



TALLINNA TEHNICAÜLIKOOI  
INSENERITEADUSKOND  
Elektroenergeetika ja Mehhatroonika instituut

## **ELEKTRIVORMELI FEST23 ELEKTRI- VEOMOOTORI SOBIVUSANALÜÜS**

### **SUSTAINABILITY ANALYSIS OF TRACTION MOTOR FOR ELECTRIC FORMULA FEST23**

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Karl Martin Meras

Üliõpilaskood: 221364 AAAM

Juhendaja: Anton Rassõlkin, kaasprofessor  
tenuuris

(Tiitellehe pöördel)

## **AUTORIDEKLARATSIOON**

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud.

Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

"....." ..... 20.....

Autor: .....

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

"....." ..... 20.....

Juhendaja: .....

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

"....." .....20... .

Kaitsmiskomisjoni esimees .....

/ nimi ja allkiri /

## **Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks<sup>1</sup>**

Mina Karl Martin Meras (*autori nimi*)

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose Elektrivormeli FEST23 elektri-veomootori sobivusanalüüs,  
(*lõputöö pealkiri*)

mille juhendaja on Anton Rassõlkin,  
(*juhendaja nimi*)

- 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.
- 

13.05.2024 (kuupäev)

---

<sup>1</sup> 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 loomingu tegevusega ning lõputöö kaas- või ühisautor(id) ei ole andnud lõputööd kaitsvale üliõpilasele kindlaksmääratud tähtajaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.

# Elektroenergeetika ja Mehhatroonika instituut

## LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

**Üliõpilane:** Karl Martin Meras, 221364

Õppekava, peeriala: AAAM, Energiamuundus ja Juhtimissüsteemid

Juhendaja(d): Anton Rassõlkin, kaasprofessor tenuuris, 6203202

Konsultant:

### Lõputöö teema:

(eesti keeles) – Elektrivormeli FEST23 elektri-veomootori sobivusanalüüs

(inglise keeles) – Suitability analysis of traction motor for electric formula FEST23

### Lõputöö põhieesmärgid:

1. Elektrimootori mehaaniline disainimine sobitumaks FEST23 elektrivormeli jõuülekandega.
2. Elektrimootori katsepingi modifitseerimine vastavalt uue elektrimootori disainile ja elektrimootori katsetamine.
3. Tulemuste analüüsimine ning ettepanekud paranduste läbi viimiseks. Kas tulevikus peaks elektrimootorid täielikult ise-arendama?

### Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Lõputöö ülesande eesmärkide püstitus.	01.11.22
2.	Elektrimootori projekteerimine CAD tarkvaras (mehaaniline disain).	01.02.23
3.	Elektrimootori koostamine.	20.09.23
4.	Esimesed testid elektrimootoriga (enkooderi ühendamise ja seadistamine).	01.20.23
5.	Elektrimootorite rakistamine elektrimootorite testpingiga.	07.10.23
6.	Esmane elektrimootori juhtalgoritmi seadistamine.	08.10.23
7.	Esimesed katsed testpingis ning elektrimootori parameetrite leidmine.	01.12.23
8.	Efektiivsuskaart ning selle võrdlusanalüüs tootja poolsete andmetega.	07.12.23
9.	Lõputöö lähteülesande koostamine.	01.02.24
10.	Esimese mustandi saatmine juhendajale üle vaatamiseks.	01.03.24
11.	Teise mustandi saatmine juhendajale üle vaatamiseks.	01.04.24

12.	Sisendite leidmine ning määratlemine tulevaste ise-arendatud elektrimootoritele.	01.04.24
13.	Lõpliku lõputöö esitamine juhendajale viimaseks üle lugemiseks.	01.05.24
14.	Lõputöö viimaste muudatuste sisse viimine ning esitamine.	10.05.24

**Töö keel:** Eesti keel.

**Lõputöö esitamise tähtaeg:** 13.05.2024.a

**Üliõpilane:** ..... ".....".....20.....a  
/allkiri/

**Juhendaja:** ..... ".....".....20.....a  
/allkiri/

**Konsultant:** ..... ".....".....20.....a  
/allkiri/

**Programmijuht:** ..... ".....".....20.....a  
/allkiri/

*Kinnise kaitsmise ja/või lõputöö avalikustamise piirangu tingimused formuleeritakse pöördel*

# SISUKORD

EESSÕNA .....	8
Lühendite ja tähiste loetelu .....	9
SISSEJUHATUS .....	10
1.      TEOREETILINE TAUST .....	12
1.1 Elektrivormeli jõuülekanne konseptsioon .....	12
1.2 Elektri-veomootori valiku alused .....	13
1.2.1  Elektrisõidukitel kasutatavad elektri-veomootorite tüübid .....	14
1.2.2  Elektri-veomootori nõudmised .....	18
1.3 Elektri-veomootori juhtimine ning võimalused optimeerimiseks .....	19
1.3.1  Elektri-veomootori juhtimine .....	19
1.4 Elektri-veomootori optimeerimise rakendamine elektrivormeli näitel .....	22
2.      ELEKTRIMOOTORI PROJEKTEERIMINE .....	25
2.1 Lähteandmed .....	25
2.2 Elektromagnetiline disain .....	28
2.2.1  Püsimagneetiga elektrimootorite põhitõed .....	28
2.3 Mehaaniline disain .....	38
2.3.1  Laagrite valik .....	39
2.3.2  Võlli projekteerimine .....	42
2.3.3  Korpuse projekteerimine .....	46
2.3.4  Positsiooniandur .....	47
2.3.5  Katsepink .....	48
2.3.6  Tootmine ja koostamine .....	49
3.      KATSETAMINE .....	51
3.1 Mootori funktsionaalsuse katsed .....	51
3.1.1  Maandustakistuse ja isolatsioonitakistuse mõõtmine .....	52
3.1.2  Mähise takistuse mõõtmine .....	52
3.1.3  Enkooderi nurga nullimise protsess .....	52
3.1.4  Esimesed elektrimootori katsed testpingis .....	54
3.2 Elektrimootori parameetrite testid .....	55
3.2.1  Katseseadmed .....	55
3.2.2  Vastuelektromotoorjõu konstant $K_e$ .....	56
3.2.3  Pöördemomendi konstant $K_t$ .....	57
3.2.4  Elektrimootori konstant $K_M$ .....	58
3.2.5  Efektiivsuskaart .....	59
3.2.6  Kadude analüüs .....	61
3.2.7  S6 talitus .....	63

3.3 Katsetulemused ja järeldused.....	65
KOKKUVÕTE .....	67
SUMMARY.....	69
LISA 1 – Fischer Elektromotoren elektrimootori andmeleht .....	74
LISA 2 – AMK-Motion elektrimootori andmeleht [42].....	77
LISA 3 – Fischer Elektromotoren joonised .....	79
LISA 4 - Enkooderi kinnitamise joonis .....	81
LISA 5 - Resolveri kinnitamise joonis .....	82
LISA 6 – Fischer Elektromotoren efektiivsuskaart .....	83

## **EESSÕNA**

Käesolev lõputöö on valminud koostöös tudengivormeli meeskonnaga FS Team Tallinn. Elektrimootori mehaanilise projekteerimise vältel tehti koostööd ettevõttega Fischer Elektronen GmbH. Lõputöö teema valikul lähtuti isiklikust huvist jõuülekande, elektrimootorite ja nende testimise vastu.

Soovin tänu avaldada oma juhendajale, Anton Rassõlkinile, kes oli suureks abiks antud töö valmimisel. Lisaks soovin avaldada erilist tänu kõigile tudengivormeli meeskonna liikmetele, kes olid töö valmimisel abiks nii nõu kui ka jõuga.



## Lühendite ja tähiste loetelu

AC	vahelduvvool (inglise keeles <i>Alternating Current</i> )
CAN	sõidukites kasutatav andmeside protokoll (inglise keeles <i>Controller Area Network</i> )
DC	alalisvool (inglise keeles <i>Direct Current</i> )
DCM	harjadega alalisvoolumootor (inglise keeles <i>Direct Current Motor</i> )
DTC	momendi vahetu juhtimise algoritm (inglise keeles <i>Direct Torque Control</i> )
FEST23	2022/2023 hooajal projekteeritud elektrivormel
FOC	väljaorienteeritud juhtimise algoritm (inglise keeles <i>Field Oriented Control</i> )
FS	tudengivormel (inglise keeles <i>Formula Student</i> )
FSST	Taltech ja Tallinna Tehnikakõrgkooli tudengitest koosnev tudengivormeli tiim (inglise keeles <i>Formula Student Team Tallinn</i> )
IM	asünkroonmootor (inglise keeles <i>Induction Motor</i> )
IPM	süvistatud püsिमagnet (inglise keeles <i>Interior Permanent Magnet</i> )
PC	arvuti (inglise keeles <i>Personal Computer</i> )
PI	proportsionaal-integraal regulaator (inglise keeles <i>Proportional-Integral</i> )
PM	püsिमagnet (inglise keeles <i>Permanent Magnet</i> )
PMSM	püsिमagnetitega sünkroonmootor (inglise keeles <i>Permanent Magnet Synchronous Motor</i> )
SiC	ränikarbiid ehk pooljuhtmaterjal (inglise keeles <i>silicone carbide</i> )
SPM	pinnapealne püsिमagnet (inglise keeles <i>Surface Permanent Magnet</i> )
SRM	lülitatav reluktantsmootor (inglise keeles <i>Switched Reluctance Motor</i> )

## SISSEJUHATUS

Formula Student on 1980. aastate algusel, Ameerikast alguse saanud tehnika valdkonna inseneridele suunatud tootearendus võistlus. Tänu suurele huvile on *formula SAE* võistlussari levinud üle kogu maailma, millest täna võtab osa üle 500 meeskonna tervest maailmast. [1] Võistlused jagunevad kolme kategooriasse: sise põlemismootoriga, elektri- ja isejuhtiv vormel. Võistlustel hinnatakse staatilisi, kui ka dünaamilisi alasid. Staatiliste alade alla kuuluvad vormeli disain, kuluaruanne ja äriplaan, mis tuleb kaitsta kohapeal olevatele kohtunikele. Dünaamilised alad on kiirendus, rajasõit, kaheksasõit, kestvussõit ja efektiivsus. Võitja selgitatakse välja punktisüsteemi alusel, kus võetakse arvesse iga ala erinev kaal. [2]

Formula Student Team Tallinn (FSTT) koosneb Tallinna Tehnikaülikooli ja Tallinna Tehnikakõrgkooli bakalaureuse ja magistri tudengitest. Meeskond loodi 2006. aastal ning esimesel võistlusel käidi sõitva vormeliga 2008. aastal sise põlemismootorite kategoorias. Sise põlemismootorite kategoorias võisteldi viis aastat, pärast mida otsustati 2012/13 hooajal minna üle elektrivormelite kategooriasse. Tänapäevaks on kokku valminud elektrivormeleid üheksa erinevat elektrivormelit. Lisaks sellele alustati 2018. aastal ka paralleelselt isejuhtiva vormeli ehitust ning sellega võistlemist. Üheks suurimaks väljakutseks meeskonnale on FEST23 elektrivormeli projekteerimine nii isesõitvaks kui ka piloodiga sõitvaks masinaks. [3]

Aastast 2015. on FSTT elektrivormelid kasutanud AMK-Motion tootja poolt pakutavat lahendust elektrimootorite ja pingevaheldi näol, mis on projekteeritud spetsiaalselt tudengivormeli võistlussarja vajadustel. Kuigi elektrimootorid on olnud läbi aastate üsna töökindlad ning täitnud oma eesmärgi edukalt on tekkinud vajadus leida alternatiivse suurema pöördemomendi ja efektiivsuse saavutamise näol. Tulenevalt sellest otsustati 2022 hooaja lõpus alustada koostööd Saksamaa ettevõttega Fischer Elektromotoren, et projekteerida nende poolt pakutavale elektrimootori elektromagnetilisele disainile sobilik mehaaniline disain, sobitumaks vajadusel FEST23 elektrivormeli jõuülekanedega. Sellest tulenevalt valmib antud lõputöö raames, FSTT tudengivormeli tiimi esimesed mehaanilise disainiga elektrimootorid, koostöös Saksamaa ettevõttega Fischer Elektromotoren.

Esimeses osas käsitletakse täpsemalt elektrivormeli FEST23 jõuülekande konseptsiooni ning selle ülesehitust. Petükis analüüsitakse ka elektrisõidukitel kasutatavaid elektrimootori tüüpe ning juhtimisalgoritme. Ühtlasi kirjeldatakse ka võimalike nõudmisi elektrimootorile ning esimese osa lõpus esitletakse algoritm elektrimootori

disainimiseks, mida saab ka lihtsustatult võtta aluseks elektrimootori valimisel jõuülekanne süsteemi.

Lõputöö teises osas liigutakse edasi elektrimootori projekteerimise juurde. Sellest tulenevalt võrreldakse tootjate poolseid andmeid ning defineeritakse lähteandmed projekteerimise ülesandega alustamiseks. Kuigi lõputöö eesmärk ei ole projekteerida elektrimootori elektromagnetilist osa, esitletakse valdkonna baas põhimõtteid ning võrreldakse neid olemasoleva infoga Fischer Elektromotoren elektrimootori kohta. Elektromagnetiliste baasteadmiste juurest liigutakse edasi mehaanilise disainini, mis hõlmab endas infot Fischer Elektromotoren tootja poolt sätestatud piirangutest kuni lõpliku mehaanilise disaini valmimiseni.

Kolmas osa lõputöös käsitleb elektrimootori katsetamist peale koostamise protsessi. Protsess jaotatakse suuresti kolmeks osaks, kus eel-testimise faasis verifitseeritakse elektrimootori korrasolekut enne katsepinki rakistamist. Eel-testide eesmärgiks on positsioonianduri seadistamine, maandus- ja isolatsioonitakistuse mõõtmine ning mehaaniliste vigastuste või projekteerimise vigade inspeksioon. Tulenevalt edukast esimesest testimise faasist kinnitatakse elektrimootorid katsepinki, kus sooritatakse esimesed elektrimootorite pingestamised ning tühijooksu katsed. Peale edukaid tulemusi alustatakse elektrimootori jõudlusparameetrite valideerimisega ning efektiivsus- ja kaovõimsuskaartide koostamisega.

Lisaks eelnevalt nimetatud testidele, analüüsitakse kolmandas osas ka pöördemomendi seadeväärtuse ning anduriga mõõdetud pöördemomendi erinevust sõltuvalt koormusest ja kiirusest. Peatüki viimases osas koostatakse testtulemuste kokkuvõtlik analüüs ning kokkuvõtte projekteeritud prototüüp elektrimootori sobivusest tulevastele elektrivormelitele.

# 1. TEOREETILINE TAUST

## 1.1 Elektrivormeli jõuülekande konseptsioon

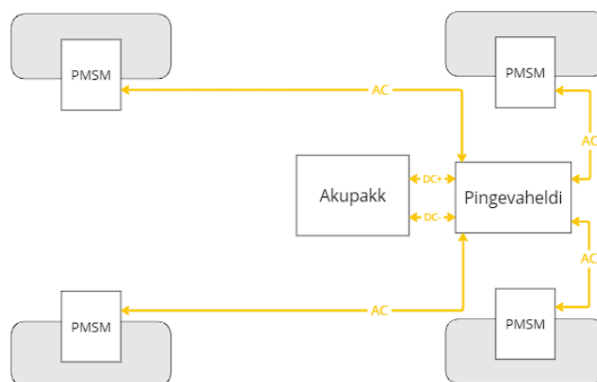
FEST23 elektrivormeli näite näol on tegemist nelikveolise vormelautoga mille elektri-veomootorid paiknevad iga ratta sees käändmikutes (vt joonis 1.1). Tulenevalt sellisest elektriveoajami konseptsioonist on võimalik juhtida igat vormeli ratast individuaalselt. Individuaalne juhtimine tagab täpsema ning parema momendi jaotumise kurvis, mis omakorda tagab elektrivormeli kiirema kurvi läbivuse. Elektrimootorite paigutamine nurgakoostu vähendab ka vormeli kere ruumala, kuna kere sees ei pea olema ruumi mootorite ning mehaanilise jõuülekande jaoks. Tulenevalt sellest saab projekteerida madalama massiga süsteemi, mis aitab kaasa kiirendusele ning sellest tulenevalt ringi ajale. Oluline on ka lisada, et paraneb süsteemi efektiivsus tänu võimalikule regeneratiivsele pidurdamisele esimeste mootoritega.



Joonis 1.1 FEST23 elektrivormel.

Elektri-veomootorite kasutamine ratta käändmikutes omab ka mõningaid negatiivseid mõjusid elektrivormelile. Üheks suurimaks probleemiks on ratta käändmiku ning ülekande üsna keeruline disain. Vaja on kasutada planetaarülekannet ning antud juhul peab mahtuma nii planetaarülekannet, elektrimootor kui ka pidurid velje sisse. Teiseks oluliseks murekohaks on vedrustamata massi suurenemine, elektri-veomootorite integreerimisel nurgakoostu. Kolmandaks probleemiks on vajadus üsna keeruka vormeli juhtimissüsteemi järele. Siiski on kindel, et antud konseptsiooni rakendamine mõjub üldiselt ringi ajale positiivselt ning võit kaalub üle kaotused.

Elektrivormeli veo-elektrimootorite juhtimiseks kasutatakse pingevaheldit, mis paikneb vormeli tagaosas akupaki kohal. Vaheldit toidetakse otse akupakist läbi alalispinge, mida illustreerib joonis 1.2. Vormeli elektri-veomootori juhtimiseks kasutatakse momendi vektorjuhtimist ja juhtimissüsteemi, mis on välja arendatud spetsiaalselt FEST23 vormeli juhtimiseks. Elektri-veomootoritena on kasutusel Sakamaa ettevõtte AMK-Motion püsिमagnetitega sünkroonmootorid, mida on FEST tudengivormelitel kasutatud alates 2015. aastast. Ühtlasi on ka vaheldina kasutusel sama tootja pingevaheldi, mis kuulub ühtsesse tudengivormeli võistlussarja jaoks disainitud toote komplekti. [4]

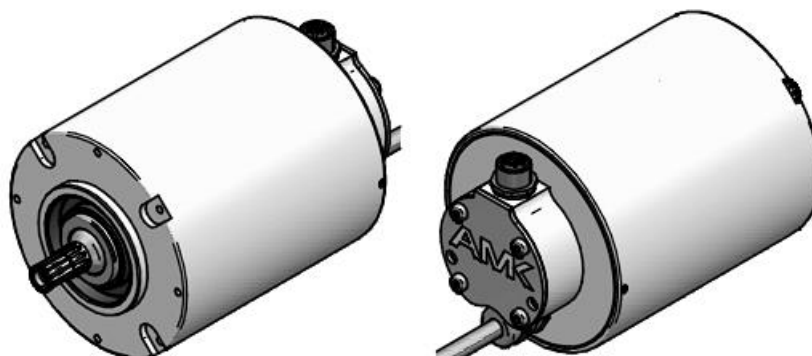


Joonis 1.2. Elektrivormeli jõuülekande konseptsioon.

## 1.2 Elektri-veomootori valiku alused

Tudengivormeli võistlussarjas, elektrivormelite kategoorias on hetkel domineerivaks elektri-veomootoriks püsिमagnetitega sünkroonmootor. Põhilisteks kasutatavateks elektri-veomootoriteks on AMK-Motion DD5-14-10-POW (vt joonis 1.3) ja Fischer Elektronen TI085-052-070-04B7S-07S04BE2. Lisaks antud kahele põhiliselt kasutatud elektri-veomootorile arendavad tiptiimid ise-arendatud püsिमagnet sünkroonmootoreid. Antud juhul on elektrimootorid mitu korda väiksemad kui pakutavad ostutooted, millest tulenevalt ka tiimid, kes neid kasutavad palju konkurentsivõimelisemad. Negatiivse küljena esineb siiski ise-arendatud elektrimootoriga tiimidel rohkem töökindluse probleeme. Tiimid, kes kasutavad ise-arendatud elektriveoajameid, on elektriveoajameid arendanud juba mitmeid aastaid ning auto peale jõudvad variandid on mitmenda põlvkonna prototüüp versioonid. Hea näitena võib tuua Šveitsi tiimi AMZ-racing, kes purustas 01.09.2023 Geuinnessi-rekordi kiireima 0-100 km/h elektrisõiduki kategoorias ajaga 0.956 sekundit. [5] AMZ-racing

kasutas rekordi purustamisel tudengite enda poolt arendatud elektri-veomootoreid ning SiC pingevaheldit.

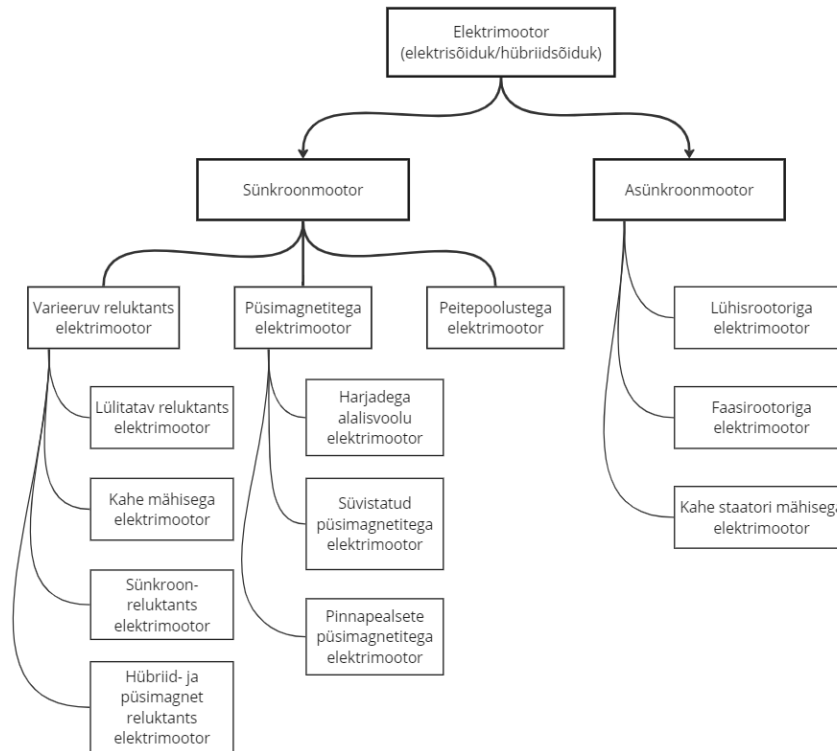


Joonis 1.3. AMK-Motion DD5-14-10-POW elektrimootor. [4]

Siiski on oluline uurida hetkel tõusvaid trende elektri veomootorite kasutusest elektrisõidukitel ning kaardistada nende omadused, mille puhul on võimalik valida antud kasutusvaldkonna jaoks sobivaim lahendus. Samuti on oluline defineerida kasutusvaldkond ning tulenevalt sellest nõudmised elektri-veomootorile.

### 1.2.1 Elektrisõidukitel kasutatavad elektri-veomootorite tüübid

Esimene tänapäevane elektrimootori kasutamine sai alguse 1996. *General Motors EV1* turule tulekuga. Tulenevalt vajadusest suurema energia efektiivsusega trantsordivahendite järele ning keskkonna nõudmiste karmistumisele on hakanud autotööstus liikuma üha enam elektrisõidukite arendamise suunal. [6] *Internal Energy Agency* andmetel müüdi aastal 2023 ligikaudu 13.9 miljonit elektriautot ning graafik näitab kasvavat trendi. [7] Tänapäeval kasutatakse elektrisõidukitel erinevat tüüpi elektri veoajameid, mille kasutusvaldkond sõltub enamasti keskkonnast ning elektrimootorile esitatavatest nõudmistest toimima terviklikus jõuülekanne süsteemis. Kuigi mõned üksikud elektrisõidukite tootjad on avaldanud tehnilist kirjandust nende poolt kasutatvate elektrimootorite kohta, elektrisõiduki jõuülekanne on enamus informatsiooni avalik teaduslikest uurimustöödest või kolmandate osapoolte tagurpidise inseneerimise tulemusel. Joonisel 1.4 on näha võimalike elektrimootorite tüüpe, mida saab integreerida elektrisõiduki jõuülekanne süsteemi. Osad valikutest on laialdaselt kasutusel ning osad neist on veel arengu järgus, kus püütakse välja arendada sobilikku lahendust elektrisõiduki jõuülekanne süsteemi sobitumiseks. [6]



Joonis 1.4. Võimalikud elektrimootori tüübid elektri-/hübriidsõidukitel kasutamiseks.

Enim kasutust leidnud mootoriteks elektrisõidukitel on harjadega alalisvoolumootor (DCM, inglise keeles Direct Current Motor), asünkroonmootor (IM, inglise keels Induction Motor), püsomagnetitega sünkroonmootorid (PMSM, inglise keels Permanent magnet Synchronous Motor) ja reluktantsmootorid (SRM, inglise keels Switched Reluctance Motor). [8]

Tabel 1.1. Elektrisõidukites enim kasutatavate elektrimootorite võrdlus. [6] [9]

Parameeter	Elektrimootori tüüp			
	DCM	IM	PMSM	SRM
Võimsustihedus	Madal	Keskmine	Kõrge	Väga kõrge
Tipp efektiivsus [%]	<90	90-95	95-97	<90
Kontrollitavus	Lihtne	Keeruline	Keeruline	Keeruline
Töökindlus	Halb	Hea	Ülihea	Hea
Soojuseralduvus	Halb	Halb	Hea	Hea
Suurus ja kaal	Suur, raske	Keskmine, keskmine	Väike, kerge	Väike, kerge
Võimekus kõrgetel kiirustel	Kehv	Ülihea	Hea	Ülihea
Konstruksioon	Kehv	Parem	Hea	Ülihea
Elektrimootori juhtimine	Lihtne	Keskmine	Keeruline	Keeruline

### **1.2.1.1 Asünkroonmootorid**

Asünkroonmootorid on üsna laialt levinud ning tööstuses enim kasutatavad elektrimootori tüübid. Tulenevalt laiast kasutusalaast on asünkroonmootorid ühed töökindlaimad elektrimootorid. Asünkroonmootorid on oma ehituselt üsna lihtsad, robustsed ja odavad. Asünkroonmootoritel on üsna kõrge tipu pöördemoment ning reageerimiskiirus. Asünkroonmootorite rootori pöörlemise kiirus ei ole sünkroonis elektrilise pöörlemiskiirusega, tulenevalt sellest on vaja arvestada elektrimootoris tekkiva libistusega (inglise keeles *slip*). Asünkroonmootorite kontrollimiseks kasutatakse enim lihtsamaid kahe astmelisi vektorjuhtimise algoritme. Asünkroonmootorid jagunevad peamiselt kahte kategooriasse rootori ehituse poolest: lühis- ja faasirootoriga asünkroonmootoriteks. Lühisrootoriga elektrimootori rootoril paiknevad juhtivast materjalist (aluminium/vask) vardad, mis on lühistatud otsaplaatidest ja paralleelselt või väikse nurga (inglise keeles *skew angle*) all rootori keskpunktiga võrreldes. Faasirootoriga konstruktsioonis on rootoril mähis. [10]

### **1.2.1.2 Alalisvoolumootor**

Alalisvoolu elektrimootorid on oma ehituselt üsna suured ning tänu sellele ka rasked. Tulenevalt sellest on alalisvoolu mootorid enim kasutatud leidnud näiteks rongidel ja trammidel. Alalisvoolu elektrimootorite konstruktsiooni koosneb statsionaarsest staatorist ja pöörlevast rootorist. Elektrivoolu rootori mähisesse juhtimiseks kasutatakse alalisvoolu elektrimootorites lamelle ja harju, mis tekitavad mehaanilise kontakti rootori ja staatori vahel. Tulenevalt mehaanilisest kontaktist pöörleva ja statsionaarse osa vahel on alalisvoolu elektrimootori töökindlus üsna kehv. Tulenevalt sellest on kasutusele võetud ka harjadeta alalisvoolu elektrimootoreid, millel on parem töökindlus ja eluiga. Alalisvoolu elektrimootorite võimsustihedus, efektiivsus ja koormuse efektiivsus jääb alla konkureerivatele elektrimootoritele. Samuti vajab rootoril paikneva mähise jahutamine erilist tähelepanu. [11]

### **1.2.1.3 Püsिमagnetitega sünkroonmootor**

Püsिमagnetitega sünkroonmootor sarnaneb oma tööpõhimõttelt alalisvoolu elektrimootoriga, kus staator on statsionaarne ja rootor pöörlev elektrimootori osa. Püsिमagnetitega elektrimootoris tekitatakse ergutusväli läbi rootoril paiknevate püsिमagnetite ja staatori mähise elektromagnetvälja vahel. Tulenevalt püsिमagnetomadustele on püsिमagnet sünkroonmootori konstruktsioonile puudub staatori ja rootori vahel mehaaniline kontakt, mille tulemuseks on parem töökindlus. Samuti ei vaja eraldi jahutust rootor, vaid piisab staatori jahutamisest. Oluline on siiski märkida, et püsिमagnetitega elektrimootori püsिमagnetid on üsna temperatuuritundlikud ning määravad tavaliselt elektirmootori maksimaalse lubatava töö temperatuuri. Püsिमagnet sünkroonmootoritel on kõrge võimsustihedus, kiire reageerimisaeg ning suur



efektiivsus. Probleemseks kohaks osutub elektrimootori hind ning juhtimis algoritmi keerukus.

#### **1.2.1.4 Reluktansmootor**

Reluktansmootoril tekitatakse staatoris kolmefaasilise mähise abil pöörlev magnetväli. Reluktantsmootori rootor on konstrueeritud nii, et rootori magnetiline takistus ehk reluktants sõltub suunast. Reluktantsmootoril on üsna lihtne rootori konstruktsioon – pöördemomendi tekitamine toimub ilma magnetite ja mähisteta rootoril ehk läbi d-telje ja q-telje reluktantside erinevust, mis on tulenev rootori geomeetristest omadustest. [11] Tänu sellisele konstruktsioonile on reluktants elektrimootorid oma ehituselt üsna robustsed ja töökindlad. Reluktantsmootoritel on suur efektiivsus ja väike pöördemomendi värelus. Kontrollimisel on vaja kasutada keerukaid algoritme ja üsna võimekaid protsessoreid. [12] Robustne konstruktsioon kajastub ka elektrimootori hinnas – pole vaja kasutada pöördemomendi tekitamiseks kalleid püsिमagnetiteid. Reluktantsmasinate puhul on miinuseks väike võimsustegur, mis mõjutab nii jõudlust kui ka nende juhtimisel jõuelektroonika suurust ja maksumust. [6]

#### **1.2.1.5 Tõusev trend elektrimootorite kasutamisest elektrisõidukites**

Haruldase muldmetall magnetite kasutamine elektrimootorites suurendab võimekusest genereerida elektrimootorites kõrget reluktants pöördemomenti (umbes 40-50 % või enam). Tulenevalt sellest on püsिमagnetite kasutamine elektrimootorites hetkel üsna tõusev trend. [6] Püsिमagnetite negatiivseks küljeks on nende erilisus ning tulenevalt sellest maavara saadavus. Piiratud maavara saadavus muudab ka püsिमagnetite hinna kõrgeks. Tulenevalt sellest otsitakse ka alternatiivseid lahendusi, püsिमagnetitest loobumiseks. Antud juhul annab sünkroone reluktantsmasin võimaluse püsिमagnetitest vabanemiseks. Kahjuks on ka sünkroonsel reluktantsmasinal palju puudusi nagu suur müratase, kõrge pöördemomendi pulsatsioon, vibratsioon, kõrge disaini ja kontrollimise keerukus. Tulenevalt madalast hinnast, robustsusest ning püsिमagnetite puudumisest võib tulevikus antud elektrimootor siiski saada domineerivamaks elektrimootori tüübiks elektisõidukitel.

Samuti on üheks tõusvaks trendiks ka elektrimootori ning juhtseadme ühtsesse korpusesse integreerimine, mis vähendab üldist jõuülekanne ruumi kasutust ning elektriliste ühenduste arvu. Kahjuks on ka antud lahenduste puhul olulisi puudusi ning murekohti. Näiteks tuleb arvestada süsteemi jahutuse projekteerimisel integreeritud süsteemi piisavalt efektiivse jahutamisega.

## 1.2.2 Elektri-veomootori nõudmised

Elektrisõiduki elektri veoajami üheks peamiseks nõudeks peab olema kõrge käivitusmoment ning elektrimootor peaks suurel kiirusel tootma suurt võimsust. Võrreldes elektrimootoreid sisepeõlemismootoritega on nende limiidiks tööala, käivitusmoment null kiirusel ning efektiivsuse kukkumine kiiruse tõustes. Üldiselt lahendatakse antud probleeme siduri ning käigukasti kasutamisega. Tulenevalt laiaast elektri veoajami tööpiirkonnast kasutatakse elektrimootoreid üsna sageli ilma käike vahetava käigukastita. [13]

Kuigi nõudmisi elektri veoajamile võib olla palju, siis neid tähtsaimad on kõrge võimsustihedus ja kõrge efektiivsus. Sellest tulenevalt peab nii efektiivne ala kui ka elektrimootor ise olema disainitud enim kasutatavasse piirkonda. [13] Enne elektimootori integreerimist jõuülekande süsteemi tuleb defineerida kasutusvaldkond, süsteemi piirangud, nõudmised süsteemile ning nõudmised elektrimootorile. Alati ei pruugi olla antud ülesanne lihtne ning üheselt defineeritud, seega sobivaid alternatiive võib leida mitmeid, sellest tulenevata on mõned olulisemad tugipunkid olemas. [14]

Elektriveoajami valimisel elektrivormelile olulised parameetrid:

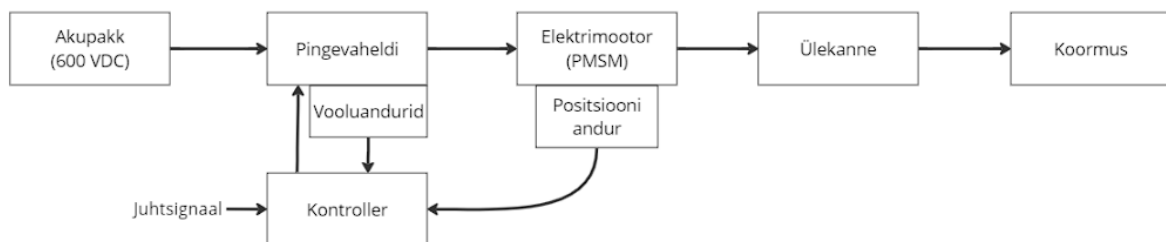
- Võimsus - elektrimootorite tüübi põhiselt on olemas võimsus vahemik, mille piires on elektrimootorid võimelised opereerima. Näiteks võib leida kome faasilisi asümmeetrilisi elektrimootoreid vahemikust watt kuni megawatt.
- Maksimalne kiirus ja kiirusvahemik – Levinuimad elektrimootorite kiirused on tavaliselt vahemikus 1500 kuni 3000 rpm. Antud vahemik on atraktiivne, kuna sellises vahemikus saavutatakse hea võimsuse ja kaalu suhe. Üle 10000 rpm elektrimootorite kiirused on tavaliselt ebatavalised, kuid mitte väikeste mootorite puhul. Samuti on haruldased mõnesaja pöördel-minutis töötavad elektrimootorid.
- Koormusnõuded ning pöördemomendi-kiiruse graafik – kasutusvaldkond ehk kuidas elektrimootorit kasutatakse ning mis nõudmised mehaanilise jõu ülekandmiseks on vaja arvesse võtta. Üsna oluline on elektrimootori pöördemomendi-kiiruse suhte graafik. Samuti peab arvestama rootori inertsiga ning elektrimootorilt soovitava jõudlusega.
- Regeneratiivne pidurdamine – üldiselt on kõik elektrisõidukites kasutatavad elektrimootorid võimelised regeneratiivseks talituseks. Tavaliselt ei ole aga odavama poole muundurid piisavalt võimekad pidevaks regeneratiivseks talituseks. Oluline on veenduda regeneratiivse pidurdamise võimekuses ja piirangutes.
- Keskkonnanõuded ja temperatuur – elektrimootori kasutusvaldkondi ning paigaldusviise kui ka kohti on üsna palju erinevaid. Kasutusvaldkonnast võib

sõltuda ka korpuse disain. Sellest tulenevalt on vaja võtta arvesse keskkonnas tulenevad mõjud nagu näiteks IP klass, mootori jahutusmeetod ja ka keskkonna poolt tekitatud või mootorit piiravad temperatuuri nõuded.

- Mõõtmed – kuigi antud valdkonnas on ka kasutusel standardid siis ühtne detailne mõõtmete vahemik ka erirakendusega elektrimootoritele on üsna puudulik. Sellest tulenevalt on võlli diameeter, kinnitusvahendid, üldised mõõdud defineeritud ainult levinumatele elektrimootori tüüpidele näiteks asünkroonmootoritele. [14]

### 1.3 Elektri-veomootori juhtimine ning võimalused optimeerimiseks

Nii elektrivormeli kui ka enamusele elektrisõidukite elektrilise jõuülekanne koosneb tavaliselt neljast osast, milleks on toitesüsteem, vaheldi ja kontrollid, elektrimootor koos positsiooni anduriga ning ülekanne. Joonisel 1.5 on esitatud elektrivormeli jõuülekanne põhimõtteskeem. Sellest tulenevalt on üsna oluline osa elektrimootori juhtimisel, millest sõltub süsteemi lõplik efektiivsus, täpsus, kiirus ja sooritusvõime.



Joonis 1.5. Elektrivormeli jõuülekanne põhimõtteskeem.

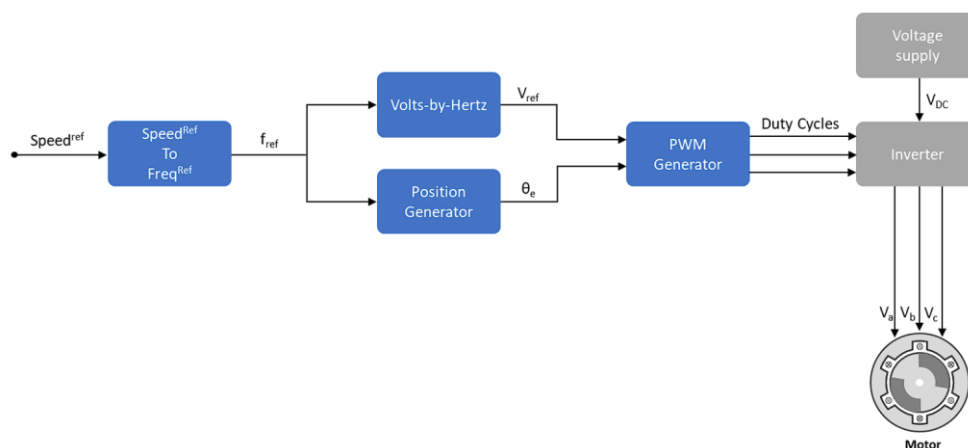
#### 1.3.1 Elektri-veomootori juhtimine

Elektrimootori juhtimiseks on erinevaid juhtimise võimalusi. Neist põhilised on elektrisõidukite juhtimismeetodid on: skalaarjuhtimine, vektorjuhtimine, mis omakorda jaguneb momendi vahetu juhtimine (inglise keeles *Direct Torque Control*, DTC) ja võljaorienteeritud juhtimine (inglise keeles *Field Oriented Control*, FOC). Välja vektorjuhtimist saab omakorda jaotada kahte klassi: otsene- ja kaudne juhtimine. [15]

##### 1.3.1.1 Skalaarjuhtimine

Skalaarjuhtimine kujutab endast vahelduvvoolu mootorite kontrollimist muutuva kiirusega elektrimootorite juhtimisel. Kõige enam kasutatakse skalaarjuhtimist

lühisrootoriga asünkroonmootritel. Kontrollalgoritmi sisendiks on referents kiirus või sagesus. Pingevaheldit juhitakse pulsilaiusmodulatsiooni läbi, mille sisendiks on elektriline nurk  $\theta_e$  ja pinge referents väärtus  $V_{ref}$ . Seda juhtimistüüpi kasutatakse olukordades, kus elektrimootori pöörlemise kiirus ja nurk pole oluline. Tulenevalt sellest pole vaja süsteemis kasutada sensoreid, mille tulemusena on süsteem robustsem. Juhtimise idee seisneb sisendvoolu suurusjärgu muutmises vastavalt sagedusele konstantse suhtena. Selline juhtimine leiab tihti kasutust pumpadel, ventilaatoritel või odavamatel lahendustel. Juhtimise puuduseks on sobivus ainult mootoritele, mis töötavad kindlatel kiirustel. [16]



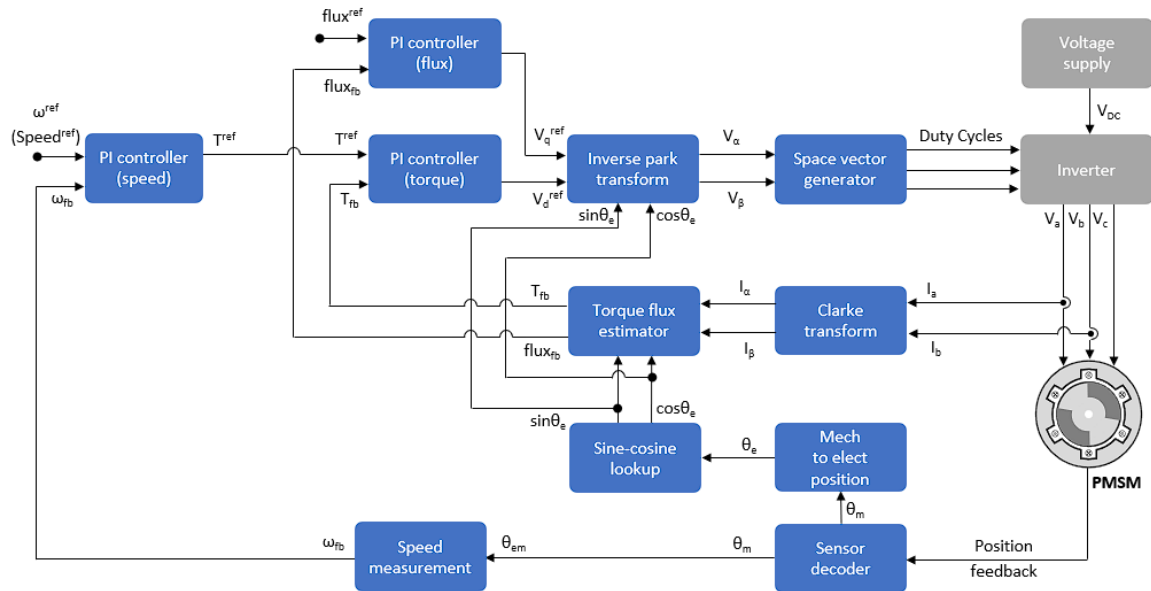
Joonis 1.6. Näide elektrimootori V/f skalaarjuhtimis algoritmist. [17]

### 1.3.1.2 Vektorjuhtimine

Vektorjuhtimise puhul on oluline osa tagasiside, seega juhtimine toimub läbi tagasisidestatud süsteemi. Tagasisideks on tavaliselt elektrimootori positsiooniandur ja pingevaheldis paiknevad vooluandurid. Selle tulemusel paraneb tänu positsioonianduri kasutamisele juhtimistäpsus, tänu millele on võimalik teada rootori elektrilist positsiooni. Tänu täpsemale tagasisidele on võimalik arvutada täpsemad juhtsignaalid elektrimootorile. Vektorjuhtimise korral kontrollitakse nii pöördemomenti kui ka magnetvoogu kas otseselt või kaudselt. [16]

**Momendi vahetul juhtimisel** kontrollitakse nii magnetvoogu kui ka elektromagnetilist pöördemomenti otse ja eraldiseisvalt. DTC algoritm ennustab pöördemomenti ja magnetvoo suurust mootori positsiooni ja voolude järgi. Sellest tulenevalt on PI regulaatorite sisendiks pöördemomendi  $T_{ref}$  ja magnetvoo  $flux_{ref}$  seadeväärtused. Tagasiside põhjal lahutatakse maha pöördemomendi  $T_{fb}$  ja magnetvoo  $flux_{fb}$  väärtused magnetvoo ja pöördemomendi leidmiseks, mille tulemusel saadaks PI regulaatori väljundiks q-telje referentspinge  $V_q^{ref}$  ja d-telje referentspinge  $V_d^{ref}$ . Antud väärtused on seadesuurused  $\alpha$  ja  $\beta$  koordinaatsüsteemi teisendusteks, mis omakorda on sisend

ruumivektori leidmise plokile. [18] Kuigi joonisel 1.7 on kujutatud tagasisidestatud vahetu juhtimise algoritmi siis klassikalises vahetu momendi juhtimise algoritmis puudub elektrimootori positsiooni anduri tagasiside. DTC juhtalgoritmi puhul esineb üsna suuri pöördemomendi võnkumisi, tulenevalt millest on DTC juhtalgoritm üsna halb viis elektirsõidukite ja ka elektrivormeli juhtimiseks. DTC algoritm sobib kasutusvaldkondades, kus pöördemomendi võnkumine ei ole niivõrd oluline.

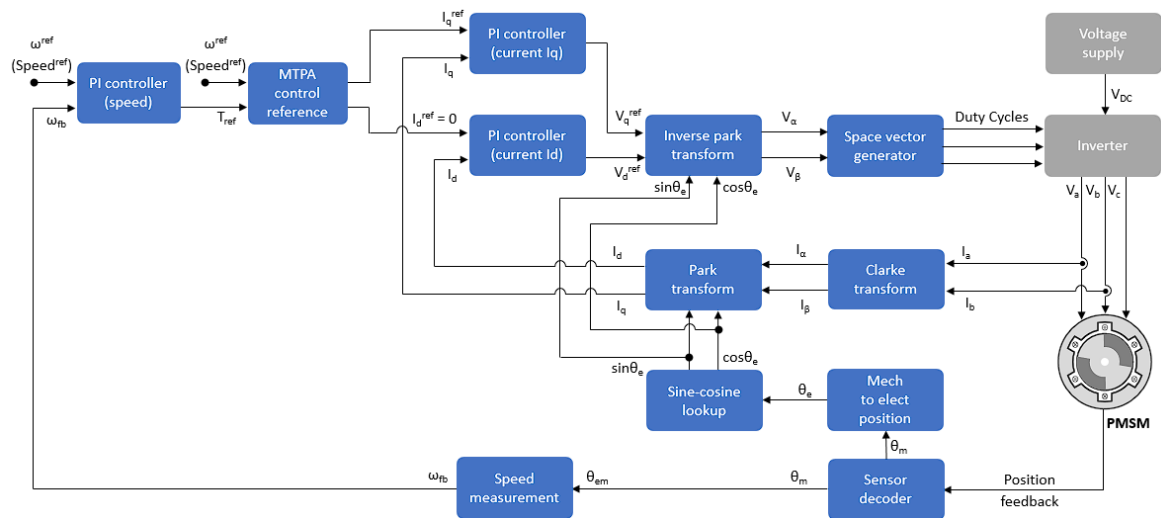


Joonis 1.7. PMSM otsejuhtimise (DTC) näidis plokkskeem. [18]

**Väljaorienteeritud juhtimise** algoritmi kasutatakse enim püsimagneetiga sünkroonmootrite ja asünkroonmootrite kontrollimiseks. Nende kahe erineva elektrimootori juhtimisalgoritmide suurimaks vaheks on asünkroonmootori libistusega arvestamise vajadus. FOC algoritmi puhul on sisendiks kas kiirus  $\omega^{ref}$  või pöördemoment  $T^{ref}$ . Kui sisendiks on kiirus tuleb pöördemoment leida PI regulaatori abil. FOC algoritmi puhul kontrollitakse otse staatori voolukomponentide d-q telgesid. Vastavalt q-telje ( $i_q^{ref}$ ) juhtimine on indutseeritud elektromagnetilise pöördemomendi kaudne juhtimine ja d-telje ( $i_d^{ref}$ ) on magnetvoo taseme kaudne juhtimine. Selle tulemusel on vooluregulaatori väljunditeks  $V_q^{ref}$  ja  $V_d^{ref}$ , mis teisendatakse esmalt  $\alpha$  ja  $\beta$  koordinaatsüsteemi ning seejärel kolmefaasilisse koordinaatsüsteemi. Selle tulemusel on võimalik saavutada soovitud pöördemoment minimaalse vooluga, tänu millele paraneb elektrimootori efektiivsus. [15]

Tagasisidena kasutatakse süsteemis nii kolme faasi voolude mõõtmist kui ka pöörlemiskiiruse ja nurga mõõtmist. Lisaks voolu kontrollimisele on võimalik kasutada ka välja nõrgestamise algoritmi. Väljanõrgestamis algoritm võimaldab elektrimootoril töötada piirkondades üle baaskiiruse, mille tulemusel on võimalik juhtida mootorit ka

suurematel kiirustel. FOC algoritm on võrreldes teiste algoritmidega keerulisem ja ka täpsem momendi juhtimine minimaalsete pöördemomendi võnkumistega.



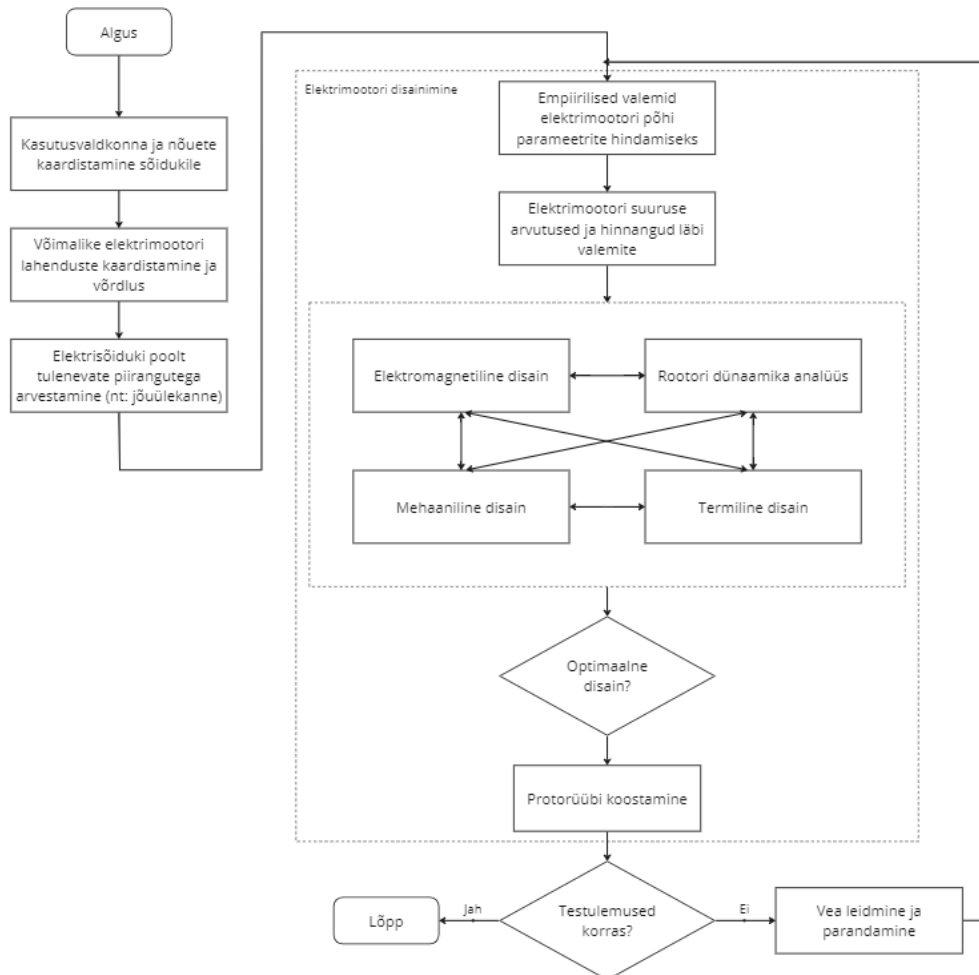
Joonis 1.8. Näide PMSM välja vektorjuhtimise (FOC) algoritmi plokskeemist. [17]

## 1.4 Elektri-veomootori optimeerimise rakendamine elektrivormeli näitel

Loetud teooria põhjal ning võttes arvesse elektrivormeli poolt tulenevaid piiranguid esitletakse algoritm elektrimootori disainimiseks elektrisõidukile (vt Joonis 1.9). Algoritmi rakendamisel langeb kogu rõhk esimesele kolmele sammule, mille jooksul on vaja defineerida nii sõiduki kasutusvaldkond, sõiduki mass, kiirendus kui ka muud olulised tegurid, mis mõjutavad sõiduki ehitust või jõudlust. Oluline on ka arvestada sõiduki või alamsüsteemidest tulenevate piirangute ja intgratsioonidega.

Peale nõudmiste ja piirangute kaardistamist saab alustada elektrimootori disainimisega. Disainimise faas algab elektrimootori empiiriliste valemite koostamisest ja arvutustest. Edasi tuleks liikuda elektrimootori põhiliste parameetrite arvutamiseni. Esmaste usaldusväärsete tulemuste korral on võimalik alustada elektrimootori simuleerimise, analüüsi ja disainimisega. Antud osa on üsna kompleksne ja iga osa antud plokis on üsna tugevalt seotud teineteisega. Esimese optimaalse elektrimootori simulatsiooni tulemuste, tootmistehnoloogiate valiku ja mehaanilise disaini valmimisel tuleks koostada prototüüp elektrimootor ning seda testida. Kui testitud prototüüp vastab projekteeritud eeldustele saab lugeda disaini lõplikuks. Kui esineb fundamentaalseid jõudluse probleeme või vigu, tuleks leida vea põhjus ning see kõrvaldada, seejuures tuleb alustada disainimise protsessi otsast peale, kõrvaldades juurprobleem.

Ostutoote valimisel jääb elektrimootori disainimise osa vahele ning mitte rahuldavate testtulemuste korral jääb vea leidmine ja parandamine tõenäoliselt ettevõtte kanda, kui tegemist ei ole näiteks valesti valitud elektrimootoriga elektrisõidukile.



Joonis 1.9. Elektri veomootori disainimise algoritm.

Eelmises peatükis käsitletud elektrimootori juhtimis meetodite analüüsi põhjal võib väita, et veoajami efektiivsus ning täpsus ei ole ainult elektrimootori disainist sõltuv, vaid on tugevalt seotud elektrimootori juhtimise ja ka kasutusvaldkonnaga. Siiski on tegureid mis aitavad kaasa elektrimootori optimaalsemale tööle. Käsitledes elektrimootori disaini, sõltub optimeerimise tulemuslikkus ning võimekus suuresti mootori tüübist ning sellele rakendatavatest võimalustest. Tulenevalt sellest on oluline defineerida nõue, millele elektrimootori parameetreid optimiseerima hakatakse.

Elektrivormeli jõuülekanne on sarnane tavalistele elektrisõiduki jõuülekanne ehitusele, kuid optimeerimise fookus elektrivormeli puhul on üldse teises kohas. Näiteks kui masstootmises elektrisõidukil on oluline pikk tööiga, pikk sõiduulatus, ja hind, siis elektrivormel projekteeritakse sõitma korraga maksimaalselt 22 km ning vastu peab

vormel pidama ühe võistlushooaja – ligikaudu 900 km ja 25 tundi. Tulenevalt lühikesest vahemaast ning tööajast on näiteks võimalik optimeerida mehaanilisi detaile, võttes mitte nii suurel määral arvesse väsimus tegurit. Tänu sellisele optimeerimisele on võimalik projekteerida detailid kergemad ja mitte nii robustsed – mis avaldab suurt mõju vormeli ringiajale.

Jõuülekanne koosneb paljudest erinevatest nii mehaanilistest kui ka elektrilistest süsteemidest. Igat süsteemi on võimalik optimeerida vastavalt vajadusele – alati ei ole mõistlik optimeerida lihtsalt optimeerimise pärast, vaid otsused peavad olema põhjendatud, hästi läbi kaalutud, kuna ühe parameetri optimeerimisel kannatab tõenäoliselt mõni teine parameeter. Näiteks saab elektrivormeli elektrimootorile esitada neli kõige põhilisemat nõuet, mille põhjal saab teha optimeerimise otsused ning valikud nii elektrimootorit ise-arendades kui ka sobiva ostutoote valimisel. Elektriveoajami valimisel/disainimisel on elektrivormelile oluliseimateks parameetriteks: kompaktsus ja kaal, efektiivsus, täpse juhtimise võimekus ja kiire reageerimisaeg ning töökindlus.



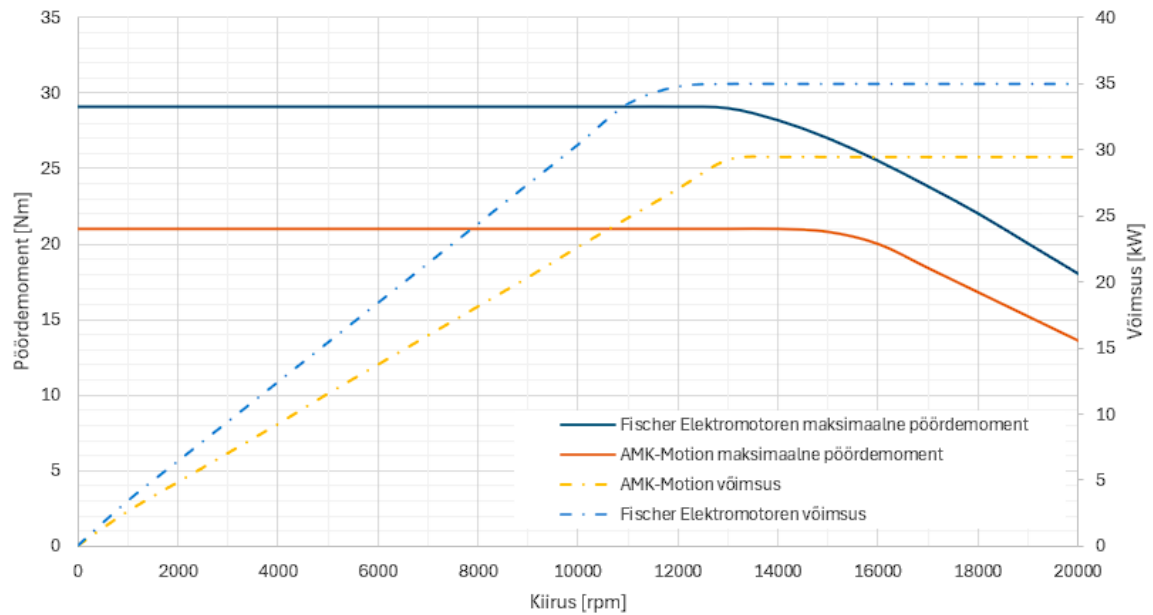
## 2. ELEKTRIMOOTORI PROJEKTEERIMINE

### 2.1 Lähteandmed

Lähteandmete defineerimisel tuleb alustada kõige tähtsamast – võistlussarja reeglid. Esimeseks oluliseks sammuks on määratleda reeglid, mille alusel on võimalik valida elektri-veomootorit jõuülekande süsteemi või disainida selle elemente. Tudengivormeli tiim FSTT võistleb Euroopa kategoorias, mille võistlussarja reeglid defineerib *Formula Student Germany*. Võistlussarja reeglistiku puhul on olulisemateks punktideks elektrivormeli jõuülekandele EV2, T10 ning T7.3 reeglistik, millest olulisemad nõudmised:

- EV 2.1.1 – Ainult elektrilised mootorid on lubatud
- EV 2.1.2 – Mootori kinnitused peavad vastama T10 reeglistikule. T10 reeglistik defineerib kinnitusvahendid.
- EV 2.1.4 – Mootorid peavad elektriliselt olema ühendatud akupakiga läbi mootori kontrolleri.
- T 2.2.1 – Elektrivormeli jõuülekande süsteemi akupaki väljund ei tohi ületada võimsust 80 kW.
- T 2.2.2 – Regeneratiivne pidurdamine on lubatud.
- T 7.3.2 – Jõuülekande pöörlevad osad peavad vastama tingimustele:
  - Kate valmistatud 2 mm paksusega performeerimata terasest või 3 mm alumiiniumsulamist 6061-T6
  - Kinnitatud 6 mm meetermõõdustikus tugevusklassiga 8.8 või tugevama kinnitusvahenditega ning vastama reeglile T 10.1
- T 7.3.4 – Elektriveoajamil peab olema korpus või kaitsekilp valmistatud 2 mm paksusega performeerimata alumiiniumsulamist 6061-T6 või võrdväärsest materjalist. Kaitsekilp võib olla jagatud kaheks võrdseks sektsiooniks, mõlemad 1 mm paksusega. [2]

Elektrimootori projekteerimine tehakse koostöös Saksa ettevõttega Fischer Elektromotoren GmbH. [19] Antud lahenduse välja töötamisel pakub ettevõtte elektromagnetilise lahenduse disaini staatori ning rootori näol. Ettevõtte poolt pakutava lahenduse kasutuselevõtt annaks rohkema momendi ning nominaalse kiiruse võimekuse. Parema võimaliku maksimaalselt kasutatava pöördemomendi ja võimsuse võrdluseks koostatakse Joonis 2.1 tootja poolt pakutavate elektrimootori andmelehtede alusel, nii võimalikule uuele lahendusele, kui ka hetkel kasutusel olevale elektrimootorile.



Joonis 2.1. AMK-Motion ja Fischer Elektromotoren PMSM maksimaalse pöördemomendi ning võimsuse võrdlus 550 V<sub>DC</sub> sisendpinge korral.

Elektri veomootori puhul ei ole ainsaks oluliseks parameetriks maksimaalne pöördemoment ja võimsus ning sellest tulenevalt võrreldakse ka jõudlus- elektri- ja mehaanilisi parameetreid tabelis 2.1. Kuigi võistlusreeglid piiravad maksimaalselt lubatava võimsuse 80 kW, võib näha, et uue mootori kasutusele võtuga suureneks ka võimalik võimsuse kasutus elektrimootori kohta. Tabelis esitatud tootja poolsete andmetena kajastub, et väheneb faasivool, mille tulemusel on võimalik kasutada väiksema ristlõikega juhtmeid mootorite toitejuhtmetena. Fischeri elektriveoajami kaalu andmete põhjal võib eeldada, et ajami kogukaal on suurem ning uue mootoriga soovitud kaaluvõitu ei saavutata (vt Tabel 2.1). Elektrimootorite andmelehed on nähtavad LISA 1 ja LISA 2 all.

Tabel 2.1. AMK-Motion DD5-14-10-POW ja Fischer Elektromotoren TI085-052-070-04B7S-07S04BE2 parameetrite võrdlus.

	<b>Parameeter</b>	<b>AMK-Motion</b>	<b>Fischer Elektromotoren</b>
<b>Jõudlus parameetrid</b>	Maksimaalne pöördemoment [Nm]	21.0	29.1
	Nominaalne pöördemoment [Nm]	9.8	11.1
	Maksimaalne kiirus [rpm]	20000	20000
	Nominaal kiirus [rpm]	12000	13250
	Maksimaalne võimsus [W]	35000	35366
	Nominaal võimsus [W]	12300	15404
<b>Elektrilised parameetrid</b>	Nominaal vool [ $A_{rms}$ ]	41.0	22.6
	Maksimaalne vool [ $A_{rms}$ ]	105	61
	Nimipinge [V]	350	-
	Pöördemomendi konstant [ $Nm/A_{rms}$ ]	0.260	0.492
	Voolukonstant [V/rpm]	0.019	0.031
	Rootori ajakonstant [ms]	10	3
	Pooluspaaride arv:	5	4
	Mähise takistus [ $\Omega$ ]	0.135	0.126
	Mähise induktiivsus [mH]	0	0.393
Staarori ühendusskeem	Kolmnurk- ühendus	Tähtühendus	
<b>Mahaanilised parameetrid</b>	Mootori mass [kg]	3.55	2.80 (ilma korpusega)
	Rootori inertsmoment [ $kgm^2$ ]	$0.27 \cdot 10^{-3}$	$0.33 \cdot 10^{-3}$
	Rootori balanseerimisklass	G2.5	G1.0

Kõige olulisem võit Fischer elektriajamite kasutamisel on kõrgem lubatav efektiivsus. Kogu võisluse punktiskoorist 1000 punkti, moodustab 75 punkti efektiivsus. Elektrivormeli efektiivsus arvestatakse läbitud kestvussõidu jooksul valemiga (2.1) [2]:

$$Efektiivsus_{Skoor} = 75 \left( \frac{EF_{max} - EF_{team}}{EF_{max} - EF_{min}} \right), \quad (2.1)$$

kus  $EF_{team}$  - tiimi efektiivsustegur,

$EF_{min}$  – madalaim efektiivsustegur kõikidest tiimidest,

$EF_{max}$  – defineeritud, kui  $1.5 \cdot EF_{min}$ .

Efektiivsustegur on arvutatud valemiga:

$$EF = T^2 \cdot E, \quad (2.2)$$

kus  $T$  – korrigeerimata kestvussõidu aeg [s],

$E$  – kasutatud energia [J].

Elektrimootori tootjate poolt pakutavaid efektiivsuskaarte on omavahel üsna keeruline otseselt võrrelda. Igal juhul võib algandmete puhul eeldada ligikaudu 5 % kõrgemat efektiivsust, mis avaldaks positiivset mõju kogu jõuülekande disainile ning vastavalt ka võimalikule punkti skoorile.

## **2.2 Elektromagnetiline disain**

Kuigi elektrimootori tootja ei avalda tehnilisi detaile elektrimootori elektromagnetilise disaini osas, on oluline enne mehaanilise disainiga alustamist käsitleda püsिमagnetitega elektrimootori fundamentaalseid tööpõhimõtteid. Siiski on võimalik teha mõningaid järeldusi tootja poolsetest andmetest ning valmis rootori ja staatori inspeksioonist. Järgnevas peatükis käsitletakse püsिमagnetitega elektrimootorite põhitõdesi ning võrreldakse neid saadaval olevate andmete põhjal.

### **2.2.1 Püsिमagnetitega elektrimootorite põhitõed**

Olenemata püsिमagnetitega elektrimootori topoloogiast on üldine püsिमagnetitega elektrimootorite konstruktsioon omavahel üsna sarnane. Püsिमagnetitega elektrimootorite puhul on tegemist ehituslikult vahelduvvoolu sünkroonmootoritega, mille puhul tekitatakse ergutusväli rootoril paiknevate püsिमagnetite abil. Tulenevalt sellisest ehituslikust eripärast tekitatakse magnetväli rootoril paiknevate püsिमagnetite ja staatori elektromagnetiliste mähiste vahel. Pöördemomendi tekitamiseks hoitakse staatori ja rootori vaheline ruuminurk üldjuhul  $90^\circ$ , mis tagab maksimaalse pöördemomendi. Ühtlase pöördemomendi saavutamiseks tuleb mähiseid ergutada õigel ajal rootori asendi suhtes, sellist protsessi nimetatakse kommutatsiooniks ning juhtimine toimub läbi vaheldi. Täpse rootori positsiooni määramiseks kasutatakse võlli peal paiknevat asendiandurit. [11]

Pöördemomendi maksimaliseerimiseks rootori ja staatori vahel on oluline, et magnetiline jõud ehk magnetvoog nende vahel oleks maksimaalne. Kuna rootor on elektrimootori pöörlev osa, peab rootori ja staatori vahel olema õhupilu. Õhul on üsna kehv läbivustakistus ehk võime juhtida magnetvoogu. Selle kompenseerimiseks on oluline kasutada nii rootoril kui ka staatoril ferromagnetilist materjali, et juhtida efektiivsemalt magnetvoogu läbi õhupilu. Lisaks sellele mõjutab ka õhupilu paksus

staatori ja rootori vahelist magnetvoo edastust elektrimootoris – mida kitsam õhupilu, seda parem magnetvoo edastus. [20]

### 2.2.1.1 Pöördemoment

Püsिमagnet elektrimootorites esineb kolme tüüpi pöördemomenti. Püsिमagnet elektrimootori kogu pöördemoment avaldub valemis (2.3)

$$T = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{d\theta} - \frac{1}{2} \phi^2 \frac{dR}{d\theta} + Ni \frac{d\phi}{d\theta}, \quad (2.3)$$

kus  $i$  – mähise vool [A],

$L$  – induktiivsus [H],

$\theta$  – elektriline nurk [rad],

$\Phi$  – magnetvoog [Wb],

$R$  – reluktants [m/H],

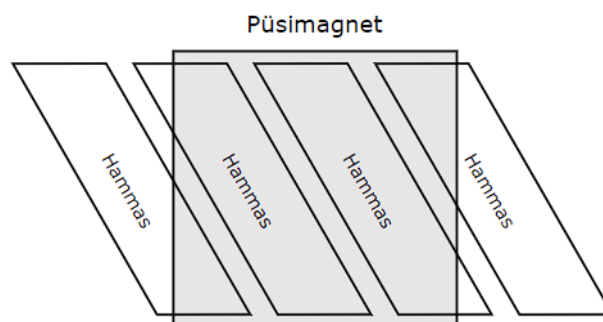
$N$  – mähise keerdude arv.

Valemi esimene osa kirjeldab mootori konstruktsioonis tulenevat mähise induktiivsuse  $L$  muutumist funktsioonina vastavalt positsiooni muutusele  $\theta$ . Teine osa valemist kirjeldab kleepimis pöördemomenti (inglise keeles *cogging torque*), kui magnetvoog  $\phi$  liigub läbi muutuva magnetilise reluktantsi  $R$ . Kolmas osa kirjeldab vastastikust pöördemomenti, mis paneb elektrimootori võlli reaalselt pöörlema. Lihtsustatult öeldes on esimesed kaks osa valemist mitte soovitud parasiitnähtused ning viimane osa valemist soovitud osa. [21]

Vastastikune pöördemoment (inglise keeles *mutual torque*) tuleneb püsिमagnetite poolustest ja staatori mähise vastastikust mõjust. Vastastikune pöördemoment on püsिमagnet elektrimootorites suurim pöördemomendi osa ja on proportsionaalne keerdude arvuga mähises. [20]

Kleepimis pöördemoment tekib elektrimootoris, kui püsिमagnetid üritavad end positioneerida maksimaalse ferromagneetilise materjali suhtes. Tulenevalt tüüpilisest püsिमagnetitega elektrimootori disainist tekitab kleepumis pöördemomenti varieeruv uurete ja hammaste magnetiline takistus. Juhul kui staatori magnetiline takistus ei varieeru, siis on kleepumis pöördemoment null. Kleepumis pöördemoment põhjustab elektrimootoris pöördemomendi pulsatsioonid ning tulenevalt sellest on välja pakutud erinevaid meetodeid selle parasiit pöördemomendi vähendamiseks. Näiteks mängib

olulist rolli urete arv, staatori hamba disain, pooluste nihutamine, staatori mähise nurga alla nihutamine püsomagnetite suhtes (inglise keeles *skewed*) või rootori püsomagnetite nurga alla nihutamine urete suhtes (vt Joonis 2.2). [21]



Joonis 2.2. Näide nurga alla nihutatud staatori uurdetest püsimagneti suhtes.

Kuigi reluktants pöördemoment ei ole põhiline komponent püsimagnet elektrimootori pöördemomendi tekitamiseks nagu näiteks reluktants elektrimootoritel, siis võib teatud püsimagnet elektrimootori topoloogiates seda esineda. Reluktants pöördemoment tekib topoloogiates kus  $L_d$  ja  $L_q$  induktiivsused erinevad teineteisest nagu näiteks süvistatud püsimagnet rootoriga elektrimootoril. Üldiselt on reluktants pöördemomendi komponendi osakaal püsimagnet elektrimootorites väike. [22]

### 2.2.1.2 Kaod püsimagnetitega elektrimootorites

Elektrimootori efektiivsuse määravad elektrimootori poolt tekkinud kaod. Kaod elektrimootoris võivad tekkida erinevatest teguritest. Selles peatükis käsitletakse PMSM suurimaid kadude põhjuseid ning võimalusi nende lahendamiseks. Püsimagnetitega mootorite põhilised kaod on: vaseskaod ja rauaskaod, millest suurim osakaal on vaseskadudel. Lisaks sellele esinevad püsimagnet elektrimootorites ka muud kaod, mis ei ole niivõrd domineerivad ning on tänu sellele tihitipeale oletuslikud väärtused.

Muud kaod püsimagnet elektrimootoris on mehaaniline-, püsimagnet-, ja muud kaod, mida on keeruline läbi valemite või simulatsioonide arvutada, kuna moodustavad üsna väikese osa kadudest. Põhilise osa mehaanilistest kadudes püsimagnet elektrimootorites moodustab laagritest tulenev veerekadu (ka laagrimäärde viskoosuse mõju). Lisaks laagritest tulenevale kaole võib teatud juhtudel avaldada mõju ka näiteks simmerlingi kasutamine elektrimootori tihendamiseks. Samuti avaldavad mõju elektrimootori tolerantsid ja rootori kotsentrilisus staatori suhtes.

Püsimagnetitega elektrimootorites esinevad ka püsimagnetitest tulenevad kaod, millega arvestamine on üsna keeruline. Sellest tulenevalt ei arvestata tihtipeale püsimagnet

elektrimootorites, püsimagnetites tekkiva rauaskadudega, mis on üsna väikesed võrreldes suuremate kadudega elektrimootorites.

**Vaseskaod** tekivad elektrimootori mähises igal hetkel kui mähises liigub vool. Tulenevalt mähise takistusest ja voolu liikumisest mähises võib lihtsustatult kujul kirjeldada elektrimootori vaseskadusi läbi valemi (2.4)

$$P_{kadu} = I_{rms}^2 \cdot R, \quad (2.4)$$

kus  $I_{rms}$  – mähise voolu keskvärtus [A],

$R$  – mähise takistus [ $\Omega$ ].

Praktikas asi nii lihtne ei ole ja arvesse tuleb võtta nii juhi materjali eritakistust  $\rho$ , staatori pikkust  $L_{st}$ , uurde täituvus tegurit  $K_{wb}$ , uurde ristlõiget  $A_{uure}$  ja voolu tiheduse ruutkeskmise väärtust  $J_{rms}$ . Selle tulemusel avalduvad vaseskaod valemis (2.5). Voolu tihedus  $J_{rms}$  avaldub juhi ruutkeskmise voolu ja ristlõike suhtena. [21]

$$P_{cu} = (K_{wb} \cdot A_{uure} \cdot L_{st}) \rho J_{rms}^2, \quad (2.5)$$

kus  $K_{wb}$  – uurde täituvus tegur,

$A_{uure}$  – uurde ristlõige [ $m^2$ ],

$L_{st}$  – staatori pikkus [m],

$\rho$  – materjali eritakistus [ $\Omega \cdot m$ ],

$J_{rms}$  – voolu tihedus [ $A/m^2$ ].

Antud juhul tasub tähele panna, et materjali (näiteks vase) takistus on sõltuv temperatuurist. Tulenevalt sellest on eritakistuse väärtus võimalik leida valemiga (2.6). Eitakistuse väärtus on lineaarselt temperatuurist sõltuv [21]

$$\rho(T) = \rho(T_0) \cdot (1 + \alpha(T - T_0)), \quad (2.6)$$

kus  $T$  – temperatuuri väärtus, millele teisendada [ $^{\circ}C$ ],

$T_0$  – temperatuuri väärtus, mille puhul on temperatuur mõõdetud [ $^{\circ}C$ ],

$\alpha_p$  – temperatuuri koefitsent  $T_0 = 20^{\circ}C$  juures [ $1/^{\circ}C$ ].

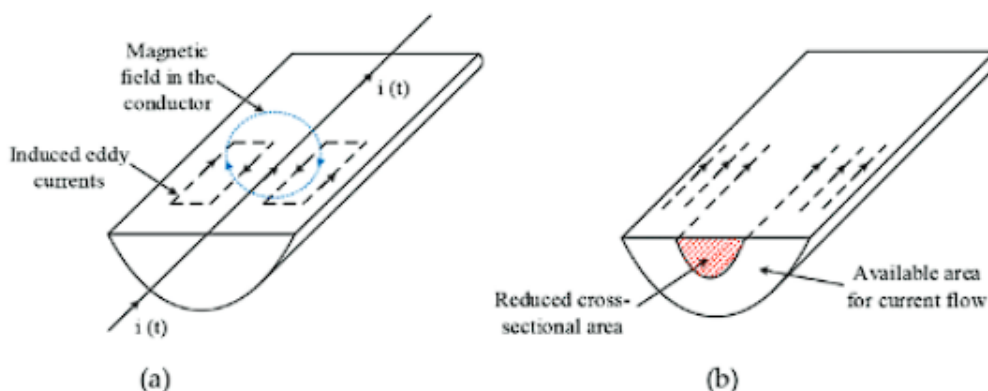
Olukordades, kus suureneb elektriline sagedus tekivad lisakaod ehk AC kaod. Siinuspinge sageduse suurenedes tekib pinnaefekt, ehk vool on surutud juhi pinnale, mille tulemusel juhi keskosas voolu ei liigu (vt Joonis 2.3). Selle nähtuse tulemusel väheneb efektiivne juhi ristlõike pindala vastavalt valemile (2.7). [21]

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu'}} \quad (2.7)$$

kus  $\delta$  – pinna efekti sügavus [m],

$\omega$  – nurkkiirus [rad/s],

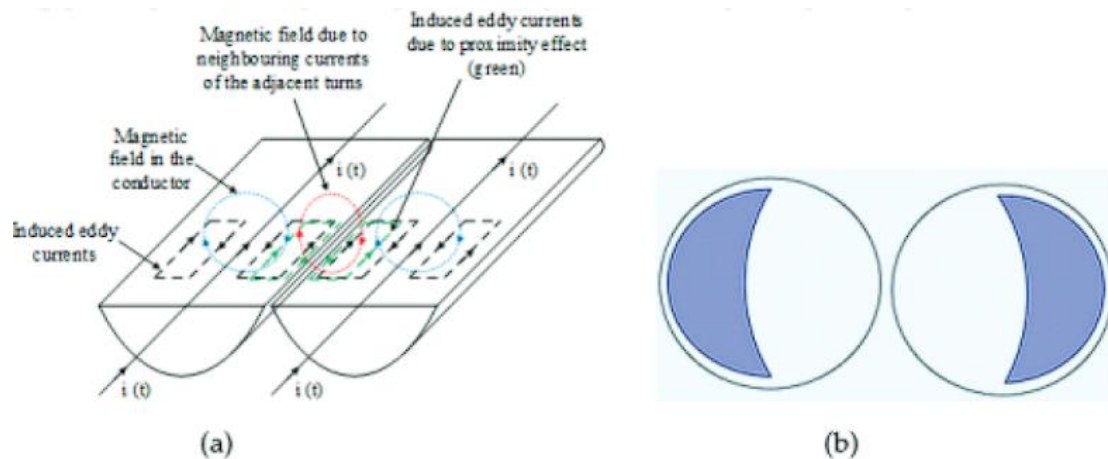
$\mu$  – magnetiline läbitavus [H/m].



Joonis 2.3. Pinnaefekti mõju juhis: (a) pöörivoolude teke juhis ja (b) vähenenud efektiivse ristlõike ala juhis. [23]

Pinnaefektiga võitlemiseks võetakse mähises kasutusele *Litz* tüüpi juhtmed. *Litz* juhe koosneb väiksema ristlõikega juhtidest, mis on eraldi isoleeritud, juhid on omavahel punutud. Tulenevalt sellest, et iga individuaalne juht on kitsam kui pinna efekti sügavus, vähenevad AC kaod märgatavalt. Lisaks pinnaefektile tekib juhtides ka lähedusefekt (inglise keeles *proximity effect*). Lähedusefekti põhjustab lähedal olevates juhtides liikuva voolu poolt tekitatud magnetväli. Sarnaselt pinna efektile suureneb ka lähedusefektist tulenevad kaod, elektrilise sageduse suurenemisel. Antud efekti tekkimist ning mõju illustreerib Joonis 2.4. [23]





Joonis 2.4. Kahe juhi läheduseefekti mõju: (a) magnetvoog tekitatud kahe lähestikku juhi poolt ja (b) lähestiku efekti mõju ristlõikele kahe kõrvuti olevale juhile. [23]

**Rauaskaod** tekivad, kui ferromagnetilisi materjale ergutatakse, mis tahes ajas muutuva ergutusega, siis materjali läbiv energia hajub tulenevalt pöörivoolu- (inglise keeles *eddy current*) ja hüstereesise kadude tagajärjel. Neid kahte kadu on omavahel üsna keeruline isoleerida ja tulenevalt sellest on need tavaliselt mõõdetav suurus kui rauaskadu (inglise keeles *core loss* või *iron loss*). Hüsteresise kadu on tulenev materjali omadustest ning tavaliselt leitav materjali andmelehel. Elektrimootori hüstereesise kao vähendamiseks on ainus võimalus, kasutada seega paremat materjali. [21] Hüsteresise ligikaudsed kaod saab leida valemiga (2.8): [24]

$$P_h = k_h \cdot f \cdot B^n, \quad (2.8)$$

kus  $k_h$  – hüstereesise koefitsent,

$f$  – sagedus [Hz],

$B$  – magnetiline induktsioon [T]

$n$  – materjalist tulenev eksponent vahemikus 1.5-2.5.

Pöörivoolu kadu ei ole siiski niivõrd sõltuv materjali omadustest vaid materjali kasutamise tehnikast. Tulenevalt sellest kasutatakse elektrimasinates kahte enamlevinumat viisi, millest esimeseks tehnikaks on materjali takistuse suurendamine lisades materjalile väike kogus silikoni. Teine üsna efektiivne moodus on materjali õhukeste kihtide lamineerimine. Laminatsioonide vahel on isoleeriv mittemagneetuv materjal ning laminatsiooni paksusest sõltub kadude suurus - eriti suurte sagedustel.

Lamineerimise tehnika aitab vähendada pöörivoolude liikumist suurel ringil. [10]  
 Pöörivoolukaod  $P_e$  on ligikaudu leitavad valemiga (2.9): [24]

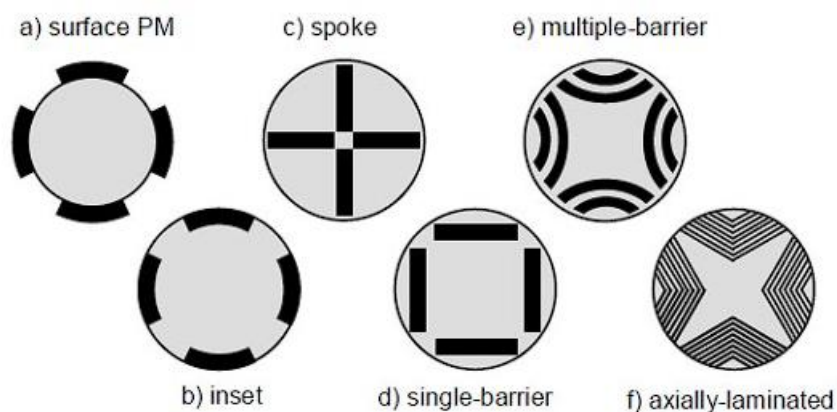
$$P_e = k_e \cdot f^2 \cdot B^2, \quad (2.9)$$

kus  $k_e$  – materjalist tulenev konstant,

$h$  – materjali paksus [m].

### 2.2.1.3 Püsिमagnetitega elektrimootori rootor

Loogilises võtmes, omab püsिमagnetite paigutus rootoril tähtsat rolli magnetvälja tugevuses ja magnetvoo juhtimises rootori ja staatori vahel. Selle tulemusel on välja töötatud erinevaid viise ning topoloogiaid püsिमagnetite paigutamiseks rootoris. Sellest tulenevalt jagunevad püsिमagnetmootorid, enam levinumate püsिमagnetite paigutuse järgi vastavalt kahte enim kasutatud leidvatesse kategooriatesse: süvistatud- (inglise keeles *Interior Permanent Magnet, IPM*) pinnapealse- (inglise keeles *Surface Permanent Magnet, SPM*) püsिमagnetitega rootoriteks. Samuti võib kategoriseerida ka püsिमagnet elektrimootoreid vastavalt magnetvoo suunale: radiaal- ja aksiaal püsिमagnet elektrimootoriteks. [25] Tulenevalt asjaolust, et projekteeritakse radiaal suunalise magnetvooga elektrimootorit, ei käsitleta antud lõputöös aksiaal suunalise magnetvooga elektrimootoreid.



Joonis 2.5. Kuus enamlevinumat püsिमagnetite paigutuse viisi rootoril: a) pinnapealne paigutus; b) süvistatud paigutus; c) kodar tüüpi paigutus; d) ühe barjääriline paigutus; e) mitme barjääriline paigutus; f) aksiaalselt lamineeritud paigutus. [26]

Oluline parameeter püsomagnetitega elektrimootoril on ka magnetiliste pooluste arv. Tavaline praktika on kasutada elektrimootoris paaris arv magnetilisi pooluseid. Magnetiliste pooluste arv defineerib elektrilise sageduse elektimootoris. Suurem elektriline sagedus suurendab AC kadusid. Samuti peab jõuelektronika muundur suutma suurtematel sagedustel elektrimootorit juhtida. Väiksem pooluste arv tähendab pöördemomendi tootlikuse efektiivsuse vähenemist. Vahelduvad magnetpoolused rootoril määravad vahelduva magnetvoo sageduse mootori faasides ning on seoses võlli mehaanilise pöörlemis sagedusega läbi valemi (2.10). [21]

$$\omega_e = \frac{N}{2} \cdot \omega_m, \quad (2.10)$$

kus  $\omega_e$  – elektriline kiirus [rad/s],

$\omega_m$  – võlli mehaaniline kiirus [rad/s],

N – magnetiliste pooluste arv.

**Pinnapealse püsomagnetitega rootoril** toimub pöördemomendi tekitamine tänu pinnapealsetele püsomagnetitele rootoril ja läbi magnetvoo rootori ja staatori vahel. Maksimaalse pöördemomendi saavutamiseks peab vastuelektromotoorjõud olema faasis, faasi vooluga. D-telje ja q-telje induktiivsused pinnapealsete püsomagnetitaga rootoril on samaväärsed. Genereeritud pöördemoment avaldub valemiga (2.11) [26]:

$$T = \frac{3 \cdot E \cdot i \cdot \cos \alpha}{\omega}, \quad (2.11)$$

kus E – vastuelektromotoorjõud [V],

$\alpha$  – nurk vastuelektromotoorjõu ja faasi voolu vahel [rad].

Püsomagnetite pinnapealse paigutusega rootoril on mõningaid eeliseid kui ka puuduseid. Püsomagnet materjalidel on kõrge survetugevus ja madal tõmbetugevus. Kuna magnetid paiknevad rootori pinnal on need kergemini mõjutatavad mehaanilistele vigastustele nii elektrimootori koostamisel kui ka hilisemate töötükkide ajal. Samuti on keeruliseks osaks magnetite kinnitamine rootorile. Kõrgetel kiirustel pöörleval rootoril on suur inertsmoment ning suurem otsene mõju temperatuurile. Tulenevalt sellest peavad magnetid olema kinnitatud rootorile tugevalt, et pidada vastu mõjuvatele jõududele elektrimootoris. [27]

Riskide vähendamiseks paigaldatakse rootorile kaitsev hülss väikese siirdeistuga. [27] Tulenevalt sellest tekib pingekonsentratsioon magneti ja hülsi vahel ning suureneb tsentrifugaaljõu mõjul kõrgetel pöörlemiskiirustel. Rotori kahjustused võivad tekkida,

kui rootori nihkepinge ületab materjali voolepiiri. Rootori mehaanilisel disainimisel on seega oluline võtta arvesse ka omavõnkesagedusi. [28] Liiga väike siirdeist võib põhjustada hülssi tahtmatut liikumist ja rootori kahjustusi, liiga suur siirdeist võib tekitada koostamisel magnetitele kahjustusi. Kui kaitsev hülss on liiga õhuke, võib see puruneda, liiga paks hülss mõjutab õhupilu suurust ja läbi selle elektrimootori jõudlust ja kadusi elektrimootoris. [27]

**Süvistatud püsिमagnetitega rootoris** tekib kahte erinevat tüüpi pöördemoment. Püsिमagnetite poolt tekitatud pöördemoment  $\Theta_{mag}$ , mis tekib tänu püsिमagnetite magnetvoole rootoril (d-telg) ja staatori mähise voolule (q-teljel). Relkuktants pöördemoment tekib tänu rootori d ja q telje ebaühtlastele induktiivsustele ( $L_d < L_q$ ). See on tingitud asjaolust, et d-telje magnetvoog peab läbima suurema takistuse kui q-telje magnetvoog. Tulenevalt sellest on süvistatud püsिमagnetitega elektrimootoris tekkivat kahete erinevat pöördemomenti võimalik juhtida eraldiseisvalt. Püsिमagnetite poolt tekitatud pöördemomenti saab juhtida läbi varieeruva jääkvoo tiheduse ning reluktants pöördemomenti läbi rootori tüübi, kuju ja arvu muutmise läbi magnetvoo tõkete rootoril. [26]

Püsiseisundis avaldub elektrimootori keskmine pöördemoment valemiga (2.12):

$$T = 1.5 \cdot p \cdot [i_q \cdot \phi + (L_d - L_q) \cdot i_q \cdot i_d], \quad (2.12)$$

kus  $L_d$  – d-telje induktiivsus [H],

$L_q$  – q-telje induktiivsus [H],

p – pooluspaaride arv,

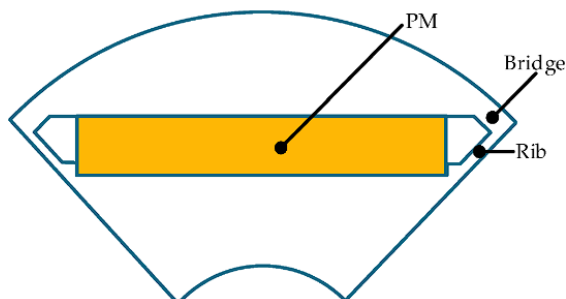
$i_q$  – staatori q-telje vool [A],

$i_d$  – staatori d-telje vool [A].

Valemis (2.12) kujutab nurksulgudes esimene pool püsिमagnetite ja staatori q-telje voolu poolt tekitatud pöördemomenti d-teljel. Teine osa valemist kujutab relkuktants pöördemomenti. [26]

Süvistatud magnetitega rootoril on magnetid rootori sees peidus, mis vähendab ohtu otseste mehaaniliste vigastuste tekkimiseks. Samuti on püsिमagnetid rohkem kaitstud otseste staatori temperatuuriväljade eest. Süvistatud püsिमagnetitega rootori puhul on tsentrifugaaljõud kontseentreeritud magnetsillale (inglise keeles *magnetic bridge*), mis võib põhjustada magnetahela kahjustusi. Tulenevalt sellest on sild süvistatud

magnetitega rotoril mehaaniliselt kõige nõrgem koht. Elektromagnetilise disaini vaatest peab sild olema võimalikult väike, et vältida magnetilist küllastuspunkti tekkimist. Tulenevalt sellest on oluline võtta rotori mehaanilisel disainimisel arvesse materjali voolepiiri ning magnetsillale tekkivat kontsentratsiooni punkti. [27]

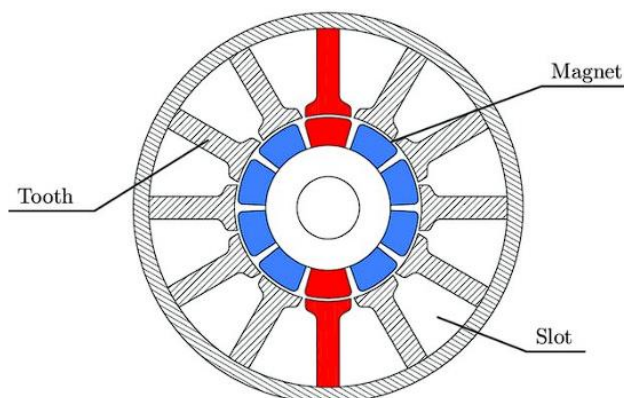


Joonis 2.6. Näidis struktuur tavalisest süvitatud püsomagnetiga rotorist. [27]

Enim kasutatavateks püsomagnetiteks materjalideks elektrimootori rotoril on samarium-koobalt (SmCo) või neodüüm-raud-boor (NdFeB) haruldased muldmetall magnetid. [29]

#### 2.2.1.4 Püsomagnetitega elektrimootori staator

Püsomagnetitega elektrimootori staator on statsionaarne elektrimootori osa, mille ülesandeks on elektromagnetvälja tekitamine. Sellest tulenevalt on staatori põhiliseks konstruktsiooni osaks ümmargune rauast südamik, millele on sisse lõigatud avadused mähiste paigaldamiseks. Neid avasid rauast südamikus kutsutakse uureteks (inglise keeles *slots*). Uurete vahele jääb rauast osa, mida nimetatakse hammasteks (inglise keeles *tooth*). Ümmargune kaar, mis ühendab staatori ühtseks osaks nimetatakse staatori ikeks (inglise keeles *stator yoke* või *back-iron*). [21]

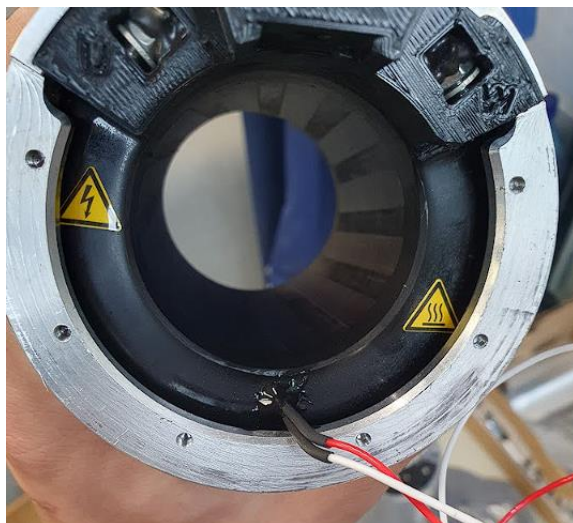


Joonis 2.7. Püsomagnetitega sünkroonmootori läbilõige (10 poolust, 12 uuret). [30]

Uurete sees paiknevad mähised, mis moodustavad voolu liikumisel läbi nende, elektromagnetvälja. Ükisikud mähised võivad ulatuda ühele või mitmele staatori hambale. Mähiseid, mis ulatuvad ühest pilust teise, nimetatakse (inglise keeles *end turns*). Kui iga mähis ulatub ühe hambani, nimetatakse mähist konsentreerituks (inglise keeles *concentrated*). Teisest küljest, kui iga mähis ulatub mitme hambani ja kattub teise mähisega on mähis jaotatud (inglise keeles *distributed*). Uurete arv ja mähise ühendusskeem sõltub suuresti magnetpooluste arvust rootoril ja määratakse üldjuhul peale pooluspaaride loendamist. [21]

Selle asemel, et kontrollida iga mähise voolu eraldi, ühendatakse mähised, mis pingestatult mõjutavad rootorit samas suunas. Sellest tulenevalt on võimalik tekitada ükskõik kui palju faase. Enam levinum faaside arv on siiski kolm. Kolmefaasilise mootori faasi ühendusskeemid jagunevad omakorda kolmnurkühenduseks ( $\Delta$ -ühendus) ja tähtühenduseks (Y-ühendus). [21]

Suurimaks erinevuseks täht- ja kolmnurkühenduse vahel on kolmnurkühenduse puhul tekkivad mootoris ringlevad voolud, mis omakorda suurendavad vaseskadusid. Kolmnurkühenduse eeliseks on lihtsam tootmistehnoloogia ehk sõlme faaside kokku ühendamisel peab tegema vähem ühendusi. Fischer-Elektronen elektrimootori staatori puhul on tegu 12 uurde ning tähtühendusega. AMK-Motion elektrimootori kohta on teada ainult ühendusskeem, ehk kolmnurkühendus.



Joonis 2.8. Fischer Elektromotoren elektrimootori staator (8 poolust, 12 uuret).

## 2.3 Mehaaniline disain

Elektrimootori mehaanilise disaini puhul kehtib standard EVS-EN IEC 60072. Antud standardi esimene osa käsitleb elektrimootori mõõtmeid, korpuse suurust ja väljund

võimsust. Standardi teine osa käsitleb suuremaid mootori tüüpe ja mõõtmeid. Kolmas osa keskendub väikestele elektrimootoritele. Tulenevalt sellest on standard EVS-EN IEC 60072 hea alus elektrimootor mehaanilisel disainil, kuid mitte täielikult rakendatav elektrivormeli elektrimootori mehaanilise disaini protsisis.

Elektrimootori mehaanilise disaini projekteerimisel on vaja arvesse võtta rootori ja staatorist tulenevate piirangutega (vt LISA 3). Ettevõtte esitab piirangud mehaanilisele disainile jooniste näol, mille tulemusel tuleb elektrimootorile projekteerida võll, korpus, võlli positsioonianduri kinnitus ning elektrimootori mehaanilised kinnitused. Võll ning staatori korpus tuleb saata ettevõttesse 10 nädalat peale tellimust, mille tulemusel ettevõtte koostab rootori eelnevalt saadetud võllile ning balanseerib selle. Ühtlasi koostatakse staator ja integreeritakse korpusega. Tagasi saadetakse rootor ja staator kahes osas – elektrimootori edasine koostamine tehakse ülikoolis.

Lõputöö käigus projekteeriti elektriveoajami 3D mudel realprojekteerimise tarkvaras *Catia V5*. Kokku projekteeriti 14 erinevat detaili nii elektrimootori konstrueerimiseks kui ka abivahendeid elektrimootori tootmiseks ning koostamiseks. Kuna tegemist on FSTT meeskonna esimeste ise projekteeritud mehaanilise disainiga elektrimootoritega, oli esmane eesmärk teha prototüüp elektrimootorid, mida oleks võimalik testida katsepingis. Eduka katsepingi katsetuste puhul on arvesse võetud ka võimalus sobitada antud prototüüp elektrimootorid FEST23 elektrivormelile. Sellest tulenevalt on disainitud elektrimootori kinnituspunktid ja mootori gabariitmõõdud sobituma FEST23 elektrivormeli käändmikesse, hetkel kasutusel olevate AMK-Motion elektrimootorite asemele. Mehaanilise disainimise periood jagunes 3 etappi:

- 1) Laagrisüsteemi ja laagrite valik
- 2) Võlli arvutused, analüüs ning projekteerimine
- 3) Korpuse disainimine ja elektrimootori mehaaniliste- ja positsioonianduri kinnituste projekteerimine

Kõigile projekteeritud detailidele tehti inseneri-joonised, mille põhjal toodeti detailid. Detailidele, mis saadeti Saksamaale elektrimootorite tehasesse, koostati ka mõõteraportid.

### **2.3.1 Laagrite valik**

Elektrimootori laagrite valimisel on oluline elektrimootori kasutusvaldkond. Elektrivormeli puhul on olulisemateks teguriteks: töökindlus, efektiivsus, kompaktsus ning kaal. Antud juhul ei ole laagrite eluiga oluline ning on pigem teisejärguline – laagrid

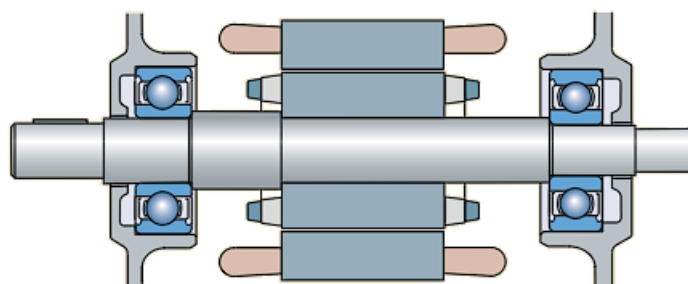
peaksid kestma maksimaalselt 3 aastat. Eelnevate aastate logide põhjal on võimalik määrata ligikaudne aastane keskmine kilometraaz ning tulenevalt sellest ka elektrimootori aastane tööaeg. Viimaste aastate maksimaalne kilometraaz jääb alla 900 km, mis teeb ligikaudseks mootori aastaseks tööajaks 15 tundi. Arvestades varuteguriga võiks laagrite eluiga olla vähemalt 90 tundi.

Elektrimootorites kasutatakse enam levinult kahe laagri süsteemi. Üks laager võlli jõuülekanne pool ning teine võlli tagaosas, kus paikneb enamasti PMSM puhul positsiooniandur. Enamlevinud laagritüübid elektriveoajamites on kuul-, silinder-, isoleeritud- ja keraamilised laagrid. Üldiselt on elektrimootorites kasutusel kuullaagrid kui suurematel ja raskematel mootoritel kasutatakse kas kahte laagrit kõrvuti või laiema laagri pinnaga laageid suuremate koormuste jaoks. [10]

Võlli positsioneerimiseks elektrimootoris on kasutusel kaks põhiliselt kasutusel olevat süsteemi: fikseeritud (inglise keeles *locating*) ja mitte-fikseeritud (inglise keeles *non-locating*) süsteem. Fikseeritud süsteem positsioneerib võlli aktsiaalsuunal. Fikseeritud süsteemis on nii laagri sisevõru kui ka välisvõru jäigalt fikseeritud. Sellises süsteemis on kasutusel laagrid, mis suudavad taluda radiaal-aktsiaal kombineeritud jõude. Sellisteks laagriteks on tavaliselt erinevat tüüpi kuullaagrid, kuid suurte aktsiaal jõudude korral kasutatakse pigem näiteks koonuslaagreid. Mitte-fikseeritud süsteem arvestab võlli termilise paisumisega aktsiaal suunas, tänu millele välditakse tekkivat lisakoormust laagritele aktsiaalsuunas. Võimalus selleks on tagumise laagri välisvõru mitte fikseerimine, vaid korpuse disainimine nii, et laagri välimine pind saaks laagripesas termilise paisumise korral vabalt liikuda. [31]

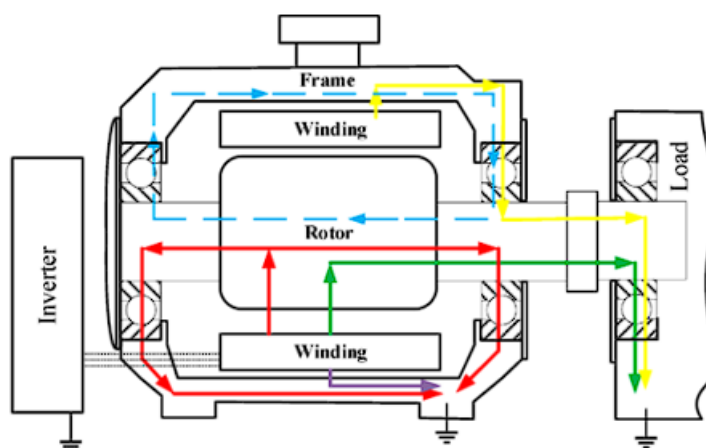
Väiksematel mootoritel, millel on lühike võll, kasutatakse tavaliselt ristfikseeritud (inglise keeles *cross locating*) süsteemi koos kahe kuullaagriga. Ristfikseeritud süsteem kujutab endast seda, et võll on fikseeritud ühe laagri poolt ühtepidi ning teise laagri poolt teistpidi aktsiaalsihis. Võlli termilise paisumisega arvestatakse laagrite lubatava aktsiaalse lõtkuga. Selleks, et vähendada mootorite poolt tekitatavat müra ning vibratsioone, kasutatakse laagritel eelpingestus (inglise keeles *preload*) süsteemi. Eelpingestus süsteem kujutab endast vedruga laagri pingestamist mitte-fikseeritud laagri välisvõrul. [31]





Joonis 2.9. Näide ristfikseeritud laagrisüsteemist väikestele mootoritüüpidele. [31]

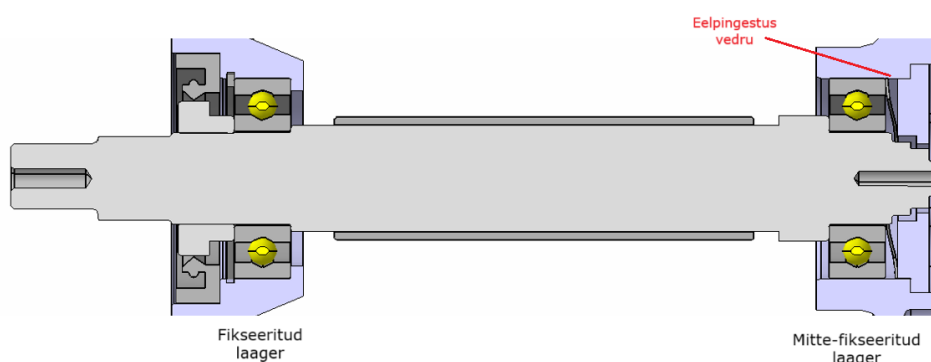
Ekstreemsed elektrimootori töötingimused nagu näiteks suur temperatuuri varieerumine, pole soodne keskkond laagritele. 30-40% pöörlevate elektrimootorite rikestest on põhjustatud laagririkestest. Laagrite suurimaks rikke põhjuseks on ebapiisav määre. Põhjuseid laagririkeks võib olla nii mehaanilisi, kui ka elektrilisi, näiteks ajamis tekkiv lekkevool. [32] Lekkevool läbi laagrite kuulide põhjustab laagri kuulide kui ka laagrivõrude pinna kahjustusi, mille tulemusel laagri eluiga väheneb, mootori müra, vibratsioon ning rikke tõenäosus suureneb. Joonis 2.10 illustreerib võimalike lekkevoolude teekonda elektriveoajamis. Probleemi ennetamiseks on erinevaid viise, millest tõhusamad ja enim kasutatavad meetodid on keraamiliste või isoleeritud laagrite kasutamine, võllile maandusharja lisamine. [33]



Joonis 2.10. Laagrite lekkevoolud vaheldiga juhitud vahelduvvoolu elektriveoajamis. [34]

Kuigi lekkevoolust põhjustatud rikete tõsidust on raske ette ennustada, kaaluti siiski riski vähendamiseks ka keraamiliste laagrite kasutamist. Keraamilised laagrid ei lase lekkevoolul liikuda läbi laagrite võllile, tänu millele paraneb elektrimootorite töökindlus. Kahjuks on sobiva temperatuuri taluvusega kaetud keraamiliste laagrite valik üsna piiratud ning tarneajad pikad.

Antud juhul projekteeritakse elektriveoajamil ülekande poolele fikseeritud laager ja tagumine laager on mitte fikseeritud. Tagumisele laagrile lisatakse eelpingestatud vedru, mille survejõud arvutatakse ning valitakse vastavalt tootja soovitudele. Laagritüübiks valitakse kuullaager, kuna tänu elektrimootori võlli suurele pöörlemiskiirusele on kuullaager sobivaim valik püstitatud eesmärke täitma. Valituks osutub SKF 6002-2Z laagrid nii ülekande poole kui ka mootori tagumisse otsa. Laagrite valimisel kasutatakse *SKF Bearing Select* kalkulaatorit. [35] *SKF* laagrikalkulaatori tulemusi verfitseeritakse *KISSsoft* programmis analüüsiga, mille tulemusel on laagri projekteeritud minimaalseks eluaeaks ligikaudu 370 tundi. Antud tulemus ei erine suuresti *SKF online* kalkulaatori tulemustest.



Joonis 2.11. Elektrimootorile projekteeritud laagrisüsteem.

### 2.3.2 Võlli projekteerimine

Elektrimootori pöörlemiskiiruse suurenedes suurenevad ka rauaskaad mootoris, mille põhjuseks on suurem sagedus. Lisaks sellele suurenevad ka resonantssagedus, vibratsioon ja müratase. Võlli materjali valikul tuleb arvestada materjali erinevate omadustega nii mehaanilisest kui ka elektromagnetilisest võtmest. Tulenevalt sellest on mõistlik kasutada püsिमagnetitega elektrimootori võlli materjalina võimalikult head mittemagnetiliste omadustega materjali. Mitte-magnetiliste omadustega võll tagab väiksema magnetvoo lekke võllile, tänu millele paraneb mootori jõudlus. Suur magnetvoo leke võllile põhjustab elektrimootoris pingekadu ning suuremaid rauaskadusid. Oluline on siiski leida materjal, mis vastaks elektrimootori rootori poolt tekitatud mehaanilistele omadustele. [28]

Tulenevalt tootja poolt esitatud joonistest võib eeldada, et elektrimootori elektromagnetilises disainis kasutatakse kodar (inglise keeles *spoke*) tüüpi rootori disaini (vt LISA 3). Püsिमagnetid paiknevad võlli peal ning on süvistatud elektrotehnilise terase – selle tulemusel on tegu süvistatud püsिमagnet rootoriga. Elektrotehnilise terase

otsi katavad balanseerimis plaadid, mis on asetatud võllie pingistuga. Rootor on balanseeritud vastavalt standardile ISO21940-11, tasemele G1.

Elektrimootori tootja poolsest võlli materjali valikust on välja pakutud roostevaba teras või titaan (TiAl4V6) sulam. Roostevaba terasena valitakse võrdluseks 304 seeria roostevaba teras (X5CrNi18-10) ja 316 seeria roostevaba teras (X5CrNiMo17-12-2). Valitud roostevabade teraste puhul ei ole suuri materjalist tulenevaid erinevusi. Suurimaks erinevuseks on paremad mittemagnetilised omadused peale töötlemist 316 seeria roostevabal terasel. Antud tabelist võib näha, et titaan on kergem, mis on ka peamine põhjus titaani kasuks valimisel (vt Tabel 2.2). Kergem võll tagab väiksema rootori kaalu ning rootori inertsmomendi. Titaani kasutamisel on mure kohaks soojusmahtuvus ning probleemseks võib osutuda ka masintöötlemise võimekus.

Tabel 2.2. Võlli materjali omadusi võrdlev tabel. [36] [37]

Materjal	Tihedus [g/cm <sup>3</sup> ]	Voolepiir [N/mm <sup>2</sup> ]	Tõmbetugevus [N/mm <sup>2</sup> ]	Elastusmoodul [Gpa]	Väsimustugevus [N/mm <sup>2</sup> ]	Pinnatugevus [HB]	Soojuspaisumise koefitsent 100°C [x10 <sup>-6</sup> /°C]	Soojusmahtuvus 100°C [W/(m·K)]	Magnetiline läbitavus [H/m]
Titaansulam (Ti-6Al-4V)	4.43	830	900	110	240	310	8.6	6.7	1.00005
Roostevaba teras (304)	7.90	600	700	193	241	149	17.2	16.3	1.02000
Roostevaba teras (316)	8.00	600	700	193	241	149	15.9	16.3	1.02000

Elektrimootori pöördemomendi edasi kandmiseks rattasse on erinevaid võimalusi. Neis enimkasutatavad liited on: kiil-, hammas-, seadekruvidega-, pressist-, polügon liides ülekanne. [38] Tulenevalt kõrgest pöörlemiskiirusest tuleks valida võlli pöördemomendi ülekandmiseks võimalikult väikese disbalansiga ja pingekonsentratsiooniga liides. Samuti peab kannatama liide erisuunalise ja tsüklilise pöördemomendi üle kandmist. Sobivaimaks liideseks valitakse hammasliide. Hammasliited on enim kasutatavad liited suurtel kiirustel pöördemomendi üle kandmiseks. Hammasliide jaoks on loodud erinevad standardid mis käsitlevad eri tüüpi liideste projekteerimise nõudeid.

Projekteerimise käigus esitati 14 eri tootjale Eestis, Soomes kui ka Kesk-Euroopas pakkumine toota DIN 5480 – W11x0.8x30°x12x7h hammasliitega elektrimootori võll. Masinapargi võimekus, oskused ning koostöö soov projekteeritud võlli toota ei olnud

kokkuvõttes ühelgi ettevõttel. Tulenevalt sellest otsustati võlli projekteerida lihtsamini toodetavale polügon P3G liitele, vastavalt standardile DIN 32711-1.



Joonis 2.12. Titaansulamist elektrimootori võllid enne Saksamaa tehasesse saatmist

Liite läbimõõdu võimaliku kasutusvahemiku määrab rootori koostamise piirangud, valitud laager ning FEST23 vormelil kasutatav ülekanne. Tulenevalt sellest tuli teha arvutused võlli kõige suurema nihkepingega, ehk väiksema diameetriga osale – liidesele. Arvutused kahe erineva liite minimaalse diameetriga võllile on tehtud valemis (2.13). Arvutuste valideerimiseks ning täpsemateks tulemusteks ehitati üles programmis *KiSSsoft* võlli analüüs, kus analüüsiti võlli läbipaindeid, pinget ja varutegurit arvutuslike tulemustega. Tulemuste verifitseerimiseks kasutati liidese mehaaniliseks analüüsiks programmi *Ansys*.

Esmalt sooritati lihtsustatud arvutus 10.8 mm diameeteiga võlli polügon liite nihkepinge leidmiseks:

$$\tau_t = \frac{16 \cdot T \cdot K_s \cdot 1000}{\pi \cdot D^3} = \frac{16 \cdot 30 \cdot 2 \cdot 1000}{\pi \cdot 10.8^3} = 242.6 \text{ N/mm}^2, \quad (2.13)$$

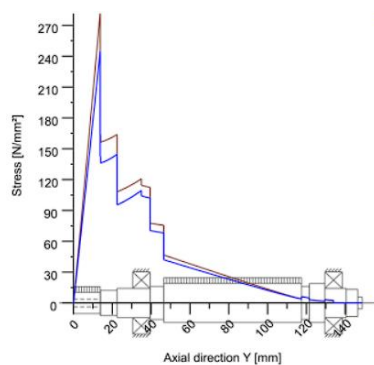
kus  $\tau_t$  – nihkepinge [N/mm<sup>2</sup>],

$K_s$  – varutegur,

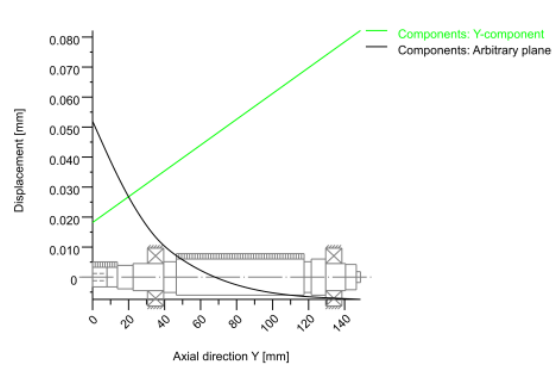
$D$  – võlli diameeter [mm].

Järgnevalt sooritatkase arvutus 9.8 mm diameetriga võlli hammasliite nihkepinge leidmiseks ning saadakse tulemuseks 324.7 N/mm<sup>2</sup>.

Arvutuslike tulemuste verifitseerimiseks ehitati üles programmis *KISSsoft* võlli mudel hammasliitega võllile. Mudeli analüüsi tulemuseks on võlli maksimaalne pinge 244.7 N/mm<sup>2</sup> liite võlli pool ääres ning maksimaalne läbipaine 0.052 mm, mida võib ka näha joonistelt 2.13 ja 2.14. Võlli läbipaindel arvestati võlli liitele mõjuvaks jõuks  $F_x = 300$  N ja  $F_z = 100$  N, mis on üsna tugevasti üle dimensioneeritud jõud – oluliseim on siiski töökindlus. Tulenevalt võllile mõjuvate jõudude üle dimensioneerimisest ning matejali voolepiirist, tundub üle 3 kordne varutegur võllile piisav. Sellest olenemata on vaja teha eraldi analüüsid ka liitele programmis *Ansys*.



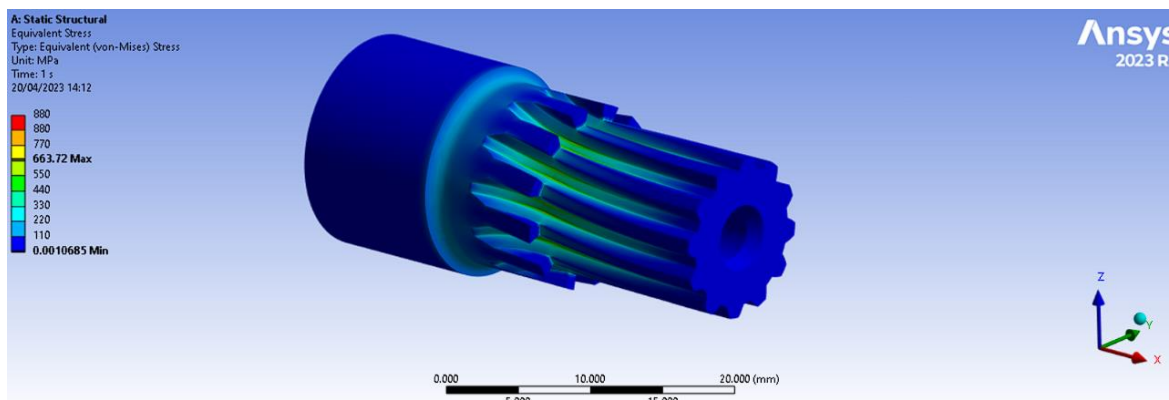
Joonis 2.13. Pinge jaotumine võllil, programmis *KISSsoft*



Joonis 2.14. Võlli deformatsioon, programmis *KISSsoft*

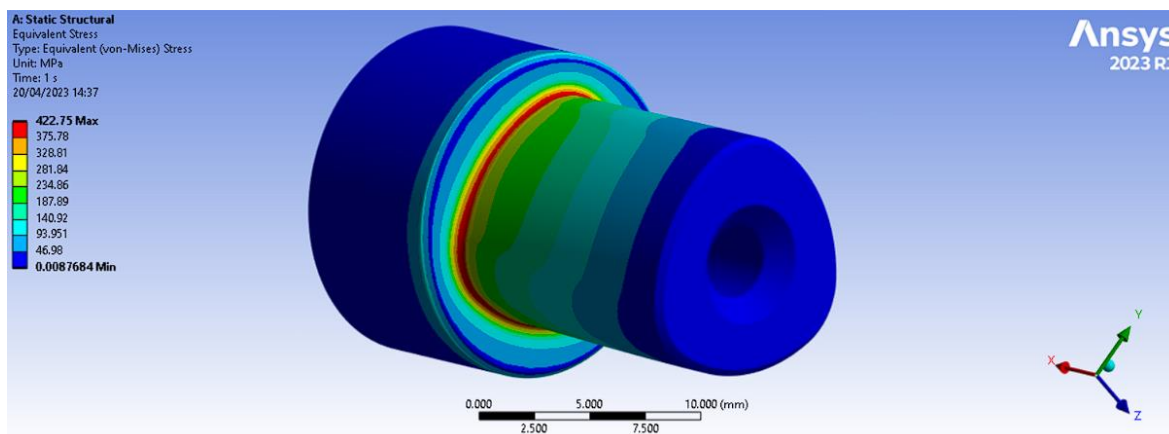
Nagu *KISSsoft* analüüsi tulemustest näha võib, suureneb pinge kontsentratsioon hüppeliselt just liite võlli poolses üleminekus. Täpsema geomeetria analüüsimiseks ning pinge kontsentratsiooni vähendamiseks otsustati teha võlli liite ning liite üleminekule pinge ja varuteguri analüüs programmis *Ansys - static structural* keskkonnas. Esmalt

analüüsiti DIN 5480 – W11x0.8x30°x12x7h hammasliite geometriat, mille tulemusel saadi maksimaalseks pingeks 663.7 N/mm<sup>2</sup>, varuteguriga 1.4 (vt. Joonis 2.15).



Joonis 2.15. Pingete jaotus simulatsioon hammasliitel programmis Ansys.

Ühtlasi koostati ka analüüs P3G polügonliite modifitseeritud liitele, millele lisatud liite serva raadius, vähendamaks tekkivat pinget liite võlli poolses servas. Raadiuse lisamisel servale parandas pinge kontsentratsiooni tekkimise probleem märgatavalt (vt Joonis 2.16). Maksimaalseks pingeks 422.8 N/mm<sup>2</sup>, mis teeb varuteguriks 2.2.

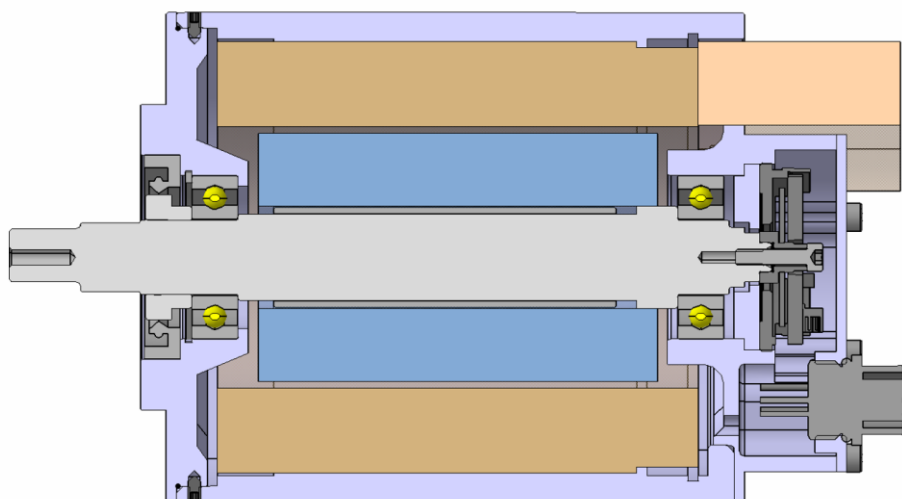


Joonis 2.16. Pingete jaotus simulatsioon polügon liitel programmis Ansys.

Valmis kujul elektrimootori võllid on nähtavad joonisel 2.12.

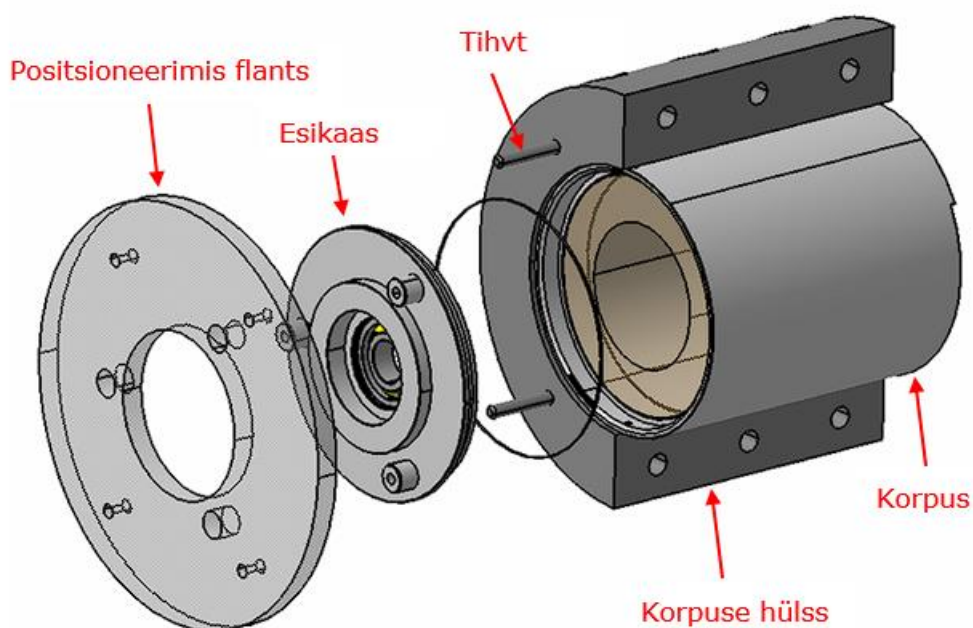
### 2.3.3 Korpuse projekteerimine

Elektrimootori korpus koosneb kolmest detailist: korpus, esikaas ja tagakaas. Korpuse sisse paigutub staator. Esikaas ja tagakaas on võlli laagrite kinnitavad elemendid. Esikaas kinnitub korpuse külge pingistu ning fikseerivate seadekruvidega. Tagakaas kinnitub korpuse külge kuue DIN 912 poldiga. Esikaane ja korpuse vaheliseks tihendamiseks on kasutatud O-rõngast, võlli ja esikaane tihendamisel kasutatakse simmerlingi.



Joonis 2.17. Prototüüp elektrimootori läbilõige.

Nii staatori korpusesse kinnitamiseks kui ka hilisemaks elektrimootori koostamiseks on vaja projekteerida korpusele välimine hülss. Välimine hülss on hilisemal koostamise protsessil oluliseim abivahend elektrimootori koostamisel. Hülss projekteeritakse kahe osalisena kinnituma omavahel kuue DIN 912 poldiga.



Joonis 2.18. Näide esikaane pressimisest elektrimootori korpuse külge koos vajalike abinõudega.

### 2.3.4 Positsiooniandur

FEST23 elektivormeli elektri-veomootor kasutab elektrimootori elektrilise nurga positsioneerimiseks enkooderit. Tulenevalt võimalusest kasutada mootorite juhtimiseks

FEST23 AMK-Motion kontrolleri, võetakse kasutusele sama tüüpi enkooder (HEIDENHAIN ECI-1118). Enkooderi kinnitusviisi elektrimootoris võib näha LISA 4.

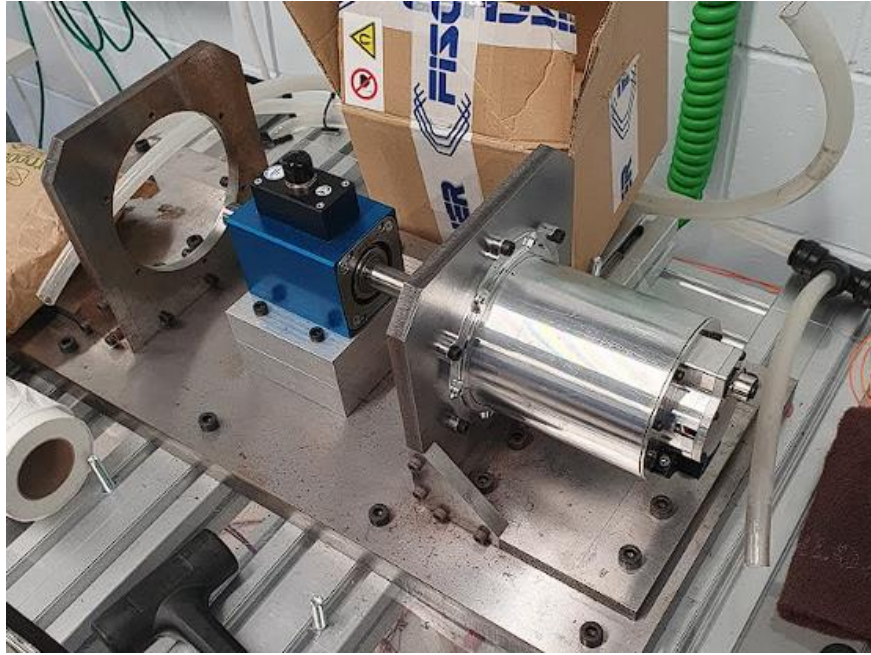
Tulenevalt vajadusest kasutada tulevikus ise-arendatud inverterite testimiseks resolverit, projekteeritakse sama elektrimootor sobituma ka resolveriga. Sobivaks resolveri tüübiks valitakse TE V23401-S1001-B110. Antud valiku tegemisel on määravaimaks asjaoluks, lihtsaimini integreeritavam lahendus. Samuti säilib ka vajadusel enkooderi kasutamise võimalus ning resolveri kinnitamise meetodikast elektrimootori korpuses võib näha LISA 5.

### **2.3.5 Katsepink**

Katsepingi projekteerimine koostati eelneval hooajal tiimi siseselt, mille tulemusel valmis Tanel Tammeveski magistritöö. [39] Projekteerimistöö käigus võeti arvesse ka vajadust katsetada tulevikus erinevaid mootoreid kasutusel olevatest AMK-Motion elektrimootoritest. Tulenevalt sellest on prototüüp elektrimootorite katsepingiga ühendamiseks vaja ümber projekteerida katsepingi kolm detaili: elektri-veomootori kinnitusflants, ülekande liidespuks ja jahutuskorpus. Projekteerimine kui ka tootmine teostatakse tiimi siseselt.

Katsepingis elektrimootorite testimisel kasutatakse kahe elektrimootoriga süsteemi, kus üks elektrimootor töötab generaatori talituses ning teine elektrimootori talituses. Kahe elektrimootori vahel on sidurid, paigaldusest tulenevate kõrvalekallete kompenseerimiseks. Sidurite keskel on pöördemomendi sensor, mis mõõdab võlli pöördemomenti. Selle tulemusel on võimalik arvutada täpne mehaaniline energia elektrimootori võllil. Antud testimis meetodit nimetatakse inglise keeles *back-to-back* testimise meetodiks.

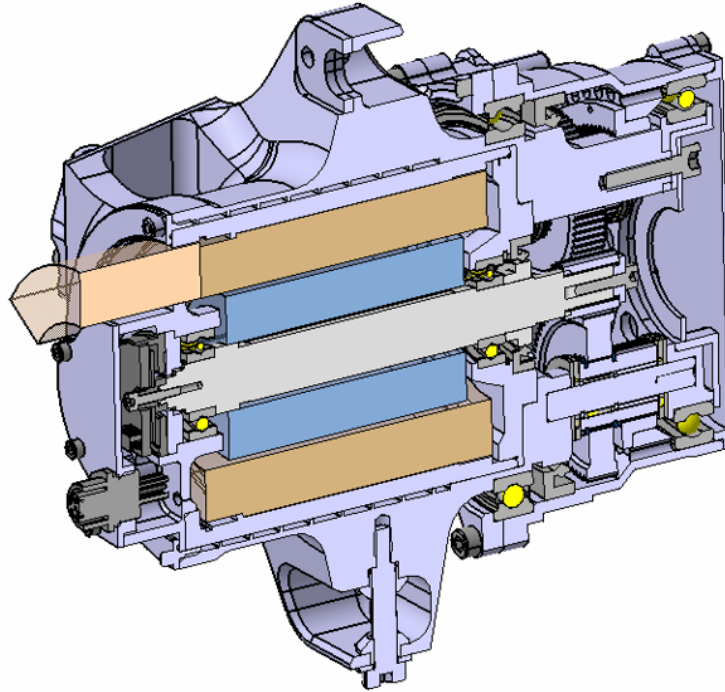




Joonis 2.19. Prototüüp elektrimootori esimene rakistamine katsepinki.

### 2.3.6 Tootmine ja koostamine

Projekteerimisetöö käigus töötati läbi üsna suures mahus teooria materjale ja dokumentatsiooni. Projekteerimisetöö sai alguse 2022 sügisel ning lõppes 2023 aasta kevadel. Poole aasta jooksul valmisid 3D mudelid erinevatest mehaanilistest konseptsioonidest. Samuti tehti erinevatele kriitilistele elektrimootori osadele arvutused ja arvutuste verifitseerimiseks analüüsid programmis *KISSsoft* ja *Ansys*. Elektrimootori projekteerimise käigus valmis 14 erineva detaili 3D mudel ning insenerijoonis, mille tulemusel toodeti detailid, Eesti ettevõtete või Tallinna Tehnikakõrgkooli masinapargis tiimi liikmete poolt. Toodetud võll, korpus ning korpuse hülss saadeti Saksamaa Fischer-Elektromotoren tehasesse, kus koostati elektrimootori rootor ja staator. Elektrimootori võllile ja korpusele koostati mõõteraportid. Elektrimootori rootori ja staatori koostamine üheks tervikuks, teostati ülikooli ruumides. Elektrimootori koostamise lihtsustamiseks koostati 12 leheküljeline juhise dokument.



Joonis 2.20. FEST23 nurgakoostu läbilõige koos projekteeritud Fischer Elektromotoren elektrimootoriga.

Antud töö tulemusel valmisid FS Team Tallinn esimesed prototüüp Fischer Elektromotoren TI085-052-070-04B7S-07S04BE2 püsिमagnet sünkroonmootorid.

## 3. KATSETAMINE

### 3.1 Mootori funktsionaalsuse katsed

Selleks, et oleks võimalik elektrimootoreid katsetada tuleb esmalt veenduda koostatud elektrimootorite korrasolekus. Tulenevalt sellest sooritatakse enne elektrimootori parameetrite teste rida eel-teste, veendumaks elektrimootori ohutus toimimises. Peale eel-katsetusi elektrimootoriga ning mõõdetud andmete analüüsi otsustatakse, kas elektrimootorit võib koormata ka maksimaalsel koormusel ning pöörlemis kiirustel. Elektrimootori sobivas korrasolekus on võimalik teha erinevaid teste, mis defineerivad olulised elektrimootori parameetrid, jõudluse ning funktsionaalsuse, mis on sisendiks juhtimis algoritmi täpsemaks muutmisel.

Elektrimootoritele kehtivad standardid testimisel:

- IEC 60034-1: 2010 Rotating electrical machines – Part 1: Rating and Performance.
- IEC 60034-2-1: 2014 Rotating electrical machines – Part 2-1: Standard methods for determining losses and efficiency from test (excluding machines for traction vehicles).
- IEC 60034-4: 2008 Rotating electrical machines – Part 4: Method for determining synchronous machines quantities from tests.
- IEC 60034-19: 2014 Rotating electrical machines – Part 19: Specific test methods for DC machines on conventional and rectifier-fed supplies.
- IEC 60034-29: 2008 Rotation electrical machines – Part 29: Equivalent loading and superposition techniques – indirect testing to determine temperature rise.
- EVS-EN 60349-4: 2013 Electric traction – Rotating electrical machines for rail and road vehicles – Part 4: Permanent magnet synchronous electrical machines connected to an electronic converter

Antud juhul ei kehti enamusi antud standarditest testitavale püsimagnetitega sünkroonmootorile, seega testimisel neid arvesse ei võeta. Antud juhul on siiski võimalik mõningaid nüansse rakendada ka PMSM testimisel. Põhiliseks standardiks, mida võtta alusesks on IEC 60034-1:2010 ja EVS-EN 60349-4: 2013.

### **3.1.1 Maandustakistuse ja isolatsioonitakistuse mõõtmine**

Peale elektriveoajami koostamise protsessi ja visuaalset kontrolli tehti elektrimootorile maanduse ning isolatsiooni kontroll. Antud kontroll tagab kindlustunde, et elektrimootori koostamisel ei ole tekkinud defekte ning elektrimootori mähise isolatsioon ei ole saanud kahjustada. Isolatsiooni kahjustuse korral võib tõenäoliseks tulemuseks olla lühis mootori korpuse ja mähise vahel. Samuti võivad olla omavahel lühises elektrimootori faasid.

Elektrimootori omavaheliste osade maandustakistuse väärtusi kontrolliti milli-oommeetriga GOSSEN METRAWATT METRAHIT 27 I. Tulemused jäid alla  $0.2 \Omega$  takistuse mida loeti sobivaks tulemuseks.

Andmelehel on defineeritud elektrimootori maksimaalne alalisvoolu pinge  $600 V_{DC}$ . Tulenevalt sellest valiti konstantseks pingeks  $500 V_{DC}$ . Isolatsioonitest sooritati seadmega GOSSEN METRAHIT IM XTRA milli-oommeetriga täpsusklass  $0.15 \%$  ning tulemuseks saadi keskmiseks väärtuseks  $2.385 M\Omega$ .

### **3.1.2 Mähise takistuse mõõtmine**

Mähise takistuse mõõtmine sooritatakse valideerimaks andmelehes olevat väärtust. Mähise takistuse mõõtmisel kõrge takistuse avastamine võib viidata katkisele mähisele näiteks mähistraatide omavaheline kokku keevitumine. Samuti võib viidata takistuse väärtuste liigne varieerumine faaside vahel, mähise vigastustele. Mähise takistust mõõdedakse milli- oommeetriga GOSSEN METRAHIT IM XTRA täpsusklass  $0.15 \%$ . Oluline on sooritada mõõtmised samal temperatuuril, kuna takistuse väärtus sõltub mähise temperatuurist eelnevalt käsitletud valemi (3.6) alusel.

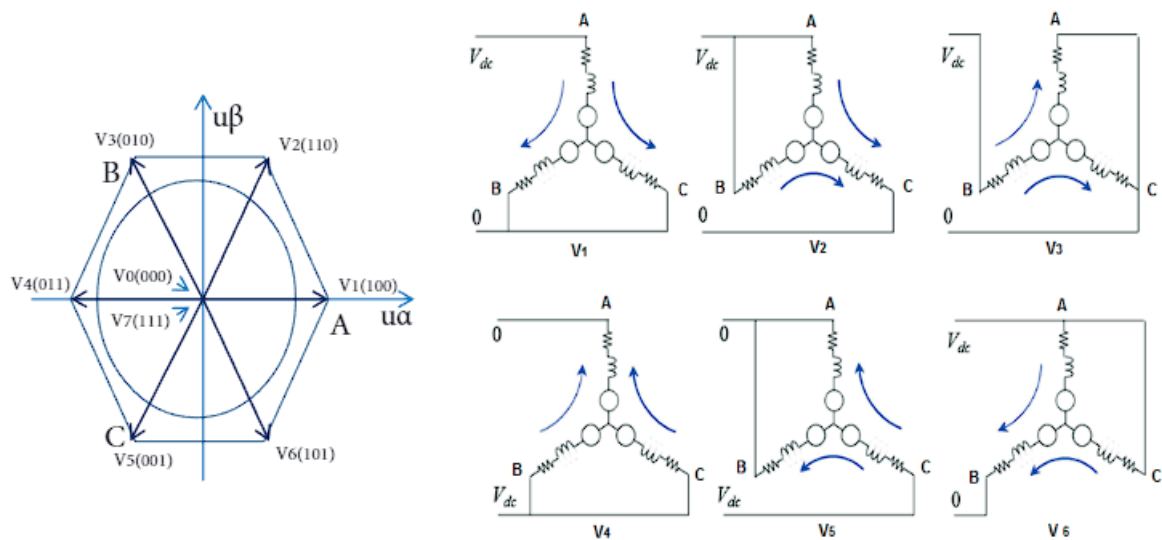
Mõõtmised sooritati milli-oommeetriga GOSSEN METRAHIT IM XTRA. Täpsemate tulemuste saamiseks kasutati mõõtmisel Kelvini nelja juhtmega ühendusviisi, mis kompenseerib mõõtejuhtmete takistust. Mõõtmised sooritati  $19.2 \text{ }^\circ\text{C}$  ning keskmiseks tulemuseks  $0.120 \Omega$ . Andmelehel esitatud mähise takistuse väärtus on esitatud temperatuuril  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  ja väärtuseks  $0.126 \Omega$ .

### **3.1.3 Enkooderi nurga nullimise protsess**

Tulenevalt esmaselt valituks osutunud enkooderi kasutamisest tuleb enne elektrimootori vaheldiga ühendamist määrata ära enkooderi ja rootori elektriline nurk ehk erinevus enkooderi ja rootori elektrilise nurga vahel. Selleks on üldiselt kaks lihtsat võimalust. Kui nurk rootori elektrilise positsiooni ja enkooderi vahel on teada, saab seda sisestades määrata. Teine võimalus, kui nurk teada ei ole võib kasutada meetodit, kus

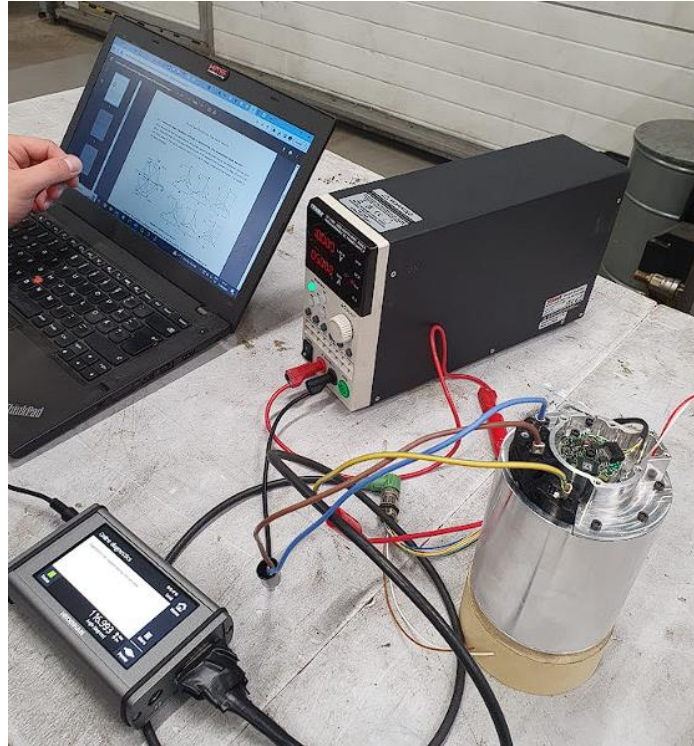
rootor fikseeritakse null asendis ning sooritatakse enkooderi seadmega nullimise protsess (inglise keeles *datum shift*).

Kirjanduses on käsitletud mootori elektrilise nurga tuvastamiseks erinevaid meetodeid ning viise sõltuvalt positsioonianduri tüübist ning elektrimootorist. Antud juhul tehakse nullimise protseduur faasi lühistamise meetodi kohaselt. Faasilühistamise meetodeid on erinevaid ning valituks osutub  $V_3 = \{0, 1, 0\}$  ja  $V_1 = \{1, 0, 0\}$  vooluvektori meetod. Antud juhul ühendatakse esmalt elektrimootor  $V_3$  vooluvektori konfiguratsiooni, kus rootor keerab end B faasi. Peale seda ühendatakse elektrimootor  $V_1$  konfiguratsiooni, mille tulemusel liigub rootor A faasi. Kui rootor on algselt B negatiivses või positiivses faasis, ei pruugi rootor liikuda. Kui peale seda lisada teine vooluvektor peab rootor liikuma. Parema protsessi kontrollimiseks võib vahepeale lisada ka  $V_2$  konfiguratsiooni. [40]



Joonis 3.1. Võimalikud vooluvektorid. [40]

Selleks, et mõõta enkooderi nurka ning seda ka nullida vastavalt rootori elektrilisele nurgale kasutatakse seadet HEIDENHAIN PT100. Esmased nullimised tehakse väikese voolu ja pinge juures, mille puhul jälgitakse PT100 seadme stabiilset nurga näitu.



Joonis 3.2. Enkooderi nullimise protseduur seadmega HEIDENHAIN PT100.

### 3.1.4 Esimesed elektrimootori katsed testpingis

Esimene test faasijuhtmete pingevaheldiga ühendamisel tehti ilma koormuseta ühele mootorile testpingis. Eelnevalt sisestatakse mootori andmelehel leitavad mootori parameetrid kontroll algoritmi. Testimise eesmärgiks oli jälgida elektrimootori parameetreid ning käitumist. Peale edukaid katseid ühendatakse elektrimootorile koormus teise elektrimootori näol.

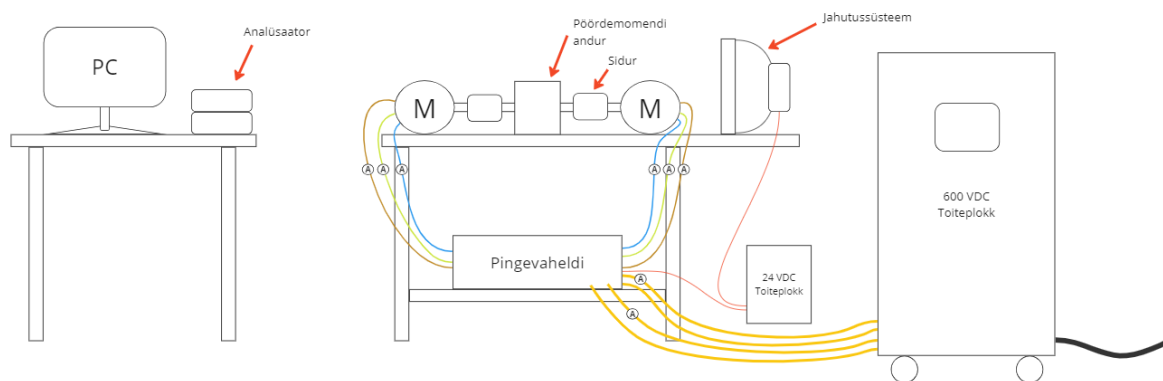
Esimese koormustesti eesmärk on näha mootori käitumist koormuse olukorras. Tulemusi analüüsida, parandada kontrolleri seadistust. Oluline oli jälgida ka temperatuure ning kuulata kõrvaga, ega ei kostu ühtegi kahtlast heli, mis viitaks mehaanilistele vigastustele. Edukate testtulemustest korral saab esmalt valideerida enkooderi nurga seadistust ning mootori parameetreid. Peale elektrimootori parameetrite leidmist katselisel teel, saab teha parema kontrolleri seadistuse, mille põhjal sooritatakse katsed elektrimootori efektiivsuskaardi loomiseks ning jõudluse määramiseks. Elektrimootori parameetrite leidmiseks tehakse katseid ning valideeritakse tulemused, mida võrreldakse nii tootja poolsete andmete, kui ka eelneval hooajal tehtud testidega AMK-Motion tootja elektrimootoriga. Parameetrite verifitseerimist käsitleb järgnev peatükk.

## 3.2 Elektrimootori parameetrite testid

Täpsemaks mootori kontroll algoritmi seadistamiseks sooritati mootori parameetrite testid, et leida täpsemad väärtused ning kinnitada tootja poolt esitatud andmelehe parameetreid. Testimise teel saadud andmeid võrreldakse tootjapoolse andmelehel esitatuga. Sellest tulenevalt testitakse ainult olulisemaid parameetreid, mis määravad elektimootori jõudluse ja efektiivsuse.

### 3.2.1 Katseseadmed

Katsesete läbiviimisel kasutati peatükis 2.3.5 kirjeldatud katsepinki. Katsepingis on võimalik teha üksikule elektrimootorile teste ühendades lahti elektrimootori võlli ja pöördemomendi anduri vaheline sidur. Mootorite juhtimine toimub läbi pingevaheldi, mis saab oma juhtsignaalid läbi keskkontrolleri CAN liini. Keskkontrollerit juhitakse läbi arvuti (PC) ning tiimi siseselt arendatud testpingi liidesprogrammi. Liidesprogrammist on võimalik sisestada soovitud seadeväärtuseid või jälgida vaheldi poolt edastatud informatsiooni läbi CAN suhtluse.



Joonis 3.3. Katseseadmeid visualiseeriv näidis skeem.

Kuna pingevaheldi nõuab sisendina nii 600 V<sub>DC</sub> kui ka juhtloogika jaoks 24 V<sub>DC</sub> toitepinget, siis kasutatakse toiteplokkina CENERGIA B2C+30 toiteplokki. Toiteplokk on regeneratiivne ning iga kanal on eraldiseisvalt seadistatav. Suhtlus toiteploki ja PC vahel toimub läbi Ethernet protokollini ning mugavamaks toiteploki seadistamiseks on olemas ka liidesprogramm. Kuna jahutussüsteemi ventilaatorid ja pump ning pingevaheldi vajavad ka madalpinget 24 V<sub>DC</sub>, kasutatakse madalpinge toiteplokki eraldi vajalike seadmete toitmiseks.

Anduritena on kasutusel pöördemomendiandur Lorenz Messtechnik DR-2643 andur. Anduri maksimaalseks lubatavaks pöördemomendiks on 30 Nm, täpsusklass 0.1 %. Vooluanduritena on kasutusel koormatava mootori elektrilistel ühendustel Signaltec

CT100 andurid, täpsusklass maksimaalselt 0.2 %. Koormusmootori voolu mõõtmisel kasutatakse FLUKE i400s ampertange täpsusklassiga 2 % + 0.04 A. Pinget mõõdetakse nii vahelduvvoolu poolel kui ka alalisvoolu poolel. Temperatuuri mõõtmisel lähtutakse vaheldi ja elektrimootori sisestest temperatuurianduritest. Võlli pöörlemiskiirust mõõdab enkooder. Kogu sensoritega mõõdetud info salvestatakse analüsaatoriga Dewesoft SIRIUS HS.

### 3.2.2 Vastuelektromotoorjõu konstant $K_e$

Elektrimootori mähise juhtidesse indutseeritud pinge pöörleva magnetvälja korral on defineeritud, kui elektrimootori vastuelektromotoorjõud  $V_{bemf}$  ja on otseselt seotud rootori pöörlemiskiirusega. Tulenevalt sellest on vastuelektromotoorjõu konstant defineeritud kui vastuelektromotoorjõu  $V_{bemf}$  keskväärtsus ja pöörlemiskiiruse  $\omega$  suhe [V/(rad/s)] ning avaldub valemis (3.1). [10]

$$K_e = \frac{V_{bemf}}{\omega}, \quad (3.1)$$

kus  $V_{bemf}$  – vastuelektromotoorjõud [V].

Püsimagneti remanantsus (ehk magnetilise induksiooni intensiivsus) sõltub temperatuurist. Sellest tulenevalt varieerub vastuelektromotoorjõu konstant  $K_e$  vastavalt magneti temperatuurile lineaarselt. Tüüpiline Nd-Fe-Br tüüpi magneti temperatuuri koefitsent  $\alpha_{(Nd-Fe-B)}$  on ligikaudu 0.001/°C, mis tähendab 100 °C temperatuuri tõusmisel 10 % vastuelektromotoorjõu vähenemist. Vaelm (3.2) näitab temperatuuri seost [22]

$$K_e(T) = K_e(T_0)[1 + \alpha(T - T_0)]. \quad (3.2)$$

Vastuelektromotoorjõu leidmisel tuleb elektrimootori faasid ühendada elektriliselt lahti. Antud juhul on katsetatav mootor ühendatud mehaaniliselt läbi teise elektrimootori generaatori reziimi, mis pöörleb konstantsel kiirusel. Sellise talituse korral on võimalik näha, kui mitu volti pöörlemiskiiruse kohta elektromootor toodab. Vastuelektromotoorjõud on temperatuurist sõltuv, sellest tulenevalt on vaja hoida katse ajal temperatuur stabiilne. Pöörlemiskiirust mõõdetakse elektrimootori korpusesse paigaldatud enkooderiga. Temperatuuri mõõtmine toimub läbi elektrimootori temperatuuri anduri. Mõõdetud liini voolude tulemused peale Fourier-analüüsi ja vastuelektromotoorjõu konstant on avaldatud tabelis 3.1.



Tabel 3.1. Katselisel teel saadud  $K_e$  tulemused.

Pöörlemiskiirus [rpm]	$\omega$ [rad/s]	$U_{12}$ [V <sub>rms</sub> ]	$U_{23}$ [V <sub>rms</sub> ]	$U_{31}$ [V <sub>rms</sub> ]	$K_e$ [V <sub>rms</sub> /(rad/s)]
1000	104.72	30.7	29.0	25.2	0.270
2000	209.44	53.2	52.8	52.6	0.252
3000	314.16	79.8	79.6	79.4	0.253
4000	418.88	106.4	106.6	106.0	0.254
5000	523.60	132.9	132.7	132.2	0.253
6000	628.32	159.4	159.1	158.7	0.253
7000	733.04	185.9	185.7	185.2	0.253
8000	837.76	212.4	212.0	211.4	0.253
9000	942.48	239.1	238.5	237.9	0.253
10000	1047.20	265.6	265.0	264.3	0.253
11000	1151.92	292.0	291.4	290.6	0.253
12000	1256.64	318.6	317.9	316.9	0.253
13000	1361.36	345.0	344.3	343.3	0.253

Nagu tabelist 3.1 näha on vastuelektromotoorjõu konstant kindlal temperatuuril (20 °C) üsna konstantne väärtus. Tabelis esitatud 1000 rpm pöörlemiskiiruse väärtus erineb teistest märgatavalt ning tuleneb madalal pöördel tekkivast pinge siinuse kujust, mis ei ole nii ühtlane, kui suurematel pöörlemiskiirustel. Katsete keskmiseks vastuelektromotoorjõu konstandi väärtuseks saadi 0.254, mis erineb tabelis esitatud väärtusest 0.296.

### 3.2.3 Pöördemomendi konstant $K_t$

Sarnaselt vastuelektromotoorjõu konstandile on ka pöördemomendi konstant oluline osa elektrimootori jõudluse määramisel. Pöördemomendi konstant  $K_t$  avaldub võlli mehaanilise pöördemomendi  $T$  ja elektrimootori sisendvoolu  $I_{rms}$  suhtena [Nm/A] valemis (3.3). Oluline on ka märkida, et ka pöördemomendi konstant  $K_t$  allub valemis (3.2) esitatud lineaarsele seosele [10]

$$K_t = \frac{T}{I_{rms}}. \quad (3.3)$$

Pöördemomendi konstandi määramiseks on vaja ühendada mehaaniliselt testitava elektrimootoriga teine elektrimootor. Mõõtes võlli pöördemomendi ja testitava elektrimootori faasi voolusid, on võimalik arvutada elektrimootori konstant erinevatel pöörlemiskiirustel. Esmalt määdetakse vajalikud suurused elektrimootori nominaalparameetritel ning tabelis 3.2 arvutatakse tulemuste põhjal pöördemomendi konstandi keskvaartus.

Tabel 3.2. Katselisel teel leitud  $K_t$  väärtused.

Kiirus [rpm]	Pöördemomendi seadeväärtus [Nm]	Mõõdetud pöördemoment [Nm]	Mõõdetud faasivool [ $I_{rms}$ ]	$K_t$ [Nm/ $I_{rms}$ ]	$K_t$ keskvärtus [Nm/ $I_{rms}$ ]
10000	12	12.2	32.3	0.376	<b>0.356</b>
10000	13	12.9	34.8	0.370	
10000	14	13.6	37.3	0.365	
12000	12	11.5	32.8	0.350	
12000	13	12.2	35.2	0.348	
12000	14	13.0	37.8	0.344	
14000	12	12.5	35.3	0.355	
14000	13	13.2	37.9	0.349	
14000	14	13.9	40.6	0.344	

Tabelist 3.2 võib näha, et pöördemomendi konstandi puhul ei ole varieerumine suur ning tulemused on üsna sarnased. Suurima ja vähima väärtuse vahe on 0.032. Madalamal pöörlemiskiirusel on tulemused paremad, ning andmelehe nominaalparameetritele lähim tulemus 12000 rpm, 12 Nm seadesväärtuse korral on tulemuseks 0.350. Soovitud tulemus jääb alla andmelehel esitatud tulemusele 0.492 Nm/ $I_{rms}$ .

### 3.2.4 Elektrimootori konstant $K_M$

Elektrimootori konstant  $K_M$  on defineeritud kui pöördemomendi konstandi  $K_t$  ja võimsuse kao ruutjuur  $P_{kadu}$  suhe, mis avaldub kolme faasilise vahelduvvoolu elektrimootori puhul valemis (3.4). Elektrimootori konstant  $K_M$  näitab elektrimootori võimet muundada elektrilist võimsust mehaaniliseks võimsuseks. Mida suurem on  $K_M$  väärtus, seda efektiivsemalt suudab elektrimootor pöördemomenti tekitada [10]

$$K_M = \frac{T}{\sqrt{I^2 \cdot R}}. \quad (3.4)$$

Elektrimootori konstant  $K_M$  on andmelehel esitatud elektrimootori nominaalparameetritel, kuid võib erineda oluliselt erinevatel pöördemomentidel ning kiirustel. Kuna elektrivormeli ülekanne on projekteeritud töötama kestvussõidu ajal maksimaalselt elektrimootori nominaalparameetritel, mõõdetakse elektrimootori konstanti nominaalparameetritel. Samuti annab nominaalparameetritel mõõtmine võrdlusmomenti andlehe ja mõõtetulemuste vahel.

Tabel 3.3. Katselisel teel leitud  $K_M$  väärtused.

Kiirus [rpm]	Pöördemomendi seadeväärtus [Nm]	Möödetud pöördemoment [Nm]	Möödetud kadu [W]	$K_M$	$K_M$ keskvärtus	
10000	12	12.2	797.2	0.428	0.421	<b>0.378</b>
10000	13	12.9	930.5	0.421		
10000	14	13.6	1059.2	0.416		
12000	12	11.5	987.7	0.365	0.369	
12000	13	12.2	1097.7	0.369		
12000	14	13.0	1219.0	0.372		
14000	12	12.5	1164.5	0.342	0.343	
14000	13	13.2	1309.2	0.344		
14000	14	13.9	1494.8	0.342		

Tabelist võib näha, et mootori konstandi väärtus ei sõltu suurel määral pöördemomendi väärtusest samal kiirusel. Näiteks 14000 rpm puhul on pöördemomendi erinevus 1.5 Nm, kadude erinevus 330.3 W, mille puhul mootori konstant  $K_M$  erineb 0.005 võrra. Igat seadepunkti mõõdeti kolm korda ning tulemus keskmestati, et saada võimalikult usaldusväärne tulemus. Nominaalparameetritele kõige lähemal mõõdetud punkt on 12000 rpm 12 Nm, mille korral on  $K_M$  väärtus 0.365, mis erineb andmelehel esitatud tulemusest 0.447.

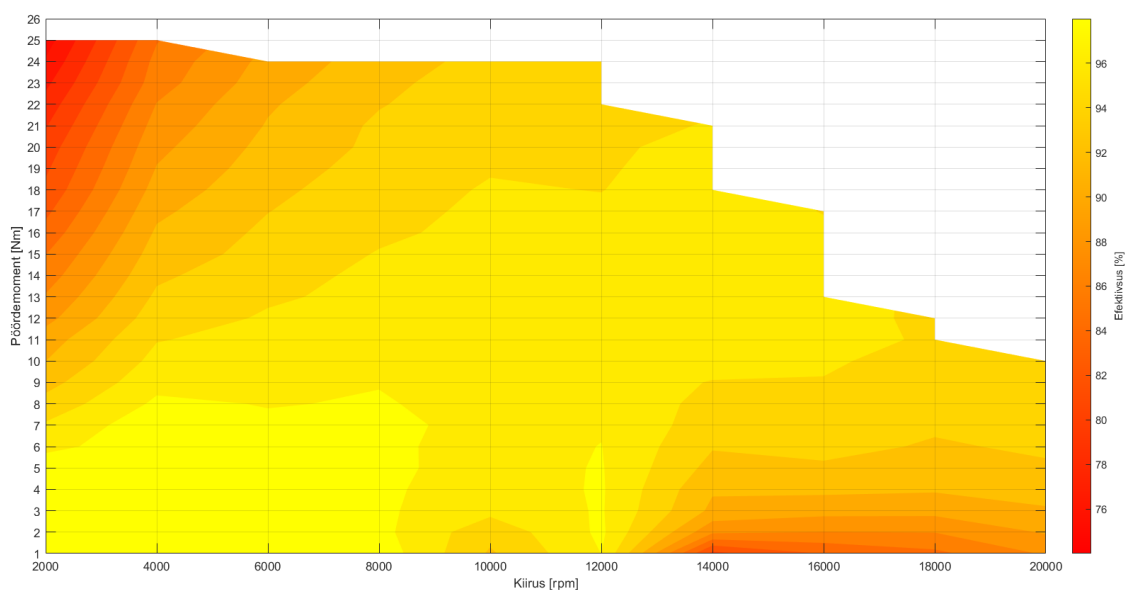
### 3.2.5 Efektiivsuskaart

Elektrimootori efektiivsust on võimalik leida mitmel meetodil. Kaudne ja ebatäpsem meetod, kus efektiivsus leitakse läbi elektrimootoris tekkivate kadude. Kadusi elektrimootoris saab ennustada eelnevate koormuseta testide alusel. Siiski on meetod üsna ebatäpne ning parem on leida efektiivsus otsesel mõõtmisel. Efektiivsus  $\eta$  avaldub elektrimootoris sisse pandud elektrilise võimsuse  $P_{in}$  ja välja võetud mehaanilise võimsuse  $P_{out}$  suhtena valemis (3.5)

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}}. \quad (3.5)$$

Tulenevalt sellest kasutatakse mehaanilise võimsuse mõõtmiseks vällilt pöördemomendi andurit ning sisse pandava elektrilise võimsuse leidmiseks voolu ja pinget. Efektiivsuskaardi koostamisel hoitakse elektrimootori temperatuur võimalikult stabiilne, ehk  $30 \pm 1$  °C. Elektrimootori temperatuur valitakse turvalisuse kaalutlustel madalam, et kindlasti mitte ületada lubatud temperatuuri piiri ning valideerida jahutussüsteemi toimivust. Samuti on olemas võrdlusmoment eelnevalt kasutusel olnud elektrimootoritega, samadel parameetritel katseliselt saadud tulemustega. Mähise

temperatuuri mõõtmine toimub elektrimootori sisse ehitatud PT1000 temperatuuri anduri kaudu. Mõõtmised on sooritatud 550 V<sub>DC</sub> pingevaheldi sisendpingel, mis on keskmine elektrivormeli akupaki pinge kestvussõidu vältel.

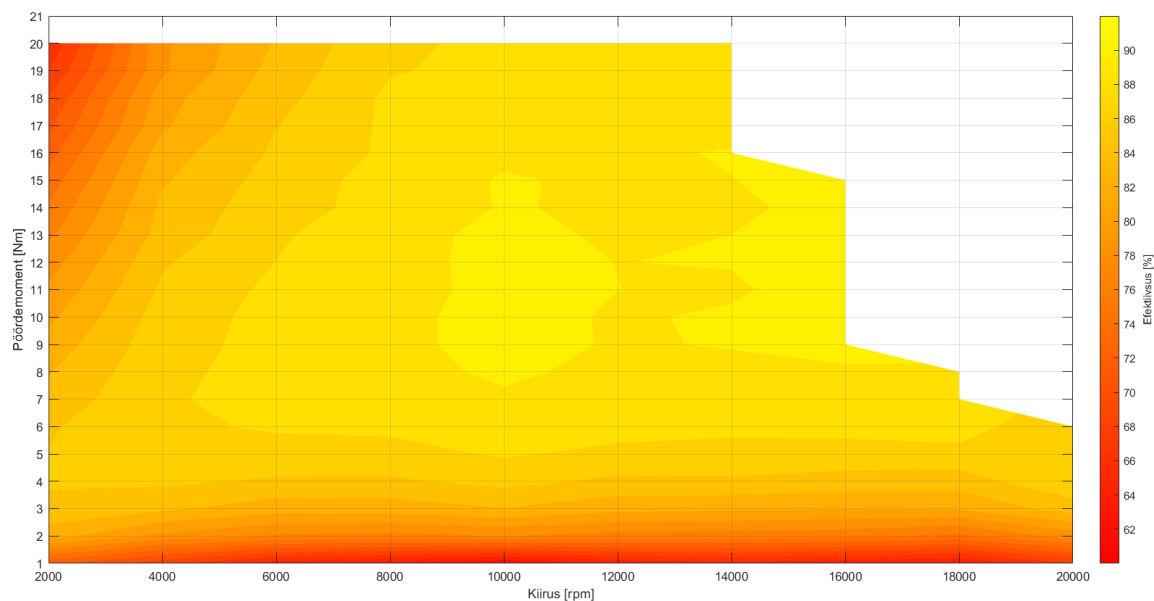


Joonis 3.4. Katselisel teel mõõdetud prototüüp elektrimootori efektiivsuskaart.

Prototüüp elektrimootori efektiivsuskaardi saamiseks sooritati kokku 206 seadepunkti mõõtmine. Tulenevalt mõõtemetoodikast ning mõningatest piirangutest ei ole võimalik mõõta kogu tootja poolset efektiivsuskaardi ala. Maksimaalne pöördemomendi seadesuurus 25 Nm on võimalik mõõta ainult madalatel pööratel, suurematel pööratel seadesuuruse väärtust vähendatakse. Mõõtmistulemused salvestati analüsaatoriga DeweSoft Sirius-HS ning eksporditi programmi *Matlab*, kus koostati skripti abil efektiivsuskaardid. Saadud tulemus joonisel 3.4 on üsna sarnase efektiivsuse ala iseloomuga, kui tootja poolt pakutud andmeleht LISA 6. Maksimaalseks mõõdetud efektiivsuseks mõõdeti üle 97 % ning madalaimaks väärtuseks 75 %. Üllataval kombel on mõõdetud efektiivsused üsna sarnased tootja poolset efektiivsuskaardil lubatud väärtustestega. Siiski esineb mõõdetud punktide ja andmelehe punktide vahel erinevust maksimaalselt 6%. Arvutatud keskmine väärtus on 94.2 %.

Mõõdetud efektiivsuskaart on üsna usaldusväärne ning sarnaneb tootja poolt simuleeritud efektiivsuskaardile. Sellest tulenevalt on oluline ka võrrelda prototüüp elektrimootori efektiivsuskaarti varasemalt kasutusel olnud elektrimootorite efektiivsuskaardiga. AMK-Motion elektrimootori mõõdetud efektiivsuskaart koosneb 169 seadepunktis ja maksimaalseks pöördemomendi seadesuuruseks on 21 Nm. Peale 14000 rpm kiirust pole 20 Nm pöördemomenti võimalik saavutada ning pöördemomendi

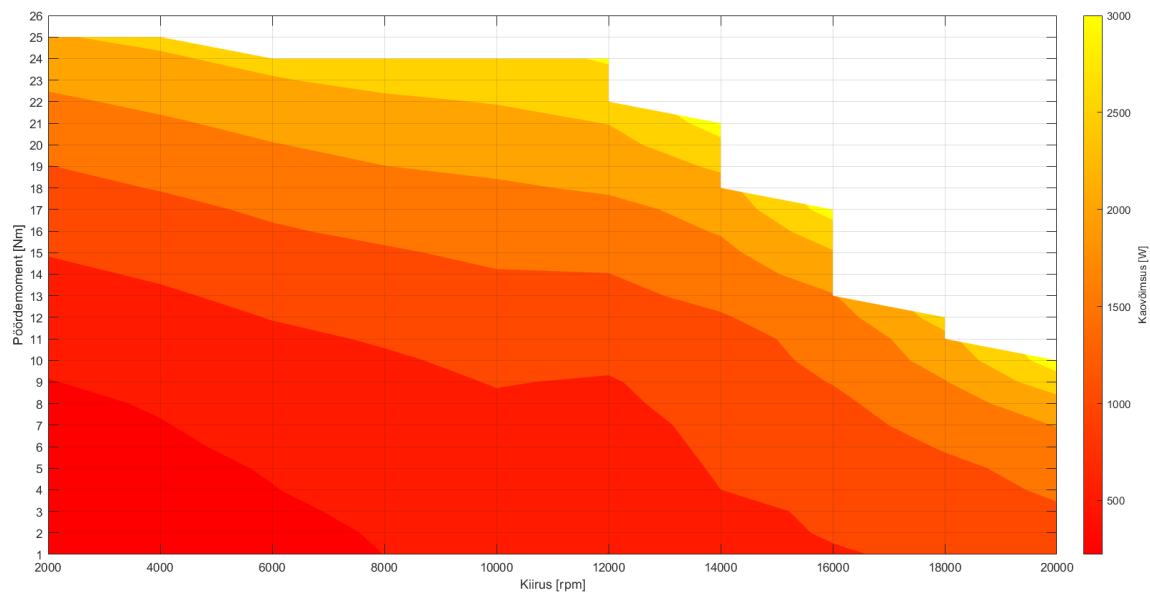
seadesuurust vähendatakse vastavalt testimise tulemustele. Testimise tulemusel saadakse efektiivsuskaart, mille efektiivsusalaade iseloom vastab tootja poolt esitatud andmetele. Maksimaalseks mõõdetud efektiivsuseks on 90%, mis koondub kahes osas kaardi keskosas. Kahe 90 % efektiivsusega keskoas vahel on mõõdetud efektiivsus üsna ligilähedane 90 %-le. Minimaalseks efektiivsuseks mõõdeti 61 %. Keskmiseks arvatud efektiivsuse väärtuseks on 85 %. Joonis 3.5 kajastab eelnevalt mõõdetud AMK-Motion efektiivsuskaarti samadel sisendparameetritel ning test metoodikal.



Joonis 3.5. AMK-Motion elektrimootori mõõdetud efektiivsuskaart.

### 3.2.6 Kadude analüüs

Elektrimootori efektiivsuse kaart annab hea ülevaate elektrimootori efektiivsetest aladest. Süsteemi efektiivsuse tõstmiseks on oluline püsida võimalikult palju efektiivses alas. Tihtipeale ei ole aga efektiivses alas püsimine ainus efektiivne energia kulutamise tegur mida jälgida. Sellest tulenevalt on vaja analüüsida ka tekkivaid kaovõimsuseid elektrimootoris ja pingevaheldis. Tulenevalt sellest mõõdetakse elektrimootori ja pingevaheldi kogu kaovõimsust eraldi, et võimalusel analüüsida neid nii eraldi kui ka koos. Kaovõimsuste hindamisel on võetud aluseks sama efektiivsuskaardi koostamisel tehtud katsetulemused. Katsetulemuste põhjal koostatakse pingevaheldi ja elektrimootori kogu kaovõimsuse kaart joonisel 3.6.

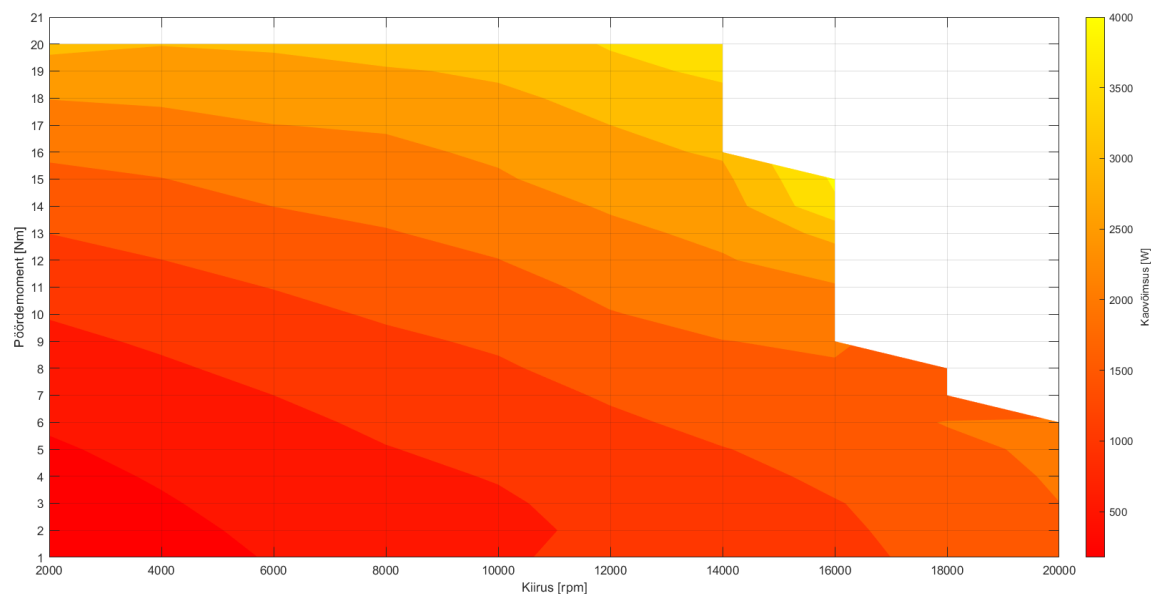


Joonis 3.6. AMK-Motion pingevaheldi ja Fischer-Eletromotoren elektrimootori kaovõimsus kaart.

Jooniselt on näha, et kaovõimsus ei jagune sarnaselt efektiivsuskaardile (vt. Joonis 3.4). Selle põhjuseks on kõrgematel kiirustel ja pöördemomentidel suurem vajalik vool elektrimootori juhtimiseks. Lihtsustatult võib öelda, et mida väiksem pöördemoment ja kiirus, seda väiksem on kaovõimsus. Antud kaovõimsuse kaarti saab kasutada efektiivsema energia tarbimise sisendina ja ka jahutussüsteemi vajaliku jahutusvõimsusega arvestamisel. Kuigi süsteemid on erinevad, tuleb eraldi analüüsida ka elektrimootori ja pingevaheldis tekkivaid kadusid. Selleks on oluline koostada eraldiseisvad kaovõimsus kaardid nii pingevaheldile kui ka elektrimootorile.

Eraldiseisvatelt kaovõimsuskaartidelt on näha, et elektrimootori puhul toimub kaovõimsuse jagunemine sarnaselt joonisel 3.6 esitatud tulemustele. Maksimaalsed mõõdetud kaovõimsuse punktid koonduvad madala kiiruse ja suure pöördemomendi piirkonda ning kõrge kiiruse ja pöördemomendi piirkonda. Analüüsid pingevaheldi maksimaalseid kaovõimsuseid joonistub välja mitte nii sarnane värvide jaotus, kuid suurimad kaovõimsused esinevad kiiruse keskalas suurematel pöördemomentidel. Madalatel pöördemomentidel on pingevaheldi kaod ka kõige madalamad.

Võrdlusmomendi tekitamiseks analüüsitakse eelmisel hooajal tehtud kaovõimsus kaarte peatükis 3.2.5 käsitletud tingimustel, kus sooritati mõõtmised AMK-Motion pingevaheldi ja elektrimootori efektiivsuskaardi ning kaovõimsuste mõõtmised. Tulemusena esitletak joonisel 3.7 kaovõimsuskaart AMK-Motion pingevaheldi ja elektrimootori mõõtetulemustest.



Joonis 3.7. AMK-Motion pingevaheldi ja elektrimootori kaovõimsus kaart.

Nagu eeldada võis, on joonis 3.7 kaovõimsuse värvijaotus sarnane joonisel 3.6 esitatule. Erinevuseks on kaovõimsus suurusjärkude erinevus, mida kajastab ka peatükis 3.2.5 käsitletud efektiivsuskaartide võrdlus. AMK-Motion elektrimootori ja pingevaheldi keskmiseks mõõdetud kaovõimsuseks on ligikaudu 1800 W ja maksimaalseks mõõtetulemuseks ligikaudu 4000 W.

Fischer Elektromotoren elektrimootori ja AMK-Motion pingevaheldi kombineeritud keskmiseks mõõdetud kaovõimsuseks on 1400 W ja maksimaalseks mõõtetulemuseks 3200 W. Antud juhul on kahe erineva kombinatsiooni keskmise tulemuste erinevus ligi 400 W ja 22.2 %. AMK-Motion pingevaheldi ja elektrimootori eraldi analüüsil on kadude jaotumine graafikul sarnane Fischer Elektromotoren elektrimootori ja AMK-Motion pingevaheldi kombinatsioonile. Suurimaks erinevuseks on pingevaheldi kaovõimsuste jaotus, ehk kaovõimsused on madalamad ühtalsed kogu kiiruse vältel, kuid erinevused tekivad teatud pöördemomendi suurenemisel. Kuigi mõlema elektrimootori katsetamisel on kasutatud sama pingevaheldit, on pingevaheldi keskmise kaovõimsuste erinevus 284 W ehk 36.4 %. Antud erinevus on üsna suur ning sellest tulenevalt oleks vaja põhjust edasi uurida. Taha täiendavaid elektrimootori parameetrite mõõtmisi ning parandada juhtalgoritmi juhtimisloogika täpsust.

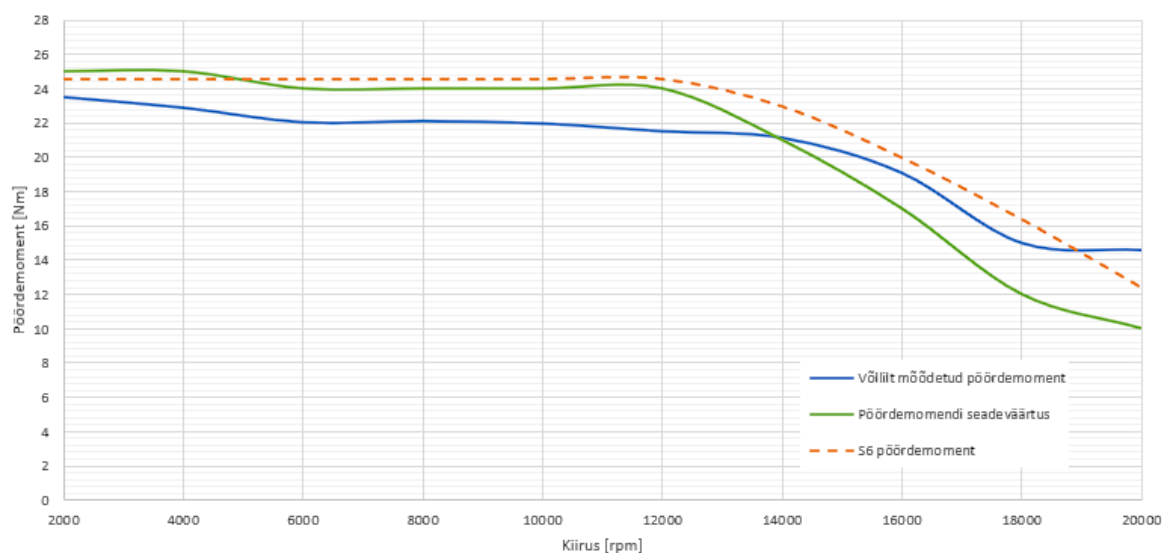
### 3.2.7 S6 talitus

Elektrimootori andmeleht märgib ära S6 talitusviisi, mis on defineeritud standardis EVS-EN 60034-1. S6 talitusviis kujutab endast samasuguste koormuse ja tühijooksu tsüklite

esinemist, mille korral ei saavutata temilist tasakaalu. Tavaliselt lisatakse ka koormustalituse lühendi järgi ka koormuskestuse väärtus (nt: S6 25 %). [41]

Kuna andmelehes ei ole antud talitustsükli pikkust, siis vastavalt standardile EVS-EN 60034-1 peab aluseks võtma 10 minutilise talitustsükli pikkuse ning suhteline lülituskestus vastavalt: 15 %, 25 %, 40 %, 60 %. [41]

Kahjuks pole võimalik tekitada S6 talitusele vastavat olukorda, tänu millele antud talitust vastavalt standardile ei testita. Efektiivsuskaardi koostamisel on arvestatud elektrimootori pöördemomendi võimet hoida seadepunkti 2 sekundit. Kontrollerilt küsitud seadepunkti eduka läbimise tulemusel esitatakse maksimaalse küsitud seadepunkti väärtus ning võrreldakse seda pöördemomendi anduri poolt mõõdetud suurusega joonisel 3.8. Graafikule lisatakse võrdluse eesmärgil, andmelehel esitatud S6 talitusviisi pöördemomendi graafik.



Joonis 3.8. Efektiivsuskaardi koostamisel mõõdetud maksimaalne pöördemomendi väärtus, pöördemomendi seadesuuruse väärtus ja S6 talituses pöördemoment.

Nagu võib näha joonis 3.8 kujutatud graafikutel, ei suuda elektrimootori mehaaniline pöördemoment saavutada soovitud seadepunkti väärtust kuni 14000 rpm kiiruseni. Peale 14000 rpm kiirust ületab võllilt mõõdetud pöördemoment küsitud seadepunkti väärtust. Antud olukorra võib põhjustada kontroll algoritm, täpsemalt välja nõrgestamise loogika. Täpsemaks analüüsiks on vaja teha korduskatsed ning testida kontrolleri välja nõrgestamise algoritmi seadeväärtuste parendamist. Samuti on oluline hinnata efektiivsuse ja kaovõimsuste muutu juhtalgoritmi muutusele, kuna mõõtetulemuste põhjal on antud ala pingevaheldi efektiivsus kõrgeim.



### 3.3 Katsetulemused ja järeldused

Kõigi tehtud katsete eesmärgiks oli veenduda prototüüp elektrimootori korrasolekus ning täielikus funktsionaalsuses tootja poolt esitatud andmete põhjal. Tulenevalt sellest jagunesid katsetused kolmeks osaks:

- 1) Eel-testid elektrimootori korrasoleku verifitseerimiseks
- 2) Elektrimootori parameetrite testid
- 3) Efektiivsuskaart ja kaovõimsuste hindamine

Tulenevalt ühes punktis tehtud katsete edukale läbimisele, liiguti edasi järgmisesse katsetuse etappi. Tulenevalt sellest moodustasid elektrimootori eel-testid olulise osa mootori katsetustest enne elektrimootori testpinki integreerimist. Teine osa, ehk elektrimootori parameetrite testid moodustati elektrimootorite jaoks projekteeritud testpingis ning koosnesid olulisematest elektrimootori jõudluse verifitseerimise testidest. Elektrimootori viimases katsetuse etapis sooritati 206 seadepunkti mõõtmise eesmärgil koostada elektrimootori kogu võimaliku tööala efektiivsuskaart. Efektiivsuskaardi koostamise tulemusel salvestati vajalikud andmed ka hilisemaks kaovõimsuste hindamiseks ning struktureerimiseks. Ühtlasi analüüsiti ka elektrilise ja mehaanilise pöördemomendi väärtuse erinevust.

Eel-testid edenesid edukalt, tänu millele liiguti üsna kiiresti edasi teise testimise faasi, kus katsetati elektrimootori jõudluse määramiseks olulisi parameetreid. Testimise tulemused antud faasis ei sobinud kokku tootja poolt esitatud väärtustega. Selle põhjuseks võib olla asjaolu, et tulemused on puhtalt arvutuslikud ning saadud simuleerimise tulemusel. Antud kontekstis otsustati liikuda edasi kogu elektrimootori tööala kaardistamiseni, mis annab parema ülevaate elektrimootori karakteristikast.

Tulenevalt üsna ajakulukast testimisest efektiivsuskaardi koostamise nõol, mõõdeti ühtlasi mitte ainult elektrimootori faasipingeid ja voolusid ning mehaanilist võimsust võllilt, vaid ka pingevaheldi sisend pinget ja voolu. Selle tulemusel koostati samaaegselt efektiivsuskaart pingevaheldile, kui ka kogusüsteemi (pingevaheldi + elektrimootor) efektiivsuskaart. Üllataval tulemusena osutus prototüüp elektrimootori juhtmisel pingevaheldi efektiivsus olema kehvem keskmiselt 3 %. Antud juhul võib olla probleemiks pingevaheldi kontroll algoritmist tulenev ebatäpne juhtimine.

Kogu süsteemi efektiivsuskaart koos uue prototüüp elektrimootoriga osutus siiski kokkuvõttes efektiivsemaks kui eelmine lahendus, keskmiselt 6 %. Selle tulemusel

analüüsi ka süsteemis tekkivaid kaovõimsuseid, et hinnata, kas valitud pingevaheldi ja elektrimootor annab võitu ka kaovõimsuste vähenemises. Väiksemad kaovõimsused annavad võimaluse tulevikus projekteerida jahutussüsteemi kompaktsema, kergema ning efektiivsema. Tulemuste analüüsist selgus, et kokkuvõttes on Fischer Elektromotoren elektromootori ja AMK-Motion pingevaheldi kombinatsioon väiksemate kaovõimsustega. Keskmise kaovõimsus erineb 400 W ja 22.2 %. Samuti on maksimaalselt mõõdetud kaovõimus enam kui 800 W väiksem. Antud tulemus on heaks lähtepunktiks ning tugev argument uue kombinatsiooni kasutusele võtmiseks tulevastel elektrivormelitel.

Lisaks efektiivsuskaardi ja kaovõimsus kaartide koostamisele analüüsi ka maksimaalset saavutatud pöördemomendi väärtust ning selle erinevust pöördemomendi seadeväärtuse suuruselt. Kuigi mõõdetud pöördemomendi seadeväärtus erines oluliselt seadeväärtuse suuruselt oli see siiski rahuldav. Parema pöördemomendi täpsuse saavutamiseks tuleb analüüsida täpsemalt pingevaheldi kontrollalgoritmi ülesehitust. Kontrollalgoritmi seadeväärtuste muutmisel on vaja teha erinevaid katseid muutuste hindamiseks nii efektiivsusele, kaovõimsustele kui ka pöördemomendi täpsusele ning pulsatsioonile.

Katsete kokkuvõtteks võib öelda, et oleks vaja teha juba sooritatud katsetele kordusmõõtmised. Ühtlasi oleks vaja teha ka katselised mõõtmised parameetritele, mis on juhtalgoritmi jaoks vajalikud sisendparameetrid. Antud juhul saab muuta kontroll algoritmi väärtused täpsemaks, mille järel on vajalik teha kordusmõõtmised, et hinnata, kuidas mõõdetud parameetrid mõjutavad juhtalgoritmi täpsust. Samuti tuleks katselisel teel hinnata PI regulaatorite häälestamise täpsust (vt. Joonis 1.8) ning seda vajadusel parendada.

## KOKKUVÕTE

Lõputöö eesmärgiks oli projekteerida koostöös Saksamaa ettevõttega Fischer Elektromotoren elektrimootori mehaaniline disain sobitumaks FEST23 elektrivormeli jõuülekanedega. Sellest tulenevalt projekteeriti mehaaniline disain, koostati elektrimootor ning projekteeriti ka detailid sobitumaks elektrimootorite katsepingiga. Elektrimootorit testiti esmalt katsepingi väliselt ning peale edukaid katsetulemusi ja seadistusi rakistati elektrimootorid katsepinki, kus sooritati elektrimootorite parameetrite katselised mõõtmised, mida analüüsiti ning võrreldi eelnevalt elektrivormelil kasutusel olnud elektrimootorite katsetulemustega.

Töö jagunes kolmeks osaks, kus esimeses osas anti ülevaade FEST23 elektrivormeli jõuülekande konseptsioonist ja ülesehitusest. Lisaks käsitleti enim kasutatavaid elektrimootorite tüüpe elektrisõidukitel ja juhtimis algoritme nende juhtimiseks. Peatüki lõpus koostati algoritm elektrimootori disainimiseks elektrisõidukile. Töö teine osa käsitles elektrimootori disainimist. Alustuseks defineeriti algandmed ja piirangud, edasi anti ülevaade püsिमagnet elektrimootori elektromagnetilise disaini põhitõdedest ning võrreldi seda saada oleva infoga Fischer Elektromotoren elektrimootori kohta. Edasi liiguti mehaanilise disaini juurde, kus projekteeriti reaalkonstruktsiooni tarkvaras *Catia V5* elektrimootori detailid. Elektrimootori laagrite valmisel ning võlli arvutustel kasutati tarkvara *KISSsoft* ning liidete analüüsimiseks tarkvara *Ansys*. Konstruktsiooni töö tulemusel valmis kokku 14 erinevat detaili elektrimootori koostamiseks.

Töö viimane osa keskendus elektrimootori testimisele ja testitulemuste võrdlemisele elektrivormelil varasemalt kasutusel olnud elektrimootori testitulemustega. Peatükk jagunes kolmeks osaks, kus esimeses osas käsitleti eel-teste veendumaks elektrimootori korras olekus ja elektrimootori positsioonianduri seadistamist. Teises osas keskenduti oluliste elektrimootori jõudluse parameetrite leidmisele. Kolmas osa koosnes efektiivsuskaardi ja kaovõimsuskaardi loomisest ja analüüsist. Katsete tulemusel võrreldi tootja poolseid andmelehel esitatud väärtusi katseliselt mõõdetud tulemustega. Tulemusi analüüsiti peatüki lõpus, kus esitati edasised tegevused elektrimootorite katsetamiseks ja pingevaheldi juhtalgoritmi parendamiseks.

Lõputöö tulemusel verifitseeriti Fischer Elektromotoren elektrimootori paremat sobivust tulevastele elektrivormelitele. Uus elektrimootor võimaldab suuremat pöördemomenti, väiksemaid kaovõimsuseid ja paremat efektiivsust. Elektrimootori mehaanilise osa ise disainimine avab võimaluse projekteerida nii võlli liides kui ka positsioonianduri kinnitumine vastavalt vajadusele. Samuti on võimalik projekteerida korpuse

mehaanilised kinnitused ja jahutuskorpus vastavalt soovile. Antud juhul annab mehaanilise osa ise disainimine juurde teatud määral vabadust ja valikuid optimeerimiseks.

Kuigi lõputöös ei käsitletud projekteerimise või testimise ajal tekkinud probleeme, siis tegelikuses neid siiski tekkis. Üheks suuremaks probleemiks osutus võlli tootmine, kuna üsna väikese nuutliite ja materjali valik nõuab tootmisel erilist masinapargi võimekust ja kompetentsi, ei leidunud küllalt palju ettevõtteid, kes oleksid nõus antud võlli tootma. Sellest tulenevalt valiti võllile kiirelt uus ja lihtsam liides – polügonliides. Tulevikus on vaja uurida alternatiivseid tootmise meetodeid või liiteid, et leida sobivaim liide võllilt jõu üle kandmiseks. Teine suurem probleem esines teise efektiivsuskaardi koostamise käigus, kui elektrimootorist hakkas kostuma vilinat. Sellest tulenevalt võeti elektrimootor lahti ning diagnoositi laagririke. Täpne tekkepõhjus vajab siiski sügavamat analüüsi ning järeldusi. Tulenevalt rikkest jäi edasine elektrimootori testimine pausile.

Tekkinud probleemid ei olnud takistuseks lõppeesmärgini jõudmisel, milleks oli anda hinnang uute elektrimootorite sobivusest tulevastele elektrivormelitele. Tehtud töö ja katsete tulemuste analüüsi põhjal võib väita, et Fischer Elektromotoren elektrimootorid on parem valik tulevaste elektrivormelitele, kui varasemal kasutusel olnud elektrimootorid. Antud lõputöö on heaks alguspunktiks, et jõuda FSTT elektrimootorite täielikult ise arendamiseni. Lõputöö tulemusel koguti hulga teadmisi ja kogemusi, mille põhjal on hea arendada edasi tiimi püüdlust ise-arendatud elektrimootorite poole.

## SUMMARY

The aim of the thesis was to design, in collaboration with the German company Fischer Elektromotoren, the mechanical design of an electric motor to fit in the powertrain of the FEST23 electric formula car. As a result, a mechanical design was created and the parts were manufactured. After assembling the rotor and stator by Fischer Elektronen, the final assembly was created at the university, and details were designed to fit the electric motor test bench. Initially, the electric motor was tested outside the test bench, and after successful test results and adjustments, the electric motors were installed on the test bench, where experimental measurements of the electric motor parameters were conducted and analyzed, comparing them with the test results of previously used electric motors in the electric formula car.

The thesis was divided into three parts. The first part provided an overview of the concept and structure of the powertrain of the FEST23 electric formula car. Additionally, it discussed the most commonly used types of electric motors in electric vehicles and control algorithms for their operation. At the end of the chapter, an algorithm was developed for designing an electric motor for an electric vehicle. The second part of the thesis focused on the design of the electric motor. Initially, the initial data and constraints were defined, followed by an overview of the basic principles of permanent magnet electric motor electromagnetic design, comparing it with the available information about the Fischer Elektromotoren electric motor. Then, the mechanical design was addressed, where the details of the electric motor were designed using the real redesign software *Catia V5*. Software such as *KISSsoft* was used for bearing design and shaft calculations, and *Ansys* for spline analysis. As a result of the design work, a total of 14 different details for assembling the electric motor were produced.

The final part of the thesis focused on testing the electric motor and comparing the test results with those of previously used electric motors in the electric formula car. The chapter was divided into three parts, where the first part dealt with pre-tests to ensure the proper condition of the electric motor and the calibration of the electric motor position sensor. The second part focused on finding important performance parameters of the electric motor. The third part consisted of creating and analyzing efficiency maps and loss maps. The manufacturer's datasheet values were compared with the experimentally measured results. The results were analyzed at the end of the chapter, presenting further actions for testing the electric motors and improving the inverter control algorithm.

As a result of the thesis, the suitability of the Fischer Elektromotoren electric motor for future electric formula cars was verified. The new electric motor allows for higher torque, lower losses, and better efficiency. Designing the mechanical part of the electric motor itself opens up the possibility of designing the shaft spline and position sensor fasteners according to the specific needs. It is also possible to design the mechanical mounts and cooling housing of the case according to preference. In this case, designing the mechanical part itself provides a certain degree of freedom and choices for optimization.

Although the thesis did not address the problems that arose during the design or testing, but they did occur in reality. One major problem was the production of the shaft, as the relatively small spline and material selection required special manufacturing capabilities and competence. There were not enough companies willing to manufacture this particular shaft. Consequently, a new and simpler interface, the polygon spline, was quickly chosen for the shaft. In the future, alternative manufacturing methods or interfaces need to be investigated to find the most suitable interface for transmitting power from the shaft. Another major problem occurred during the compilation of the second efficiency map, when a whistling sound started to come from the electric motor. Consequently, the electric motor was disassembled and a bearing failure was diagnosed. The exact cause needs further analysis and conclusions. Due to the malfunction, further testing of the electric motor was paused.

The problems that arose did not hinder reaching the ultimate goal, which was to assess the suitability of the new electric motors for future electric formula cars. Based on the work done and the analysis of the test results, it can be argued that Fischer Elektromotoren electric motors are a better choice for future electric formula cars than previously used electric motors. This thesis serves as a good starting point to fully develop FSTT electric motors internally. As a result of the thesis, a wealth of knowledge and experience was gathered, which provides a good foundation for further developing the team's efforts towards self-developed electric motors.

## KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] R. Matthews, „History of Formula SAE,” Formula SAE, [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: <https://www.fsaonline.com/page.aspx?pageid=c4c5195a-60c0-46aa-acbf-2958ef545b72>. [Kasutatud 25.02.2024].
- [2] FSG. GmbH, "Formula Student Rules 2023," FSG, 2023. [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: [https://www.formulastudent.de/fileadmin/user\\_upload/all/2023/rules/FS-Rules\\_2023\\_v1.1.pdf](https://www.formulastudent.de/fileadmin/user_upload/all/2023/rules/FS-Rules_2023_v1.1.pdf). [Kasutatud 25.02.2024].
- [3] "Tudengivormeli võistlussari," FS Team Tallinn, [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: <https://www.formulastudent.ee/et/tudengivormel/>. [Kasutatud 25.02.2024].
- [4] AMK-motion, „AMK-motion,” AMKmotion GmbH & Co KG, 2022. [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: [https://www.amk-motion.com/amk-dokucd/dokucd/en/DokuCD\\_HTML5\\_en.htm#projekt/doku-cd\\_html5/topics/amk\\_automotive.htm](https://www.amk-motion.com/amk-dokucd/dokucd/en/DokuCD_HTML5_en.htm#projekt/doku-cd_html5/topics/amk_automotive.htm). [Kasutatud 25.02.2024].
- [5] AMZ Racing, „World Record,” AMZ Racing, [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: <https://www.amzracing.ch/en/world-record>. [Kasutatud 02.03.2024].
- [6] E.B.Agamloh, A.von.Jouanne, A.Yokichi, „An overview of Electric Machine Trends in Modern Electric vehicles,” ResearchGate, 17.05.2020. [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: [https://www.researchgate.net/publication/340841920\\_An\\_Overview\\_of\\_Electric\\_Machine\\_Trends\\_in\\_Modern\\_Electric\\_Vehicles](https://www.researchgate.net/publication/340841920_An_Overview_of_Electric_Machine_Trends_in_Modern_Electric_Vehicles). [Kasutatud 08.03.2024].
- [7] I.E.Agency, „Electric Vehicles,” IEA, 11.07.2023. [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: <https://www.iea.org/energy-system/transport/electric-vehicles>. [Kasutatud 08.03.2024].
- [8] R.Nukki, „Research and Development of Exterior-Rotor Permanent Magnet Synchronous Machines for Light Aerial Vehicles,” TTÜ Kirjastus, 21.06.2016. [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: [https://www.researchgate.net/publication/307569873\\_Research\\_and\\_Development\\_of\\_Exterior-Rotor\\_Permanent\\_Magnet\\_Synchronous\\_Machines\\_for\\_Light\\_Aerial\\_Vehicles](https://www.researchgate.net/publication/307569873_Research_and_Development_of_Exterior-Rotor_Permanent_Magnet_Synchronous_Machines_for_Light_Aerial_Vehicles). [Kasutatud 08.03.2024].
- [9] S.F.Gebremariam, T.T.Wondie, "Comparative analysis of electric motor drives employed for propulsion purpose of Battery Electric Vehicle (BEV) systems," ResearchGate, 12.2023. [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: [https://www.researchgate.net/publication/377071607\\_Comparative\\_analysis\\_of\\_electric\\_motor\\_drives\\_employed\\_for\\_propulsion\\_purpose\\_of\\_Battery\\_Electric\\_Vehicle\\_BEV\\_systems](https://www.researchgate.net/publication/377071607_Comparative_analysis_of_electric_motor_drives_employed_for_propulsion_purpose_of_Battery_Electric_Vehicle_BEV_systems). [Kasutatud 06.05.2024]
- [10] W.Tong, Mechanical Design of Electric Motors, CRC Press, 2014.
- [11] A.Kallaste, K.Janson, Elektrimasinate alused, Tallinn: TTÜ Kirjastus, 2017.
- [12] R.Terec, V.Chindris, L.Szabo, P.Rafajdus, „Position Sensing System for Switched Reluctance Motor Control,” 05.2012. [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: [https://www.researchgate.net/publication/254041010\\_Position\\_sensing\\_system\\_for\\_switched\\_reluctance\\_motor\\_control](https://www.researchgate.net/publication/254041010_Position_sensing_system_for_switched_reluctance_motor_control). [Kasutatud 20.04.2024].
- [13] K. H. Nam, AC Motor Control and Electrical Vehicle Applications - Second Edition, Taylor & Francis Group, LLC, 2019.
- [14] A. Hughes, Electric Motors and Drives - Fundamentals, Types and Applications, Elsevier Ltd., 2006.

- W.Xu, M.M.Ismail, M.R.Islam, "Permanent Magnet Synchronous Machines and Drives: Flux Weakening Advanced Control Techniques," Researchgate, 07.2023. [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: [https://www.researchgate.net/publication/371424380\\_Permanent\\_Magnet\\_Synchronous\\_Machines\\_and\\_Drives\\_Flux\\_Weakening\\_Advanced\\_Control\\_Techniques](https://www.researchgate.net/publication/371424380_Permanent_Magnet_Synchronous_Machines_and_Drives_Flux_Weakening_Advanced_Control_Techniques). [Kasutatud 26.03.2024].
- [15] A.El-Shahat, M.Ruba, Applied Electromechanical Devices and Machines for Electric Mobility Solutions, IntechOpen, 2020.
- [16] „Open-Loop and Closed-Loop Control,” MathWorks Inc., [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: <https://www.mathworks.com/help/mcb/gc/open-loop-and-closed-loop-control.html>. [Kasutatud 26.03.2024].
- [17] „Direct Torque control (DTC),” MathWorks Inc., [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: <https://www.mathworks.com/help/mcb/gc/direct-torque-control-dtc.html>. [Kasutatud 26.03.2024].
- [18] „Our Electric Motors in the Formula Student,” Fischer Elektromotoren GmbH, [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: <https://fischer-elektromotoren.de/en/company/formula-student/>. [Kasutatud 25.02.2024].
- [19] R. Krishan, „Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motor Drives,” CRC Press, 2009.
- [20] D. Hanselman, Brushless Permanent Magnet Motor Design - Second Edition, USA: Magna Physics Publishnig, 2006.
- [21] S.-K. Sul, Control of Electric Machine Drive Systems, Canada: IEEE PRESS, 2011.
- [22] A. Abdolkhani, „Fundamentals of Inductively Coupled Wireless Power Transfer Systems,” 06.2016. [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: [https://www.researchgate.net/publication/304614872\\_Fundamentals\\_of\\_Inductively\\_Coupled\\_Wireless\\_Power\\_Transfer\\_Systems](https://www.researchgate.net/publication/304614872_Fundamentals_of_Inductively_Coupled_Wireless_Power_Transfer_Systems). [Kasutatud 21.04.2024].
- [23] V. Leivsdottir, "Investigation of Loss Calculation Methods for PMSMs and Implementation of Loss Functionality on a Developed FEM Model," Norwegian University of Science and Technology, 07.2016. [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: [https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/bitstream/handle/11250/2433742/14854\\_FULLTEXT.pdf?sequence=1](https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/bitstream/handle/11250/2433742/14854_FULLTEXT.pdf?sequence=1). [Kasutatud 21.04.2024].
- [24] M. Mockaisamy, A.Balaschanmugham, „Permanent-Magnet Synchronous Machine Drives,” ResearchGate, 09.2019. [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: [https://www.researchgate.net/publication/335912683\\_Permanent-Magnet\\_Synchronous\\_Machine\\_Drives](https://www.researchgate.net/publication/335912683_Permanent-Magnet_Synchronous_Machine_Drives). [Kasutatud 28.03.2024].
- [25] P.S.Ghahfarokhi, J.Faiz, "Design of four-pole permanent magnet motor with different rotor topologies," ResearchGate, 01.2013. [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: [https://www.researchgate.net/publication/306018152\\_Design\\_of\\_four-pole\\_permanent\\_magnet\\_motor\\_with\\_different\\_rotor\\_topologies](https://www.researchgate.net/publication/306018152_Design_of_four-pole_permanent_magnet_motor_with_different_rotor_topologies). [Kasutatud 28.03.2024].
- [26] G.Du, N.Li, Q.Zhou, W.Gao, L.Wang, T.Pu, "Multi-Physics comparison of Surface-Mounted and Interior Permanent Magnet Synchronous Motor for High-Speed Applications," MDPI, 2022. [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: <https://www.mdpi.com/2075-1702/10/8/700>. [Kasutatud 29.03.2024].
- [27] J.I.Lee, Y.C.Kim, J.Y.Choi, H.W.Cho, "Analysis od Electromagnetic-Mechanical Characteristics according to Shaft Materials of permanent Magnet Synchronous
- [28]



- motor," MDPI, 29.10.2022. [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/21/8046>. [Kasutatud 29.03.2024].
- [29] A.El-Shahat, "Electric Machines dor Smart Grids Applications - Design, Simulation and Control," 09.02.2018. [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: <https://www.intechopen.com/chapters/62105>. [Kasutatud 28.03.2024].
- [30] T. Gejguš, J.Schöder, K.Loos, A.Lion, M.Johiltz, „Advanced Characterisation of soft Polymers Under Cyclic Loading in Context of Engine Mounts,” 01 2022. [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: [https://www.researchgate.net/publication/358050673\\_Advanced\\_Characterisation\\_of\\_Soft\\_Polymers\\_under\\_Cyclic>Loading\\_in\\_Context\\_of\\_Engine\\_Mounts](https://www.researchgate.net/publication/358050673_Advanced_Characterisation_of_Soft_Polymers_under_Cyclic>Loading_in_Context_of_Engine_Mounts). [Kasutatud 08.04.2024].
- [31] „Rolling bearings and seals in electric motors and generators,” SKF Group, 08.2013. [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: [https://cdn.skfmediahub.skf.com/api/public/0901d196802b0348/pdf\\_preview\\_medium/0901d196802b0348\\_pdf\\_preview\\_medium.pdf](https://cdn.skfmediahub.skf.com/api/public/0901d196802b0348/pdf_preview_medium/0901d196802b0348_pdf_preview_medium.pdf). [Kasutatud 25.02.2024].
- [32] M.A.Khan, B.Asad, K.Kudelina, T.Vaimann, A.Kallaste, "The Bearing Faults Detection Methods for Electrical Machines—The State of the Art," MDPI, 27.12.2022. [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/1/296>. [Kasutatud 27.03.2024].
- [33] B. Christiansen, „How to extend the life of your motor bearings,” ABB, 16.07.2021. [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: <https://new.abb.com/news/detail/80396/how-to-extend-the-life-of-your-motor-bearings>. [Kasutatud 27.03.2024].
- [34] Jiaojiao Ma, Y.Xue, Q.Han, X.Li, C.Yu, „Motor Bearing Damage Induced by Bearing Current: A Review,” MDPI, 05.12.2022. [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: <https://www.mdpi.com/2075-1702/10/12/1167>. [Kasutatud 28.03.2024].
- [35] „SKF Bearing Select,” SKF, [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: <https://skfbearingselect.com/#/bearing-selection-start>. [Kasutatud 15.03.2024].
- [36] J.Pearson, Atlas Steels Technical Handbook of Stainless Steels, Atlas Quality Management, 2021.
- [37] M.Peters, C.Leyens, Titanium and Titanium Alloys Fundamentals and Applications, WILEY-VCH GmbH & Co., 2003.
- [38] R.Gomeringer, M.Heinzler, R.Kilgus, V.Menges, S.Oesterele, T.Rapp, C.Scholer, A.Stenzel, A.Stephan, F.Wieneke, „Mehaanikainseneri Käsiraamat,” Tallinna Tehnikaülikooli Kirjastus, 2022.
- [39] T.Tammeveski, Elektrialjami katsestendi projekteerimine, TalTech, 30.05.2023.
- [40] M.T.Aydemir, S.YILMAZ, „A novel initial rotor position alignment method for permanent magnet synchronous motor using incremental encoder,” ResearchGate, 11.2019. [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: [https://www.researchgate.net/publication/345412483\\_A\\_novel\\_initial\\_rotor\\_position\\_alignment\\_method\\_for\\_permanent\\_magnetsynchronous\\_motor\\_using\\_incremental\\_encoder](https://www.researchgate.net/publication/345412483_A_novel_initial_rotor_position_alignment_method_for_permanent_magnetsynchronous_motor_using_incremental_encoder). [Kasutatud 09.04.2024].
- [41] "EVS-EN 60034-1:2010," EVS, 11 04 2010. [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: <https://www.evs.ee/et/evs-en-60034-1-2010>. [Kasutatud 05.05.2024].
- [42] „Motor Datasheet,” AMK-Motion, 26.10.2016. [Võrgumaterjal]. Loetud aadressil: [https://www.amk-motion.com/amk-dokucd/dokucd/en/content/resources/pdf-dateien/fse/motor\\_data\\_sheet\\_a2370dd\\_dd5.pdf](https://www.amk-motion.com/amk-dokucd/dokucd/en/content/resources/pdf-dateien/fse/motor_data_sheet_a2370dd_dd5.pdf). [Kasutatud 25.02.2024].

# LISA 1 – Fischer Elektromotoren elektrimootori andmeleht



Motor Datasheet [calculated Values]

TI085-052-070-04B7S-07S04BE2

with Fieldweaking  
2018-079-2

*High-Speed &  
Power-Systems*

Project-No.:

	Symbol	Unit	Value	
<b>Rated Data Water cooled (<math>\varphi = 0^\circ</math>)</b>				
Nominal Torque	T <sub>NomWC</sub>	Nm	11,1	
Nominal Current	I <sub>NomWC</sub>	A <sub>rms</sub>	22,6	
Nominal Speed	n <sub>NomWC</sub>	rpm	13250	
Nominal Power	P <sub>NomWC</sub>	W	15404	
Winding Losses <sup>1</sup> / Total Losses <sup>1,2</sup>	P <sub>DWC</sub>	W	254	617
Holding Torque	T <sub>HWC</sub>	Nm	7,9	
Holding Current	I <sub>HWC</sub>	A <sub>rms</sub>	16	

<b>Rated Data S6 duty (<math>\varphi = -10^\circ</math>)</b>				
Torque	T <sub>S6</sub>	Nm	24,6	
Current	I <sub>S6</sub>	A <sub>rms</sub>	51	
Speed	n <sub>S6</sub>	rpm	12100	
Power	P <sub>S6</sub>	W	31199	
Winding Losses <sup>1</sup> / Total Losses <sup>1,2</sup>	P <sub>DS6</sub>	W	1282	1619
Holding Torque	T <sub>HS6</sub>	Nm	17,4	
Holding Current	I <sub>HS6</sub>	A <sub>rms</sub>	35,9	

<b>Peak Data (<math>\varphi = -10^\circ</math>)</b>				
Peak Torque	T <sub>Peak</sub>	Nm	29,1	
Peak Current	I <sub>Peak</sub>	A <sub>rms</sub>	61	
Speed at Peak Torque	n <sub>Peak</sub>	rpm	11600	
Peak Power	P <sub>Peak</sub>	W	35366	
Winding Losses <sup>1</sup> / Total Losses <sup>1,2</sup>	P <sub>DPeak</sub>	W	1843	2167

<b>Data</b>				
Torque Constant	k <sub>t</sub>	Nm/A <sub>rms</sub>	0,492	
BEMF Constant (Phase - Phase)	k <sub>e</sub>	V <sub>rms</sub> /(rad/s)	0,296	
		V <sub>rms</sub> /rpm	0,031	
Motor Constant	k <sub>m</sub>	Nm/√W	0,447	
Idle Speed	n <sub>idle</sub>	rpm	13650	
max. Speed (Fieldweaking)	n <sub>max</sub>	rpm	20000	
max. Frequency (Idle/Fieldweaking)	f <sub>max</sub>	Hz	910	1333
DC Bus Voltage	U <sub>DC</sub>	V <sub>DC</sub>	600	
∅ Resistance per Phase (Winding only)	R <sub>Ph20</sub>	Ω	0,126	
∅ Inductance per Phase (Winding only)	L <sub>Ph</sub>	mH	0,393	
electr. Time Constant $\tau=L/R$	τ <sub>el</sub>	ms	3,11	
Number of Polepairs	n		4	
Winding Connection			Star	

Date:

28.09.2018

Page 1 of 3



	Symbol	Unit	Value
<b>Data Watercooling</b>			
Inlet Temperature of Coolant	T <sub>in</sub>	°C	10 ... 40
Max. Temperature rise of Coolant	T <sub>max</sub>	K	5
Min. required Coolant flow	Q <sub>min</sub>	l/min	---
Volume of cooling channel	V <sub>cool</sub>	l	---
thermal Time Constant	T <sub>th</sub>	min	---

<b>Data Mechanics</b>			
Rotor Inertia (assembly set)	J	kgm <sup>2</sup>	0,33*10 <sup>-3</sup>
Weight of Motor w/o Housing	m	kg	2,8
Outer Stator Diameter w/o Housing	dA	mm	85
Inner Stator Diameter	dAg	mm	51,6
Length of Stator	l	mm	70

**Annotations - Losses**

<sup>1</sup> Winding Losses are referred to a Coil Temperature of 100°C.

<sup>2</sup> The total Losses are made up of: Winding Losses; Stator Iron Losses; Rotor Losses;

*Calculation of total Losses:*

Winding Losses + Stator Iron Losses (at speed X) + Rotor Losses (at speed X)

**Annotations - general**

Ensure that your servo drive can handle the Nominal- and Peakcurrent of the Motor.

An adjustment of the Speed and DC Bus Voltage can be done after consultation.

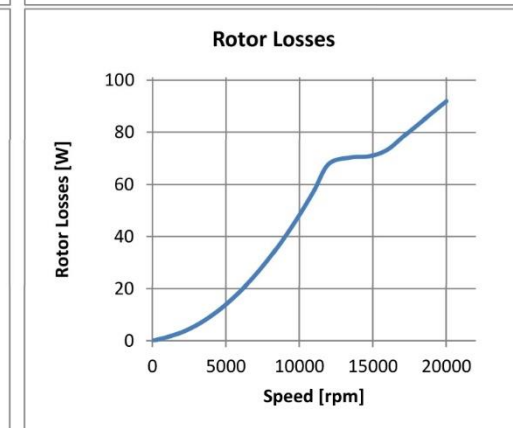
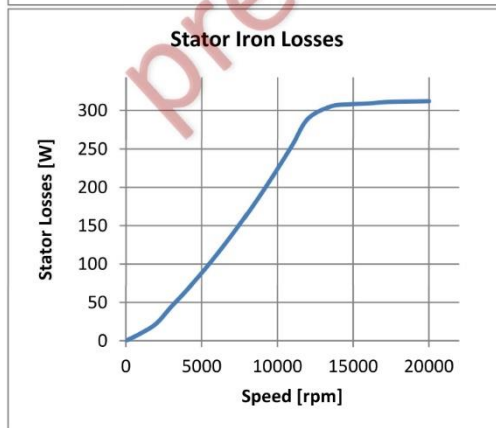
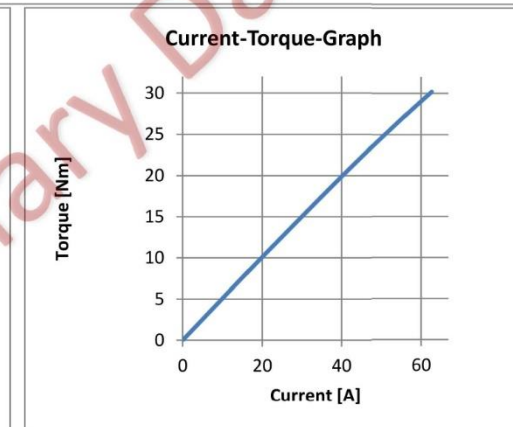
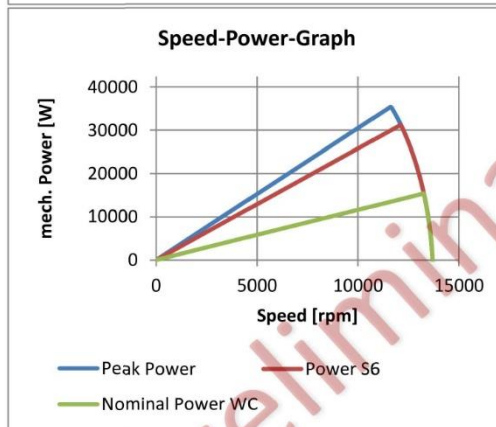
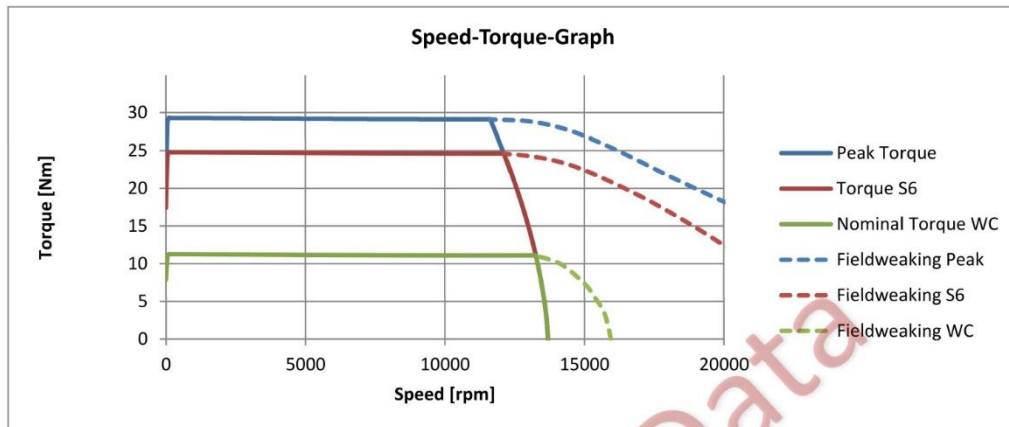
The nominal data in this datasheet are based on an ambient/coolant temperature of 20°C

The stated nominal Torques are without consideration of friction losses through Bearings or Sealings.

**Annotations - thermal monitoring system**

Because the exact duty type depends also on the thermal connection of the motor, the embedded thermal monitoring system has to be analysed and attended. However, attention has to be payed that the temperature sensors do not show the exact temperature of the winding and this could be up to 20 K higher due to thermal capacities. Despite an electrical insulation towards the winding, you are only allowed to connect the sensors to your controller by using a galvanic separation in between.





Fischer Elektromotoren GmbH  
 Schützenstraße 19  
 D-74842 Billigheim-Allfeld  
 Geschäftsführer: Peter Fischer  
 Date:

Tel. (0049) 6265/9222-0  
 Fax: (0049) 6265/9222-22  
[info@fischer-elektromotoren.de](mailto:info@fischer-elektromotoren.de)  
[www.fischer-elektromotoren.de](http://www.fischer-elektromotoren.de)  
 28.09.2018 Page 3 of 3



Bezeichnung/name **DD5-14-10-POW - 18600-B5**  
 Teil-Nr./part number **A2370DD**

Formula Student  
 Zeichn.-Nr./drawing no.: 12703-01260  
 Datum/date: 15.03.2017

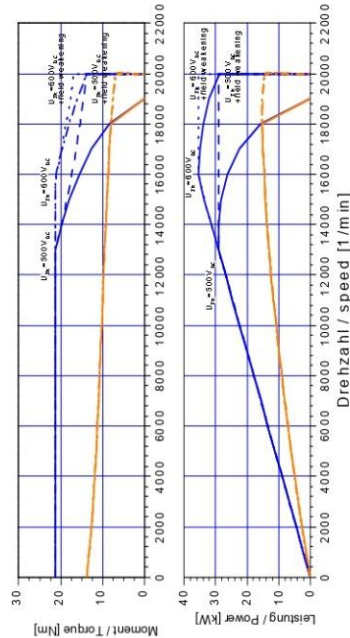
### Motorbeschreibung motor description:

Motorprinzip/motor principle: synchron  
 Kühlart/cooling type: liquid  
 Bauform/mounting type: IMB5  
 Schutzart/degree of protection: IP 65  
 Isolierklasse/insulation class: F

### Leistungsdaten performance data:

Betriebsart/duty type: S1 dT=100K  
 Dauerstillstandsmoment/continuous Stall Torque "Mo": 13,8 Nm  
 Maximales Moment/maximum torque "Mmax": 21 Nm  
 Bemessungsmoment/rated torque "Mn" (ID32771): 9,8 Nm  
 Bemessungsleistung/rated power "Pn": 12,3 kW  
 Bemessungsdrehzahl/rated speed "Nn" (ID32772): 12000 rpm  
 Theo. Leerlaufdrehzahl/theor. no-load-speed "No": 18617 rpm

### Motorcharakteristiken performance - characteristics:



Kennlinie kann die maximal zulässige Drehzahl übersteigen! / Characteristic may exceed mechanical speed limit of motor

### Elektrische Daten electrical data:

Nennspannung/rated voltage "Un" (ID32768): 350 V  
 Nennstrom/rated current "In" (ID111): 41 Arms  
 Dauerstillstandsstrom/cont. stall current "Ic" (ID34096): 53,1 Arms  
 Maximalstrom/maximum current "Imax" (ID109): 105 Arms  
 Maximale Dauer für/duration for "Imax" (ID34168): 1,24 s  
 Drehmomentkonstante/torque constant "kt": 0,26 Nm/Arms  
 Spannungskonstante/voltage constant "ke" (ID 34234): 18,8 V/ku/min  
 Schaltung/connection type: D  
 Polzahl/number of poles "2p" (ID32775): 10 Pole  
 Klemmenwiderstand/terminal resistance "Rt" (ID34164): 0,135 Ohm  
 Klemmeninduktivität/terminal inductance "Lt" (ID34167): 0 mH  
 Querscheninduktivität/quadrature axis inductance "Lq" (ID34046): 0,12 mH  
 Hauptachseninduktivität/direct axis inductance "Ld" (ID34045): 0,24 mH  
 Magn.-Strom/magn. current "Im" (ID32769): 35 Arms  
 Magn.-Strom/magn. current "Im1" (ID32770): 0 Arms  
 Rotorzeitkonstante/rotor time constant "Tr" (ID32774): 0,01 s

### Reglereinstellungen controller settings:

#### Stromregler current controller:

Verstärkung q-Achse/gain q-axis "Kpq" (ID34151): 0,64 V/A  
 Verstärkung d-Achse/gain d-axis "Kpd" (ID34152): 0,58 V/A  
 Nachstellzeitkonstante/time constant "Tnq" (ID34050): 1,2 ms  
 Nachstellzeitkonstante/time constant "Tnd" (ID34052): 1,2 ms  
 Adaption Verstärkung/adaption gain "Kpq2" (ID 34179): 20 %  
 Adaption Nachstellzeit/adaption time constant "Tnq2" (ID 34180): 400 %  
 Untere Anpaßschwelle/lower adaption limit "Iua" (ID34177): 19 %  
 Obere Anpaßschwelle/upper adaption limit "Ioa" (ID34178): 68 %

#### Drehzahlregler speed controller (default for plain motor):

Verstärkung/gain "Kp\_n" (ID100): 40  
 Nachstellzeitkonstante/time constant "Tn\_n" (ID101): 20 ms

#### Spannungsregler voltage controller:

Spannungsregler/voltage controller "Kp" (ID34148): 0,08 A/V  
 Spannungsregler/voltage controller "Tn" (ID34149): 6 ms  
 Spannungsüberhöhung "dU" (ID34235): 116 %  
 Systemwiderstand "Rs" (ID34233): 0 Ohm



# Motor-Datenblatt motor data sheet



Bezeichnung/name **DD5-14-10-POW - 18600-B5** Datum/date: 15.03.2017  
 Teil-Nr./part numbe **A2370DD** Zeichn.-Nr./drawing no.: 12703-01260

- Formula Student

## Mechanische Daten mechanical data:

Gesamtmasse/motor mass "m": 3,55 kg  
 Motorträgheitsmoment/inertia "J": 2,74 kgcm<sup>2</sup>  
 Mech. zul. Drehzahl/mech. speed limit "Nmax": 20000 rpm  
 Rundlauf/run out (DIN 42955): N  
 Wuchtgüte/balancing quality: G2,5  
 Schwingstärke/vibration level (DIN ISO 2373): N  
 Passfeder/shaft key: -

## Bremsendaten brake data:

Typ/type: -  
 Bremsmoment/brake torque: Nm  
 Bremsstrom/brake current: A  
 Bremsenspannung/brake voltage: V  
 Spannungsart/voltage type: -  
 Einfallzeit/engage time "Te": 0 ms  
 max. Bremsenergie/max. braking energy: J  
 einmally/single engagement: J  
 Lebenslang/lifetime: -

## Lüfterdaten fan data:

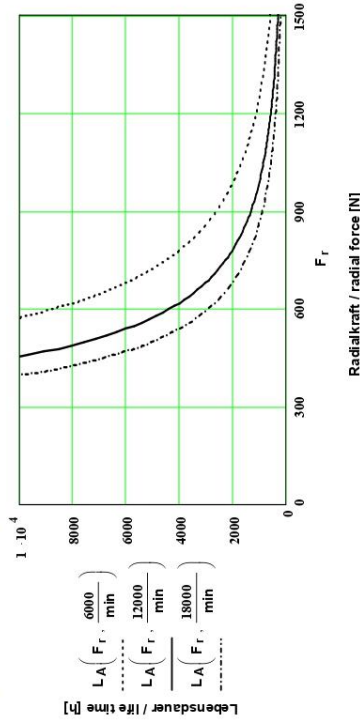
AMK-TNr./AMK part number:  
 Lüfterspannung/fan voltage:  
 Strom/current:  
 Frequenz/frequency: Hz

## Wicklungsschutz thermistor:

Typ/type (ID34166): KTY84  
 Ansprechtemp./operation temp: - °C  
 Widerstand/resistance (25°C) <=: 629 Ω

## Lagerbelastung bearing load:

A/B - Lager/A/B - side bearing:  
 Lagertyp/bearing type : 6005 / 6003  
 Fettsorte/type of grease: GE2 / GE2  
 theo. Fettgebrauchsdauer/grease life time: 13000 / 18000 h  
 bei Nennrehzahl und 70°C Lageräußerringtemp/at rated speed and 158°F at outer bearing ring  
 erforderliche Fettmenge/necessary grease quantity : 0 / g  
 Maximale Axialkraft bei Montage/max. axial force for assembly: 3275 N

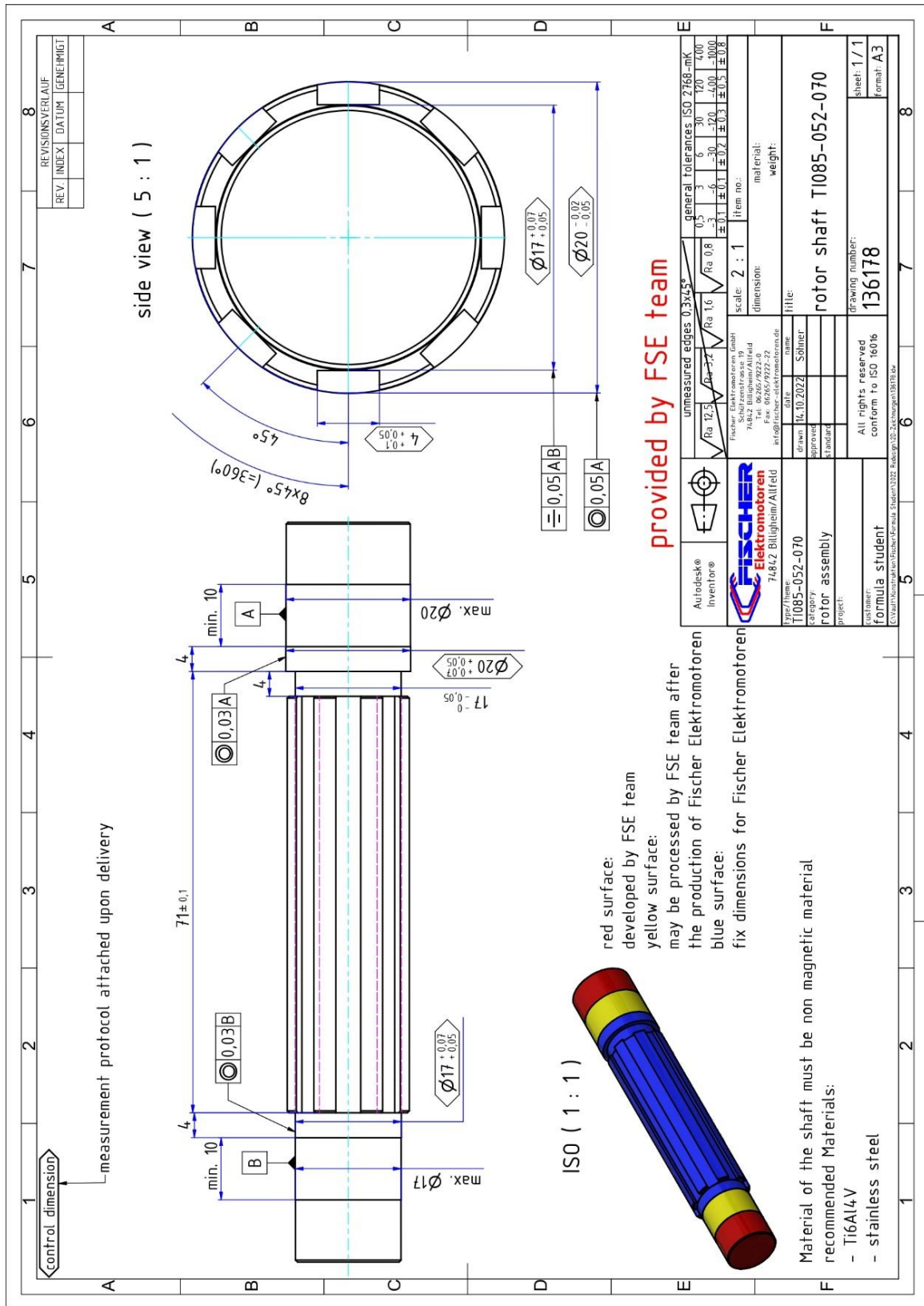


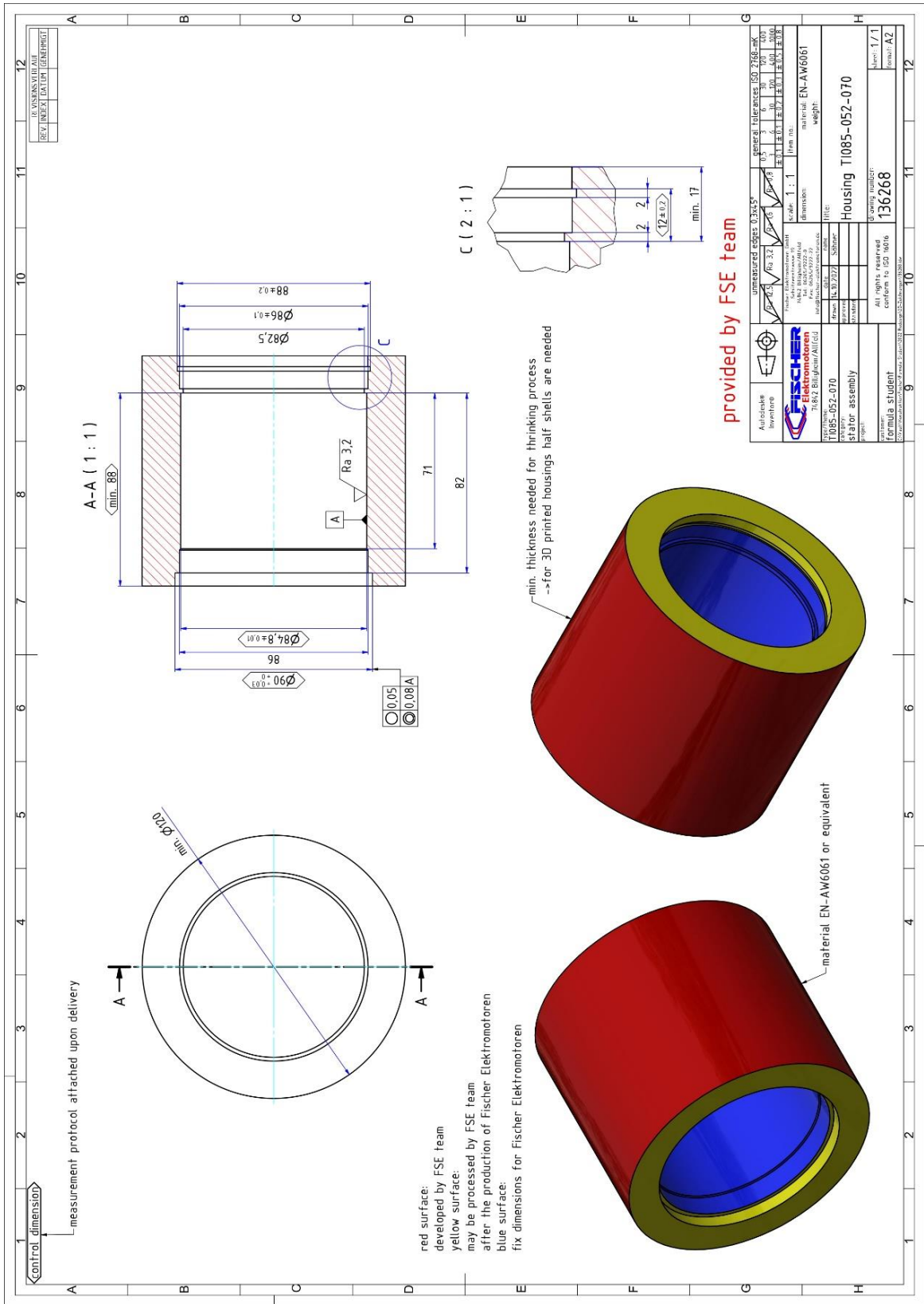
Ersteller/created by: SMM Änderungsstand Mechanik/revision motor-mechanics: 0.00 Änderungsdatum/motor revision motor date: 26.10.2016

Für dieses Dokument und die darin enthaltenen Angaben behalten wir uns alle Rechte und technische Änderungen vor.  
 All rights reserved for this document and all information included. Technical modifications reserved

\* Typenschildbezeichnung unterstrichen; bitte bei Rückfragen immer angeben /Nameplate data underlined; please state with every inquiry

(c) AMK Antriebs- und Steuerungstechnik GmbH Co. KG







# LISA 4 - Enkooderi kinnitamise joonis

ITEM	QTY	ID	PART
1	1		Fischer Housing
2	1		Fischer Tagakaas
3	1		Fischer NDE Bearing Cover
4	1		Fischer Enkoodri Katmik
5	1		SKF 6002-Z
6	1		Heidenhain EC1118
7	1		Phoenix Contact 1513790
8	6		DIN 912 M3x5
9	8		DIN 912 M3x6
10	4		ISO 16041 M3x6
11	1		DIN 912 M3x12

	Material:	Unmarked Tolerances:	Mass:	Scale:
Drawn	Karl Martin Meras		3,70(kg)	1:1
Checked		Title:		
Approved		<b>Fischer Back-end Assembly</b>		
	Tallinn TU/UA5	Sheet:	ID:	
		3/4	FEST 23.00.00.03	

## LISA 5 - Resolveri kinnitamise joonis

ITEM	QTY	ID	PART
1	1		Fischer Shaft
2	1		Fischer Tagakaas
3	1		SKF 6002-Z
4	1		Fischer Resolver Shaft
5	1		DIN912 M3x14
6	2		Fischer Resolver Kinnitus
7	1		TE 1393047
8	2		DIN912 M4x12
9	1		Fischer Enkoodri Katmik
10	6		DIN912 M3x6
11	1		Phoenix Contact 1513790

	Material:	Unmarked Tolerances:	Mass:	Scale:
Drawn	Karl Martin Meras		0,42(kg)	1:1
Checked				
Approved				
		Title:		
		Fischer Resolver Assembly		
Tallinn TUJUAS		ID:		
		Sheet:	3/4	

# LISA 6 – Fischer Elektromotoren effektiivsuskaart

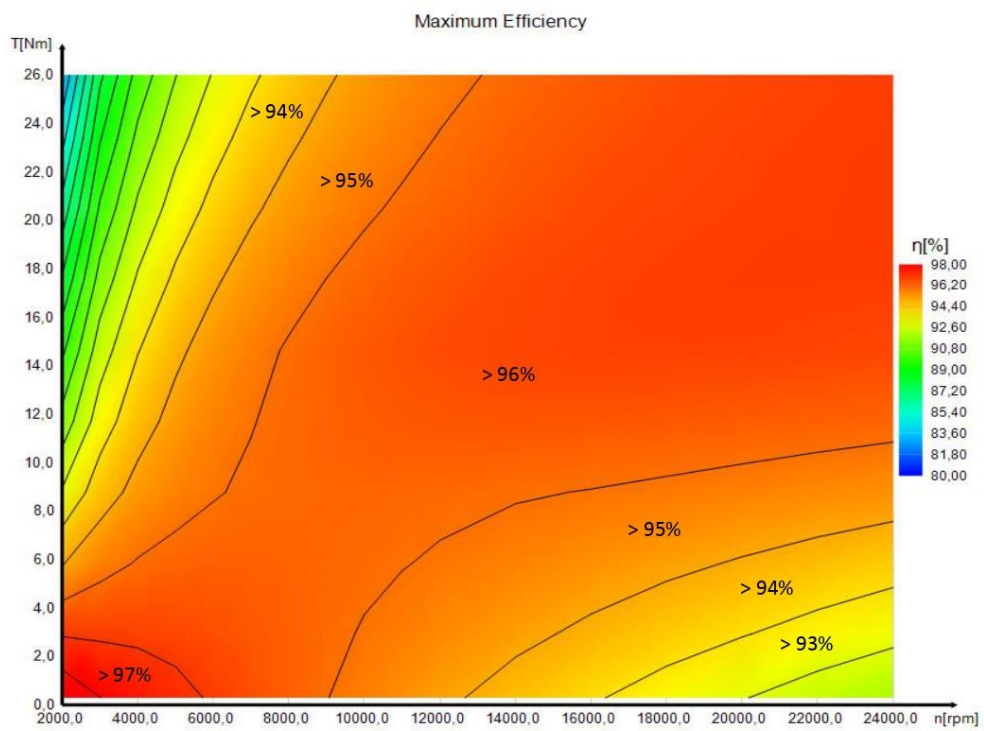


Wirkungsgrad [berechnet]  
TI085-052-070-04B7S-07S04BE2

*High-Speed &  
Power-Systems*

Projektnummer: 2018-079-2

Maximaler Wirkungsgrad: > 96%



Stand: 27.09.2018

