ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
Katedra výkonové elektroniky a strojů

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Návrh elektrického motoru pro naviják

Autor práce: **Martin Bělík**
Vedoucí práce: **Ing. Jan Laksar Ph.D.**

2022

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2021/2022

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	**Martin BĚLÍK**
Osobní číslo:	**E19B0214P**
Studijní program:	**B2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor:	**Aplikovaná elektrotechnika**
Téma práce:	**Základní elektromagnetický návrh elektrického stroje pro naviják**
Zadávající katedra:	**Katedra výkonové elektroniky a strojů**

Zásady pro vypracování

1. Proveďte rešerši a definujte hlavní parametry elektrického navijáku vhodného k montáži na vozidlo.
2. Proveďte elektromagnetický návrh daného stroje
3. Vytvořte výkresovou dokumentaci včetně 3D modelu.

Rozsah bakalářské práce: **30-40**
Rozsah grafických prací: **dle doporučení vedoucího**
Forma zpracování bakalářské práce: **elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. PYRHÖNEN, Juha, JOKINEN, Tapani, HRABOVCOVÁ, Valéria. Design of Rotating Electrical Machines. 2. vyd. John Wiley & Sons Ltd, 2014. ISBN 978-1-118-58157-5.
2. KOPYLOV, Igor Petrovič. Stavba elektrických strojů. 1. vyd. Praha: SNTL –Nakladatelství technické literatury, 1988. ISBN 04-532-88.
3. Elektronické informační zdroje.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jan Laksar, Ph.D.**
Research and Innovation Centre for Electrical Engineering

Datum zadání bakalářské práce: **8. října 2021**
Termín odevzdání bakalářské práce: **26. května 2022**

Západočeská univerzita v Plzni * Katedra elektrotechnická *

L.S.

Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan

Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 8. října 2021

Abstrakt

Práce se zabývá návrhem synchronního motoru s permanentními magnety s vnitřním rotorem. Motor je určen pro pohon lanového navijáku s možností montáže na vozidlo. Použité magnety jsou na bázi vzácných zemin z materiálu NdFeB. Práce obsahuje rešerši navijáků dostupných na trhu, výpočet momentů a otáček navijáku a motoru, elektromagnetický výpočet, výpočet náhradních parametrů, výpočet ztrát stroje, zjednodušený postup výpočtu oteplení stroje a 3D model motoru. 3D model byl vytvořen v programu SOLIDWORKS. Návrh stroje byl ověřen v programu ANSYS. Součástí práce je fázorový diagram navrženého stroje s výkonovou a momentovou charakteristikou.

Klíčová slova

Synchronní motor s permanentními magnety, PMSM, povrchové uložení permanentních magnetů, NdFeB, lanový naviják, návrh motoru, SOLIDWORKS

Abstract

This thesis deals with the design of permanent magnet synchronous machine with an inner rotor. The motor is designed to driving a winch mounted on a vehicle. Used magnets are made of rare earth NdFeB material. The thesis contains search of the market available winches, torque and RPM calculation of winch and motor, electromagnetic calculation, calculation of equivalent circuit parameters, machine losses calculation, simplified thermal calculation and 3D motor model. 3D model was created in SOLIDWORKS. Motor design was verified in ANSYS. A phasor diagram with power and torque characteristics are part of the thesis.

Key Words

Permanent magnet synchronous machine, PMSM, rotor surface mounted magnets, NdFeB, winch, design process of rotating electrical machines, SOLIDWORKS

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Janu Laksarovi, Ph.D. za veškerý čas, který věnoval této bakalářské práci. Dále si cením veškerých cenných rad, vysvětlení a připomínek vyřknutých v průběhu práce na bakalářské práci.

Obsah

Seznam symbolů a zkratek 9

Úvod 16

1 Synchronní stroje s permanentními magnety 17

2 Rešerše 18

3 Návrh synchronního motoru s permanentními magnety 21

3.1 Určení výkonu a otáček stroje z mechanického výpočtu 21

3.2 Zvolené parametry, výpočet ekvivalentního zatížení stroje a napětí střídače 23

3.3 Určení hlavních rozměrů 26

3.4 Určení počtu drážek 28

3.5 Návrh statorového vinutí 31

3.6 Stanovení rozměrů drážky 34

3.7 Návrh permanentních magnetů 37

3.8 Výpočet parametrů náhradního schématu stroje 42

3.9 Stanovení ztrát a účinnosti stroje 46

3.10 Teplotní výpočet 49

3.11 Momentová a výkonová charakteristika stroje, fázorové diagramy 52

Zhodnocení a závěr 56

Literatura 58

Přílohy I

Příloha č. 1 – Katalogový list N30SH I

Příloha č. 2 – Katalogový list Sura M350-50A II

Příloha č. 3 – Průběhy indukovaného napětí III

Příloha č. 4 – Rozložení magnetického pole stroje naprázdno IV

Příloha č. 5 – Průběh ekvivalentních výkonů stroje V

Příloha č. 6 – Průběh výkonů pro režim zatížení S3 VI

Příloha č. 7 – Výkres statorového plechu VII

Příloha č. 8 – Výkres rotorového jha a magnetu VIII

Příloha č. 9 – 3D model motoru IX

Seznam symbolů a zkratek

Značka	Popisek	Jednotka
a	Počet paralelních větví vinutí	[−]
a_{ss}	Stejnosměrný počet paralelních větví	[−]
b_{cs}	Střední šířka cívky	[m]
b_i	Tloušťka izolace	[m]
b_m	Šířka magnetu	[m]
b_{z1}	Šířka zubu statoru	[m]
b_0	Šířka zúžení statorové drážky	[m]
b_1	Šířka dna statorové drážky	[m]
b_2	Šířka vrcholu statorové drážky	[m]
c	Drážková rozteč v počtu drážek Tingleyova schéma	[−]
$cos(\varphi)$	Účiník motoru	[−]
d_{buben}	Průměr bubnu	[m]
d_{lano}	Průměr lana	[m]
f_f	Počet fázových svazků na fázi	[−]
f_1	Frekvence	[Hz]
h_{d1}	Hloubka statorové drážky	[m]
h_{j1}	Výška jha statoru	[m]
h_{j2}	Výška jha rotoru	[m]
h_m	Výška magnetu	[m]
h_m'	Přepočtená výška magnetu	[m]
h_0	Výška krčku statorové drážky	[m]
h_{01}	Výška drážkového klínu	[m]
h_1	Výška aktivní části statorové drážky	[m]
k_c	Carterův činitel	[−]
k_{dj}	Činitel uvažující vliv nerovnoměrností rozložení toku v magnetickém obvodu	[−]
k_{dz}	Činitel uvažující vliv nerovnoměrností rozložení toku v magnetickém obvodu	[−]
k_f	Koeficient sycení	[−]
k_p	Činitel mechanických ztrát pro malé a střední stroje	$[W \cdot s^2/m^4]$

k_{pt}	Činitel respektující změnu odporu s teplotou	[−]
$k_{prevodovka}$	Převodový poměr	[−]
k_r	Činitel rozlohy	[−]
k_{tok}	Konstanta redukující velikost toku spřaženého s vinutím	[−]
k_v	Činitel vinutí	[−]
k_y	Činitel zkrácení kroku vinutí	[−]
k_B	Činitel tvaru pole	[−]
k_E	Poměr indukovaného a jmenovitého napětí statoru	[−]
k_{Fe}	Činitel plnění železa	[−]
k_β, $k_{\beta'}$	Činitel respektující zkrácení kroku vinutí	[−]
l_{avs}	Střední délka závitu	[m]
l_{cs}	Délka čela statoru	[m]
l_{j1}	Délka střední siločáry jha statoru	[m]
l_{j2}	Délka střední siločáry jha rotoru	[m]
l_m	Délka magnetu	[m]
l_v	Délka vyložení čel	[m]
l_{Fe}	Délka paketu	[m]
l_s	Délka vinutí	[m]
m	Počet fází	[−]
m'	Matematický počet fází	[−]
m_{j1}	Hmotnost statorového jha	[kg]
m_{z1}	Hmotnost zubu statoru	[kg]
n	Otáčky motoru	[ot/min]
n_p	Počet paralelních vodičů	[−]
n_t	Rozloha jedné fáze v počtu buněk Tingleyova schéma	[−]
n_{vrstev}	Počet vrstev	[−]
p	Počet pólových dvojic	[−]
q	Počet drážek na pól a fázi	[−]
r_a	Poměrná hodnota odporu	[−]
r_{buben}	Poloměr bubnu	[m]
t_{d1}	Drážková rozteč	[m]
t_m	Teplotní odolnost magnetu	[°C]
t_p	Pólová rozteč	[m]

t_{pd}	Pólová rozteč v počtu drážek	[−]
$2u$	Počet vrstev vinutí	[−]
$v_{navijeni}$	Rychlost navíjení	[m/s]
v_2	Obvodová rychlost rotoru	[m/s]
$vrstva$	Střední poloměr bubnu s navinutou vrstvou lana	[m]
x_d	Poměrná hodnota reaktance	[−]
y_k	Krok na komutátoru	[−]
y_1	Krok vinutí	[−]
y_{1d}	Cívkový krok v počtu drážek	[−]
y_2	Spojkový krok	[−]
A	Lineární proudová hustota	[A/m]
$A_{konecna}$	Přepočtená lineární proudová hustota	[A/m]
B_{j1}	Magnetická indukce jha statoru	[T]
B_{j2}	Magnetická indukce jha rotoru	[T]
B_m	Magnetická indukce magnetu	[T]
B_r	Remanentní indukce magnetu pro 20 °C	[T]
B_{r_80}	Remanentní indukce magnetu pro 80 °C	[T]
B_s	Velikost výběhu vinutí z drážky	[m]
B_{z1}	Magnetická indukce zubu statoru	[T]
B_{z1max}	Maximální magnetická indukce zubu statoru	[T]
B_δ	Indukce ve vzduchové mezeře	[T]
$B_{\delta_konecne}$	Přepočtená indukce ve vzduchové mezeře	[T]
C	Essonův činitel	[VA/(m^3·ot/min)]
D_v	Průměr vodiče	[m]
D_{1e}	Vnější průměr statoru	[m]
D_{1i}	Vnitřní průměr statoru	[m]
D_{2e}	Vnější průměr rotoru	[m]
D_{2i}	Vnitřní průměr rotoru	[m]
F_m	Výsledný úbytek magnetického napětí na jeden pól pár	[A]
F_{tazna}	Tažná síla	[N]
H_c	Koercivita magnetu pro 20 °C	[A/m]
H_{c_80}	Koercivita magnetu pro 80 °C	[A/m]
H_{j1}	Intenzita jha statoru	[A/m]

H_{j2}	Intenzita jha rotoru	[A/m]
H_m	Intenzita magnetu	[A/m]
H_z	Intenzita zubu statoru	[A/m]
H_δ	Intenzita magnetického pole ve vzduchové mezeře	[A/m]
I_{1N}	Jmenovitý proud statoru	[A]
$\overline{I_{1C}}$	Vektor statorového proudu	[A]
J	Proudová hustota	[A/m^2]
$J_{konecna}$	Přepočtená proudová hustota	[A/m^2]
K	Počet cívek	[−]
K_{civek}	Počet cívek na fázi	[−]
K_d	Poměr vnitřního a vnějšího průměru statoru	[−]
K_v	Činitel vyložení čel	[−]
K_z	Činitel respektující přenos části ztrát do okolí statoru	[−]
K_T	Činitel plnění drážky	[−]
K_1	Počet cívek ve svazku	[−]
L_d	Celková indukčnost	[H]
L_{dif}	Indukčnost diferenčního rozptylu	[H]
L_s	Délka vinutí	[m]
L_σ	Rozptylová indukčnost	[H]
L_1	Hlavní indukčnost	[H]
M	Bod momentové charakteristiky motoru	[Nm]
M_{mot}	Moment motoru	[Nm]
M_{vyst_bubnu}	Výstupní moment bubnu	[Nm]
N_1	Počet závitů	[−]
O_d	Obvod drážky	[m]
P	Bod výkonové charakteristiky motoru	[W]
$P_{ekvivalentni_S3}$	Výkon motoru pro přerušovaný chod	[W]
P_{mot}	Výkon motoru	[W]
P_{prikon_S1}	Příkon motoru pro trvalé zatížení	[W]
P_{prikon_S3}	Příkon motoru pro přerušovaný chod	[W]
P_{vyst_bubnu}	Výstupní výkon bubnu	[W]
P_1	Příkon motoru	[W]

Q_1	Počet drážek	[−]
R_1	Odpor vinutí statoru	[Ω]
S_c	Počet fázových svazků	[−]
S_d	Plocha statorové drážky	[m^2]
S_{efl}	Efektivní průřez vodiče	[m^2]
S_i	Vnitřní zdánlivý výkon	[VA]
$S_{p_ef_S1}$	Zdánlivý příkon motoru pro trvalé zatížení	[VA]
$S_{p_ef_S3}$	Zdánlivý příkon motoru pro přerušovaný chod	[VA]
S_{tel}	Ekvivalentní ochlazovací povrch tělesa	[m^2]
S_v	Průřez vodiče	[m^2]
V_d	Počet vodičů v drážce	[−]
$V_{d'}$	Vypočtený počet vodičů v drážce	[−]
U_0	Napájecí napětí zdroje	[V]
U_f	Fázové napětí střídače	[V]
U_i	Indukované napětí	[V]
$\overline{U_{ic}}$	Vektor indukovaného napětí	[V]
U_{sdr}	Sdružené napětí střídače	[V]
X_d	Podélná reaktance	[Ω]
X_{1d}	Hlavní reaktance	[Ω]
$X_{1\sigma}$	Rozptylová reaktance	[Ω]
Z_d	Velikost impedance	[Ω]
$\overline{Z_{dc}}$	Vektor impedance	[Ω]
Z_n	Jmenovitá impedance	[Ω]
α_p	Pólové krytí magnetu	[−]
α_v	Součinitel přestupu tepla	[$W/(m^2 \cdot K)$]
α_{Br}	Koeficient poklesu remanentní indukce při změně teploty	[%/°C]
α_{Cu}	Teplotní součinitel elektrického odporu	[K^{-1}]
α_{Hc}	Koeficient poklesu koercivní intenzity při změně teploty	[%/°C]
α_δ	Činitel pólového krytí	[−]
α_1	Součinitel přestupu tepla z povrchu stroje	[$W/(m^2 \cdot K)$]
β	Zkrácení kroku vinutí	[−]
β	Zátěžný úhel	[rad]

β_{moment}	Zátěžný úhel pro vykreslení momentové a výkonové charakteristiky	[rad]
γ	Koeficient pro výpočet Carterova činitele	[−]
δ	Velikost vzduchové mezery	[m]
δ'	Součin velikosti vzduchové mezery a Carterova činitele	[m]
δ''	Velikost vzduchové mezery navýšená o Carterův činitel a koeficient sycení	[m]
δ_{ef}	Efektivní hodnota velikosti vzduchové mezery	[m]
η	Účinnost motoru	[−]
$\eta_{konecna}$	Přepočtená účinnost motoru	[−]
η_{prevod}	Účinnost převodovky	[−]
λ	Štíhlostní poměr	[−]
λ_c	Činitel magnetické vodivosti rozptylu čel	[−]
λ_d	Činitel magnetické vodivosti rozptylu drážek	[−]
λ_{ekv}	Střední ekvivalentní tepelná vodivost drážkové izolace	[W/(m·K)]
λ_i	Střední tepelná vodivost izolace vsypávaného vinutí	[W/(m·K)]
μ_r	Relativní permeabilita	[−]
μ_0	Permeabilita vakua	[H/m]
ξ	Činitel bezpečnosti ve fázi	[−]
ρ	Úhel mezi vektory $\overline{Z_d} \cdot \overline{I_{1c}}$, $X_d \cdot \overline{I_{1c}}$	[rad]
ρ_s	Rezistivita mědi při 100 °C	[Ω/m]
ρ_{Cu}	Rezistivita mědi při 20 °C	[Ω]
ρ_{PFe}	Hustota železa	[kg/m^3]
τ_{dif}	Činitel diferenčního rozptylu	[−]
φ	Fázový posun proudu	[rad]
ω_{bubnu}	Úhlová rychlost bubnu	[rad/s]
ω_{mot}	Úhlová rychlost motoru	[rad/s]
ω_s	Synchronní úhlová rychlost	[rad/s]
Δ_{p15}	Měrné ztráty v železe	[W/kg]
Δt	Rozdíl teplot	[°C]
ΔP	Celkové ztráty motoru	[W]
ΔP_d	Přídavné ztráty motoru	[W]
ΔP_{Fe}	Ztráty v železe statoru	[W]

ΔP_{j1}	Jouleovy ztráty ve vinutí statoru	[W]
ΔP_{jc1}	Jouleovy ztráty v čelech cívek statoru	[W]
ΔP_{jd1}	Jouleovy ztráty v drážkách statoru	[W]
ΔP_{mech}	Mechanické ztráty motoru	[W]
ΔT_{izc}	Teplotní spád na tloušťce izolace čel statorového vinutí	[°C]
ΔT_{izd}	Teplotní spád v izolaci drážkové části statorového vinutí	[°C]
ΔT_{povc}	Oteplení vnějšího povrchu izolace čel vinutí nad teplotu vzduchu uvnitř stroje	[°C]
ΔT_{vin}	Oteplení statorového vinutí nad teplotu okolního vzduchu	[°C]
ΔT_{vinuti}	Střední oteplení statorového vinutí nad teplotu vzduchu uvnitř stroje	[°C]
ΔT_{vz}	Oteplení vzduchu ve stroji nad teplotu okolí	[°C]
ΔT_{Fe}	Oteplení vnitřního povrchu statoru na teplotu vzduchu uvnitř stroje	[°C]
ΔU_{j1}	Úbytek magnetického napětí ve jhu statoru	[A]
ΔU_{j2}	Úbytek magnetického napětí ve jhu rotoru	[A]
ΔU_{z}	Úbytek magnetického napětí v zubu statoru	[A]
ΔU_{δ}	Úbytek magnetického napětí ve vzduchové mezeře	[A]
Σ_{Pout}	Součet ztrát odváděných do vzduchu uvnitř stroje	[W]
ϕ	Magnetický tok	[Wb]
$\phi_{konecne}$	Přepočtený magnetický tok	[Wb]

Úvod

V dřívějších dobách byly synchronní stroje používány zejména v režimu generátoru pro přeměnu energie na elektřinu. Současná aplikace synchronních strojů je rozmanitější. Synchronní stroje jsou používány v aplikacích, pro které se dříve používaly stejnosměrné a krokové motory. Větší míře aplikací synchronních strojů napomohl dlouhodobý vývoj v různých oblastech elektrotechniky, zejména v oblasti materiálového inženýrství, výkonové elektroniky a regulační techniky. Konstrukční změny přinesly permanentní magnety, které nahradily budící rotorové vinutí a vyřešily problém s přívodem napájení do rotoru. Přesto permanentní magnety nejsou dokonalé a jejich použití má své výhody i nevýhody.

Návrh elektrických strojů je dlouhý proces. Pro návrh elektrických strojů se používají osvědčené postupy v kombinaci se zkušenostmi návrhářů a společností zabývajících se vývojem. Simulační software a CAD systémy ulehčují a urychlují vývoj nových strojů. Použitím softwaru lze odhalit nedostatky v návrhu a provádět iterace výpočtů, které nedostatky odstraní. Nicméně i s použitím software při návrzích je nutné provádět prototypování a zkoušky.

V první části práce je uveden stručný popis konstrukce synchronního stroje, permanentních magnetů a porovnání synchronních strojů s permanentními magnety se synchronními stroji s budícím vinutím. Druhá část práce popisuje výsledky provedené rešerše elektrických motorů použitých pro lanové navijáky motorových vozidel. Třetí část práce se týká elektromagnetického návrhu synchronního motoru s permanentními magnety. Návrh stroje uvedený v mé práci odpovídá podstatnou částí návrhu asynchronního stroje, který byl probrán v rámci bakalářského studia. Jedná se o návrh statoru, vinutí a drážek. Návrh stroje je doplněn o zjednodušený výpočet oteplení stroje, který opět odpovídá postupu pro asynchronní stroj. Návrh stroje a následné iterace návrhu byly kontrolovány pomocí simulačního softwaru ANSYS. Poslední částí práce je nakreslený 3D model vytvořený v programu SOLIDWORKS.

1 Synchronní stroje s permanentními magnety

Synchronní stroje s permanentními magnety se vyskytují v několika provedeních. Klasickým uspořádáním stroje je stator s vinutím uloženým v drážkách a vnitřním rotorem. Rotor je osazen permanentními magnety. Rotor lze odlehčit pomocí dutin, které neovlivní magnetický tok uzavřený v povrchových vrstvách rotoru. Lze se setkat s uspořádáním stroje v podobě vnějšího rotoru a vnitřního statoru, které se používá pro individuální pohony kol. Existuje i uspořádání stroje s otočným statorem i rotorem. [3]

Použití permanentních magnetů oproti budícímu vinutí přináší výhody v podobě absence zdroje budícího proudu s problematickým přívodem proudu do rotoru a ztrát v buzení. Stroje s permanentními magnety dosahují menších objemů, jelikož magnety jsou zdrojem velikého magnetického toku. Nedostatky PMSM spočívají v nákladech na pořízení magnetů, možnosti odmagnetování magnetů vlivem teploty či poruchy, nemožnosti stroj odbuzovat a náročnější technologii výroby a oprav. [3]

Permanentní magnety jsou rozděleny do segmentů o rozměrech v desetinách, maximálně jednotkách centimetrů, přesto mohou být i v celku. Dělení do segmentů ovlivňují rozměry stroje a způsob uložení magnetů. Magnety jsou zhotoveny ze speciálních slitin. Indukce magnetů se pohybuje v rozmezí 0,8 až 1,2 T. Magnety mění své vlastnosti v závislosti na teplotě. S rostoucí teplotou dochází k poklesu magnetismu. Magnety usazené na povrchu rotoru se k rotoru upevňují lepením a často se omotávají bandáží ze skelných či uhlíkových vláken. Uchycení magnetů lze provést se zmagnetovaným magnetem, usazení magnetů ale bude obtížnější kvůli působícím magnetickým silám. Druhá možnost spočívá v montáži nezmagnetovaných magnetů, která se používá pro výrobu větších sérií. Magnety se po montáži zmagnetují za použití speciálních přípravků. [3]

Synchronní stroje nalézají své uplatnění v trakčních pohonech kolejových i nekolejových vozidel, pomocných pohonech s výkony do jednotek wattů a v systémech se spalovacím motorem. [3]

2 Rešerše

Před samotným návrhem motoru bylo nutné provést průzkum trhu s elektrickými navijáky. Cílem rešerše bylo zjistit údaje o mechanických a elektrických parametrech navijáků, druhu elektrického motoru a době plného provozu. Rešerši jsem prováděl prostřednictvím webových stránek prodejců s garážovou technikou a hobby nářadím. Bohužel tyto stránky často uváděly minimum údajů o nabízených produktech, ze kterých by bylo nemožné stanovit počáteční mechanické parametry pro výpočet motoru. Na stránkách prodejců se také často nenacházel datasheet k nabízenému produktu.

Kvůli potřebě získat co nejvíce technických údajů o navijákové technice jsem se rozhodl hledat údaje na webových stránkách výrobců a firemních distributorů pro Českou republiku. Na těchto stránkách bylo možné najít datasheety nabízených produktů s potřebnými údaji.

Při rešerši jsem vyhledával navijáky určené k montáži na vozidlo a také elektrické navijáky dimenzované na sítové napětí. Dokumenty k navijákům s možností montáže na vozidlo neobsahovaly údaje o způsobu provozu a třídě ochran, ale podařilo se mi je nalézt u produktů dimenzovaných na síťové napětí.

Zaznamenal jsem následující parametry:

Mechanické:

- maximální nosnost,
- převodový poměr,
- tažná síla,
- rozměry zařízení,
- rychlost tahu,
- hmotnost zařízení.

Elektrické:

- výkon,
- napájecí napětí,
- jmenovitý proud.

Ostatní:

- druh provozu,
- třída ochrany.

Při rešerši jsem také hledal informace o použitých motorech, převodovkách a lanech.

Navijáky mohou využívat šnekovou převodovku, která je spolehlivá a odolná. Nejvíce se používají převodovky planetové, které mají malé rozměry, nízkou hmotnost a cenu. Nevýhodou této převodovky je však častá instalace brzdy uvnitř bubnu, která způsobuje ohřev bubnu. Vlivem ohřevu bubnu je nutné provozovat naviják v přerušovaném chodu. [1]

Navijáky často využívají ocelových lan, která zvyšují celkovou hmotnost zařízení. Výhodou ocelových lan je odolnost proti mechanickému poškození při provozu navijáku a vysoká odolnost vůči oteplení zařízení. Lze použít lana syntetická, která jsou dražší a náchylnější na poškození oproti lanům ocelovým. Syntetická lana jsou oproti ocelovým lanům lehčí. [1]

Převážná většina elektrických navijáků využívá pro svůj pohon synchronních strojů s permanentními magnety. Jedná se o levnější řešení, které je více náchylné na provozní podmínky a teplotu. Lze také využít stejnosměrné stroje se sériovým vinutím. [1]

Motory v navijácích jsou dimenzované na provoz v krátkých intervalech. Navijáky určené pro montáž na vozidla odebírají ze zdroje proud v řádech desítek A. Tento proud má nezanedbatelné tepelné účinky, které by mohly vést k destrukci motoru při trvalém zatížení motoru. Navijáky provozujeme v přerušovaném chodu, který umožní odvod ztrátového tepla. Provoz motoru v periodicky přerušovaném provozu neumožňuje stroji vychladnout na teplotu okolí. K destrukci motoru vlivem přehřátí může dojít i při provozu nezatíženého navijáku (např. při dlouhodobém navíjení odvinutého lana bez uvázaného břemene). Datasheety navijáků uvádějí provoz v kategorii zatížení S3 při 15−25 % doby provozu. S3 udává periodický přerušovaný provoz, při kterém se pravidelně střídají doby vypnutí a provozu motoru. [1] [2]

V průběhu rešerše jsem zjistil, že s měnícím se počtem vrstev lana navinutého na bubnu se mění tažná síla. S rostoucí vrstvou lana se jmenovitá tažná síla snižuje. S měnícím se zatížením lana se také mění odebíraný proud a rychlost navíjení.

Výsledky rešerše jsou uvedeny v tabulce 2-1. Tabulka neobsahuje veškeré produkty nalezené a zapsané při rešerši, ale pouze výčet produktů dimenzovaných na zatížení blízké navrhovanému stroji.

Tabulka 2-1 Elektrické navijáky nalezené při rešerši

Označení	Golemwinch 3500	DV 3500i	1800/12	Badger 2500H	HT690008
Výrobce	Golemtech	Comeup	Gude	Ramsey Winch	Hoteche
Tažná síla [kg]	1600	1588	1800	1133	1361
Výkon [W]	1200	900	–	671,13	1000
Napětí [V]	12	12/24	12	12	12
Převodový poměr	153/1	170/1	–	136/1	153/1
Délka [mm]	334	423	270	335	300
Šířka [mm]	110	93	295	114	103,5
Výška [mm]	120	153	200	121	106
Rychlost navíjení [m/min]	1,75	1,8	1,8	2,3	0,7
Hmotnost [kg]	10	13,9	15	12	9,3
Jmenovitý proud [A]	169	300/180	15–25	140	150
Třída ochrany	–	–	IP 54	–	–
Cena s DPH [Kč]	5323	13298	3190	14145	3878

3 Návrh synchronního motoru s permanentními magnety

3.1 Určení výkonu a otáček stroje z mechanického výpočtu

Na základě dat získaných z rešerše jsme s vedoucím bakalářské práce stanovili počáteční parametry nutné pro započetí mechanického výpočtu.

Volené parametry pro mechanický výpočet:

- Rychlost navíjení $v_{navijeni}$ = 1,2 m/min
- Tažná síla F_{tazna} = 1500 kg
- Průměr bubnu d_{buben} = 75 mm
- Účinnost převodovky η_{prevod} = 95 %
- Počet vrstev navinutého lana n_{vrstev} = 5
- Průměr lana d_{lano} = 4,8 mm
- Převodový poměr $k_{prevodovka}$ = 1:153

Distributoři navijáků uvádějí tažnou sílu v kg. Tažnou sílu uvádím mezi volenými parametry také v kg, jelikož síla v kg umožňuje snadnější představu o možné zatížitelnosti stroje břemenem. Ve výpočtech je tažná síla uvedena v N.

Při výpočtech uvažuji konstantní tažnou sílu ve všech vrstvách navinutého lana. Průměr lana jsem zvolil na základě dat k produktu Golemwinch 1,6 t. Výrobce tohoto navijáku udává tažnou sílu zařízení 1600 kg. Lano navijáku Golemwinch 1,6 t má průměr 4,8 mm.

Střední poloměr bubnu s navinutou 1. vrstvou lana:

$$vrstva_1 = r_{buben} + \frac{1}{2} \cdot d_{lano} = 0{,}0375 + \frac{1}{2} \cdot 0{,}0048 = 0{,}0399 \text{ m} \tag{3.1}$$

Střední poloměr bubnu s 2. až 5. navinutou vrstvou:

$$vrstva_i = vrstva_{i-1} + d_{lano} \quad \text{Pro i = 2:5} \tag{3.2}$$

Úhlová rychlost bubnu:

$$\omega_{bubnuj} = \frac{v_{navijeni}}{vrstva_j} \quad \text{Pro j = 1:5} \tag{3.3}$$

$v_{navijeni}$ je přepočtena z m/min na m/s.

Výstupní moment bubnu:

$$M_{vyst_bubnuj} = F_{tazna} \cdot vrstva_j \tag{3.4}$$

Výstupní výkon bubnu:

$$P_{vyst_bubnu} = F_{tazna} \cdot v_{navijeni} = 14715 \cdot 0{,}02 = 294{,}3\ \text{W} \tag{3.5}$$

Úhlová rychlost motoru:

$$\omega_{motj} = k_{prevodovka} \cdot \omega_{bubnuj} \tag{3.6}$$

Moment motoru:

$$M_{motj} = \frac{M_{vyst_bubnuj}}{k_{prevodovka} \cdot \eta_{prevod}} \tag{3.7}$$

Výkon motoru:

$$P_{motj} = M_{motj} \cdot \omega_{motj} \tag{3.8}$$

Otáčky motoru:

$$n_j = \frac{\omega_{motj} \cdot 30}{\pi} \tag{3.9}$$

Všechny výše uvedené parametry jsem vypočítal pro každou vrstvu.

Tabulka 3-1 Vypočtené parametry v jednotlivých vrstvách

vrstva [–]	1	2	3	4	5
poloměr [m]	0,0399	0,0477	0,0495	0,0543	0,0591
ω_{bubnu} [rad/s]	0,5013	0,4474	0,4040	0,3683	0,3384
M_{vyst_bubnu} [Nm]	587,1	657,8	728,4	799,0	869,7
P_{vyst_bubnu} [W]	294,3	294,3	294,3	294,3	294,3
ω_{mot} [rad/s]	76,69	68,46	61,82	56,36	51,78
M_{mot} [Nm]	4,039	4,525	5,011	5,497	5,983
P_{mot} [W]	309,8	309,8	309,8	309,8	309,8
n [ot/min]	732,4	653,7	590,3	538,1	494,4

Motor je navrhován pro pátou vrstvu navinutého lana na buben navijáku, které odpovídají otáčky motoru n = 494,4 ot/min, výkon P_{mot} = 309,8 W a moment motoru M_{mot} = 5,983 Nm.

3.2 Zvolené parametry, výpočet ekvivalentního zatížení stroje a napětí střídače

Z mechanického výpočtu jsem získal velikost otáček a obvodové rychlosti motoru. Dále bylo potřeba stanovit parametry stroje pro následující výpočty. Parametry stroje jsem zvolil na konzultaci s panem Laksarem. V průběhu návrhu stroje bylo nutné volené parametry pozměnit kvůli výsledkům výpočtů. Například první zvolená hodnota proudové obvodové hustoty byla příliš veliká a stroj by se neuchladil. Nejvíce jsem měnil hlavní parametry při iteraci výpočtů, kdy jsem se snažil o zmenšení rozdílu mezi vypočtenými a volenými parametry účiníku *cos(φ)* a účinnosti η. Hodnoty uvedené v tabulce odpovídají poslední iteraci výpočtu.

Volené parametry stroje:

Tabulka 3-2 Tabulka volených parametrů

B_δ [T]	k_{tok} [–]	A [A/m]	J [A/m^2]	$cos(\varphi)$ [–]	η [–]	k_v [–]	k_B [–]
0,8	0,95	22000	$2{,}3 \cdot 10^6$	0,985	0,83	0,866	$\frac{\pi}{2 \cdot \sqrt{2}}$

α_δ [–]	p [–]	D_{1e} [m]	q [–]	n [ot/min]	ω_s [rad/s]	*krytí*
$\frac{2}{\pi}$	4	0,12	0,5	494,4	51,78	IP 54

Volené parametry jsou v pozdějších fázích návrhu ověřovány výpočtem.

Součin konstanty k_{tok} s hodnotou B_δ vyjadřuje umělé snížení indukce ve vzduchové mezeře o 5 % rozptylového magnetického toku. Rozptyl byl zahrnut do návrhu při kontrole výsledků získaných z vytvořeného skriptu s analýzou v simulačním programu Ansys Electronics. Rozptyl magnetického toku zavedený do návrhu snížil rozdíl mezi hodnotami indukovaného napětí získaných ze skriptu a simulačního programu. Přepočtem vyšla velikost magnetické indukce ve vzduchové mezeře $B_\delta = 0{,}76$ T.

Zvolené otáčky a volená synchronní úhlová rychlost odpovídají vypočteným parametrům z mechanického výpočtu pro pátou vrstvu navinutého tažného lana na navíjecím bubnu.

Stupeň krytí IP 54 používaný pro navijáky brání vniknutí prachu částečně a úplnému vniknutí drobných nástrojů. Zvolené krytí chrání před vniknutím stříkající vody ze všech směrů.

Z mechanického výpočtu jsem vypočítal velikost potřebného výkonu motoru na hřídeli stroje, který vyšel P_{mot} = 309,8 W. Stroj, který ve své bakalářské práci navrhuji, musí pracovat s ekvivalentním zatížením. Provoz navijáků spadá do kategorie S3 pracovního zatížení. Přepočet výkonu do kategorie zatížení S3 umožní provést návrh pro nižší hodnotu výkonu. Stroj vypočtený pro kategorii zatížení S3 může nabývat menších rozměrů, než stroj navrhovaný pro kategorii zatížení S1. Zatížení v S3 uvažuje periodicky opakující se intervaly. Pro návrh uvažuji 10minutové intervaly rozdělené na 2minutovou dobu chodu stroje a 8minutovou dobu vypnutí stroje. Navrhovaný stroj tedy odpovídá zatížení S3 20 %.

Při návrhu jsem vyčíslil hodnoty výkonů, příkonů a zdánlivých příkonů pro oba druhy zatížení.

Příkon motoru pro periodicky přerušovaný chod:

$$P_{prikon_S3} = \frac{P_{mot}}{\eta} = \frac{309{,}8}{0{,}83} = 373{,}2\ \text{W} \tag{3.10}$$

Zdánlivý příkon motoru pro periodicky přerušovaný chod:

$$S_{p_ef_S3} = \frac{P_{prikon_S3}}{\cos(\varphi)} = \frac{373{,}2}{0{,}985} = 378{,}9\ \text{VA} \tag{3.11}$$

Výkon motoru pro ekvivalentní zatížení:

$$P_{ekvivalentni_S1} = \sqrt{P_{mot}^2 \cdot \frac{2}{10}} = \sqrt{309{,}8^2 \cdot \frac{2}{10}} = 138{,}5\ \text{W} \tag{3.12}$$

Příkon motoru pro ekvivalentní zatížení:

$$P_{prikon_S1} = \frac{P_{ekvivalentni_S1}}{\eta} = \frac{138{,}5}{0{,}83} = 166{,}9\ \text{W} \tag{3.13}$$

Zdánlivý příkon motoru pro ekvivalentní zatížení:

$$S_{p_ef_S1} = \frac{P_{prikon_S1}}{\cos(\varphi)} = \frac{166{,}9}{0{,}985} = 169{,}5\ \text{VA} \tag{3.14}$$

Navrhovaný motor je určen pro použití na vozidlech. Napájení motoru bude obstarávat autobaterie s jmenovitým napětím U_0 = 12 V. Motor bude napájen ze střídače napětí. Připojení střídače umožní řízení motoru.

Fázové napětí motoru:

$$U_f = \frac{\xi \cdot U_0}{\sqrt{2} \cdot \sqrt{3}} = \frac{0{,}9 \cdot 12}{\sqrt{2} \cdot \sqrt{3}} = 4{,}409 \text{ V} \tag{3.15}$$

Činitel bezpečnosti ve fázi $\boldsymbol{\xi}$ byl volen z intervalu 0,8–0,9.

3.3 Určení hlavních rozměrů

V této části se věnuji výpočtům vedoucím k vyčíslení rozměrů statoru, vnitřního výkonu stroje a indukovaného napětí v obvodu statoru.

Zdánlivý vnitřní výkon elektrických střídavých strojů je určen výkonovou rovnicí v následujícím tvaru:

$$S_i = C \cdot D_{1i} \cdot l_{Fe} \cdot n \tag{3.16}$$

Otáčky stroje jsem již stanovil, ale ostatní veličiny ve výkonové rovnici jsou zatím neznámé a musíme je teprve stanovit. První vypočteme Essonův činitel využití stroje. Essonův činitel vyjadřuje jednotkový výkon vztažený k jednotce objemu a jedné otáčce za minutu.

Essonův činitel:

$$C = \frac{\pi^2 \cdot \alpha_\delta \cdot k_B \cdot k_v \cdot A \cdot B_\delta}{60} = \\ = \frac{\pi^2 \cdot \frac{2}{\pi} \cdot \frac{\pi}{2 \cdot \sqrt{2}} \cdot 0{,}866 \cdot 2{,}2 \cdot 10^4 \cdot 0{,}76}{60} = 1{,}684 \cdot 10^3 \ \frac{\mathrm{VA}}{\mathrm{m^3} \cdot \frac{\mathrm{ot}}{\mathrm{min}}} \tag{3.17}$$

Vnitřní průměr statoru:

$$D_{1i} = K_d \cdot D_{1e} = 0{,}49 \cdot 0{,}12 = 0{,}0588 \ \mathrm{m} \tag{3.18}$$

Poměr vnitřního a vnějšího průměru statoru K_d = 0,49 jsem volil po konzultaci s vedoucím bakalářské práce. Tato hodnota se volí v rozmezí 0,5–0,6 pro stroje s permanentními magnety. Konstanta K_d byla zvolena mimo toto rozmezí v průběhu iterace. Důvodem bylo dosažení činitele plnění drážky K_T blízkého hodnotě 0,4.

Pólová rozteč:

$$t_p = \frac{\pi \cdot D_{1i}}{2 \cdot p} = \frac{\pi \cdot 0{,}0588}{2 \cdot 4} = 0{,}0231 \ \mathrm{m} \tag{3.19}$$

Vnitřní zdánlivý výkon:

$$S_i = S_{p_ef_S1} \cdot k_E = 169{,}5 \cdot 0{,}874 = 148{,}1 \text{ VA} \tag{3.20}$$

Poměr indukovaného napětí vinutí statoru k jmenovitému napětí k_E byl volen z intervalu 0,8–0,9. V průběhu iteračního výpočtu docházelo k změnám parametru k_E a jeho konečná velikost se ustálila na hodnotě k_E = 0,874. Ve fázorovém diagramu jsem parametrem k_E nastavoval fázor proudu a indukovaného napětí do fáze.

Délka paketu je již poslední neznámou ve výkonové rovnici, ze které délku paketu vyjádřím.

Délka paketu:

$$l_{Fe} = \frac{S_i}{C \cdot n \cdot D_{1i}^2} = \frac{148{,}1}{1{,}684 \cdot 10^3 \cdot 494{,}4 \cdot 0{,}0588^2} \doteq 0{,}0514 \text{ m} \tag{3.21}$$

Stator synchronního stroje je složen z navzájem odizolovaných plechů tlustých cca 0,5 mm. Navržený stroj bude obsahovat 103 plechů. Celková délka stroje bude 0,0515 m. Navrhovaný stroj nebude obsahovat radiální ventilační kanály a bude složen z jednoho paketu. Vlivem absence radiálních ventilačních kanálů mohu psát $l_l = l_{Fe}$, kde l_l značí celkovou konstrukční délku statoru. Radiální ventilační kanály se navrhují pro stroje s délkou svazku větší 250 až 300 mm. [4]

Indukované napětí:

$$U_i = k_E \cdot U_f = 0{,}874 \cdot 4{,}409 = 3{,}854 \text{ V} \tag{3.22}$$

3.4 Určení počtu drážek

Před výpočtem vinutí a rozměrů drážek je nutné stanovit počet drážek a parametry týkající se vodiče pro vinutí.

Počet drážek:

$$Q_1 = 2 \cdot p \cdot q \cdot m = 2 \cdot 4 \cdot \frac{1}{2} \cdot 3 = 12 \tag{3.23}$$

Počet fází $m = 3$.

Drážková rozteč:

$$t_{d1} = \frac{\pi \cdot D_{1i}}{Q_1} = \frac{\pi \cdot 0{,}0588}{12} = 0{,}0154 \text{ m} \tag{3.24}$$

Jmenovitý proud statoru:

$$I_{1N} = \frac{S_{p_ef_S1}}{m \cdot U_f} = \frac{169{,}5}{3 \cdot 4{,}409} = 12{,}81 \text{ A} \tag{3.25}$$

Frekvence:

$$f_1 = \frac{\omega_s \cdot p}{2 \cdot \pi} = \frac{51{,}78 \cdot 4}{2 \cdot \pi} = 32{,}96 \text{ Hz} \tag{3.26}$$

Vypočtený počet vodičů v drážce:

$$V_d' = \frac{\pi \cdot D_{1i} \cdot A}{I_{1N} \cdot Q_1} = \frac{\pi \cdot 0{,}0588 \cdot 2{,}2 \cdot 10^4}{12{,}81 \cdot 12} = 26{,}43 \tag{3.27}$$

Počet vodičů v drážce:

$$V_d = a \cdot V_d' = 1 \cdot 26{,}43 \doteq 26 \tag{3.28}$$

Na konzultaci s vedoucím bakalářské práce jsme se dohodli na použití dvouvrstvého vinutí ve statoru. Výsledný počet vodičů v drážce musí být číslo celé a dělitelné dvěma. Výsledek je zaokrouhlen na nejbližší celé sudé číslo. Počet paralelních větví a byl zvolen $a = 1$. Počet paralelních větví se volí tak, aby počet vodičů v drážce vyžadoval nepatrnou změnu a splňoval uvedené podmínky. [4]

Návrh stroje je proveden pro zubové vinutí, které odpovídá smyčkovému vinutí s krokem rovným 1. Zubové vinutí má oproti postupnému vinutí s krokem větším než 1 malou délku čel vinutí. Zubová vinutí bývají standartně dvouvrstvá. Vinutí použité v návrhu vytvoří točivé magnetické pole ve tvaru trojúhelníku. Nevýhodou tohoto stroje budou značné pulzace magnetického napětí, jelikož tvar pole je velice vzdálen od kruhu.

Počet závitů:

$$N_1 = \frac{V_d \cdot Q_1}{2 \cdot a \cdot m} = \frac{26 \cdot 12}{2 \cdot 1 \cdot 3} = 52 \tag{3.29}$$

Přepočtená lineární proudová hustota:

$$A_{konecna} = \frac{2 \cdot m \cdot N_1 \cdot I_{1N}}{\pi \cdot D_{1i}} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 52 \cdot 12{,}81}{\pi \cdot 0{,}0588} = 2{,}164 \cdot 10^4 \text{ A/m} \tag{3.30}$$

Hodnota přepočtené proudové hustoty se může nepatrně lišit od hodnoty volené před započetím výpočtu. Zvolená hodnota proudové hustoty $A = 2{,}2 \cdot 10^4$ A/m. Přepočtená hodnota se od volené liší přibližně o dvě procenta. Rozdíl je tedy minimální a požadavek byl splněn. [4]

Magnetický tok:

$$\Phi = \alpha_\delta \cdot B_\delta \cdot t_p \cdot l_{Fe} = \frac{2}{\pi} \cdot 0{,}76 \cdot 0{,}0231 \cdot 0{,}0515 = \\ = 5{,}754 \cdot 10^{-4} \text{ Wb} \tag{3.31}$$

Přepočtená proudová hustota:

$$J_{konecna} = \frac{A \cdot J}{A_{konecna}} = \frac{2{,}2 \cdot 10^4 \cdot 2{,}3 \cdot 10^6}{2{,}164 \cdot 10^4} = 2{,}338 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2 \tag{3.32}$$

Hodnota přepočtené proudové hustoty se opět liší přibližně o dvě procenta od hodnoty proudové hustoty volené v začátku návrhu, což ukazuje na správnost návrhu.

Efektivní průřez vodiče:

$$S_{ef1} = \frac{I_{1N}}{a \cdot J_{konecna}} = \frac{12{,}81}{1 \cdot 2{,}338 \cdot 10^6} = 5{,}479 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \tag{3.33}$$

Průřez vodiče:

$$S_v = \frac{S_{ef1}}{n_p} = \frac{5{,}479 \cdot 10^{-6}}{8} = 6{,}848 \cdot 10^{-7}\ \mathrm{m}^2 \tag{3.34}$$

Pro navrhovaný stroj uvažuji použití strojního navíjení. Vodiče pro strojní navíjení mají maximální průměr 1,4 mm. Průměr efektivního vodiče by byl vetší než dovolená maximální hodnota průměru vodiče pro strojní navíjení. Zmenšení průměru vodiče docílíme rozdělením efektivního vodiče na vodiče dílčí, které se navzájem paralelně propojí.

Počet paralelních vodičů n_p volíme nejvýše 12. Vyšší počet paralelních větví způsobuje náročnější výrobu. Počet paralelních vodičů se snažíme zvolit co nejnižší. Pro výpočet jsem volil $n_p = 8$. [4]

Průměr vodiče:

$$D_v = \sqrt{\frac{S_v \cdot 4}{\pi}} = \sqrt{\frac{6{,}848 \cdot 10^{-7} \cdot 4}{\pi}} = 0{,}9338 \cdot 10^{-3}\ \mathrm{m} \tag{3.35}$$

Průměr vodiče D_v jsem zvolil z normovaných velikostí. Výsledná velikost průměru vodiče D_v je 1 mm a splňuje požadavek na průměr vodiče pro strojní navíjení.

3.5 Návrh statorového vinutí

Podkapitola návrh vinutí shrnuje postup výpočtu zubového dvouvrstvého vinutí. Postup návrhu vinutí vychází z návrhu vinutí pro stroje stejnosměrné. Cílem návrhu vinutí je získat činitel vinutí, počet cívek na fázi a údaje o cívkových krocích. Po provedení návrhu se vynáší pilové schéma a Tingleyovo schéma, která znázorňují zapojení vinutí a jeho rozložení v drážkách.

Krok vinutí:

$$y_1 = 2u \cdot y_{1d} + 1 = 2 \cdot 1 + 1 = 3 \tag{3.36}$$

Pro dvouvrstvé vinutí je počet vrstev vinutí $2u = 2$. Cívkový krok v počtu drážek pro zubová vinutí je roven $y_{1d} = 1$. Krok vinutí byl zkrácen, aby bylo možné vinutí do drážek navinout.

Krok na komutátoru:

$$y_k = \frac{a_{ss}}{p} = \frac{4}{4} = 1 \tag{3.37}$$

Stejnosměrný počet paralelních větví $a_{ss} = 4$.

Spojkový krok:

$$y_2 = 2 \cdot y_k - y_1 = 2 \cdot 1 - 3 = -1 \tag{3.38}$$

Počet cívek na fázi:

$$K_{civek} = \frac{K}{m} = \frac{12}{3} = 4 \tag{3.39}$$

Počet cívek K pro dvouvrstvá vinutí musí být roven počtu drážek Q_l.

Počet fázových svazků:

$$S_c = m' \cdot a_{ss} = 6 \cdot 4 = 24 \tag{3.40}$$

m' je matematický počet fází rozstříhaného vinutí.

Počet fázových svazků na fázi:

$$f_f = \frac{S_c}{m} = \frac{24}{3} = 8 \tag{3.41}$$

Počet cívek ve svazku:

$$K_1 = \frac{K}{m' \cdot a_{ss}} = \frac{12}{6 \cdot 4} = 0{,}5 \tag{3.42}$$

Pólová rozteč v počtu drážek:

$$t_{pd} = \frac{Q_1}{2 \cdot p} = \frac{12}{2 \cdot 4} = 1{,}5 \tag{3.43}$$

Zkrácení kroku vinutí:

$$\beta = \frac{y_{1d}}{t_{pd}} = \frac{1}{1{,}5} = 0{,}6667 \tag{3.44}$$

Zubové vinutí spadá do kategorie zlomkových vinutí, která lze řešit pomocí Tingleyova schéma. Tingleyovo schéma zobrazuje informace o vinutí v tabulce 3-3, kde jednotlivá políčka představují drážky pro vinutí. Počet drážek na pól a fázi q je pro zlomková vinutí vyjádřen zlomkem.

Počet drážek na pól a fázi:

$$q = \frac{n_t}{c} = \frac{1}{2} \tag{3.45}$$

c udává drážkovou rozteč v počtu buněk schématu. n_t vyjadřuje rozlohu jedné fáze v počtu buněk tabulky. Počet pólů $2p$ udává počet řádek tabulky. Součin rozlohy jedné fáze v počtu buněk n_t s počtem fází m udává počet sloupců tabulky. [4]

Zbývá stanovit činitel rozlohy, činitel zkrácení kroku vinutí a činitel vinutí.

Činitel rozlohy:

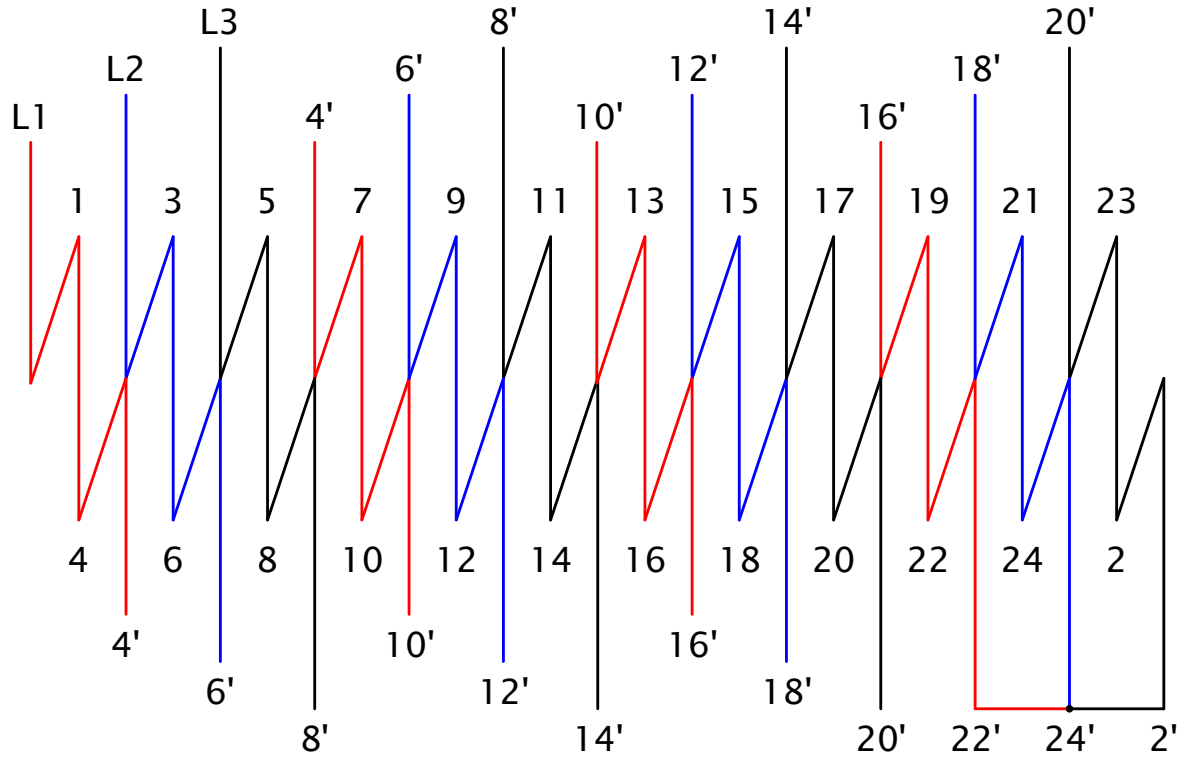
$$k_r = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2 \cdot m}\right)}{n_t \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2 \cdot m \cdot nt}\right)} = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2 \cdot 3}\right)}{1 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2 \cdot 3 \cdot 1}\right)} = 1 \tag{3.46}$$

Činitel zkrácení kroku vinutí:

$$k_y = \sin\left(\frac{y_{1d}}{t_{pd}} \cdot \frac{\pi}{2}\right) = \sin\left(\frac{1}{1{,}5} \cdot \frac{\pi}{2}\right) = 0{,}866 \tag{3.47}$$

Činitel vinutí:

$$k_v = k_r \cdot k_y = 1 \cdot 0{,}866 = 0{,}866 \tag{3.48}$$



Obrázek 3-1 Pilové schéma statorového vinutí. L1, L2, L3 označuje jednotlivé fáze. Čísla s čárkou označují konkrétní konec vinutí, ze kterého je veden vodič na začátek následujícího vinutí (př. 4‘ označuje propojení konce vinutí v drážkové straně č.4 s začátkem vinutí v drážkové straně č.7).

Tabulka 3-3 Tingleyovo schéma znázorňující statorové vinutí

L1 L1'	L3' L3	L2 L2'
1 2		3 4
	5 6	
7 8		9 10
	11 12	
13 14		15 16
	17 18	
19 20		21 22
	23 24	

3.6 Stanovení rozměrů drážky

Vodiče kruhového průřezu lze vložit do libovolného typu drážky. V doporučené literatuře jsem zvolil typ polouzavřené drážky s lichoběžníkovým obrysem pro vsypávané vinutí. Vinutí je v drážce zajištěno klínem proti vypadnutí z drážky. Pro zvolený typ drážky mají statorové zuby konstantní průřez a konstantní magnetickou indukci v zubu. [4]

Před výpočtem rozměrů drážek ověřím výpočtem volenou hodnotu magnetické indukce ve vzduchové mezeře a vypočtenou hodnotu magnetického toku. Magnetický tok byl vypočten v části 3.4.

Přepočtená hodnota magnetického toku:

$$\Phi_{konecne} = \frac{U_i}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot f_1 \cdot N_1 \cdot k_v} = \frac{3{,}854}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot 32{,}96 \cdot 52 \cdot 0{,}866} = \\ = 5{,}843 \cdot 10^{-4}\ \text{Wb} \tag{3.49}$$

Přepočtená hodnota indukce ve vzduchové mezeře:

$$B_{\delta_konecne} = \frac{\Phi_{konecne}}{\alpha_\delta \cdot t_p \cdot l_{Fe}} = \frac{5{,}843 \cdot 10^{-4}}{\frac{2}{\pi} \cdot 0{,}0231 \cdot 0{,}0515} = 0{,}7718\ \text{T} \tag{3.50}$$

Z tabulek z doporučené literatury jsem volil parametry pro výpočet rozměrů drážek.

Jedná se o následující parametry:

- Magnetická indukce jha statoru B_{j1} = 1,3 T
- Magnetická indukce zubu statoru B_{z1} = 1,5 T
- Magnetická indukce zubu statoru v nejužším průřezu B_{z1max} = 1,85 T
- Činitel plnění železa k_{Fe} = 0,97

Magnetické indukce jsem volil v tabulce 6.10 doporučené literatury od Kopylova, Stavba elektrických strojů. [4] Průběhem iterací se volené parametry musely upravit a jejich hodnoty klesly, jelikož docházelo k přesycování statorových zubů v okolí krčků. Činitel plnění železa jsem volil ze stejné literatury v tabulce 6.11. Zvolená hodnota činitele k_{Fe} odpovídá statorovým plechům odizolovaným vrstvou laku.

Výška jha statoru:

$$h_{j1} = \frac{\Phi_{konecne}}{2 \cdot B_{j1} \cdot l_{Fe} \cdot k_{Fe}} = \frac{5{,}843 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot 1{,}3 \cdot 0{,}0515 \cdot 0{,}97} = 0{,}0045 \text{ m} \tag{3.51}$$

Šířka zubu statoru:

$$b_{z1} = \frac{\Phi_{konecne} \cdot 0{,}9}{B_{z1} \cdot l_{Fe} \cdot k_{Fe}} = \frac{5{,}843 \cdot 10^{-4} \cdot 0{,}9}{1{,}5 \cdot 0{,}0515 \cdot 0{,}97} = 0{,}0070 \text{ m} \tag{3.52}$$

Konstanta 0,9 vyjadřuje odhad rozptylu magnetického toku uzavřeného přes hlavu zubu statoru.

Hloubka statorové drážky:

$$h_{d1} = \frac{D_{1e} - D_{1i}}{2} - h_{j1} = \frac{0{,}12 - 0{,}0588}{2} - 0{,}0045 = 0{,}0261 \text{ m} \tag{3.53}$$

Šířka dna statorové drážky:

$$b_1 = \pi \cdot \frac{D_{1i} + 2 \cdot h_{d1}}{Q_1} - b_{z1} = \pi \cdot \frac{0{,}0588 + 2 \cdot 0{,}0045}{12} - 0{,}007 = \\ = 0{,}0221 \text{ m} \tag{3.54}$$

Výška krčku statorové drážky h_0 je udávaná v rozmezí 0,5 až 1 mm. Výška klínu se udává v rozmezí 0,9 až 4,9 mm. Šířka zúžení statorové drážky musí být dostatečně široká, aby bylo možné vložit navinuté vinutí do drážek. Otevření drážky nesmí být příliš velké a je omezeno maximální hodnotou 3 mm pro stroje do 20 kW. Otevření drážky má vliv na pulzace indukovaného napětí.

Šířka zúžení statorové drážky:

$$b_0 = D_v + 0{,}0015 = 0{,}001 + 0{,}0015 = 0{,}0025 \text{ m} \tag{3.55}$$

Šířka vrcholu statorové drážky:

$$b_2 = \frac{\pi \cdot (D_{1i} + 2 \cdot h_0 - b_0) - Q_1 \cdot b_{z1}}{Q_1 - \pi} = \\ = \frac{\pi \cdot (0{,}0588 + 2 \cdot 0{,}0005 - 0{,}0025) - 12 \cdot 0{,}007}{12 - \pi} = 0{,}0108 \text{ m} \tag{3.56}$$

Výška aktivní části statorové drážky:

$$h_1 = h_{d1} - h_0 - h_{01} = 0{,}0261 - 0{,}0005 - 0{,}001 = 0{,}0246 \text{ m} \tag{3.57}$$

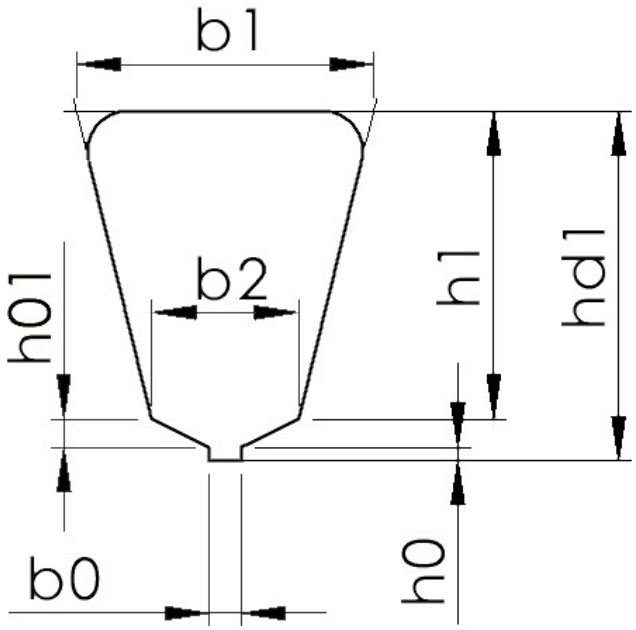
Plocha statorové drážky:

$$S_d = h_1 \cdot \frac{b_1 + b_2}{2} = 0{,}0246 \cdot \frac{0{,}0221 + 0{,}0108}{2} = 4{,}047 \cdot 10^{-4}\ \mathrm{m}^2 \tag{3.58}$$

Činitel plnění drážky:

$$K_T = \frac{\pi \cdot D_v^2 \cdot V_d \cdot n_p}{4 \cdot S_d} = \frac{\pi \cdot 0{,}001^2 \cdot 26 \cdot 8}{4 \cdot 4{,}047 \cdot 10^{-4}} = 0{,}4037 \tag{3.59}$$

Činitel plnění drážky K_T je kontrolním parametrem zobrazující správnost výpočtu. Stroje napájené malým napětím dosahují velikosti parametru K_T v rozmezí (0,5; 0,6). Vinutí strojů navinutých z válcových vodičů odpovídá činiteli plnění drážky K_T = 0,5. Po konzultaci s vedoucím závěrečné práce jsem stroj navrhoval pro hodnotu činitele K_T = 0,4. Nižší hodnota činitele plnění drážky představuje určitou jistotu v návrhu. [7]



Obrázek 3-2 Statorová drážka

Tabulka 3-4 Vypočtené rozměry drážky

h_0 [mm]	0,5
h_1 [mm]	24,6
h_{01} [mm]	1
h_{d1} [mm]	26,1
b_0 [mm]	2,5
b_1 [mm]	22,1
b_2 [mm]	10,8

3.7 Návrh permanentních magnetů

Existují různé způsoby montáže magnetů (povrchová montáž, tangenciální, V uložení apod.). Pro svou práci jsem vybral povrchovou montáž magnetů. Ostatní způsoby uložení zasahují do rotorového jha.

Pro návrh magnetů bylo nutné zvolit magnet. Volený magnet je z materiálu směsi NdFeB (neodym-železo-borový). Magnet jsem volil z katalogového listu společnosti Arnold Magnetic Technologies. Zvoleným typem magnetu je N30SH, který je použitelný do teploty 150 °C (Příloha č. 1 - Katalogový list N30SH).

Parametry magnetu odečtené z katalogového listu magnetu N30SH:

- Remanentní indukce pro 20 °C B_r = 1,125 T
- Relativní permeabilita μ_r = 1,05
- Koeficient poklesu remanentní indukce při změně teploty α_{Br} = -0,12 %/°C

Pro návrh magnetů je potřeba znát také hodnoty intenzit plechů, ze kterých bude stroj složen. Hodnoty jsem odečetl z katalogového listu SURA 350-50A uvedeném v příloze č. 2.

Hodnoty intenzit odečtené z katalogového listu SURA 350-50A:

- Intenzita jha statoru H_{j1} = 264 A/m
- Intenzita zubu statoru H_z = 1200 A/m

Intenzity se volí dle indukce ve jhu a zubu statoru. Jejich volené hodnoty se měnily na poslední konzultaci.

Koercivita H_c a remanentní indukce B_r magnetu jsou teplotně závislé parametry. Obě hodnoty je nutné přepočítat pro uvažovanou teplotu magnetů při provozu stroje. Teplotu magnetů uvnitř stroje za provozu jsme s vedoucím práce zvolili rovnou 80 °C. Vzorce pro přepočet pocházejí z dokumentu výrobce magnetů. [6]

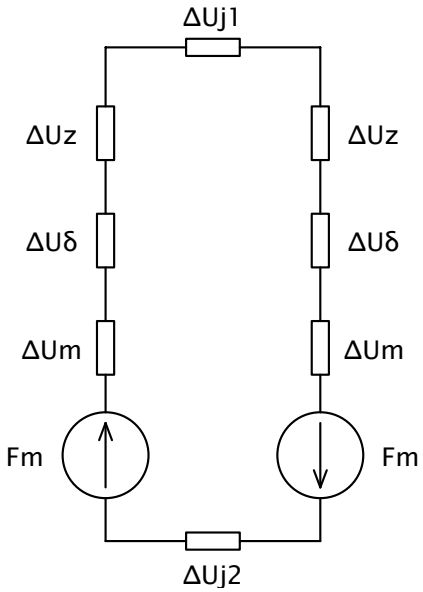
Remanentní indukce magnetu pro 80 °C:

$$B_{r_{80}} = B_r \cdot \left(1 + \frac{\alpha_{Br} \cdot (80 - 20)}{100}\right) = \\ = 1{,}125 \cdot \left(1 + \frac{(-0{,}12) \cdot (80 - 20)}{100}\right) = 1{,}044 \text{ T} \tag{3.60}$$

Koercivita magnetu pro 80 °C:

$$H_{c_80} = \frac{B_{r_{80}}}{\mu_0 \cdot \mu_r} == \frac{1{,}044}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 1{,}05} = 7{,}9123 \cdot 10^5 \text{ A/m} \tag{3.61}$$

Pro určení rozměrů magnetů je třeba vypočítat prvky v magnetickém obvodu. Magnetický obvod se uzavírá skrze statorové jho, zuby statoru, vzduchovou mezeru, permanentní magnety a rotorové jho. Zdrojem magnetického obvodu jsou permanentní magnety, které generují magnetomotorické napětí. V magnetickém obvodu vznikají úbytky magnetického napětí na prvcích, ze kterých je tvořen. Pro stanovení výšky magnetu je zapotřebí vypočítat úbytky magnetického napětí v magnetickém obvodu. [5]



Obrázek 3-3 Náhradní schéma magnetického obvodu pro povrchové uložení permanentních magnetů

Výška jha rotoru:

$$h_{j2} = \frac{\Phi_{konecne}}{2 \cdot B_{j2} \cdot l_{Fe} \cdot k_{Fe} \cdot k_{tok}} = \frac{5{,}843 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot 1{,}3 \cdot 0{,}0515 \cdot 0{,}97 \cdot 0{,}95} = \\ = 0{,}0047 \text{ m} \tag{3.62}$$

Zvolená velikost indukce jha rotoru B_{j2} je totožná s volenou hodnotou indukce statorového jha B_{j1}.

Vnější průměr rotoru:

$$D_{2e} = D_{1i} - 2 \cdot (\delta + h_m) = 0{,}0588 - 2 \cdot (0{,}0009 + 0{,}006) = \\ = 0{,}0450 \text{ m} \tag{3.63}$$

Výšku magnetu jsem předběžně zvolil a při iteracích snížil na hodnotu h_m = 0,006 m.

Intenzita magnetického pole ve vzduchové mezeře:

$$H_\delta = \frac{B_\delta}{\mu_0 \cdot k_{tok}} = \frac{0{,}7718}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 0{,}95} = 6{,}465 \cdot 10^5 \text{ A/m} \tag{3.64}$$

Délka střední siločáry jha statoru:

$$l_{j1} = \frac{\pi \cdot (D_{1e} - h_{j1})}{2 \cdot p} = \frac{\pi \cdot (0{,}12 - 0{,}0045)}{2 \cdot 4} = 0{,}0454 \text{ m} \tag{3.65}$$

Úbytek magnetického napětí ve jhu statoru:

$$\Delta U_{j1} = H_{j1} \cdot l_{j1} = 264 \cdot 0{,}0454 = 11{,}97 \text{ A} \tag{3.66}$$

Úbytek magnetického napětí v zubu statoru:

$$\Delta U_z = H_z \cdot h_{d1} = 1200 \cdot 0{,}0261 = 31{,}32 \text{ A} \tag{3.67}$$

Délka střední siločáry jha rotoru:

$$l_{j2} = \frac{\pi \cdot (D_{2e} - h_{j2})}{2 \cdot p} = \frac{\pi \cdot (0{,}045 - 0{,}0047)}{2 \cdot 4} = 0{,}0158 \text{ m} \tag{3.68}$$

Úbytek magnetického napětí ve jhu rotoru:

$$\Delta U_{j2} = H_{j2} \cdot l_{j2} = 264 \cdot 0{,}0158 = 4{,}174 \text{ A} \tag{3.69}$$

Hodnota intenzity jha rotoru H_{j2} je totožná s volenou velikostí intenzity jha statoru H_{j1}.

Koeficient pro výpočet Carterova činitele:

$$\gamma = \frac{\left(\frac{b_0}{\delta}\right)^2}{5 + \frac{b_0}{\delta}} = \frac{\left(\frac{0{,}0025}{0{,}0009}\right)^2}{5 + \frac{0{,}0025}{0{,}0009}} = 0{,}9921 \tag{3.70}$$

Carterův činitel:

$$k_c = \frac{t_{d1}}{t_{d1} - \gamma \cdot \delta} = \frac{0{,}0154}{0{,}0154 - 0{,}0009 \cdot 0{,}9921} = 1{,}062 \tag{3.71}$$

Součin velikosti vzduchové mezery a Carterova činitele:

$$\delta' = \delta \cdot k_c = 0{,}0009 \cdot 1{,}062 = 9{,}554 \cdot 10^{-4}\ \text{m} \tag{3.72}$$

Úbytek magnetického napětí ve vzduchové mezeře:

$$\Delta U_\delta = H_\delta \cdot \delta' = 6{,}465 \cdot 10^5 \cdot 9{,}554 \cdot 10^{-4} = 617{,}7\ \text{A} \tag{3.73}$$

Intenzita magnetu:

$$H_m = \frac{B_m}{\mu_r \cdot \mu_0} = \frac{0{,}9}{1{,}05 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} = 6{,}821 \cdot 10^5\ \text{A/m} \tag{3.74}$$

Pro povrchovou montáž je velikost magnetické indukce magnetu totožná s indukcí ve vzduchové mezeře.

Výsledný úbytek magnetického napětí na jeden pól pár:

$$\begin{gathered} F_m = 2 \cdot (\Delta U_\delta + \Delta U_z) + \Delta U_{j1} + \Delta U_{j2} = \\ = 2 \cdot (617{,}7 + 31{,}32) + 11{,}97 + 4{,}17 = \ 1{,}314 \cdot 10^3\ \text{A} \end{gathered} \tag{3.75}$$

Výška magnetu:

$$\begin{gathered} h_m = \frac{F_m}{2 \cdot \left(H_{c_{80}} - H_m\right)} = \frac{1{,}314 \cdot 10^3}{2 \cdot (7{,}912 \cdot 10^5 - 6{,}821 \cdot 10^5)} = \\ = 0{,}006\ \text{m} \end{gathered} \tag{3.76}$$

Koercivita snížená o intenzitu magnetu vyjadřuje ve vzorci zdroj magnetického napětí se započteným úbytkem magnetického napětí v magnetech.

Šířka magnetu:

$$b_m = \frac{\Phi_{konecne}}{B_m \cdot l_{Fe}} = \frac{5{,}843 \cdot 10^{-4}}{0{,}9 \cdot 0{,}0515} = 0{,}0126\ \text{m} \tag{3.77}$$

Délka magnetů je totožná s délkou statorového paketu.

Pólové krytí magnetu:

$$\alpha_p = \frac{b_m}{t_p} = \frac{0{,}0126}{0{,}0231} = 0{,}5460 \tag{3.78}$$

Koeficient sycení:

$$k_f = \frac{F_m}{2 \cdot \Delta U_\delta} = \frac{1{,}314 \cdot 10^3}{2 \cdot 617{,}7} = 1{,}064 \tag{3.79}$$

Velikost vzduchové mezery navýšená o Carterův činitel a koeficient sycení:

$$\delta'' = \delta \cdot k_c \cdot k_f = 0{,}0009 \cdot 1{,}062 \cdot 1{,}064 = 0{,}001 \text{ m} \tag{3.80}$$

Přepočet vnějšího průměru rotoru:

$$D_{2e} = D_{1i} - 2 \cdot (\delta + h_m) = 0{,}0588 - 2 \cdot (0{,}0009 + 0{,}006) = \\ = 0{,}0450 \text{ m} \tag{3.81}$$

Vnitřní průměr rotoru:

$$D_{2i} = D_{2e} - 2 \cdot h_{j2} = 0{,}045 - 2 \cdot 0{,}0047 = 0{,}0355 \text{ m} \tag{3.82}$$

3.8 Výpočet parametrů náhradního schématu stroje

Postup výpočtu parametrů náhradního schématu stroje je složen z více zdrojů. Pro výpočet odporu vinutí a části výpočtu indukčností jsem využil knihu Stavba elektrických strojů od Kopylova. [4]

Dalším zdrojem pro stanovení indukčnosti je Pyrhönenův Design of rotating electrical machines. [7]

Pro stanovení odporu vinutí bylo potřeba zvolit pracovní teplotu vinutí. Se změnou teploty dochází ke změně rezistivity materiálu. První krok ke stanovení odporu vinutí byl přepočet rezistivity mědi pro pracovní teplotu vinutí 100 °C.

Rezistivita mědi při 100 °C:

$$\rho_s = \rho_{Cu} \cdot (1 + \alpha_{Cu} \cdot \Delta t) = \\ = 0{,}0178 \cdot 10^{-6} \cdot [1 + 4 \cdot 10^{-3} \cdot (100 - 20)] = 2{,}35 \cdot 10^{-8}\ \Omega/\mathrm{m} \tag{3.83}$$

Následujícím krokem bylo stanovení délky vinutí. Výpočet délky vinutí je složen z výpočtu délky čel vinutí a délky aktivní části cívky ve statorové drážce. Délka aktivní části vinutí v drážce bývá doplněna o délku rovných úseků, které zahrnují rovnou část cívky vycházející od čela statorového paketu po začátek ohybu čela vinutí. V návrhu rovné úseky neuvažuji. Stroj je malý a zubové vinutí obtočené kolem statorového zubu vytváří minimální délku čel vinutí.

Střední šířka cívky:

$$b_{cs} = \frac{\pi \cdot \beta \cdot (D_{1i} + h_{d1})}{2 \cdot p} = \frac{\pi \cdot 0{,}6667 \cdot (0{,}0588 + 0{,}0261)}{2 \cdot 4} = 0{,}0222\ \mathrm{m} \tag{3.84}$$

Délka čela statoru:

$$l_{cs} = \frac{\pi \cdot b_{cs}}{2} = \frac{\pi \cdot 0{,}0222}{2} = 0{,}0349\ \mathrm{m} \tag{3.85}$$

Střední délka závitu:

$$l_{avs} = 2 \cdot (l_{Fe} + l_{cs}) = 2 \cdot (0{,}0515 + 0{,}0349) = 0{,}1728\ \mathrm{m} \tag{3.86}$$

Délka vinutí:

$$L_s = l_{avs} \cdot N_1 = 0{,}1728 \cdot 52 = 8{,}987 \text{ m} \tag{3.87}$$

Odpor vinutí statoru:

$$R_1 = \frac{\rho_s \cdot L_s}{S_{ef1} \cdot a} = \frac{2{,}35 \cdot 10^{-8} \cdot 8{,}987}{5{,}479 \cdot 10^{-6} \cdot 1} = 0{,}0385\ \Omega \tag{3.88}$$

V průběhu návrhu vinutí bylo nutné krok vinutí zkrátit, aby jej bylo možné navinout. Činitel respektující zkrácení kroku vinutí je závislý na kroku vinutí. Pro nezkrácený krok vinutí a jednovrstvá vinutí dosahuje činitel hodnoty k_β, $k_\beta' = 1$. Vzorec pro výpočet k_β' odpovídá zkrácení kroku v intervalu hodnot $2/3 \leq \beta \leq 1$. [4]

Činitel respektující zkrácení kroku vinutí:

$$k_\beta' = \frac{1}{4} \cdot (1 + 3 \cdot \beta) = \frac{1}{4} \cdot \left(1 + 3 \cdot \frac{2}{3}\right) = 0{,}75 \tag{3.89}$$

$$k_\beta = \frac{1}{4} \cdot \left(1 + 3 \cdot k_\beta'\right) = \frac{1}{4} \cdot (1 + 3 \cdot 0{,}75) = 0{,}8125 \tag{3.90}$$

Tvar vzorce pro výpočet činitele magnetické vodivosti rozptylu drážek se odvíjí od tvaru drážky. Vzorec pochází z tabulky 6.22 literatury od Kopylova, Stavba elektrických strojů. Výpočet magnetické vodivosti rozptylu čel pochází ze stejného zdroje. [4]

Činitel magnetické vodivosti rozptylu drážek:

$$\begin{gathered} \lambda_d = \frac{h_1 \cdot k_\beta}{3 \cdot b_2} + \left(\frac{3 \cdot h_{01}}{b_2 + 2 \cdot b_0} + \frac{h_0}{b_0}\right) \cdot k_\beta' = \\ = \frac{0{,}0246 \cdot 0{,}8125}{3 \cdot 0{,}0108} + \left(\frac{3 \cdot 0{,}001}{0{,}0108 + 2 \cdot 0{,}0025} + \frac{0{,}0005}{0{,}0025}\right) \cdot 0{,}75 = \\ = 0{,}9093 \end{gathered} \tag{3.91}$$

Činitel magnetické vodivosti rozptylu čel:

$$\begin{gathered} \lambda_c = 0{,}34 \cdot \frac{q}{l_{Fe}} \cdot \left(l_{cs} - 0{,}64 \cdot \beta \cdot t_p\right) = \\ = 0{,}34 \cdot \frac{0{,}5}{0{,}0515} \cdot \left(0{,}0349 - 0{,}64 \cdot \frac{2}{3} \cdot 0{,}0231\right) = 0{,}0827 \end{gathered} \tag{3.92}$$

Efektivní hodnota velikosti vzduchové mezery:

$$\delta_{ef} = \delta'' \cdot \frac{h_m}{\mu_r} = 0{,}001 \cdot \frac{0{,}006}{1{,}05} = 0{,}0068 \text{ m} \tag{3.93}$$

Následující vzorce již pocházejí z literatury od Pyrhönena, Design of rotating electrical machines. [7]

Hlavní indukčnost:

$$\begin{gathered} L_1 = t_p \cdot l_{Fe} \cdot \frac{\mu_0}{\delta_{ef}} \cdot \frac{4 \cdot q}{Q_1} \cdot \left(\frac{N_1 \cdot k_v \cdot m}{\pi}\right)^2 = \\ = 0{,}0231 \cdot 0{,}0515 \cdot \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}}{0{,}0068} \cdot \frac{4 \cdot 0{,}5}{12} \cdot \left(\frac{52 \cdot 0{,}866 \cdot 3}{\pi}\right)^2 = \\ = 6{,}823 \cdot 10^{-5} \text{ H} \end{gathered} \tag{3.94}$$

Diferenční indukčnost:

$$L_{dif} = L_1 \cdot \tau_{dif} = 6{,}823 \cdot 10^{-5} \cdot 0{,}46 = 3{,}139 \cdot 10^{-5} \text{ H} \tag{3.95}$$

τ_{dif} je činitel diferenčního rozptylu, jehož hodnota odpovídá zubovým vinutím.

Rozptylová indukčnost:

$$\begin{gathered} L_\sigma = \frac{4 \cdot m}{Q_1} \cdot \mu_0 \cdot l_{Fe} \cdot N_1^2 \cdot (\lambda_d \cdot \lambda_c) + L_{dif} = \\ = \frac{4 \cdot 3}{12} \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 0{,}0515 \cdot 52^2 \cdot (0{,}9093 \cdot 0{,}0827) + \\ + 3{,}139 \cdot 10^{-5} = 2{,}050 \cdot 10^{-4} \text{ H} \end{gathered} \tag{3.96}$$

Celková indukčnost:

$$L_d = L_\sigma \cdot L_1 = 2{,}05 \cdot 10^{-4} \cdot 6{,}823 \cdot 10^{-5} = 2{,}732 \cdot 10^{-4} \text{ H} \tag{3.97}$$

Rozptylová reaktance:

$$X_{1\sigma} = 2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot L_\sigma = 2 \cdot \pi \cdot 32{,}96 \cdot 2{,}05 \cdot 10^{-4} = 0{,}0425 \ \Omega \tag{3.98}$$

Hlavní reaktance:

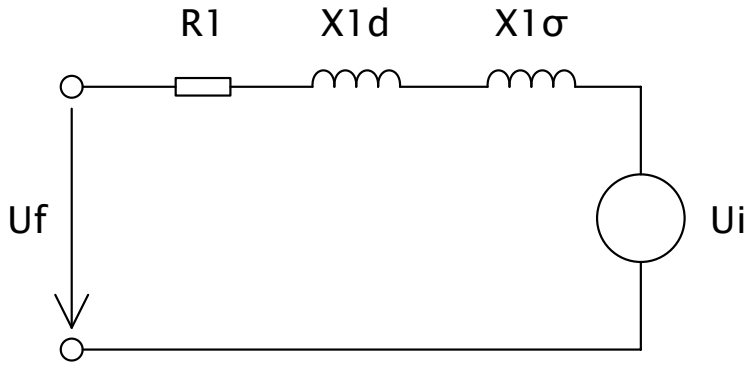
$$X_{1d} = 2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot L_1 = 2 \cdot \pi \cdot 32{,}96 \cdot 6{,}823 \cdot 10^{-5} = 0{,}0141 \ \Omega \tag{3.99}$$

Podélná reaktance:

$$X_d = X_{1d} + X_{1\sigma} = 0{,}0141 + 0{,}0425 = 0{,}0566 \ \Omega \tag{3.100}$$

Jmenovitá impedance:

$$Z_n = \frac{U_f}{I_{1N}} = \frac{4{,}409}{12{,}81} = 0{,}3442\ \Omega \tag{3.101}$$



Obrázek 3-4 Náhradní schéma synchronního stroje

Obr. 3-4 zobrazuje náhradní schéma synchronního stroje, kde *R1* je odpor vinutí, *X1d* hlavní reaktance a *X1σ* rozptylová reaktance.

3.9 Stanovení ztrát a účinnosti stroje

Ztráty motoru jsou složeny ze ztrát v železe, ztrát ve vinutí, mechanických ztrát a ztrát přídavných. Ztráty v železe vznikají vlivem střídavé magnetizace plechů a souvisejí s velikostí plochy magnetizační křivky materiálu, ze kterého je plech vytvořen. Velikost ztrát v železe je ovlivněna také vířivými proudy. Vířivé proudy se snažíme omezit vzájemnou izolací plechů. Mechanické ztráty jsou ovlivněny třením v ložiskách. Velikost mechanických ztrát je závislá na velikosti otáček. Do mechanických ztrát se také promítají ztráty způsobené ventilátorem. Pro stroj navrhovaný ve své bakalářské práci ventilátor ve stroji neuvažuji kvůli zvolenému stupni krytí IP 54 a malým rozměrům stroje. Jouleovy ztráty vznikají ve vinutí statoru. Přídavné ztráty bývají způsobeny rozptylovými toky, pulzacemi indukce ve vzduchové mezeře či neharmonickým průběhem magnetického napětí. Ztráty v magnetech je velmi obtížné stanovit a nejsou v návrhu zahrnuty. Ztráty způsobují vířivé proudy indukované v magnetech vlivem pulzací mag toků ve vzduchové mezeře. [8]

Hmotnost statorového jha:

$$m_{j1} = \frac{\pi}{4} \cdot \left[D_{1e}^2 - \left(D_{1e} - 2 \cdot h_{j1}\right)^2\right] \cdot l_{Fe} \cdot \rho_{PFe} = \\ = \frac{\pi}{4} \cdot [0{,}12^2 - (0{,}12 - 2 \cdot 0{,}0045)^2] \cdot 0{,}0515 \cdot 7800 = 0{,}6559 \text{ kg} \tag{3.102}$$

Hmotnost zubu statoru:

$$m_{z1} = h_{d1} \cdot b_{z1} \cdot Q_1 \cdot l_{Fe} \cdot \rho_{PFe} = \\ = 0{,}0216 \cdot 0{,}007 \cdot 12 \cdot 0{,}0515 \cdot 7800 = 0{,}8807 \text{ kg} \tag{3.103}$$

Ztráty v železe statoru

$$\Delta P_{Fe} = \Delta_{p15} \cdot \left(\frac{f_1}{50}\right)^{\beta_{Fe}} \cdot \left[k_{dj} \cdot \left(\frac{B_{j1}}{1{,}5}\right)^2 \cdot m_{j1} + k_{dz} \cdot \left(\frac{B_{z1}}{1{,}5}\right)^2 \cdot m_{z1}\right] =$$
$$= 3{,}29 \cdot \left(\frac{32{,}96}{50}\right)^{1{,}4} \cdot \left[1{,}6 \cdot \left(\frac{1{,}3}{1{,}5}\right)^2 \cdot 0{,}6559 + 1{,}8 \cdot \left(\frac{1{,}5}{1{,}5}\right)^2 \cdot 0{,}8807\right] \quad (3.104)$$
$$= 4{,}358\ \text{W}$$

Δp_{15} značí měrné ztráty v železe. Měrné ztráty jsou odečteny z katalogového listu SURA M350-50A pro 1,5 T (katalogový list přiložen v příloze č.2). β_{Fe} je exponent závislý na druhu použité oceli. Činitele uvažující vliv nerovnoměrností rozložení toku v částek magnetického obvodu k_{dj}, k_{dz} jsou volenými hodnotami uvedenými v Kopylova literatuře Stavba elektrických strojů. [4]

Jouleovy ztráty ve vinutí statoru:

$$\Delta P_{j1} = m \cdot R_1 \cdot I_{1N}^2 = 3 \cdot 0{,}0385 \cdot 12{,}81^2 = 18{,}98\ \text{W} \quad (3.105)$$

Přídavné ztráty motoru:

$$\Delta P_d = 0{,}005 \cdot P_{ekvivalentnis_1} = 0{,}005 \cdot 138{,}5 = 0{,}6927\ \text{W} \quad (3.106)$$

Velikost přídavných ztrát uvažuji 0,5 % ekvivalentního výkonu stroje. Norma ČSN udává střední hodnotu přídavných ztrát při jmenovitém zatížení 0,5 % jmenovitého výkonu. [4]

Obvodová rychlost rotoru:

$$v_2 = \omega_s \cdot \frac{D_{2e}}{2} = 51{,}78 \cdot \frac{0{,}0466}{2} = 1{,}206\ \text{m/s} \quad (3.107)$$

Mechanické ztráty motoru:

$$\Delta P_{mech} = k_p \cdot D_{2e} \cdot \left(l_{Fe} + 0{,}6 \cdot t_p\right) \cdot v_2^2 =$$
$$= 15 \cdot 0{,}0466 \cdot (0{,}0515 + 0{,}6 \cdot 0{,}0231) \cdot 1{,}206^2 = 0{,}0665\ \text{W} \quad (3.108)$$

k_p označuje činitel mechanických ztrát pro malé a střední stroje s uzavřeným chladícím systémem. Výpočet mechanických ztrát pochází z Pyrhönenovy literatury Design of rotating electrical machines. [7]

Celkové ztráty motoru:

$$\Delta P = \left(\Delta P_{Fe} + \Delta P_{j1} + \Delta P_{mech} + \Delta P_d\right) \cdot 1{,}2 = \\ = (4{,}358 + 18{,}98 + 0{,}0665 + 0{,}6927) \cdot 1{,}2 = 28{,}91 \text{ W} \tag{3.109}$$

Stroj bude v provozu napájen z měniče. Ztráty měniče jsou započteny do celkových ztrát. Konstanta 1,2 vyjadřuje navýšení celkových ztrát o 20 % při započtení ztrát měniče.

Příkon motoru:

$$P_1 = P_{ekvivalentni_S1} + \Delta P = 138{,}5 + 28{,}91 = 167{,}5 \text{ W} \tag{3.110}$$

Přepočtená účinnost motoru:

$$\eta_{konecna} = \frac{P_{ekvivalentni_S1}}{P_1} = \frac{138{,}5}{167{,}5} = 0{,}827 \tag{3.111}$$

Jedním z cílů iterací výpočtu bylo docílit přibližně stejné hodnoty účinnosti volené na začátku návrhu stroje.

3.10 Teplotní výpočet

Teplotní výpočet není součástí mého zadání. Myslím, že je vhodné znát alespoň přibližné údaje týkající se oteplení stroje. Postup výpočtu pochází z literatury od Kopylova, Stavba elektrických stojů. Provedený výpočet je pouze orientační. Výpočet oteplení jsem provedl pouze pro stator. Navrhovaný stroj odpovídá krytí IP 54. Stroj bude chlazen vzduchem a nebude obsahovat ventilátor. [4]

Délka vyložení:

$$l_v = K_v \cdot b_{cs} = 0{,}72 \cdot 0{,}0222 = 0{,}0160 \text{ m} \tag{3.112}$$

Činitel vyložení čel K_v odpovídá čelům izolovaným páskou. Voleno z tabulky 6.19. [4]

Jouleovy ztráty v drážkách statoru:

$$\Delta P_{jd1} = \frac{k_{pt} \cdot \Delta P_{j1} \cdot 2 \cdot l_{Fe}}{l_{avs}} = \frac{1{,}07 \cdot 18{,}98 \cdot 2 \cdot 0{,}0515}{0{,}1728} = 12{,}10 \text{ W} \tag{3.113}$$

k_{pt} označuje činitel respektující změnu odporu s teplotou. Volen pro třídu izolace F.

Jouleovy ztráty v čelech cívek statoru:

$$\Delta P_{jc1} = \frac{k_{pt} \cdot \Delta P_{j1} \cdot 2 \cdot l_{cs}}{l_{avs}} = \frac{1{,}07 \cdot 94{,}89 \cdot 2 \cdot 0{,}0349}{0{,}1728} = 8{,}205 \text{ W} \tag{3.114}$$

Oteplení vnitřního povrchu statoru na teplotu vzduchu uvnitř stroje:

$$\Delta T_{Fe} = K_z \cdot \frac{\Delta P_{jd1} + \Delta P_{Fe}}{\pi \cdot D_{1i} \cdot l_{Fe} \cdot \alpha_1} = 0{,}18 \cdot \frac{12{,}1 + 4{,}358}{\pi \cdot 0{,}0588 \cdot 0{,}0515 \cdot 11} = \\ = 28{,}31 \text{ °C} \tag{3.115}$$

Součinitel přestupu tepla z povrchu stroje α_1 byl zvolen na konzultaci s vedoucím bakalářské práce. Činitel respektující přenos části ztrát do okolí statoru K_z je tabulkovou hodnotou. Velikost činitele K_z je odečtena z tabulky 6.30. [4]

Obvod drážky:

$$O_d = b_1 + b_2 + 2 \cdot h_{d1} = 0{,}0221 + 0{,}0108 + 2 \cdot 0{,}0261 = \\ = 0{,}0851 \text{ m} \tag{3.116}$$

Teplotní spád v izolaci drážkové části statorového vinutí:

$$\Delta T_{izd} = \frac{\Delta P_{jd1}}{Q_1 \cdot O_d \cdot l_{Fe}} \cdot \left(\frac{b_i}{\lambda_i} + \frac{b_1 + b_2}{16 \cdot \lambda_{ekv}}\right) = \\ = \frac{12{,}1}{12 \cdot 0{,}0851 \cdot 0{,}0515} \cdot \left(\frac{0{,}0005}{0{,}3} + \frac{0{,}0221 + 0{,}0108}{16 \cdot 0{,}3}\right) = 1{,}961\ ℃ \tag{3.117}$$

Střední tepelná vodivost izolace vsypávaného vinutí λ_i a střední ekvivalentní tepelná vodivost drážkové izolace λ_{ekv} jsou volenými hodnotami z literatury Stavba elektrických strojů od Kopylova. [4]

Teplotní spád na tloušťce izolace čel statorového vinutí:

$$\Delta T_{izc} = \frac{\Delta P_{jc1}}{2 \cdot Q_1 \cdot O_d \cdot l_{cs}} \cdot \left(\frac{b_i}{\lambda_i} + \frac{h_{d1}}{12 \cdot \lambda_{ekv}}\right) = \\ = \frac{8{,}205}{2 \cdot 12 \cdot 0{,}0851 \cdot 0{,}0349} \cdot \left(\frac{0{,}0005}{0{,}3} + \frac{0{,}0261}{12 \cdot 0{,}3}\right) = 1{,}026\ ℃ \tag{3.118}$$

Oteplení vnějšího povrchu izolace čel vinutí nad teplotu vzduchu uvnitř stroje:

$$\Delta T_{povc} = K_z \cdot \frac{\Delta P_{jc1}}{2 \cdot \pi \cdot D_{1e} \cdot \alpha_1 \cdot l_v} = 0{,}18 \cdot \frac{8{,}205}{2 \cdot \pi \cdot 0{,}12 \cdot 11 \cdot 0{,}016} = 11{,}13\ ℃ \tag{3.119}$$

Střední oteplení statorového vinutí nad teplotu vzduchu uvnitř stroje:

$$\Delta T_{vinuti} = \frac{(\Delta T_{Fe} + \Delta T_{izd}) \cdot 2 \cdot l_{Fe}}{l_{avs}} + \frac{(\Delta T_{izc} + \Delta T_{povc}) \cdot l_{cs}}{l_{avs}} = \\ = \frac{(28{,}31 + 1{,}961) \cdot 2 \cdot 0{,}0515}{0{,}1728} + \frac{(1{,}026 + 11{,}13) \cdot 0{,}0349}{0{,}1728} = \\ = 20{,}50\ ℃ \tag{3.120}$$

Součet ztrát odváděných do vzduchu uvnitř stroje:

$$\Sigma P_{out} = \Delta P - (1 - K_z) \cdot \left(\Delta P_{jd1} + \Delta P_{Fe}\right) - 0{,}9 \cdot \Delta P_{mech} = \\ = 28{,}91 - (1 - 0{,}18) \cdot (12{,}1 + 4{,}358) - 0{,}9 \cdot 0{,}0665 = 15{,}36\ \mathrm{W} \tag{3.121}$$

Ekvivalentní ochlazovací povrch tělesa:

$$S_{tel} = \pi \cdot D_{1e} \cdot (l_{Fe} + l_v) = \pi \cdot 0{,}12 \cdot (0{,}0515 + 0{,}016) = \\ = 0{,}0315 \text{ m}^2 \tag{3.122}$$

Vzorec pro výpočet ekvivalentního ochlazovacího povrchu tělesa odpovídá vnějšímu povrchu stroje bez žeber.

Oteplení vzduchu ve stroji nad teplotu okolí:

$$\Delta T_{vz} = \frac{\Sigma P_{out}}{S_{tel} \cdot \alpha_v} = \frac{15{,}36}{0{,}0315 \cdot 14} = 34{,}84 \text{ °C} \tag{3.123}$$

Součinitel přestupu tepla α_v je odečten z obrázku 6.59. [4]

Oteplení statorového vinutí nad teplotu okolního vzduchu:

$$\Delta T_{vin} = \Delta T_{vinuti} + \Delta T_{vz} = 20{,}5 + 34{,}84 = 55{,}34 \text{ °C} \tag{3.124}$$

Iterací výpočtů bylo docíleno teploty vinutí blízké 100 °C, pro kterou je vinutí statoru navrženo. Teplota vinutí se stanovuje ze součtu oteplení vinutí a teploty okolí uvažované pro 40 °C. Při iteraci jsem nastavení oteplení prováděl změnami volených hodnot lineární proudové hustoty a proudové hustoty.

3.11 Momentová a výkonová charakteristika stroje, fázorové diagramy

Část skriptu určená pro výpočet veličin v charakteristikách a fázorovém diagramu vychází ze studijního materiálu ZČU pro navazující studium. Jedná se o prezentaci k předmětu TES2. [9]

Z již vypočtených náhradních parametrů stroje jsem vypočítal velikost impedance a velikost úhlu ρ, který mezi sebou svírají fázory $\overline{Z_d} \cdot \overline{I_{1c}}$ a $X_d \cdot \overline{I_{1c}}$.

Velikost impedance:

$$Z_d = \sqrt{R_1^2 + X_d^2} = \sqrt{0{,}0385^2 + 0{,}0566^2} = 0{,}0685\ \Omega \tag{3.125}$$

Úhel mezi vektory $Z_d \cdot \overline{I_{1c}}$, $X_d \cdot \overline{I_{1c}}$:

$$\rho = \tan^{-1}\frac{R_1}{X_d} = \tan^{-1}\frac{0{,}0385}{0{,}0593} = 0{,}5766\ \text{rad} \tag{3.126}$$

Bod momentové charakteristiky motoru:

$$M = \frac{m \cdot U_i}{\omega_s \cdot Z_d} \cdot \left[U_f \cdot \sin(\rho - \beta_{moment}) - U_i \cdot \sin(\rho)\right] \tag{3.127}$$

Proměnná β_{moment} slouží pro vykreslení bodů momentové a výkonové charakteristiky stroje. Ve vytvořeném skriptu je β_{moment} definován v intervalu od $-\pi$ do π. β_{moment} v návrhu měním s krokem 0,1.

Bod výkonové charakteristiky motoru:

$$P = \frac{m \cdot U_i}{Z_d} \cdot \left[U_f \cdot \sin(\rho - \beta_{moment}) - U_i \cdot \sin(\rho)\right] \tag{3.128}$$

Pro sestavení fázorového diagramu jsem z dříve vypočtených veličin stanovil fázory. Nejprve jsem stanovil zátěžný úhel. Fázor indukovaného napětí je pootočen o hodnotu zátěžného úhlu oproti vektoru fázového napětí. Dopočetl jsem již jen fázory indukovaného napětí, impedance a proudu statorem.

Zátěžný úhel:

$$\beta = \cos^{-1}\left({U_i}^2 + {U_f}^2 - \frac{(Z_d \cdot I_{1N})^2}{2 \cdot U_i \cdot U_f}\right) = \\ = \cos^{-1}\left(3{,}854^2 + 4{,}409^2 - \frac{(0{,}0685 \cdot 12{,}81)^2}{2 \cdot 3{,}854 \cdot 4{,}409}\right) = 0{,}1649 \text{ rad} \tag{3.129}$$

Fázor indukovaného napětí:

$$\overline{U_{ic}} = U_i \cdot e^{-\beta j} = 3{,}854 \cdot e^{-0{,}1649j} = 3{,}801 - 0{,}632j \text{ V} \tag{3.130}$$

Fázor impedance:

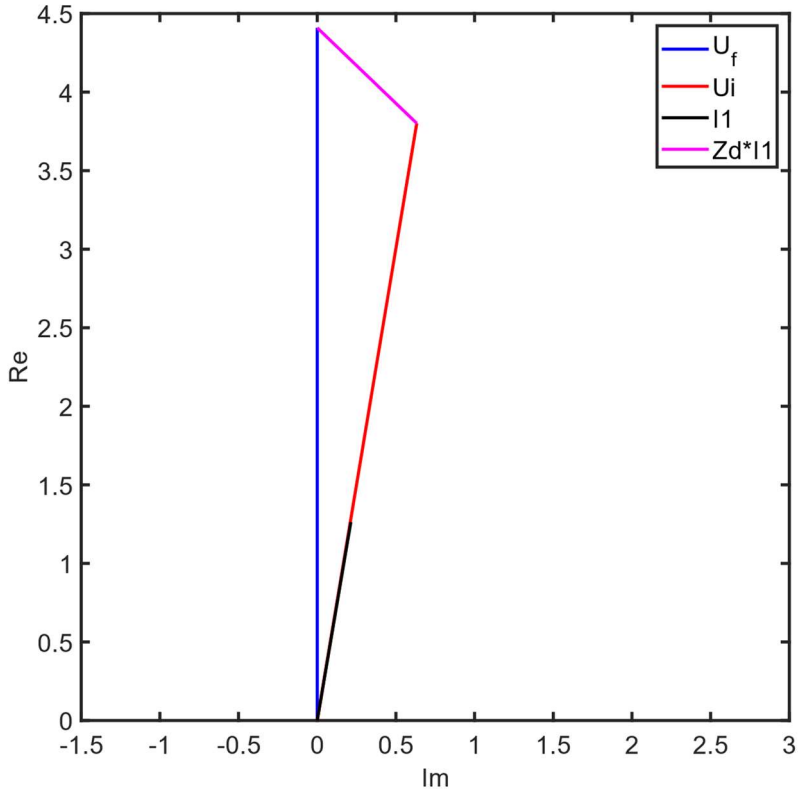
$$\overline{Z_{dc}} = R_1 + j \cdot X_d = 0{,}0385 + j \cdot 0{,}0566 = 0{,}0385 + 0{,}0566j \ \Omega \tag{3.131}$$

Fázor proudu:

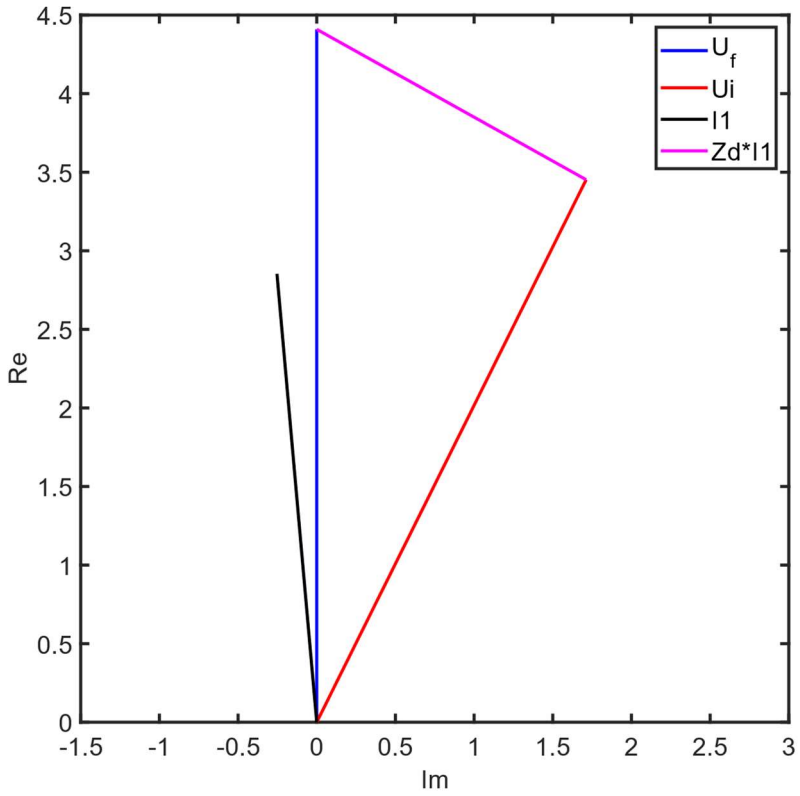
$$\overline{I_{1c}} = \frac{\overline{U_f} - \overline{U_{ic}}}{\overline{Z_{dc}}} = \frac{4{,}409 - (3{,}796 - 0{,}666)}{0{,}0385 + 0{,}0566j} = 12{,}632 - 2{,}137j \text{ A} \tag{3.132}$$

Pomocí příkazu angle v Matlabu jsem zjistil velikost fázového posunu fázoru proudu $\overline{I_{1c}}$ oproti fázoru indukovaného napětí $\overline{U_i}$. Ze zjištěné hodnoty jsem již dopočetl $cos\,\varphi$. Navržený stroj dosahuje velikosti účiníku $cos\,\varphi$ = 0,986.

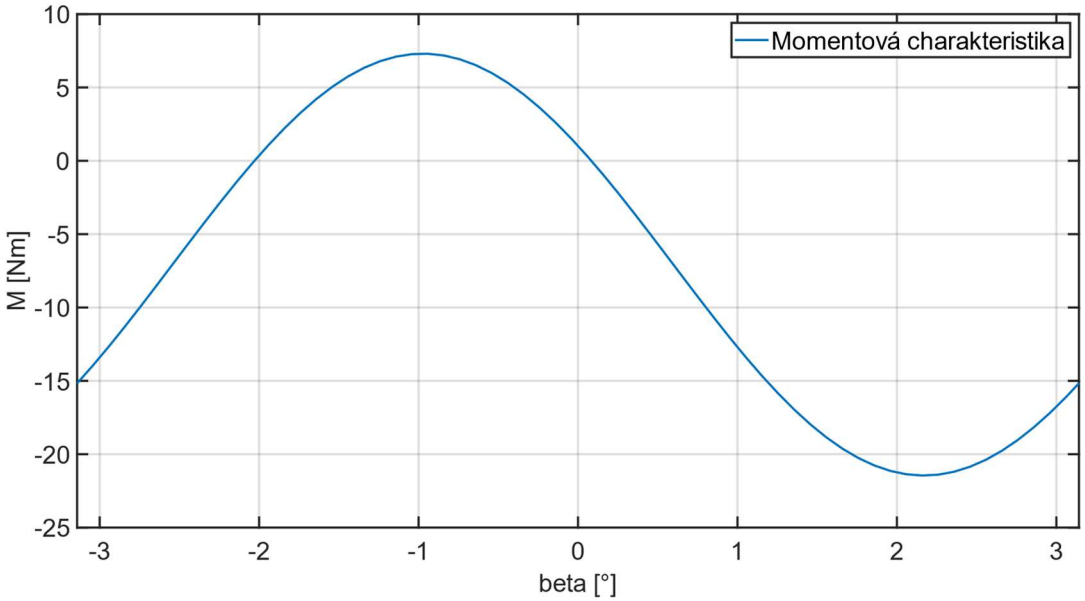
Uvedený výpočet jsem provedl pro hodnoty vypočtené z ekvivalentního výkonu, pro který je stroj navrhován. Pro ekvivalentní výkon jsem prováděl iteraci výpočtů. Iterací výpočtů jsem se snažil docílit velikosti vypočteného účiníku blízké volené hodnotě ze začátku návrhu. Pomocí poměru indukovaného a jmenovitého napětí statoru k_e jsem nastavoval v průběhu iterace překrytí fázorů indukovaného napětí a proudu. Fázorový diagram jsem vykreslil i pro výkon odpovídající trvalému zatížení stroje.



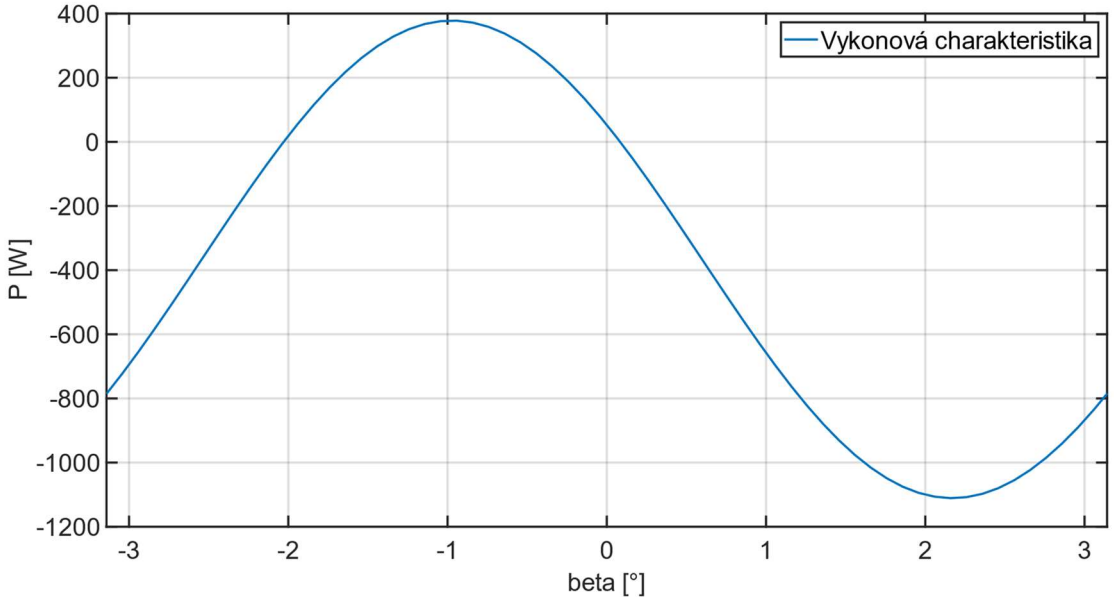
Obrázek 3-5 Fázorový diagram navrženého motoru pro ekvivalentní výkon



Obrázek 3-6 Fázorový diagram navrženého stroje pro druh zatížení S3



Obrázek 3-7 Momentová charakteristika navrženého stroje



Obrázek 3-8 Výkonová charakteristika navrženého stroje

Zhodnocení a závěr

Cílem bakalářské práce bylo navrhnou elektromotor pro lanový naviják s možností montáže na vozidlo. Návrh vychází z provedené rešerše lanových navijáků. Rešerší byly získány mechanické parametry navijáků a informace o použitých motorech, druhu zatížení, krytí strojů atd. Na základě výsledků rešerše byly zvoleny parametry pro mechanický výpočet. Motor byl navrhnut na rychlost navíjení 1,2 m/min a tažnou sílu odpovídající 1,5 t. Mechanickým výpočtem byl vypočten mechanický výkon motoru P_{mot} = 309,8 W, otáčky stroje n = 494,4 ot/min a moment M_{mot} = 5,983 Nm. Stroj dosahuje maximálního momentu 7,297 Nm. Výkon motoru odpovídající druhu zatížení S3 byl přepočten na ekvivalentní zatížení. Ekvivalentní výkon motoru $P_{ekvivalentni_S1}$ vyšel 138,5 W. Krytí stroje bylo zvoleno IP 54.

Navržený stroj se skládá ze 103 plechů SURA M350-50A tlustých 0,5 mm o celkové délce l_{Fe} = 51,5 mm, vnějším průměru D_{1e} = 120 mm a vnitřním průměru D_{1i} = 58,8 mm. Počet pólů stroje je $2p$ = 8. Statorový paket obsahuje 12 drážek, do kterých je umístěno dvouvrstvé zubové vinutí. Pro dosažení požadavku na vsypávané vinutí je vinutí tvořeno 8 paralelními vodiči normovaného průměru D_v = 1 mm. Cívky vinutí obsahují 52 závitů a protéká jimi proud o velikosti 12,81 A. Pro návrh statoru, drážek a vinutí byla použita zejména literatura od Kopylova: Stavba elektrických strojů. [4]

Navržený rotor stroje obsahuje 8 magnetů z materiálu NdFeB typu N30SH. Výpočty byla zjištěna výška magnetu h_m = 6 mm a šířka b_m = 12,6 mm. Délka magnetu odpovídá délce statorového paketu. Dlouhé magnety by mohly být nevhodným řešením z hlediska výroby a montáže. Magnety jsou usazeny na vnějším povrchu rotoru. Průměr rotoru je D_{2e} = 45 mm. Velikost vzduchové mezery byla zvolena na hodnotu δ = 0,9 mm. V dalších částech návrhu byly vypočteny náhradní parametry stroje a ztráty. Vypočtená účinnost motoru vyšla η = 82,7 %. Volená hodnota účinnosti na začátku návrhu byla 83 %. Výsledný rozdíl mezi účinnostmi je tedy minimální. Účiník stroje vyšel $cos\,\varphi$ = 0,986. Pro postup výpočtu náhradních parametrů a ztrát byla použita literatura od Kopylova: Stavba elektrických strojů [4] a Pyrhönena: Design of rotating electrical machines. [7]

Vytvořený návrh byl mnohokrát iterován. Nejprve probíhaly iterace zaměřené na dosažení volených parametrů na začátku výpočtu, podmínek týkajících se vinutí a nastavení překrytí fázorů proudu a indukovaného napětí ve fázorovém diagramu. Následně byla na konzultaci s vedoucím bakalářské práce vytvořena simulace v programu ANSYS. Simulace odhalila nedostatky návrhu. Stroj v simulaci nedosahoval vypočteného indukovaného napětí a docházelo k přesycování statorových zubů vlivem rozptylového toku. Vzniklé nesrovnalosti byly řešeny snížením magnetické indukce ve vzduchové mezeře o 5 % rozptylového magnetického toku, zvětšením šířky magnetů a snížením magnetické indukce v zubech statoru. Tyto úpravy si vyžádaly další iterace výpočtů.

Pro všechny konstrukční prvky motoru byly vytvořeny 3D modely v softwaru SOLIDWORKS.

V případě dalšího postupu při návrhu tohoto stroje bych navrhoval upravit vinutí stroje tak, aby vytvářelo menší pulzace indukovaného napětí. Dále bych pokračoval simulacemi návrhu zaměřenými na oteplení stroje, jejichž výsledek by mohl ovlivnit přepracování návrhu z hlediska volených provozních teplot a volených typů magnetů. Zaměřil bych se také na mechanický výpočet či simulaci zaměřenou na kontrolu mechanické pevnosti hřídele.

Navržený stroj je vhodný pro čtyřkolky či terénní vozidla. Hlavním omezením stroje je zvolená tažná síla. Navijáky pro vozidla se volí na základě tažné síly. Tažná síla by měla 2x až 3x přesahovat pohotovostní hmotnost vozidla. Při použití navijáku na terénním vozidle by bylo vhodné stroj doplnit o kladkostroj.

Literatura

[1] Výběr navijáku. Elektrické navijáky a vybavení pneuservisu [online]. 2008 [cit. 07.02.2022]. Dostupné z: http://www.navijaky.net/vyver-navijaku.html

[2] Druhy provozu elektrických strojů. [online]. [cit. 07.02.2022]. Dostupné z: https://vyuka.hradebni.cz/file.php/218/Pohony/4-4-Druhy_provozu_elektrickych_pohonu.pdf

[3] Novák, Jaroslav. Uplatnění synchronních strojů v dopravní technice (1. část) - Časopis Elektro – Odborné časopisy. Odborné časopisy [online]. 2006, č.6 [cit. 17.02.2022]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/uplatneni-synchronnich-stroju-v-dopravni-technice-1-cast--13092

[4] Kopylov, Igor Petrovič. Stavba elektrických strojů: celostátní vysokoškolská učebnice pro elektrotechnické fakulty vysokých škol technických. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1988. 688 s. ISBN 04-532-88.

[5] Horníková, Lucie. Návrh synchronního motoru s PM. V Plzni, 2015. Diplomová práce (DP.). Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Roman Pechánek

[6] Industrial Magnet Manufacturer | Arnold Magnetic Technologies [online]. 2010 [cit. 24.03.2022]. Dostupné z: https://www.arnoldmagnetics.com/wp-content/uploads/2017/10/Understanding-and-Using-Reversible-Temperature-Coefficients-Constantinides-Magnetics-2010-psn-hi-res.pdf

[7] Pyrhönen, Juha, Tapani Jokinen a Valéria Hrabovcová. Design of rotating electrical machines. 2nd edition. Chichester: Wiley, 2014. 584 s. ISBN 978-1-118-58157-5.

[8] Pavelková, Naděžda. Účinnost elektrických motorů a snižování spotřeby elektrické energie – Časopis Elektro – Odborné časopisy. Odborné časopisy [online]. 2008, č.10 [cit. 26.03.2022]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/ucinnost-elektrickych-motoru-a-snizovani-spotreby-elektricke-energie--12053

[9] Hruška, Karel. Přednáška č.10 z předmětu TES2 [online]. 2012. [cit. 23.04.2022]. Dostupné z: https://portal.zcu.cz/portal/studium/courseware/kev/tes2/prednasky.html

Přílohy

Příloha č. 1 – Katalogový list N30SH

ARNOLD MAGNETIC TECHNOLOGIES

N30SH

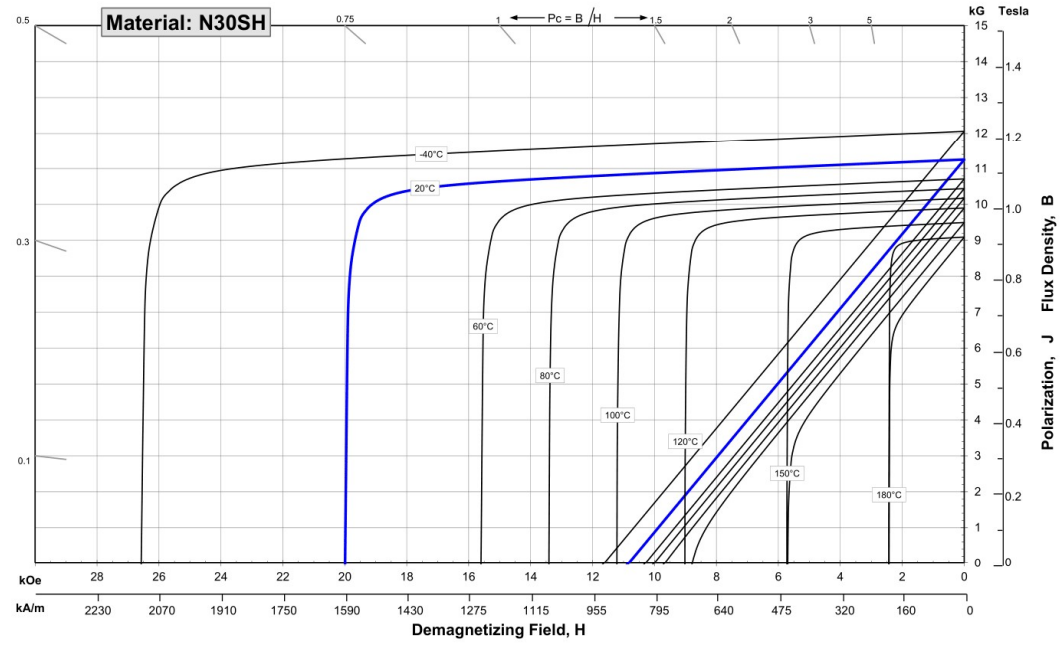
Sintered Neodymium-Iron-Boron Magnets

These are also referred to as "Neo" or NdFeB magnets. They offer a combination of high magnetic output at moderate cost. Please contact Arnold for additional grade information and recommendations for protective coating. Assemblies using these magnets can also be provided.

	Characteristic	Units	min.	nominal	max.
Magnetic Properties	**Br**, Residual Induction	Gauss	10,800	11,250	11,700
		mT	1080	1125	1170
	H_{cB}, Coercivity	Oersteds	10,200	10,700	11,200
		kA/m	811	852	891
	H_{cJ}, Intrinsic Coercivity	Oersteds	20,000		
		kA/m	1,592		
	BHmax, Maximum Energy Product	MGOe	28	31	33
		kJ/m^3	223	243	263

	Characteristic	Units	C //	C ⊥
Thermal Properties	Reversible Temperature Coefficients (1)			
	of Induction, α(Br)	%/ºC	-0.12	
	of Coercivity, α(Hcj)	%/ºC	-0.55	
	Coefficient of Thermal Expansion (2)	ΔL/L per ºC x10^{-6}	7	-1
	Thermal Conductivity	kcal/mhrºC	5.3	5.8
	Specific Heat (3)	cal/gºC	0.11	
	Curie Temperature, Tc	ºC	310	
Other Properties	Flexural Strength	psi	41,300	
		MPa	285	
	Density	g/cm^3	7.6	
	Hardness, Vickers	Hv	620	
	Electrical Resistivity, ρ	μΩ • cm	150 // 130 ⊥	

Notes: (1) Coefficients measured between 20 and 150 ºC
(2) Between 20 and 200 ºC. Values are typical and can vary.
(3) Between 20 and 140 ºC



1 kA/m = 12.566 Oe 1 kOe = 79.577 kA/m

Notes The material data and demagnetization curves shown above represent typical properties that may vary due to product shape and size.
Demagnetization curves show nominal Br and minimum Hci.
Magnets can be supplied thermally stabilized or magnetically calibrated to customer specifications.
Additional grades are available. Please contact the factory for information.

© Arnold Magnetic Technologies Corp.
770 Linden Avenue, Rochester, NY 14625
Ph: (+1) 585-385-9010
E-mail: info@arnoldmagnetics.com
www.arnoldmagnetics.com
Rev. 210607

Příloha č. 2 – Katalogový list Sura M350-50A

Typical data for SURA® M350-50A

T	W/kg at 50 Hz	VA/kg at 50 Hz	A/m at 50 Hz	W/kg at 100 Hz	W/kg at 200 Hz	W/kg at 400 Hz	W/kg at 1000 Hz	W/kg at 2500 Hz
0,1	0,02	0,08	36,4	0.06	0.17	0,48	2.02	8.34
0,2	0,09	0,20	48,1	0.24	0.62	1,75	7.15	29.0
0,3	0,18	0,36	56,1	0.50	1.30	3,62	14.7	60.1
0,4	0,30	0,54	63,2	0.81	2.15	6,02	24.6	104
0,5	0,44	0,75	70,2	1.18	3.17	8,96	37.2	162
0,6	0,59	0,99	77,5	1.60	4.36	12,5	53.1	241
0,7	0,76	1,27	85,6	2.08	5.73	16,6	72.7	343
0,8	0,95	1,58	94,8	2.62	7.31	21,5	96.9	474
0,9	1,16	1,94	106	3.21	9.09	27,2	126	638
1,0	1,39	2,39	122	3.88	11.1	33,8	162	840
1,1	1,65	2,96	146	4.61	13.4	41,5	204	1079
1,2	1,95	3,76	185	5.43	16.0	50,4	254	1360
1,3	2,29	5,11	264	6.37	18.9	60,4	312	1679
1,4	2,75	8,40	481	7.53	22.3	72,1	378	2036
1,5	3,29	19,8	1200	8.99	26.6	85,7	456	2316
1,6	4,41	54,1	3025					
1,7	4,77	124	6186					
1,8	5,00	238	10720					

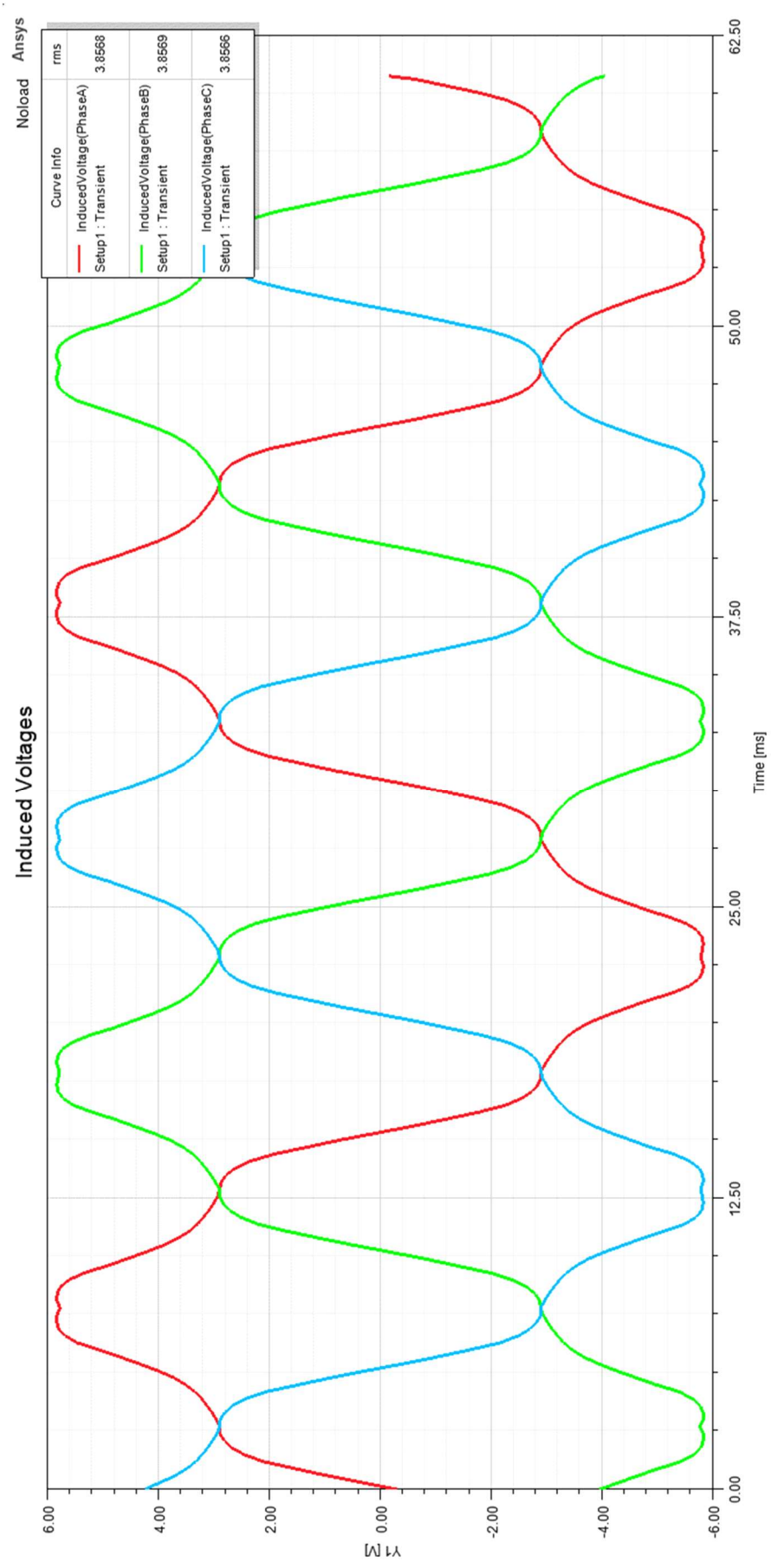
Loss at 1.5 T , 50 Hz, W/kg	3,29
Loss at 1.0 T , 50 Hz, W/kg	1,39
Anisotropy of loss, %	10
Magnetic polarization at 50 Hz	
H = 2500 A/m, T	1,58
H = 5000 A/m, T	1,67
H = 10000 A/m, T	1,78
Coercivity (DC), A/m	45
Relative permeability at 1.5 T	1050
Resistivity, μΩcm	42
Yield strength, N/mm²	320
Tensile strength, N/mm²	460
Young's modulus, RD, N/mm²	200 000
Young's modulus, TD, N/mm²	210 000
Hardness HV5 (VPN)	160

RD represents the rolling direction
TD represents the transverse direction
Values for yield strength (0.2 % proof strength)
and tensile strength are given for the rolling direction
Values for the transverse direction are approximately 5% higher

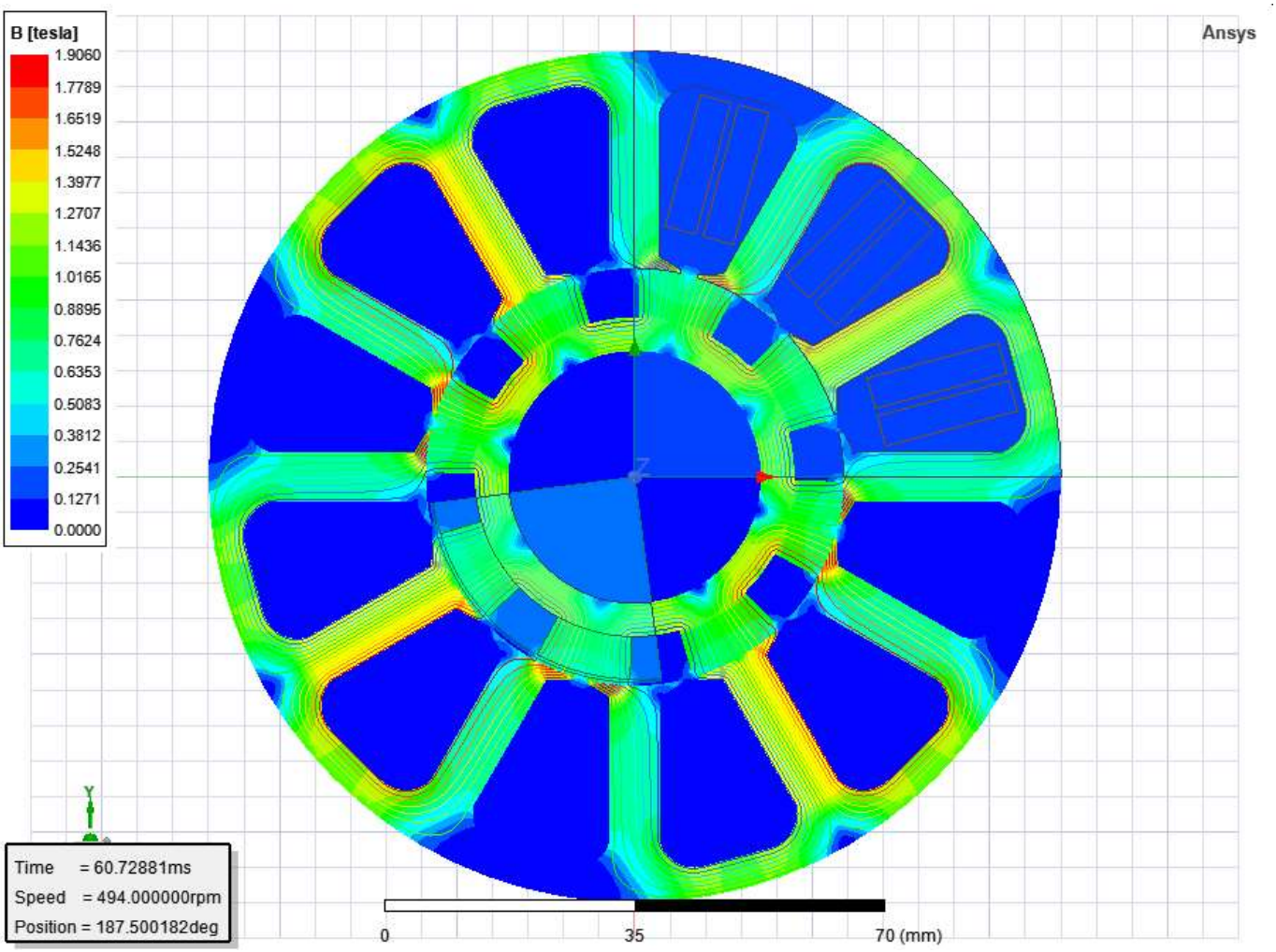
cogent
Surahammars Bruks AB

Oct 2009

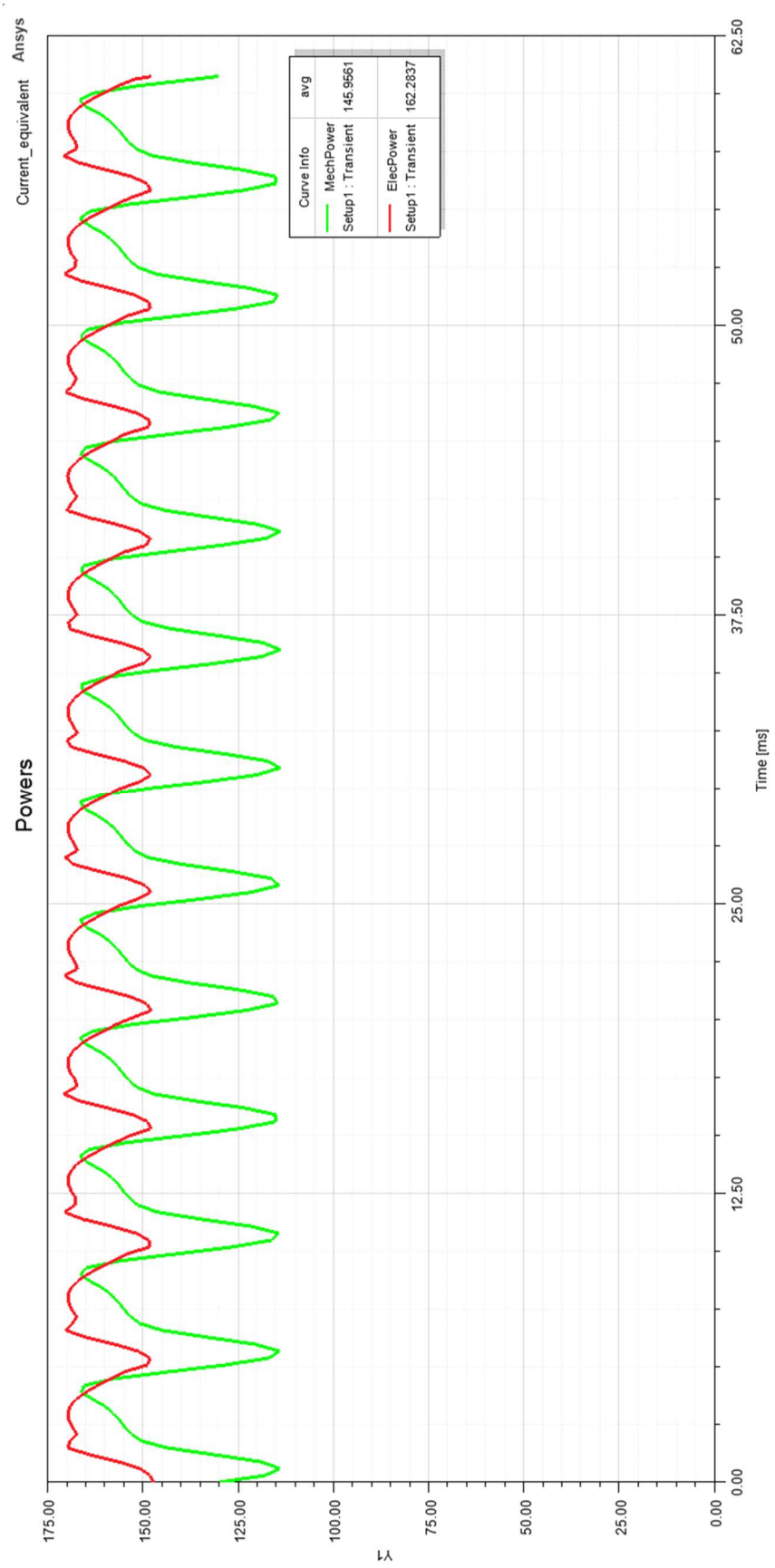
Příloha č. 3 – Průběhy indukovaného napětí



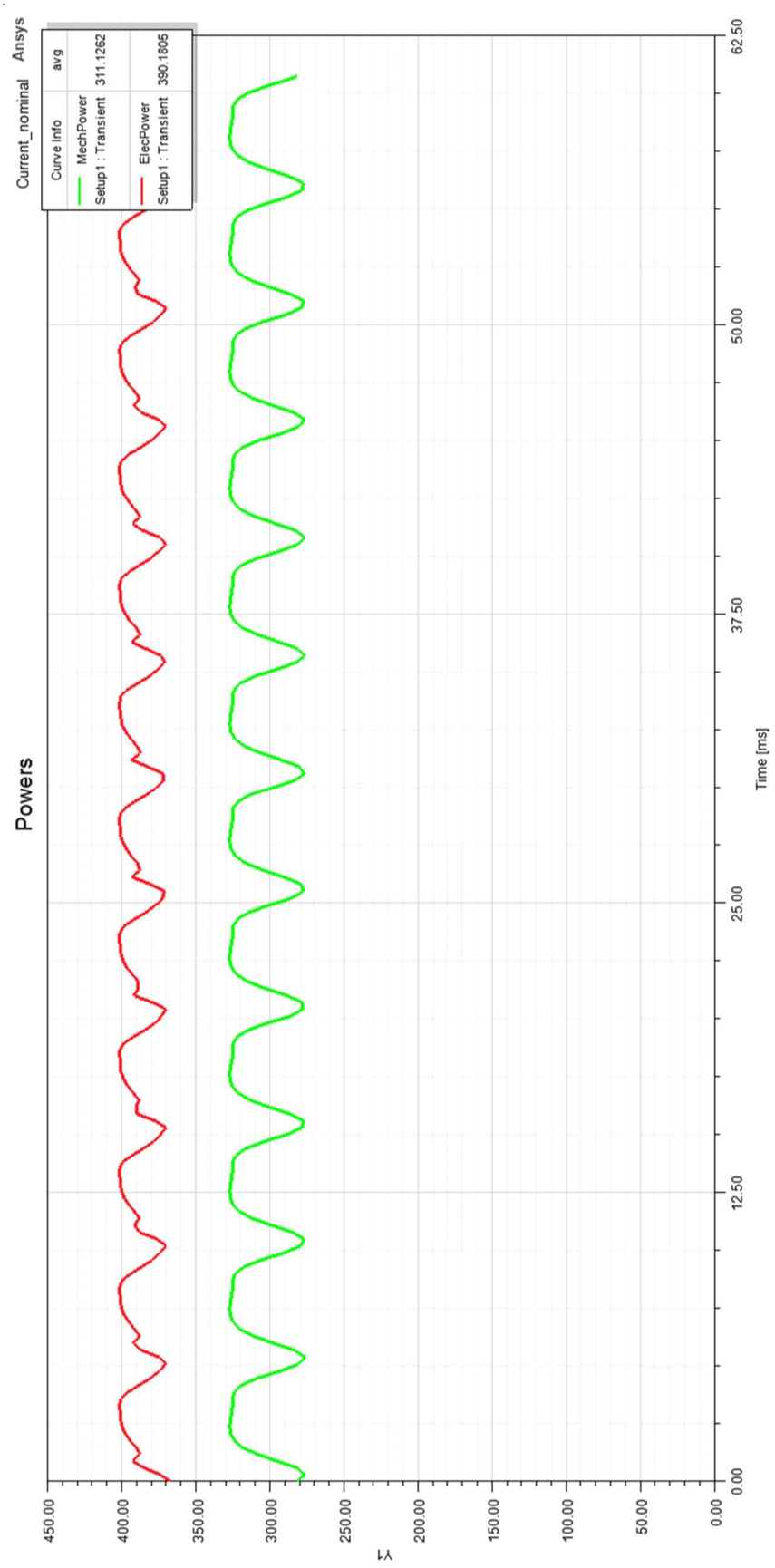
Příloha č. 4 – Rozložení magnetického pole stroje naprázdno



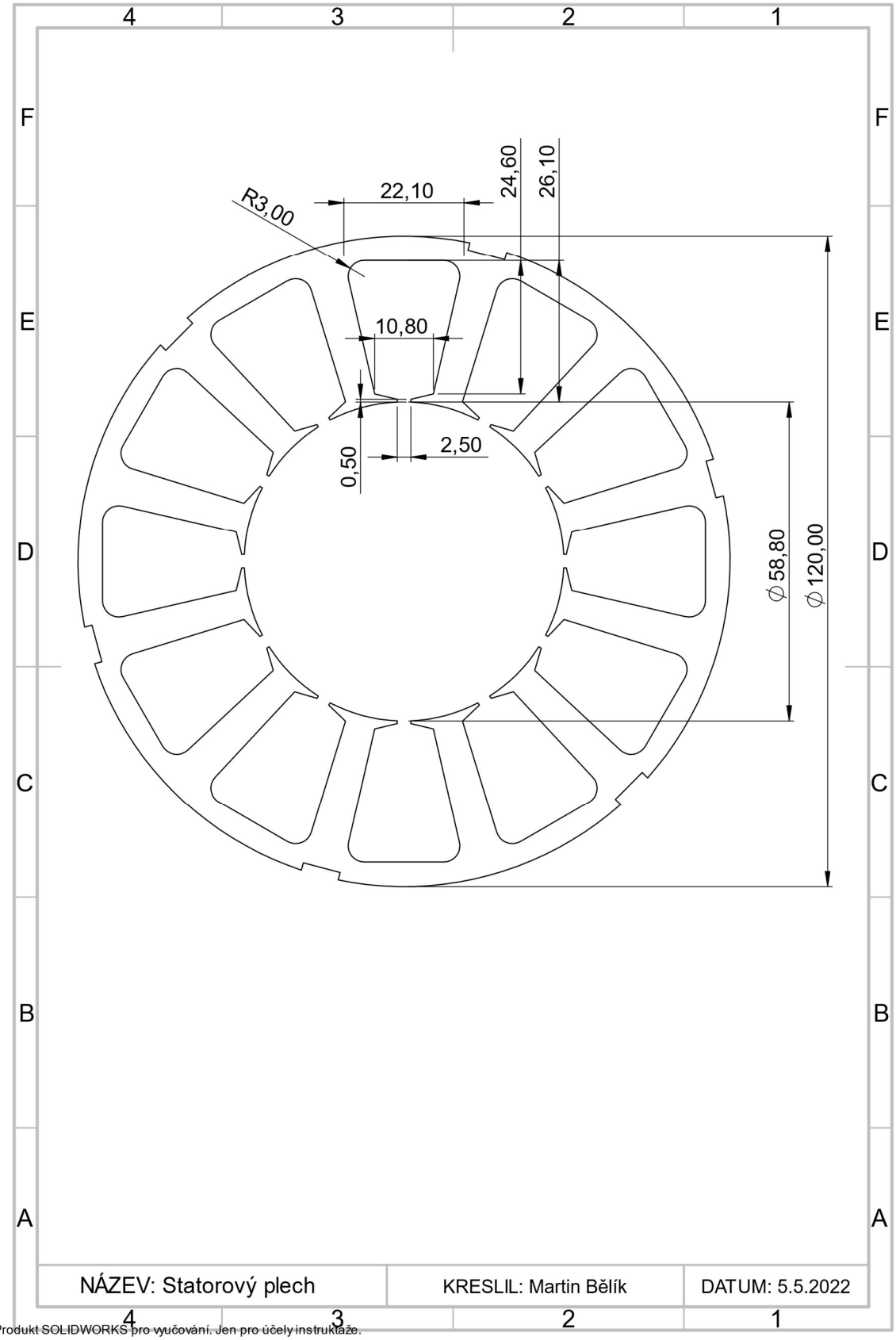
Příloha č. 5 – Průběh ekvivalentních výkonů stroje



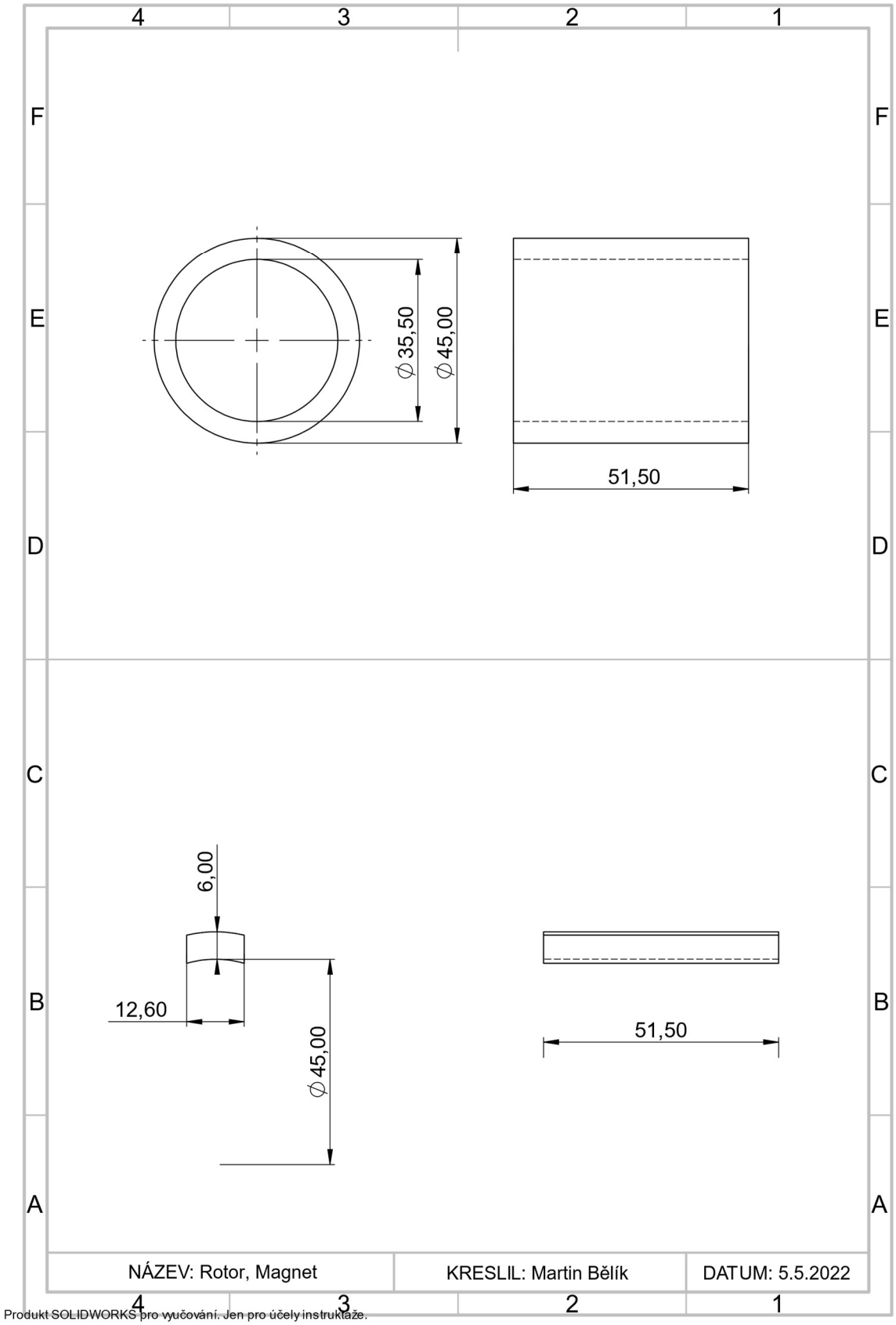
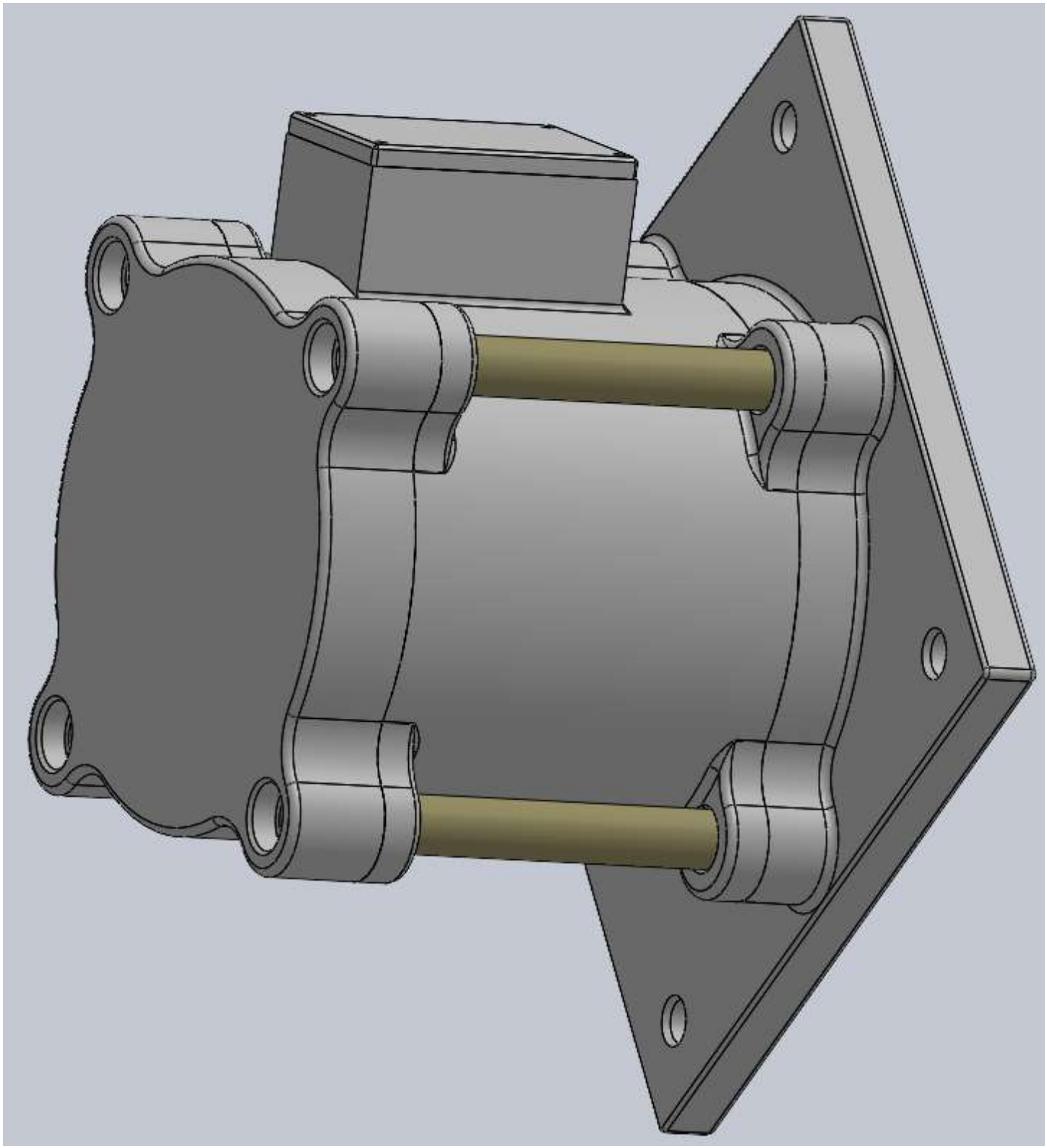
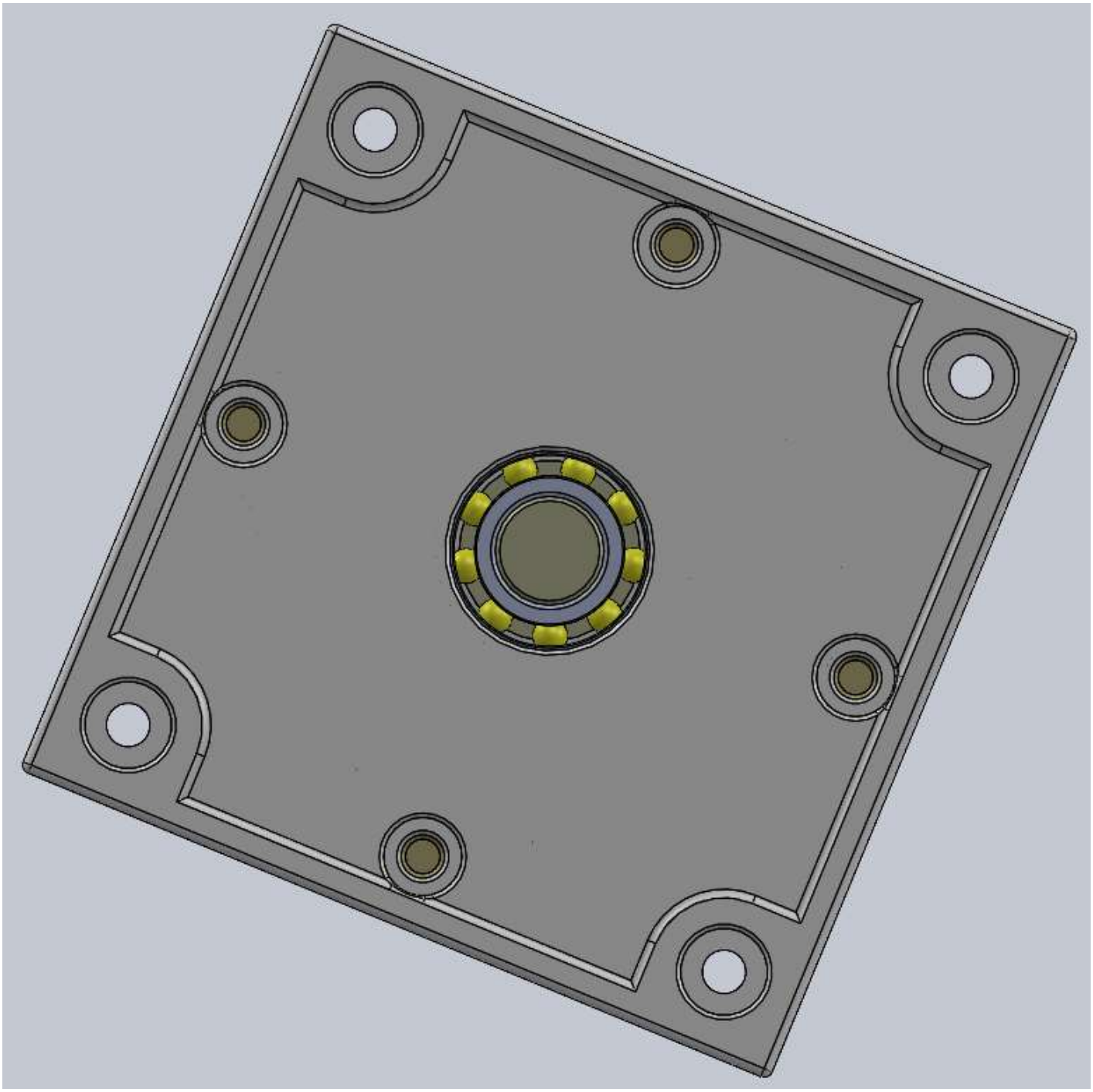
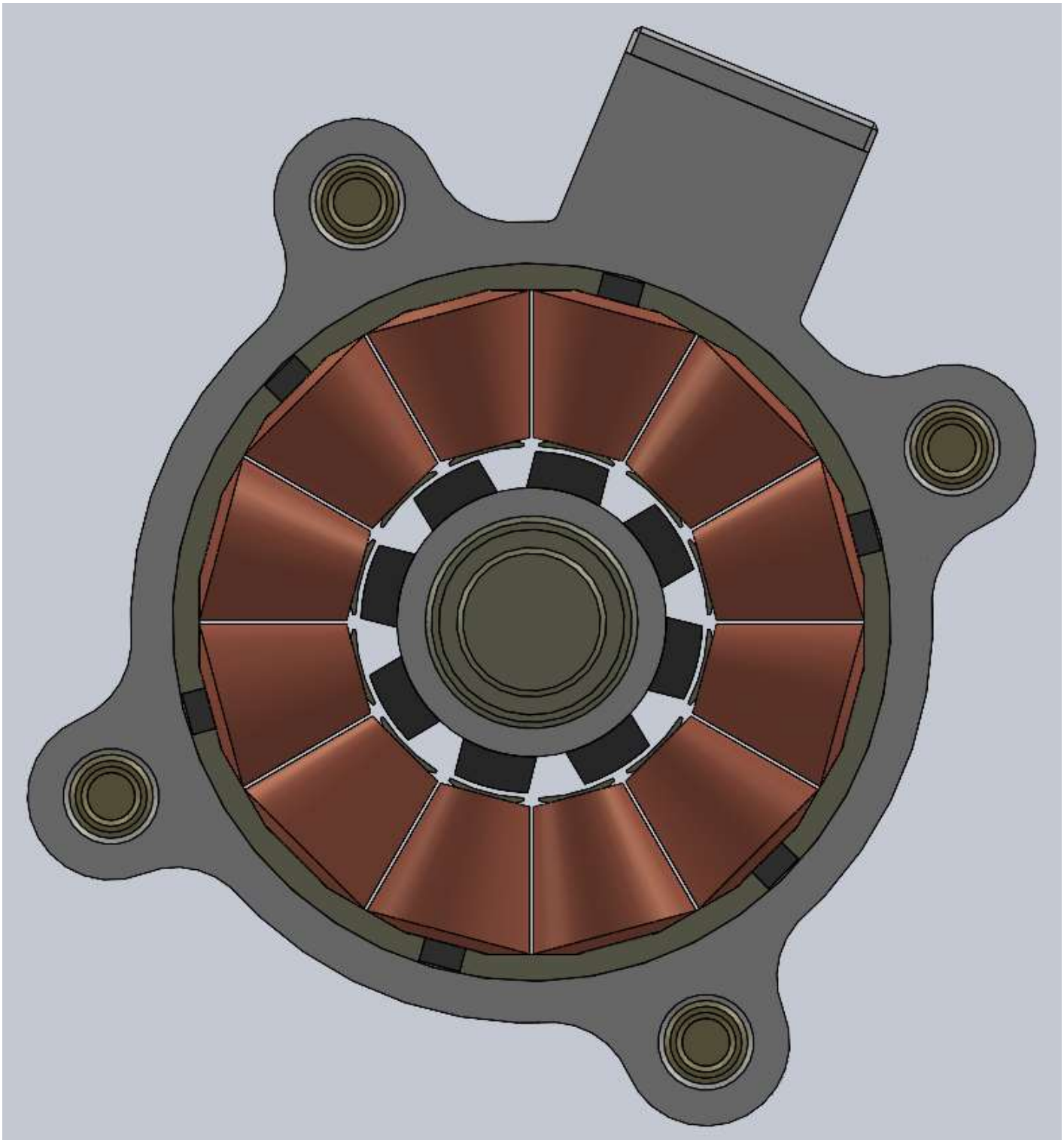
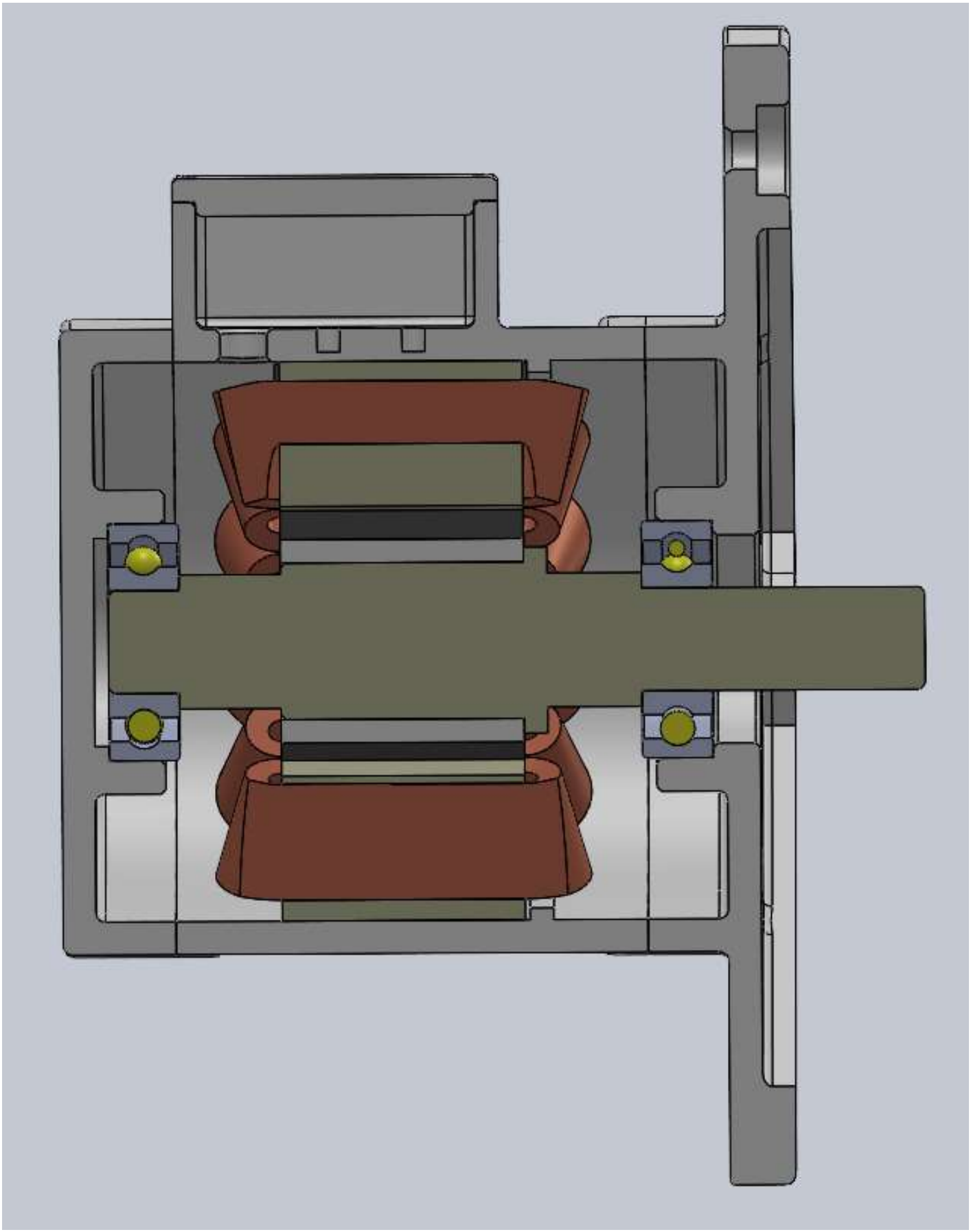
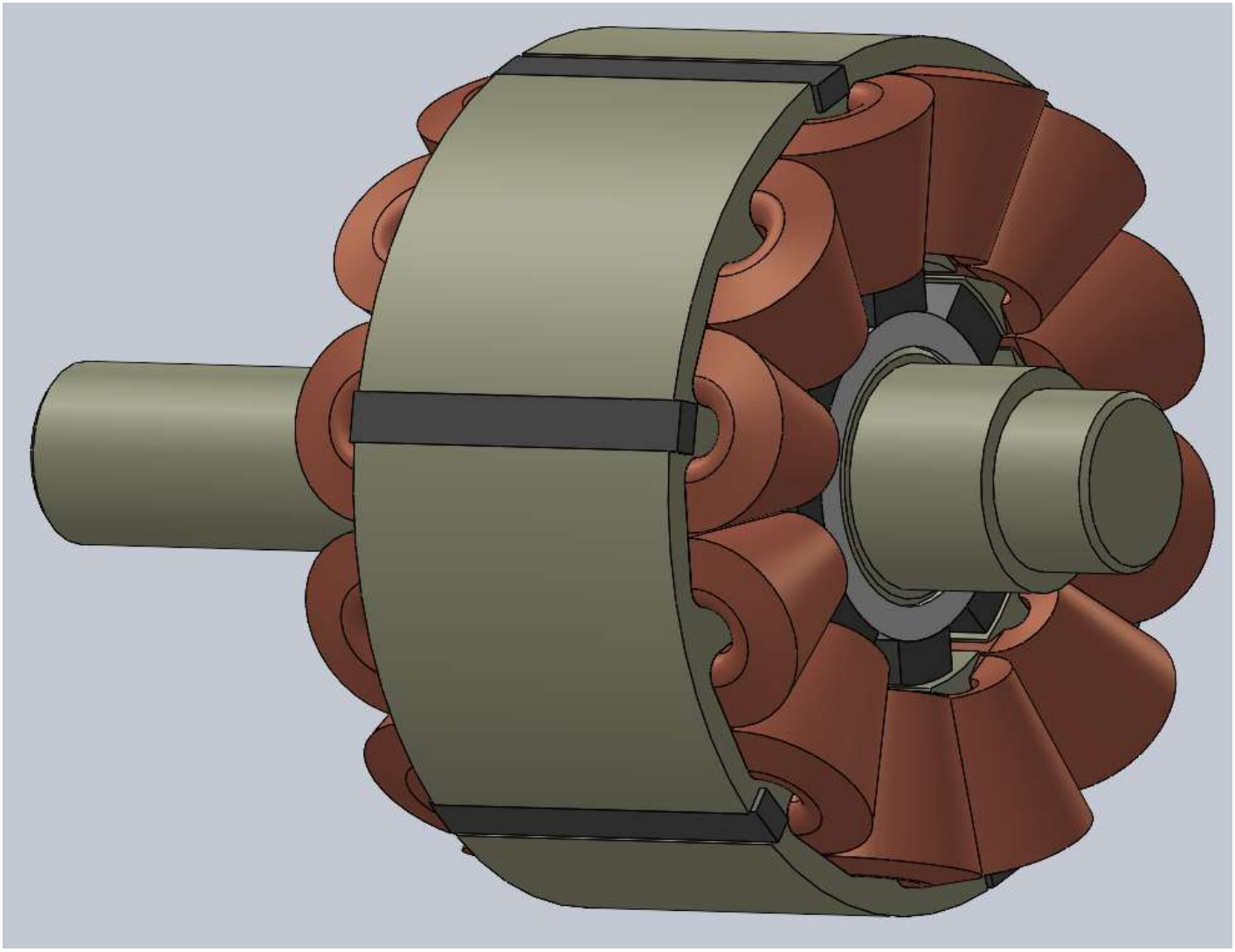
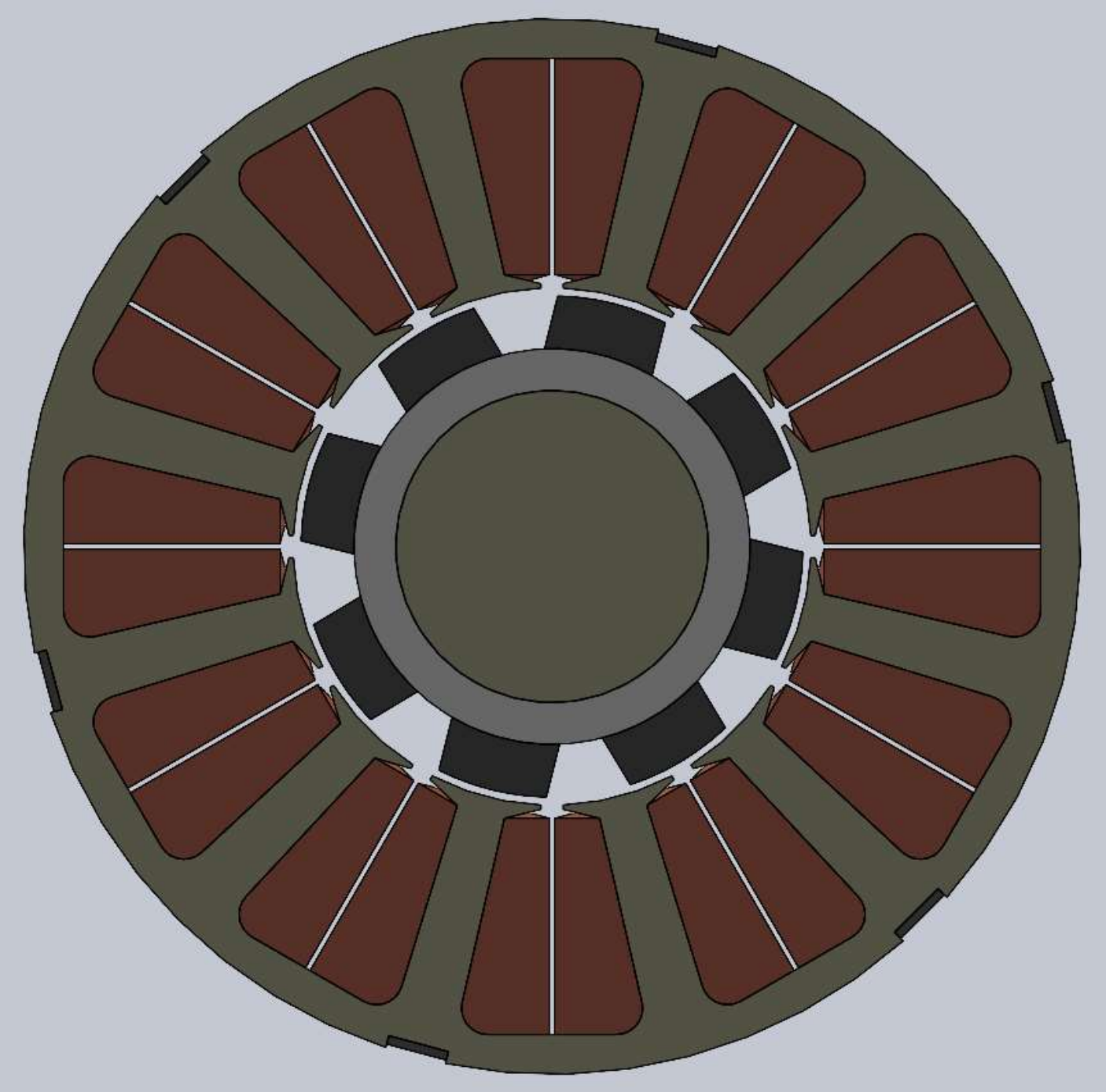
Příloha č. 6 – Průběh výkonů pro režim zatížení S3



Příloha č. 7 – Výkres statorového plechu



Příloha č. 8 – Výkres rotorového jha a magnetu



Příloha č. 9 – 3D model motoru