

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY

NÁVRH SYNCHRONNÍHO MOTORU S PM
DIPLOMOVÁ PRÁCE

Autor: Bc. Lucie Horníková

Vedoucí práce: Ing. Roman Pechánek, PhD.

2015

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracovala samostatně s použitím uvedené literatury a zdrojů informací. Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

V Plzni, 10. května 2015

.....
vlastnoruční podpis

Touto cestou bych ráda poděkovala vedoucímu své práce Ing. Romanovi Pechánkovi, Phd., za jeho čas a cenné rady při konzultacích dané problematiky.
Nemalé díky také patří mé rodině a přátelům, především za jejich psychickou podporu.

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Lucie HORNÍKOVÁ**
Osobní číslo: **E13N0040P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Průmyslová elektronika a elektromechanika**
Název tématu: **Návrh synchronního motoru s PM**
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Proveďte elektromagnetický návrh synchronního motoru s permanentními magnety.
2. Návrh proveďte pro různé uložení permanentních magnetů v rotoru.
3. Návrh motoru ověřte pomocí MKP. Analyzujte vliv uložení PM na provozní vlastnosti motoru.
4. Vytvořte 3D model synchronního motoru.
5. Parametry motoru: $P=60\text{kW}$, $U_s=400\text{V}$, $n=1000\text{ot/min}$, $2p=12$, $m=3$.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. Reece, A.B.J.; Preston, T.W.: Finite element methods in electrical power engineering, Oxford University Press, 2000, ISBN 0-19-856504-6.
2. Kopylov, I. P., kol.: Stavba elektrických strojů. Praha, STNL/MIR, 1988.
3. Hrabovcová, V.; Jokinen, T.; Pyrhönen, J.: Design of rotating electrical machines, Wiley, 2008. ISBN 978-0-470-69516.
4. Databáze iee.org.

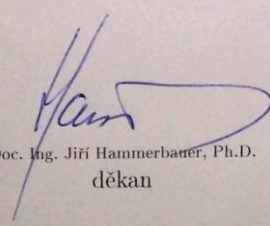
Vedoucí diplomové práce:

Ing. Roman Pechánek, Ph.D.

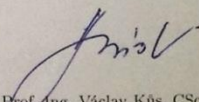
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání diplomové práce: 15. října 2014

Termín odevzdání diplomové práce: 11. května 2015


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Prof. Ing. Václav Kús, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2014

OBSAH

SEZNAM ZKRATEK	3
ANOTACE	7
ABSTRACT.....	8
ÚVOD	9
1 PERMANENTNÍ MAGNETY	10
1.1 ZÁKLADNÍ MAGNETICKÉ VELIČINY	10
1.2 MAGNETIZACE	11
1.3 DRUHY PERMANENTNÍCH MAGNETŮ	13
2 SYNCHRONNÍ STROJE S PERMANENTNÍMI MAGNETY	15
2.1 KONSTRUKČNÍ USPOŘÁDÁNÍ.....	15
2.2 APLIKACE PMSM	16
3 ELEKTROMAGNETICKÝ NÁVRH SYNCHRONNÍHO MOTORU S PM.....	18
3.1 ZADANÉ PARAMETRY STROJE.....	18
3.2 VÝPOČET HLAVNÍCH PARAMETRŮ STROJE	18
3.3 VÝPOČET VINUTÍ STATORU.....	20
3.4 VÝPOČET MAGNETICKÉHO OBVODU	24
3.5 NÁVRH STATOROVÉ DRÁŽKY	25
3.6 NÁVRH PERMANENTNÍCH MAGNETŮ	27
3.6.1 Určení rozměrů magnetu pro povrchové uložení	28
3.6.2 Určení rozměrů magnetu pro vnitřní „V“ uložení	30
3.6.3 Určení rozměrů pro vnitřní tangenciální uložení.....	33
3.6.4 Určení rozměrů pro vnitřní radiální uložení	35
3.7 VÝPOČET ODPORU VINUTÍ	37
3.8 VÝPOČET INDUKČNOSTÍ A ROZPTYLŮ VINUTÍ	38
3.9 VÝPOČET ZTRÁT A ÚČINNOST STROJE	41
4 TEPelný VÝPOČET STROJE	43
5 OVĚŘENÍ NÁVRHU POMOCÍ METODY KONEČNÝCH PRVKŮ.....	46
5.1 METODA KONEČNÝCH PRVKŮ (MKP)	46
5.2 OVĚŘENÍ NÁVRHU S POVRCHOVÝMI PM	47
5.3 OVĚŘENÍ NÁVRHU S VNITŘNÍM „V“ ULOŽENÍM PM	48
5.4 OVĚŘENÍ NÁVRHU S VNITŘNÍM TANGENCIÁLNÍM ULOŽENÍM PM.....	51
5.5 OVĚŘENÍ NÁVRHU PRO VNITŘNÍ RADIÁLNÍ ULOŽENÍ.....	52
5.6 SROVNÁNÍ JEDNOTLIVÝCH KONSTRUKČNÍCH VARIANT ROTORŮ	54
ZÁVĚR.....	56
SEZNAM LITERATURY	58
SEZNAM OBRÁZKŮ, TABULEK, GRAFŮ A DIAGRAMŮ	59
PŘÍLOHA Č. 1 – TINGLEYHO SCHÉMA.....	I
PŘÍLOHA Č. 3 – PILOVÉ SCHÉMA STATOROVÉHO VINUTÍ.....	III
PŘÍLOHA Č. 4 – KONSTRUKČNÍ UPOŘÁDÁNÍ STATOROVÉHO VINUTÍ	IV
PŘÍLOHA Č. 5 – KATALOGOVÝ LIST M330-50A.....	V
PŘÍLOHA Č. 6 – KATALOGOVÝ LIST N38SH.....	VI
PŘÍLOHA Č. 7 – NÁKRES „V“ MAGNET	VII
PŘÍLOHA Č. 8 – NÁKRES TANGENCIÁLNÍ MAGNET	VIII
PŘÍLOHA Č. 9 – NÁKRES RADIÁLNÍ MAGNET	IX
PŘÍLOHA Č. 10 – PŘÍČNÝ ŘEZ S POVRCHOVÝMI MAGNETY	X
PŘÍLOHA Č. 11 – PŘÍČNÝ ŘEZ S VNITŘNÍMI RADIÁLNÍMI MAGNETY	XI

PŘÍLOHA Č. 12 – PŘÍČNÝ ŘEZ S VNITŘNÍMI TANGENCIÁLNÍMI MAGNETY.....	XII
PŘÍLOHA Č. 13 – PŘÍČNÝ ŘEZ S VNITŘNÍMI „V“ MAGNETY.....	XIII
PŘÍLOHA Č. 14 – 3D MODEL MOTORU	XIV

SEZNAM ZKRATEK

A	Obvodová proudová hustota	[A/m]
A_{skut}	Skutečná obvodová proudová hustota	[A/m]
a	Počet paralelních větví	[-]
a_{ss}	Počet paralelních větví pro stejnosměrné vinutí	[-]
B	Magnetická indukce	[T]
B_{δ}	Magnetická indukce ve vzduchové mezeře	[T]
B_{j1}	Magnetická indukce ve jhu statoru	[T]
B_m	Magnetická indukce permanentního magnetu	[T]
B_z	Magnetická indukce v zubu statoru	[T]
b_c	Střední šířka cívký	[m]
b_m	Šířka permanentního magnetu	[m]
b_{pl}	Tloušťka plechu statorového svazku	[m]
C	Essonův činitel	[VA/m ³ ot]
C_{skut}	Skutečná hodnota Essonova činitele	[VA/m ³ ot]
$\cos\varphi$	Účinník	[-]
D_e	Vnější průměr statoru	[m]
D_1	Vnitřní průměr statoru	[m]
D_2	Vnější průměr rotoru	[m]
d_i	Průměr dílčího vodiče	[mm]
f	Frekvence	[Hz]
H	Intenzita magnetického pole	[A/m]
H_C	Koercitivní intenzita magnetického pole	[A/m]
H_{j1}	Intenzita magnetického pole jha statoru	[A/m]
H_{j2}	Intenzita magnetického pole jha rotoru	[A/m]
H_m	Intenzita magnetického pole magnetu	[A/m]
H_{δ}	Intenzita magnetického pole ve vzduchové mezeře	[A/m]
h_{ax}	Výška odsazení axiálních kanálů	[m]
h_d	Výška statorové drážky	[m]
h_{j1}	Výška jha statoru	[m]
h_m	Výška magnetu	[m]
h_z	Výška statorového zubu	[m]
I_C	Proud procházející jednou cívkou	[A]
I_d	Proud procházející drážkou	[A]
$I_{d/2}$	Proud procházející vrstvou drážky	[A]
I_{nf}	Jmenovitá hodnota fázového proudu	[A]
K_{ζ}	Činitel respektující izolaci čel	[-]
k_C	Carterův činitel	[-]
k_E	Činitel udávající poměr indukovaného napětí ku jmenovitému	[-]
k_{Fe}	Činitel plnění železa	[-]
k_{Fez}	Korekční činitel pro zuby synchronního stroje	[-]
k_{Fej}	Korekční činitel pro jho synchronního stroje	[-]
k_v	Činitel vinutí pro danou harmonickou	[-]
k_w	Činitel využití drážky	[-]
$k_{\beta}, k_{\beta'}$	Činitele pro určení rozptylů	[-]

k_p	Činitel mechanických ztrát	[-]
$L_{a\sigma}$	Rozptylová indukčnost	[H]
L_{dif}	Diferenční indukčnost	[H]
L_μ	Magnetizační indukčnost	[H]
l	Délka stroje	[m]
l_c	Střední délka cívky	[m]
l_ζ	Délka čela vinutí	[m]
l_d	Délka drážky	[m]
l_e	Efektivní délka stroje	[m]
l_{e_skut}	Skutečná efektivní délka stroje	[m]
l_{j1}	Délka střední siločáry jha statoru	[m]
l_{j2}	Délka střední siločáry jha rotoru	[m]
l_m	Délka permanentního magnetu	[m]
l_p	Délka střední siločáry pólového nástavce	[m]
l_v	Délka vyložení čel	[m]
M_n	Jmenovitý točivý moment	[Nm]
m	Počet fází	[-]
m'	Matematický počet fází	[-]
m_{Fe_j1}	Hmotnost statorového jha	[kg]
m_{Fe_z}	Hmotnost statorových zubů	[kg]
N_i	Počet cív. stran se stejným odklonem od osy fáze	[-]
$N_{cív/skup}$	Počet cívek ve skupině	[-]
N_s	Počet závitů v sérii	[-]
N_{skup}	Počet skupin vinutí	[-]
$N_{skup/f}$	Počet skupin vinutí na fázi	[-]
n	Otáčky stroje	[ot/min]
n_p	Počet dílčích vodičů	[-]
n_{pl}	Počet plechů statorového svazku	[-]
O_d	Obvod drážky	[m]
O_ζ	Obvod čel	[m]
P_n	Jmenovitý činný výkon	[W]
p	Počet pólpáru	[-]
Q	Počet drážek statoru	[-]
Q_p	Počet drážek na pól	[-]
q	Počet drážek na pól a fázi	[m]
R_{Cu_n}	Odpor vinutí při pracovní teplotě	[Ω]
r_a	Poměrná hodnota odporu vinutí	[p.u.]
S_{Cu}	Obsah mědi v drážce	[mm ²]
S_d	Plocha drážky	[mm ²]
S_i	Vnitřní elektromagnetický výkon	[VA]
S_n	Jmenovitý zdánlivý výkon	[VA]
$S_{těl}$	Ekvivalentní ochlazovaný povrch tělesa	[m ²]
S_{v1}	Průřez jednoho vodiče	[mm ²]
T_{max}	Maximální dovolená teplota	[°C]
t_{d1}	Drážková rozteč	[m]
t_{p1}	Pólová rozteč statoru	[m]
U_f	Fázové napětí	[V]

U_i	Indukované napětí	[V]
U_m	Magnetické napětí	[A]
U_s	Jmenovité sdružené napětí	[V]
V_d	Počet vodičů v drážce	[-]
$V_{d/2}$	Počet vodičů ve vrstvě drážky	[-]
v_2	Obvodová rychlost rotoru	[m/s]
X_{ao}	Rozptylová reaktance	[Ω]
X_{ad}	Podélná reaktance	[Ω]
X_d	Synchronní reaktance	[Ω]
x_d	Poměrná hodnota synchronní reaktance	[p.u.]
γ_k	Krok na komutátoru	[-]
γ_{1d}	Krok vinutí v počtu drážek	[-]
γ_1	Přední cívkový krok	[-]
γ_2	Zadní krok vinutí	[-]
Z_n	Jmenovitá impedance	[Ω]
α_1	Součinitel přestupu tepla přes vzduchovou mezeru	[W/m ² K]
α_v	Součinitel přestupu tepla pro vodní chlazení	[W/m ² K]
α_δ	Činitel pólového krytí	[-]
β	Činitel zkrácení kroku	[-]
γ_{Cu}	Měrná elektrická vodivost mědi	[S/m]
ΔP	Celkové ztráty	[W]
ΔP_{Fe}	Celkové ztráty v železe	[W]
ΔP_{Fe_j1}	Ztráty v železe pro jho	[W]
ΔP_{Fe_z}	Ztráty v železe pro zuby	[W]
$\Delta P_{j\check{c}}$	Jouleovy ztráty v čelech statoru	[W]
ΔP_{jd}	Jouleovy ztráty v drážkách statoru	[W]
ΔP_{j1}	Jouleovy ztráty ve statorovém vinutí	[W]
ΔP_m	Mechanické ztráty	[W]
ΔP_v	Ztráty odváděné do vzduchu uvnitř stroje	[W]
ΔP_{PWM}	Ztráty při uvažování napájení z PWM	[W]
ΔU_{j1}	Úbytek magnetického napětí statorového jha	[A]
ΔU_m	Úbytek magnetického napětí	[A]
ΔU_z	Úbytek magnetického napětí statorového zubu	[A]
ΔU_p	Úbytek magnetického napětí v pólovém nastavci	[A]
ΔU_δ	Úbytek magnetického napětí ve vzduch. mezeře	[A]
Δv_{id}	Teplotní spád v izolaci drážkové části	[°C]
Δv_{pov}	Oteplení vnitřního povrchu statoru	[°C]
$\Delta v_{pov\check{c}}$	Oteplení vnějšího povrchu čel	[°C]
Δv_v	Oteplení vzduchu nad teplotu okolního prostředí	[°C]
Δv_1	Střední oteplení statorového vinutí nad okolní teplotu	[°C]
$\Delta v_{1_v\check{y}sl}$	Výsledné oteplení	[°C]
Δv_1	Střední oteplení statorového vinutí	[°C]
δ	Tloušťka vzduchové mezery	[m]
δ'	Vzduchová mezera zvětšená o Carterův činitel	[mm]
δ_{ef}	Efektivní tloušťka vzduchové mezery	[mm]
η	Účinnost	[- , %]
$\lambda_{\check{c}}$	Činitel magnetické vodivosti rozptylu čel	[-]

λ_d	Činitel magnetické vodivosti drážkového rozptylu	[-]
λ_{ekv}	Ekvivalentní tepelná vodivost drážk. izolace	[W/mK]
λ_{ekv}	Střední tepelná vodivost izolace pro vsypávané vinutí	[W/mK]
μ_r	Relativní permeabilita	[-]
μ_0	Permeabilita vakua	[H/m]
ρ_{Cu}	Rezistivita mědi	[Ω/m]
σ_{Cu}	Proudová hustota ve vodiči	[A/mm ²]
τ_{dif}	Činitel diferenčního rozptylu	[-, %]
Φ	Magnetický tok	[Wb]
Φ_{j1}	Magnetický tok jhem statoru	[Wb]
Φ_z	Magnetický tok zubem statoru	[Wb]
φ_i	Osa fáze	[°]
$2p$	Počet pólů	[-]
$2u$	Počet vrstev vinutí v drážce	[-]
k, k_1, k_2, h, t, t_0	Pomocné rozměry definující uložení magnetu	[mm]
$b_1, b_2, b_0,$ h_1, h_2, h_0, h'	Rozměry drážky	[mm]

ANOTACE

Byl vytvořen elektromagnetický návrh synchronního stroje s permanentními magnety, použité magnety na bázi vzácných zemin jsou z NdFeB. V práci jsou provedeny čtyři návrhy pro různé uložení permanentních magnetů v rotoru stroje. Vliv těchto uspořádání na rozložení magnetického pole je porovnán pomocí MKP v programu FEMM. Dále byly provedeny výpočty odporů a indukčností, obsahem diplomové práce je i zjednodušený tepelný výpočet pro vodní chlazení. Pro 2D model byl použit AutoCAD 2012, pro 3D model software SolidWorks 2010.

Klíčová slova: Synchronní stroj s permanentními magnety, MKP, magnetická indukce, povrchové uložené PM, vnitřně uložené PM, NdFeB, AutoCAD, FEMM, SolidWorks

ABSTRACT

Electromagnetic design of permanent magnet synchronous machine was made; used magnetic material is rare earth NdFeB magnet. The thesis contains four designs for different arrangements of permanent magnets, which are located in rotor. Influence of these arrangements on magnetic field inside of machine is compared by FEM, by using FEMM software. Additional calculations of resistances and inductances were made; diploma thesis also contains simplified thermal calculation for water cooling. 2D model was created in AutoCAD 2012, for creation of 3D model was used SolidWorks 2010.

Key words: Permanent magnet synchronous machine, PMSM, FEM, flux density, surface mounted PM, interior mounted PM, NdFeB, AutoCAD, FEMM, SolidWork

Úvod

V minulosti jsme se synchronními stroji v režimu motoru setkali málokdy. Lze to připsat složitějšímu konstrukčnímu provedení, obtížné regulaci při rozběhích stroje a také faktu, že ve většině případů byly nahrazeny stroji asynchronními. Dnes, s rozvojem výkonové a regulační techniky, se v některých aplikacích opět dostávají do popředí synchronní motory. Příkladem je využití synchronních strojů v trakčních vozidlech, kde pro ušetření prostoru bývá budící vinutí nahrazeno permanentními magnety.

Při návrhu elektrických strojů je důležité správně dimenzovat jak elektrický, tak magnetický obvod. Dříve tyto výpočty vycházeli z ověřených návrhů, které se odvíjely podle velikosti výkonu, počtu pólů apod. S příchodem výkonné počítačové techniky a vývojem softwarů pro řešení metody konečných prvků (MKP) se návrhy podstatně ulehčily. Modelováním pomocí MKP lze získat rozložení a intenzity magnetických či teplotních polí v průřezu/objemu stroje, dále umožňují ověřit různé parametry stroje (R, L, moment, atd.) nebo převod vypočtených dat do numerických softwarů pro další zpracování. To nám usnadňuje návrhy nejrůznější konstrukční uspořádání a jejich optimalizaci.

V první části mé práce byl proveden elektromagnetický návrh synchronního motoru s permanentními magnety. Protože ne všechny části stroje korespondují s obecným návrhem synchronního motoru uvedeným v [1], byly např. pro výpočet vinutí a oteplení použity postupy pro asynchronní stroj. Předmětem této práce je provést návrhy pro různé uložení permanentních magnetů v rotoru, přičemž stator zůstává pro všechny varianty stejný. Aby bylo možné různé varianty motoru mezi sebou porovnat, byly v druhé části práce namodelovány pomocí MKP. Ze simulací byly získány rozložení magnetických polí, společně s průběhy indukci ve vzduchové mezeře pro jednotlivá uspořádání.

1 PERMANENTNÍ MAGNETY

Permanentní magnety patří z hlediska magnetických vlastností do skupiny magneticky tvrdých materiálů. Ty jsou charakterizovány širokou hysterezní smyčkou, která zobrazuje změnu magnetických vlastností materiálu při vlivu vnějšího magnetického pole. Protože definujícími vlastnostmi permanentního magnetu jsou remanentní magnetická indukce B_r a magnetická koercivita H_c , budou tyto základní veličiny popsány v kapitole 1.1.

1.1 ZÁKLADNÍ MAGNETICKÉ VELIČINY

Magnetický tok Φ [Wb] – vektorová veličina vyjadřující počet siločar magnetického pole B , tyto siločáry jsou kolmo orientovány na plochu S . Magnetický tok je vyjádřen vztahem:

$$\Phi = \int_S B dS \quad [Wb]$$

Magnetická indukce B [T] – základní vektorová veličina sloužící ke kvantitativnímu popisu magnetického pole. Vyjadřuje hustotu indukčních siločar daného magnetického pole, na kolmé ploše S . Platí vztah:

$$B = \mu \cdot H \quad [T]$$

Intenzita magnetického pole H [A/m] – vektorová veličina popisující velikost silových účinků způsobených vnějším magnetickým polem. Vyjádříme ji vztahem:

$$H = \frac{B}{\mu} \quad [A/m]$$

Permeabilita vakua μ_0 [H/m] – skalární magnetická veličina popisující míru magnetizace vakua v důsledku působení magnetického pole. Její hodnota je rovna:

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \quad [H/m]$$

Relativní permeabilita μ_r [-] – popisuje relativní magnetickou polarizovatelnost (magnetickou „vodivost“) prostředí, ve kterém je magnetické pole vytvářeno. Dle této „konstanty“ rozdělujeme materiály na diamagnetické ($\mu_r < 1$), paramagnetické ($\mu_r > 1$) a feromagnetické ($\mu_r \gg 1$)

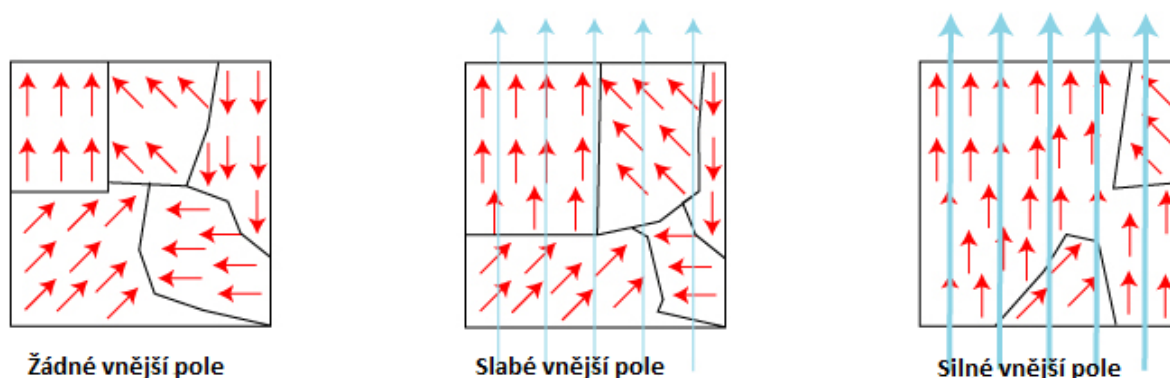
$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} [-]$$

1.2 MAGNETIZACE

To jak se bude materiál chovat v magnetickém poli, určují nosiče elektrického náboje, tj. elektrony. Elektron obíhající kolem jádra vytváří proudovou smyčku, které náleží příslušný orbitalový magnetický moment m_0 . Kromě něho má elektron ještě vlastní spinový magnetický moment m_s . Výsledný magnetický moment atomu je pak roven:

$$m_a = \sum m_0 + \sum m_s$$

K feromagnetickým vlastnostem přispívají zejména spinové magnetické momenty (na rozdíl od paramagnetik, kde se projevují naopak momenty orbitalní). Feromagnetické látky mají doménovou strukturu - tzv. Weissovy domény, které jsou od sebe vzájemně odděleny Blochovými stěnami. Magnetizace feromagnetik je kolektivní proces, při kterém dochází k otáčení spinových magnetických momentů jednotlivých domén do paralelního uspořádání. [6]

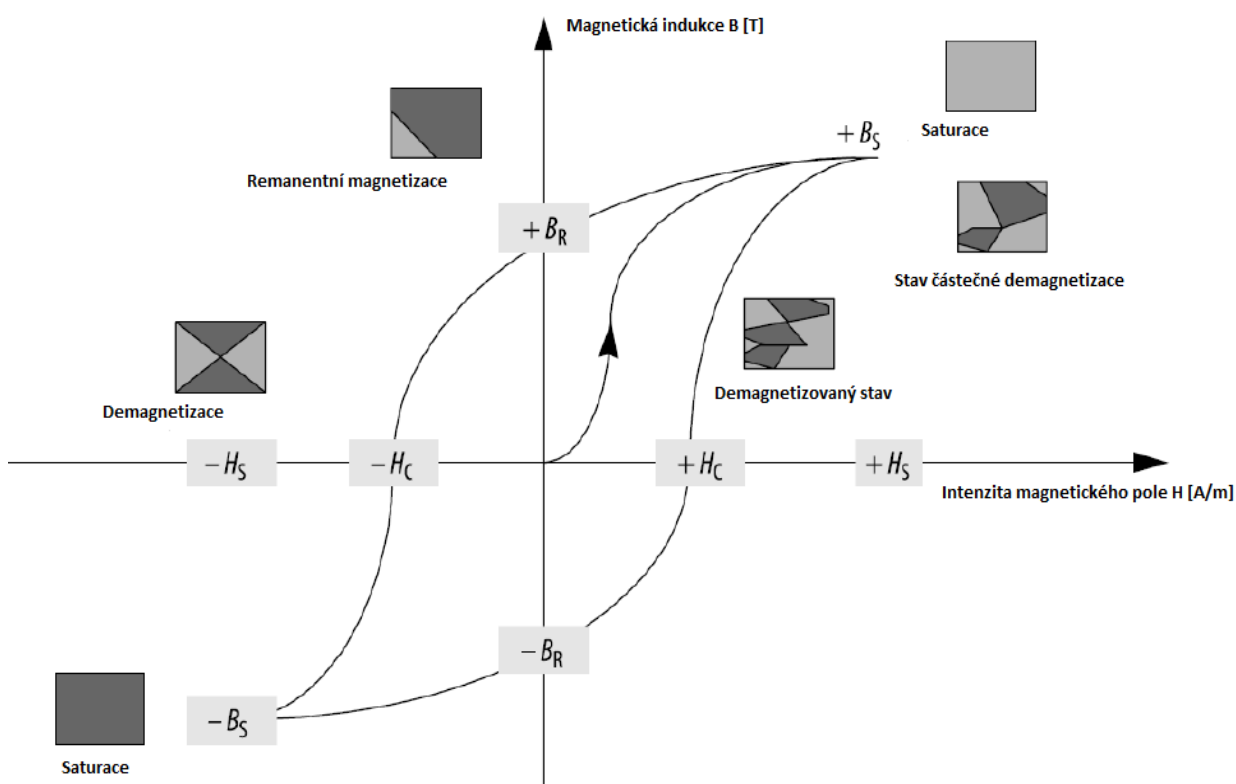


Obrázek 1-1: Magnetizace feromagnetika [11]

Postup magnetizace feromagnetika je možné vidět na obrázku 1-1. V prvním případě (absence vnějšího magnetického pole) jsou magnetické momenty Weissových domén uspořádány nahodile. V druhém případě na feromagnetikum působí slabé magnetické pole, které má za následek zvětšování domén s magnetickým momentem

působícím ve stejném (nebo podobném) směru jako směr vnějšího magnetického pole. Při působení silného vnějšího magnetické pole (třetí případ) dochází ke skokovým natočením domén, až dojde k zmagetizování celého feromagnetika. Toto skokové natočení je známý jako Barkhausenův jev. [2], [6]

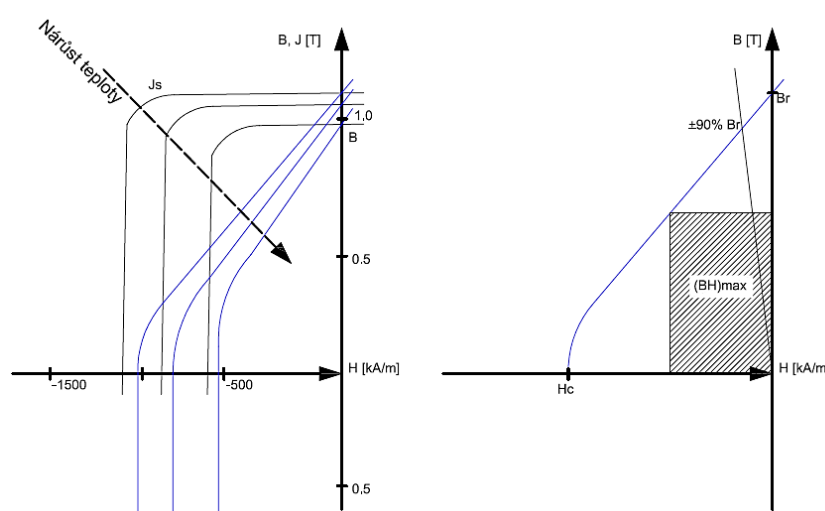
Proces magnetizace je také znázorněn na obr. 1-2, kde je zobrazena uzavřená křivka magnetování – hysterezní smyčka. Oproti magneticky měkkým materiálům, mají magneticky tvrdé materiály širokou hysterezní smyčku, což odráží jejich charakterizující vlastnosti – vysoká remanence B_r a vysoká koercivita H_c . Remanentní indukce je hodnota indukce, na které se indukce ustálí po zmagetování při nulové intenzitě magnetického pole. Tato hodnota zůstává stejná jak pro B-H charakteristiku, tak i pro B-J křivku. Koercivita udává odolnost feromagnetika proti odmagetování vnějším polem nebo vlastní demagnetizací. Můžeme hovořit o hodnotě koercivity H_{cJ} platnou pro křivku B-J, nebo hodnotě H_{cB} platnou naopak pro křivku B-H.



Obrázek 1-2: Hysterezní smyčka magneticky tvrdého materiálu [7]

V případě permanentních magnetů se využívá pouze 2. kvadrantu hysterezní smyčky v kombinaci s demagnetizační křivkou. Ten nám podává informace jak o remanenci magnetu B_r , tak i jeho koercivitě H_c . Tyto hodnoty se ze zvyšující teplotou snižují. Další důležitou veličinou permanentních magnetů je jejich energetický součin

$(BH)_{\max}$, který je dán maximálním obsahem obdélníku, kterého lze dosáhnout pod demagnetizační křivkou (viz obrázek 1-3). $(BH)_{\max}$ udává míru energie uložené v magnetu a často bývá kvalitativním měřítkem. Jinými slovy, čím větší hodnota $(BH)_{\max}$, tím silnější je magnet. Pro správné využití permanentního magnetu je potřeba mít stanovený odpovídající pracovní bod. Uvádí se, že pracovní bod pro neefektivnější využití magnetu je v místě, kde $(BH)_{\max}$ protíná demagnetizační smyčku. V elektrických strojích není možné tuto hodnotu použít, protože by mohlo dojít k demagnetizaci magnetu vlivem reakce kotvy. Pro tyto aplikace se reálná hodnota pracovního bodu pohybuje okolo 90% B_r . [5], [8]



Obrázek 1-3: Teplotní závislost permanentních magnetů, $(BH)_{\max}$ a volba pracovního bodu

1.3 DRUHY PERMANENTNÍCH MAGNETŮ

Slitiny AlNiCo

Jak už název napovídá, jedná se o slitiny hliníku, niklu, kobaltu dále také železa, mědi a titanu. Vyznačují se velkou remanencí, ale jejich koercivita je nízká, proto je u nich větší pravděpodobnost demagnetizace. AlNiCo magnety jsou velmi silné (srovnatelné s neodymovými magnety) a jsou odolné proti vysokým teplotám, až 525 °C. Permanentní magnety tohoto typu mohou být magnetovány pouze v axiálním směru. Optimální poměr průměru magnetu k jeho délce je 1:4. Využívají se v elektromotorech, měřících přístrojích, akustických měničích apod. [12]

Keramické magnety

Jsou známé také jako feritové magnety. Vyrábějí se zejména z oxidu železa a uhličitanu strontnatého. Jejich tepelná odolnost se pohybuje v rozmezí $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $250\text{ }^{\circ}\text{C}$. Feritové magnety jsou křehké a citlivé na nárazy. Díky své cenové dostupnosti, jednoduché výrobě, výborné odolnosti vůči korozi a demagnetizaci patří mezi nejvíce využívané magnety. Uplatnění nacházejí v automobilovém průmyslu, v reproduktorech, spínačích, senzorech polohy apod. [13]

Samarium kobaltové magnety (SmCo)

Patří do skupin permanentních magnetů na bázi vzácných zemin (Sm + Co jako přechodový kov), které se vyznačují vysokou účinností. Maximální remanentní indukce těchto magnetů je $1,5\text{ T}$ a max. energetický součin 450 kJ/m^3 . V praxi se ale tyto hodnoty pohybují okolo $1,05\text{ T}$ a 255 kJ/m^3 . Oproti neodymovým magnetům jsou více odolné proti korozi, ale jsou křehčí. Díky nižšímu teplotnímu koeficientu jsou odolné teplotám do $250\text{ }^{\circ}\text{C}$. Nejznámější jsou sloučeniny SmCo_5 a $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ a používají se především v krokových motorech, sluchátkách, reproduktorech atd. [2]

Neodymové magnety (NdFeB)

Stejně jako SmCo magnety, patří do skupiny magnetů na bázi vzácných zemin. Od samarium-kobaltových magnetů se odlišují vyšší koercivitou a větším maximálním energetickým součinem (až 310 kJ/m^3). Jejich remanence se pohybuje okolo $1,05 - 1,3\text{ T}$. NdFeB magnety jsou ale více citlivé na vysoké teploty, teplotní odolnost je maximálně do $180\text{ }^{\circ}\text{C}$. Jelikož obsahují železo, jsou více náchylné na korozi než SmCo, proto vyžadují povrchovou úpravu např. zinkem nebo epoxidovou pryskyřicí. Oblast použití mají obdobnou jako SmCo, ale díky absenci kobaltu jsou levnější. [2]

2 SYNCHRONNÍ STROJE S PERMANENTNÍMI MAGNETY

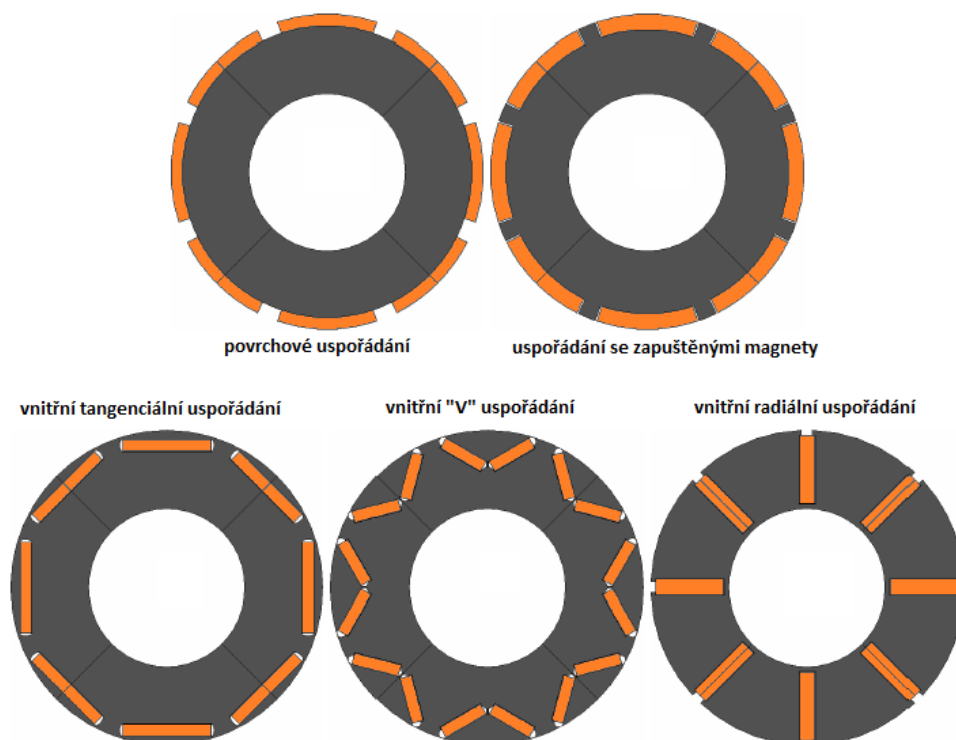
Synchronní stroje patří mezi střídavé točivé stroje (v případě motorů je stator napájen střídavým proudem, u generátorů naopak střídavý proud dodávají). Podle konstrukčního řešení rotoru se rozdělují na stroje s vyniklými póly a stroje s hladkým rotorem. Běžné synchronní stroje využívají k vybuzení magnetického pole budící vinutí protékané stejnosměrným proudem. V tomto vinutí pak vznikají ztráty, které dotačně ohřívají stroj. Tomu lze předejít použitím permanentních magnetů, které dokážou plně nahradit funkci budícího vinutí a tím dosáhnout i vysokých účinností. V elektrických strojích se využívají především magnety na bázi vzácných zemin, viz kapitola 1.3. Samozřejmě tato možnost je ekonomicky výhodná jen pro motory menších rozměrů, vzhledem k ceně permanentních magnetů.

2.1 KONSTRUKČNÍ USPOŘÁDÁNÍ

Pro synchronní stroje s permanentními magnety (dále jen PMSM) se nabízí hned několik možností konstrukčního uspořádání rotoru (obrázek 2-1). Základní dělení je na vnitřně a povrchově uložené magnety. Nejběžnější a na výrobu nejjednodušší jsou stroje s povrchovými magnety. Ty se na venek jeví jako stroj s hladkým rotorem, jelikož relativní permeabilita permanentních magnetů je $\mu_r \approx 1,05$. Magnety jsou při povrchovém uložení neefektivněji využity, protože hodnota synchronní indukčnosti je nízká a to přispívá k velikosti momentu. Nevýhodou je mechanické namáhání magnetů a velikost vířivých proudů při vysokých otáčkách. V případě vnitřně uložených magnetů dochází vlivem rozptylů ke „ztrátě“ cca čtvrtiny magnetického toku. Na druhou stranu na rozdíl od povrchového uložení jsou magnety mechanicky i magneticky chráněny. U některých konstrukčních řešení pro vnitřní uložení lze použít dva permanentní magnety na pól, čímž lze dosáhnout vyšší indukce ve vzduchové mezeře při stavu naprázdno. [2] [14]

V případě povrchového uložení se PM na rotor připevňují lepením a omotáním skelnou bandáží, která PM chrání proti mechanickým vlivům. U vnitřního uložení jsou magnety v rotoru zajištěny klíny, které zároveň brání uzavírání nežádoucího rozptylového toku. S ohledem na charakter výroby (kusová/sériová) se volí způsob magnetizace permanentních magnetů. Prvním případem je zmagnetování PM ještě před instalací na rotor stroje, ale následné působení magnetických sil sebou přináší obtížnější manipulaci při samotném osazování PM. Druhým způsobem je zmagnetování magnetů až po jejich

osazení na stroj. K tomu jsou zapotřebí speciální stroje a technika, a proto se tento způsob využívá především u sériové výroby.



Obrázek 2-1: Příklady konstrukčních uspořádání permanentních magnetů [14]

2.2 APLIKACE PMSM

Díky použití permanentních magnetů zažívají dnes synchronní stroje renesanci, zejména v oblasti dopravní techniky. U kolejových vozidel v minulém století dominovali stejnosměrné stroje a to především díky svým regulačním vlastnostem. V současné době jsou stejnosměrné, potažmo asynchronní stroje ve vybraných trakčních aplikacích nahrazovány právě PMSM.

Mezi hlavní výhody PMSM patří menší objem stroje a s tím související menší moment setrvačnosti. Díky menšímu objemu je zde i možnost přímého pohonu bez převodovky. PMSM mají také velkou momentovou přetížitelnost a vyšší účinnost, vzhledem k absenci ztrát v budicím vinutí. Nevýhodami zůstává vyšší cena a složitější konstrukce. [15]

Při návrhu PMSM je snaha o optimalizaci konstrukce, především o poměr průměru k délce stroje. Vzhledem k počtu segmentů permanentních magnetů je výhodnější kratší motor. U trakce patří mezi hlavní požadavky minimalizace rozměrů motoru, to se projevuje především zvýšením ztrátového tepla, z toho důvodu bývají trakční PMSM

chlazený vodou. V trakčních aplikacích se dále můžeme setkat i s tzv. nábojovými motory, kdy je použito konstrukční uspořádání s vnějším rotorem. Takovýto motor je pak pevně spojen s kolem vozidla. Výkony motorů pro tramvajová vozidla se pohybují v rozsahu od 40 do 60 kW, s jmenovitými otáčkami od 500 – 1000 ot/min. Jelikož se většinou jedná o motory s velkým počtem pólů, překračují jejich napájecí frekvence hodnotu 100 Hz. Příkladem takového pohonu je například tramvaj 15T od firmy Škoda Transportation a.s., která je vybavena 16 synchronními motory s permanentními magnety o výkonu 45kW, každý napájený z vlastního střídače. [15]

Kromě oblasti kolejových vozidel se začínají PMSM aplikovat i ve vozidlech silničních, resp. v elektromobilech a hybridních vozidlech. V dnešní době je snahou všech automobilových výrobců vyvíjet ekologicky příznivé a palivově co nejméně náročné pohony. Slibnou oblastí splňující tyto požadavky jsou právě elektromobily a hybridní vozidla. I zde je významným faktorem minimalizování rozměrů motoru při zachování výkonu, společně se zajištěním vysoké účinnosti při nízkých otáčkách. Synchronními motory s permanentními magnety jsou vybaveny například vozidla Lexus NX 300h (2 PMSM o celkovém výkonu 145 kW) nebo BMW i3 (výkon 135 kW) [14]. V roce 2013 začala firma Schaeffler ve spolupráci s firmou Ford vyvíjet nový typ pohonu tzv. E-Wheel Drive (obr. 2-2). Zvláštností tohoto pohonu je, že automobil je přímo poháněn elektromotory, které jsou společně s výkonovými obvody, brzdami a chladičím systémem, přímou součástí motoru. [16]



Obrázek 2-2: Konstrukční řešení systému E-Wheel Drive [16]

Synchronní motory s permanentními magnety nacházejí uplatnění v řadě dalších aplikací jako např. servomotory, optické mechaniky, hodinové strojky apod.

3 ELEKTROMAGNETICKÝ NÁVRH SYNCHRONNÍHO MOTORU S PM

3.1 ZADANÉ PARAMETRY STROJE

Jmenovitý výkon:	$P_n = 60 \text{ kW}$
Jmenovité napětí:	$U_s = 400 \text{ V}$
Jmenovité otáčky:	$n_n = 1000 \text{ ot/min}$
Počet fází:	$m = 3$
Počet pólů:	$2p = 12$

K těmto zadaným parametrům jsem si dále zvolila předběžnou hodnotu účinníku a účinnost stroje, jelikož budou nezbytné pro další výpočty. Krytí stroje je IP 54 a typ chlazení IC3W7.

účinník:	$\cos\varphi = 0,85$
účinnost stroje:	$\eta = 0,95$

3.2 VÝPOČET HLAVNÍCH PARAMETRŮ STROJE

Hodnota fázového napětí vychází z hodnoty napětí sdruženého:

$$U_f = \frac{U_s}{\sqrt{3}} = \frac{400}{\sqrt{3}} = 230 \text{ V} \quad (3.2.1)$$

Frekvence stroje vychází ze vztahu:

$$f = \frac{p \cdot n}{60} = \frac{6 \cdot 1000}{60} = 100 \text{ Hz} \quad (3.2.2)$$

kde p je počet pólů stroje.

Zdánlivý výkon stroje:

$$S_n = \frac{P}{\cos\varphi \cdot \eta} = \frac{60000}{0,85 \cdot 0,95} = 74\,303,4 \text{ VA} \quad (3.2.3)$$

Jmenovitý proud jedné fáze:

$$I_{fn} = \frac{S_n}{\sqrt{3}U_s} = \frac{74303,4}{\sqrt{3} \cdot 400} = 107,25 \text{ A} \quad (3.2.4)$$

Dále můžeme určit jmenovitý točivý moment stroje:

$$M_n = \frac{P \cdot 30}{\pi \cdot n} = \frac{60000 \cdot 30}{\pi \cdot 1000} = 572,96 \text{ Nm} \quad (3.2.5)$$

Protože rozměry stroje nejsou pevně dány, volím vnitřní průměr statoru $D_1 = 200$ mm. Je také potřeba zvolit hodnotu indukce ve vzduchové mezeře B_δ a předběžnou obvodovou proudovou hustotu A . Tyto hodnoty jsem zvolila následovně:

$$B_\delta = 1 \text{ T}$$

$$A = 62\,000 \text{ A/m}$$

Délka stroje vychází z výkonové rovnice pro střídavé stroje:

$$S_i = C \cdot D_1^2 \cdot l \cdot n \quad (3.2.6)$$

kde S_i představuje vnitřní elektromagnetický výkon určený dle vztahu:

$$S_i = S \cdot k_E = 74303,4 \cdot 0,82 = 60928,8 \text{ VA} \quad (3.2.7)$$

kde k_E udává poměr indukovaného napětí ku jmenovitému napětí stroje. Jeho hodnotu volím $k_E = 0,82$.

Abychom mohli určit z výkonové rovnice délku stroje, musí se určit hodnota Essonova činitele, který vychází ze vztahu:

$$C = \frac{\pi^2}{60\sqrt{2}} \cdot A \cdot B_\delta \cdot k_v = \frac{\pi^2}{60\sqrt{2}} \cdot 62000 \cdot 1 \cdot 0,93 = 6706,7 \text{ VA/m}^3 \text{ot} \quad (3.2.8)$$

Pozn.: činitel vinutí k_v byl předběžně zvolen, jeho hodnota bude určena následovně po návrhu vinutí stroje.

Délka stroje určená z výkonové rovnice:

$$l = \frac{S_i}{C \cdot D_1^2 \cdot n} = \frac{60928,8}{6706,7 \cdot 0,2^2 \cdot 1000} = 0,227 \text{ m} \quad (3.2.9)$$

Pólová rozteč statoru:

$$t_{p1} = \frac{\pi \cdot D_1}{2p} = \frac{\pi \cdot 0,2}{12} = 0,0524 \text{ m} \quad (3.2.10)$$

Po konzultaci s vedoucím práce volím velikost vzduchové mezery $\delta = 0,8$ mm. V tuto chvíli lze určit i průměr rotoru jako:

$$D_2 = D_1 - 2\delta = 0,200 - 2 \cdot 0,0008 = 0,198 \text{ m} \quad (3.2.11)$$

3.3 VÝPOČET VINUTÍ STATORU

Typ statorového vinutí volím dvouvrstvé (čili $2u = 2$), vlnové nekřížené. Pro další výpočty je potřeba zvolit počet drážek na pól a fázi q . Při jeho volbě je potřeba věnovat pozornost dvěma faktorům:

- jmenovatel c nesmí být násobkem počtu fází m (tj. 3,6, atd.)
- jmenovatel c nesmí být větší než hodnota p (v tomto případě ≤ 6)

S ohledem na výše uvedené volím počet drážek na pól a fázi:

$$q = \frac{n}{c} = \frac{5}{4} \quad (3.3.1)$$

Po volbě q lze určit počet drážek statoru:

$$Q = 2p \cdot m \cdot q = 12 \cdot 3 \cdot \frac{5}{4} = 45 \quad (3.3.2)$$

Následně můžeme určit drážkovou rozteč statoru:

$$t_{d1} = \frac{\pi \cdot D_1}{Q} = \frac{\pi \cdot 0,2}{45} = 0,0139 \text{ m} \quad (3.3.3)$$

Počet drážek na pól:

$$Q_p = \frac{Q}{2p} = \frac{45}{12} = 3,75 \text{ drážek} \quad (3.3.4)$$

Podle této hodnoty volím krok vinutí v počtu drážek (pro vinutí se zkráceným krokem):

$$y_{1d} = 3$$

$$\beta = \frac{y_{1d}}{Q_p} = \frac{3}{3,75} = 0,8 \quad (3.3.5)$$

Přední cívkový krok určíme dle vztahu:

$$y_1 = 2u \cdot y_{1d} + 1 = 2 \cdot 3 + 1 = 7 \quad (3.3.6)$$

Pro určení zadního cívkového potřebujeme znát krok na komutátoru:

$$y_k = \frac{\varepsilon Q - a_{ss}}{p} = \frac{1 \cdot 45 - 3}{6} = 7 \quad (3.3.7)$$

Pozn.: hodnota ε pro vlnové vinutí je $\varepsilon=1$, počet paralelních větví $a_{ss}=3$

Zadní cívkový krok:

$$y_2 = 2y_k - y_1 = 2 \cdot 7 - 7 = 7 \quad (3.3.8)$$

Jelikož je vinutí střídavé je potřeba znát tzv. matematický počet fází, tato hodnota se běžně stanovuje jako $m' = 6$. V tomto bodě je možné zjistit, kolik skupin bude vinutí mít a z kolika cívek se skládají jednotlivé skupiny.

Počet skupin vinutí vyjádříme jako:

$$N_{skup} = m' \cdot a_{ss} = 6 \cdot 3 = 18 \quad (3.3.9)$$

Počet skupin na fázi:

$$N_{skup/f} = \frac{m' \cdot a_{ss}}{m} = \frac{6 \cdot 3}{3} = 6 \quad (3.3.10)$$

Následně určíme počet cívek ve skupině:

$$N_{cív/skup} = \frac{Q}{N_{skup}} = \frac{45}{18} = 2,5 \quad (3.3.11)$$

Z těchto výpočtů vyplývá, že každá fáze bude tvořena 6 skupinami cívek, střídavě po 2 a 3 cívkách.

Počet závitů v sérii pro vinutí statoru:

$$N_s = \frac{\pi \cdot D_1 \cdot A}{2 \cdot m \cdot I_1} = \frac{\pi \cdot 0,2 \cdot 62000}{2 \cdot 3 \cdot 107,25} = 60,54 \quad (3.3.12)$$

Protože N_s musí být číslo celé, zaokrouhluji ho na hodnotu $N_s = 60$.

Pro návrh drážky je potřeba určit počet vodičů v drážce. Ten, vzhledem k volbě dvouvrstvého vinutí, musí nabývat pouze sudých hodnot:

$$V_d = \frac{a \cdot N_s}{p \cdot q} = \frac{1 \cdot 60}{6 \cdot \frac{5}{4}} = 8 \quad (3.3.13)$$

Tzn. pro jednu vrstvu drážky:

$$V_{d/2} = \frac{V_d}{2u} = \frac{8}{2} = 4 \quad (3.3.14)$$

U střídavých vinutí je důležitým faktorem činitel vinutí k_v , který respektuje zmenšení indukovaného napětí ve vinutí v případě zkrácení jeho kroku. Tento činitel lze určit jak numericky, tak například pomocí Tingleyho schématu. V mé práci jsem použila druhý způsob, tj. pomocí Tingleyho schématu. Na obr. 3-1 je Tingleyho schéma pro první 4 póly stroje (poté se schéma opakuje).

pól	fáze	A				C				B			
		A'				C'				B'			
1.	+	1+			3+			5-			7+		
		2+			4-			6+			8-		
2.	-		9-			11+			13+			15-	
			10-			12+			14-			16+	
3.	+			17+			19-			21+			23+
				18-			20-			22+			24-
4.	-				25-			27+			29-		
					26+			28-			30-		

Obrázek 3-1: Tingleyho schéma pro první 4 póly stroje

Obecný vzorec pro činitel vinutí z [1]:

$$k_{vv} = \frac{\sum_n N_i \cos v \varphi_i}{n} \quad (3.3.15)$$

kde N_i je počet cívkových stran se stejným odklonem od osy fáze φ_i .

S použitím vztahu 3.3.15 dostáváme činitele pro jednotlivé harmonické:

$$k_{v1} = \frac{2 \cdot \cos 6^\circ + 1 \cdot \cos 18^\circ + 1 \cdot \cos 30^\circ + 1 \cdot \cos 42^\circ}{5} = 0,909$$

$$k_{v5} = \frac{2 \cdot \cos(5 \cdot 6^\circ) + 1 \cdot \cos(5 \cdot 18^\circ) + 1 \cdot \cos(5 \cdot 30^\circ) + 1 \cdot \cos(5 \cdot 42^\circ)}{5} = 0$$

$$k_{v7} = \frac{2 \cdot \cos(7 \cdot 6^\circ) + 1 \cdot \cos(7 \cdot 18^\circ) + 1 \cdot \cos(7 \cdot 30^\circ) + 1 \cdot \cos(7 \cdot 42^\circ)}{5} = 0,088$$

$$k_{v11} = \frac{2 \cdot \cos(11 \cdot 6^\circ) + 1 \cdot \cos(11 \cdot 18^\circ) + 1 \cdot \cos(11 \cdot 30^\circ) + 1 \cdot \cos(11 \cdot 42^\circ)}{5} = 0,104$$

Obsah vyšších harmonických v magnetickém poli vzduchové mezery je charakterizován diferenčním rozptylem. Ten lze získat pomocí Görgesova obrazce. Podrobný postup k jeho určení je popsán v [3] (Görgesův obrazec pro toto vinutí je v příloze č. 2). Diferenční rozptyl je dán vztahem:

$$\tau_{dif} = \frac{r_g^2 - r_{1g}^2}{r_{1g}^2} = \frac{1,375 - 1,179}{1,179} = 0,166 \rightarrow 16,6 \% \quad (3.3.16)$$

Jelikož hodnota N_s byla zaokrouhlena na nejbližší celé číslo, je potřeba přepočítat hodnoty obvodové proudové hustoty A . Dále se přepočtou dle vztahů 3.2.8 a 3.2.9 i skutečné hodnoty Essonova činitele C a délka stroje l_e :

$$A_{skut} = \frac{N_s \cdot 2m \cdot I_1}{\pi \cdot D_1} = \frac{60 \cdot 6 \cdot 107,25}{\pi \cdot 0,2} = 61\,449 \text{ A/m} \quad (3.3.17)$$

$$C_{skut} = \frac{\pi^2}{60\sqrt{2}} \cdot A \cdot B_\delta \cdot k_v = \frac{\pi^2}{60\sqrt{2}} \cdot 61449 \cdot 1 \cdot 0,909 = 6502,1 \text{ VA/m}^3 \text{ ot}$$

$$l_e = \frac{S_i}{D_1^2 \cdot n \cdot C_{skut}} = \frac{60928,8}{0,2^2 \cdot 1000 \cdot 6502,1} = 0,234 \text{ m}$$

Statorový paket je složený z plechů tloušťky 0,5 mm, proto se musí délka stroje přepočíst, tak aby počet plechů bylo číslo celé.

$$n_{pl} = \frac{l_e}{b_{pl}} = \frac{0,234}{0,5 \cdot 10^{-3}} = 468,4 \rightarrow 469 \quad (3.3.18)$$

Skutečná délka stroje:

$$l_{e_skut} = n_{pl} \cdot b_{pl} = 469 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3} = 0,235 \text{ m} \quad (3.3.19)$$

Proud procházející jednou cívkou je dán:

$$I_c = \pi \cdot D_1 \cdot A = \pi \cdot 0,2 \cdot 61449 = 38609,3 \text{ A} \quad (3.3.20)$$

Z toho odvodíme proud procházející drážkou:

$$I_d = \frac{I_c}{Q} = \frac{38609,3}{45} = 858 \text{ A} \quad (3.3.21)$$

A proud v jedné vrstvě drážky:

$$I_{d/2} = \frac{I_d}{2u} = \frac{858}{2} = 429 \text{ A} \quad (3.3.22)$$

Kontrolně můžeme provést přepočet počtu vodičů v jedné vrstvě drážky pomocí poměru proudu $I_{d/2}$ a I_n :

$$V_{d/2} = \frac{I_{d/2}}{I_n} = \frac{429}{107,25} = 4 \quad (3.3.23)$$

Pro navržené vinutí je v přílohách č. 1 až 4 kompletní Tingleyho schéma, pilové schéma a konstrukční uspořádání vinutí.

3.4 VÝPOČET MAGNETICKÉHO OBVODU

Magnetický obvod statoru bude složen z plechu m330-50a (katalogový list viz příloha č. 5). Vzhledem k tomu, že délka stroje nepřesahuje 0,3 m, bude magnetický obvod statoru bez radiálních kanálů. V plechách statoru budou vyraženy axiální kanály o průměru 8 mm, které budou zapuštěny do statorového jha.

Předpokládaná velikost indukovaného napětí ve stroji:

$$U_i = U_f \cdot k_E = 231 \cdot 0,82 = 189,4 \text{ V} \quad (3.4.1)$$

Celkový magnetický tok:

$$\phi = \frac{U_i}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot f \cdot N_s \cdot k_{v1}} = \frac{189,4}{4,44 \cdot 100 \cdot 60 \cdot 0,91} = 0,007808 \text{ Wb} \quad (3.4.2)$$

Pro kontrolu spočteme indukci ve vzduchové mezeře:

$$B_\delta = \frac{\phi}{\alpha_\delta \cdot t_{p1} \cdot l_e} = \frac{0,007808}{\frac{2}{\pi} \cdot 0,052 \cdot 0,235} = 1 \quad (3.4.3)$$

V dalším kroku je potřeba zvolit magnetické indukce pro jednotlivé části magnetického obvodu, tj. indukci v zubech B_z a indukci ve jhu statoru B_{j1} . Tyto hodnoty jsem po domluvě s vedoucím zvolila následovně:

Indukce v zubech statoru: $B_z = 1,8 \text{ T}$

Indukce ve jhu statoru: $B_{j1} = 1,4 \text{ T}$

Jho statoru:

Při stanovení velikosti magnetického toku procházejícího jhem statoru uvažujeme, že se magnetický tok po průchodu zubem rozdělí na dvě stejně velké složky. Velikost magnetického toku jhem tedy vyjádříme jako:

$$\phi_{j1} = \frac{\phi}{2} = \frac{0,007808}{2} = 0,003904 \text{ Wb} \quad (3.4.4)$$

Výšku jha pak lze vyjádřit pomocí vztahu $\phi = B \cdot S$ jako:

$$h_{j1} = \frac{\phi_{j1}}{B_{j1} \cdot k_{Fe} \cdot l_e} = \frac{0,003904}{1,4 \cdot 0,97 \cdot 0,235} = 0,01226 \text{ m} \rightarrow 0,0123 \text{ m} \quad (3.4.5)$$

$$B_{j1} = \frac{\phi}{h_{j1} \cdot k_{Fe} \cdot l_e} = \frac{0,004094}{0,0123 \cdot 0,97 \cdot 0,246} = 1,395 \text{ T} \quad (3.4.6)$$

Zuby statoru:

$$\phi_z = B_\delta \cdot t_{d1} \cdot l_e = 1 \cdot 0,0139 \cdot 0,235 = 0,00327 \text{ Wb} \quad (3.4.7)$$

$$b_z = \frac{\phi_z}{B_z \cdot k_{Fe} \cdot l_e} = \frac{0,00327}{1,8 \cdot 0,97 \cdot 0,235} = 0,00798 \text{ m} \rightarrow 0,008 \text{ m} \quad (3.4.8)$$

$$B_z = \frac{\phi_z}{b_z \cdot k_{Fe} \cdot l_e} = \frac{0,00327}{0,008 \cdot 0,97 \cdot 0,235} = 1,797 \text{ T} \quad (3.4.9)$$

3.5 NÁVRH STATOROVÉ DRÁŽKY

Návrh drážky byl proveden dle [1]. Zvolila jsem polouzavřenou drážku typu L, aby bylo docíleno rovnoběžného tvaru zubů statoru. Jelikož pro výpočet výšky drážky, resp. výšky zubu, je potřeba znát vnější průměr stroje, tuto hodnotu volím:

$$D_e = 300 \text{ mm}$$

Výšku drážky určíme ze vztahu:

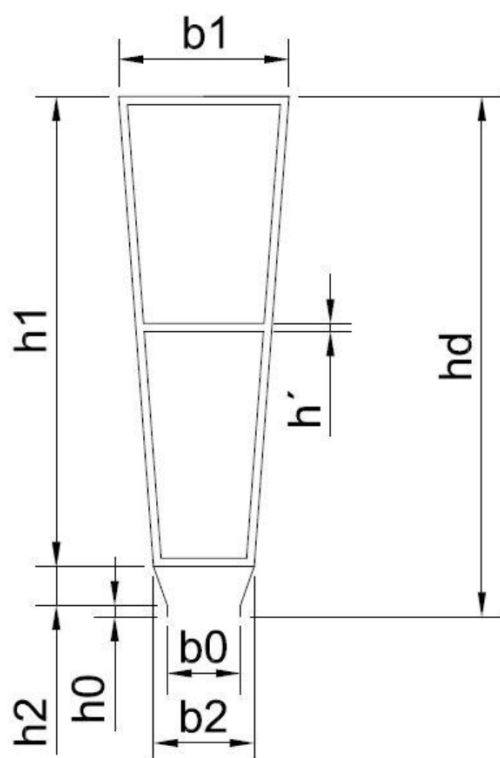
$$h_d = \frac{D_e - D_1}{2} - h_{j1} - h_{ax} = \frac{0,3 - 0,2}{2} - 0,0123 - 0,006 = 0,0317 \text{ m} \quad (3.5.1)$$

kde h_{ax} je výška odsazení axiálního kanálu od vnějšího poloměru stroje. Výšku drážky zaokrouhlují na 32 mm.

Geometrie drážky je na Obr. 3-2, její kompletní rozměry jsou uvedeny v tabulce 3-1. Kompletní postup jejich výpočtů je uveden v [1].

Plocha drážky je dána vztahem:

$$S_d = \left(\frac{b_1 + b_2}{2} \right) \cdot h_1 = \left(\frac{10,5 + 6,2}{2} \right) \cdot 29 = 243,6 \text{ mm}^2 \quad (3.5.2)$$



hd [mm]	32,00
b1 [mm]	10,50
b2 [mm]	6,20
bo [mm]	4,50
h1 [mm]	29,00
h2 [mm]	2,40
ho [mm]	0,70
h' [mm]	0,50

Obrázek 3-2: Statorová drážka typu L

Tabulka 3-1: Rozměry drážky

Průřez jednoho vodiče:

$$S_v = \frac{I_n}{\sigma_{cu}} = \frac{107,25}{7} = 15,32 \text{ mm}^2 \quad (3.5.3)$$

kde σ_{cu} je proudová hustota ve vodiči, kterou jsem zvolila po konzultaci s vedoucím práce.

Vzhledem k lichoběžníkovému tvaru drážky volím vsypávané vinutí. Jelikož průřez vodiče S_{v1} je příliš velký, bude složen z 11 dílčích vodičů o průměru 1,32 mm. Efektivní průřez jednoho vodiče bude tedy:

$$S_{v.ef} = \left(\frac{\pi \cdot d_i^2}{4} \right) \cdot n_p = \left(\frac{\pi \cdot 1,32^2}{4} \right) \cdot 11 = 15,05 \text{ mm}^2 \quad (3.5.4)$$

Obsah mědi v drážce si vyjádříme vztahem:

$$S_{Cu} = S_{v.ef} \cdot V_d = 15,05 \cdot 8 = 120,4 \text{ mm}^2 \quad (3.5.6)$$

Činitel využití drážky:

$$k_w = \frac{S_{Cu}}{S_d} = \frac{120,4}{243,6} = 0,49 \quad (3.5.7)$$

3.6 NÁVRH PERMANENTNÍCH MAGNETŮ

Jak již bylo zmíněno v kapitole 2, permanentní magnety v elektrických točivých strojích nahrazují konvenční měděné budící vinutí. V případě strojů synchronních jsou tyto magnety umístěny na rotoru. V mé práci jsem provedla čtyři konstrukční uspořádání rotoru pro různá uložení PM – povrchové, vnitřní tangenciální, vnitřní radiální a „V“ uložení (známe též jako „V-shaped“).

Zvolila jsem si PM na bázi vzácných zemin a to neodym-železo-borové, přesněji typ N38SH (katalogový list viz příloha č. 6). Dimenzování permanentních magnetů vychází z výpočtu magnetického obvodu stroje, resp. z jeho náhradního schématu. V tomto obvodu PM představují zdroje magnetomotorické síly U_m s napěťovým úbytkem ΔU_m , jenž jsou definovány vztahy 3.6.1 a 3.6.2. K určení výšky magnetu je také zapotřebí definovat napěťové úbytky ve zbývajících částech magnetického obvodu – statorovém jhu, statorových zubech, vzduchové mezeře a ve jhu rotoru.[8]

$$U_m = \int_{h_m} H_c d_z = H_c \cdot h_m \quad (3.6.1)$$

$$\Delta U_m = \int_{h_m} H_m d_z = H_m \cdot h_m \quad (3.6.2)$$

Výchozí parametry permanentních magnetů:

- Koercivita magnetu $H_c = 907 \text{ kA/m}$
- Relativní permeabilita $\mu_r = 1,05$
- koeficient poklesu teploty $\alpha = -0,12 \text{ \%/}^\circ\text{C}$
- teplotní odolnost 150°C

Výchozí parametry magnetického obvodu:

- Indukce ve jhu statoru $B_{j1} = 1,4 \text{ T} \Leftrightarrow H_{j1} = 404 \text{ A/m}$
- Indukce v zubech statoru $B_z = 1,8 \text{ T} \Leftrightarrow H_z = 10400 \text{ A/m}$
- Indukce ve jhu rotoru $B_{j2} = 1,4 \text{ T} \Leftrightarrow H_{j2} = 404 \text{ A/m}$

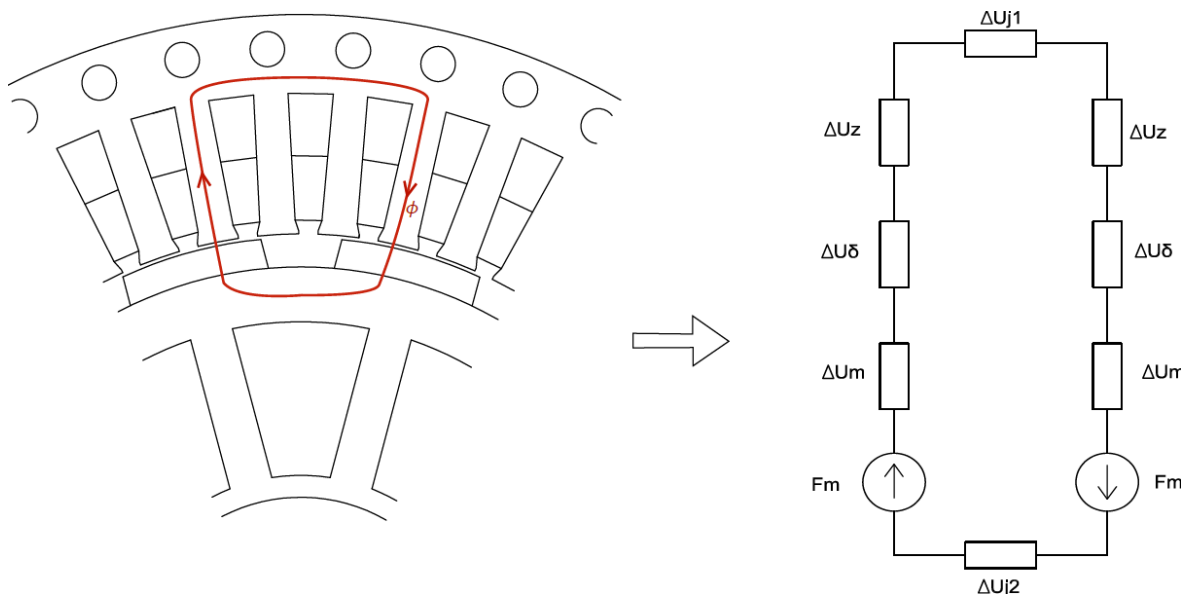
Intenzity magnetického pole byly určeny podle katalogového listu pro m330-50a (příloha č. 5).

Intenzitu magnetického pole ve vzduchové mezeře určíme ze vztahu:

$$H_\delta = \frac{B_\delta}{\mu_0} = \frac{1}{4\pi \cdot 10^{-7}} = 795774,7 \text{ A/m} \quad (3.6.3)$$

3.6.1 URČENÍ ROZMĚRŮ MAGNETU PRO POVRCHOVÉ ULOŽENÍ

Jak již bylo popsáno výše, pro definování rozměru permanentního magnetu je potřeba nejdříve zjistit velikosti jednotlivých úbytků magnetického napětí. Magnetický obvod pro povrchově uložené magnety je společně s náhradním schématem zobrazen na obrázku 3-3.



Obrázek 3-3: Magnetický obvod a jeho náhradní schéma pro povrchové uspořádání PM

Délka střední siločáry jha statoru:

$$l_{j1} = \frac{\pi \cdot (D_e - h_{j1})}{2p} = \frac{\pi \cdot (0,3 - 0,012)}{12} = 0,0755 \text{ m} \quad (3.6.4)$$

Úbytek napětí ve statorovém jhu:

$$\Delta U_{j1} = H_{j1} \cdot l_{j1} = 404 \cdot 0,0755 = 30,5 \text{ A} \quad (3.6.5)$$

Úbytek napětí v zubu:

$$\Delta U_z = H_z \cdot h_z = 10400 \cdot 0,032 = 332,8 \text{ A} \quad (3.6.6)$$

kde předpokládáme, že $h_z = h_d = 0,032 \text{ m}$.

Délka střední siločáry jha rotoru:

$$l_{j2} = \frac{\pi \cdot (\frac{D_e}{2})}{2p} = \frac{\pi \cdot (\frac{0,3}{2})}{12} = 0,0393 \text{ m} \quad (3.6.7)$$

Úbytek napětí ve statorovém jhu:

$$\Delta U_{j_2} = H_{j_2} \cdot l_{j_2} = 404 \cdot 0,0393 = 15,9 \text{ A} \quad (3.6.8)$$

Pro výpočet úbytku napětí ve vzduchové mezeře je potřeba si vyjádřit hodnotu Carterova činitele k_c :

$$\gamma = \frac{\left(\frac{b_0}{\delta}\right)^2}{5 + \frac{b_0}{\delta}} = \frac{\left(\frac{4,5}{0,8}\right)^2}{5 + \frac{4,5}{0,8}} = 2,98 \quad (3.6.9)$$

$$k_c = \frac{t_{d1}}{t_{d1} - \gamma \cdot \delta} = \frac{13,9}{13,9 - 2,98 \cdot 0,8} = 1,29 \quad (3.6.10)$$

Přepočtená tloušťka vzduchové mezery:

$$\delta' = k_c \cdot \delta = 1,29 \cdot 0,8 = 0,96 \text{ mm} \quad (3.6.11)$$

Úbytek napětí ve vzduchové mezeře:

$$\Delta U_{\delta} = H_{\delta} \cdot \delta' = 795774,5 \cdot 0,00096 = 767,6 \text{ A} \quad (3.6.12)$$

Intenzitu magnetického pole PM si vyjádříme jako:

$$H_m = \frac{B_m}{\mu_r \cdot \mu_0} = \frac{1}{1,05 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}} = 757880,7 \text{ A/m} \quad (3.6.13)$$

Magnetickou indukci magnetů uložených na povrchu rotoru uvažujeme stejnou jako indukci ve vzduchové mezeře stroje. V tomto případě tedy platí: $B_m \approx B_{\delta} = 1 \text{ T}$

V tuto chvíli jsou vyčísleny všechny hodnoty úbytků magnetických napětí, předběžnou výšku magnetu vyjádříme jako:

$$\begin{aligned} h_{m1} &= \frac{2 \cdot \Delta U_{\delta} + 2 \cdot \Delta U_z + \Delta U_{j_2} + \Delta U_{j_1}}{2 \cdot (H_c - H_m)} \\ &= \frac{2 \cdot 767,6 + 2 \cdot 332,8 + 15,9 + 30,5}{2 \cdot (907000 - 757880,7)} = 7,53 \text{ mm} \end{aligned} \quad (3.6.14)$$

Následně jsem provedla další iteraci, abych zjistila, kolem které hodnoty se výška magnetu pohybuje. Byl použit následující postup:

$$\delta' = h_{m1} + \delta \quad (3.6.15)$$

$$\gamma' = \frac{\left(\frac{b_0}{\delta'}\right)^2}{5 + \frac{b_0}{\delta''}} \quad (3.6.16)$$

$$k_c' = \frac{t_{d1}}{t_{d1} - \gamma'' \cdot \delta'} \quad (3.6.17)$$

$$\delta'' = k_c' \cdot \delta \quad (3.6.18)$$

Pro takto vyjádřenou novou hodnotu vzduchové mezery, byl opět přepočten úbytek napětí ve vzduchové mezeře a následně i výška magnetu. Tento iterační postup jsem několikrát zopakovala, až se výška PM „ustálila“ okolo hodnoty 6,8 mm.

Výška permanentního magnetu pro povrchové uložení tedy je:

$$h_m = 6,8 \text{ mm}$$

Šířka magnetu vychází ze známého vztahu:

$$\phi = B \cdot S \quad (3.6.19)$$

Úpravou 3.6.19 dostaneme:

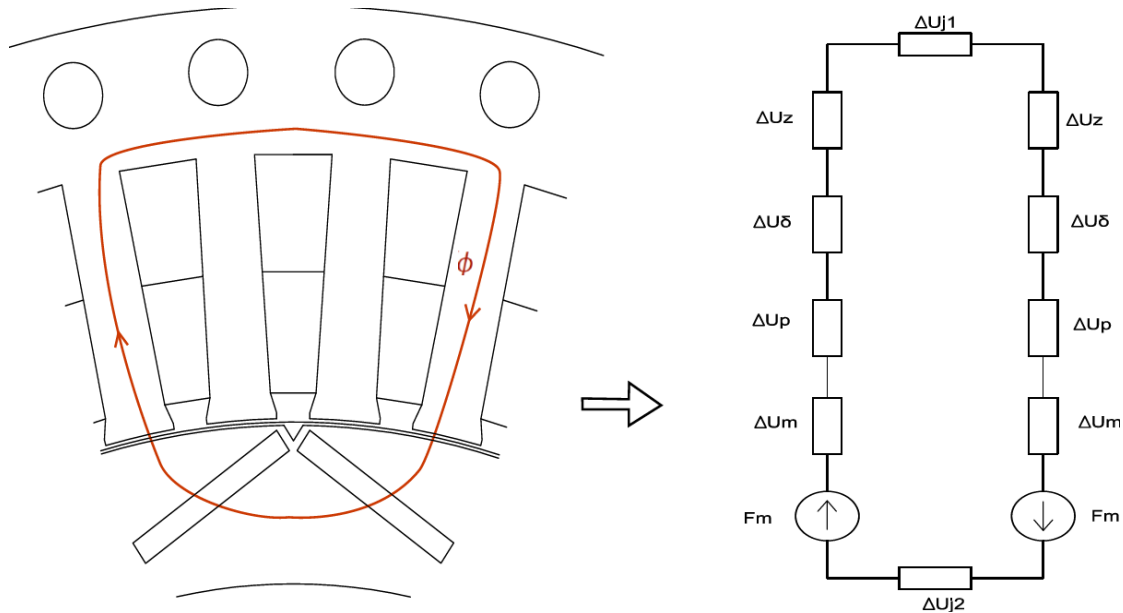
$$b_m = \frac{\phi}{B_\delta \cdot l_e} = \frac{0,007808}{1 \cdot 0,235} = 0,0332 \text{ m} \quad (3.6.20)$$

Finální rozměry permanentního magnetu pro povrchové uložení jsou:

$$h_m \times b_m \times l_m = 6,8 \times 33 \times 235 \text{ mm}$$

3.6.2 URČENÍ ROZMĚRŮ MAGNETU PRO VNITŘNÍ „V“ ULOŽENÍ

V případě uložení permanentních magnetů pod povrch rotoru do tvaru „V“ je situace poněkud odlišná. Jak už bylo řečeno v kapitole 2, v tomto případě využíváme dva PM na jeden pól tzn., že magnety jsou dimenzovány na poloviční tok Φ ($\frac{\phi}{2} = 0,0039 \text{ Wb}$). Z tohoto důvodu by měli být rozměry magnetů zhruba poloviční oproti uložení povrchovému a s ohledem na tuto skutečnost snižuji i indukci PM na nižší hodnotu $B_m = 0,7 \text{ T}$. Cesta magnetického toku se také mírně liší od předchozího případu, viz obrázek 3-4.



Obrázek 3-4: Magnetický obvod a náhradní schéma pro „V“ uložení PM

Co se týče úbytků magnetického napětí ve statoru stroje, tak je situace stejná, proto budou použity hodnoty z kapitoly 3.6.1:

$$\Delta U_{\delta} = 767,6 \text{ A}$$

$$\Delta U_{j1} = 30,5 \text{ A}$$

$$\Delta U_z = 332,8 \text{ A}$$

Pro návrh tohoto uložení jsem uvažovala následující velikosti úhlů (viz příloha č. 7):

$$\xi = 140^\circ$$

$$\varepsilon = 110^\circ$$

$$\gamma = 30^\circ \text{ (dáno počtem pólů, platí pro všechny typy rotorů)}$$

Ze sinovo věty si lze vyjádřit délku úseku $k_1 + b_m + k_2$:

$$k_1 + b_m + k_2 = \frac{D_e}{2} \cdot \sin \frac{\gamma}{2} = \frac{0,099}{\sin 110^\circ} \cdot \sin 15^\circ = 0,0273 \text{ m} \quad (3.6.21)$$

kde β je úhel pomocného trojúhelníku dopočtený ze vztahu: $180^\circ = \frac{\gamma}{2} + \frac{\varepsilon}{2} + \beta$

Šířka magnetu vyjádřená z rovnice 3.6.19:

$$b_m = \frac{\phi}{2 \cdot B_m \cdot l_e} = \frac{0,007808}{2 \cdot 0,7 \cdot 0,235} = 0,0238 \rightarrow 0,024 \text{ m} \quad (3.6.22)$$

Jelikož už známe hodnotu b_m můžeme v tuto chvíli vhodně zvolit hodnoty k_1 a k_2 . Ty jsem zvolila následovně

$$k_1 = 0,0025 \text{ m}$$

$$k_2 = 0,0008 \text{ m}$$

$$\text{Pro kontrolu: } k_1 + b_m + k_2 = 0,0025 + 0,0008 + 0,024 = 0,0273 \text{ m}$$

Délka střední siločáry v „pólovém nastavci“:

$$l_p = \operatorname{tg}30^\circ \cdot \left(\frac{b_m}{2}\right) = \operatorname{tg}30^\circ \cdot \left(\frac{0,024}{2}\right) = 0,00693 \text{ m} \quad (3.6.23)$$

Úbytek napětí v „pólovém nastavci“ rotoru:

$$\Delta U_p = H_{j_2} \cdot l_p = 404 \cdot 0,00693 = 2,8 \text{ A} \quad (3.6.24)$$

Délka střední siločáry jha rotoru:

$$l_{j_2} = \frac{\pi \cdot (D_2 - h_{j_2})}{24} = \frac{\pi \cdot (0,198 - 0,012)}{24} = 0,0243 \text{ m} \quad (3.6.25)$$

Úbytek napětí v rotorovém jhu:

$$\Delta U_{j_2} = H_{j_2} \cdot l_{j_2} = 404 \cdot 0,0245 = 9,8 \text{ A} \quad (3.6.26)$$

Protože byla snížena velikost indukce v magnetu je potřeba přepočítat hodnotu intenzity magnetického pole PM:

$$H_m = \frac{B_m}{\mu_r \cdot \mu_0} = \frac{0,7}{1,05 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}} = 530516,5 \text{ A/m} \quad (3.6.27)$$

Výška permanentního magnetu:

$$\begin{aligned} h_{m1} &= \frac{2 \cdot \Delta U_\delta + 2 \cdot \Delta U_z + 2 \cdot \Delta U_p + \Delta U_{j_2} + \Delta U_{j_1}}{2 \cdot (H_c - H_m)} \\ &= \frac{2 \cdot 767,6 + 2 \cdot 332,8 + 2 \cdot 2,8 + 9,8 + 30,5}{2 \cdot (907000 - 530516,5)} = 0,00298 \approx 0,003 \text{ m} \end{aligned} \quad (3.6.28)$$

Finální rozměry permanentního magnetu pro vnitřní „V“ uložení:

$$h_m \times b_m \times l_m = 3 \times 24 \times 235 \text{ mm}$$

3.6.3 URČENÍ ROZMĚRŮ PRO VNITŘNÍ TANGENCIÁLNÍ ULOŽENÍ

Pro tangenciálně uložené magnety platí stejné náhradní schéma magnetického obvodu jako na obrázku 3-4, jen délky středních siločar na rotoru jsou odlišné. Výpočet velikosti PM byl proveden dle [17], nákres s okótovanými rozměry je v příloze č. 8.

V prvním kroku je potřeba zvolit rozměry k , h a předběžnou výšku magnetu h_m (uvádím již konečné hodnoty, které byly po několika iteracích optimalizovány) :

$$\begin{aligned}k &= 1,5 \text{ mm} \\h &= 1,5 \text{ mm} \\h_m &= 2,5 \text{ mm}\end{aligned}$$

Délka tětiny pro polovinu pólové rozteče:

$$\frac{t}{2} = \frac{D_2}{2} \cdot \sin \frac{\gamma}{2} = \frac{0,198}{2} \cdot \sin 15^\circ = 0,0256 \text{ m} \quad (3.6.29)$$

Dále platí:

$$t = 2 \cdot t_0 + b_m \quad (3.6.30)$$

Kde délku odvěsny pomocného trojúhelníku t_0 vyjádříme jako:

$$\begin{aligned}t_0 &= \left[h + h_m + \frac{k}{\sin \frac{\gamma}{2}} \right] \cdot \operatorname{tg} \frac{\gamma}{2} = \left[0,0015 + 0,0025 + \frac{0,0015}{\sin 15^\circ} \right] \cdot \operatorname{tg} 15^\circ \\t_0 &= 0,00262 \text{ m}\end{aligned} \quad (3.6.31)$$

Šířka magnetu vyjádřená z 3.6.30:

$$b_m = 2 \cdot \frac{t}{2} - 2 \cdot t_0 = 2 \cdot 0,0256 - 2 \cdot 0,00262 = 0,046 \text{ m} \quad (3.6.32)$$

Indukce v magnetu:

$$B_m = \frac{\phi}{b_m \cdot l_e} = \frac{0,007808}{0,046 \cdot 0,235} = 0,74 \text{ T} \quad (3.6.33)$$

Intenzita magnetického pole magnetu:

$$H_m = \frac{B_m}{\mu_r \cdot \mu_0} = \frac{0,74}{1,05 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}} = 564297,9 \text{ A/m} \quad (3.6.34)$$

Délka střední siločáry procházející „pólovým nastavcem“:

$$l_p = 0,005 \text{ m}$$

Úbytek napětí na „pólovém nastavci“:

$$\Delta U_p = H_{j2} \cdot l_p = 404 \cdot 0,005 = 2,02 \text{ A} \quad (3.6.35)$$

Délka střední siločáry procházející jhem rotoru:

$$l_{j2} = \frac{\pi \cdot 2 \left(\frac{b_m}{2} + t_0 \right)}{2,4} = \frac{\pi \cdot 2 \cdot (0,023 + 0,00262)}{2,4} = 0,067 \text{ m} \quad (3.6.36)$$

Úbytek napětí ve jhu rotoru:

$$\Delta U_{j2} = H_{j2} \cdot l_{j2} = 404 \cdot 0,067 = 27,2 \text{ A} \quad (3.6.37)$$

Výška magnetu:

$$h_{m1} = \frac{2 \cdot \Delta U_\delta + 2 \cdot \Delta U_z + 2 \cdot \Delta U_p + \Delta U_{j2} + \Delta U_{j1}}{2 \cdot (H_c - H_m)} \quad (3.6.38)$$

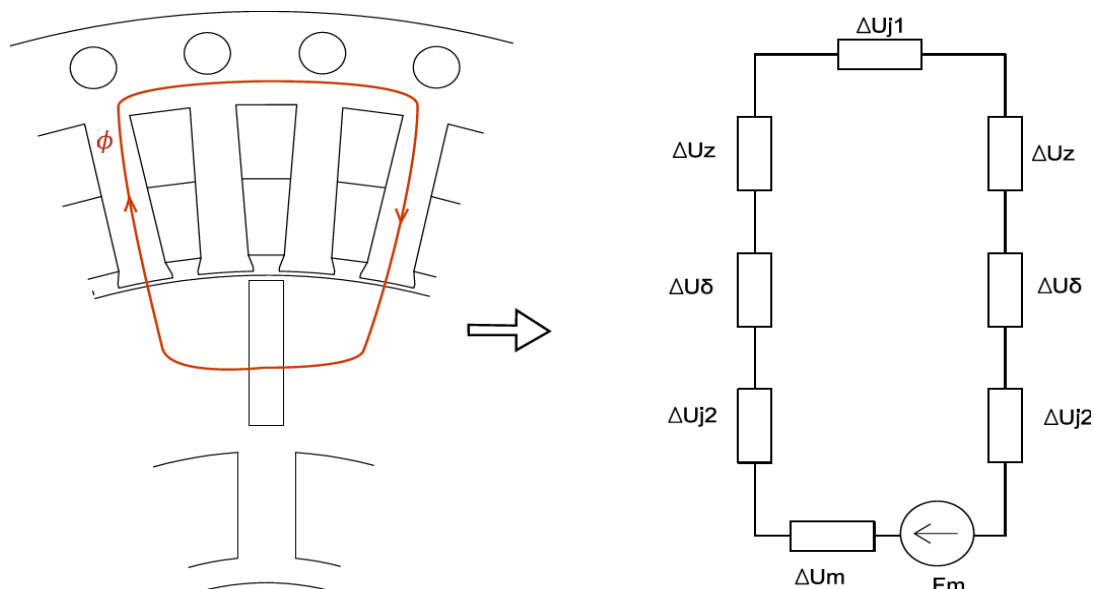
$$h_{m1} = \frac{2 \cdot 767,6 + 2 \cdot 332,8 + 2 \cdot 2,02 + 27,2 + 30,5}{2 \cdot (907000 - 564297,9)} = 0,0033 \text{ m}$$

Finální rozměry permanentního magnetu pro vnitřní tangenciální uložení:

$$h_m \times b_m \times l_m = 3,3 \times 46 \times 235 \text{ mm}$$

3.6.4 URČENÍ ROZMĚRŮ PRO VNITŘNÍ RADIÁLNÍ ULOŽENÍ

V případě radiálně uložených magnetů platí náhradní schéma z obrázku 3-5. Zde je vidět, že magnetický tok ϕ se uzavírá pouze přes jeden permanentní magnet, což se projeví na výšce magnetu. Hodnotu magnetické indukce pro tento návrh volím 0,6 T.



Obrázek 3-5: Magnetický obvod a náhradní schéma pro radiální uložení

Šířka magnetu vyjádřená opět z 3.6.19:

$$b_m = \frac{\phi}{2 \cdot B_m \cdot l_e} = \frac{0,007808}{2 \cdot 0,6 \cdot 0,235} = 0,0277 \rightarrow 0,028 \text{ m} \quad (3.6.39)$$

Odsazení magnetu od povrchu rotoru volím (viz příloha č.7):

$$k = 1 \text{ mm}$$

Délka střední siločáry jha rotoru:

$$l_{j2} = \frac{\pi \cdot (b_m + k)}{4} = \frac{\pi \cdot (0,028 + 0,001)}{4} = 0,0228 \text{ m} \quad (3.6.40)$$

Úbytek napětí ve jhu rotoru:

$$\Delta U_{j2} = H_{j2} \cdot l_{j2} = 404 \cdot 0,0228 = 9,2 \text{ A} \quad (3.6.41)$$

Intenzita magnetického pole magnetu:

$$H_m = \frac{B_m}{\mu_r \cdot \mu_0} = \frac{0,6}{1,05 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}} = 454728,4 \text{ A/m} \quad (3.6.42)$$

Protože zbývající úbytky magnetického napětí jsou stejné jako v předchozích třech případech, můžeme si vyjádřit výšku magnetu:

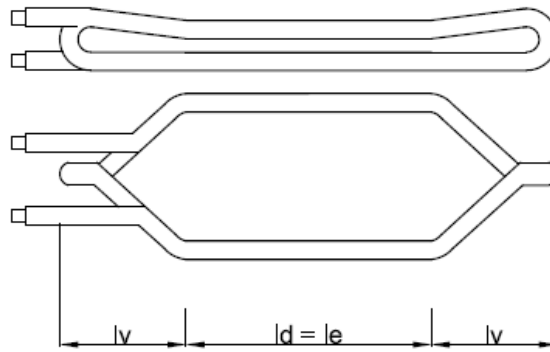
$$\begin{aligned} h_{m1} &= \frac{2 \cdot \Delta U_{\delta} + 2 \cdot \Delta U_z + \Delta U_{j2} + \Delta U_{j1}}{(H_c - H_m)} & (3.6.43) \\ &= \frac{2 \cdot 767,6 + 2 \cdot 332,8 + 9,2 + 30,5}{(907000 - 454728,4)} = 0,00497 \rightarrow 0,005 \text{ m} \end{aligned}$$

Finální rozměry magnetu pro vnitřní radiální uložení:

$$h_m \times b_m \times l_m = 5 \times 27 \times 235 \text{ mm}$$

3.7 VÝPOČET ODPORU VINUTÍ

Ke stanovení velikosti odporu vinutí je potřeba znát střední délku jedné cívky (viz obrázek 3-6). Tu jsem určila s použitím postupů z [1]. S ohledem na charakter navrhovaného stroje byl použit výpočet pro rozměry cívky asynchronního stroje, který uvažuje vsypávané vinutí.



Obrázek 3-6: Rozměry dvouvrstvé cívky statorového vinutí [1]

Střední šířka cívky procházející středem drážky:

$$b_c = \frac{\pi \cdot (D_1 + h_d)}{2p} \cdot \beta = \frac{\pi \cdot (0,2 + 0,032)}{12} \cdot 0,8 = 0,0486 \text{ m} \quad (3.7.1)$$

Délka čela:

$$l_{\zeta} = K_{\zeta} \cdot b_c + 2v = 1,9 \cdot 0,0486 + 2 \cdot 0,01 = 0,112 \text{ m} \quad (3.7.2)$$

kde K_{ζ} je činitel zvolený z tabulky 6.19 v [1], respektující čela izolovaná páskou a v je délka přímé části cívky při výstupu z drážky.

Délka vyložení:

$$l_v = K_v \cdot b_c + v = 0,72 \cdot 0,0486 + 0,01 = 0,045 \text{ m} \quad (3.7.3)$$

kde K_v je činitel pro vyložení čel, opět zvolený podle tabulky 6.19 z [1].

Střední délka cívky:

$$l_c = 2 \cdot (l_d + l_{\zeta}) = 2 \cdot (0,235 + 0,112) = 0,694 \text{ m} \quad (3.7.4)$$

kde $l_d \approx l_e$

Rezistivita mědi při 20°C:

$$\rho_{Cu_{20}} = \frac{1}{\gamma_{Cu_{20}}} = \frac{1}{58,5} \cdot 10^{-6} = 1,709 \cdot 10^{-8} \Omega/m \quad (3.7.5)$$

Rezistivita mědi při pracovní teplotě 120°C:

$$\begin{aligned} \rho_{Cu_{120}} &= \frac{1}{\gamma_{Cu_{20}}} \cdot (1 + \alpha_{Cu} \Delta t) = \frac{1}{58,5} \cdot (1 + 0,004 \cdot 100) = \\ &= 2,393 \cdot 10^{-8} \Omega/m \end{aligned} \quad (3.7.6)$$

Odpor vinutí při 20°C:

$$R_{Cu_{20}} = \rho_{Cu_{20}} \cdot \frac{N_s \cdot l_c}{S_{v_{ef}} \cdot a} = 1,709 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{60 \cdot 0,694}{15,05 \cdot 10^{-6} \cdot 1} = 0,0473 \Omega \quad (3.7.7)$$

Odpor vinutí při pracovní teplotě stroje 120°C:

$$R_{Cu_{n}} = \rho_{Cu_{120}} \cdot \frac{N_s \cdot l_c}{S_{v_{ef}} \cdot a} = 2,393 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{60 \cdot 0,694}{15,05 \cdot 10^{-6} \cdot 1} = 0,0671 \Omega \quad (3.7.8)$$

3.8 VÝPOČET INDUKČNOSTÍ A ROZPTYLŮ VINUTÍ

Pro určení velikosti synchronní reaktance X_d je potřeba znát hodnoty magnetizační a rozptylové indukčnosti, resp. reaktance. Rozptylová indukčnost vyjádřená dle [1]:

$$L_{a\sigma} = 2\mu_0 \cdot \frac{l_e}{pq} \cdot N_s^2 \cdot (\lambda_d + \lambda_\xi) + L_{dif} \quad (3.8.1)$$

Jak je vidět ze vztahu 3.7.1, je nutné určit hodnoty činitelů magnetické vodivosti λ_d a λ_ξ . Aby bylo respektováno zkrácení kroku statorového vinutí, je potřeba si vyjádřit činitele k_β a k_β' . Pro rozmezí $2/3 \leq \beta < 1$ platí dle [1] tyto vztahy:

$$k_\beta' = \frac{1}{4} \cdot (1 + 3\beta) = \frac{1}{4} \cdot (1 + 3 \cdot 0,8) = 0,85 \quad (3.8.2)$$

$$k_\beta = \frac{1}{4} \cdot (1 + 3k_\beta') = \frac{1}{4} \cdot (1 + 3 \cdot 0,85) = 0,89 \quad (3.8.3)$$

Činitel magnetické vodivosti drážkového rozptylu:

$$\begin{aligned} \lambda_d &= \frac{h_1}{3b_2} \cdot k_\beta + \left(\frac{3h_2}{b_2 + 2b_0} + \frac{h_0}{b_0} \right) \cdot k_\beta = \\ &= \frac{29}{3 \cdot 6,2} \cdot 0,89 + \left(\frac{3 \cdot 2,4}{6,2 + 2 \cdot 4,5} + \frac{0,7}{4,5} \right) \cdot 0,85 = 1,919 \end{aligned} \quad (3.8.4)$$

Činitel magnetické vodivosti rozptylu čel:

$$\lambda_{\zeta} = 0,34 \cdot \frac{q}{l_e} (l_e - 0,64\beta \cdot t_p) = 0,34 \cdot \frac{1,25}{0,246} (0,235 - 0,64 \cdot 0,8 \cdot 0,052) = 0,375 \quad (3.8.5)$$

Výpočet magnetizační indukčnosti jsem převzala z [2]:

$$L_{\mu} = t_{p1} \cdot l_e \cdot \frac{\mu_0}{\delta_{ef}} \cdot \frac{4q}{Q} \left(\frac{m}{\pi} \cdot N_s \cdot k_{v1} \right)^2 = 0,052 \cdot 0,235 \cdot \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{0,0073} \cdot \frac{4 \cdot 1,25}{45} \cdot \left(\frac{3}{\pi} \cdot 60 \cdot 0,91 \right)^2 = 0,610 \cdot 10^{-3} H \quad (3.8.6)$$

kde δ_{ef} je efektivní šířka vzduchové mezery určená vztahem (pro povrchové uložení PM):

$$\delta_{ef} = \delta' + \frac{h_m}{\mu_r} = 0,00083 + \frac{0,0068}{1,05} = 0,0073 m \quad (3.8.7)$$

Diferenční indukčnost:

$$L_{dif} = \tau_{dif} \cdot L_{\mu} = 0,166 \cdot 0,669 \cdot 10^{-3} = 0,111 \cdot 10^{-3} H \quad (3.8.8)$$

Dosazením do vztahu 3.8.1:

$$L_{a\sigma} = 2\mu_0 \cdot \frac{l_e}{pq} \cdot N_s^2 \cdot (\lambda_d + \lambda_{\zeta}) + L_{dif} = 2 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot \frac{0,235}{6 \cdot 1,25} \cdot 60^2 \cdot (1,919 + 0,377) + 0,111 \cdot 10^{-3} = 0,754 mH$$

Rozptylová reaktance:

$$X_{a\sigma} = 2\pi \cdot f_n \cdot L_{a\sigma} = 2\pi \cdot 100 \cdot 0,754 \cdot 10^{-3} = 0,47 \Omega \quad (3.8.9)$$

Podélná reaktance:

$$X_{ad} = C_{d1} \cdot 2\pi \cdot f_n \cdot L_{\mu} = 1,4 \cdot 2\pi \cdot 100 \cdot 0,61 \cdot 10^{-3} = 0,56 \Omega \quad (3.8.10)$$

Celková synchronní reaktance je pak rovna:

$$X_d = X_{a\sigma} + X_{ad} = 0,47 + 0,56 = 1,03 \Omega \quad (3.8.11)$$

Pro ověření skutečné hodnoty činitele k_E , který byl zvolený na začátku návrhu, je potřeba si vyjádřit synchronní reaktanci a odpor statorového vinutí v poměrných jednotkách.

Jmenovitá hodnota impedance:

$$Z_n = \frac{U_{fn}}{I_n} = \frac{231}{107,25} = 2,15 \, \Omega \quad (3.8.12)$$

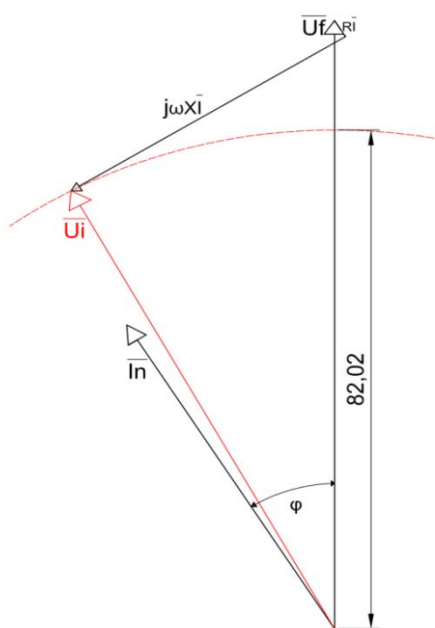
Odpor vinutí v p.u.:

$$r_a = \frac{R_{Cu,n}}{Z_n} = \frac{0,0671}{2,15} = 0,031 \quad (3.8.13)$$

Synchronní reaktance stroje v p.u.:

$$x_d = \frac{X_d}{Z_n} = \frac{1,03}{2,15} = 0,481 \quad (3.8.14)$$

Sestrojením fázorového diagramu (obrázek 3-7) bylo možné ověřit, zda-li zvolená hodnota činitele k_E odpovídá skutečnému poměru mezi napětím indukovaným a napětím jmenovitým. Jak je vidět, hodnoty se v podstatě neliší.



Obrázek 3-7: Fázorový diagram stroje pro ověření velikosti činitele k_E

3.9 VÝPOČET ZTRÁT A ÚČINNOST STROJE

Jouleovy ztráty

Jouleovy ztráty, často také zvané jako „ztráty v mědi“ nebo „ztráty nakrátko“, tvoří dominantní složku ztrát celého stroje. Jejich velikost je úměrná odporu vinutí a kvadrátu procházejícího proudu. V tomto případě uvažujeme pouze Jouleovy ztráty ve statoru, protože buzení stroje je zajištěno permanentními magnety:

$$\Delta P_{j1} = m \cdot R_{Cu_n} \cdot I_n^2 = 3 \cdot 0,0671 \cdot 107,25^2 = 2315,7 \text{ W} \quad (3.9.1)$$

Ztráty v železe

Ztráty v železe jsou dány součtem ztrát hysterezních a ztrát vířivými proudy. Pro jejich jednodušší určení jsou výrobcem plechů vždy dány tzv. ztrátová čísla Δp . Ty udávají měrné ztráty v 1 kg plechů při indukci 1 T (resp. 1,5 T) a frekvenci 50 Hz. Mnou použité hodnoty byly odečteny z katalogového listu. V mé práci uvažuji pouze ztráty v železe vznikající ve statoru stroje.

Hmotnost zubů:

$$m_{Fe_z} = \rho_{Fe} \cdot h_z \cdot l_e \cdot b_z \cdot Q = 7650 \cdot 0,032 \cdot 0,235 \cdot 0,008 \cdot 45 = 20,7 \text{ kg} \quad (3.9.2)$$

Ztráty v železe pro zuby statoru:

$$\Delta P_{Fe_z} = k_{Fez} \cdot m_{Fe_z} \cdot \Delta p \cdot \left(\frac{B_z}{1}\right)^2 = 2 \cdot 20,7 \cdot 3,43 \cdot \left(\frac{1,8}{1}\right)^2 = 457,8 \text{ W} \quad (3.9.3)$$

kde k_{Fez} korekční činitel pro zuby synchronního stroje zvolené dle [2].

Hmotnost jha:

$$m_{Fe_{j1}} = \rho_{Fe} \cdot \pi(D_e - h_j) \cdot h_j \cdot l_e = 7650 \cdot \pi(0,3 - 0,012) \cdot 0,012 \cdot 0,235 = 19,9 \text{ kg} \quad (3.9.4)$$

Ztráty v železe pro jho statoru:

$$\Delta P_{Fe_{j1}} = k_{Fej} \cdot m_{Fe_{j1}} \cdot \Delta p \cdot \left(\frac{B_j}{1}\right)^2 = 1,5 \cdot 19,9 \cdot 3,43 \cdot \left(\frac{1,4}{1}\right)^2 = 199,5 \text{ W} \quad (3.9.5)$$

kde k_{Fej} korekční činitel pro jho synchronního stroje zvolené dle [2].

Celkové ztráty v železe:

$$\Delta P_{Fe} = \Delta P_{Fe_z} + \Delta P_{Fe_{j1}} = 457,8 + 199,5 = 657,3 \text{ W} \quad (3.9.6)$$

Mechanické ztráty

Obvodová rychlost rotoru:

$$v_2 = \left(\frac{\pi \cdot n}{30}\right) \cdot \frac{D_1}{2} = \left(\frac{\pi \cdot 1000}{30}\right) \cdot \frac{0,2}{2} = 10,5 \text{ m/s} \quad (3.9.7)$$

Mechanické ztráty určené opět dle [2]:

$$\begin{aligned} \Delta P_m &= k_\rho \cdot D_2 \cdot (l_e + 0,6t_p)v_2^2 = 15 \cdot 0,198 \cdot (0,235 + 0,6 \cdot 0,052) \cdot 10,5^2 \\ &= 86,8 \text{ W} \end{aligned} \quad (3.9.8)$$

kde k_ρ činitel mechanických ztrát pro malé a střední uzavřené stroje [2].

Celkové ztráty stroje

$$\Delta P = \Delta P_{j1} + \Delta P_{Fe} + \Delta P_m = 2315,7 + 657,3 + 86,8 = 3059,6 \text{ W} \quad (3.9.9)$$

Jelikož je napájecí frekvence stroje 100 Hz (viz vztah 3.2.2) musíme při výpočtu ztrát dbát na fakt, že stroj bude napájen pomocí PWM měniče. V těchto případech se obecně uvažuje zvýšení ztrát o 20 %:

$$\Delta P_{PWM} = 1,2 \cdot \Delta P = 1,2 \cdot 3059,6 = 3671,5 \text{ W} \quad (3.9.10)$$

V tuto chvíli již můžeme určit účinnost stroje:

$$\eta = \frac{P_n}{P_n + \Delta P_{PWM}} \cdot 100 = \frac{60000}{60000 + 3671,5} \cdot 100 = 94,2 \text{ \%} \quad (3.9.11)$$

4 TEPelný VÝPOČET STROJE

Protože tepelný výpočet není cílem této práce, byl zvolen početní postup dle [1]. Byl použit výpočet oteplení pro asynchronní motor, z důvodu charakteru mnou navrženého stroje. Jak již bylo uvedeno na začátku návrhu, krytí stroje je IP54 (IP5x - uzavřený stroj, chráněný před vniknutím prachu; IPx4 – stroj chráněn před stříkající vodou ze všech směrů). Zvolený typ chlazení je IC 3W7 (vodou chlazený stroj s přívodem a odvodem chladiva s oddělenou chladicí jednotkou). [10]

Výpočet oteplení vychází z vypočtených ztrát stroje. Vzhledem k tomu, že byla v kapitole 3.9 zjištěná skutečná účinnost stroje, je potřeba přepočítat hodnoty zdánlivého výkonu, jmenovitého proudu a následně i Jouleovy ztráty:

$$S_n = \frac{P_n}{\eta \cdot \cos\varphi} = \frac{60000}{0,942 \cdot 0,85} = 74907,7 \text{ VA} \quad (4.1)$$

$$I_{nf} = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{74907,7}{\sqrt{3} \cdot 400} = 108,12 \text{ A} \quad (4.2)$$

$$\Delta P_{J1} = m \cdot R_{cun} \cdot I_{nf}^2 = 3 \cdot 0,0671 \cdot 108,12^2 = 2353,4 \text{ W} \quad (4.3)$$

Rozdělení Jouleových ztrát na ztráty v drážkách ΔP_{Jd} a ztráty v čelech $\Delta P_{J\check{c}}$:

$$\Delta P_{Jd} = \Delta P_{J1} \cdot \frac{2l_e}{l_c} = 2353,4 \cdot \frac{2 \cdot 0,235}{0,694} = 1591,2 \text{ W} \quad (4.4)$$

$$\Delta P_{J\check{c}} = \Delta P_{J1} \cdot \frac{2l_{\check{c}}}{l_c} = 1,43 \cdot 2353,4 \cdot \frac{2 \cdot 0,112}{0,694} = 762,2 \text{ W} \quad (4.5)$$

Součinitel přestupu tepla přes vzduchovou mezeru dle [9]:

$$\alpha_1 = 14,7 \left(\pi \cdot D_1 \cdot \frac{n}{60} \right)^{0,65} = 14,7 \cdot \left(\pi \cdot 0,2 \cdot \frac{1000}{60} \right)^{0,65} = 67,7 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (4.6)$$

Oteplení vnitřního povrchu statoru nad teplotu vzduchu uvnitř stroje:

$$\Delta\vartheta_{pov} = K \frac{\Delta P_{Jd} + \Delta P_{J\check{c}}}{\pi \cdot D_1 \cdot l_e \cdot \alpha_1} = 0,12 \cdot \frac{1561,2 + 762,2}{\pi \cdot 0,2 \cdot 0,235 \cdot 67,7} = 27,7 \text{ }^\circ\text{C} \quad (4.7)$$

Kde K je činitel respektující, že část ztrát se přímo odvádí kostrou do okolního prostředí, zvolen z [1].

Obvod statorové drážky:

$$O_d = 2h_d + b_1 + b_2 = 2 \cdot 0,032 + 0,0105 + 0,0062 = 0,081 \text{ m} \quad (4.8)$$

Teplotní spád v izolaci drážkové části vinutí:

$$\begin{aligned} \Delta\vartheta_{id} &= \frac{\Delta P_{Jd}}{Q \cdot O_d \cdot l_e} \cdot \left(\frac{b_{i1}}{\lambda_{ekv}} + \frac{b_1 + b_2}{16\lambda'_{ekv}} \right) \\ &= \frac{1561,2}{45 \cdot 0,081 \cdot 0,235} \cdot \left(\frac{0,0005}{0,3} + \frac{0,0105 + 0,0062}{16 \cdot 0,37} \right) = 8,39 \text{ }^\circ\text{C} \end{aligned} \quad (4.9)$$

Kde λ_{ekv} je střední ekvivalentní tepelná vodivost drážkové izolace, λ'_{ekv} střední tepelná vodivost vnitřní izolace pro vsypávané vinutí určené z [1].

Teplotní spád na tloušťce izolace čel:

$$\begin{aligned} \Delta\vartheta_{i\check{c}} &= \frac{\Delta P_{J\check{c}}}{2 \cdot Q \cdot O_{\check{c}} \cdot l_{\check{c}}} \cdot \left(\frac{b_{i\check{c}}}{\lambda_{ekv}} + \frac{h_d}{12\lambda'_{ekv}} \right) \\ &= \frac{762,2}{2 \cdot 45 \cdot 0,081 \cdot 0,112} \cdot \left(\frac{0,0005}{0,3} + \frac{0,032}{12 \cdot 0,37} \right) = 3,98 \text{ }^\circ\text{C} \end{aligned} \quad (4.10)$$

Obvod čela uvažují $O_{\check{c}} \approx O_d$

Oteplení vnějšího povrchu izolace čel vinutí nad teplotu uvnitř stroje:

$$\Delta\vartheta_{pov\check{c}} = K \frac{\Delta P_{J\check{c}}}{2\pi \cdot D_1 \cdot l_v \cdot \alpha_1} = 0,12 \cdot \frac{762,2}{2\pi \cdot 0,2 \cdot 0,045 \cdot 67,7} = 23,9 \text{ }^\circ\text{C} \quad (4.11)$$

Střední oteplení statorového vinutí:

$$\begin{aligned} \Delta\vartheta'_1 &= \frac{(\Delta\vartheta_{pov} + \Delta\vartheta_{id}) \cdot 2l_1 + (\Delta\vartheta_{pov\check{c}} + \Delta\vartheta_{i\check{c}}) \cdot 2l_{\check{c}}}{l_c} \\ &= \frac{(27,7 + 8,39) \cdot 2 \cdot 0,235 + (23,9 + 3,98) \cdot 2 \cdot 0,112}{0,694} = 33 \text{ }^\circ\text{C} \end{aligned} \quad (4.12)$$

Ekvivalentní ochlazovaný povrch tělesa stroje:

$$S_{t\check{e}l} = \pi \cdot D_e \cdot (l_e + 2l_v) = \pi \cdot 0,3 \cdot (0,235 + 2 \cdot 0,045) = 0,306 \text{ m}^2 \quad (4.13)$$

Ztráty odváděné do vzduchu uvnitř stroje:

$$\begin{aligned} \Delta P_v &= \Sigma \Delta P - (1 - K) \cdot (\Delta P_{J\check{c}} + \Delta P_{Fe}) \\ &= 3671,5 - (1 - 0,12) \cdot (762,2 + 457,8 + 199,5) = 2422,4 \text{ W} \end{aligned} \quad (4.14)$$

Oteplení vzduchu uvnitř stroje nad teplotu okolního prostředí:

$$\Delta\vartheta_v = \frac{\Delta P_v}{S_{t\dot{e}l} \cdot \alpha_v} = \frac{2422,4}{0,306 \cdot 1000} = 7,9 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (4.15)$$

kde α_v je součinitel přestupu tepla do okolí, což je v tomto případě voda. Předpokládá se, že teplota kostry je shodná s teplotou uvnitř stroje. Hodnota α_v byla zvolena dle doporučení vedoucího práce.

Střední oteplení statorového vinutí nad teplotu okolí:

$$\Delta\vartheta_1 = \Delta\vartheta'_1 + \Delta\vartheta_v = 33 + 7,9 = 40,9 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (4.16)$$

Protože norma uvažuje teplotu okolí 40 °C, je hodnota výsledného oteplení:

$$\Delta\vartheta_{1_výsl} = \Delta\vartheta_1 + 40 = 40,9 + 40 = 80,9 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (4.17)$$

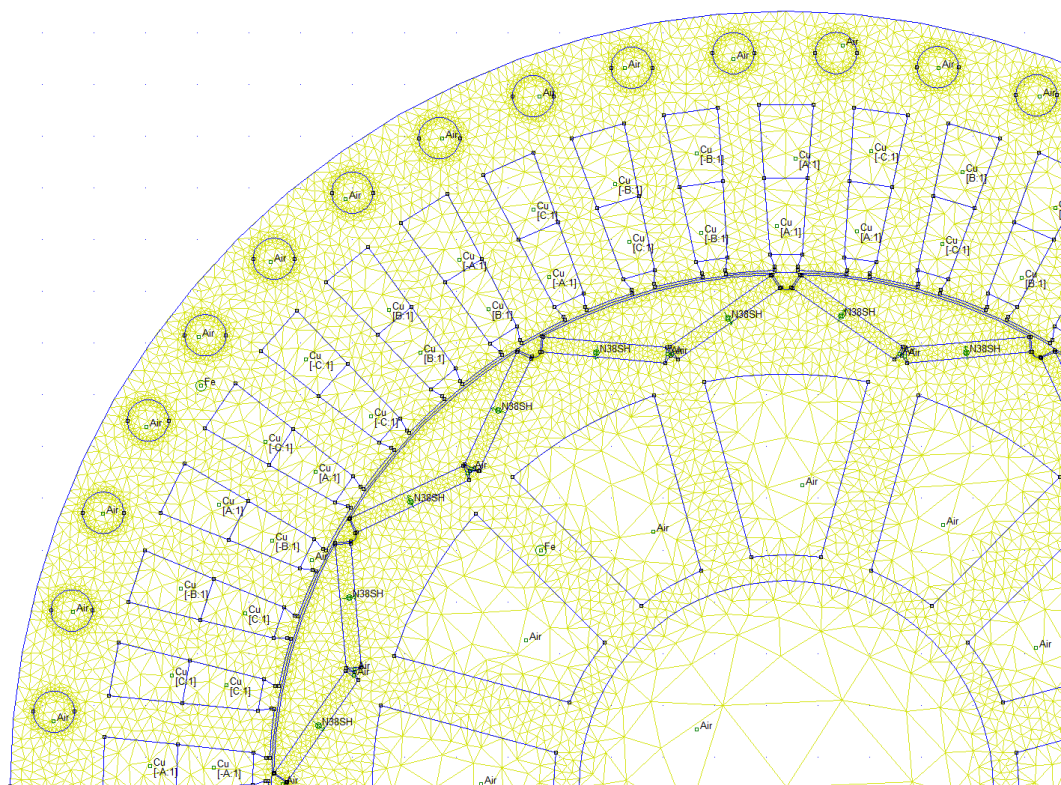
Konečná hodnota oteplení je tedy menší než maximální dovolená teplota pro zvolenou třídu izolace H ($T_{\max} = 180 \text{ } ^\circ\text{C}$), tím můžeme říci, že stroj tepelně vyhovuje požadavkům. Pracovní teplota permanentních magnetů byla zvolena na 130 °C, což je přibližně 90% maximální dovolené teploty použitého typu magnetu.

5 OVĚŘENÍ NÁVRHU POMOCÍ METODY KONEČNÝCH PRVKŮ

5.1 METODA KONEČNÝCH PRVKŮ (MKP)

Problematika analýzy elektrických a elektromagnetických polí se ve většině případů potýká s různými faktory, kterými jsou např. složité geometrie, použití různých materiálů (z nichž některé mohou mít nelineární charakteristiky), různé okrajové podmínky apod. Z těchto důvodů se tyto úlohy řeší numericky. V dnešní době se pro tyto účely užívá rozšířená a dobře aplikovatelná metoda konečných prvků (MKP). Jak již vyplívá z názvu, MKP využívá toho, že řešenou oblast rozložíme na konečný počet prvků = vytvoří se síť konečných prvků. V uzlech této sítě pak hledáme neznámé parametry. Podrobný popis této metody lze nalézt například v [4].

V mé práci byl pro modelování elektromagnetických polí použit software FEMM verze 4.2. 2D Geometrie všech čtyř návrhů byli nakresleny v AutoCADU 2012, následně ve formátu dxf. naimportovány do samotného FEMMu. Zde byly v Preprocessoru nadefinovány všechny materiálové oblasti a okrajové podmínky. Potom se celý model „zameshoval“, aby byla vytvořena potřebná síť konečných prvků (obrázek 4-1). Řešení problému probíhá v části zvané Solver, jehož výsledky se zobrazí v třetí části – Postprocessoru.



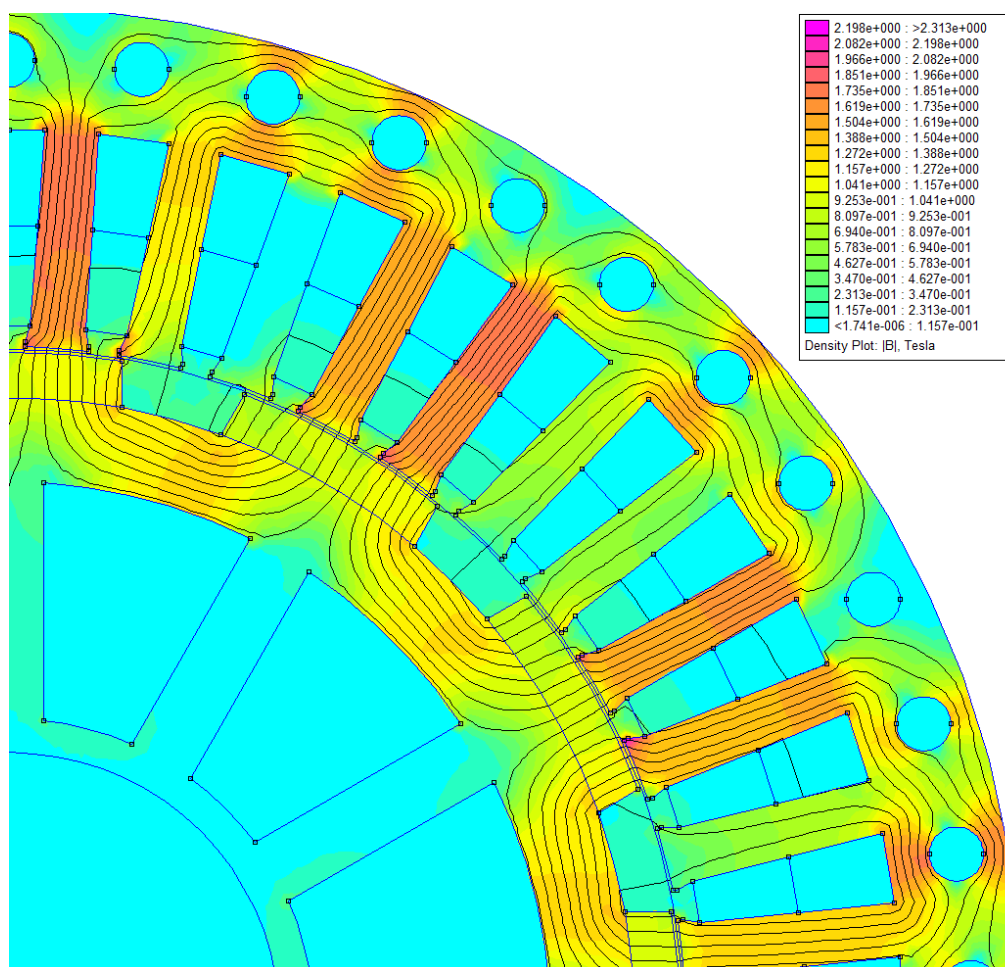
Obrázek 5-1: Ukázka zasíťování modelu pro nadefinované oblasti materiálů

Pro simulaci byl použit konstantní proud protékající vrstvou drážky, dán vztahem 3.3.22. Hodnoty proudů jednotlivých fází jsou v časovém okamžiku A, -B/2 a -C/2. Tyto velikosti proudů byly nadefinovány do jednotlivých drážek podle Tingleyho schématu (příloha 1). Drážky jsou v modelech vyplněny pouze mědí, bez uvažování izolace vodičů. Byla použita okrajová podmínka typu Mixed (smíšená) – což je podmínka prolínající Dirichletovu a Neumannovu okrajovou podmínku.

Pro permanentní magnety byla nastavena koercivita, dle katalogové listu výrobce (příloha č. 6), $H_c = 907 \text{ kA/m}$ s relativní permeabilitou $\mu_r = 1,05$.

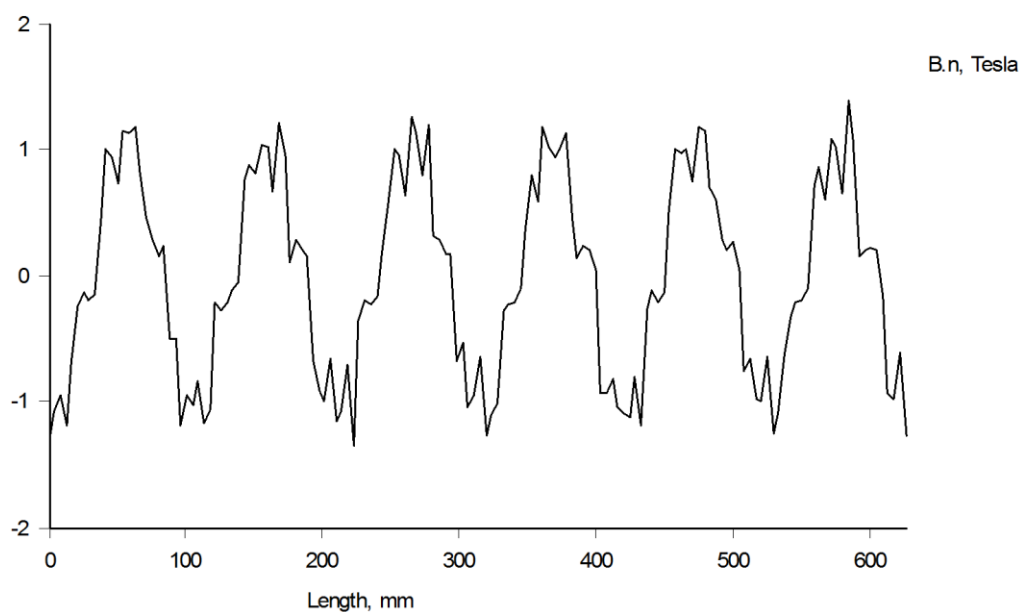
5.2 OVĚŘENÍ NÁVRHU S POVRCHOVÝMI PM

Z výsledků simulace na obrázku 4-2 je možné vidět rozložení magnetického pole pro konstrukční uspořádání s povrchovými permanentními magnety. Na první pohled můžeme říct, že je pole správně rozloženo po obvodu stroje a periodicky se opakuje.



Obrázek 5-2: Rozložení magnetického pole pro povrchově uložené PM

Jho statoru bylo navrhováno na magnetickou indukci $B_{j1} = 1,4$ T. Ze simulace je vidět, že je syceno na hodnoty kolem 1,27 T, v místech okolo axiálních kanálů dosahuje indukce hodnot 1,5-1,6 T, takže se lehce přesycuje. Zuby statoru dosahují hodnot 1,73 T, což je hodnota blízká navrhované hodnotě $B_z = 1,8$ T. Rotorové jho je syceno na indukci 1,3 T, tedy na hodnotu lehce nižší než se kterou bylo počítáno v návrhu stroje. Na obr. 5-3 je průběh indukce ve vzduchové mezeře, ten se blíží spíše lichoběžníkovému průběhu. To je dáno tvarem vzduchové mezery, který je v místě pólů konstantní. Velikost B_δ odpovídá navrhované hodnotě 1 T.



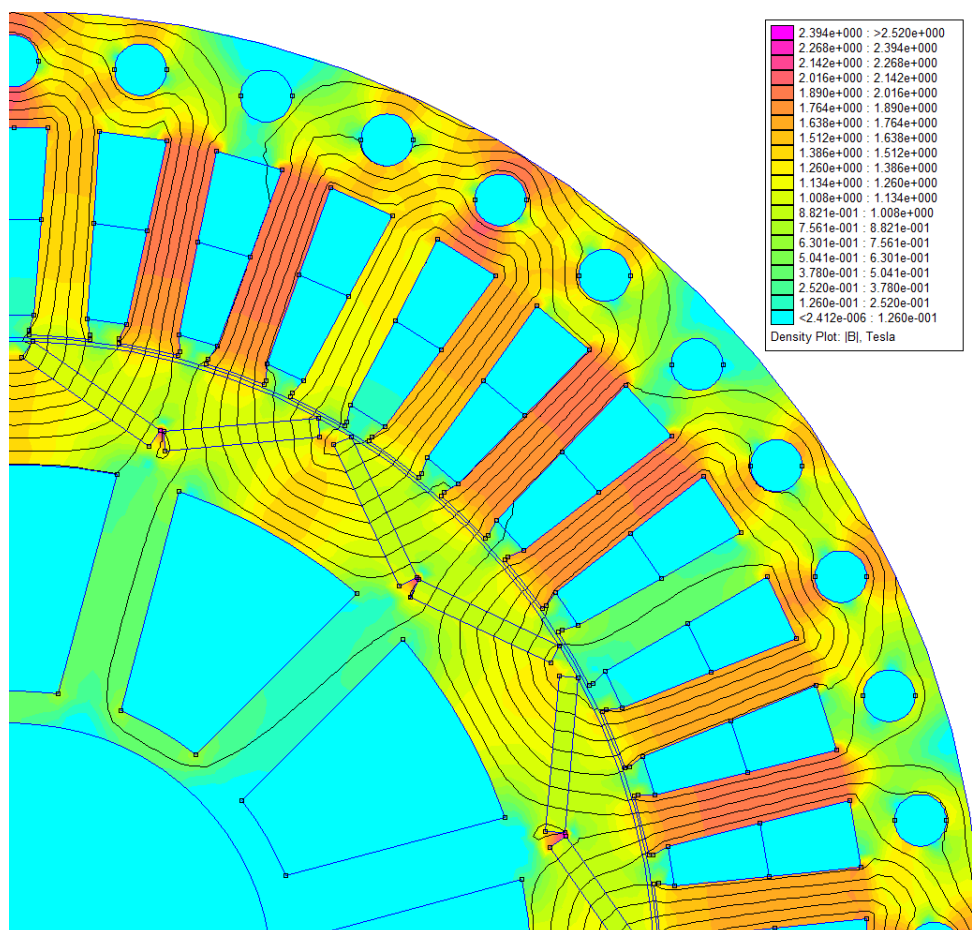
Obrázek 5-3: Průběh B_δ po obvodu vzduchové mezery pro povrchové uspořádání

5.3 OVĚŘENÍ NÁVRHU S VNITŘNÍM „V“ ULOŽENÍM PM

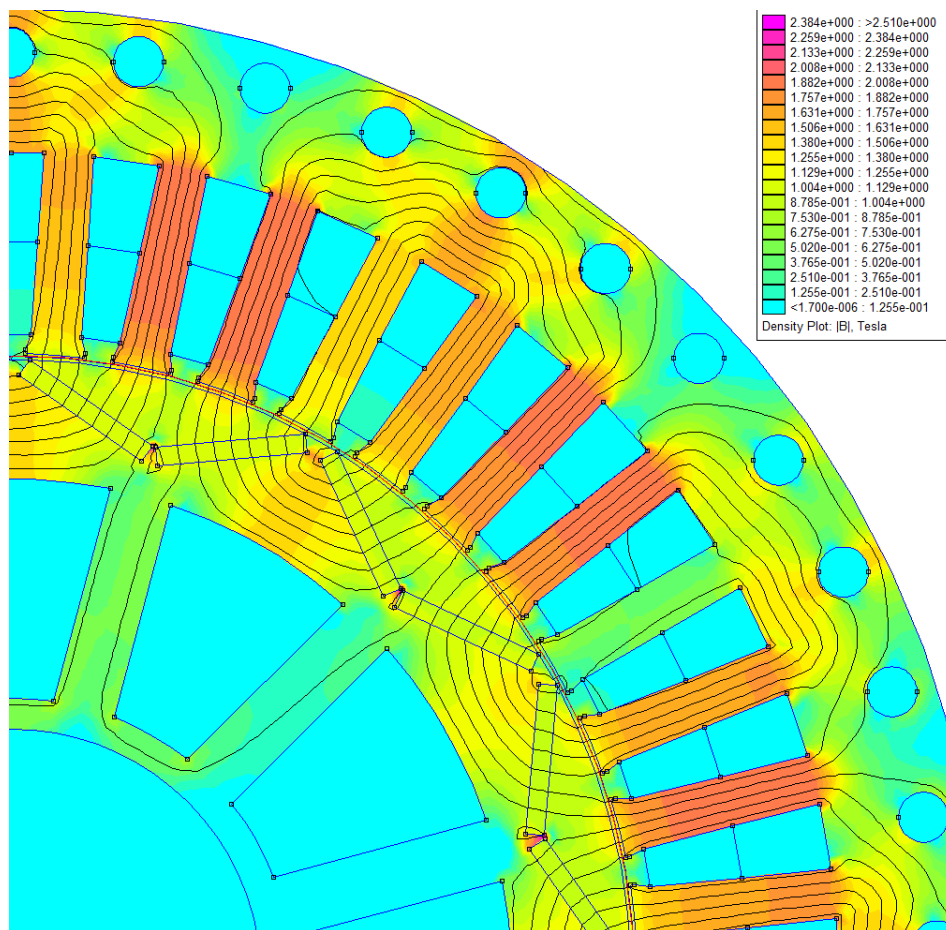
V případě vnitřního uložení magnetů do tvaru „V“ je na obr. 5-4 na první pohled vidět rozdíl v sycení statorového jha. Co se týče rozložení samotného pole, je situace podobná předchozímu případu s povrchově uloženými magnety. Statorové jho je v okolí axiálních kanálů přesycováno a to až na hodnotu indukce 1,95 T. Tato hodnota je v rozporu s navrhovanou hodnotou $B_{j1} = 1,4$ T. Statorové zuby dosahují indukce 1,87 – 1,9 T, což pohybuje okolo hodnoty, se kterou se počítalo v návrhu stroje. Rotorové jho je syceno na indukci 1,3 – 1,4 T a také tedy odpovídá vypočtenému návrhu.

Pro vnitřní „V“ uložení by bylo optimální více dimenzovat statorové jho. Zkusila jsem tedy zvětšit vnější průměr statoru na hodnotu $D_e = 310$ mm, tak aby byly axiální

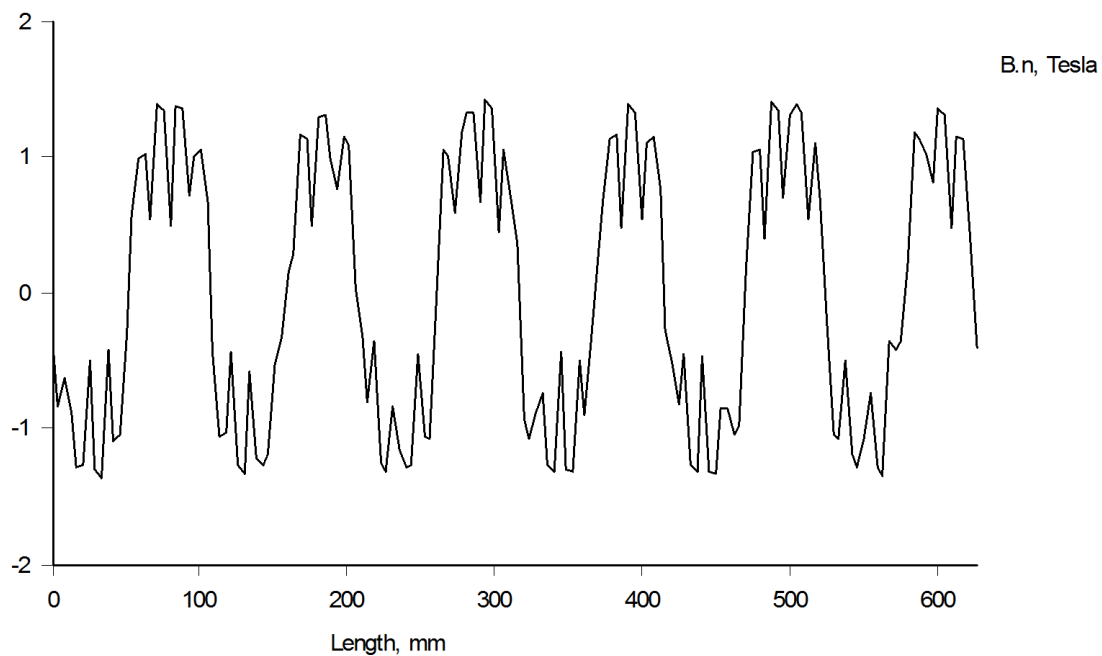
kanály vyvrtány až nad samotným jhem statoru. Tato změna se promítla pouze v hodnotě úbytku magnetického napětí ve statorovém jhu $\Delta U_{j1} = 31,5$ A, která se od původní hodnoty liší o cca 3%. Takto malá změna neměla vliv na velikost rozměrů permanentního magnetu. Rozložení magnetického pole pro druhou geometrii je na obr. 5-5. Díky rozšíření prostoru pod axiálními kanály dochází k lepšímu rozložení magnetického toku ve statorovém jhu. Hodnoty indukce se pohybují mezi 1,38 – 1,55 T, v některých oblastech pod chladicími kanály dosahuje indukce hodnot 1,7 T.



Obrázek 5-4: Rozložení mag. pole pro vnitřní "V" uložení (vnější průměr statoru $D_e = 300$ mm)



Obrázek 5-5: Rozložení mag. pole pro vnitřní "V" uložení (vnější průměr statoru $D_e = 310$ mm)



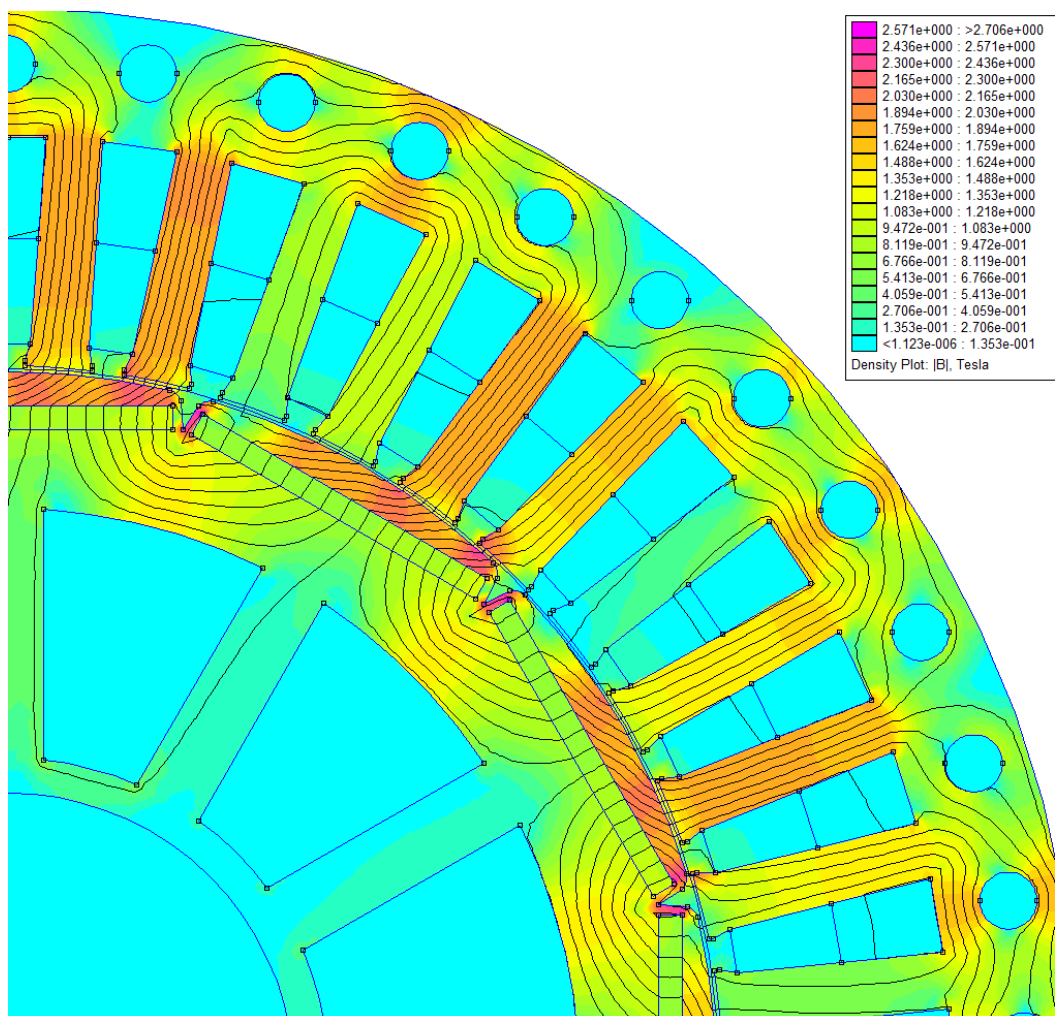
Obrázek 5-6: Průběh B_n po obvodu vzduchové mezery pro vnitřní "V" uspořádání

Na průběhu B_n je na první pohled vidět rozdíl s předchozím případem pro povrchové uspořádání. Charakter průběhu se blíží sinusovce a dosahuje max. hodnoty cca 1,3 T.

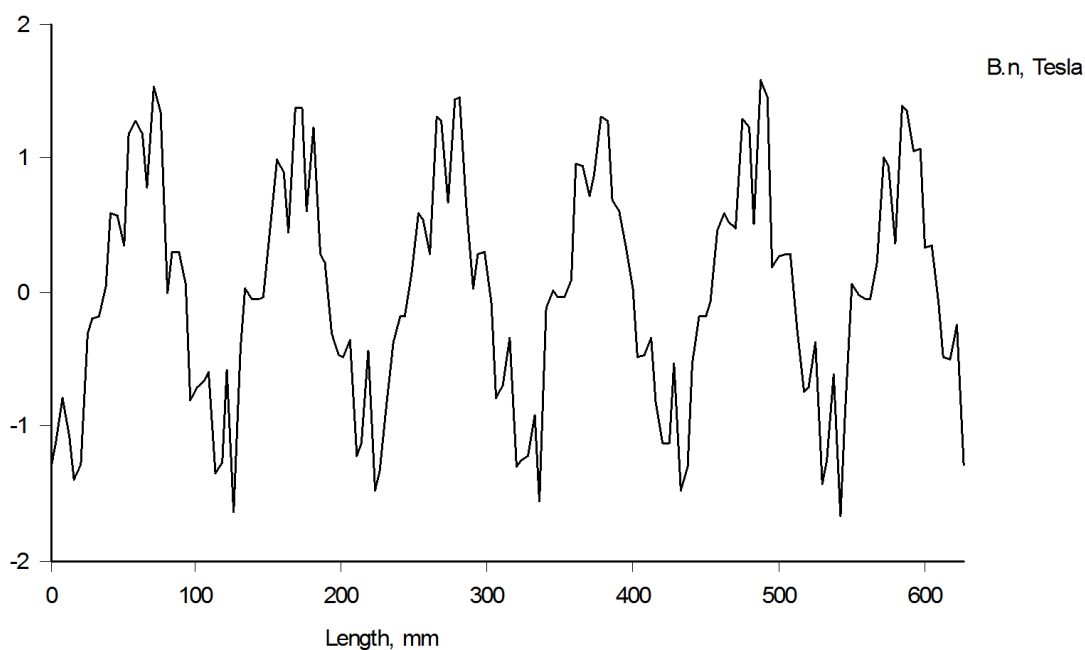
5.4 OVĚŘENÍ NÁVRHU S VNITŘNÍM TANGENCIÁLNÍM ULOŽENÍM PM

U simulace modelu s tangenciálním uložením s PM vyšlo najevo, že dochází k přesycování magnetického obvodu rotoru v oblasti pólů. Velikost magnetické indukce se zde pohybuje v hodnotách do 2 T, je tedy místy až o 40% vyšší než původně navrhovaná hodnota syčení. Ve zbývajících částech magnetického obvodu hodnoty magnetické indukce korespondují s hodnotami, pro které byl obvod navržen. Magnetická indukce ve statorovém jhu je 1,3 – 1,5 T. Zuby se sytí na hodnoty 1,75 – 1,8 T.

Nerovnoměrné syčení rotorového jha se také projevuje na průběhu magnetické indukce ve vzduchové mezeře B_δ . Díky přesycení jednotlivých částí pólu dochází podél vzduchové mezery k velkému deformování B_δ a průběh není zdaleka tak „hladký“ jako v případě „V“ uložení.



Obrázek 5-7: Rozložení magnetického pole pro vnitřní tangenciální uložení

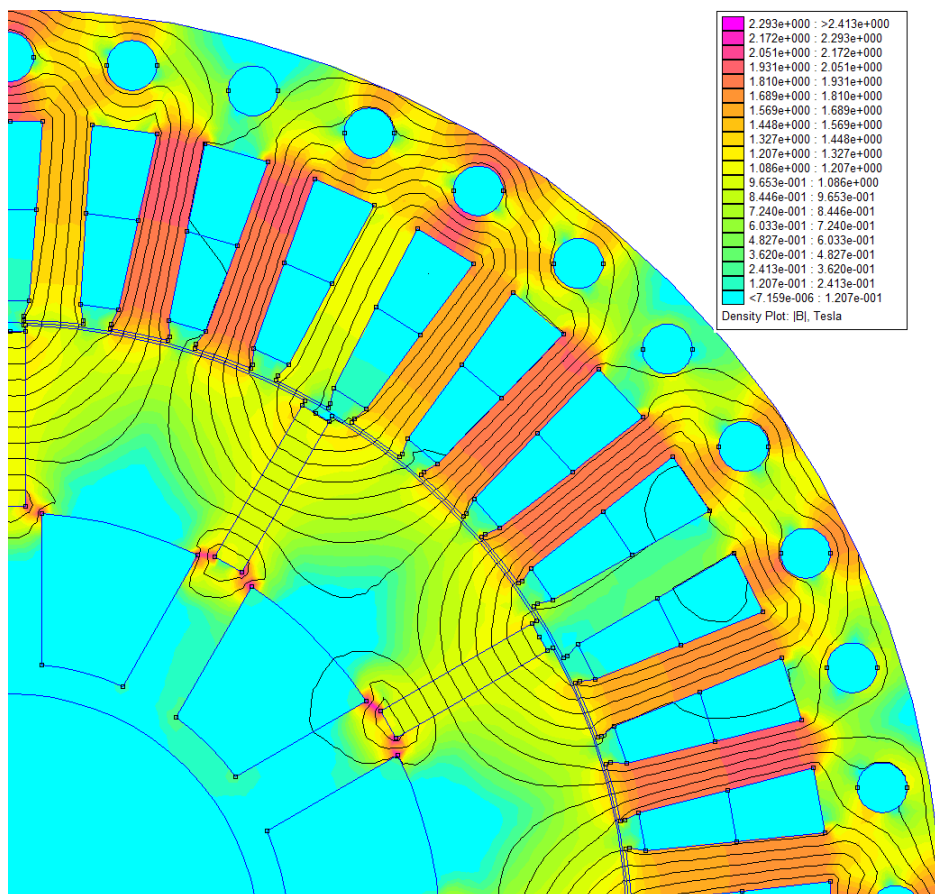


Obrázek 5-8: Průběh B_{δ} po obvodu vzduchové mezery pro vnitřní tangenciální uspořádání

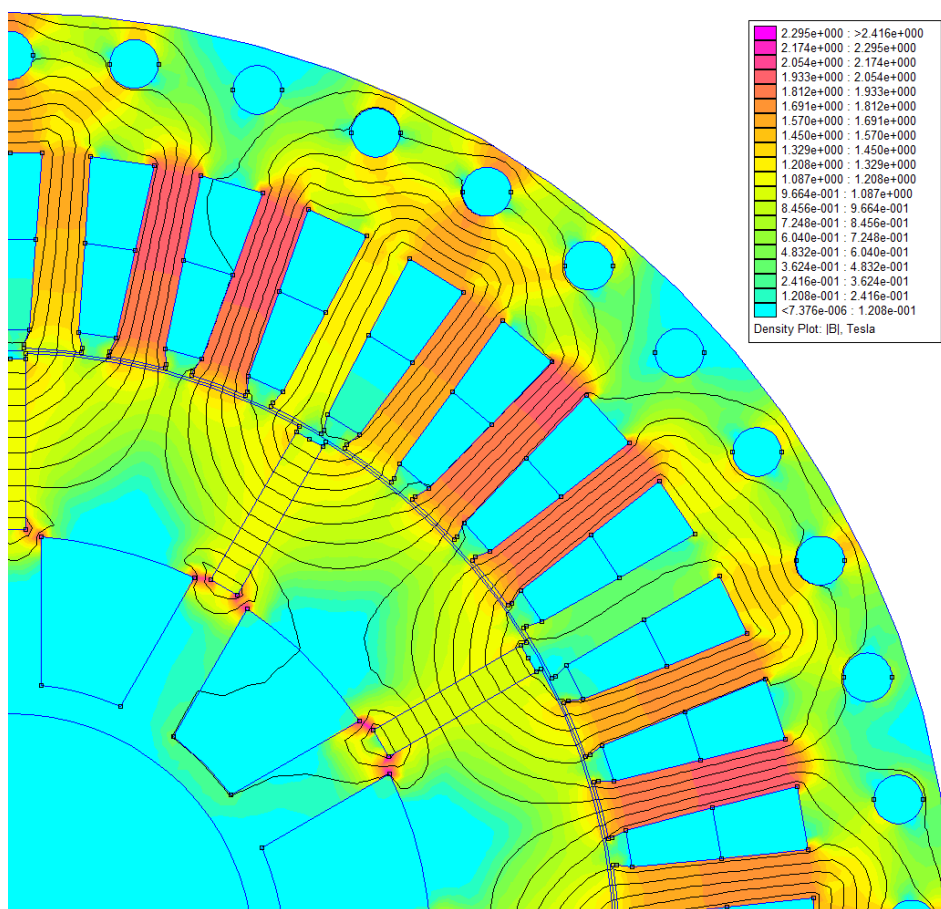
5.5 OVĚŘENÍ NÁVRHU PRO VNITŘNÍ RADIÁLNÍ ULOŽENÍ

Výsledky simulace (obr. 5-9) pro radiální uložení ukazují obdobný problém jako v případě „V“ uložení. Jho statoru je opět pod axiálními kanály přesycováno, a to na hodnoty 1,7 – 1,9 T. Zuby se sytí na hodnotu o něco málo vyšší než byla navrhovaná a to na 1,9 T. Protože pro radiální magnety je předdimenzováno rotorové jho, dosahuje hodnota magnetické indukce nižších hodnot a to 1,2 T.

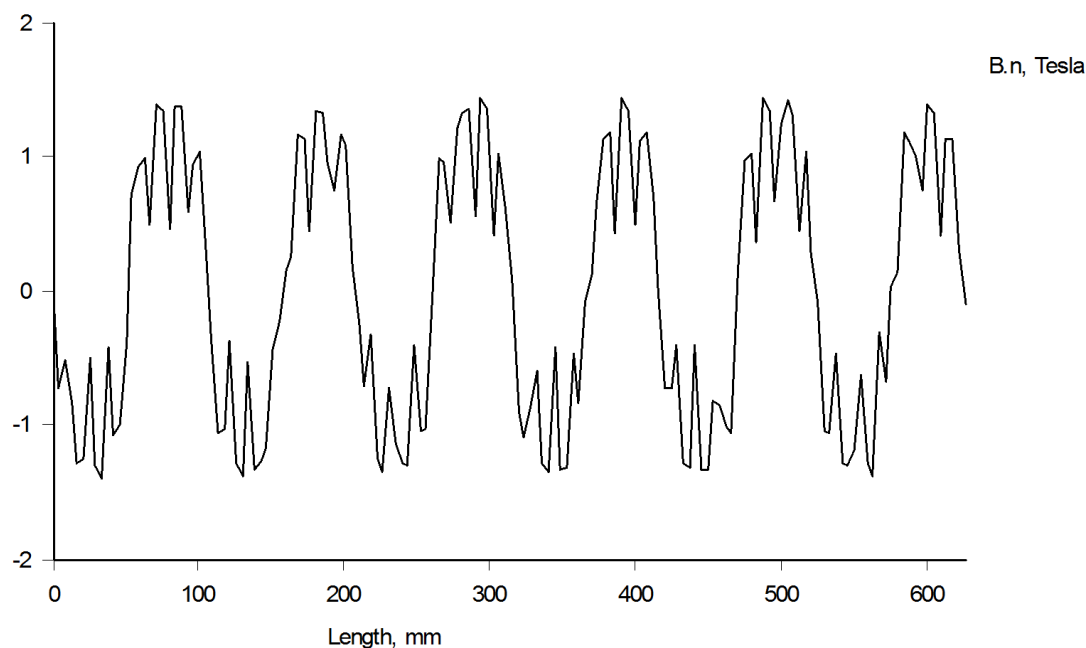
Stejně jako pro „V“ uspořádání jsem vyzkoušela zvětšit vnější průměr statoru (opět na 310 mm). Výsledky modelování jsou na obr. 5-10. Hodnota B_{j1} se snížila na cca 1,3 T, pod chladícími kanály na 1,6 T. U toto uložení dochází v rotoru k uzavírání parazitního magnetického toku ve spodní části permanentních magnetů. Tomu jsem se snažila předejít co nejmenším odsazením magnetů od rotorové hvězdice.



Obrázek 5-9: Rozložení magnetického pole pro vnitřní radiální uložení ($D_e = 300$ mm)



Obrázek 5-10: : Rozložení magnetického pole pro vnitřní radiální uložení ($D_e = 310$ mm)



Obrázek 5-11: Průběh B_δ po obvodu vzduchové mezeře pro vnitřní radiální uspořádání

Průběh magnetické indukce ve vzduchové mezeře se v případě radiálně uložených magnetů blíží sinusovému průběhu, stejně jako pro „V“ uložení. Jako v předešlých případech vnitřně uložených magnetů se hodnota B_δ dosahuje hodnoty 1,3 T.

5.6 SROVNÁNÍ JEDNOTLIVÝCH KONSTRUKČNÍCH VARIANT ROTORŮ

Porovnání navrhovaných magnetických indukcí s hodnotami obdrženy pomocí MKP pro jednotlivé části magnetického obvodu jsou v tabulce 5-1 (hodnoty indukcí jsou pro původní vnější průměr statoru). Lze říci, že nejvíce se od návrhu liší tangenciální uspořádání, z důvodu velkého přesycování rotoru v oblasti pólů. Pro všechny vnitřní uspořádání byl magnetický obvod sycen více než v případě povrchových magnetů. Co se týče indukce ve vzduchové mezeře, opět je u vnitřních magnetů dosahováno větší hodnoty a to 1,3 T. Obrázky 5-3, 5-6, 5-8 a 5-11 ukazují, že u povrchových PM se průběh B_δ blíží lichoběžníkovému tvaru, kdežto pro vnitřně uložené jsou průběhy cca sinusové (kromě tangenciálních magnetů, kde je průběh silně deformován). Ve všech čtyřech variantách se samozřejmě v průbězích projevuje zkreslení vyššími harmonickými.

	B_{δ} [T]	B_{δ_skut} [T]	B_{j1} [T]	B_{j1_skut} [T]	B_{j2} [T]	B_{j2_skut} [T]	B_z [T]	B_z_skut [T]
Povrchové PM	1	1 - 1,1	1,4	1,2 - 1,6	1,4	1,35	1,8	1,73
Vnitřní "V" PM	1	1,3	1,4	1,4 - 1,9	1,4	1,3 - 1,4	1,8	1,87 - 1,9
Vnitřní tangen. PM	1	1,3	1,4	1,3 - 1,5	1,4	1,4 - 2	1,8	1,75 - 1,8
Vnitřní radiální PM	1	1,3	1,4	1,4 - 1,9	1,4	1,1 - 1,2	1,8	1,9

Tabulka 5-1: Hodnoty magnetických indukcí pro jednotlivé části mag. obvodu

Protože pro každý rotor byly navrženy rozdílné velikosti permanentních magnetů, vychází na každou variantu jiný objem permanentních magnetů. Jak je vidět z tabulky 5-2, nejhůře v tomto ohledu vychází varianta s povrchovými magnety.

	Povrchové PM	Vnitřní "V" PM	Vnitřní tangen. PM	Vnitřní radiální PM
Objem PM [m ³]	0,000633	0,000406	0,000428	0,000395

Tabulka 5-2: Srovnání objemů PM pro jednotlivá konstrukční řešení

ZÁVĚR

Cílem práce bylo provést elektromagnetický návrh dvanáctipólového synchronního stroje s permanentními magnety o výkonu 60kW. Tento návrh byl proveden pro několik variant uložení magnetů, které byly následně ověřeny simulací dle MKP. V první fázi byl navržen stator o vnitřním průměru $D_1=200$ mm se 45 drážkami, se zlomkovým dvouvrstvým vinutím. Kvůli rozměrům a tvaru drážek je navrhnuté vinutí vsypávané. Efektivní délka stroje vyšla $l_e=235$ mm. Účinnost motoru určená ze ztrát vyšla $\eta = 94,2\%$, což se od původně odhadované hodnoty 95% liší minimálně. Pro tuto část výpočtu byly skoro výhradně použity postupy z [1].

Protože při návrhu rotoru s permanentními magnety se postupuje odlišně, než v případě strojů s budícím vinutím, byly výpočty provedeny s použitím [17] a základních vztahů 3.6.1, 3.6.2 a 3.6.19. Pro návrh byly použity NdFeB magnety na bázi vzácných zemin. Pro všechny varianty byly sestrojeny náhradní magnetické obvody a spočteny jednotlivé úbytky magnetického napětí. Z výpočtů vyšlo najevo, že při dimenzování magnetů lze zanedbávat úbytky magnetického napětí na rotoru. Tyto úbytky dosahují obvykle velikostí do 30 A a mají tedy velmi malý vliv na výslednou výšku permanentního magnetu.

Z 2D simulací všech konstrukčních uspořádání rotoru bylo ověřeno rozložení magnetického pole po obvodu stroje. Z výsledků viditelných např. na obrázcích 5-2 a 5-5 je vidět, že se magnetický tok vybuzený rotorem uzavírá přes statorové zuby a jeho periodicky se opakuje. U všech 4 variant dochází v magnetickém obvodu statoru k lehkému přesycení v okolí axiálních chladících kanálů, které jsou umístěny ve statorovém jhu. Hodnoty přesycení jsou větší především v případě vnitřně uložených magnetů, kde dosahují hodnot až 1,9 T. Z tohoto důvodu jsem zkusila u radiálních a „V“ magnetů zvětšit vnější průměr statoru D_e , z původních 300 mm na 310 mm. Tím se posunuly chladící kanály a zvětšila se plocha pro uzavírání žádaného magnetického toku. U vnitřních tangenciálních PM dochází k nerovnoměrnému sycení rotorového jha (obr. 5-7), jsem si vědoma, že toto konstrukční uspořádání by mělo být lépe dimenzováno. Shrnutí dosažených hodnot indukci je v tabulce 5-1.

Co se týče tvarů průběhů indukci ve vzduchové mezeře, pro povrchové magnety průběh odpovídá lichoběžníkovému tvaru, kdežto v případě vnitřních magnetů se indukce

blíží sinusovému průběhu, což je mimo jiné způsobeno i větší hodnotou pólového krytí. Tyto výsledky potvrzují např. i v [2]. Ve všech průbězích je patrná složka vyšších harmonických, které jsou ovlivněny tvarem vzduchové mezery (drážkování, nehladký tvar rotoru apod.).

Po zhodnocení simulací je zřejmé, že při návrhu synchronních strojů s permanentními magnety není optimální používat stejný postup pro různá konstrukční uspořádání. Pro varianty s vnitřními magnety lze například obvod dimenzovat na vyšší hodnoty magnetické indukce ve vzduchové mezeře. Při návrhu geometrie uložení magnetů je potřeba počítat s možností uzavírání rozptylových magnetických toků, kterým lze předejít eliminováním vzdáleností mezi jednotlivými magnety nebo v opačném případě použitím nemagnetických klínů.

Pro všechny konstrukční provedení byl vypracován 3D model v softwaru SolidWorks, který může být použit pro další analýzy v trojrozměrné soustavě.

SEZNAM LITERATURY

- [1] KOPYLOV, I.P. *Stavba elektrických strojů*. Praha: SNTL, 1988. ISBN 04-532-88
- [2] PYRHONEN, Juha, Tapani JOKINEN a Valéria HRABOVCOVÁ. *Design of Rotating Electrical Machines*. Second Edition. United Kingdom: Wiley, 2014. ISBN 978-1-118-58157-5
- [3] BARTOŠ, Václav. *Teorie elektrických strojů*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2006. ISBN 80-7043-509-7
- [4] BIANCHI, Nicola. *Electrical Machine Analysis Using Finite Elements*. Boca Raton: Taylor&Francis Group, 2005. ISBN 0-8493-3399-7
- [5] HANSELMAN, Duane C. *Brushless permanent magnet motor design*. 2nd ed. Cranston, R.I.: The Writers' Collective, c2003, xvi, 392 p. ISBN 19-321-3363-1
- [6] MALÝ, Marek. *Magnetické vlastnosti látky*. Katedra fyziky: Přírodovědecká fakulta UJEP, 2013. Dostupné z: <http://physics.ujep.cz/~mmaly/vyuka/ruzne/ISING/Ising.pdf>
- [7] POLANSKÝ, Radek. *Materials in Electrical Engineering: A reference book for Erasmus students* [online]. 2013 [cit. 2015-04-23]. Dostupné z: <https://courseware.zcu.cz/>
- [8] HRUŠKA, Karel. *Učební materiály z předmětu TES2*. 2012 [cit. 2015-04-23]. Dostupné z: <https://courseware.zcu.cz/>
- [9] PECHÁNEK, Roman: Tepelný a ventilační výpočet uzavřeného asynchronního trakčního. Diplomová práce, Západočeská univerzita v Plzni, 2007
- [10] ČERVENÝ, Josef. *Stavba elektrických strojů: Skripta k předmětu SES* [online]. 2012 [cit. 2015-05-03]. Dostupné z: <https://courseware.zcu.cz/>
- [11] Making magnets speak: the Barkhausen effect. *Skulls in the stars* [online]. 2012 [cit. 2015-04-26]. Dostupné z: <http://skullsinthestars.com/2012/10/01/making-magnets-speak-the-barkhausen-effect/>
- [12] *Feromagnet* [online]. 2015 [cit. 2015-04-26]. Dostupné z: <http://www.feromagnet.cz/magnety-alnico>
- [13] Feritový magnet. In: *Wikipedia* [online]. 2008, 10.3.2015 [cit. 2015-04-26]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Feritový_magnet
- [14] FINKEN, T.; HOMBITZER, M.; HAMEYER, K., "Study and comparison of several permanent-magnet excited rotor types regarding their applicability in electric vehicles," *Emobility - Electrical Power Train, 2010*, vol., no., pp.1,7, 8-9Nov.2010, Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5668074&isnumber=5668029>
- [15] NOVÁK, Jaroslav. Uplatnění synchronních strojů v dopravní technice (1. část). *Elektro - časopis pro elektrotechniku* [online]. 2006, č.6 [cit. 2015-04-27]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/uplatneni-synchronnich-stroju-v-dopravni-technice-1-cast--13092>
- [16] E-Wheel Drive. *Schaeffler Germany* [online]. 2013 [cit. 2015-04-27]. Dostupné z: <http://www.schaeffler.de/content.schaeffler.de/en/index.jsp>
- [17] HRUŠKA, Karel (Akademický rok 2014/2015). *Vybrané partie elektrických strojů* [2014] Západočeská univerzita v Plzni

SEZNAM OBRÁZKŮ, TABULEK, GRAFŮ A DIAGRAMŮ

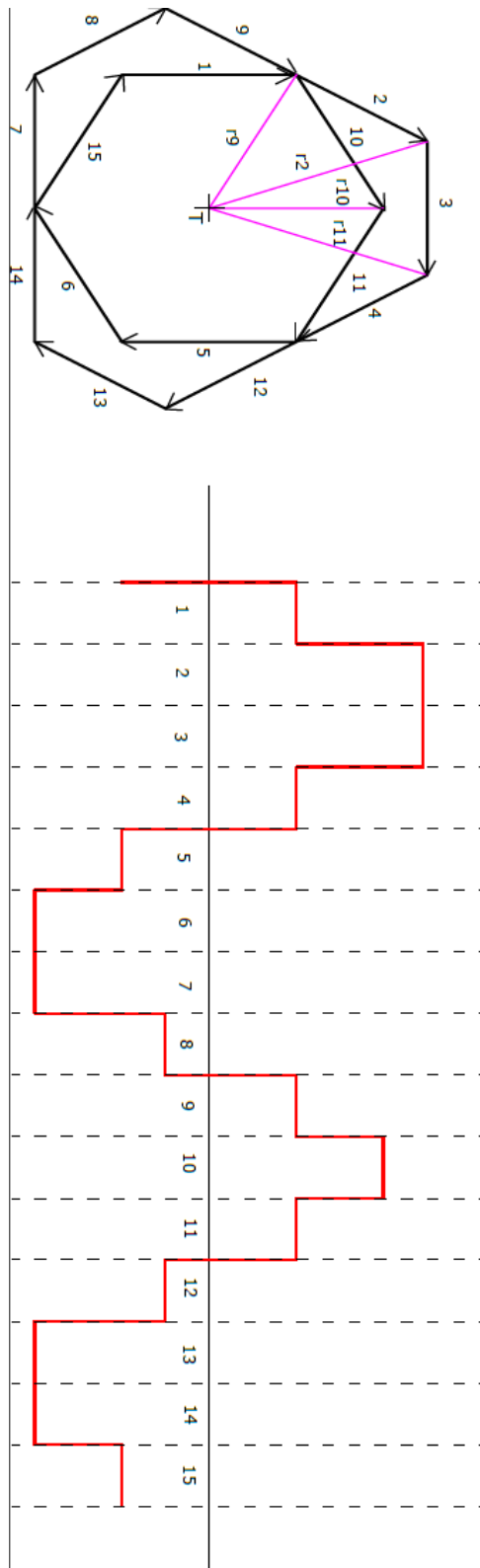
Obrázek 1-1: Magnetizace feromagnetika [11]	11
Obrázek 1-2: Hysterezní smyčka magneticky tvrdého materiálu [7]	12
Obrázek 1-3: Teplotní závislost permanentních magnetů, $(BH)_{\max}$ a volba pracovního bodu	13
Obrázek 2-1: Příklady konstrukčních uspořádání permanentních magnetů [14]	16
Obrázek 2-2: Konstrukční řešení systému E-Wheel Drive [16]	17
Obrázek 3-1: Tingleyho schéma pro první 4 póly stroje	22
Obrázek 3-2: Statorová drážka typu L	26
Obrázek 3-3: Magnetický obvod a jeho náhradní schéma pro povrchové uspořádání PM. 28	
Obrázek 3-4: Magnetický obvod a náhradní schéma pro „V“ uložení PM	31
Obrázek 3-5: Magnetický obvod a náhradní schéma pro radiální uložení	35
Obrázek 3-6: Rozměry dvouvrstvé cívky statorového vinutí [1]	37
Obrázek 3-7: Fázorový diagram stroje pro ověření velikosti činitele k_E	40
Obrázek 5-1: Ukázka zasíťování modelu pro nadefinované oblasti materiálů	46
Obrázek 5-2: Rozložení magnetického pole pro povrchově uložené PM	47
Obrázek 5-3: Průběh B_δ po obvodu vzduchové mezery pro povrchové uspořádání	48
Obrázek 5-4: Rozložení mag. pole pro vnitřní "V" uložení (vnější průměr statoru $D_e = 300\text{mm}$)	49
Obrázek 5-5: Rozložení mag. pole pro vnitřní "V" uložení (vnější průměr statoru $D_e = 310\text{mm}$)	50
Obrázek 5-6: Průběh B_δ po obvodu vzduchové mezery pro vnitřní "V" uspořádání	50
Obrázek 5-7: Rozložení magnetického pole pro vnitřní tangenciální uložení	51
Obrázek 5-8: Průběh B_δ po obvodu vzduchové mezery pro vnitřní tangenciální uspořádání	52
Obrázek 5-9: Rozložení magnetického pole pro vnitřní radiální uložení ($D_e = 300\text{ mm}$) ..	53
Obrázek 5-10: : Rozložení magnetického pole pro vnitřní radiální uložení ($D_e = 310\text{ mm}$)	53
Obrázek 5-11: Průběh B_δ po obvodu vzduchové mezery pro vnitřní radiální uspořádání ..	54

PŘÍLOHA Č.1 – TINGLEYHO SCHÉMA

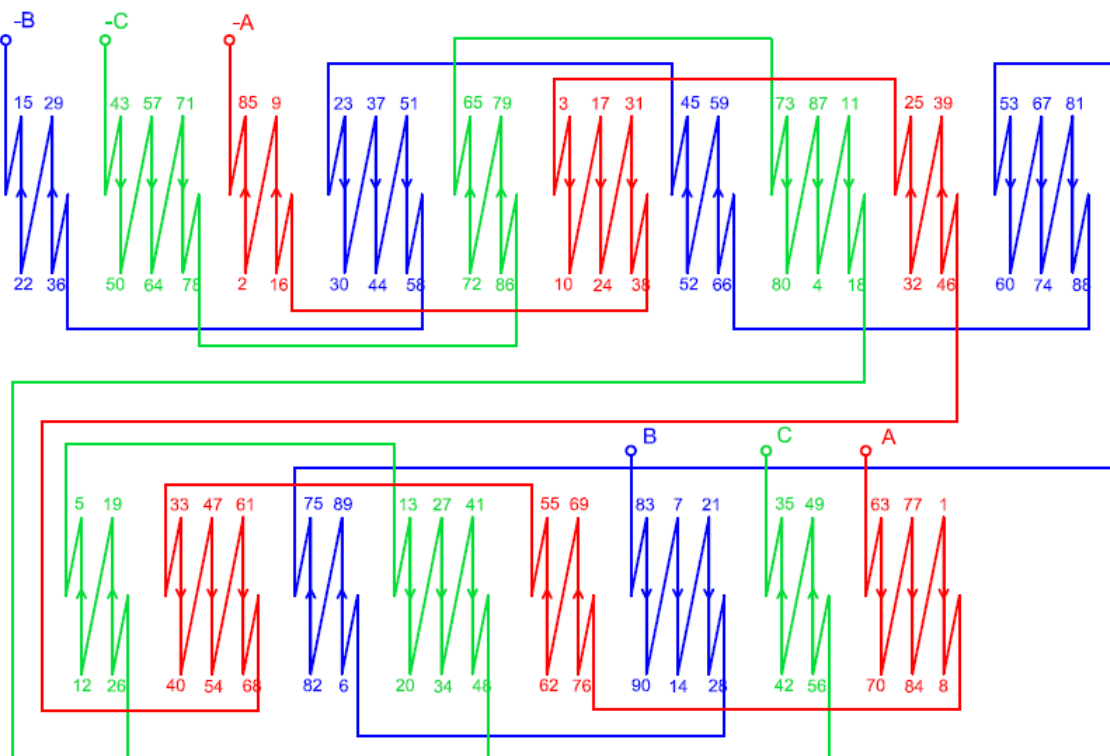
pól	fáze	A				C				B															
		A'		A		C'		C		B'		B													
1.	+	1+	2+	9-	10-	3+	4-	11+	12+	19-	20-	5-	6+	13+	14-	21+	22+	7+	8-	15-	16+	23+	24-		
2.	-			17+	18-			25-	26+			27+	28-			29-	30-			37+	38-				
3.	+																								
4.	-																								
5.	+	31+	32+																						
6.	-			39-	40-																				
7.	+			47+	48-																				
8.	-																								
9.	+	61+	62+																						
10.	-			69-	70-																				
11.	+																								
12.	-																								

Příloha č.2 – Gorgesův obrazec

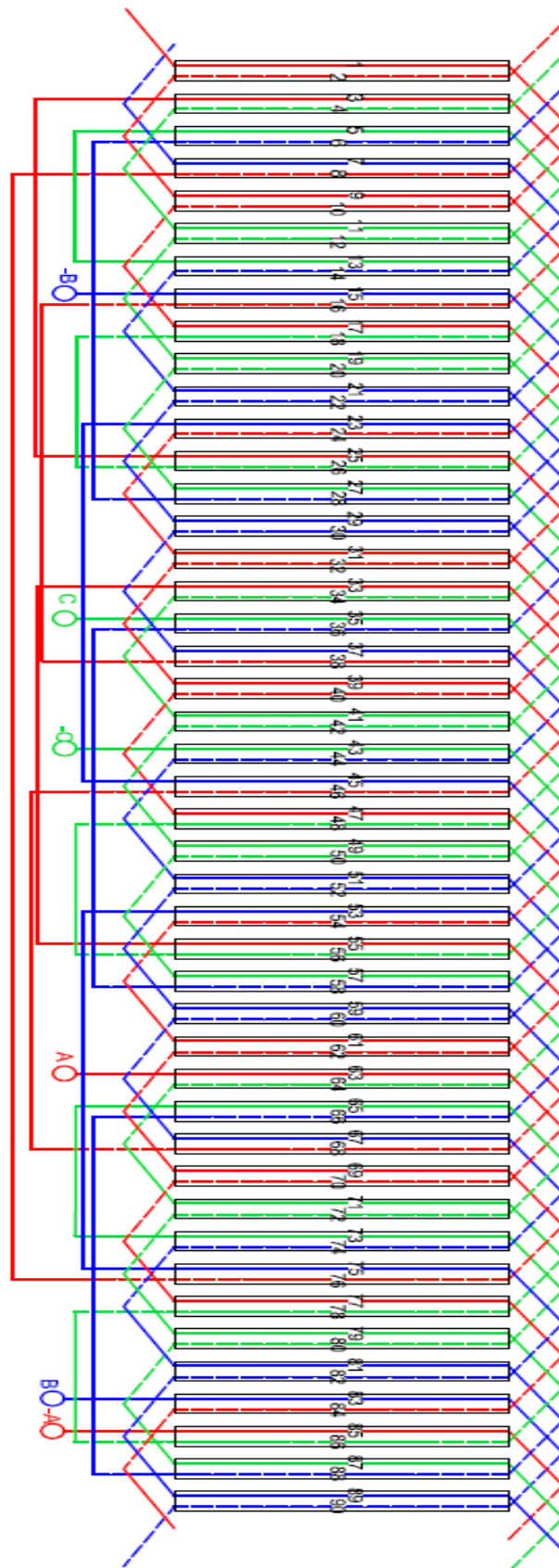
Gorgesův obrazec s křivkou magnetomotorického napětí



PŘÍLOHA Č. 3 – PILOVÉ SCHÉMA STATOROVÉHO VINUTÍ



PŘÍLOHA Č. 4 – KONSTRUKČNÍ UPOŘÁDÁNÍ STATOROVÉHO VINUTÍ



PŘÍLOHA Č. 5 – KATALOGOVÝ LIST M330-50A

Typical data for SURA® M330-50A

1 (2)

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	0,03	0,07	27,7	0,05	0,13	0,34	1,64	6,55
0,2	0,09	0,19	36,4	0,20	0,49	1,36	5,71	22,7
0,3	0,18	0,34	42,4	0,43	1,06	2,84	11,7	47,8
0,4	0,28	0,51	47,8	0,71	1,78	4,77	19,7	82,9
0,5	0,41	0,70	52,9	1,04	2,65	7,18	30,1	130
0,6	0,55	0,93	58,3	1,42	3,66	10,1	43,1	194
0,7	0,71	1,20	64,1	1,84	4,83	13,6	59,2	281
0,8	0,89	1,50	71,0	2,32	6,17	17,7	78,2	392
0,9	1,08	1,86	79,7	2,85	7,69	22,5	103	529
1,0	1,29	2,30	91,8	3,43	9,42	28,1	132	697
1,1	1,53	2,86	110	4,08	11,4	34,6	166	
1,2	1,81	3,65	140	4,81	13,6	42,0		
1,3	2,12	5,00	205	5,63	16,0	50,2		
1,4	2,56	8,27	399	6,60	18,7	59,3		
1,5	3,03	19,9	1097	7,71	21,8	69,6		
1,6	3,49	54,7	2925					
1,7	3,84	124	6118					
1,8	4,15	239	10828					

Loss at 1.5 T, 50 Hz, W/kg	3,03
Loss at 1.0 T, 50 Hz, W/kg	1,29
Anisotropy of loss, %	10

Magnetic polarization at 50 Hz	
H = 2500 A/m, T	1,57
H = 5000 A/m, T	1,66
H = 10000 A/m, T	1,77

Coercivity (DC), A/m	40
Relative permeability at 1.5 T	1050
Resistivity, $\mu\Omega\text{cm}$	42

Yield strength, N/mm ²	315
Tensile strength, N/mm ²	455
Young's modulus, RD, N/mm ²	200 000
Young's modulus, TD, N/mm ²	210 000
Hardness HVS (VHN)	155



PŘÍLOHA Č. 6 – KATALOGOVÝ LIST N38SH



N38SH

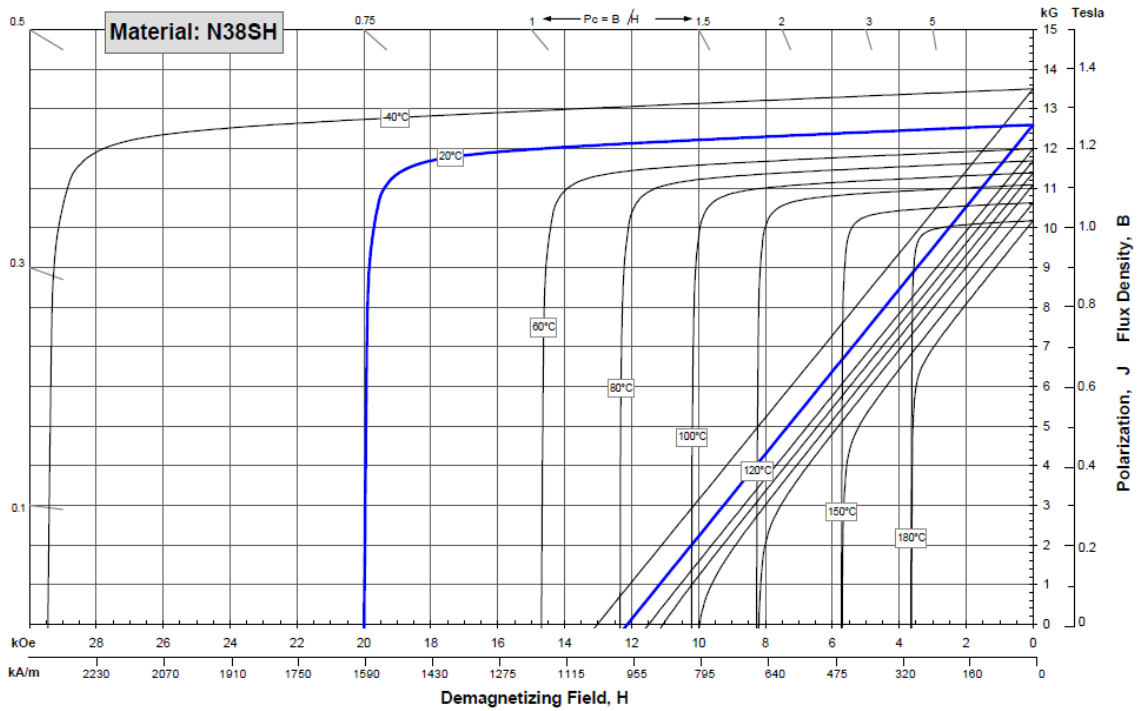
Sintered Neodymium-Iron-Boron Magnets

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	Magnetic Properties		
		min.	nominal	max.
B_r , Residual Induction	Gauss	12,200	12,600	13,000
	mT	1220	1260	1300
H_{cB} , Coercivity	Oersteds	11,400	11,900	12,400
	kA/m	907	947	987
H_{cJ} , Intrinsic Coercivity	Oersteds	20,000		
	kA/m	1,592		
BH_{max} , Maximum Energy Product	MGOe	36	39	41
	kJ/m ³	287	307	326

Characteristic	Units	Thermal Properties	
		C //	C ⊥
Reversible Temperature Coefficients ⁽¹⁾	of Induction, α(B _r)	%/°C	-0.12
	of Coercivity, α(H _{cj})	%/°C	-0.55
	Coefficient of Thermal Expansion ⁽²⁾	ΔL/L per °C x 10 ⁻⁶	7.5
Thermal Conductivity	kcal/mhr°C	5.3	5.8
Specific Heat ⁽³⁾	cal/g°C		0.11
Curie Temperature, T _c	°C		310
Other Properties	Flexural Strength	psi	41,300
		MPa	285
	Density	g/cm ³	7.5
	Hardness, Vickers	Hv	620
Electrical Resistivity, ρ	μΩ · cm		180

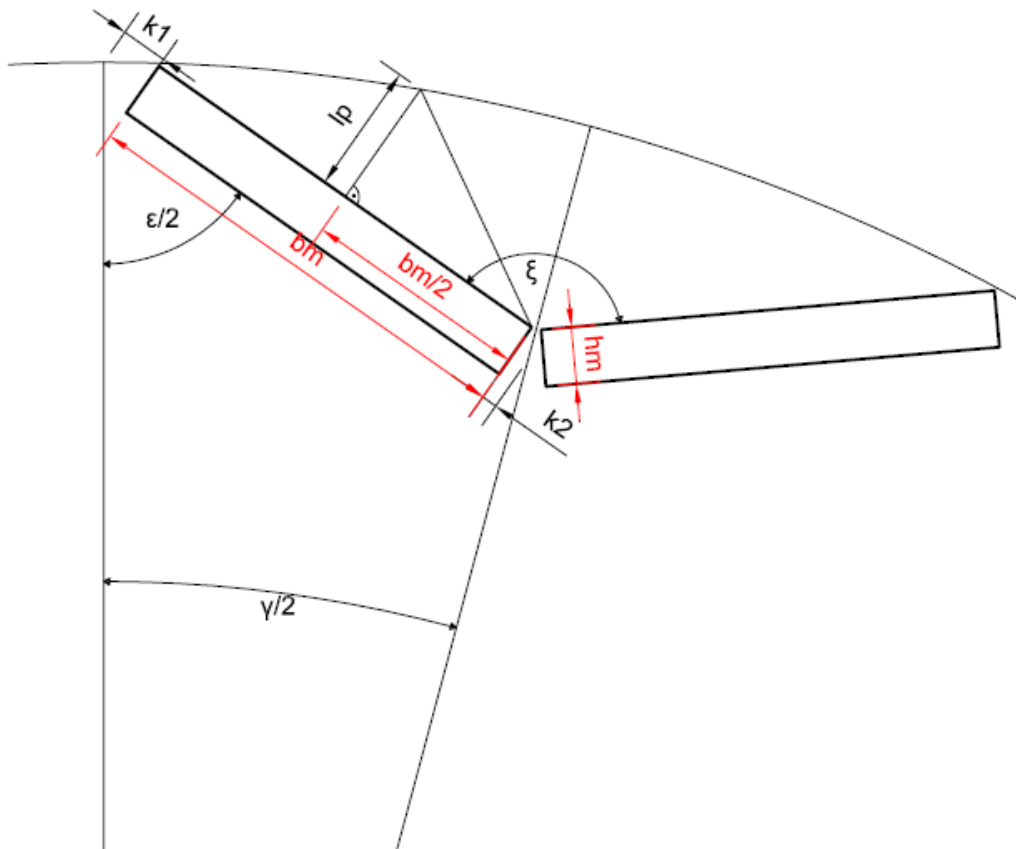
Notes: (1) Coefficients measured between 20 and 150 °C
 (2) Between 20 and 200 °C
 (3) Between 20 and 140 °C



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

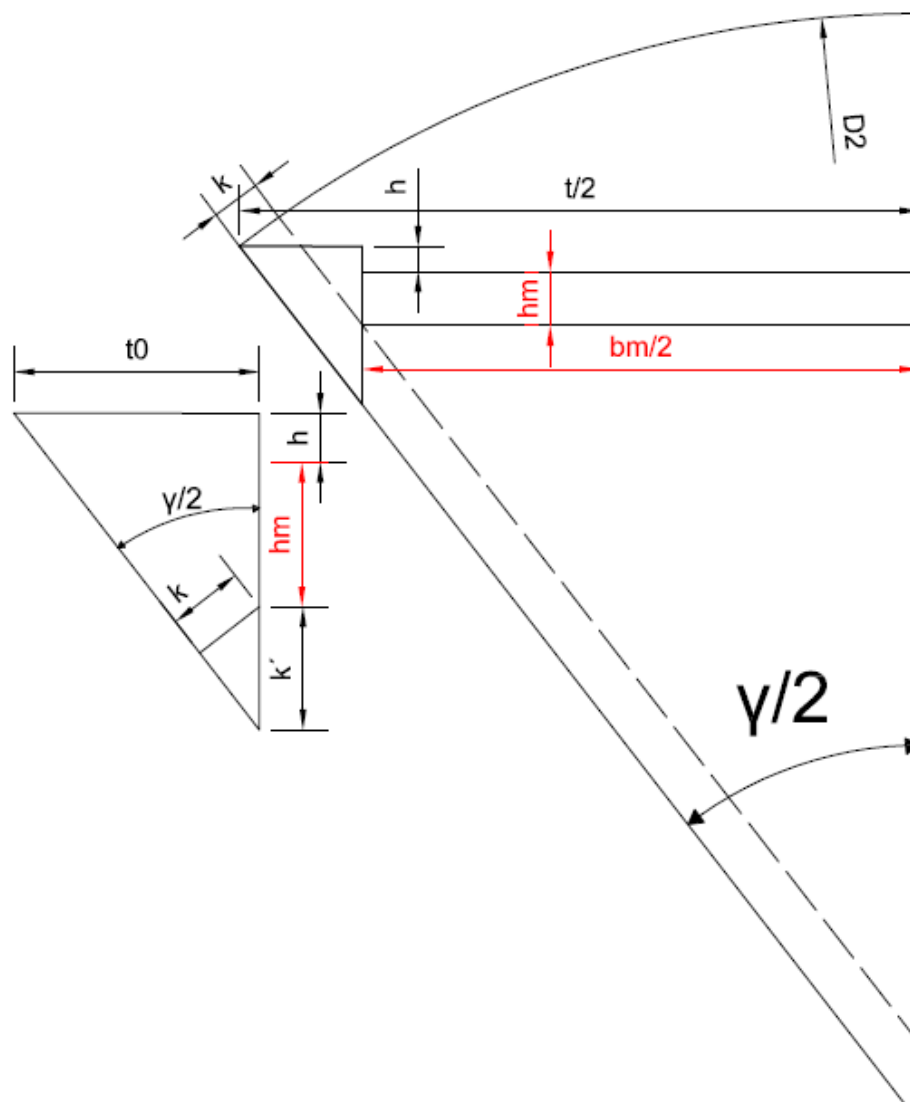
PŘÍLOHA Č. 7 – NÁKRES „V“ MAGNET

Doplnění k určení rozměrů magnetů pro „V“ uložení



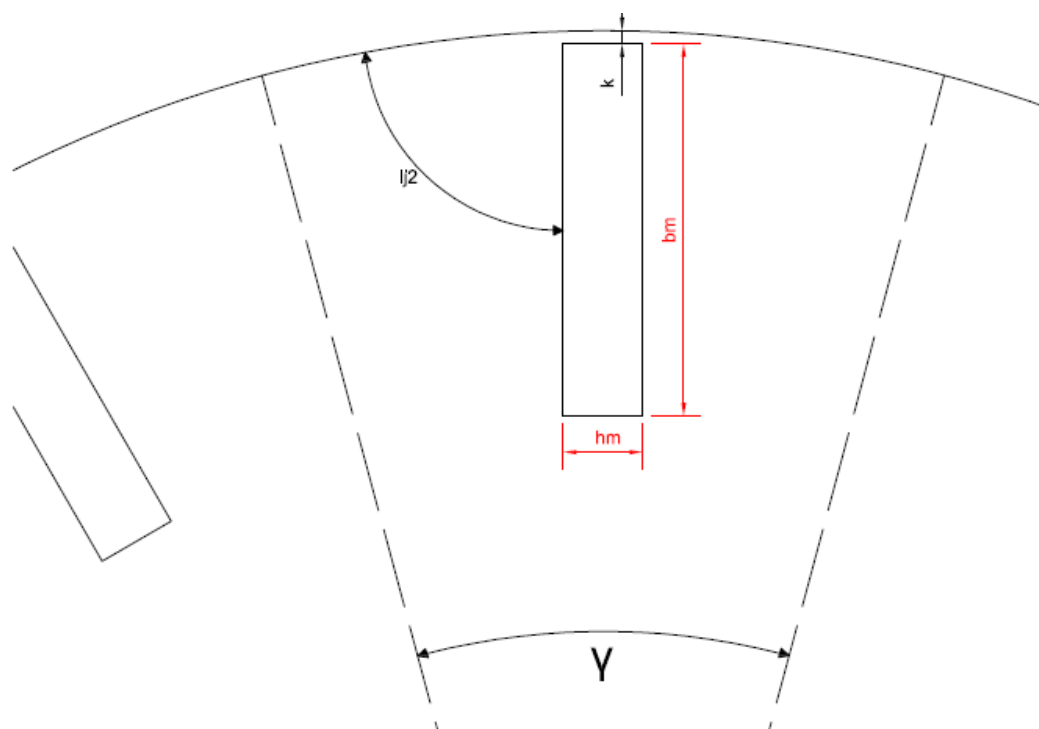
PŘÍLOHA Č. 8 – NÁKRES TANGENCIÁLNÍ MAGNET

Doplnění k určení rozměrů magnetů pro tangenciální uložení

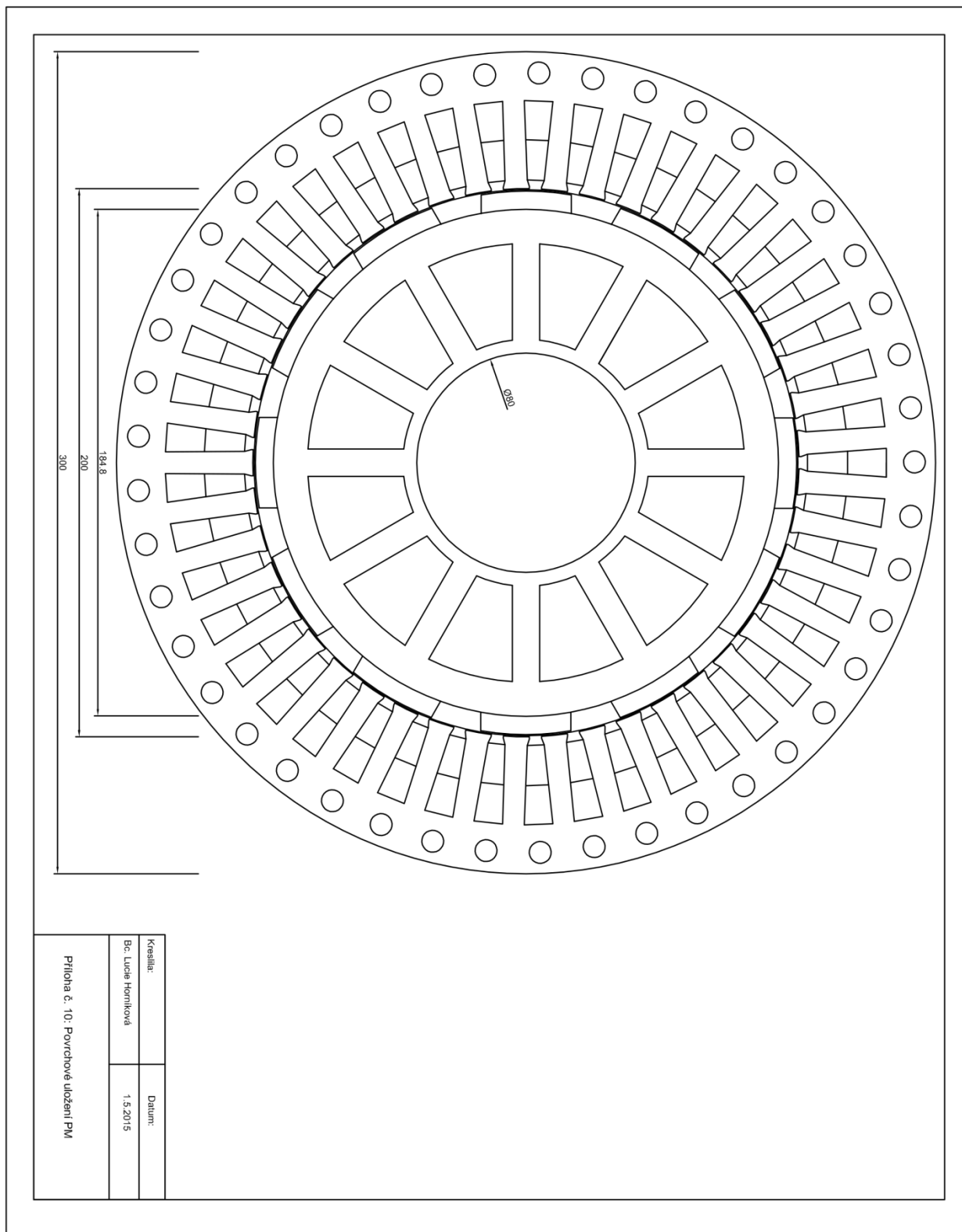


PŘÍLOHA Č. 9 – NÁKRES RADIÁLNÍ MAGNET

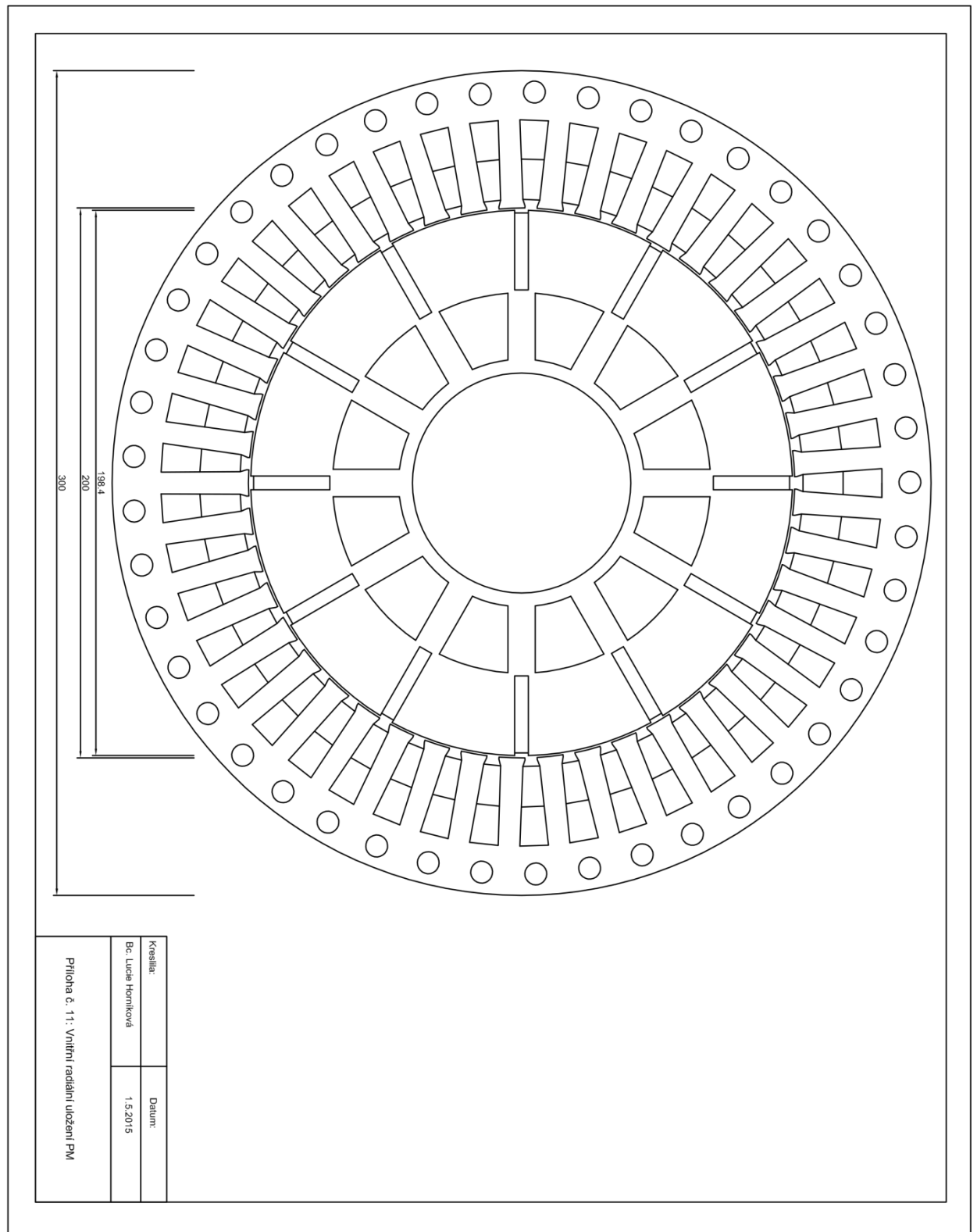
Doplnění k určení rozměrů magnetů pro radiální uložení



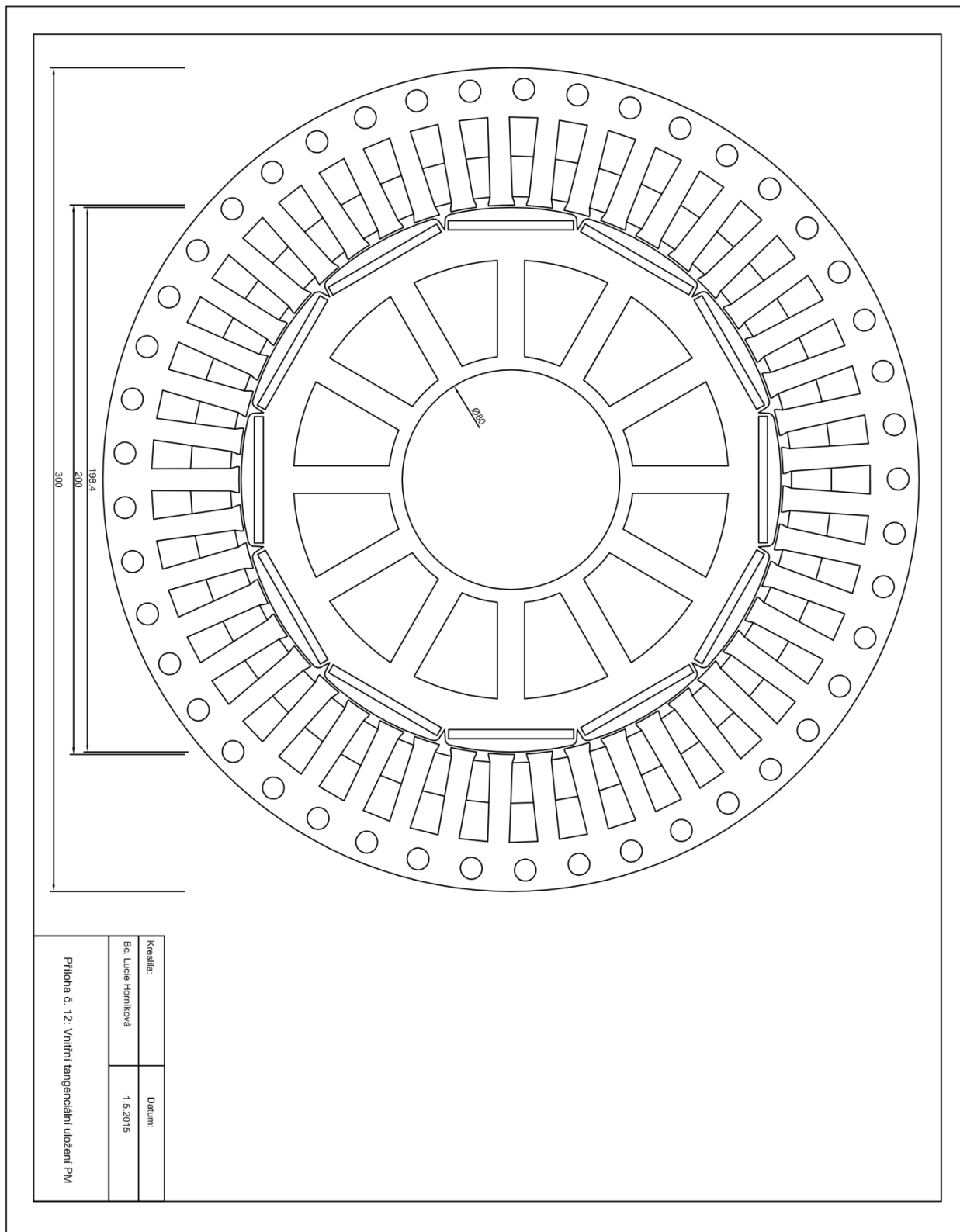
PŘÍLOHA Č. 10 – PŘÍČNÝ ŘEZ S POVRCHOVÝMI MAGNETY



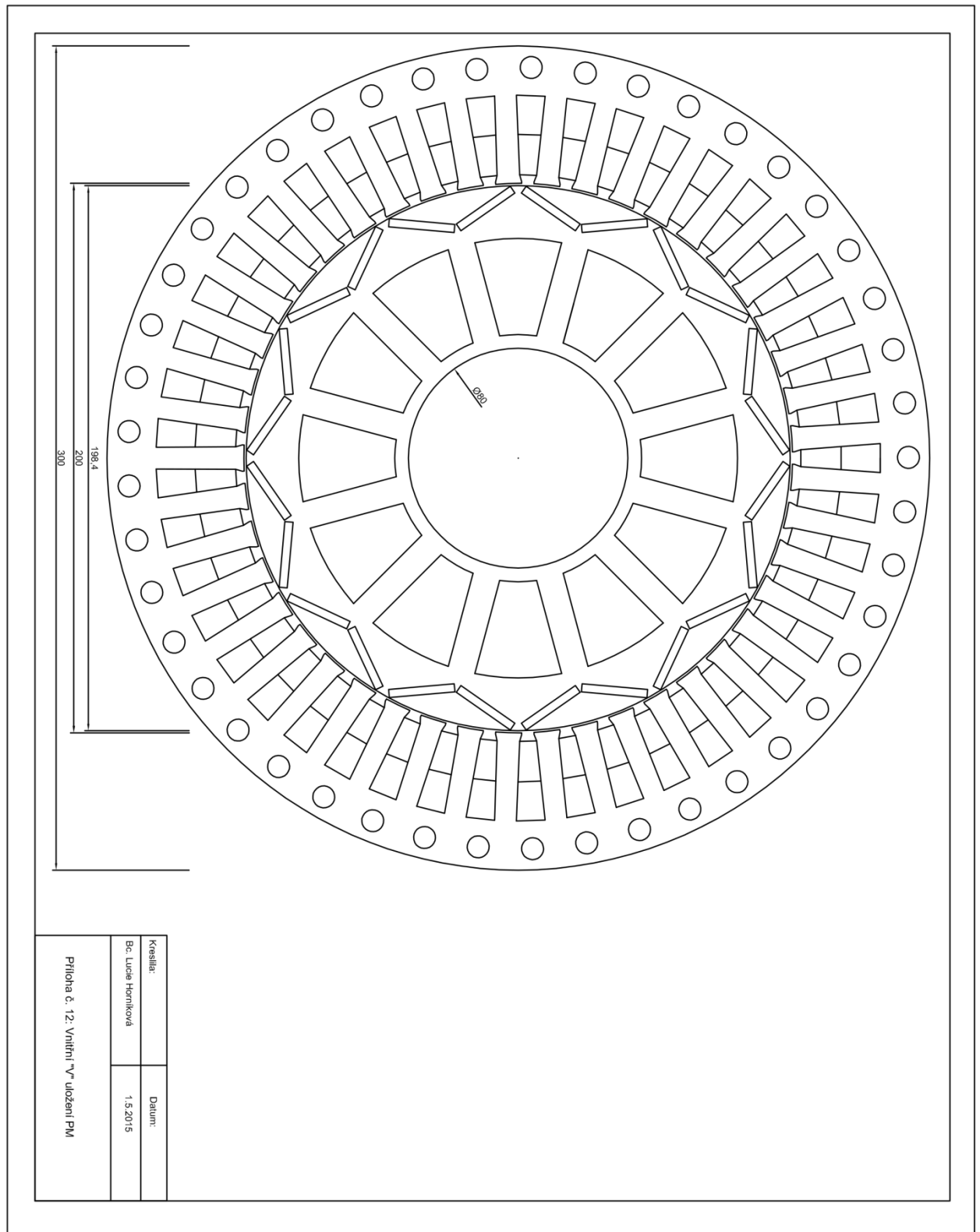
PŘÍLOHA Č. 11 – PŘÍČNÝ ŘEZ S VNITŘNÍMI RADIÁLNÍMI MAGNETY



PŘÍLOHA Č. 12 – PŘÍČNÝ ŘEZ S VNITŘNÍMI TANGENCIÁLNÍMI MAGNETY



PŘÍLOHA Č. 13 – PŘÍČNÝ ŘEZ S VNITŘNÍMI „V“ MAGNETY



PŘÍLOHA Č. 14 – 3D MODEL MOTORU

