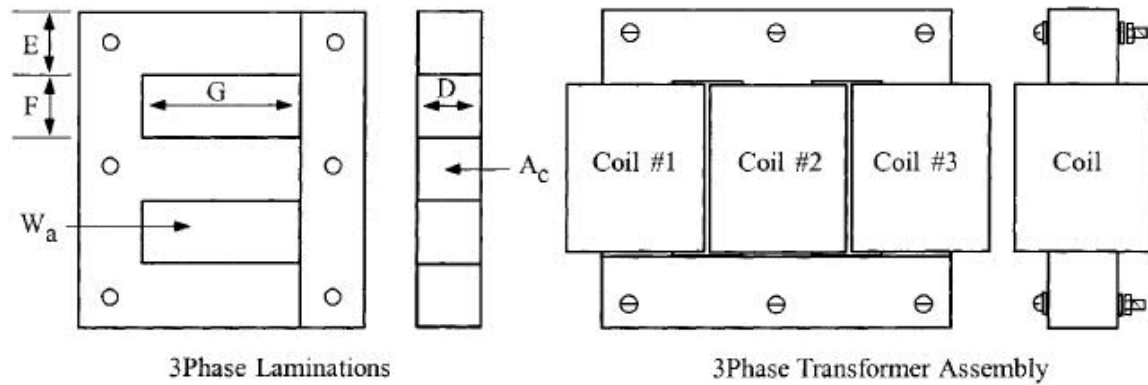
Ap leidmine valemiga 3.8:

$$Ap = \frac{320\,000 * 10^4}{4 * 0,4 * 500 * 1,7 * 400} = 5882 \text{ cm}^4$$

Teades Ap väärtust, saab teha valiku kirjandusallikas viidatud tabelist, kus on erinevate südamike tüüpide kaupa toodud välja südamike lehtede mõõtmed ja muud omadused, sõltuvalt valikust. Valida tuleks arvatud väärtusele lähim. Kui seda pole võimalik mõistlikkuse piires teha, soovitatakse kasutada südamiku kahekordistamist. Sellisel juhul püsiks akna suurus sama, kuid südamiku ristlõike suureneks kaks korda. Joonisel 21 on toodud ära valitud kolmefaasiline südamik 2.400EI, mida on sügavuti kahekordistatud, sest ühekordsest kogusest ei piisa võimsust arvestades. Kuna järgmistes mõötudes südamik on liialt suure erinevusega välja arvatud Ap väärtusega, on olemasolevat kahekordistatud. Sügavuti südamiku suurendamine ei suurenda pooli akna suurust, vaid ainult magnetahela ristlõiget. Järgnevalt on toodud edasiseks arvutuseks saadud andmed tabelis 3.4, kus tärniga tähistatud parameetrid on juba kahekordsed. [18]

Tabel 3.4. Südamiku 2.400EI andmed.

Südamiku kaal* [kg]	57,268
Keskmine keeru pikkus* [cm]	69,6
Magnetahela ristlõike pindala* [cm ²]	70,606
Akna pindala [cm ²]	92,9
Pindala koguprodukt* [cm ⁴]	9839,32
Südamiku pindala* [cm ²]	5798



Joonis 18. Kolmefaasiline südamik. [18]

Eelneva joonise 18 peal toodud mõõtmed on standardsed ning neid on võimalik kasutada terve ülejäänud arvutuskäigu lihtsustamiseks. Valitud magnetsüdamiku olulisemad mõõtmed on toodud tabelis 3.5.

Tabel 3.5. 2.400EI magnetsüdamiku mõõtmed

E [cm]	6,096
F [cm]	6,096
G [cm]	15,24
D [cm]	6,096

Saadud andmetega on võimalik arvutada välja keerdude arv N :

$$N = \frac{U \cdot 10^4}{K_f \cdot B \cdot f \cdot A_c} = \frac{400 \cdot 10^4}{4 \cdot 1,7 \cdot 500 \cdot 70,606} = 16,6625 \approx 17 \quad (3.6)$$

Järgmisena arvutatakse induktiivne reaktiivtakistus X_L :

$$X_L = \frac{U}{I} = \frac{400}{800} = 0,5 \Omega \quad (3.7)$$

Induktiivpooli induktiivsus L :

$$L = \frac{X_L}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{0,5}{2 \cdot \pi \cdot 500} = 0,00015915 H \quad (3.8)$$

Magnetvootiheduse B uue väärtuse leidmine:

$$B = \frac{U \cdot 10^4}{K_f \cdot N \cdot A_c \cdot f} = \frac{400 \cdot 10^4}{4 \cdot 17 \cdot 70,606 \cdot 500} = 1,6662 T \quad (3.9)$$

Elektrijuhi ristlõike A_{wL} leidmine:

$$A_{wL} = \frac{I}{J} = \frac{800}{400} = 2 \text{ cm}^2 \quad (3.10)$$

Saadud väärtusele vastavalt on valitud lähim vaste juhtme AWG 0000 näol, mille palja juhtme ristlõike pindala on $1,07 \text{ cm}^2$, kuid kasutades kahte juhet on väärtuseks $A_w = 2,14 \text{ cm}^2$. Valitud juhtme takistus on $1,6 \frac{\mu\Omega}{\text{cm}}$, kuid kahe paralleelse juhtme korral on väärtus $0,8 \frac{\mu\Omega}{\text{cm}}$.

Mähise takistus R_L :

$$R_L = MLT * N * R * 10^{-6} = 69,6 * 17 * 0,8 * 10^{-6} = 0,000946 \Omega \quad (3.11)$$

Vaseskao P_L arvutus:

$$P_L = I^2 * R_L = 800^2 * 0,000946 = 605,7984 \text{ W} \quad (3.12)$$

Südamiku kaod massi suhtes saab arvutada kasutades masina töösagedus, milleks on $f = 50 \text{ Hz}$:

$$\frac{W}{kg} = 0,000557 * f^{1,68} * B^{1,86} = 1,03 \text{ W/kg} \quad (3.13)$$

Valemis kasutatud konstandid on võetud allikas [18] eespool olnud peatükist, kus on ette antud vastava paksusega elektrotehnilise terase lehe kohta käivad väärtused.

Südamiku soojuslik kadu P_{Fe} :

$$P_{Fe} = \frac{W}{kg} * m_{Fe} = 1,03 * 57,268 \approx 59 \text{ W} \quad (3.14)$$

Kogukaod P_Σ :

$$P_\Sigma = P_L + P_{Fe} = 605,7984 + 59 \approx 665 \text{ W} \quad (3.15)$$

Akna pindala täitmise faktor K_u :

$$K_u = \frac{N * A_w}{\frac{W_a}{2}} = \frac{17 * 2,14}{\frac{92,9}{2}} = 0,7832 \quad (3.16)$$

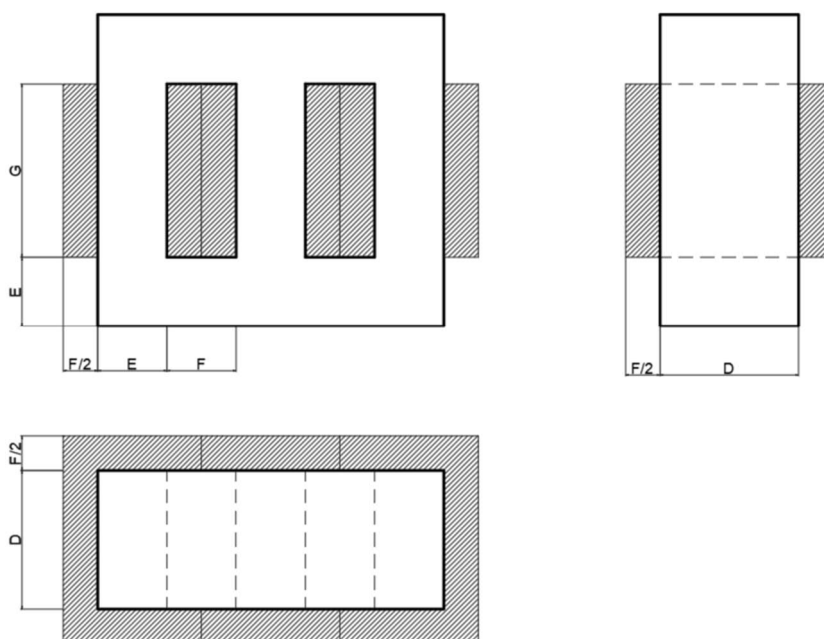
Siinusfiltri lähteandmetest tulenevalt valiti võimsustaluvuse järgi pooli südamik, mille suurendamine kaks korda on ligilähedaseim tulemus võimsustaluvuse aspektist. Selgeks

sai induktiivpooli vajalik induktiivsus, keerdude arv, juhtmekeeru ristlõike pindala ning kogu eeldatavad kaod. Edasi on võimalik saadud väärtusi kasutada kui algandmeid induktiivpooli projekteerimiseks.

3.2.2 Analüütilised arvutused

Analüütiliste arvutuste eesmärk on hinnata ja võimalusel optimeerida saadud induktiivpooli mõõtmeid ning viia kaks erinevat arvutusviisi omavahel vastavusse. Tähtis on analüütilisi arvutusi tehes veenduda eelnevas alapeatükis tehtud arvutuskäiguga saadud geomeetriliste väärtuste õigsuses, sest mõned väärtused tulid kaasa südamiku valimisel.

Filtri induktiivpooli südamiku üldine asendiplaani koos seadme ruumala arvutusteks vajalike mõõtudega on toodud joonisel 19:



Joonis 19. Kolmefaasilise induktiivpooli mõõtmed

Eelneval joonisel 19 on toodud ära mõõdud, mille abil on võimalik induktiivpooli ruumala arvutada. Mähise poolt ära võetav mõtteline ruum on viirutatud ning lihtsustuse huvides pole pooli pealtvaates näidatud mähise paindenurka, vaid see on jäetud täisnurgaks. Arvutuste hõlbustamiseks on mõistlik teha mõned lihtsustused suhtarvude abil:

$$k_w = \frac{D}{E} \quad (3.17)$$

$$k_s = \frac{F \cdot 0,5}{E + F \cdot 0,5} \quad (3.18)$$

$$k_h = \frac{G}{E+G} \quad (3.19)$$

Kuna eelnevas alapeatükis kasutatud kolmefaasilise induktiivpooli südamik on standardmöötmes, siis tema proportsioonid on otseselt üle võetud ka käesolevasse arvutusse:

$$k_w = 2$$

$$k_s = \frac{1}{3}$$

$$k_h \approx 0.7143$$

Lähteandmetes antud voolutugevus on efektiivväärtus. Filtri maksimaalne voolutugevus I_{max} avaldub läbi efektiivväärtuse I_{eff} :

$$I_{max} = \sqrt{2} * I_{eff} = \sqrt{2} * 800 = 1131 \text{ A} \quad (3.20)$$

Et leida induktiivpooli magnetsüdamiku ristlõike pindala, on tarvis esmalt avaldada induktiivsus läbi erinevate valemite. Siinusfiltri induktiivsus on leitav valemiga:

$$L = \frac{\psi}{I_{max}}, \quad (3.21)$$

kus ψ – aheldusvoog, Wb,

I_{max} – voolutugevuse maksimumväärtus, A.

Aheldusvoogu on võimalik arvutada:

$$\psi = N * \phi, \quad (3.22)$$

kus ϕ – magnetvoog, Wb,

N – keerdude arv pooli südamiku ümber.

Magnetvoogu on võimalik leida ka teisiti:

$$\phi = B * S_m, \quad (3.23)$$

kus B – magnetvootihedus, T,

S_m – magnetilise juhi ristlõike pindala, mm².

Vastavalt valemitele (3.21), (3.22) ja (3.23) avaldub induktiivsus L:

$$L = \frac{N \cdot B \cdot S_{meff}}{I_{max}} \quad (3.24)$$

Kui kõik muud tunnussuurused on määratud või välja arvatud, siis valemist (3.24) on võimalik avaldada magnetahela ristlõikepindala S_m :

$$S_{meff1} = \frac{I_{max} \cdot L}{N \cdot B} = \frac{1131 \cdot 1,5915 \cdot 10^{-4}}{17 \cdot 1,6662} \approx 6357 \text{ mm}^2 \quad (3.25)$$

Tulenevalt eelnevalt valitud standardsuurustes teraslehtede mõõtudest, tuleb arvutada reaalne magnetahela ristlõige kasutades samba laiuse mõõtu $D = l_{Fe}$.

$$S_{meff2} = E^2 \cdot k_w = 60,96^2 \cdot 2 \approx 7432 \text{ mm}^2 \quad (3.26)$$

Saadud tulemusest võib järeldada, et südamiku geomeetria tagab elektrilised nõuded. Kui arvesse võtta laminaatide täitetegurit, mis valitud materjali puhul on $K_{sf} = 0,96$, siis magnetahela ristlõikepindala väärtus on:

$$S_m = \frac{S_{meff2}}{K_{sf}} = \frac{7432}{0,96} \approx 7742 \text{ mm}^2 = 77,42 \text{ cm}^2 \quad (3.27)$$

Kui alapeatükis 3.2.1 tehtud arvutustes oli etteantud magnetsüdamiku ristlõike pindala väärtus $70,606 \text{ cm}^2$, siis äsjastes arvutustes tuli eelneva väärtusega mõnevõrra erinevus sisse, mis võib olla tulenenud laminatsioonitegurist, kuid lõpuni selge ei ole, mille tõttu antud erinevus tekib. Kuna väärtuse vahe ei ole liialt märkimisväärne, on autor otsustanud seda ignoreerida.

Elektrijuhtme kimbu või pooli mõõtmete määramisel saab lähtuda nimivoolust, mis induktiivpooli läbib. Vastavalt jahutustingimustele peab olema valitud voolutihedus, mis ka siinkohal on valitud 4 A/mm^2 . Elektrijuhi ristlõike arvutamine toimub samamoodi, kui eelnevas alapeatükis valemis (3.10):

$$S_{eff} = \frac{I}{j} = \frac{800}{4} = 200 \text{ mm}^2 = 0,0002 \text{ m}^2 \quad (3.28)$$

Et leida kogu mähise poolt hõivatud ristlõike pindala, tuleb valemist (3.28) saadud vastust korrutada keerdude arvuga N ja läbi jagada akna täiteteguriga K_u :

$$S_e = \frac{S_{eff} \cdot N}{K_u} = \frac{200 \cdot 17}{0,7832} = 4341 \text{ mm}^2 \quad (3.29)$$

Kui induktiivpooli mõõdud on paigas, saab hakata arvutama tema kadusid. Rauaskadude arvutamiseks on kõigepealt tarvis arvutada välja südamiku ruumala:

$$V_m = D * (3E + 2F) * (2E + G) - (D * 2F * G) = 60,96 * (3 * 60,96 + 4 * 30,48) * (2 * 60,96 + 152,41) - (60,96 * 4 * 30,48 * 152,41) = 7\,928\,955 \text{ mm}^3 = 7,9 \text{ dm}^3 \quad (3.30)$$

Südamiku materjali tiheduse ja valemiga (3.30) leitud ruumalaga, saab leida südamiku massi:

$$m_{Fe} = \rho_{Fe} * V_m = 7,65 * 7,9 = 60,65 \text{ kg} \quad (3.31)$$

Südamiku kadude arvutuseks on siinkohal mõistlik kasutada terase andmeleheltsaadud infot kohta, kus $W/kg = 1,35 : [17]$

$$P_{Fe} = \frac{W}{kg} * m_{Fe} = 1,35 * 60,65 \approx 81,88 \text{ W} \quad (3.32)$$

Vaseskadude arvutamiseks on vaja teada keskmist juhtmekeeru pikkust MLT (*Mean Length Turn*). Arvestada tuleb arvutuses ka vasest juhi läbimõõtu, mille saab üle kanda eelneva alapeatüki arvutusest, kus võeti juhiks kahe AWG 0000 juhtmega juhtmekimp, mille ühe juhtme läbimõõt on $D_{wL} = 11,684 \text{ mm} = 0,011684 \text{ m}$. MLT arvutamine käib analoogselt magnetahela keskmise pikkuse arvutamisega:

$$MLT = (2D + 2E + \pi * 2D_{wL}) = 0,4392 \text{ m} \quad (3.33)$$

Elektriahela takistus R_{Cu} :

$$R_{Cu} = \rho_{Cu} * \frac{MLT}{S_{eff}} * N = 1,68 * 10^{-8} * \frac{0,4392}{0,0002} * 17 = 6,27 * 10^{-4} \Omega \quad (3.34)$$

Vaseskaod P_{Cu} :

$$P_{Cu} = I_{eff}^2 * R_{Cu} = 800^2 * 6,27 * 10^{-4} \approx 401,4 \text{ W} \quad (3.35)$$

Kogukaod poolis:

$$P_{\Sigma} = P_{Fe} + 3 * P_{Cu} = 81,88 + 3 * 401,4 = 1286,08 \text{ W} \quad (3.36)$$

Induktiivpooli kogu minimaalset ruumala arvutamiseks tuleb sisse arvestada ka pool akna laiust $\frac{F}{2}$ igas suunas:

$$V_L = (3E + 3F) * (2E + G) * (D + F) = 18\,351\,116 \text{ mm}^3 = 18,35 \text{ dm}^3 \quad (3.37)$$

Arvutuste kontrollimiseks on võimalik leida keskmine magnetahela pikkus *MPL (Mean Path Length)*, mis annab geomeetriast lähtuvalt magnetahela reluktantsi ning viimase abiga omakorda on võimalik reaalne induktiivsus arvutada. Lähtudes joonisest 19, on võimalik tuletada MPL leidmiseks valem:

$$MPL = (4E + F + 2G) * 2 \approx 1,22 \text{ m} \quad (3.38)$$

Reluktants:

$$Rel = \frac{MPL}{\mu * \mu_0 * S_{meff2}} = \frac{1,22}{4 * \pi * 10^{-7} * 1691 * 7432 * 10^{-6}} = 77\,200 \, \Omega \quad (3.39)$$

Magneetimisinduktiivsus:

$$L = \frac{N^2}{R} = \frac{17^2}{77\,200} = 0,0037 \text{ H} \quad (3.40)$$

Saadud induktiivsuse väärtus erineb märkimisväärselt valemiga (3.8) arvutatud induktiivsuse väärtusest. Selle põhjuseks võib lugeda pooli magnetsüdamikute valikut, mille aluseks oli võimsustaluvus ning seeläbi võimaldab ka suuremat potentsiaalset induktiivsust. Kuna antud töö rakenduses ei ole niivõrd suur induktiivsus soovitatav, on tarvis pooli reluktantsi suurendada õhupilu lisamise teel. Õhupilu poolt kompenseeritava reluktantsi väärtuse saab välja arvutada. Soovitavale induktiivsusele vastav reluktants:

$$Rel_1 = \frac{N^2}{L} = \frac{17^2}{1,5915 * 10^{-4}} = 1\,815\,897 \frac{A}{Wb} \quad (3.41)$$

Õhupilu reluktants:

$$Rel_g = Rel_1 - Rel = 1\,815\,897 - 77\,200 = 1\,738\,697 \frac{A}{Wb} \quad (3.42)$$

Õhupilu arvutus:

$$l_g = Rel_g * S_{meff2} * \mu_0 = 1\,738\,697 * 7432 * 10^{-6} * 4 * \pi * 10^{-7} = 0,0162 \text{ m} \quad (3.43)$$

Alapeatükist 3.2.1. esialgselt välja jäänud arvutuskäik on õhupilu arvutamine, mis on allikas eelkõige mõeldud ühefaasilistele südamikele ning neil puhul on ka algandmetes antud magnetahela pikkus MPL. Nüüd, kui õhupilu leiab rakendust, tasub arvutada ümber ka elektri juhi keerdude arv N. Alustades õhupilu väärtuse leidmisest, on allika *Transformer and Inductor Design Handbook* kohaselt on arvutuskäik järgmine:

$$l_g = \frac{0,4 * \pi * N^2 * S_{meff2} * 10^{-8}}{L} - \frac{MPL}{\mu} = \frac{0,4 * \pi * 17^2 * 74,32 * 10^{-8}}{1,5915 * 10^{-4}} - \frac{121,92}{1691} = 1,62 \text{ cm} \quad (3.44)$$

Õhupilu tõttu muutub magnetvoog selle ümbruses sedasi, et osa voost liigub enne pilu südamikust välja ning pärast pilu naaseb ligi täisnurkselt südamikku, tekitades

pöörivoolusid ja lisakadusid nii südamikus kui ka mähises. Selle kõrvale kalduva magnetvoo nimi on inglise keeles *Fringing Flux* ning seda arvutatakse nii:

$$F = \left(1 + \frac{l_g}{\sqrt{S_{meff2}}} * \ln\left(\frac{2G}{l_g}\right) \right) = \left(1 + \frac{1,62}{\sqrt{74,32}} * \ln\left(\frac{2*15,24}{1,62}\right) \right) \approx 1,55 \quad (3.45)$$

Uus keerdude arv N avaldub järgnevalt:

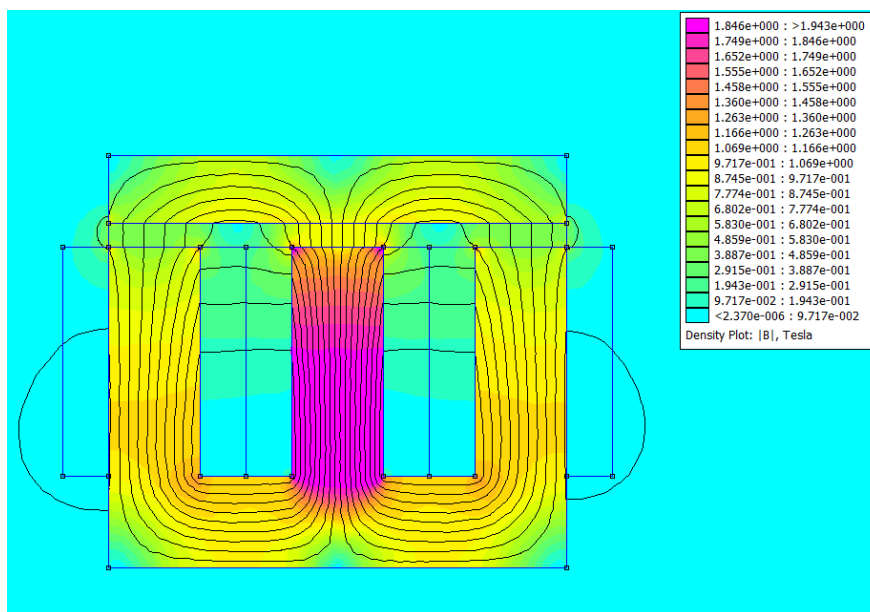
$$N = \sqrt{\frac{L * l_g}{0,4\pi * A_c * F * 10^{-8}}} \approx 13 \quad (3.46)$$

Saadud tulemused erinevad mõnevõrra esialgselt tehtutest. Muutus induktiivpooli geomeetria, eelkõige magnetahela ristlõikepindala. Käsitsi välja arvutatud ning seeläbi väiksemaks osutunud keskmine juhtmekeeru pikkus MLT ja muutunud geomeetrilised andmed mõjutasid pooli kadusid, mis olid käesolevas alapeatükis väiksemad. Viimasena lisandus veel induktiivpoolile juurde ka õhupilu, mis suurendab magnetahela reluktantsi ning seeläbi tagab vastava induktiivsuse väärtuse. Õhupilu lisamisest tingituna oli vaja korrigeerida pooli keerdude arvu N. Enne lõplike kadude arvutust tuleb saadud tulemust valideerida FEMM-i magnetväljade arvutuse simulatsiooniga.

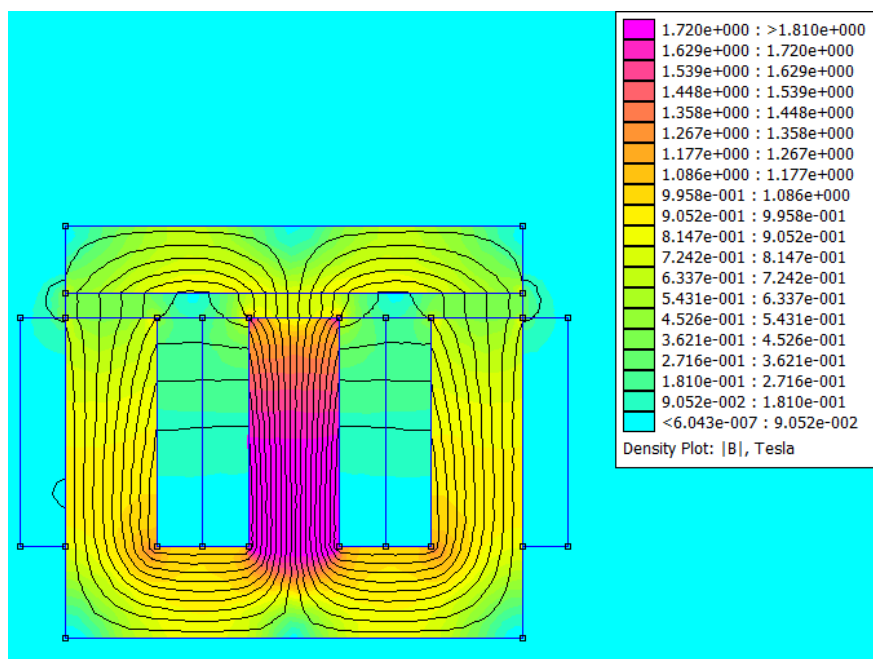
3.2.3 Simulatsioonid FEMM-is

Eelnevalt analüütilistes arvutustes tehtud tulemusi saab programmis FEMM simuleerida, kirjutades MatLab-i programmi koodi, milles oleks defineeritud probleem ja vajalikud parameetrid. Eelnevalt defineeritud mõõtmetele E, D, G ja F lisanduvad veel õhupilu l_g ning parandatud keerdude arv N . Olulisemad parameetrid, mis tulemustes on kajastatud, on magnetvootihedus B ja induktiivsus L . Simuleerimisel on kasutatud kolmefaasilise süsteemi sellist hetke, kus faas B on amplituudväärtusel ehk $I_B = 1131$. Ülejäänud faasid A ja C on poole amplituudväärtusel miinuspoole peal ehk $I_A = I_C = -565,5$.

Joonis 20 näitab simuleerimise tulemust, kui keerdude arv $N=13$. On näha, et magnetvootihedus on keskmise faasi tipu korral liiga suur ehk $B \approx 2T$. Induktiivsus L on iga faasi puhul liiga suur, ulatudes väärtusest $2,31 * 10^{-4}$ H kuni $2,56 * 10^{-4}$ H. Ilmneb, et arvutustulemused erinevad simulatsiooni tulemustest ning seetõttu on võimalik ka käsitsi muuta parameetreid, näiteks keerdude arvu N , mille vähendamisel peab induktiivsus L vähenema. Vähendades keerdude arvu proovimise teel, võib saavutada lähima tulemuse kui $N=10$. Joonis 21 näitab visuaalselt tulemust sul puhul ning kuigi magnetvootihedus B ei ole alla $1,7$ T, siis iga faasi induktiivsus on antud geomeetria juures kõige lähim tulemus, varieerudes alates $1,59 * 10^{-4}$ H kuni $1,65 * 10^{-4}$ H.



Joonis 20. Simulatsioon, N=13



Joonis 21. Simulatsioon, N=10

Saadud tulemusi arvesse võttes, on mõistlik arvutada välja kogukaod analüütiliselt ning seejärel simuleerida temperatuuriväljade arvutusi FEMM-is. Muutused keerdude arvus ja õhupilu lisamine toovad endaga kaasa ka muutuse kadude arvutuses.

Valemiga (3.47) saab leida südamikuga kaod P_{Fe} :

$$P_{Fe} = \frac{W}{kg} * m_{Fe} = 1,35 * 60,65 \approx 82 W \quad (3.47)$$

Induktiivpooli õhupilu kadude arvutuseks on tarvis kasutada koefitsienti K_i , mis teraslehest südamikü puhul on 0,155. Õhupilu kaod on: [18]

$$P_g = K_i * E * l_g * f * B^2 = 0,155 * 6,096 * 1,62 * 50 * 1,81^2 \approx 250,7 \text{ W} \quad (3.48)$$

Kogukaod induktiivpoolis:

$$P_\Sigma = P_{Fe} + 3 * P_{Cu} + P_g = 82 + 3 * 401,4 + 250,7 \approx 1537 \text{ W} \quad (3.49)$$

Alapeatükis 3.2.1 tuli andmete seas välja standardse magnetsüdamiku üldpindala $A_t = 5798 \text{ cm}^2$. Selleks, et välja arvutada pooli pinna soojuseralduse tihedust Ψ , on vaja arvutada välja võimalikult täpne pooli pindala.

Raamatus *Transformer and Inductor Design Handbook* on välja toodud, et seadme pinna A_t ja pindala koguprodukti A_p vaheline seos väljendub valemiga: [18]

$$A_t = K_s * A_p^{0,5}, \quad (3.50)$$

kus K_s – südamiku ehitusest sõltuv konstant.

Konstandi K_s väärtused on toodud allikas ära ning laminaatide kasutamisel südamiku on väärtuseks $K_s = 41,3$. Selle abil saab arvutada kahekordistatud südamikuga induktiivpooli hinnangulise pindala.

$$A_t = 41,3 * 9839,32^{0,5} \approx 4097 \text{ cm}^2$$

Pooli pinna soojuseralduse tiheduse saab arvutada:

$$\Psi = \frac{P_\Sigma}{A_{t,arvutatud}} = \frac{1537}{4097} = 0,375 \frac{\text{W}}{\text{cm}^2} \quad (3.51)$$

Induktiivpoolis toimuv temperatuuri tõus T_r :

$$T_r = 450 * (\Psi)^{0,826} = 450 * (0,375)^{0,826} \approx 200 \text{ C}^\circ \quad (3.52)$$

Magnetväljade arvutusest FEMM-is saab iga faasi vaseskaod teada, mida kasutada temperatuuriväljade arvutuses. Südamiku kaod on võetud analüütilisest arvutusest ning õhupilust tingitud kaod on lisatud südamiku kadude hulka, sest nad väljenduvad tehtud arvutustes rauaskadudena.

FEMM-i temperatuuriväljade arvutusteks on tarvis defineerida materjalide soojusjuhtivused, neid ümbritsev keskkond ja jahutustingimused. Elektrotehnilise terase soojusjuhtivusteguriks on arvestatud $24 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$, vaskmähise efektiivne

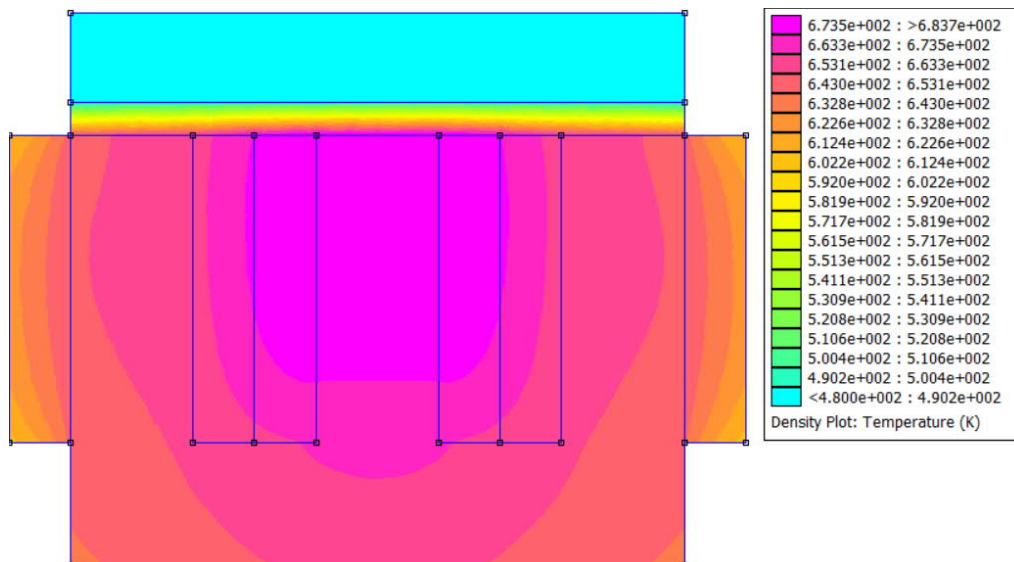
soojusjuhtivustegur sõltub isolatsioonist, juhtide arvust, juhtme tüübist ja mitmetest muudest mähise omadustest, kuid antud simulatsiooni jaoks on kasutatud soojusjuhtivustegurit $4 \frac{W}{m \cdot K}$. Keskkond on programmis määratlemata, kuna sel juhul tähendaks see seisvat õhku induktiivpooli ümber, mis ei peegelda reaalsust ning on jahutustingimuste mõistes halvim variant. Soojuse ülekande viisidena saab käsitleda nii soojusjuhtivust läbi kontaktpinna, soojuskiirgust kui ka konveksiooni, kuid on siinkohal arvestatud ainult viimasega. Seda seetõttu, et planeeritava siinusfiltri ühendusklemmid ja muud lisanduvad detailid ei ole antud faasis välja projekteeritud ning teda ümbritsevad seadmed teadmata. Sagedusmuundurkabinettides kasutatakse nii loomulikku õhukonveksiooni kui ka sundjahutust, mida tekitatakse ventilaatorite abil. Tavapärase praktika on see, et läbi kabineti alaosas oleva õhufiltri tuleb jahe õhk sisse, mis soojeneb ning liigub üles. Kabineti katusel või ukse ülemises osas paikneb teine õhuava, millest liigub soe õhk välja. Võimsamate muundurite puhul on kasutatud vedelikjahutust, mille jahutusvõime on oluliselt suurem.

Simuleerides erinevaid jahutustingimusi on üheks peamiseks teguriks konveksioonitegur h , mis omab jahutustingimusest sõltuvalt erinevaid väärtuseid, mis on toodud tabelis 3.6: [19]

Tabel 3.6. Konveksiooniteguri väärtused [19]

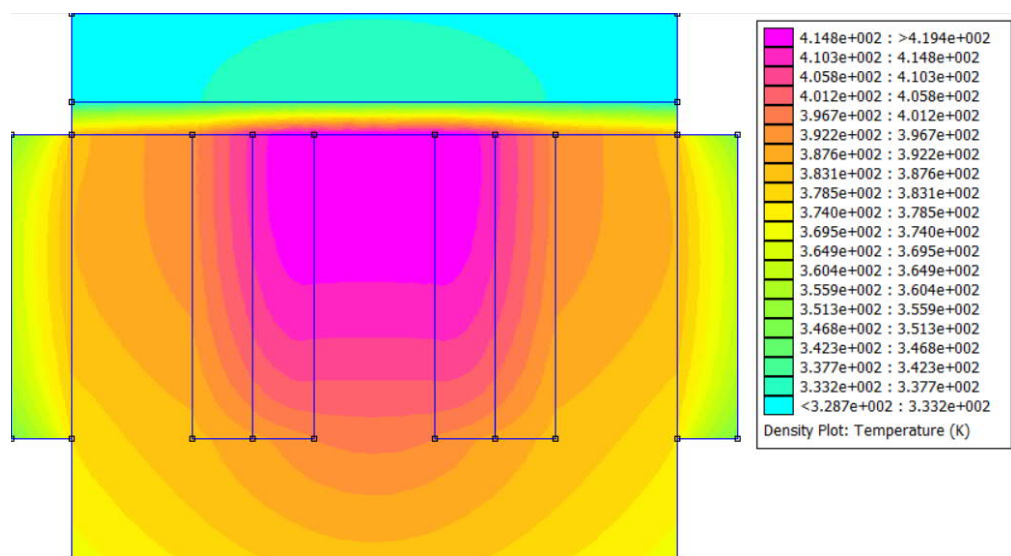
Jahutustingimus	Konveksioonitegur h [W/m ² *K]
Loomulik õhkonveksioon	~ 10
Sundjahutus õhuga	25 - 300
Sundjahutus vedelikuga	100 - 40 000

Loomuliku konveksiooni teel induktiivpooli jahutamine on liialt optimistlik ning seda olukorda ei ole mõtet läbi simuleerida. Kui oletada, et pooli jahutab ventilaator või mitu ventilaatorit, siis teoreetiliselt võiks konveksiooniteguri oletada kuni 300, kuid see on ebarealistlik. Võttes arvesse arvutusi ja katseid, millest on juttu artiklis [20], võib oletada ventilaatorite puhul, et $h \sim 50$. Joonis 22 näitab temperatuuriväljade simulatsiooni tulemusi, kui on konveksiooni tingimuseks loomulik õhu liikumine.



Joonis 22. Temperatuuriväljad, h=10

Simuleerimise tulemus näitab, et maksimumtemperatuur pooli sisemuses võib ulatuda kuni $683,7 \text{ K} \approx 410,55 \text{ }^\circ\text{C}$. Saadud tulemus ei tähenda head mähise isolatsioonile ning seda tuleks kindlasti parandada tõstes konvektsioonitegurit. Seda saab teha oletusel, et kabinetti mahuks ära ka ventilaator(id) induktiivpooli jahutamiseks.



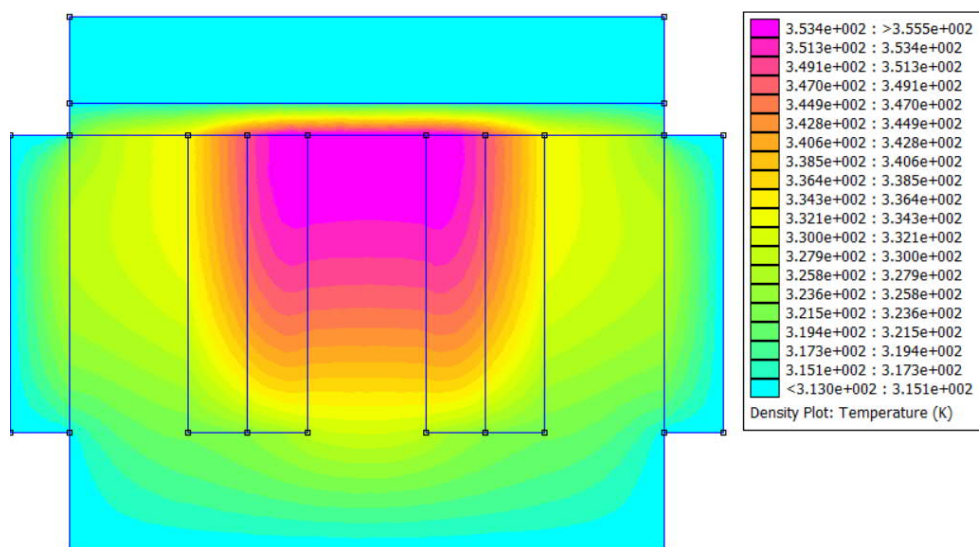
Joonis 23. Temperatuuriväljad, h=50

Joonis 23 näitab parimat võimalikku tulemust sundkonvektsiooni teel, mille puhul ilmneb, et temperatuur võib poolis ulatuda ligikaudu $146,25 \text{ }^\circ\text{C}$, mis on ei ole küll ebarealistlik, ent sellegipoolest teeb olud keerulisemaks seoses mähise isolatsiooniga. Isolatsiooni suhtes kehtivad standardid, mille alusel on jaotatud nad erinevatesse klassidesse sõltuvalt temperatuuri tõusust. Täpsemal projekteerimisel on oluline valida

selline isolatsioon, mis taluks temperatuuri tõusu kuni 146,25 °C ning ilmselt oleks mõistlik jätta ka varu.

Standardi IEC 60085 kohaselt peab olema siinkohal isolatsioon vähemalt F (155 °C) klassist, et pidada vastu maksimumtemperatuurile. [21]

Lihtsustusena võiks ka oletada, et seadme välispinda suudetakse näiteks vedelikjahutusega hoida ligi 40 °C juures ning sellisel juhul jaguneks temperatuuriväljad seadme ulatuses nõnda nagu on näidatud joonisel 24. Nagu jooniselt näha, oleks pooli sisetemperatuuri maksimum kuni umbes 355 K ehk 82 °C. Saadud tulemus oleks pooli materjalidele parim, kuid vedelikjahutuse süsteem ei pruugi olla oma suuruselt optimaalne kogu filtri lahenduse suhtes.



Joonis 24. Temperatuuriväljad piiritingimusega 40 °C

Jahutuse vajadust ei saa käesoleva töö kontekstis eirata, sest tegemist on piiratud ruumi paigutatud kuuma objektiga, mille materjalid kõrgetel temperatuuridel vananevad kiirelt. Olukorras, kus on materjalid viimseni teada ja väga täpselt välja arvatud temperatuuri tõus poolis, saaks hinnata ka tema eluiga, kuid see kuulub lõpuni välja projekteerimise juurde ning pole antud töö kontekstis veel asjakohane. Kui sellisest pooli olevast kontseptsioonist edasi lõpuni projekteerida filter, oleks võimalik võtta arvesse sagedusmuunduri olemasolevat jahutussüsteemi ning sinna integreerida projekteeritav filter. Antud töö kontekstis on see variant taas piiratud, sest tegemist on üksiku kabinetiga, millel ei ole keerulist vedelikjahutussüsteemi loodud. Seetõttu on tõenäoline, et filtrit lõpuni välja projekteerides on tarvis arvestada ühe või mitme ventilaatoriga, mis tagaksid piisava õhuliikumise kabinetis.

3.3 Kondensaatorite valimine

Selleks, et üksikust induktiivpoolist saaks siinusfilter, tuleb talle lisada juurde ka kondensaatorid, mis ühendatakse temaga rööbiti. Kuna kondensaatoreid pakutakse turul küllaldaselt, on mõistlik valida ligilähedase mahtuvusega kondensaator, mis tagaks siinusfiltri töö eespool sätestatud algandmete piires.

Siinusfiltri kondensaatoriteks on antud töös valitud elektrolüüt-kondensaatorid tootjalt Kemet. Kuna siinusfiltrite disainis üldiselt kerkivad esile kruvikinnitustega elektrolüüt-kondensaatorid, siis seepärast on ka siinkohal tehtud taoline valik. Näide sellisest kondensaatorist on joonisel 25. Kondensaatorite hinnangulised suurused on võetud erinevate kruvikinnitustega elektrolüüt-kondensaatorite kohta, millel oleks induktiivsusele vastav väärtus ning mis on leitavad Transfer Multisort Elektronik (TME) e-kaupluse valikust. Kui on teada vastavalt induktiivsusele ja resonantssagedusele vajalik mahtuvus, siis sobiva mahtuvusega kondensaatori leides saab tema andmelehelte kätte ta mõõdud, mille abil saab hinnata tema ligikaudset ruumala.



Joonis 25. Elektrolüüt-kondensaator ALS30A471DE400 KEMET [22]

Teades induktiivpooli arvutusest tema induktiivsust ühe faasi kohta $L = 0,15915 \text{ mH}$, siis resonantssageduse 500 Hz juures on vajalik mahtuvus arvutatav valemiga 3.1:

$$C = \frac{1}{(2\pi f_r)^2 * L} = \frac{1}{(2\pi * 500)^2 * 1,5915 * 10^{-4}} = 636,64 \mu F \quad (3.53)$$

TME valikust üks lähimaid vasteid oleks kondensaator ALS30A331DF500 KEMET, mille põhilisi andmeid väljendab tabel 3.7: [22]

Tabel 3.7. ALS30A331DF500 KEMET andmed [22]

Mahtuvus [μF]	330
Nimipinge [V, DC]	500
Mõõtmed [mm]	36x105

Toodud kondensaatorit tuleks ühe faasi kohta kasutada kaks tükki ning ühendada need omavahel rööbiti, sel juhul oleks mahtuvus ühe faasi kohta 660 μF . Sellega kaasneb muutus selles, mis on siinusfiltri resonantssagedus. Uus resonantssagedus on leitav valemiga (1.12):

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{1,5915 \cdot 10^{-4} \cdot 660 \cdot 10^{-6}}} \approx 491 \text{ Hz} \quad (3.54)$$

Kuna siinusfiltri löikesagedus peaks olema 3-4 korda väiksem sagedusmuunduri lülitussagedusest, mis antud juhul on 1500 Hz, siis saadud uus löikesageduse väärtus sobib sinna vahemikku.

3.4 Filtri lõplikud väärtused

Kuna välja arvatud kondensaatori mahtuvuse väärtusele üldjuhul ei esine täpset vastet mõne valmis toote näol, on kombineeritud mitu kondensaatorit omavahel, et mahtuvuse väärtus oleks võimalikult ligilähedane varasemalt arvatud väärtusele. Esialgsest on olulisimad näitajad ruumala ja kogukaod filtris. Arvutuse (3.37) tuli välja induktiivpooli esmane minimaalne ruumala, millele tuleks juurde lisada ka kondensaatorite ruumala teatud koefitsiendiga, et võtta arvesse kondensaatorite omavahelist ning kondensaatorite ja pooli vahelist ruumi. Koefitsiendiks on hinnanguliselt arvatud $k=1,5$.

$$V_C = 6 * (36 * 105) * 1,5 = 34\,020 \text{ mm}^3 = 0,034 \text{ dm}^3 \quad (3.55)$$

Kogu filtri ruumala:

$$V_f = V_L + V_C = 18,35 + 0,034 = 18,384 \approx 18,4 \text{ dm}^3 \quad (3.56)$$

Filtrit iseloomustavad tunnussuurused on toodud tabelis 3.8:

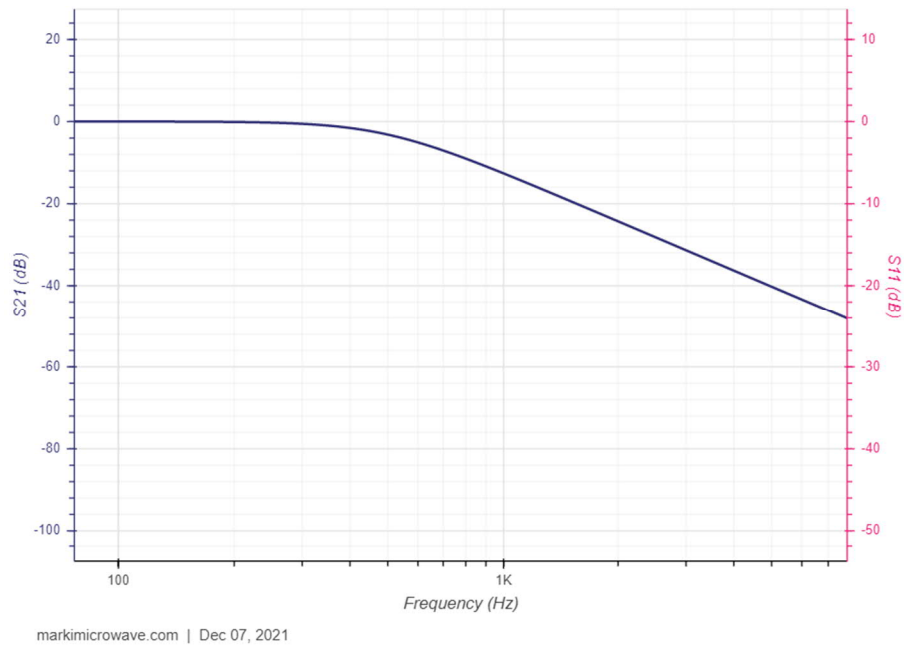
Tabel 3.8. Siinusfiltri andmed

Induktiivsus [H]	0,00015915
Mahtuvus [F]	0,00066
Löikesagedus [Hz]	491
Nimipinge [V]	400

Tabel 3.8. Siinusfiltri andmed

Nimivool [A]	800
Ruumala [dm ³]	18,4

Siinusfiltri Bode diagramm on näidatud joonisel 26. Diagrammilt on näha, et ligikaudu 500 Hz juures hakkab filter summutama edastatavaid signaale.



Joonis 26. Arvutatud siinusfiltri Bode diagramm [23]

4. JÄRELDUSED

Arvutuste objektiks olnud siinusfilter on oma esmase ruumala poolest väiksem pea kõigist dU/dt filtritest, kuid sinna pole juurde arvestatud muid detaile, mis on vajalikud näiteks filtri kinnitamiseks või juhtmete ühendamiseks. Oma ruumalalt võib nende detailide lisamisel filter minna kas või kaks korda suuremaks, kuid isegi siis peaks ta olema ruumi poolest tavapärasesse 800 mm laiusesse sagedusmuundurkabinetti ära paigutatav. Filtri kasutusele peamiseks järele jäänud takistuseks on soojuskaod, mis ette antud võimsuse puhul on suuremahulised ning seavad ette keerulised jahutustingimused. See eeldaks keerulist jahutussüsteemi, mis oleks eeldatavasti filtriga vähemalt samaväärsete mõõtmetega või suurem. Seda arvesse võttes saab järeldada, et filter esitatud kujul küll täidaks enda elektrilise signaali puhastamise eesmärgi, kuid ei ole lihtsasti integreeritav mõnda standardlahendusse, mis piirduks pelgalt õhkjahutusega ventilaatorite abil.

Ühe võimalusena näeb autor antud töös esitatud kontseptsiooni edasi projekteerida, et selgitada välja täpse jahutussüsteemi suurus või siis integreerida lahendus mõnda sellisesse sagedusmuundurkabinetti, kus on kasutusel vedelikjahutus, mida oleks võimalik laiendada ka siinusfiltrile. Üldjuhul see paraku tähendab ühe kabineti asemel suuremat kabinettide rivi, milles on igasse kabinetti ära jaotatud erinevad komponendid ning sel juhul on ruumipuudus tõenäoliselt väiksem mure. Kuna antud töös oli eesmärgiks üksikuse kabinetti mahutada siinusfilter, siis hea mähise isolatsiooni materjali ja võimsa ventilaatorjahutusega on see võimalik.

KOKKUVÕTE

Lõputöös käsitleti häiringuid elektriagamites, nende põhjuseid ja kuidas neid oleks võimalik vähendada või elimineerida. Kuna maailmas iga aastaga on enam elektrimootoreid kasutuses, vajavad nad täpsemat juhtimist, kuid sellega paraku kaasneb elektrisignaali mürasaaste. Selline müra põhjustab häiringuid ajamites ja võib lõppkokkuvõttes viia ajami töö seiskumiseni rikke tõttu. Ühena mitmest võimalikust variandist on antud töös keskendunud siinusfiltrile, mis aina rangemateks minevate standardite ja nõuete taustal on muutumas aktuaalsemaks ja potentsiaalseks asendajaks dU/dt filtrile.

Siinusfiltri teeb keerulisemaks tema kõrgem induktiivsus ning ta sisaldab peale induktiivpooli ka kondensaatoreid. Standardses sagedusmuundurkabinetis, mis mahutab endas ühte sagedusmuundurit ja temaga kaasas käivaid kaitseseadmeid, võib enda sisse mahutada ka dU/dt filtrit. Siinusfilter see-eest üldiselt on paigutatud eraldi kabinetti oma suuruse tõttu. Lõputöö eesmärk oli võtta erinevate tootjate sagedusmuundurkabinettide näitel ette ülesanne töötada välja siinusfilter, mis täidaks enda ülesannet võimsustaluvuse poolelt, kuid samal ajal oleks hinnanguliselt ka mahutatav kompaktsesse kabinetti.

Selleks oli eeskätt vaja arvutada välja sobiv induktiivpool, millele saaks hiljem vastavad kondensaatorid valida. Pooli arvutusteks kasutati kahte varianti, üks pärines allikast [18], kus oli toodud arvutuskäik ühefaasilise pooli arvutuseks ning kirjandus sisaldas ka tabeleid südamik standardmõõtmetega. Saades sellest arvutuskäigust vastused kätte, oli tarvis veel autori poolt tehtavaid analüütilisi arvutusi, millel oleks eelkõige kontrollarvutuste, kuid ka optimeerimise mõte. Analüütiliste arvutuste käigus selgus, et esimeste arvutuste tulemus andis liialt suure induktiivsuse, kuna südamik sai valitud suur. Induktiivsuse vähendamiseks arvutati läbi reluktantsi suurendamise poolile juurde õhupilu. Arvutustest selgus, et õhupilu lisamisega oli tarvis muuta ka elektrijuhi keerdude arvu. Kogu saadud tulemust simuleeriti läbi programmis FEMM, mis näitas liiga suurt magnetvootihedust südamikus ja liiga suurt induktiivsust. Katsetamise teel ilmnes, et keerdude arvu vähendamine veelgi andis kõige optimaalsema tulemuse. Saadud väärtustega arvutati induktiivpooli kaod. Pärast kadude arvutust valiti filtrile lähimad sobivad kondensaatorid, mis muutsid veidi resonantssagedust, kuid mitte oluliselt. Viimaks saadi teada ka filtri esialgne hinnanguline ruumala, mis oma väärtuselt annab lootust, et kui seadmele juurde lisada muid vajalikke detaile paigalduseks, siis ta omab dU/dt filtrile sarnaseid mõõtmeid ning mahub kabinetti ära. Suurimaks kitsaskohaks jäi temperatuur, mistõttu vajab siinusfilter korralikku jahutust. Kui

kasutada õhkjahutust ventilaatorite abil, siis oleks õige isolatsioonimaterjali puhul filtri töökorras olek tagatud. Ideaalsel juhul suudetaks filtri välispinda hoida alati umbes 40 °C juures vedelikjahutuse abil, kuid selline süsteem on oma keerukuselt ja suuruselt ilmselt ebamõistlik.

Soojuskadudest edasi hargneva probleemi lahendamine ei mahtunud antud lõputöösse ning optimaalse lahenduse leidmine saaks jääda tulevikku. Siinusfiltrit on ilmselt võimalik integreerida mõne vedelikjahutusega sagedusmuundurkabineti sisse, kuid kompaktse standardlahenduse loomine eeldab juba ees olevat jahutussüsteemi või filtrile rakendatavat uut süsteemi, mis tõenäoliselt paikneks osaliselt kabinetist väljaspool. Filter oma elektriliste parameetrite täitmise ja ruumala poolt vaadatuna oleks võimalik lõpuni välja projekteerida ning sobitada sagedusmuundurkabinetti.

SUMMARY

The thesis dealt with disturbances in electric drives, their causes and how they could be reduced or eliminated. As more and more electric motors are used in the world every year, they need more precise control but unfortunately this causes noise pollution of the electrical signal. Such noise causes interference in the drives and can eventually lead to the drive stopping due to a fault. As one of several possibilities, this work focuses on a sine wave filter, which is becoming more of a relevant and a potential substitute for a dU/dt filter while standards and quality requirements for filtering get higher.

The sine filter is complicated by its higher inductance value and it also contains capacitors in addition to the inductor itself. Also, a dU/dt filter can be installed in a standard frequency converter cabinet that contains one frequency converter and all necessary protection devices. The sine wave filter, on the other hand, is generally installed in a separate cabinet due to its size. The aim of the thesis was to develop a sine filter on the example of frequency converter cabinets from different manufacturers, which would fulfil its function in terms of power efficiency, but at the same time it would be estimated to fit in a single compact cabinet.

Most importantly it was necessary to calculate a suitable inductor for which the corresponding capacitors could be selected later. Two variants of the coil calculations were used, one from the source [18], which provided the instructions for the calculation of a single-phase inductor and the literature also included tables with standard core dimensions. After receiving the answers from this calculation, it was necessary to perform analytical calculations by the author, which would have the idea of control calculations but also optimization. Analytical calculations revealed that the resulting inductance from the first calculations was too high because the selected core was large. To reduce the inductance, an air gap was introduced by increasing the reluctance of the inductor. The calculations showed that the number of turns of the wire also had to be changed due to the introduction of the air gap. The whole result was simulated in the program FEMM, which showed results that the magnetic flux density in the core was too big and so was the inductance. Experimentation showed that further reduction of the number of turns gave the most optimal result. Inductor losses were calculated from the values obtained. After the loss calculation, the closest suitable capacitors for the filter were selected, which changed the resonant frequency slightly but not significantly. Finally, the initial estimated volume of the filter was found, which gives hope that if other parts which are needed for installation are added to the device, it will have dimensions like a dU/dt filter and will fit in a cabinet. The biggest bottleneck was the

temperature, so the sine filter needs proper cooling. If air cooling is used with fans, the correct winding insulation material would ensure that the filter is in working order. In an ideal situation, the outer surface of the filter could always be kept at about 40 °C by liquid cooling, but such a system is most probably unreasonable in its complexity and size.

Solving the problem of heat loss did not fit into this dissertation and finding the optimal solution could be in the future. The sinusoidal filter could probably be integrated into a liquid-cooled frequency converter cabinet, but the creation of a compact standard solution requires an existing cooling system or a new system for the filter, which is likely to be located partly outside the cabinet. The filter could be completely designed and matched to the frequency converter cabinet in terms of the fulfilment of its electrical parameters and volume.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] T. Vaimann, *Uitvoolud*, Tallinn: Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut, 2020.
- [2] Schaffner Group, „Sine wave filter solutions for motor drive applications,“ Luterbach, 2013.
- [3] D. Rendusara, P. Enjeti, W. Gray, A. von Jouanne, „Filtering Techniques to Minimize the Effect of Long Motor Leads on PWM Inverter Fed AC Motor Drive Systems,“ 1995. [Võrgumaterjal].
- [4] P. T. Finlayson, „Output Filters for PWM Drives with Induction Motors,“ 1998.
- [5] D. Choi, H. Bu, Y. Cho, S. Baek, „Analysis and Design of a Sine Wave Filter for GaN-Based Low-Voltage Variable Frequency Drives,“ 18 02 2020.
- [6] AEGIS, „Discovering and Preventing Bearing Current Damage,“ 2018. [Võrgumaterjal]. Available: <https://est-aegis.info/2018/02/discovering-and-preventing-bearing-current-damage/>.
- [7] D. Vinnikov, R. Jansikene, V. Vodovozov, *Elektriamite elektroonsed süsteemid*, Tallinn: TTÜ elektriamite ja jõuelektroonika instituut, 2008.
- [8] L. Kütt, *Häiringute edasikandumine ja filtreerimine (Loeng)*, Tallinn, 2018.
- [9] Texas Instruments Incorporated, „LC Filter Design,“ Dallas, 2016.
- [10] J. K. Steinke, *Use of an LC Filter to Achieve a Motor-friendly Performance of the PWM Voltage Source Inverter*, Turgi, 1999.
- [11] ABB, „ACS580-07 Hardware Manual“.
- [12] ABB, „ABB general purpose drives, ACS580, 0.75 to 500 kW, Catalog,“ 2016.
- [13] TDK, „Output Filters. B84143V0390S229.“ [Võrgumaterjal]. Available: https://product.tdk.com/en/search/emc/emc/output-filter/info?part_no=B84143V0390S229.
- [14] Schneider Electric, „Altivar VW3A5107 Product data sheet“.
- [15] Schneider Electric, „Altivar VW3A5210 Product data sheet“.
- [16] Vacon Ltd, „RFI-, DU/DT- AND SINE-FILTERS USER MANUAL,“ Vaasa, 2020.
- [17] JFE Steel Corporation, *ELECTRICAL STEEL SHEETS*, Tokyo.
- [18] C. W. T. McLyman, *Transformer And Inductor Design Handbook*, Idyllwild: Marcel Dekker, Inc., 2004.

- [19] Nuclear Power, „Convective Heat Transfer Coefficient,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.nuclear-power.com/nuclear-engineering/heat-transfer/convection-convective-heat-transfer/convective-heat-transfer-coefficient/>. [Kasutatud 2021].
- [20] A. Kallaste, A. Belahcen, T. Vaimann, P. S. Ghahfarokhi, „Determination of Heat Transfer Coefficient for the Air Forced Cooling Over a Flat Side of Coil,“ *Electrical, Control and Communication Engineering*, 18 September 2019.
- [21] IEC, „Electrical insulation - Thermal evaluation and designation (IEC 60085:2007),“ CENELEC, Brüssel, 2008.
- [22] Transfer Multisort Elektronik, „Kondensaatorid (ALS30A471DE400 KEMET),“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.tme.eu/ee/details/als30a471de400/elektroluutkondens-kruvikinnit-ja-muud/kemet/>.
- [23] R. Tools, „LC Filter Design Tool,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://rf-tools.com/lc-filter/>.

LISAD

Lisa 1. Magnetväljade arvutuste MatLab-i kood

```
clear;
clc;
%% FEMM
%% Start up and connect to FEMM
addpath('C:/femm42/mfiles');
openfemm
newdocument(0)
% Number of turns
N1=10;
N2=10;
N3=10;
% Proportions
ks=1/3;
kh=0.7143;
kw=2;
% Overall measures
lfe=0.06096; %m
lg=0.0162; % Air gap, m
lcu=ks*lfe/(1-ks); % m
hcu=kh*lfe/(1-kh); % m
wfe=kw*lfe; % m
htr=lfe*2+hcu+lg; % m
wtr=2*lcu+wfe; % m
ltr=6*lcu+3*lfe; % m
% Current momentary values
Ia=-565.5; % Phase A current
Ib=1131; % Phase B current
Ic=-565.5; % Phase C current
%% Problems and materials
mi_probdef(0,'meters', 'planar', 1.e-8, wtr, 30);
mi_getmaterial('Air');
mi_getmaterial('M-15 Steel');
mi_addmaterial ('Juhe1',1,1,0,4,58,0,0,0,0,0,0,1,21.4)
mi_addmaterial ('Juhe2',1,1,0,4,58,0,0,0,0,0,0,1,21.4)
mi_addmaterial ('Juhe3',1,1,0,4,58,0,0,0,0,0,0,1,21.4)
mi_addcircprop ('FaasA',Ia,1);
mi_addcircprop ('FaasB',Ib,1);
mi_addcircprop ('FaasC',Ic,1);
%% FEMM model
mi_drawpolygon([0,0; 3*lfe+4*lcu,0; 3*lfe+4*lcu,2*lfe+hcu; 0,2*lfe+hcu; 0,0]); % Core
outer measure
mi_drawpolygon([lfe,lfe; lfe+2*lcu,lfe; lfe+2*lcu,lfe+hcu; lfe,lfe+hcu; lfe,lfe]); % Core
inner measure1
mi_drawpolygon([2*lfe+2*lcu,lfe; 2*lfe+4*lcu,lfe; 2*lfe+4*lcu,lfe+hcu; 2*lfe+2*lcu,lfe
+hcu; 2*lfe+2*lcu,lfe]); % Core inner measure2
mi_drawpolygon([-lcu,lfe; 0,lfe; 0,lfe+hcu; -lcu,lfe+hcu; -lcu,lfe]); % Inductor left side
coil
mi_drawpolygon([3*lfe+4*lcu,lfe; 3*lfe+5*lcu,lfe; 3*lfe+5*lcu,lfe+hcu; 3*lfe+4*lcu,lfe
+hcu; 3*lfe+4*lcu,lfe]); % Inductor right side coil
mi_drawline(lfe+lcu,lfe,lfe+lcu,lfe+hcu); % Coil middle line1
```

```

mi_drawline(2*lfe+3*lcu,lfe,2*lfe+3*lcu,lfe+hcu); % Coil middle line2
mi_drawpolygon([-ltr/2,-0.5*htr; 1.5*ltr,-0.5*htr; 1.5*ltr,1.5*htr; -ltr/2,1.5*htr; -ltr/2,-0.5*htr]); % Air box
mi_drawline(0,lfe+hcu,lfe,lfe+hcu); % Air gap A1
mi_drawline(lfe+2*lcu,lfe+hcu,lfe*2+2*lcu,lfe+hcu); % Air gapB1
mi_drawline(lfe*2+4*lcu,lfe+hcu,lfe*3+4*lcu,lfe+hcu); % Air gapC1
mi_drawline(0,lfe+hcu+lg,lfe*3+4*lcu,lfe+hcu+lg); % Air gapABC2
%% Inductor materials
% Phase A winding
mi_addblocklabel(-lcu/2,lfe+hcu/2);
mi_selectlabel (-lcu/2,lfe+hcu/2);
mi_setblockprop('Juhe1', 1, 0, 'FaasA',0, 0, N1);
mi_clearselected;
% Phase A winding
mi_addblocklabel(lfe+lcu/2,lfe+hcu/2);
mi_selectlabel (lfe+lcu/2,lfe+hcu/2);
mi_setblockprop('Juhe1', 1, 0, 'FaasA',0, 0, -N1);
mi_clearselected;
% Phase B winding
mi_addblocklabel(lfe+lcu*6/4,lfe+hcu/2);
mi_selectlabel (lfe+lcu*6/4,lfe+hcu/2);
mi_setblockprop('Juhe2', 1, 0, 'FaasB',0, 0, N2);
mi_clearselected;
%Phase B winding
mi_addblocklabel(2*lfe+2*lcu+(lcu/2),lfe+hcu/2);
mi_selectlabel (2*lfe+2*lcu+(lcu/2),lfe+hcu/2);
mi_setblockprop('Juhe2', 1, 0, 'FaasB',0, 0, -N2);
mi_clearselected;
% Phase C winding
mi_addblocklabel(2*lfe+3*lcu+(lcu/2),lfe+hcu/2);
mi_selectlabel (2*lfe+3*lcu+(lcu/2),lfe+hcu/2);
mi_setblockprop('Juhe3', 1, 0, 'FaasC',0, 0, N3);
mi_clearselected;
% Phase C winding
mi_addblocklabel(3*lfe+4*lcu+lcu/2,lfe+hcu/2);
mi_selectlabel (3*lfe+4*lcu+lcu/2,lfe+hcu/2);
mi_setblockprop('Juhe3', 1, 0, 'FaasC',0, 0, -N3);
mi_clearselected;
% Core1
mi_addblocklabel(lfe+3*lcu,lfe/2);
mi_selectlabel (lfe+3*lcu,lfe/2);
mi_setblockprop('M-15 Steel', 1, 0, '<None>',0, 0, 0);
mi_clearselected;
% Air
mi_addblocklabel(-ltr/5,-ltr/5);
mi_selectlabel (-ltr/5,-ltr/5);
mi_setblockprop('Air', 1, 0, '<None>',0, 0, 0);
mi_clearselected;
% Core2
mi_addblocklabel(lfe+3*lcu,lfe+hcu+lfe/2);
mi_selectlabel (lfe+3*lcu,lfe+hcu+lfe/2);
mi_setblockprop('M-15 Steel', 1, 0, '<None>',0, 0, 0);
mi_clearselected;
% Air gap
mi_addblocklabel(lfe*1.5+lcu*2,lfe+hcu+lg/2);
mi_selectlabel (lfe*1.5+lcu*2,lfe+hcu+lg/2);

```

```

mi_setblockprop('Air', 1, 0, '<None>', 0, 0, 0);
mi_clearselected;
%% Model solving
mi_saveas('Induktiivpoolmag.fem');
mi_setcurrent('FaasA', Ia);
mi_setcurrent('FaasB', Ib);
mi_setcurrent('FaasC', Ic);
mi_analyze (0)
mi_loadsolution();
mo_showdensityplot(1,0,1.7,0,'mag')
mi_zoomnatural
Res1=mo_getcircuitproperties('FaasA');           % Vool, pingelang,
flux linkage
Res2=mo_getcircuitproperties('FaasB');           % Vool, pingelang,
flux linkage
Res3=mo_getcircuitproperties('FaasC');           % Vool, pingelang,
flux linkage
mo_close

```

Lisa 2. Temperatuuri väljade arvutuste MatLab-i kood

```

clear;
clc;
%% FEMM
%% Start up and connect to FEMM
addpath('C:/femm42/mfiles');
openfemm
newdocument(2)
% No. of turns
N1=10;
N2=10;
N3=10;
PcA=43.4113; % Coil losses, W
PcB=173.645; % Coil losses, W
PcC=43.4113; % Coil losses, W
Pfe=81.8+250.7; % Magnetic circuit losses,
W (N=10)
% Inductor proportions
kh=0.7143;
ks=1/3;
kw=2;
% Inductor overall measurements
lfe=0.06096;
lg=0.0162;
lcu=ks*lfe/(1-ks);
hcu=kh*lfe/(1-kh);
wfe=kw*lfe;
htr=lfe*2+hcu+lg;
wtr=2*lcu+wfe;
ltr=6*lcu+3*lfe;
At=2*(htr*ltr)+2*(wtr*ltr)+2*(htr*wtr);
Ve=wfe*hcu*4*lcu; % Electric circuit volume,
m3
Vm=wfe*(3*lfe+4*lcu)*(2*lfe+hcu)-(wfe*4*lcu*hcu); % Magnetic
circuit volume, m3
% Problem and materials
hi_probdef('meters', 'planar', 1.e-8, wtr, 30);
hi_addmaterial ('core',24,24,Pfe/Vm,0); % Core effective heat
conductivity
hi_addmaterial ('coilA',4,4,PcA/Ve,0); % Winding effective
heat conductivity
hi_addmaterial ('coilB',4,4,PcB/Ve,0);
hi_addmaterial ('coilC',4,4,PcC/Ve,0);
hi_getmaterial ('Air');
hi_addboundprop ('Ambient',0,313,0,0,0,0);
hi_addboundprop ('Convection1',2,0,0,300,10,0); %Convective Heat
Transfer Coefficient = ~5-10, ~300K = room temp
%% Pooli FEMM mudeli loomine
hi_drawpolygon([0,0; 3*lfe+4*lcu,0; 3*lfe+4*lcu,2*lfe+hcu; 0,2*lfe+hcu; 0,0]); %
Pooli südamikü välismõõt
hi_drawpolygon([lfe,lfe; lfe+2*lcu,lfe; lfe+2*lcu,lfe+hcu; lfe,lfe+hcu; lfe,lfe]); % Pooli
südamikü sisemõõt
hi_drawpolygon([2*lfe+2*lcu,lfe; 2*lfe+4*lcu,lfe; 2*lfe+4*lcu,lfe+hcu; 2*lfe+2*lcu,lfe
+hcu; 2*lfe+2*lcu,lfe]); % Pooli südamikü sisemõõt 2

```

```

hi_drawpolygon([-lcu,lfe;0,lfe;0,lfe+hcu;-lcu,lfe+hcu;-lcu,lfe]);           % Pooli mähise
vasakpoolne laupühendus
hi_drawpolygon([3*lfe+4*lcu,lfe;3*lfe+5*lcu,lfe;3*lfe+5*lcu,lfe+hcu;3*lfe+4*lcu,lfe
+hcu;3*lfe+4*lcu,lfe]); % Pooli mähise parempoolne laupühendus
hi_drawline(lfe+lcu,lfe,lfe+lcu,lfe+hcu);           % Mähise keskjoon1
hi_drawline(2*lfe+3*lcu,lfe,2*lfe+3*lcu,lfe+hcu);   % Mähise keskjoon2
hi_drawline(0,lfe+hcu+lg,lfe*3+4*lcu,lfe+hcu+lg);   % õhupiluABC2
hi_drawline(0,lfe+hcu,lfe*3+4*lcu,lfe+hcu);         % õhupiluABC1
%% Pooli materjalide määramine
% Faas A laupmähis
hi_addblocklabel(-lcu/2,lfe+hcu/2);
hi_selectlabel (-lcu/2,lfe+hcu/2);
hi_setblockprop('coilA', 0, 0, 0);
hi_clearselected;
hi_selectsegment (-lcu,lfe+hcu*0.5);
hi_selectsegment (-lcu/2,lfe);
hi_selectsegment (-lcu/2,lfe+hcu);
hi_setsegmentprop ('Convection1',0,0,0,0,0)
hi_clearselected;
% Faas A uurdes
hi_addblocklabel(lfe+lcu/2,lfe+hcu/2);
hi_selectlabel (lfe+lcu/2,lfe+hcu/2);
hi_setblockprop('coilA', 0, 0, 0);
hi_clearselected;
% Faas B uurdes vasakul
hi_addblocklabel(lfe+lcu*6/4,lfe+hcu/2);
hi_selectlabel (lfe+lcu*6/4,lfe+hcu/2);
hi_setblockprop('coilB', 0, 0, 0);
hi_clearselected;
%Faas B uurdes paremal
hi_addblocklabel(2*lfe+2*lcu+(lcu/2),lfe+hcu/2);
hi_selectlabel (2*lfe+2*lcu+(lcu/2),lfe+hcu/2);
hi_setblockprop('coilB', 0, 0, 0);
hi_clearselected;
%Faas C uurdes
hi_addblocklabel(2*lfe+3*lcu+(lcu/2),lfe+hcu/2);
hi_selectlabel (2*lfe+3*lcu+(lcu/2),lfe+hcu/2);
hi_setblockprop('coilC', 0, 0, 0);
hi_clearselected;
% Faas C laupmähis
hi_addblocklabel(3*lfe+4*lcu+(lcu/2),lfe+hcu/2);
hi_selectlabel (3*lfe+4*lcu+(lcu/2),lfe+hcu/2);
hi_setblockprop('coilC', 0, 0, 0);
hi_clearselected;
hi_selectsegment (lfe*3+lcu*4.5,lfe);
hi_selectsegment (lfe*3+lcu*4.5,lfe+hcu);
hi_selectsegment (lfe*3+lcu*5,lfe+hcu*0.5);
hi_setsegmentprop ('Convection1',0,0,0,0,0)
hi_clearselected;
% Südamik E
hi_addblocklabel(lfe*1.5+lcu*2,lfe/2);
hi_selectlabel (lfe*1.5+lcu*2,lfe/2);
hi_setblockprop('core', 0, 0, 0);
hi_clearselected;
hi_selectsegment (lfe*1.5+lcu*2,0);
hi_selectsegment (0,lfe*0.5);

```

```

hi_selectsegment (lfe*3+lcu*4,lfe*0.5);
hi_setsegmentprop ('Convection1',0,0,0,0,0)
hi_clearselected;
% Sūdamik I
hi_addblocklabel(lfe*1.5+lcu*2,lfe+hcu+lg+lfe*0.5);
hi_selectlabel (lfe*1.5+lcu*2,lfe+hcu+lg+lfe*0.5);
hi_setblockprop('core', 0, 0, 0);
hi_clearselected;
hi_selectsegment (0,lfe*1.5+hcu+lg);
hi_selectsegment (lfe*1.5+lcu*2,lfe*2+hcu+lg);
hi_selectsegment (lfe*3+lcu*4,lfe*1.5+hcu+lg);
hi_setsegmentprop ('Convection1',0,0,0,0,0)
hi_clearselected;
% õhupilu õhk
hi_addblocklabel(lfe*1.5+lcu*2,lfe+hcu+lg/2);
hi_selectlabel (lfe*1.5+lcu*2,lfe+hcu+lg/2);
hi_setblockprop('Air', 0, 0, 0);
hi_clearselected;
hi_zoomnatural;
%% Mudeli lahendamise
hi_saveas('Induktiivpoolterm.feh');
hi_analyze
hi_loadsolution();
hi_zoomnatural

```

Lisa 3. Voodiagramm projekteerimise protsessist

