

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
Katedra výkonové elektroniky a strojů

DIPLOMOVÁ PRÁCE
Elektricky buzené synchronní motory pro trakci

Autor práce: **Martin Kubaň**
Vedoucí práce: **Karel Hruška**

2022

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2021/2022

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Martin KUBAŇ**
Osobní číslo: **E20N0038P**
Studijní program: **N0713A060013 Výkonové systémy a elektroenergetika**
Specializace: **Elektrické stroje**
Téma práce: **Elektricky buzené synchronní motory pro trakci**
Zadávací katedra: **Katedra výkonové elektroniky a strojů**

Zásady pro vypracování

1. Popište používaná řešení elektricky buzených synchronních motorů pro elektrickou trakci a automobilový průmysl.
2. Navrhněte elektricky buzený synchronní stroj o jmenovitém výkonu 35 kW a jmenovité napětí baterie 360 V s přetížitelností na 100 kW.
3. Na navrženém stroji analyzujte vliv rotorových bariér za účelem maximalizace rozdílu indukčností stroje.
4. Zhodnoťte výsledky a proveditelnost výsledného řešení.



Rozsah diplomové práce: **40 – 60**
Rozsah grafických prací: **dle doporučení vedoucího**
Forma zpracování diplomové práce: **elektronická**

Seznam doporučené literatury:


ILLIANO, E. M.: Design of a highly efficient brushless current excited synchronous motor for automotive purposes. Dizertační práce, ETH Zürich, 2014. Dostupné z: <https://doi.org/10.3929/ethz-a-010433793>.
WANG, Q.; Niu, S.: Overview of flux-controllable machines: Electrically excited machines, hybrid excited machines and memory machines. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 68, 2017. ISSN 1364-0321 Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.098>.
KOPYLOV, I. P. a kol.: Stavba elektrických strojů. SNTL, Praha, 1988.
HRABOVCOVÁ, V.; JANOUŠEK, L.; RAFAJDUS, P.; LIČKO, M.: Moderné elektrické stroje. EDIS, Žilina, Slovenská Republika, 2001. ISBN 80-7100-809-5.

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Karel Hruška, Ph.D.**
Katedra výkonové elektroniky a strojů

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



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


Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 8. října 2021

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce se zabývá návrhem elektricky buzeného synchronního motoru a zvýšením poměru jeho indukčností v podélné a příčné ose. Je proveden elektromagnetický návrh tak, aby stroj odpovídal zadaným parametrům. Následně je vytvořen model navrženého motoru v programu Maxwell 2D, kde jsou v rotoru stroje vytvářeny magnetické bariéry v různých uspořádáních, přičemž u jednotlivých uspořádání je popsán vliv změny geometrie bariér na vyniklost stroje. V závěru jsou pak jednotlivá uspořádání bariér porovnána.

Klíčová slova

Elektricky buzený synchronní motor, trakce, elektromagnetický návrh, magnetické bariéry, zvýšení vyniklosti

Abstract

This master thesis focuses on design of electrically excited synchronous motor and increasing the ratio of its inductance in direct and quadrature axis. An electromagnetic design is performed so that the machine corresponds to the specified parameters. After that a model of the designed motor is created in the Maxwell 2D program, where magnetic barriers are created in the machine rotor in various configurations, while the influence of the change in the geometry of the barriers on the saliency of the machine is described for each arrangement. The individual barrier configurations are then compared in the conclusion.

Key Words

Electrically excited synchronous motor, traction, electromagnetic design, magnetic barriers, increasing of the saliency

Poděkování

Tímto bych velmi rád upřímně poděkoval vedoucímu mé diplomové práce, Doc. Ing. Karlu Hruškovi, Ph.D., za skvělé vedení mé práce, velké množství času věnovaného konzultacím a za velice trpělivé řešení všech mých dotazů.

Tato práce vznikla za podpory projektu SGS 2021 – 021.

Obsah

Úvod.....	- 1 -
1 Elektricky buzené synchronní motory v trakci.....	- 2 -
1.1 Požadavky na motory pro pohon elektrických vozidel.....	- 2 -
1.2 Elektricky buzené synchronní motory.....	- 3 -
1.3 Způsoby provedení buzení.....	- 5 -
2 Elektromagnetický návrh stroje.....	- 7 -
2.1 Výkonová rovnice a návrh vinutí.....	- 7 -
2.1.1 Základní parametry.....	- 7 -
2.1.2 Činitel vinutí.....	- 9 -
2.1.3 Výkonová rovnice a počet závitů v sérii.....	- 10 -
2.1.4 Görgesův obrazec.....	- 12 -
2.2 Magnetický obvod – jmenovité zatížení.....	- 14 -
2.2.1 Rozměry drážky.....	- 14 -
2.2.2 Výběr vodiče.....	- 16 -
2.2.3 Úbytky magnetických napětí na statoru.....	- 18 -
2.2.4 Rozměry pólu.....	- 21 -
2.2.5 Úbytky magnetických napětí na rotoru.....	- 23 -
2.2.6 Carterův činitel a činitel nasycení.....	- 24 -
2.3 Magnetický obvod – naprázdno.....	- 25 -
2.4 Výpočet činitele rozptylu.....	- 29 -
2.5 Parametry náhradního schématu.....	- 31 -
2.5.1 Potřebné rozměry.....	- 31 -
2.5.2 Odpory.....	- 32 -
2.5.3 Indukčnosti.....	- 34 -
2.6 Fázorový diagram.....	- 36 -
2.7 Návrh budícího vinutí.....	- 40 -
2.8 Ztráty.....	- 42 -
2.9 Zatěžovací charakteristiky.....	- 46 -
3 Analýza vlivu magnetických bariér.....	- 50 -

3.1	Rotor bez magnetických bariér	- 50 -
3.2	Rotor bez magnetických bariér – přetížení	- 52 -
3.3	Jedna magnetická bariéra	- 54 -
3.3.1	Vliv šířky bariéry	- 55 -
3.3.1	Vliv vzdálenosti mezi bariérou a vnějším průměrem rotoru	- 56 -
3.3.2	Vliv vzdálenosti mezi bariérou a vnitřním průměrem rotoru	- 57 -
3.4	Dvě magnetické bariéry	- 59 -
3.4.1	Vliv šířky bariéry	- 60 -
3.4.2	Vliv vzdálenosti mezi bariérou a vnějším průměrem rotoru	- 61 -
3.4.3	Vliv vzdálenosti mezi bariérou a vnitřním průměrem rotoru	- 62 -
3.5	Tři magnetické bariéry	- 63 -
3.5.1	Vliv šířky bariér	- 64 -
3.5.2	Vliv vzdálenosti mezi bariérou a vnějším průměrem rotoru	- 66 -
3.5.3	Vliv vzdálenosti mezi bariérou a vnitřním průměrem rotoru	- 68 -
3.6	Čtyři magnetické bariéry	- 71 -
3.6.1	Vliv šířky bariéry	- 72 -
3.6.2	Vliv vzdálenosti mezi bariérou a vnějším průměrem rotoru	- 73 -
3.6.3	Vliv vzdálenosti mezi bariérou a vnitřním průměrem rotoru	- 76 -
3.7	Labyrint magnetických bariér	- 78 -
3.7.1	Vliv vertikální vzdálenosti bariér	- 80 -
3.7.2	Vliv horizontální vzdálenosti bariér	- 82 -
	Závěr	- 84 -
	Literatura.....	
	Seznam obrázků.....	
	Seznam tabulek.....	
	Přílohy.....	I
I.	Příloha 1	I
II.	Příloha 2	II
III.	Příloha 3	V

Seznam symbolů a zkratek

Značka	Popisek	Jednotka
$2a_{=}$	Počet paralelních větví ss vinutí	[-]
$2p$	Počet pólů	[-]
$2u$	Počet vrstev vinutí	[-]
A	Lineární proudová hustota	[A/m]
a_{\sim}	Počet paralelních větví	[-]
a_{155}	Hloubka vniku při 155 °C	[mm]
a_{20}	Hloubka vniku při 20 °C	[mm]
b_{bvc}	Celková šířka budícího vinutí včetně izolace	[mm]
b_c	Šířka cívký	[mm]
b_{d1}	Šířka drážky	[mm]
B_{j10}	Indukce naprázdno ve jhu statoru	[T]
B_{j1max}	Zvolená maximální indukce ve jhu statoru	[T]
B_{j1n}	Indukce jha statoru	[T]
B_{j20}	Indukce naprázdno ve jhu rotoru	[T]
B_{j2max}	Zvolená maximální indukce ve jhu rotoru	[T]
b_p	Šířka pólu	[mm]
B_{p0}	Indukce naprázdno v pólu	[T]
B_{p2}	Amplituda pulzací v pólových nastavcích	[T]
B_{pmax}	Zvolená maximální indukce v pólu	[T]
b_{pn}	Šířka pólového nastavce (oblouk)	[mm]
b_{pn}'	Šířka pólového nastavce (tětiva)	[mm]
B_{pn0}	Indukce naprázdno v pólovém nastavci	[T]
B_{pnn}	Indukce v pólovém nastavci	[T]
b_{ppv}	Šířka prostoru pro vinutí a izolaci pod pólovým nastavcem	[mm]
b_v	Zvolená šířka vodiče dle normy	[mm]
b_v'	Přibližná šířka vodiče	[mm]
B_{z01}	Indukce naprázdno v zubu - vrchol	[T]
B_{z01}'	Zdánlivá indukce naprázdno v zubu-vrchol	[T]
B_{z02}	Indukce naprázdno v zubu - střed	[T]
B_{z02}'	Zdánlivá indukce naprázdno v zubu-střed	[T]
B_{z03}	Indukce naprázdno v zubu - pata	[T]
B_{z03}'	Zdánlivá indukce naprázdno v zubu-pata	[T]
b_{z1}	Přepočtená šířka zubu - vrchol	[mm]
b_{z1}'	Šířka zubu - vrchol	[mm]
b_{z2}	Šířka zubu - střed	[mm]
b_{z3}	Šířka zubu - pata	[mm]
B_{zmax}	Zvolená maximální indukce v zubu	[T]
B_{zn1}	Indukce v zubu - vrchol	[T]
B_{zn1}'	Zdánlivá indukce v zubu - vrchol	[T]
B_{zn2}	Indukce v zubu - střed	[T]
B_{zn2}'	Zdánlivá indukce v zubu - střed	[T]
B_{zn3}	Indukce v zubu - pata	[T]
B_{zn3}'	Zdánlivá indukce v zubu - pata	[T]
$B_{\delta 0}$	Indukce ve vzduchové mezeře naprázdno	[T]
$B_{\delta n}$	Jmenovitá indukce	[T]
C	Essonův činitel	[VAmin/m ³]
c	Izolační mezera mezi čely	[mm]

C_{d1}	Činitel deformace magnetického pole v ose d	[-]
$\cos\phi$	Zvolený účinník	[-]
C_{q1}	Činitel deformace magnetického pole v ose q	[-]
D_1	Průměr kotvy	[m]
D_2	Vnější průměr rotoru	[m]
D_b	Průměr vodiče budícího vinutí dle normy	[mm]
D_b'	Přibližný průměr vodiče budícího vinutí	[mm]
D_e	Vnější průměr statoru	[m]
D_i	Vnitřní průměr rotoru	[m]
f	Frekvence	[Hz]
F_1	Magnetické napětí buzení naprázdno	[A]
F_a	Magnetické napětí reakce kotvy	[A]
F_{bn}	Jmenovité magnetické napětí buzení	[A]
F_{bn1}	Jmenovité magnetické napětí buzení - 1. část	[A]
F_{bn2}	Jmenovité magnetické napětí buzení - 2. část	[A]
F_{d1}	Magnetické napětí reakce kotvy v ose d	[A]
F_{q1}	Magnetické napětí reakce kotvy v ose q	[A]
h_0	Výška prostoru pro klín	[mm]
h_{bvc}	Celková výška budícího vinutí včetně izolace	[mm]
h_d	Hloubka drážky	[mm]
h_{j1}	Přepočtená výška jha statoru	[mm]
h_{j1}'	Výška jha statoru	[mm]
h_{j1}/t_{j1}	Poměr výšky a pólové rozteče jha statoru	[-]
H_{j10}	Intenzita magnetického pole naprázdno ve jhu statoru	[A/m]
H_{j1n}	Intenzita magnetického pole ve jhu statoru	[A/m]
h_{j2}	Výška jha rotoru	[mm]
h_{j2}'	Výška jha rotoru pod středem pólu	[mm]
H_{j20}	Intenzita magnetického pole naprázdno ve jhu rotoru	[A/m]
H_{j2n}	Intenzita magnetického pole ve jhu rotoru	[A/m]
h_k	Výška klínu	[mm]
h_p	Výška pólu	[mm]
H_{p0}	Intenzita magnetického pole naprázdno v pólu	[A/m]
h_{pn}	Výška pólového nástavce	[mm]
H_{pn}	Intenzita magnetického pole v pólu	[A/m]
h_{pn}'	Výška pólového nástavce (tětíva-vrchol)	[mm]
h_{pn}''	Výška pólového nástavce (pata-tětíva)	[mm]
H_{pn0}	Intenzita magnetického pole naprázdno v pólovém nástavci	[A/m]
H_{pnn}	Intenzita magnetického pole v pólovém nástavci	[A/m]
h_v	Zvolená výška vodiče dle normy	[mm]
h_v'	Přibližná výška vodiče	[mm]
H_{z0}	Geometrický průměr intenzit magnetického pole	[A/m]
H_{z01}	Intenzita magnetického pole naprázdno v zubu-vrchol	[A/m]
H_{z02}	Intenzita magnetického pole naprázdno v zubu-střed	[A/m]
H_{z03}	Intenzita magnetického pole naprázdno v zubu-pata	[A/m]
H_{zn}	Geometrický průměr intenzit magnetického pole	[A/m]
H_{zn1}	Intenzita magnetického pole v zubu-vrchol	[A/m]
H_{zn2}	Intenzita magnetického pole v zubu-střed	[A/m]
H_{zn3}	Intenzita magnetického pole v zubu-pata	[A/m]
I_a	Proud paralelní větví	[A]
I_b	Přepočtený budící proud	[A]

I_b'	Budící proud	[A]
I_{bp}	Budící proud při přetížení	[A]
I_c	Celkový proud strojem	[A]
I_d	Proud jednou drážkou	[A]
I_n	Jmenovitý proud	[A]
J	Skutečná proudová hustota	[A/mm ²]
J'	Přibližná proudová hustota	[A/mm ²]
J_b	Zvolená proudová hustota v budícím vinutí	[A/mm ²]
J_{max}	Zvolená maximální proudová hustota	[A/mm ²]
K	Celkový počet cívek	[-]
k	Koeficient činitele rozptylu	[-]
k_{-155}	Koeficient nárůstu odporu při 155 °C a střídavém proudu	[-]
k_{-20}	Koeficient nárůstu odporu při 20 °C a střídavém proudu	[-]
K_1	Počet cívek v jednom svazku	[-]
k_B	Činitel tvaru magnetického pole	[-]
k_{C1}	Carterův činitel	[-]
k_{C2}	Carterův činitel rotoru	[-]
k_{Cu}	Činitel plnění drážky	[-]
k_D	Poměr D_1/D_e	[-]
k_E	Činitel elektromotorické síly	[-]
$k_{E'}$	Zvolený činitel elektromotorické síly	[-]
k_{Fe}	Činitel plnění železa	[-]
k_{j1}	Činitel korekce magnetického napětí jha statoru	[-]
k_m	Činitel mechanických ztrát	[-]
k_p	Koeficient výšky pólu	[-]
k_{r1}	Činitel rozlohy	[-]
k_{sat}	Činitel nasycení	[-]
k_{tj1}	Činitel opracování jha	[-]
k_{tz}	Činitel opracování zubů	[-]
k_{v1}	Činitel vinutí	[-]
k_{y1}	Činitel kroku	[-]
k_{z1}	Činitel odlehčení zubu - vrchol	[-]
k_{z2}	Činitel odlehčení zubu - střed	[-]
k_{z3}	Činitel odlehčení zubu - pata	[-]
k_β	Činitel k_β	[-]
k_β'	Činitel k_β'	[-]
k_σ	Skutečný činitel rozptylu	[-]
k_σ'	Přibližný činitel rozptylu	[-]
L_{ad}	Magnetizační indukčnost v ose d	[mH]
L_{aq}	Magnetizační indukčnost v ose q	[mH]
$L_{a\sigma}$	Rozptylová indukčnost	[mH]
l_b	Skutečná střední délka závitů budícího vinutí	[mm]
l_b'	Přibližná střední délka závitů budícího vinutí	[mm]
$L_{b\sigma}$	Rozptylová indukčnost budícího vinutí	[mH]
l_ϵ	Délka čela	[mm]
L_d	Indukčnost v ose d	[mH]
L_d/L_q	Poměr indukčností v osách d a q	[-]
l_f	Délka jednoho fázoru Görgesova obrazce	[p.j.]
l_{Fe}	Přepočtená délka železa	[m]
l_{Fe}'	Délka železa	[m]

l_i	Délka stroje	[m]
l_{j1red}	Redukovaná délka jha statoru	[mm]
l_{j2}	Pólová rozteč uprostřed jha rotoru	[mm]
L_p	Délka pólu i pólového nástavce	[m]
l_p	Vzdálenost mezi póly	[mm]
l_{pn}	Vzdálenost mezi pólovými nástavci	[mm]
L_q	Indukčnost v ose d	[mH]
l_v	Délka výběhu z drážky	[mm]
l_z	Délka závitů	[mm]
L_μ	Magnetizační indukčnost	[mH]
m	Počet fází	[-]
M	Moment	[Nm]
m_{j1}	Hmotnost statorového jha	[kg]
M_n	Jmenovitý moment	[Nm]
m_{pn}	Hmotnost pólového nástavce	[kg]
m_{z1}	Hmotnost zubu - vrchol-střed	[kg]
m_{z2}	Hmotnost zubu - střed-pata	[kg]
n_1	Počet průvodičů r_1	[-]
n_2	Počet průvodičů r_2	[-]
n_3	Počet průvodičů r_3	[-]
N_b	Přepočtený počet závitů budicího vinutí	[-]
N_b'	Počet závitů budicího vinutí	[-]
N_{b1v}	Počet závitů budicího vinutí v jedné vrstvě	[-]
N_C	Počet závitů cívky	[-]
n_c	Celkový počet průvodičů	[-]
n_{max}	Maximální otáčky	[ot/min]
n_n	Jmenovité otáčky	[ot/min]
n_p	Počet paralelních vodičů	[-]
n_{pl}	Počet plechů	[-]
N_S	Počet závitů v sérii	[-]
N_{SO}	Ověřený počet závitů v sérii	[-]
P	Činný výkon	[W]
p_i	Izolační přírůstek	[mm]
p_{ib}	Izolační přírůstek budicího vinutí	[mm]
P_{max}	Maximální výkon	[kW]
P_n	Jmenovitý výkon	[kW]
Q	Počet drážek	[-]
q	Počet drážek na pól a fázi	[-]
r_1	Délka průvodiče z těžiště ke konci fázoru 2	[p.j.]
r_{1g}	Referenční poloměr - pro základní harmonickou	[p.j.]
r_2^2	Délka průvodiče z těžiště ke konci fázoru 4 - druhá mocnina	[p.j. ²]
r_3^2	Délka průvodiče z těžiště ke konci fázoru 6 - druhá mocnina	[p.j. ²]
R_{a-155}	Odpor mědi při 155 °C a napájení střídavým proudem	[Ω]
r_{a-155}	Poměrný odpor při 155 °C	[p.j.]
R_{a-20}	Odpor mědi při 20 °C a napájení střídavým proudem	[Ω]
R_{a155}	Odpor mědi při 155 °C a napájení stejnosměrným proudem	[Ω]
R_{a20}	Odpor mědi při 20 °C a napájení stejnosměrným proudem	[Ω]
R_b	Odpor budicího vinutí	[Ω]
r_g^2	Görgesův poloměr - druhá mocnina	[p.j. ²]
R_o	Poloměr oka	[mm]

S	Zdánlivý výkon	[VA]
S_b	Skutečná plocha vodiče budícího vinutí	[mm ²]
S_b'	Přibližná plocha vodiče budícího vinutí	[mm ²]
S_C	Počet svazků cívek	[-]
S_{Cu}	Plocha všech vodičů v drážce	[mm ²]
S_d	Plocha drážky	[mm ²]
S_f	Počet svazků cívek na fázi	[-]
S_i	Vnitřní výkon	[VA]
S_v	Skutečná plocha vodiče dle normy	[mm ²]
S_v'	Přibližná plocha vodiče	[mm ²]
t_b	Izolace mezi pólem a budícím vinutím	[mm]
t_c	Cívková izolace	[mm]
t_{d1}	Drážková rozteč	[mm]
t_{d2}	Drážková rozteč uprostřed drážky	[mm]
t_{d3}	Drážková rozteč u paty drážky	[mm]
t_{j1}	Pólová rozteč jha statoru	[mm]
t_m	Mezivrstva	[mm]
t_{p1}	Pólová rozteč	[mm]
t_{p1d}	Pólová rozteč	[drážek]
t_{p2}	Pólová rozteč rotoru	[mm]
t_{pl}	Tloušťka plechu	[mm]
T_F	Počet řádků Tingleyho schématu	[-]
T_s	Počet sloupců Tingleyho schématu	[-]
t_{sd}	Tloušťka stahovací desky	[mm]
t_v	Vyložení drážky	[mm]
U_b	Budící napětí	[V]
U_{DC}	SS napětí	[V]
U_{fn}	Jmenovité fázové napětí	[V]
u_{i0}	Indukované napětí naprázdno	[p.j.]
U_{ib}	Indukované napětí	[V]
u_{ib1}	Indukované napětí - 1. část	[p.j.]
u_{ib2}	Indukované napětí - 2. část	[p.j.]
U_{ibp}	Indukované napětí při přetížení	[V]
U_m	Amplituda sdruženého napětí	[V]
U_n	Jmenovité sdružené napětí	[V]
v	Rychlost otáčení	[m/s]
v_b	Počet vrstev budícího vinutí	[-]
V_d	Počet vodičů v drážce	[-]
V_{j1}	Objem jha statoru	[m ³]
V_{pn}	Objem pólového nástavce	[m ³]
V_{z1}	Objem zubu - vrchol-střed	[m ³]
V_{z2}	Objem zubu - střed-pata	[m ³]
$X_{a\sigma}$	Rozptylová reaktance	[Ω]
$x_{a\sigma}$	Poměrná rozptylová reaktance	[p.j.]
X_d	Reaktance v ose d	[Ω]
x_d	Poměrná reaktance v ose d	[p.j.]
X_q	Reaktance v ose q	[Ω]
x_q	Poměrná reaktance v ose q	[p.j.]
y	Vzdálenost předních cívkových stran	[strany]
y_l	Krok vinutí v počtu cívkových stran	[stran]

y_{1d}	Krok vinutí	[drážek]
y_2	Spojkový krok	[stran]
y_K	Krok na komutátoru	[lamela]
Z_n	Jmenovitá impedance	[Ω]
α	Úhel alfa	[$^\circ$]
α_{Cu}	Teplotní součinitel odporu mědi	[K^{-1}]
$\alpha_{\check{c}}$	Úhel sklonu čel	[$^\circ$]
α_m	Mechanický činitel pólového krytí	[-]
α_{δ}	Elektromagnetický činitel pólového krytí	[-]
β	Činitel zkrácení kroku	[-]
β	Zátěžný úhel	[$^\circ$]
γ	Úhel gama	[$^\circ$]
γ_1	Činitel γ	[-]
γ_2	Činitel γ (pro malou vzduchovou mezeru)	[-]
γ_3	Činitel γ (pro malou vzduchovou mezeru)	[-]
γ_{Cu155}	Měrná vodivost mědi při 155 °C	[MS/m]
γ_{Cu20}	Měrná vodivost mědi při 20 °C	[MS/m]
δ	Zvolená vzduchová mezera	[mm]
δ'	Vzduchová mezera '	[mm]
δ''	Vzduchová mezera ''	[mm]
Δb	Rozdíl šířky prostoru pod nástavcem a budícího vinutí	[mm]
Δh	Rozdíl výšky pólu a celkové výšky budícího vinutí	[mm]
Δk_E	Chyba činitele elektromotorické síly	[%]
Δk_{σ}	Chyba činitele rozptylu	[%]
Δl_b	Chyba střední délky závitů budícího vinutí	[%]
ΔN_S	Chyba počtu závitů v sérii	[%]
ΔP	Celkové ztráty	[W]
ΔP_{Fej1}	Ztráty v železe - jho statoru	[W]
ΔP_{Fez1}	Ztráty v železe - zub - vrchol - střed	[W]
ΔP_{Fez2}	Ztráty v železe - zub - střed - pata	[W]
ΔP_j	Jouleovy ztráty	[W]
Δp_{j1}	Přepočtené ztrátové číslo pro jho statoru	[W/kg]
$\Delta p_{j1(100-1,4)}$	Ztrátové číslo pro jho statoru	[W/kg]
ΔP_{jb}	Jouleovy ztráty v budícím vinutí	[W]
ΔP_m	Mechanické ztráty	[W]
ΔP_p	Přídavné ztráty	[W]
$\Delta p_{pn(100-0,8)}$	Ztrátové číslo pro pólové nástavce	[W/kg]
ΔP_{pulz2}	Pulzační ztráty v pólových nástavcích	[W]
Δp_{vpn}	Ztrátové číslo pro vířivé proudy v pólových nástavcích	[W/kg]
$\Delta p_{z(100-1,5)}$	Ztrátové číslo pro zuby	[W/kg]
Δp_{z1}	Přepočtené ztrátové číslo pro zub - vrchol - střed	[W/kg]
Δp_{z2}	Přepočtené ztrátové číslo pro zub - střed - pata	[W/kg]
$\Delta \eta_{PWM}$	Chyba účinnosti při napájení PWM	[%]
ζ_{155}	Poměrná hloubka vniku při 155 °C	[-]
ζ_{20}	Poměrná hloubka vniku při 20 °C	[-]
η	Zvolená účinnost	[-]
η_{PWM}	Účinnost při napájení PWM	[-]
η_{sin}	Účinnost při sinusovém napájení	[-]
ϑ_{Cu}	Maximální teplota vinutí	[$^\circ C$]
Θ_{j10}	Úbytek magnetického napětí naprázdno na jhu statoru	[A]

Θ_{j1n}	Úbytek magnetického napětí na jhu statoru	[A]
Θ_{j20}	Úbytek magnetického napětí naprázdno na jhu rotoru	[A]
Θ_{j2n}	Úbytek magnetického napětí na jhu rotoru	[A]
Θ_{p0}	Úbytek magnetického napětí naprázdno na pólu	[A]
Θ_{pn}	Úbytek magnetického napětí na pólu	[A]
Θ_{pn0}	Úbytek magnetického napětí naprázdno na pólovém nástavci	[A]
Θ_{pmn}	Úbytek magnetického napětí na pólovém nástavci	[A]
Θ_{z0}	Úbytek magnetického napětí naprázdno na zubu	[A]
Θ_{zn}	Úbytek magnetického napětí na zubu	[A]
$\Theta_{\delta 0}$	Úbytek magnetického napětí naprázdno na vzduchové mezeře	[A]
$\Theta_{\delta n}$	Úbytek magnetického napětí na vzduchové mezeře	[A]
$\lambda_{\tilde{c}}$	Činitel magnetické vodivosti čel	[-]
$\Lambda_{\tilde{c}p}$	Magnetická vodivost mezi čely pólů	[nH]
$\Lambda_{\tilde{c}pn}$	Magnetická vodivost mezi čely pólových nástavců	[nH]
λ_{do}	Činitel magnetické vodivosti drážek	[-]
Λ_p	Magnetická vodivost mezi tělesy pólů	[nH]
Λ_{pn}	Magnetická vodivost mezi pólovými nástavci	[nH]
Λ_{σ}	Výsledná magnetická vodivost rozptylových cest	[nH]
ζ	Modulační index	[-]
ρ_{Fe}	Hustota plechů	[kg/m ³]
$\Sigma\Theta_0$	Celkový úbytek magnetických napětí naprázdno	[A]
$\Sigma\Theta_n$	Celkový úbytek magnetických napětí	[A]
τ_{dif}	Činitel diferenčního rozptylu	[-]
ϕ	Fázový posuv	[°]
φ_0	Magnetický tok naprázdno	[Wb]
φ_{j10}	Magnetický tok naprázdno jhem statoru	[Wb]
φ_{j1n}	Magnetický tok jhem statoru	[Wb]
φ_{j20}	Magnetický tok naprázdno jhem rotoru	[Wb]
φ_{j2n}	Magnetický tok jhem rotoru	[Wb]
φ_n	Jmenovitý magnetický tok	[Wb]
φ_r	Magnetický tok rotorem	[Wb]
φ_{r0}	Magnetický tok naprázdno rotorem	[Wb]
φ_{z0}	Magnetický tok naprázdno v zubu	[Wb]
φ_{zn}	Magnetický tok zubem	[Wb]
φ_{σ}	Velikost rozptylového toku	[Wb]
ψ	Vnitřní fázový posuv	[°]
ω_l	Úhlová frekvence	[rad/s]
p.j.	Poměrná jednotka	

Úvod

Tato diplomová práce se zabývá elektricky buzenými synchronními motory pro trakci. V trakci jsou dnes využívány převážně asynchronní motory a synchronní motory s permanentními magnety, které jsou často používány i k pohonu elektrických aut. Právě v případě elektrických aut však může vhodnou alternativu k těmto běžně používaným motorům představovat elektricky buzený synchronní motor. Tento typ motoru má sice nevýhody například v podobě nutnosti přenosu budícího proudu na rotor, čímž se komplikuje konstrukce stroje, či v podobě ztrát vznikajících v rotorovém vinutí, ale v porovnání s ostatními typy strojů má velkou výhodu v podobě možnosti regulace rotorového proudu. Právě regulace buzení stroje přímo pomocí rotorového proudu umožňuje práci motoru s konstantním výkonem ve větším rozsahu otáček než v případě ostatních typů elektrických motorů.

V praktické části této diplomové práce je pak proveden elektromagnetický návrh elektricky buzeného synchronního motoru se zadanými parametry. Je vytvořen model navrženého stroje v programu Maxwell 2D, který je využit k analýze vlivu rotorových bariér na rozdíl indukčností stroje v podélné a příčné ose. Jsou zde analyzována různá uspořádání magnetických bariér, které jsou vytvořeny v rotorovém pólu. Nejprve je analyzován vliv jedné bariéry, která je umístěna v podélné ose pólu. V dalších uspořádáních je zvyšován počet bariér až do čtyř, přičemž bez ohledu na počet jsou bariéry v pólu vždy rozmístěny symetricky vůči jeho podélné ose. U všech uspořádání bariér je analyzován vliv šířky bariér a vliv vzdálenosti bariér od vnitřního i vnějšího průměru rotoru. Tyto parametry jsou v závislosti na uspořádání nastavovány buď pro všechny bariéry stejně, nebo se nastavení liší podle polohy bariér. Na základě získaných hodnot je také vytvořeno uspořádání se sedmi bariérami rozmístěnými v těsné blízkosti podélné osy. Zde je analyzován vliv horizontální a vertikální vzdálenosti jednotlivých bariér. V závěru je pak uvedeno porovnání jednotlivých uspořádání z hlediska jejich vlivu na hodnoty indukčností stroje v podélné a příčné ose.

1 Elektricky buzené synchronní motory v trakci

Elektromobily poháněné elektrickými motory, které během svého provozu neprodukují žádné emise, se stále častěji dostávají do popředí zájmů výrobců automobilů. Mezi hlavní výhody pohonu vozidla s elektrickými motory, v porovnání s pohonem pomocí klasického spalovacího motoru, patří zejména schopnost rekuperace energie zpět do baterií během brzdění, která je u klasických aut se spalovacími motory přeměněna v teplo bez dalšího využití. Další výhodou je pak vysoká účinnost elektrického motoru, která se pohybuje kolem 90 %, oproti spalovacímu motoru, jehož účinnost je obvykle méně než 40 %. Oproti těmto výhodám však stojí omezený dojezd elektromobilů, způsobený bateriemi s nízkou energetickou hustotou, ale také skutečnost, že velká část elektrické energie, která se používá k dobíjení těchto baterií, se dnes stále vyrábí v elektrárnách spalujících fosilní paliva. [7]

I přes další nepraktické vlastnosti elektromobilů, jako je například poměrně zdoluhavé nabíjení jejich baterií, nebo snížení jejich dojezdu v zimních měsících i kvůli nutnosti odebírat z baterie elektrickou energii pro vytápění vozidla, jsou elektromobily stále více rozšířeny. Důvodem neustávajícího vývoje elektrických aut je především nutnost splnění emisních limitů nově vyráběných vozidel, přičemž právě elektromobily jsou často jediným způsobem, jak neustále se zpřísnující emisní limity splnit. V oblasti automobilového průmyslu se tedy plánuje útlum technologie spalovacích motorů a přechod na výrobu vozidel poháněných elektrickými motory.

1.1 Požadavky na motory pro pohon elektrických vozidel

Mezi hlavní požadavky na elektrické motory určené k pohonu elektromobilů patří vysoká momentová a výkonová hustota. Ohledně výkonu je také často požadováno, aby byl motor schopný pracovat s navrženým výkonem ve velkém rozsahu otáček, díky čemuž je možné vytvářet vozidla bez nutnosti použití vícestupňové převodovky. Motor by měl také umožňovat alespoň krátkodobé přetížení na několiknásobek svého jmenovitého výkonu například proto, aby byla během jízdy zajištěna možnost bezpečného předjíždění. Zároveň by měl mít motor vysokou účinnost, především pak při nižších rychlostech, ve kterých jsou vozidla nejčastěji provozována při jejich obvyklém využívání. Jednou z požadovaných vlastností je také vytváření co nejmenšího hluku. Dále pak může být požadováno, aby motor nevytvářel nebezpečný brzdový moment při poruše střídače, či schopnost motoru pracovat s vysokým účínkem, což se projeví nižšími požadavky na dimenzování střídače napájecího

motor. Motor by také nejlépe neměl mít žádné spojení s rotorem v podobě kartáčů. Zásadním požadavkem jsou pak samozřejmě nízké výrobní náklady. [7]

K pohonu elektrických aut jsou dnes často využívány synchronní motory s permanentními magnety, které splňují většinu zmíněných požadavků. Použití permanentních magnetů však přináší i nevýhody. Jednou z těchto nevýhod je skutečnost, že silné permanentní magnety, používané v těchto motorech, jsou vyrobeny ze vzácných zemin, které se nachází prakticky pouze na území Číny. Ta tak může ovlivňovat cenu magnetů, která v minulosti zažívala poměrně značné kolísání. Další nevýhodou je, že pokud jsou materiály pro permanentní magnety získávány těžbou bez ohledu na životní prostředí a není s nimi správně nakládáno, může tato těžba materiálů a zpracování permanentních magnetů způsobit poškození životního prostředí, což pak snižuje ekologický přínos elektromobilů. Proto může být požadováno, aby elektrický motor pro pohon elektromobilu neobsahoval permanentní magnety. [7, 10]

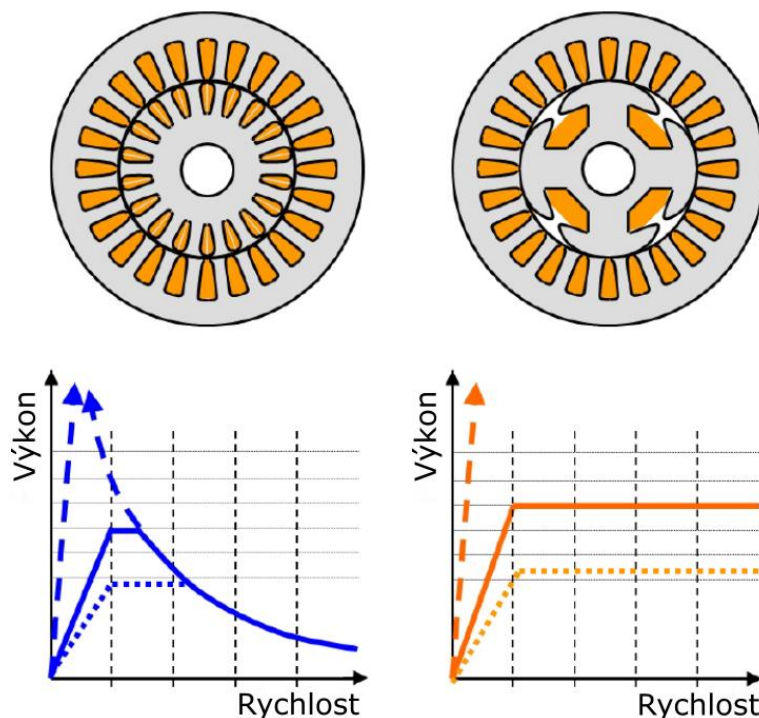
1.2 Elektricky buzené synchronní motory

Jedním z typů elektrických motorů, které neobsahují permanentní magnety, jsou elektricky buzené synchronní motory. Hlavní výhodou tohoto typu motoru je pak možnost přímo kontrolovat rotorový proud stroje a regulovat magnetický tok ve stroji.

U ostatních typů motorů používaných k pohonu elektromobilů, jako jsou například asynchronní motory nebo synchronní motory s permanentními magnety, je velkého momentu stroje při nízkých otáčkách možné dosáhnout pouze pomocí velkého statorového proudu dodávaného střídačem. Velikost dosažitelného momentu je tak limitována maximálním proudem, který je střídač schopný vytvářet. Pokud je tedy u těchto typů motorů potřeba dosahovat velké přetížitelnosti, musí tomuto požadavku odpovídat také dimenzování napájecího střídače. S větším výkonem střídače však roste i jeho cena, což může negativně ovlivnit jeho použitelnost pro danou aplikaci. U elektricky buzeného synchronního stroje je velké přetížitelnosti při nízkých rychlostech možné dosáhnout zvýšením statorového proudu i budícího proudu v rotoru, který má nižší hodnotu než statorový proud. Zvýšení přetížitelnosti stroje i s využitím rotorového proudu tak umožňuje dimenzování napájecího střídače na menší hodnoty proudů. [7, 8, 9, 10]

Díky možnosti regulovat rotorový proud je také možné při zatížení nízkým momentem snížit budící proud a dosáhnout tak snížení ztrát. Tím lze zvýšit účinnost stroje při nízkých hodnotách výkonu, při kterých jsou auta obvykle provozována nejčastěji. Další výhodou regulovatelného rotorového proudu je pak možnost práce stroje s konstantním výkonem

do vyšších rychlostí, než je tomu u ostatních typů elektrických motorů používaných k pohonu elektromobilů, kde je nutné k odbuzení použít satorový proud. Pro příklad jsou na (Obr. 1.1) uvedeny závislosti výkonu na rychlosti pro elektricky buzený synchronní motor a asynchronní motor. Regulací rotorového proudu lze dosáhnout také demagnetizace rotoru v případě poruchy střídače, aby poté motor nevytvářel nebezpečný brzdný moment. Regulovatelnost budícího proudu lze také využít k nastavení požadovaného účinníku stroje. [7, 8, 9, 10]



Obr. 1.1: Závislost výkonu na rychlosti pro asynchronní motor (vlevo) a elektricky buzený synchronní motor (převzato a přeloženo z [7])

Na (Obr. 1.1) vyznačují čárkované čáry výkon, který jsou motory schopny vytvářet po dvě vteřiny. Šipky na těchto čarách pak značí, že maximální výkon těchto strojů není omezen jejich magnetickými vlastnostmi, ale jejich teplotními a mechanickými omezeními. Plné čáry vyznačují výkon, který jsou motory schopny vytvářet po třicet vteřin, a tečkované čáry vyznačují výkon, který jsou motory schopny vytvářet bez časového omezení. [7]

Ačkoliv výhody elektricky buzeného synchronního motoru spočívají především v možnosti regulace rotorového proudu, tak právě nutnost přenést budící proud na pohybující se rotor stroje představuje nevýhodu tohoto stroje, jehož konstrukce je tak složitější než v případě ostatních používaných typů elektrických motorů. Přenos budícího proudu na rotor může být realizován klasickým způsobem přes kartáče dosedající na rotující kroužky. Tento způsob však může způsobovat problémy v podobě opotřebovávání kartáčů

a usazování prachu z kartáčů ve stroji. Těmto problémům se lze vyhnout použitím jiného způsobu přenosu proudu na rotor například pomocí rotačního transformátoru, což však dále komplikuje konstrukci stroje. Další nevýhodou elektricky buzených synchronních strojů jsou ztráty vznikající v rotoru stroje. Tyto ztráty vytváří teplo, které je však obtížné odvést pryč ze stroje vzhledem k pozici budícího vinutí uprostřed stroje, a teploty ve stroji tak dosahují vyšších hodnot než v případě synchronních motorů s permanentními magnety. [7, 8]

Využitím elektricky buzených synchronních strojů se pak zabývala například společnost BRUSA Elektronik AG, která vyvinula motor využívající pro přenos budícího proudu na rotor rotační transformátor. Přenos rotorového proudu přes kartáče pak využívá elektricky buzený synchronní motor pohánějící Renault Zoe. [7, 8, 11]

1.3 Způsoby provedení buzení

Prvním způsobem, jak zajistit přívod budícího proudu na rotor, je jeho přivedení přes kartáče na rotující měděné kroužky na rotoru. Výhody tohoto provedení jsou, že se jedná o velice jednoduchý a zároveň účinný způsob přenosu proudu na rotor. Kartáče a kroužky jsou navíc oproti ostatním řešením poměrně levné, a to i pro vyšší hodnoty přenášených proudů. Na rotoru pak nemusí být žádná výkonová elektronika, která by svou přítomností snižovala teplotní odolnost rotoru. Nemusí zde být umístěny ani senzory teploty, neboť díky možnosti přesně měřit budící proud před vstupem do rotoru, a znalosti budícího napětí, lze určit odpor budícího vinutí, z jehož hodnoty je možné určit i teplotu. [7]

Použití kartáčů však může způsobit problémy kvůli usazování prachu z kartáčů uvnitř stroje. Nevýhodou tohoto řešení je také možné opotřebení kartáčů, které je však možné snížit volbou vhodného materiálu kartáčů. Mezi nevýhody patří také nutnost použití kartáčů ze speciálních materiálů v případě velkého proudového zatížení kartáčů, či potřeba dostatečného chlazení kartáčů. [7]

Dalším způsobem zajištění přenosu budícího proudu na rotor je využití rotačního transformátoru. V rotačním transformátoru nedochází ke kontaktu mezi statorem a rotorem a toto řešení odstraňuje nevýhody, které přináší buzení pomocí kartáčů. Toto řešení však vytváří jiné nevýhody. Nevýhodou je například skutečnost, že se jedná o mnohem komplikovanější řešení než v případě použití kartáčů, což samozřejmě navýší i cenu celého stroje. Složitější je zde například přesné měření rotorového proudu. Oproti použití kartáčů zde tak nejde využít přesného měření proudu před vstupem do rotoru k určení přesné hodnoty odporu rotorového vinutí a následnému určení jeho teploty. Informaci o budícím

proudu či teplotě rotoru lze ze senzorů umístěných na rotoru přenést na stranu statoru bezdrátově, což je však samozřejmě komplikovanější. Nevýhodou použití rotačního transformátoru je také nutnost umístění usměrňovače na rotor, čímž se sníží teplotní odolnost rotoru. Při použití polovodičových součástek s dostatečnou teplotní odolností, které by nesnižovaly teplotní odolnost rotoru však roste i cena usměrňovače. Ztráty v rotačním transformátoru navíc bývají obvykle vyšší než ztráty způsobené použitím kartáčů, což snižuje účinnost budícího systému stroje. [7]

Jedním ze způsobů přenosu budícího proudu na rotor je také využití rotačních kondenzátorů. Stejně jako u rotačního transformátoru je i zde potřeba umístit na rotor usměrňovač. U těchto kondenzátorů je však požadována velká plocha elektrod a zároveň jejich malá vzdálenost. Právě malá vzdálenost elektrod vyžaduje poměrně velkou přesnost při výrobě rotačních kondenzátorů. Důležitým parametrem je zde také elektrická pevnost vzduchu, při jejímž překročení by mezi elektrodami kondenzátoru docházelo k přeskokům. Tento systém je nutné provozovat při vysokých frekvencích až v řádech MHz, což v porovnání s rotačním transformátorem klade odlišné nároky na použitou výkonovou elektroniku. [7, 11]



Obr. 1.2: Řez modelem rotačního kondenzátoru [11]

Na (Obr. 1.2) je patrný řez rotačními kondenzátory, které jsou vytvořeny axiálně naskládanými hliníkovými plechy, které mají na svém povrchu vrstvu dielektrika. V axiálním směru se tak střídají statorové a rotorové elektrody kondenzátoru. [11]

2 Elektromagnetický návrh stroje

Je zadán návrh elektricky buzeného synchronního stroje s následujícími parametry:
jmenovitý výkon:

$$P_n = 35 \text{ kW}, \quad (2.1)$$

maximální výkon:

$$P_{max} = 100 \text{ kW}, \quad (2.2)$$

stejnoseměrné napětí:

$$U_{DC} = 360 \text{ V}, \quad (2.3)$$

jmenovité otáčky:

$$n_n = 3500 \text{ ot/min}, \quad (2.4)$$

vnější průměr statoru:

$$D_e = 0,250 \text{ m}, \quad (2.5)$$

počet fází:

$$m = 3, \quad (2.6)$$

a maximální teplota vinutí:

$$\vartheta_{Cu} = 155 \text{ }^\circ\text{C}. \quad (2.7)$$

Pro návrh stroje jsou zvoleny elektrotechnické plechy M350-50A. Hodnoty potřebné k sestavení jejich magnetizační charakteristiky jsou spolu s jejich ztrátovými čísly uvedeny v (Příloha 1).

2.1 Výkonová rovnice a návrh vinutí

2.1.1 Základní parametry

Je zvolena vzduchová mezera:

$$\delta = 1,5 \text{ mm}. \quad (2.8)$$

Pro respektování způsobu řízení a mrtvých časů je zvolen koeficient bezpečnosti:

$$\xi = 0,9. \quad (2.9)$$

Následně je možné určit amplitudu sdruženého napětí:

$$U_m = \xi \cdot U_{DC} = 0,9 \cdot 360 = 324 \text{ V}, \quad (2.10)$$

efektivní hodnotu sdruženého napětí:

$$U_n = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = \frac{324}{\sqrt{2}} = 229,10 \text{ V}, \quad (2.11)$$

a efektivní hodnotu fázového napětí:

$$U_{fn} = \frac{U_n}{\sqrt{3}} = \frac{229,10}{\sqrt{3}} = 132,27 \text{ V.} \quad (2.12)$$

Dále je zvolena účinnost:

$$\eta = 0,93, \quad (2.13)$$

účinník:

$$\cos \varphi = 0,9, \quad (2.14)$$

a činitel elektromotorické síly:

$$k_E' = 1,01. \quad (2.15)$$

Ze znalosti činného výkonu, účinnosti a účinníku je možné určit zdánlivý výkon:

$$S = \frac{P_n}{\eta \cdot \cos \varphi'} = \frac{35 \cdot 10^3}{0,93 \cdot 0,9} = 41816 \text{ VA,} \quad (2.16)$$

a vnitřní výkon:

$$S_i = k_E \cdot S = 1,01 \cdot 41816 = 42234 \text{ VA.} \quad (2.17)$$

Díky znalosti zdánlivého výkonu je možné určit jmenovitý proud:

$$I_n = \frac{S}{m \cdot U_{fn}} = \frac{41816}{3 \cdot 132,27} = 105,38 \text{ A.} \quad (2.18)$$

Následně je zvolen mechanický činitel pólového krytí:

$$\alpha_m = 0,75, \quad (2.19)$$

elektromagnetický činitel pólového krytí:

$$\alpha_\delta = 0,68, \quad (2.20)$$

činitel tvaru magnetického pole:

$$k_B = 1,09, \quad (2.21)$$

indukce ve vzduchové mezeře naprázdno:

$$B_{\delta 0} = 0,8 \text{ T,} \quad (2.22)$$

lineární proudová hustota:

$$A = 30400 \text{ A/m,} \quad (2.23)$$

počet pólů:

$$2p = 4, \quad (2.24)$$

a podle (Tab. 2.1) poměr D_1/D_e :

$$k_D = 0,64. \quad (2.25)$$

Tab. 2.1: Závislost poměru k_D na počtu pólů [2]

$2p$ (-)	k_D (-)
2	0,52÷0,57
4	0,62÷0,68
6	0,70÷0,72
8	0,74÷0,77
≥ 10	0,75÷0,78

Činitel k_D je využit k výpočtu průměru kotvy:

$$D_1 = k_D \cdot D_e = 0,64 \cdot 0,250 = 0,160 \text{ m.} \quad (2.26)$$

2.1.2 Činitel vinutí

Pro stroj je nutné také navrhnout vinutí. V tomto případě je uvažováno smyčkové nekřížené vinutí, u kterého je dále zvolen počet paralelních větví stejnosměrného vinutí:

$$2a_{\sim} = 4, \quad (2.27)$$

počet paralelních větví:

$$a_{\sim} = 2, \quad (2.28)$$

počet vrstev vinutí:

$$2u = 2, \quad (2.29)$$

a počet drážek:

$$Q = 48. \quad (2.30)$$

Následně je určen počet drážek na pól a fázi:

$$q = \frac{n}{c} = \frac{Q}{2p \cdot m} = \frac{48}{4 \cdot 3} = 4, \quad (2.31)$$

pólová rozteč:

$$t_{p1d} = \frac{Q}{2p} = \frac{48}{4} = 12 \text{ drážek,} \quad (2.32)$$

a při zvoleném činiteli zkrácení kroku:

$$\beta = \frac{5}{6}, \quad (2.33)$$

je krok vinutí:

$$y_{1d} = t_{p1d} \cdot \beta = 12 \cdot \frac{5}{6} = 10 \text{ drážek,} \quad (2.34)$$

kterému odpovídá krok vinutí v počtu cívkových stran:

$$y_1 = 2u \cdot y_{1d} + 1 = 2 \cdot 10 + 1 = 21 \text{ cívkových stran.} \quad (2.35)$$

Je také vypočten krok na komutátoru:

$$y_K = \frac{a_{\equiv}}{p} = \frac{2}{2} = 1 \text{ lamela,} \quad (2.36)$$

vzdálenost předních cívkových stran:

$$y = 2 \cdot y_K = 2 \cdot 1 = 2 \text{ cívkové strany,} \quad (2.37)$$

spojkový krok:

$$y_2 = y - y_1 = 2 - 21 = -19 \text{ cívkových stran,} \quad (2.38)$$

činitel kroku:

$$k_{y1} = \sin\left(\beta \cdot \frac{\pi}{2}\right) = \sin\left(\frac{5}{6} \cdot \frac{\pi}{2}\right) = 0,9659, \quad (2.39)$$

činitel rozlohy:

$$k_{r1} = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2 \cdot m}\right)}{q \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2 \cdot m \cdot q}\right)} = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2 \cdot 3}\right)}{4 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2 \cdot 3 \cdot 4}\right)} = 0,9577, \quad (2.40)$$

a činitel vinutí:

$$k_{v1} = k_{y1} \cdot k_{r1} = 0,9659 \cdot 0,9577 = 0,9250. \quad (2.41)$$

2.1.3 Výkonová rovnice a počet závitů v sérii

V této části návrhu již může být určen Essonův činitel:

$$\begin{aligned} C &= \frac{\pi^2}{60} \cdot \alpha_{\delta} \cdot B_{\delta 0} \cdot A \cdot k_{v1} \cdot k_B = \\ &= \frac{\pi^2}{60} \cdot 0,68 \cdot 0,8 \cdot 30400 \cdot 0,9250 \cdot 1,09 = 2742,9 \frac{\text{VA} \cdot \text{min}}{\text{m}^3}, \end{aligned} \quad (2.42)$$

a z výkonové rovnice vyjádřena délka stroje:

$$l_i = \frac{S_i}{C \cdot D_1^2 \cdot n} = \frac{42234}{2742,9 \cdot 0,160^2 \cdot 3500} = 0,1719 \text{ m.} \quad (2.43)$$

Celkový proud strojem je určen jako:

$$I_C = \pi \cdot D_1 \cdot A = \pi \cdot 0,160 \cdot 30400 = 15281 \text{ A,} \quad (2.44)$$

proud jednou drážkou jako:

$$I_d = \frac{I_C}{Q} = \frac{15281}{48} = 318,35 \text{ A,} \quad (2.45)$$

a proud paralelní větve jako:

$$I_a = \frac{I_n}{a_{\sim}} = \frac{105,38}{2} = 52,69 \text{ A.} \quad (2.46)$$

Díky tomu může být určen počet vodičů v drážce:

$$V_d = \frac{I_d}{I_a} = \frac{318,35}{52,69} = 6. \quad (2.47)$$

Následně je možné pokračovat ve výpočtu dalších parametrů vinutí. Je určen počet závitů cívky:

$$N_c = \frac{V_d}{2u} = \frac{6}{2} = 3, \quad (2.48)$$

celkový počet cívek:

$$K = Q \cdot u = 48 \cdot 1 = 48, \quad (2.49)$$

počet svazků cívek:

$$S_c = m' \cdot a_{=} = 2 \cdot m \cdot a_{=} = 2 \cdot 3 \cdot 2 = 12, \quad (2.50)$$

počet svazků cívek na fázi:

$$S_f = \frac{S_c}{m} = \frac{12}{3} = 4, \quad (2.51)$$

počet cívek v jednom svazku:

$$K_1 = \frac{K}{S_c} = \frac{48}{12} = 4, \quad (2.52)$$

a počet závitů v sérii:

$$N_s = \frac{K_1 \cdot S_f \cdot N_c}{a_{\sim}} = \frac{4 \cdot 4 \cdot 3}{2} = 24. \quad (2.53)$$

Pro kontrolu počtu závitů v sérii pomocí indukovaného napětí je nutné určit indukované napětí:

$$U_{ib} = k_E' \cdot U_{fn} = 1,01 \cdot 132,27 = 133,59 \text{ V}, \quad (2.54)$$

pólovou rozteč:

$$t_{p1} = \frac{\pi \cdot D_1}{2p} = \frac{\pi \cdot 0,160 \cdot 10^3}{4} = 125,66 \text{ mm}, \quad (2.55)$$

frekvenci:

$$f = \frac{p \cdot n}{60} = \frac{2 \cdot 3500}{60} = 116,67 \text{ Hz}, \quad (2.56)$$

a magnetický tok naprázdno:

$$\begin{aligned} \Phi_0 &= \alpha_{\delta} \cdot B_{\delta 0} \cdot t_{p1} \cdot l_i = \\ &= 0,68 \cdot 0,8 \cdot 125,66 \cdot 10^{-3} \cdot 0,1719 = 0,01175 \text{ Wb}. \end{aligned} \quad (2.57)$$

Následně lze určit ověřený počet závitů v sérii:

$$N_{SO} = \frac{U_{ib}}{4 \cdot k_B \cdot k_{v1} \cdot \Phi_0 \cdot f} = \frac{133,59}{4 \cdot 1,09 \cdot 0,9250 \cdot 0,01175 \cdot 116,67} = 24,17. \quad (2.58)$$

Takto určený počet závitů v sérii je možné porovnat s původní hodnotou N_S , získanou ve vztahu (2.53), určením chyby:

$$\Delta N_S = \frac{N_S - N_{SO}}{N_S} \cdot 100 = \frac{24 - 24,17}{24} \cdot 100 = -0,698 \%, \quad (2.59)$$

2.1.4 Görgešův obrazec

Dalším krokem v návrhu vinutí je vytvoření Tingleyho schématu. Pro jeho sestavení je potřeba určit počet jeho sloupců:

$$T_s = m \cdot n = m \cdot q = 3 \cdot 4 = 12, \quad (2.60)$$

a počet jeho řádků

$$T_r = 2p = 4. \quad (2.61)$$

Tab. 2.2: Tingleyho schéma

	A				C'				B			
	A'				C				B'			
1. pól	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23
	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24
2. pól	25	27	29	31	33	35	37	39	41	43	45	47
	26	28	30	32	34	36	38	40	42	44	46	48
3. pól	49	51	53	55	57	59	61	63	65	67	69	71
	50	52	54	56	58	60	62	64	66	68	70	72
4. pól	73	75	77	79	81	83	85	87	89	91	93	95
	74	76	78	80	82	84	86	88	90	92	94	96

Pilové schéma a schéma zapojení cívek vinutí je uvedeno v (Příloha 2).

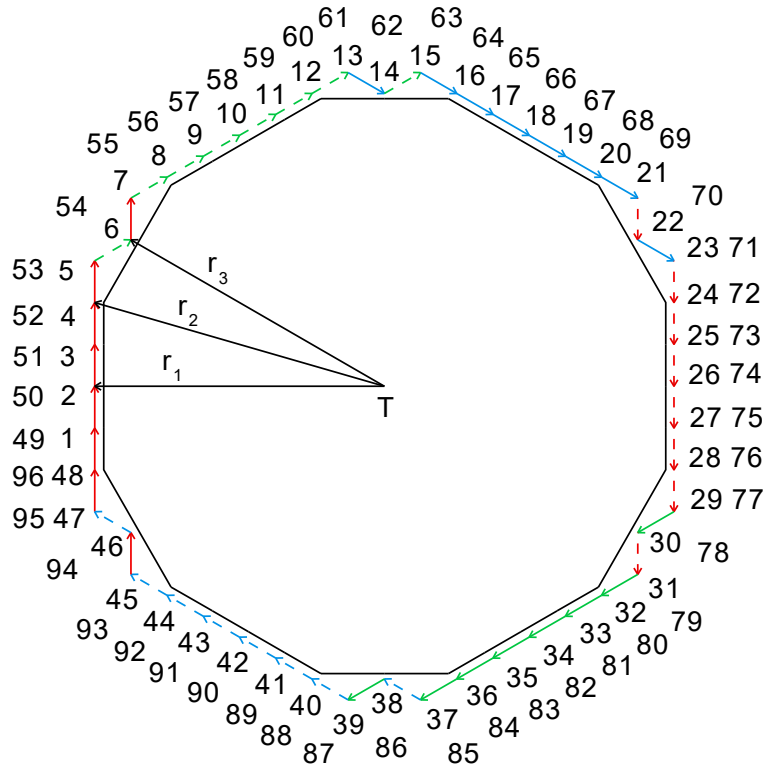
Díky znalosti Tingleyho schématu lze sestavit Görgešův obrazec, ve kterém je délka jednoho fázoru:

$$l_f = \frac{1}{2u} = \frac{1}{2} = 0,5 \text{ p. j.}, \quad (2.62)$$

a délka průvodiče z těžiště ke konci fázoru 2:

$$r_1 = 8 \cdot l_f \cdot \cos(30^\circ) = 8 \cdot 0,5 \cdot \cos(30^\circ) = 3,4614 \text{ p. j.}, \quad (2.63)$$

přičemž číslo 8 zde odpovídá počtu fázorů, které jsou k výpočtu použity.



Obr. 2.1: Görgesův obrazec

U průvodičů v Görgesově obrazci je, vzhledem k dalším výpočtům, výhodnější určit rovnou jejich druhou mocninu. Druhá mocnina délky průvodiče z těžiště ke konci fáze 4:

$$r_2^2 = r_1^2 + (2 \cdot l_f)^2 = 3,4641^2 + (2 \cdot 0,5)^2 = 13,0000 \text{ p.j.}^2, \quad (2.64)$$

a druhá mocnina délky průvodiče z těžiště ke konci fáze 6:

$$\begin{aligned} r_3^2 &= r_2^2 - (2 \cdot l_f \cdot \cos(30^\circ))^2 = \\ &= 13,0000 - (2 \cdot 0,5 \cdot \cos(30^\circ))^2 = 12,2500 \text{ p.j.}^2. \end{aligned} \quad (2.65)$$

Je také nutné určit počet průvodičů z těžiště ke konci fáze 2:

$$n_1 = 6, \quad (2.66)$$

počet průvodičů z těžiště ke konci fáze 4:

$$n_2 = 12, \quad (2.67)$$

počet průvodičů z těžiště ke konci fáze 6:

$$n_3 = 6, \quad (2.68)$$

a celkový počet průvodičů v Görgesově obrazci:

$$n_c = n_1 + n_2 + n_3 = 6 + 12 + 6 = 24. \quad (2.69)$$

Následně je určena druhá mocnina Görgesova poloměru:

$$r_g^2 = \frac{1}{n_c} \cdot (n_1 \cdot r_1^2 + n_2 \cdot r_2^2 + n_3 \cdot r_3^2) = \quad (2.70)$$

$$= \frac{1}{24} \cdot (6 \cdot 3,4641^2 + 12 \cdot 13,0000 + 6 \cdot 12,2500) = 12,5625 \text{ p.j.}^2,$$

referenční poloměr odpovídající základní harmonické:

$$r_{1g} = \frac{m}{\pi} \cdot q \cdot k_{v1} = \frac{3}{\pi} \cdot 4 \cdot 0,9250 = 3,5334 \text{ p.j.}, \quad (2.71)$$

a činitel diferenčního rozptylu

$$\tau_{dif} = \frac{r_g^2 - r_{1g}^2}{r_{1g}^2} = \frac{12,5625 - 3,5334^2}{3,5334^2} = 0,0062, \quad (2.72)$$

který, v poměrných číslech, odpovídá obsahu vyšších harmonických, které jsou vinutím vytvářeny. Z Görgesova obrazce je možné také vytvořit křivku magnetických napětí, která je uvedena v (Příloha 2).

2.2 Magnetický obvod – jmenovité zatížení

2.2.1 Rozměry drážky

Při tloušťce plechu:

$$t_{pl} = 0,5 \text{ mm}, \quad (2.73)$$

a činiteli plnění železa:

$$k_{Fe} = 0,97, \quad (2.74)$$

je vypočtena délka železa:

$$l_{Fe}' = l_i - \delta = 0,1719 - 1,5 \cdot 10^{-3} = 0,1704 \text{ m}, \quad (2.75)$$

a počet plechů jako:

$$n_{pl} = \frac{l_{Fe}'}{t_{pl}} = \frac{0,1704}{0,5 \cdot 10^{-3}} = 340,8 \doteq 341. \quad (2.76)$$

Z této zaokrouhlené hodnoty počtu plechů je získána přepočtená délka železa:

$$l_{Fe} = n_{pl} \cdot t_{pl} = 341 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3} = 0,1705 \text{ m}. \quad (2.77)$$

Je také určena drážková rozteč:

$$t_{d1} = \frac{\pi \cdot D_1}{Q} = \frac{\pi \cdot 0,160 \cdot 10^3}{48} = 10,47 \text{ mm}. \quad (2.78)$$

Pro další výpočty je uvažována maximální hodnota indukce v zubu:

$$B_{zmax} = 1,8 \text{ T}, \quad (2.79)$$

a maximální hodnota indukce ve jhu statoru:

$$B_{j1max} = 1,4 \text{ T.} \quad (2.80)$$

Je také potřeba určit jmenovitý magnetický tok:

$$\begin{aligned} \phi_n &= \frac{U_{fn}}{4 \cdot k_B \cdot N_S \cdot k_{v1} \cdot f} = \\ &= \frac{132,27}{4 \cdot 1,09 \cdot 24 \cdot 0,9250 \cdot 116,67} = 0,01171 \text{ Wb,} \end{aligned} \quad (2.81)$$

jmenovitou indukci:

$$B_{\delta n} = \frac{\phi_n}{\alpha_\delta \cdot t_{p1} \cdot l_i} = \frac{0,01171}{0,68 \cdot 125,66 \cdot 10^{-3} \cdot 0,1719} = 0,798 \text{ T,} \quad (2.82)$$

magnetický tok zubem:

$$\phi_{zn} = B_{\delta n} \cdot t_{d1} \cdot l_i = 0,798 \cdot 10,47 \cdot 10^{-3} \cdot 0,1719 = 0,00144 \text{ Wb,} \quad (2.83)$$

šířku zubu v jeho vrcholu:

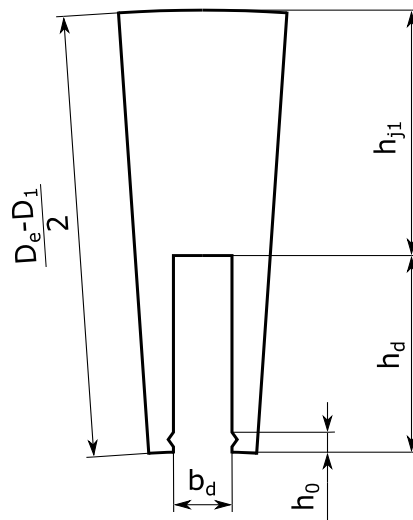
$$b_{z1}' = \frac{\phi_{zn}}{k_{Fe} \cdot l_{Fe} \cdot B_{zmax}} = \frac{0,00144}{0,97 \cdot 0,1705 \cdot 1,8} = 4,82 \text{ mm,} \quad (2.84)$$

a šířku drážky:

$$b_{d1} = t_{d1} - b_{z1}' = 10,47 - 4,82 = 5,65 \doteq 5,70 \text{ mm.} \quad (2.85)$$

Šířku drážky je potřeba zaokrouhlit, takže je následně nutné přepočítat šířku zubu v jeho vrcholu:

$$b_{z1} = t_{d1} - b_{d1} = 10,47 - 5,70 = 4,77 \text{ mm.} \quad (2.86)$$



Obr. 2.2: Rozměry drážky

Nyní je možné přejít k určení zdánlivé indukce ve vrcholu zubu:

$$B_{zn1}' = \frac{\phi_{zn}}{b_{z1} \cdot k_{Fe} \cdot l_{Fe}} = \frac{0,00144}{4,77 \cdot 10^{-3} \cdot 0,97 \cdot 0,1705} = 1,82 \text{ T}, \quad (2.87)$$

magnetického toku jhem statoru:

$$\phi_{jn1} = \frac{\phi_n}{2} = \frac{0,01171}{2} = 0,00586 \text{ Wb}, \quad (2.88)$$

výšky jha:

$$h_{j1}' = \frac{\phi_{j1}}{k_{Fe} \cdot l_{Fe} \cdot B_{j1max}} = \frac{0,00586}{0,97 \cdot 0,1705 \cdot 1,4} = 25,29 \text{ mm}, \quad (2.89)$$

a hloubky drážky:

$$\begin{aligned} h_d &= \frac{D_e - D_1 - 2 \cdot h_{j1}'}{2} = \\ &= \frac{0,250 \cdot 10^3 - 0,160 \cdot 10^3 - 2 \cdot 25,29}{2} = 19,71 \doteq 20,00 \text{ mm}. \end{aligned} \quad (2.90)$$

Hloubku drážky je potřeba zaokrouhlit, takže následně je nutné přepočítat výšku jha statoru:

$$\begin{aligned} h_{j1} &= \frac{D_e - D_1 - 2 \cdot h_d}{2} = \\ &= \frac{0,250 \cdot 10^3 - 0,160 \cdot 10^3 - 2 \cdot 20,00}{2} = 25,00 \text{ mm}. \end{aligned} \quad (2.91)$$

Díky tomu je možné určit indukci jha statoru:

$$B_{jn1} = \frac{\phi_{jn1}}{h_{j1} \cdot k_{Fe} \cdot l_{Fe}} = \frac{0,00586}{25,00 \cdot 10^{-3} \cdot 0,97 \cdot 0,1705} = 1,42 \text{ T}. \quad (2.92)$$

2.2.2 Výběr vodiče

V této fázi návrhu je nutné vybrat vodič. Uvažují se následující parametry: maximální hodnota proudové hustoty:

$$J_{max} = 12 \text{ A/mm}^2. \quad (2.93)$$

výška prostoru pro klín:

$$h_0 = 2,0 \text{ mm}, \quad (2.94)$$

výška samotného klínu:

$$h_k = 1,5 \text{ mm}, \quad (2.95)$$

vyložení drážky:

$$t_v = 0,2 \text{ mm}, \quad (2.96)$$

cívková izolace:

$$t_c = 2 \cdot 0,15 = 0,3 \text{ mm}, \quad (2.97)$$

izolační přírůstek:

$$p_i = 0,23 \text{ mm}, \quad (2.98)$$

a mezivrstva:

$$t_m = 0,3 \text{ mm}. \quad (2.99)$$

Při znalosti těchto parametrů je možné určit přibližnou šířku vodiče:

$$\begin{aligned} b_v' &= b_{d1} - 2 \cdot (t_v + t_c) - p_i = \\ &= 5,70 - 2 \cdot (0,2 + 0,3) - 0,23 = 4,47 \text{ mm}, \end{aligned} \quad (2.100)$$

přibližnou výšku vodiče:

$$\begin{aligned} h_v' &= \frac{h_d - h_0 - 3 \cdot t_v - t_m - 2u \cdot (2 \cdot t_c + N_c \cdot p_i)}{V_d} = \\ &= \frac{20,00 - 2,0 - 3 \cdot 0,2 - 0,3 - 2 \cdot (2 \cdot 0,3 + 3 \cdot 0,23)}{6} = 2,42 \text{ mm}, \end{aligned} \quad (2.101)$$

přibližnou plochu vodiče:

$$S_v' = h_v' \cdot b_v' = 2,42 \cdot 4,47 = 10,817 \text{ mm}^2, \quad (2.102)$$

a přibližnou proudovou hustotu ve vodiči:

$$J' = \frac{I_a}{S_v'} = \frac{52,69}{10,817} = 4,87 \text{ A/mm}^2. \quad (2.103)$$

Pokud hodnota přibližné proudové hustoty nepřesahuje J_{max} , je možné vybrat podle přibližných rozměrů skutečný vodič dle normy [6]. Zvolená šířka vodiče dle normy:

$$b_v = 4,00 \text{ mm}, \quad (2.104)$$

zvolená výška vodiče dle normy:

$$h_v = 2,00 \text{ mm}, \quad (2.105)$$

skutečná plocha vodiče dle normy:

$$S_v = 7,637 \text{ mm}^2, \quad (2.106)$$

při jejíž znalosti je možné určit skutečnou proudovou hustotu ve vodiči:

$$J = \frac{I_a}{S_v} = \frac{52,69}{7,637} = 6,90 \text{ A/mm}^2. \quad (2.107)$$

Při počtu paralelních vodičů:

$$n_p = 1, \quad (2.108)$$

ploše všech vodičů v drážce:

$$S_{Cu} = n_p \cdot S_v \cdot V_d = 1 \cdot 7,637 \cdot 6 = 45,822 \text{ mm}^2, \quad (2.109)$$

a ploše drážky:

$$S_d = h_d \cdot b_{d1} = 20,00 \cdot 5,70 = 114,000 \text{ mm}^2, \quad (2.110)$$

je možné určit činitel plnění drážky:

$$k_{Cu} = \frac{S_{Cu}}{S_d} = \frac{45,822}{114,000} = 0,40. \quad (2.111)$$

2.2.3 Úbytky magnetických napětí na statoru

Je určena drážková rozteč uprostřed drážky:

$$t_{d2} = \frac{\pi \cdot (D_1 + h_d)}{Q} = \frac{\pi \cdot (0,160 \cdot 10^3 + 20,00)}{48} = 11,78 \text{ mm}, \quad (2.112)$$

šířka zubu v jeho středu:

$$b_{z2} = t_{d2} - b_{d1} = 11,78 - 5,70 = 6,08 \text{ mm}, \quad (2.113)$$

drážková rozteč u dna drážky:

$$\begin{aligned} t_{d3} &= \frac{\pi \cdot (D_1 + 2 \cdot h_d)}{Q} = \\ &= \frac{\pi \cdot (0,160 \cdot 10^3 + 2 \cdot 20,00)}{48} = 13,09 \text{ mm}, \end{aligned} \quad (2.114)$$

a šířka zubu v jeho patě:

$$b_{z3} = t_{d3} - b_{d1} = 13,09 - 5,70 = 7,39 \text{ mm}. \quad (2.115)$$

Nyní je potřeba určit koeficient odlehčení zubu ve vrcholu zubu:

$$k_{z1} = \frac{t_{d1}}{k_{Fe} \cdot b_{z1}} - 1 = \frac{10,47}{0,97 \cdot 4,77} - 1 = 1,26, \quad (2.116)$$

koeficient odlehčení zubu ve středu zubu:

$$k_{z2} = \frac{t_{d2}}{k_{Fe} \cdot b_{z2}} - 1 = \frac{11,78}{0,97 \cdot 6,08} - 1 = 1,00, \quad (2.117)$$

a koeficient odlehčení zubu v patě zubu:

$$k_{z3} = \frac{t_{d3}}{k_{Fe} \cdot b_{z3}} - 1 = \frac{13,09}{0,97 \cdot 7,39} - 1 = 0,83. \quad (2.118)$$

Jelikož zdánlivá indukce ve vrcholu zubu B_{zn1}' byla určena již ve vztahu (2.87), zbývá nyní určit zdánlivou indukci ve středu zubu:

$$B_{zn2}' = \frac{\phi_{zn}}{b_{z2} \cdot k_{Fe} \cdot l_{Fe}} = \frac{0,00144}{6,08 \cdot 10^{-3} \cdot 0,97 \cdot 0,1705} = 1,43 \text{ T}, \quad (2.119)$$

a v patě zubu:

$$B_{zn3}' = \frac{\phi_{zn}}{b_{z3} \cdot k_{Fe} \cdot l_{Fe}} = \frac{0,00144}{7,39 \cdot 10^{-3} \cdot 0,97 \cdot 0,1705} = 1,17 \text{ T}. \quad (2.120)$$

Dále jsou použity vztahy pro charakteristiku sycení zubu v jeho vrcholu:

$$B_{z1} = B_{zn1}' - \mu_0 \cdot k_{z1} \cdot H = 1,82 - 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 1,26 \cdot H, \quad (2.121)$$

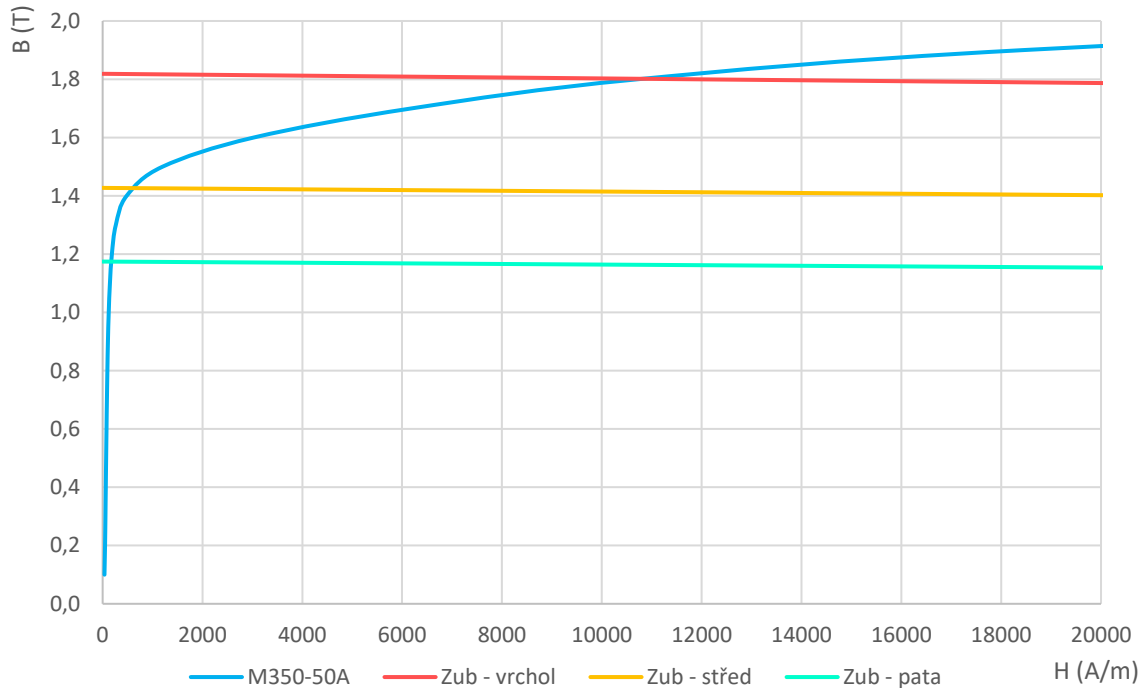
pro charakteristiku sycení zubu v jeho středu:

$$B_{z2} = B_{zn2}' - \mu_0 \cdot k_{z2} \cdot H = 1,43 - 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 1,00 \cdot H, \quad (2.122)$$

a pro charakteristiku sycení zubu v jeho patě:

$$B_{z3} = B_{zn3}' - \mu_0 \cdot k_{z3} \cdot H = 1,17 - 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,83 \cdot H. \quad (2.123)$$

Tyto charakteristiky jsou zobrazeny na (Obr. 2.3).



Obr. 2.3: Magnetizační charakteristika elektrotechnických plechů M350-50A a charakteristiky sycení jednotlivých částí zubu při jmenovitém zatížení

Z průřezů magnetizační charakteristiky plechů a charakteristik sycení zubu je určena indukce ve vrcholu zubu:

$$B_{zn1} = 1,80 \text{ T}, \quad (2.124)$$

indukce ve středu zubu:

$$B_{zn2} = 1,43 \text{ T}, \quad (2.125)$$

indukce v patě zubu:

$$B_{zn3} = 1,17 \text{ T}, \quad (2.126)$$

intenzita magnetického pole ve vrcholu zubu:

$$H_{zn1} = 10800 \text{ A/m}, \quad (2.127)$$

intenzita magnetického pole ve středu zubu:

$$H_{zn2} = 600 \text{ A/m}, \quad (2.128)$$

a intenzita magnetického pole v patě zubu:

$$H_{zn3} = 180 \text{ A/m}. \quad (2.129)$$

Následně je určen geometrický průměr intenzit magnetického pole v zubu:

$$\begin{aligned} H_{zn} &= \frac{(H_{zn1} + 4 \cdot H_{zn2} + H_{zn3})}{6} = \\ &= \frac{(10800 + 4 \cdot 600 + 180)}{6} = 2230,00 \text{ A/m}, \end{aligned} \quad (2.130)$$

a úbytek magnetického napětí na zubu:

$$\theta_{zn} = H_{zn} \cdot h_d = 2230,00 \cdot 20,00 \cdot 10^{-3} = 44,60 \text{ A}. \quad (2.131)$$

Díky znalosti zdánlivé indukce jha statoru B_{j1n} , určené ve vztahu (2.92), je nyní také možné určit odečtem z magnetizační charakteristiky použitých plechů (Příloha 1) intenzitu magnetického pole ve jhu statoru:

$$H_{j1n} = 560 \text{ A/m}. \quad (2.132)$$

Jelikož však tato intenzita magnetického pole ve jhu statoru nemá ve všech částech jha stejnou hodnotu, je před určením úbytku magnetického napětí na jhu statoru, potřeba určit redukovanou délku jha. Nejprve je nutné určit pólovou rozteč jha statoru:

$$\begin{aligned} t_{j1} &= \frac{\pi \cdot (D_1 + 2 \cdot h_d)}{2p} = \\ &= \frac{\pi \cdot (0,160 \cdot 10^3 + 2 \cdot 20,00)}{4} = 157,08 \text{ mm}, \end{aligned} \quad (2.133)$$

poměr výšky a pólové rozteče jha statoru:

$$\frac{h_{j1}}{t_{j1}} = \frac{25,00}{157,08} = 0,159, \quad (2.134)$$

a z (Obr. 2.4) je pak určen činitel korekce magnetického napětí jha statoru:

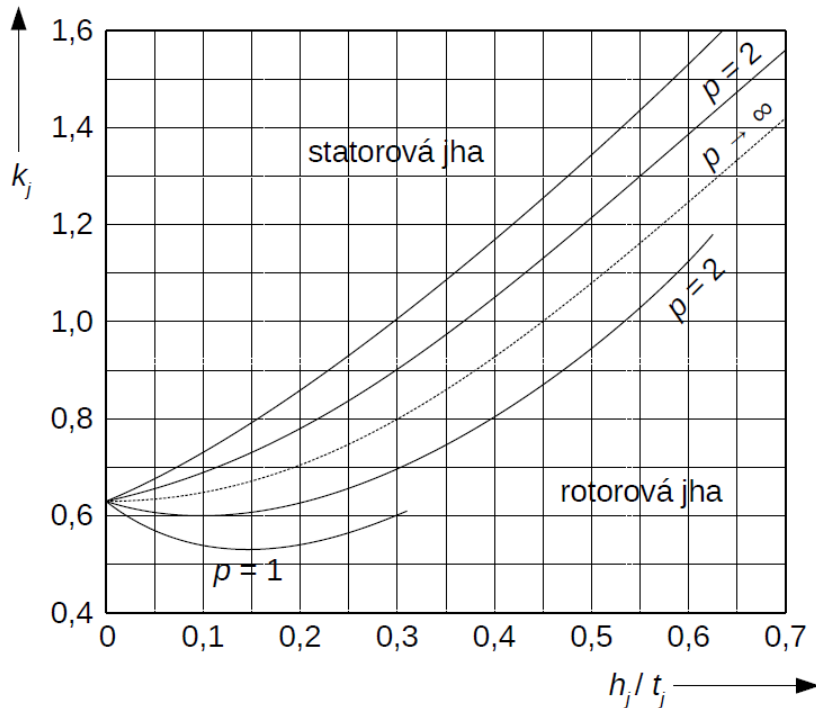
$$k_{j1} = 0,74. \quad (2.135)$$

Z těchto veličin je možné určit redukovanou délku jha statoru:

$$l_{j1red} = k_{j1} \cdot \frac{t_{j1}}{2} = 0,74 \cdot \frac{157,08}{2} = 58,12 \text{ mm}, \quad (2.136)$$

a úbytek magnetického napětí na jhu statoru:

$$\theta_{j1n} = H_{j1n} \cdot l_{j1red} = 560 \cdot 58,12 \cdot 10^{-3} = 32,55 \text{ A}. \quad (2.137)$$



Obr. 2.4: Nomogram pro určení činitele korekce magnetického napětí jha (převzato a přeloženo z [3])

2.2.4 Rozměry pólu

V této fázi návrhu začíná návrh rotoru. Je vypočten vnější průměr rotoru:

$$D_2 = D_1 - 2 \cdot \delta = 0,160 - 2 \cdot 1,5 \cdot 10^{-3} = 0,157 \text{ m}, \quad (2.138)$$

pólová rozteč rotoru:

$$t_{p2} = \frac{\pi \cdot D_2}{2p} = \frac{\pi \cdot 0,157 \cdot 10^3}{4} = 123,31 \text{ mm}, \quad (2.139)$$

šířka pólového nástavce (oblouk):

$$b_{pn} = \alpha_m \cdot t_{p2} = 0,75 \cdot 123,31 = 92,5 \text{ mm} \quad (2.140)$$

a šířka pólového nástavce (tětiva):

$$\begin{aligned} b_{pn}' &= D_2 \cdot \sqrt{\frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot b_{pn}}{D_2}\right)} = \\ &= 0,157 \cdot \sqrt{\frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot 92,5 \cdot 10^{-3}}{0,157}\right)} \cdot 10^3 = 87,2 \text{ mm}. \end{aligned} \quad (2.141)$$

Výšku pólového nástavce je potřeba zvolit:

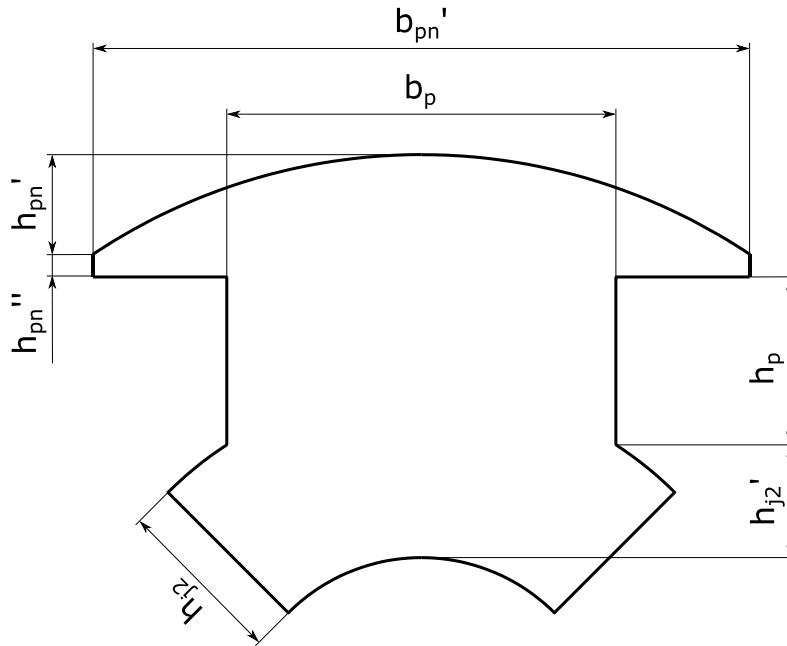
$$h_{pn} = 16,24 \text{ mm}, \quad (2.142)$$

následně lze vypočítat výšku pólového nástavce mezi jeho tětivou a vrcholem:

$$\begin{aligned} h_{pn}' &= \frac{D_2}{2} - \frac{D_2}{2} \cdot \cos\left(\frac{b_{pn}}{D_2}\right) = \\ &= \frac{0,157 \cdot 10^3}{2} - \frac{0,157 \cdot 10^3}{2} \cdot \cos\left(\frac{92,5}{0,157 \cdot 10^3}\right) = 13,24 \text{ mm}, \end{aligned} \quad (2.143)$$

a výšku pólového nástavce mezi jeho patou a tětivou jeho oblouku:

$$h_{pn}'' = h_{pn} - h_{pn}' = 16,24 - 13,24 = 3,00 \text{ mm}. \quad (2.144)$$



Obr. 2.5: Rozměry pólu

Pro další výpočty je nutné stanovit koeficient rozptylu. Jelikož však jeho přesná hodnota může být vypočtena až po dokončení návrhu magnetického obvodu, je nutné nejprve vypočítat jeho přibližnou hodnotu. Pro tento účel je zvolen koeficient činitele rozptylu:

$$k = 0,635, \quad (2.145)$$

který je v první iteraci volen podle [2], a v dalších iteracích výpočtu je upravován podle potřeby.

Následně je s jeho pomocí vypočtena podle [2] přibližná hodnota činitele rozptylu:

$$k_{\sigma}' = \frac{k \cdot 0,35 \cdot \delta}{t_{p1}^2} = \frac{0,635 \cdot 0,35 \cdot 1,5 \cdot 10^{-3}}{(125,66 \cdot 10^{-3})^2} = 0,02111, \quad (2.146)$$

díky kterému je možné vypočítat magnetický tok rotorem:

$$\phi_r = (1 + k_{\sigma}') \cdot \phi_n = (1 + 0,02111) \cdot 0,01171 = 0,01196 \text{ Wb}. \quad (2.147)$$

Délka pólu je rovna délce železa. Pro délku pólu tedy platí:

$$L_p = l_{Fe} = 0,1705 \text{ mm}, \quad (2.148)$$

příčemž je uvažováno, že pólový nástavec je stejně dlouhý jako pól.

2.2.5 Úbytky magnetických napětí na rotoru

Nyní lze určit indukci v pólovém nástavci:

$$B_{pnn} = \frac{\phi_r}{\alpha_m \cdot t_{p2} \cdot k_{Fe} \cdot L_p} = \frac{0,01196}{0,75 \cdot 123,31 \cdot 10^{-3} \cdot 0,97 \cdot 0,1705} = 0,78 \text{ T}, \quad (2.149)$$

jí odpovídající intenzitu magnetického pole v pólovém nástavci:

$$H_{pnn} = 92 \text{ A/m}, \quad (2.150)$$

a úbytek magnetického napětí na pólovém nástavci:

$$\theta_{pnn} = H_{pnn} \cdot h_{pn} = 92 \cdot 16,24 \cdot 10^{-3} = 1,49 \text{ A}. \quad (2.151)$$

Je určen koeficient výšky pólu:

$$k_p = 0,25, \quad (2.152)$$

který je v první iteraci volen podle [2], a v dalších iteracích výpočtu je upravován podle potřeby.

Pomocí něj je podle [2] vypočtena výška pólu:

$$h_p = k_p \cdot D_1 - (h_{pn} + \delta) = 0,25 \cdot 0,160 \cdot 10^3 - (16,24 + 1,5) = 22,3 \text{ mm}. \quad (2.153)$$

Při zvolené maximální indukci v pólu:

$$B_{pmax} = 1,4 \text{ T}, \quad (2.154)$$

je intenzita magnetického pole v pólu:

$$H_{pn} = 481 \text{ A/m}, \quad (2.155)$$

příčemž úbytek magnetického napětí na pólu:

$$\theta_{pn} = H_{pn} \cdot h_p = 481 \cdot 22,3 \cdot 10^{-3} = 10,73 \text{ A}, \quad (2.156)$$

a šířka pólu:

$$b_p = \frac{\phi_r}{B_{pmax} \cdot k_{Fe} \cdot L_p} = \frac{0,01196}{1,4 \cdot 0,97 \cdot 0,1705} \cdot 10^3 = 51,7 \text{ mm}. \quad (2.157)$$

Díky magnetickému toku jhem rotoru:

$$\phi_{j2n} = \frac{\phi_r}{2} = \frac{0,01196}{2} = 0,00598 \text{ Wb}, \quad (2.158)$$

a zvolené maximální indukci ve jhu rotoru:

$$B_{j2max} = 1,6 \text{ T}, \quad (2.159)$$

vychází výška jha:

$$h_{j2} = \frac{\phi_{j2n}}{B_{j2max} \cdot k_{Fe} \cdot L_p} = \frac{0,00598}{1,6 \cdot 0,97 \cdot 0,1705} \cdot 10^3 = 22,6 \text{ mm}, \quad (2.160)$$

a pólová rozteč uprostřed jha rotoru:

$$l_{j2} = \frac{\pi \cdot [D_1 - 2 \cdot (\delta + h_{pn} + h_p) - h_{j2}]}{2p} =$$

$$= \frac{\pi \cdot [0,160 \cdot 10^3 - 2 \cdot (1,5 + 16,24 + 22,3) - 22,6]}{4} = 45,02 \text{ mm}. \quad (2.161)$$

Zvolené indukci odpovídá intenzita magnetického pole ve jhu rotoru:

$$H_{j2n} = 3025 \text{ A/m}, \quad (2.162)$$

a úbytek magnetického napětí na jhu rotoru:

$$\theta_{j2n} = H_{j2n} \cdot l_{j2} = 3025 \cdot 45,02 \cdot 10^{-3} = 136,18 \text{ A}. \quad (2.163)$$

Vnitřní průměr rotoru je pak:

$$D_i = 2 \cdot \left(\sqrt{\left(\frac{D_2}{2} - h_{pn} - h_p\right)^2 + \left(\frac{b_p}{2}\right)^2} - h_{j2} \right) =$$

$$= 2 \cdot \left(\sqrt{\left(\frac{0,157 \cdot 10^3}{2} - 16,24 - 22,3\right)^2 + \left(\frac{51,7}{2}\right)^2} - 22,6 \right) \cdot$$

$$\cdot 10^{-3} = 0,050 \text{ m}. \quad (2.164)$$

Jelikož je uvažováno, že těla pólů na rotoru mají tvar obdélníku, ale přitom vystupují ze jha rotoru, které má tvar mezikruží, dochází pod pólem ke ztenčení jha. Výška jha pod středem pólu je potom:

$$h_{j2}' = \frac{D_2}{2} - h_{pn} - h_p - \frac{D_i}{2} =$$

$$= \frac{0,157 \cdot 10^3}{2} - 16,24 - 22,3 - \frac{0,050 \cdot 10^3}{2} = 14,96 \text{ mm}. \quad (2.165)$$

2.2.6 Carterův činitel a činitel nasycení

Nyní je nutné určit činitel γ který může být určen podle zjednodušeného vztahu:

$$\gamma_1 = \frac{b_{d1}}{b_{d1} + 5 \cdot \delta} = \frac{5,70}{5,70 + 5 \cdot 1,5} = 0,432, \quad (2.166)$$

nebo podle vztahu platícího i pro malé vzduchové mezery jako:

$$\begin{aligned}\gamma_2 &= \frac{2}{\pi} \cdot \left\{ \operatorname{atan} \left(\frac{b_{d1}}{2 \cdot \delta} \right) - \frac{\delta}{b_{d1}} \cdot \ln \left[1 + \left(\frac{b_{d1}}{2 \cdot \delta} \right)^2 \right] \right\} = \\ &= \frac{2}{\pi} \cdot \left\{ \operatorname{atan} \left(\frac{5,70}{2 \cdot 1,5} \right) - \frac{1,5}{5,70} \cdot \ln \left[1 + \left(\frac{5,70}{2 \cdot 1,5} \right)^2 \right] \right\} = 0,436.\end{aligned}\quad (2.167)$$

Hodnoty činitele γ jsou podobné bez ohledu na použitý způsob výpočtu, dále však bude použita jen hodnota získaná pomocí vztahu (2.167), tedy γ_2 . Následně může být určen Carterův činitel:

$$k_{C1} = \frac{t_{d1}}{t_{d1} - \gamma_2 \cdot b_{d1}} = \frac{10,47}{10,47 - 0,436 \cdot 5,70} = 1,311, \quad (2.168)$$

velikost vzduchové mezery při uvažování Carterova činitele:

$$\delta' = k_{C1} \cdot \delta = 1,311 \cdot 1,5 = 1,966 \text{ mm}, \quad (2.169)$$

a úbytek magnetického napětí na vzduchové mezeře:

$$\theta_{\delta n} = \frac{B_{\delta n}}{\mu_0} \cdot \delta' = \frac{0,798}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \cdot 1,966 \cdot 10^{-3} = 1247,92 \text{ A}. \quad (2.170)$$

Díky znalosti úbytků magnetických napětí na všech částech magnetického obvodu stroje, lze vypočítat celkový úbytek magnetických napětí:

$$\begin{aligned}\sum \theta_n &= \theta_{j1n} + \theta_{j2n} + 2 \cdot (\theta_{zn} + \theta_{\delta n} + \theta_{pnn} + \theta_{pn}) = \\ &= 32,55 + 136,18 + 2 \cdot (44,60 + 1247,92 + 1,49 + 10,73) = \\ &= 2778,21 \text{ A},\end{aligned}\quad (2.171)$$

a činitel nasycení:

$$k_{sat} = \frac{\sum \theta_n}{2 \cdot \theta_{\delta n}} = \frac{2778,21}{2 \cdot 1247,92} = 1,113, \quad (2.172)$$

díky čemuž je možné určit velikost vzduchové mezery při uvažování Carterova činitele i činitele nasycení:

$$\delta'' = k_{sat} \cdot k_{C1} \cdot \delta = 1,113 \cdot 1,311 \cdot 1,5 = 2,189 \text{ mm}. \quad (2.173)$$

2.3 Magnetický obvod – naprázdno

Magnetický tok naprázdno Φ_0 byl určen ve vztahu (2.57). Nyní je tedy potřeba určit magnetický tok naprázdno v zubu:

$$\phi_{z0} = B_{\delta 0} \cdot t_{d1} \cdot l_i = 0,8 \cdot 10,47 \cdot 10^{-3} \cdot 0,1719 = 0,00144 \text{ Wb}, \quad (2.174)$$

zdánlivou indukci naprázdno ve vrcholu zubu

$$B_{z01}' = \frac{\phi_{z0}}{b_{z1} \cdot k_{Fe} \cdot l_{Fe}} = \frac{0,00144}{4,77 \cdot 10^{-3} \cdot 0,97 \cdot 0,1705} = 1,82 \text{ T}, \quad (2.175)$$

stejným způsobem se určí také zdánlivá indukce naprázdno ve středu zubu:

$$B_{z02}' = \frac{\phi_{z0}}{b_{z2} \cdot k_{Fe} \cdot l_{Fe}} = \frac{0,00144}{6,08 \cdot 10^{-3} \cdot 0,97 \cdot 0,1705} = 1,43 \text{ T}, \quad (2.176)$$

a v patě zubu:

$$B_{z03}' = \frac{\phi_{z0}}{b_{z3} \cdot k_{Fe} \cdot l_{Fe}} = \frac{0,00144}{7,39 \cdot 10^{-3} \cdot 0,97 \cdot 0,1705} = 1,18 \text{ T}. \quad (2.177)$$

Stejně jako v případě výpočtu jmenovitého zatížení, jsou i pro zjištění skutečných hodnot magnetické indukce v jednotlivých částech zubu ve stavu naprázdno použity vztahy pro charakteristiku sycení zubu v jeho vrcholu:

$$B_{z1} = B_{z01}' - \mu_0 \cdot k_{z1} \cdot H = 1,82 - 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 1,26 \cdot H, \quad (2.178)$$

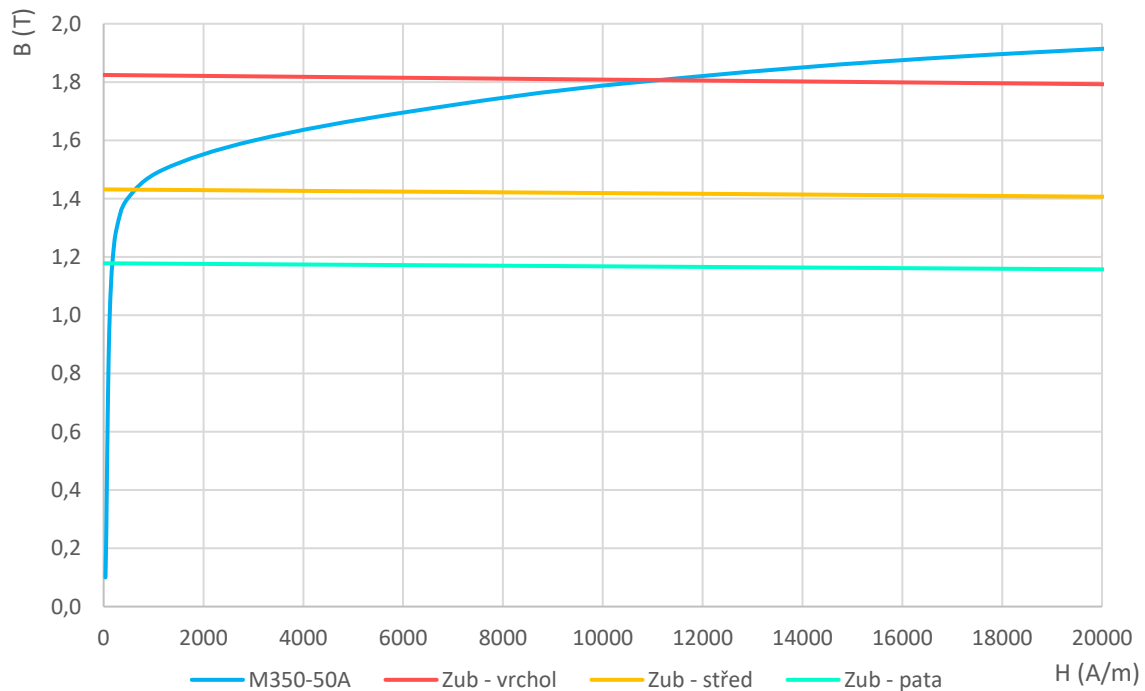
pro charakteristiku sycení zubu v jeho středu:

$$B_{z2} = B_{z02}' - \mu_0 \cdot k_{z2} \cdot H = 1,43 - 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 1,00 \cdot H, \quad (2.179)$$

a pro charakteristiku sycení zubu v jeho patě:

$$B_{z3} = B_{z03}' - \mu_0 \cdot k_{z3} \cdot H = 1,18 - 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,83 \cdot H. \quad (2.180)$$

Tyto charakteristiky jsou zobrazeny na (Obr. 2.6).



Obr. 2.6: Magnetizační charakteristika elektrotechnických plechů M350-50A a charakteristiky sycení jednotlivých částí zubu při chodu naprázdno

Z průřezů magnetizační charakteristiky plechů a charakteristik sycení zubu je určena indukce naprázdno ve vrcholu zubu:

$$B_{z01} = 1,80 \text{ T}, \quad (2.181)$$

indukce naprázdno ve středu zubu:

$$B_{z02} = 1,43 \text{ T}, \quad (2.182)$$

indukce naprázdno v patě zubu:

$$B_{z03} = 1,18 \text{ T}, \quad (2.183)$$

intenzita magnetického naprázdno pole ve vrcholu zubu:

$$H_{z01} = 11050 \text{ A/m}, \quad (2.184)$$

intenzita magnetického pole naprázdno ve středu zubu:

$$H_{z02} = 640 \text{ A/m}, \quad (2.185)$$

a intenzita magnetického pole naprázdno v patě zubu:

$$H_{z03} = 180 \text{ A/m}. \quad (2.186)$$

Následně je určen geometrický průměr intenzit magnetického pole naprázdno v zubech:

$$\begin{aligned} H_{z0} &= \frac{(H_{z01} + 4 \cdot H_{z02} + H_{z03})}{6} = \\ &= \frac{(11050 + 4 \cdot 640 + 180)}{6} = 2298,33 \text{ A/m}, \end{aligned} \quad (2.187)$$

díky kterému je možné určit úbytek magnetického napětí naprázdno na zubu:

$$\theta_{z0} = H_{z0} \cdot h_d = 2298,33 \cdot 20,00 \cdot 10^{-3} = 45,97 \text{ A}. \quad (2.188)$$

Z toku naprázdno určeného vztahem (2.57) je určen magnetický tok naprázdno jhem statoru:

$$\phi_{j10} = \frac{\phi_0}{2} = \frac{0,01175}{2} = 0,00587 \text{ Wb}, \quad (2.189)$$

jehož pomocí lze určit indukci naprázdno ve jhu statoru:

$$B_{j10} = \frac{\phi_{j10}}{h_{j1} \cdot k_{Fe} \cdot l_{Fe}} = \frac{0,00587}{25,00 \cdot 10^{-3} \cdot 0,97 \cdot 0,1705} = 1,42 \text{ T}, \quad (2.190)$$

a jí odpovídající intenzitu magnetického pole naprázdno ve jhu statoru:

$$H_{j10} = 560 \text{ A/m}. \quad (2.191)$$

Redukovaná délka jha, určená vztahem (2.136), je stejně jako ve vztahu (2.137), použita pro určení úbytku magnetického napětí naprázdno na jhu statoru:

$$\theta_{j10} = H_{j10} \cdot l_{jred} = 560 \cdot 58,12 \cdot 10^{-3} = 32,55 \text{ A}. \quad (2.192)$$

Dále je určen magnetický tok naprázdno rotorem:

$$\phi_{r0} = (1 + k_{\sigma}') \cdot \phi_0 = (1 + 0,02111) \cdot 0,01175 = 0,01200 \text{ Wb}, \quad (2.193)$$

který vytvoří v pólovém nastavci indukci naprázdno:

$$B_{pn0} = \frac{\phi_{r0}}{\alpha_m \cdot t_{p2} \cdot k_{Fe} \cdot L_p} = \frac{0,01200}{0,75 \cdot 123,31 \cdot 10^{-3} \cdot 0,97 \cdot 0,1705} = 0,78 \text{ T.} \quad (2.194)$$

Této hodnotě indukce náleží intenzita magnetického pole naprázdno v pólovém nastavci:

$$H_{pn0} = 92 \text{ A/m,} \quad (2.195)$$

přičemž této intenzitě magnetického pole naprázdno odpovídá úbytek magnetického napětí naprázdno na pólovém nastavci:

$$\theta_{pn0} = H_{pn0} \cdot h_{pn} = 92 \cdot 16,24 \cdot 10^{-3} = 1,49 \text{ A.} \quad (2.196)$$

Následuje výpočet indukce naprázdno v pólu:

$$B_{p0} = \frac{\phi_{r0}}{b_p \cdot k_{Fe} \cdot L_p} = \frac{0,01200}{51,7 \cdot 10^{-3} \cdot 0,97 \cdot 0,1705} = 1,40 \text{ T,} \quad (2.197)$$

jíž odpovídá intenzita magnetického pole naprázdno v pólu:

$$H_{p0} = 481 \text{ A/m,} \quad (2.198)$$

a úbytek magnetického napětí naprázdno na pólu:

$$\theta_{p0} = H_{p0} \cdot h_p = 481 \cdot 22,3 \cdot 10^{-3} = 10,73 \text{ A.} \quad (2.199)$$

Dále je nutné vypočítat magnetický tok naprázdno jhem rotoru:

$$\phi_{j20} = \frac{\phi_{r0}}{2} = \frac{0,01200}{2} = 0,00600 \text{ Wb,} \quad (2.200)$$

díky kterému vznikne ve jhu rotoru indukce naprázdno:

$$B_{j20} = \frac{\phi_{j20}}{h_{j2} \cdot k_{Fe} \cdot L_p} = \frac{0,00600}{22,6 \cdot 10^{-3} \cdot 0,97 \cdot 0,1705} = 1,60 \text{ T,} \quad (2.201)$$

které náleží intenzita magnetického pole naprázdno ve jhu rotoru:

$$H_{j20} = 3025 \text{ A/m,} \quad (2.202)$$

a úbytek magnetického napětí naprázdno na jhu rotoru:

$$\theta_{j20} = H_{j20} \cdot l_{j2} = 3025 \cdot 45,02 \cdot 10^{-3} = 136,18 \text{ A.} \quad (2.203)$$

Úbytek magnetického napětí naprázdno na vzduchové mezeře je pak:

$$\theta_{\delta 0} = \frac{B_{\delta 0}}{\mu_0} \cdot \delta' = \frac{0,8}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \cdot 1,966 \cdot 10^{-3} = 1251,66 \text{ A.} \quad (2.204)$$

Ze zjištěných úbytků magnetických napětí naprázdno na jednotlivých částech magnetického obvodu stroje je poté následující rovnicí možné určit celkový úbytek magnetických napětí naprázdno:

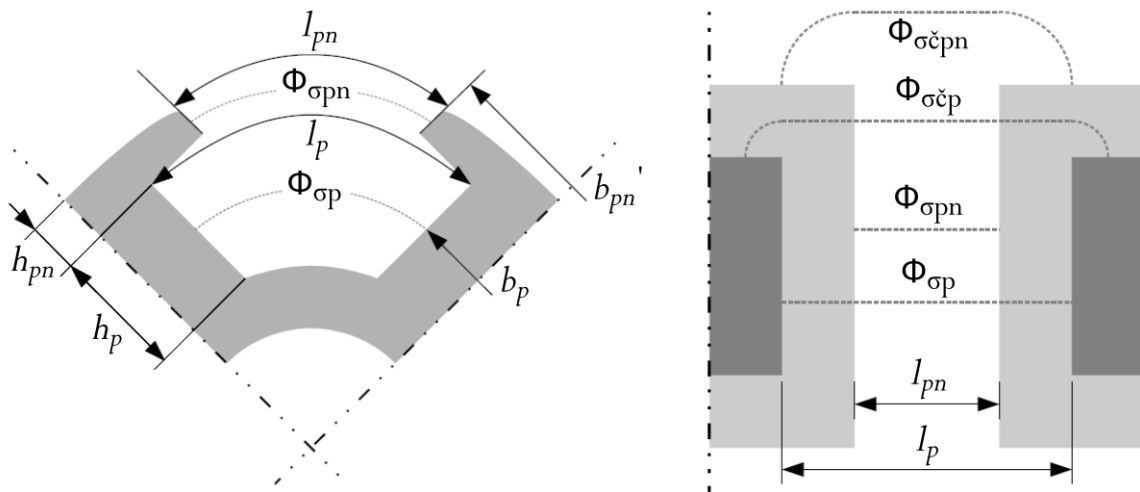
$$\begin{aligned} \sum \theta_0 &= \theta_{j10} + \theta_{j20} + 2 \cdot (\theta_{z0} + \theta_{\delta 0} + \theta_{pn0} + \theta_{p0}) = \\ &= 32,55 + 136,18 + 2 \cdot (45,97 + 1251,66 + 1,49 + 10,73) = \\ &= 2788,43 \text{ A.} \end{aligned} \quad (2.205)$$

2.4 Výpočet činitele rozptylu

Při výpočtu činitele rozptylu je uvažováno, podle (Obr. 2.7), že rozptylový magnetický tok prochází prostorem mezi póly, mezi pólovými nástavci, mezi čely pólů a mezi čely pólových nástavců. Prvním krokem pro určení rozptylového toku a následně činitele rozptylu je určení vzdálenosti mezi pólovými nástavci:

$$l_{pn} = t_{p2} - \alpha_m \cdot t_{p2} = 123,31 - 0,75 \cdot 123,31 = 30,83 \text{ mm}, \quad (2.206)$$

která odpovídá délce oblouku se stejným poloměrem jako rotor stroje.



Obr. 2.7: Siločáry rozptylového magnetického pole budících pólů (převzato a upraveno z [4])

Nutné je také určit vzdálenost mezi póly:

$$\begin{aligned}
 l_p &= \frac{2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{D_2}{2} - h_{pn}\right)}{2p} - \sqrt{\left(\frac{D_2}{2} - h_{pn}\right)^2 + \left(\frac{b_p}{2}\right)^2} \cdot \\
 &\quad \cdot 2 \cdot \tan^{-1}\left(\frac{b_p}{2 \cdot \left(\frac{D_2}{2} - h_{pn}\right)}\right) = \\
 &= \frac{2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{0,157 \cdot 10^3}{2} - 16,24\right)}{4} - \\
 &\quad - \sqrt{\left(\frac{0,157 \cdot 10^3}{2} - 16,24\right)^2 + \left(\frac{51,7}{2}\right)^2} \cdot \\
 &\quad \cdot 2 \cdot \tan^{-1}\left(\frac{51,7}{2 \cdot \left(\frac{0,157 \cdot 10^3}{2} - 16,24\right)}\right) = 44,74 \text{ mm},
 \end{aligned} \tag{2.207}$$

kteřá odpovídá délce oblouku s poloměrem odpovídajícím poloměru rotoru stroje sníženým o výšku pólového nástavce.

Je určena magnetická vodivost mezi póly, při jejímž výpočtu se stejně jako v případě drážky uplatní činitel částečného záběru trojúhelníkového rostoucího pole:

$$\begin{aligned}
 \Lambda_p &= \mu_0 \cdot \frac{h_p}{3 \cdot l_p} \cdot L_p = \\
 &= 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot \frac{22,3 \cdot 10^{-3}}{3 \cdot 44,74 \cdot 10^{-3}} \cdot 0,1705 \cdot 10^9 = 35,60 \text{ nH},
 \end{aligned} \tag{2.208}$$

magnetická vodivost mezi pólovými nástavci:

$$\begin{aligned}
 \Lambda_{pn} &= \mu_0 \cdot \frac{h_{pn}}{l_{pn}} \cdot L_p = \\
 &= 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot \frac{22,3 \cdot 10^{-3}}{44,74 \cdot 10^{-3}} \cdot 0,1705 \cdot 10^9 = 112,87 \text{ nH},
 \end{aligned} \tag{2.209}$$

magnetická vodivost prostoru mezi čely pólových nástavců:

$$\begin{aligned}
 \Lambda_{\check{c}pn} &= \frac{\mu_0 \cdot h_{pn}}{\pi} \cdot \ln\left(\frac{\pi \cdot b_{pn}}{2 \cdot l_{pn}} + 1\right) = \\
 &= \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 16,24 \cdot 10^{-3}}{\pi} \cdot \ln\left(\frac{\pi \cdot 92,5 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 30,83 \cdot 10^{-3}} + 1\right) \cdot 10^9 = \\
 &= 11,32 \text{ nH},
 \end{aligned} \tag{2.210}$$

a také magnetická vodivost prostoru mezi čely pólů, kde se stejně jako v případě magnetické vodivosti mezi póly uplatní činitel částečného záběru trojúhelníkového rostoucího pole:

$$\begin{aligned} \Lambda_{\zeta p} &= \frac{\mu_0 \cdot h_p}{3 \cdot \pi} \cdot \ln \left(\frac{\pi \cdot b_p}{2 \cdot l_p} + 1 \right) = \\ &= \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 22,3 \cdot 10^{-3}}{3 \cdot \pi} \cdot \ln \left(\frac{\pi \cdot 51,7 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 44,74 \cdot 10^{-3}} + 1 \right) \cdot 10^9 = \\ &= 3,08 \text{ nH}, \end{aligned} \quad (2.211)$$

přičemž tyto magnetické vodivosti tvoří dohromady výslednou magnetickou vodivost rozptylových cest:

$$\begin{aligned} \Lambda_{\sigma} &= \Lambda_p + \Lambda_{pn} + 2 \cdot (\Lambda_{\zeta pn} + \Lambda_{\zeta p}) = \\ &= 35,60 + 112,87 + 2 \cdot (11,32 + 3,08) = 177,27 \text{ nH}. \end{aligned} \quad (2.212)$$

Díky výsledné magnetické vodivosti je možné určit rozptylový tok:

$$\phi_{\sigma} = \Lambda_{\sigma} \cdot \frac{\sum \theta_0}{2} = 177,27 \cdot 10^{-9} \cdot \frac{2788,43}{2} = 0,000247 \text{ Wb}, \quad (2.213)$$

s využitím jmenovitého magnetického toku určeného vztahem (2.81) lze určit činitel rozptylu:

$$k_{\sigma} = \frac{\phi_{\sigma}}{\phi_n} = \frac{0,000247}{0,01171} = 0,02110, \quad (2.214)$$

a chybu činitele rozptylu mezi jeho přibližnou hodnotou získanou vztahem (2.146) a jeho skutečnou hodnotou:

$$\Delta k_{\sigma} = \frac{k_{\sigma}' - k_{\sigma}}{k_{\sigma}'} \cdot 100 = \frac{0,02111 - 0,02110}{0,02111} \cdot 100 = 0,05 \%. \quad (2.215)$$

2.5 Parametry náhradního schématu

2.5.1 Potřebné rozměry

Je určena šířka cívky:

$$b_c = b_v + p_i + 2 \cdot t_c = 4,00 + 0,23 + 2 \cdot 0,3 = 4,83 \text{ mm}, \quad (2.216)$$

a zvolena šířka izolační mezery mezi čely:

$$c = 2 \text{ mm}. \quad (2.217)$$

Dále je určen úhel sklonu čel:

$$\alpha_{\zeta} = \arcsin \left(\frac{b_c + c}{t_{d2}} \right) = \arcsin \left(\frac{4,83 + 2}{11,78} \right) = 35,43^{\circ}, \quad (2.218)$$

je zvolena délka výběhu z drážky:

$$l_v = 5 \text{ mm}, \quad (2.219)$$

a při poloměru oka čela vinutí:

$$R_o = 4 \cdot h_v = 4 \cdot 2,00 = 8,00 \text{ mm.} \quad (2.220)$$

je určena délka čela:

$$\begin{aligned} l_{\zeta} &= 2 \cdot l_v + \frac{\pi \cdot (D_1 + h_d) \cdot \beta}{2p \cdot \cos(\alpha_{\zeta})} + \pi \cdot R_o = \\ &= 2 \cdot 5 + \frac{\pi \cdot (0,160 \cdot 10^3 + 20,00) \cdot \frac{5}{6}}{4 \cdot \cos(35,43^\circ)} + \pi \cdot 8,00 = 179,70 \text{ mm,} \end{aligned} \quad (2.221)$$

a délka závitu:

$$l_z = 2 \cdot (l_{Fe} + l_{\zeta}) = 2 \cdot (0,1705 \cdot 10^3 + 179,70) = 179,70 \text{ mm.} \quad (2.222)$$

2.5.2 Odpory

Při uvažování známé měrné vodivosti mědi při 20 °C:

$$\gamma_{Cu20} = 58,50 \text{ MS/m,} \quad (2.223)$$

je odpor satorového vinutí při 20 °C a při napájení stejnosměrným proudem:

$$\begin{aligned} R_{a20} &= \frac{1}{\gamma_{Cu20}} \cdot \frac{N_S \cdot l_z}{a_{\sim} \cdot n_p \cdot S_v} = \\ &= \frac{1}{58,50 \cdot 10^6} \cdot \frac{24 \cdot 179,70 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 1 \cdot 7,637 \cdot 10^{-6}} = 0,018813 \Omega. \end{aligned} \quad (2.224)$$

Pro určení odporu satorového vinutí při průchodu střídavého proudu je nutné určit hloubku vniku při 20 °C:

$$\begin{aligned} a_{20} &= \sqrt{\frac{2}{2 \cdot \pi \cdot \mu_0 \cdot \gamma \cdot f}} = \\ &= \sqrt{\frac{2}{2 \cdot \pi \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 58,50 \cdot 10^6 \cdot 116,67}} \cdot 10^3 = 6,09 \text{ mm,} \end{aligned} \quad (2.225)$$

poměrnou hloubku vniku při 20 °C:

$$\zeta_{20} = \frac{h_v}{a_{20}} = \frac{2,00}{6,09} = 0,3283, \quad (2.226)$$

a koeficient nárůstu odporu při 20 °C:

$$\begin{aligned} k_{\sim 20} &= \zeta_{20} \cdot \frac{\sinh(2 \cdot \zeta_{20}) + \sin(2 \cdot \zeta_{20})}{\cosh(2 \cdot \zeta_{20}) - \cos(2 \cdot \zeta_{20})} = \\ &= 0,3283 \cdot \frac{\sinh(2 \cdot 0,3283) + \sin(2 \cdot 0,3283)}{\cosh(2 \cdot 0,3283) - \cos(2 \cdot 0,3283)} = 1,0010, \end{aligned} \quad (2.227)$$

pomocí kterého je možné vypočítat odpor satorového vinutí při 20 °C a při napájení střídavým proudem:

$$R_{a\sim 20} = k_{\sim 20} \cdot R_{a20} = 1,0010 \cdot 0,018813 = 0,018832 \Omega. \quad (2.228)$$

Jelikož však při provozu stroje dochází k nárůstu teploty, je nutné při uvažování teplotního součinitele odporu mědi:

$$\alpha_{Cu} = 0,00429 K^{-1}, \quad (2.229)$$

přepočítat na maximální teplotu vinutí, tedy 155 °C (2.7), měrnou vodivost mědi:

$$\begin{aligned} \gamma_{Cu155} &= \frac{\gamma_{Cu20}}{[1 + \alpha_{20} \cdot \Delta\vartheta]} = \frac{\gamma_{Cu20}}{[1 + \alpha_{Cu} \cdot (\vartheta_{Cu} - 20)]} = \\ &= \frac{58,50}{[1 + 0,00429 \cdot (155 - 20)]} = 37,05 \text{ MS/m}, \end{aligned} \quad (2.230)$$

a určit odpor satorového vinutí při 155 °C při uvažování napájení stejnosměrným proudem:

$$\begin{aligned} R_{a155} &= \frac{1}{\gamma_{Cu155}} \cdot \frac{N_s \cdot l_z}{a_{\sim} \cdot n_p \cdot S_v} = \\ &= \frac{1}{37,05 \cdot 10^6} \cdot \frac{24 \cdot 179,70 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 1 \cdot 7,637 \cdot 10^{-6}} = 0,029708 \Omega. \end{aligned} \quad (2.231)$$

Pro určení odporu satorového vinutí při průchodu střídavého proudu je nutné určit hloubku vniku při 155 °C:

$$\begin{aligned} a_{155} &= \sqrt{\frac{2}{2 \cdot \pi \cdot \mu_0 \cdot \gamma \cdot f}} = \\ &= \sqrt{\frac{2}{2 \cdot \pi \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 37,05 \cdot 10^6 \cdot 116,67}} \cdot 10^3 = 7,66 \text{ mm}, \end{aligned} \quad (2.232)$$

poměrnou hloubku vniku při 155 °C:

$$\zeta_{155} = \frac{h_v}{a_{155}} = \frac{2,00}{7,66} = 0,2612, \quad (2.233)$$

a koeficient nárůstu odporu při 155 °C:

$$\begin{aligned} k_{\sim 155} &= \zeta_{155} \cdot \frac{\sinh(2 \cdot \zeta_{155}) + \sin(2 \cdot \zeta_{155})}{\cosh(2 \cdot \zeta_{155}) - \cos(2 \cdot \zeta_{155})} = \\ &= 0,2612 \cdot \frac{\sinh(2 \cdot 0,2612) + \sin(2 \cdot 0,2612)}{\cosh(2 \cdot 0,2612) - \cos(2 \cdot 0,2612)} = 1,0004, \end{aligned} \quad (2.234)$$

pomocí kterého je možné určit odpor satorového vinutí při 155 °C a při napájení střídavým proudem:

$$R_{a\sim 155} = k_{\sim 155} \cdot R_{a155} = 1,0004 \cdot 0,029708 = 0,029720 \Omega. \quad (2.235)$$

Při porovnání hodnot odporu při uvažování napájení stejnosměrným proudem a hodnot odporu při napájení střídavým proudem je patrné, že střídavý proud způsobí v hodnotách odporu změnu až v řádu $10^{-5} \Omega$.

2.5.3 Indukčnosti

Je nutné určit magnetizační indukčnost:

$$\begin{aligned} L_{\mu} &= 2 \cdot \mu_0 \cdot \frac{m}{p} \cdot \left(\frac{N_S \cdot k_{v1}}{\pi} \right)^2 \cdot \frac{t_{p1} \cdot l_i}{\delta'} = \\ &= 2 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot \frac{3}{2} \cdot \left(\frac{24 \cdot 0,9250}{\pi} \right)^2 \cdot \frac{125,66 \cdot 10^{-3} \cdot 0,1705}{1,966 \cdot 10^{-3}} \cdot \\ &\quad \cdot 10^3 = 2,068 \text{ mH}, \end{aligned} \quad (2.236)$$

činitel k_{β}' :

$$k_{\beta}' = \frac{1 + 3 \cdot \beta}{4} = \frac{1 + 3 \cdot \frac{5}{6}}{4} = 0,875, \quad (2.237)$$

činitel k_{β} :

$$k_{\beta} = \frac{1 + 3 \cdot k_{\beta}'}{4} = \frac{1 + 3 \cdot 0,875}{4} = 0,906, \quad (2.238)$$

činitel magnetické vodivosti drážek podle [2]:

$$\begin{aligned} \lambda_{do} &= \frac{h_d - h_0 - t_c - t_v - (t_m + 2 \cdot t_c)}{3 \cdot b_{d1}} \cdot k_{\beta} + \\ &\quad + \frac{h_0}{b_{d1}} \cdot k_{\beta}' + \frac{t_m + 2 \cdot t_c}{4 \cdot b_{d1}} = \\ &= \frac{20,00 - 2,0 - 0,3 - 0,2 - (0,3 + 2 \cdot 0,3)}{3 \cdot 5,70} \cdot 0,906 + \\ &\quad + \frac{2,0}{5,70} \cdot 0,875 + \frac{0,3 + 2 \cdot 0,3}{4 \cdot 5,70} = 1,2262, \end{aligned} \quad (2.239)$$

činitel magnetické vodivosti čel:

$$\begin{aligned} \lambda_{\xi} &= 0,34 \cdot \frac{q}{l_{Fe}} \cdot (l_{\xi} - 0,64 \cdot \beta \cdot t_{p1}) = \\ &= 0,34 \cdot \frac{4}{0,1705 \cdot 10^3} \cdot \left(179,70 - 0,64 \cdot \frac{5}{6} \cdot 125,66 \right) = 0,8988, \end{aligned} \quad (2.240)$$

a s využitím činitele diferenčního rozptylu určeného vztahem (2.72) lze vypočítat rozptylovou indukčnost:

$$\begin{aligned} L_{a\sigma} &= 2 \cdot \mu_0 \cdot \frac{N_S^2}{p \cdot q} \cdot (\lambda_{do} + \lambda_c) \cdot l_{Fe} + \tau_{dif} \cdot L_\mu = \\ &= 2 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot \frac{24^2}{2 \cdot 4} \cdot (1,2262 + 0,8988) \cdot 0,1705 \cdot \\ &\quad \cdot 10^3 + 0,0062 \cdot 2,068 = 0,0785 \text{ mH}, \end{aligned} \quad (2.241)$$

ze které lze dále určit rozptylovou reaktanci:

$$X_{a\sigma} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_{a\sigma} = 2 \cdot \pi \cdot 116,67 \cdot 0,0785 \cdot 10^{-3} = 0,05752 \Omega. \quad (2.242)$$

Pro uvažování vyniklosti stroje je potřeba určit činitel deformace magnetického pole v ose d :

$$C_{d1} = 0,84, \quad (2.243)$$

a činitel deformace magnetického pole v ose q :

$$C_{q1} = 0,51, \quad (2.244)$$

přičemž hodnoty obou těchto činitelů jsou získány z [2].

Pomocí těchto činitelů je možné určit složku magnetizační indukčnosti v podélné ose d :

$$L_{ad} = C_{d1} \cdot L_\mu = 0,84 \cdot 2,068 = 1,737 \text{ mH}, \quad (2.245)$$

a složku magnetizační indukčnosti v příčné ose q :

$$L_{aq} = C_{q1} \cdot L_\mu = 0,51 \cdot 2,068 = 1,055 \text{ mH}, \quad (2.246)$$

přičemž k těmto hodnotám indukčností je ještě potřeba přičíst rozptylovou indukčnost, čímž je získána indukčnost v ose d :

$$L_d = L_{ad} + L_{a\sigma} = 1,737 + 0,0785 = 1,815 \text{ mH}, \quad (2.247)$$

a indukčnost v ose q :

$$L_q = L_{aq} + L_{q\sigma} = 1,055 + 0,0785 = 1,133 \text{ mH}. \quad (2.248)$$

Z hodnot L_d a L_q je možné určit jejich poměr:

$$\frac{L_d}{L_q} = \frac{1,815}{1,133} = 1,60, \quad (2.249)$$

jehož velikost charakterizuje vyniklost stroje.

Hodnoty indukčností L_d a L_q lze použít také k určení reaktance v ose d :

$$X_d = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_d = 2 \cdot \pi \cdot 116,67 \cdot 1,815 \cdot 10^{-3} = 1,331 \Omega, \quad (2.250)$$

a reaktance v ose q :

$$X_q = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_q = 2 \cdot \pi \cdot 116,67 \cdot 1,133 \cdot 10^{-3} = 0,831 \Omega. \quad (2.251)$$

Dále je určena jmenovitá impedance:

$$Z_n = \frac{U_{fn}}{I_n} = \frac{132,27}{105,38} = 1,255 \Omega, \quad (2.252)$$

díky které je získán odpor statorového vinutí při 155 °C a napájení střídavým proudem v poměrných jednotkách:

$$r_{a\sim 155} = \frac{R_{a\sim 155}}{Z_n} = \frac{0,029720}{1,255} = 0,0237 \text{ p. j.}, \quad (2.253)$$

rozptylová reaktance v poměrných jednotkách:

$$x_{a\sigma} = \frac{X_{a\sigma}}{Z_n} = \frac{0,05752}{1,255} = 0,0458 \text{ p. j.}, \quad (2.254)$$

reaktance v ose d v poměrných jednotkách:

$$x_d = \frac{X_d}{Z_n} = \frac{1,331}{1,255} = 1,0603 \text{ p. j.}, \quad (2.255)$$

a reaktance v ose q v poměrných jednotkách:

$$x_q = \frac{X_q}{Z_n} = \frac{0,831}{1,255} = 0,6617 \text{ p. j.}. \quad (2.256)$$

2.6 Fázorový diagram

Pro zkonstruování fázorového diagramu je určeno magnetické napětí naprázdno:

$$F_1 = \frac{\sum \theta_0}{2} = \frac{2788,43}{2} = 1394,22 \text{ A}, \quad (2.257)$$

magnetické napětí reakce kotvy:

$$\begin{aligned} F_a &= \frac{m}{\pi} \cdot \frac{N_s \cdot k_{v1}}{p} \cdot \sqrt{2} \cdot I_n = \\ &= \frac{3}{\pi} \cdot \frac{24 \cdot 0,9250}{2} \cdot \sqrt{2} \cdot 105,38 = 1579,73 \text{ A}, \end{aligned} \quad (2.258)$$

magnetické napětí reakce kotvy v ose d :

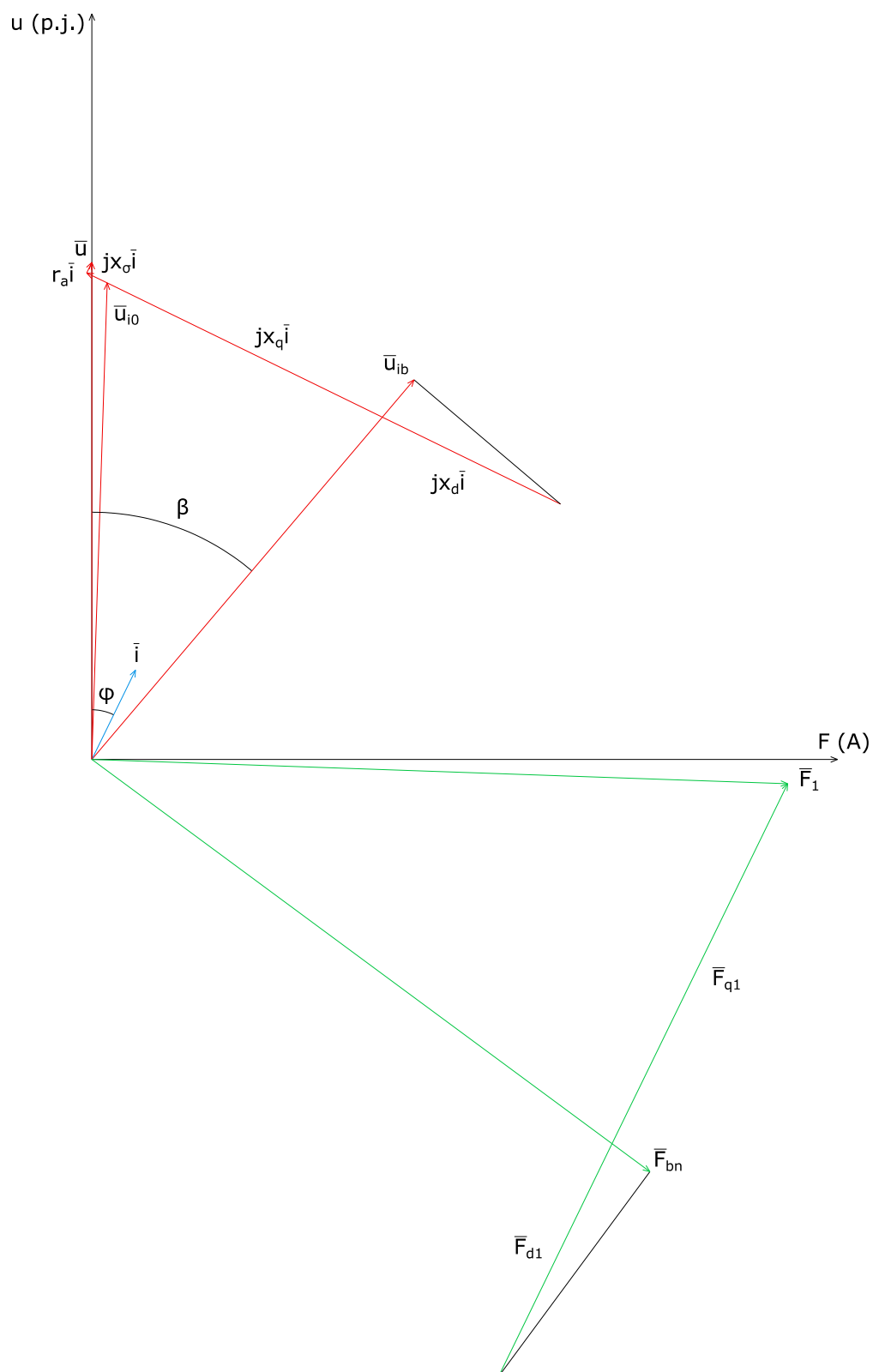
$$F_{d1} = C_{d1} \cdot F_a = 0,84 \cdot 1579,73 = 1326,98 \text{ A}, \quad (2.259)$$

přibližné magnetické napětí reakce kotvy v ose q :

$$F_{q1} = C_{q1} \cdot F_a = 0,51 \cdot 1579,73 = 805,66 \text{ A}, \quad (2.260)$$

a ze zvoleného účinníku (2.14) je vypočten fázový posuv:

$$\varphi = \cos^{-1}(\cos(\varphi)) = \cos^{-1}(0,9) = 25,84^\circ. \quad (2.261)$$



Obr. 2.8: Fázorový diagram

Z fázorového diagramu je při uvažování odporu statorového vinutí a rozptylové reaktance vypočteno indukované napětí naprázdno. Nejprve je vyjádřena jeho druhá mocnina:

$$\begin{aligned}
 u_{i0}^2 &= \left(u - \frac{r_{a\sim 155}}{\cos(\varphi)}\right)^2 + (x_{a\sigma} - r_{a\sim 155} \cdot \tan(\varphi))^2 - 2 \cdot \\
 &\cdot \left(u - \frac{r_{a\sim 155}}{\cos(\varphi)}\right) \cdot (x_{a\sigma} - r_{a\sim 155} \cdot \tan(\varphi)) \cdot (\cos(90^\circ - \varphi)) = \\
 &= \left(1 - \frac{0,0237}{\cos(25,84^\circ)}\right)^2 + (0,0458 - 0,0237 \cdot \tan(25,84^\circ))^2 - 2 \cdot \\
 &\cdot \left(1 - \frac{0,0237}{\cos(25,84^\circ)}\right) \cdot (0,0458 - 0,0237 \cdot \tan(25,84^\circ)) \cdot \\
 &\cdot (\cos(90^\circ - 25,84^\circ)) = 0,92010 \text{ p.j.}^2,
 \end{aligned} \tag{2.262}$$

a tato hodnota je následně odmocněna:

$$u_{i0} = \sqrt{u_{i0}^2} = \sqrt{0,92010} = 0,95922 \text{ p.j.} \tag{2.263}$$

Stejným způsobem lze vypočítat i délku první části fázoru indukovaného napětí. Opět je nejprve vyjádřena jeho druhá mocnina:

$$\begin{aligned}
 u_{ib1}^2 &= \left(u - \frac{r_{a\sim 155}}{\cos(\varphi)}\right)^2 + (x_q - r_{a\sim 155} \cdot \tan(\varphi))^2 - 2 \cdot \\
 &\cdot \left(u - \frac{r_{a\sim 155}}{\cos(\varphi)}\right) \cdot (x_q - r_{a\sim 155} \cdot \tan(\varphi)) \cdot (\cos(90^\circ - \varphi)) = \\
 &= \left(1 - \frac{0,0237}{\cos(25,84^\circ)}\right)^2 + (0,6617 - 0,0237 \cdot \tan(25,84^\circ))^2 - 2 \cdot \\
 &\cdot \left(1 - \frac{0,0237}{\cos(25,84^\circ)}\right) \cdot (0,6617 - 0,0237 \cdot \tan(25,84^\circ)) \cdot \\
 &\cdot (\cos(90^\circ - 25,84^\circ)) = 0,81897 \text{ p.j.}^2,
 \end{aligned} \tag{2.264}$$

a poté je provedeno odmocnění:

$$u_{ib1} = \sqrt{u_{ib1}^2} = \sqrt{0,81897} = 0,90497 \text{ p.j.} \tag{2.265}$$

Je také možné určit zátěžný úhel mezi fázory \bar{u} a \bar{u}_{ib} :

$$\begin{aligned}
 \beta &= \sin^{-1} \left(\frac{\sin(90^\circ - \varphi)}{u_{ib1}} \cdot (x_q - r_{a\sim 155} \cdot \tan(\varphi)) \right) = \\
 &= \sin^{-1} \left(\frac{\sin(90^\circ - 25,84^\circ)}{0,90497} \cdot (0,6617 - 0,0237 \cdot \tan(25,84^\circ)) \right) = \\
 &= 40,29^\circ,
 \end{aligned} \tag{2.266}$$

či vnitřní fázový posuv:

$$\psi = \beta - \varphi = 40,29 - 25,84 = 14,45^\circ. \tag{2.267}$$

Délku druhé části fázoru indukovaného napětí lze určit jako:

$$\begin{aligned} u_{ib2} &= (x_d - x_q) \cdot \cos(90^\circ + \varphi - \beta) = \\ &= (1,0603 - 0,6617) \cdot \cos(90^\circ + 25,84^\circ - 40,29^\circ) = \\ &= 0,09946 \text{ p. j.}, \end{aligned} \quad (2.268)$$

přičemž součet velikostí obou částí fázoru je roven indukovanému napětí v poměrných jednotkách, které svou hodnotou odpovídá skutečné hodnotě činitele elektromotorické síly:

$$k_E = u_{ib} = u_{ib1} + u_{ib2} = 0,90497 + 0,09946 = 1,0044, \quad (2.269)$$

a procentní chybu velikosti zvoleného činitele elektromotorické síly (2.15) oproti jeho skutečné hodnotě určené z fázorového diagramu lze vypočítat jako:

$$\Delta k_E = \frac{k_E' - k_E}{k_E'} \cdot 100 = \frac{1,01 - 1,0044}{1,01} \cdot 100 = 0,55 \%. \quad (2.270)$$

Pro výpočet další části fázorového diagramu, která je tvořena fázory magnetických napětí, je nutné nejprve určit velikost úhlu α mezi fázory \bar{u} a \bar{u}_{i0} :

$$\begin{aligned} \alpha &= \sin^{-1} \left(\frac{\sin(90^\circ - \varphi)}{u_{i0}} \cdot (x_{a\sigma} - r_{a\sim 155} \cdot \tan(\varphi)) \right) = \\ &= \sin^{-1} \left(\frac{\sin(90^\circ - 25,84^\circ)}{0,95922} \cdot (0,0458 - 0,0237 \cdot \tan(25,84^\circ)) \right) = \\ &= 1,85^\circ, \end{aligned} \quad (2.271)$$

díky kterému lze vypočítat délku první části fázoru jmenovitého magnetického napětí budícího vinutí:

$$\begin{aligned} F_{bn1} &= \sqrt{F_1^2 + F_{q1}^2 - 2 \cdot F_1 \cdot F_{q1} \cdot \cos(\alpha + 90^\circ - \varphi)} = \\ &= \sqrt{1394,22^2 + 805,66^2 - 2 \cdot 1394,22 \cdot 805,66 \cdot \cos(66,01^\circ)} = \\ &= 1295,91 \text{ A}, \end{aligned} \quad (2.272)$$

a úhel γ mezi první částí fázoru \bar{F}_{bn} a fázorem \bar{F}_{q1} :

$$\begin{aligned} \gamma &= \sin^{-1} \left(\sin(\alpha + 90^\circ - \varphi) \cdot \frac{F_1}{F_{bn1}} \right) = \\ &= \sin^{-1} \left(\sin(1,85^\circ + 90^\circ - 25,84^\circ) \cdot \frac{1394,22}{1295,91} \right) = 79,39^\circ. \end{aligned} \quad (2.273)$$

Následuje výpočet délky druhé části fázoru jmenovitého magnetického napětí budícího vinutí:

$$\begin{aligned} F_{bn2} &= (F_{d1} - F_{q1}) \cdot \cos(\gamma) = \\ &= (1326,98 - 805,66) \cdot \cos(79,39^\circ) = 96,03 \text{ A}, \end{aligned} \quad (2.274)$$

a součet délek obou částí fázoru, čímž je získána hodnota jmenovitého magnetického napětí budícího vinutí:

$$F_{bn} = F_{bn1} + F_{bn2} = 1295,91 + 96,03 = 1391,94 \text{ A.} \quad (2.275)$$

2.7 Návrh budícího vinutí

Pro návrh budícího vinutí je nejprve zvolena tloušťka stahovací desky:

$$t_{sd} = 1,0 \text{ mm,} \quad (2.276)$$

budící napětí:

$$U_b = 65 \text{ V,} \quad (2.277)$$

proudová hustota v budícím vinutí:

$$J_b = 8 \text{ A/mm}^2, \quad (2.278)$$

tloušťka izolace mezi pólem a budícím vinutím:

$$t_b = 0,5 \text{ mm,} \quad (2.279)$$

a izolační přírůstek budícího vinutí:

$$p_{ib} = 0,07 \text{ mm.} \quad (2.280)$$

Po zvolení těchto veličin je vypočtena přibližná střední délka závitu budícího vinutí:

$$\begin{aligned} l_b' &= 2 \cdot (L_p + b_p + 2 \cdot t_{sd} + 4 \cdot t_b) + \pi \cdot \left(\frac{b_{pn}' - b_p}{2} - t_b \right) = \\ &= 2 \cdot (0,1705 \cdot 10^3 + 51,7 + 2 \cdot 1,0 + 4 \cdot 0,5) + \\ &\quad + \pi \cdot \left(\frac{87,2 - 51,7}{2} - 0,5 \right) = 506,59 \text{ mm,} \end{aligned} \quad (2.281)$$

a přibližná plocha vodiče budícího vinutí:

$$\begin{aligned} S_b' &= \frac{2p \cdot l_b' \cdot F_{bn}}{\gamma_{Cu155} \cdot U_b} = \\ &= \frac{4 \cdot 506,59 \cdot 10^{-3} \cdot 1391,94}{37,05 \cdot 10^6 \cdot 65} \cdot 10^6 = 1,171 \text{ mm}^2, \end{aligned} \quad (2.282)$$

kteří odpovídá přibližný průměr vodiče budícího vinutí:

$$D_b' = \sqrt{\frac{4 \cdot S_b'}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 1,171}{\pi}} = 1,221 \text{ mm.} \quad (2.283)$$

Podle normy [5] je poté zvolen vodič s průměrem:

$$D_b = 1,250 \text{ mm,} \quad (2.284)$$

kterému odpovídá plocha vodiče:

$$S_b = \frac{\pi \cdot D_b^2}{4} = \frac{\pi \cdot 1,250^2}{4} = 1,227 \text{ mm}^2. \quad (2.285)$$

Díky znalosti plochy vodiče může být vypočten budící proud:

$$I_b' = J_b \cdot S_b = 8 \cdot 1,227 = 9,82 \text{ A}, \quad (2.286)$$

a počet závitů budícího vinutí:

$$N_b' = \frac{F_{bn}}{I_b'} = \frac{1391,94}{9,82} = 142. \quad (2.287)$$

Dále je zvolen počet vrstev budícího vinutí:

$$v_b = 10, \quad (2.288)$$

a za předpokladu, že ve všech vrstvách je stejný počet vodičů, je počet závitů v jedné vrstvě:

$$N_{b1v} = \frac{N_b'}{v_b} = \frac{142}{10} = 14,2 \doteq 15. \quad (2.289)$$

Vzhledem k nutnosti zaokrouhlit počet závitů v jedné vrstvě na nejbližší vyšší celé číslo, je nutné určit přepočtený počet závitů budícího vinutí:

$$N_b = N_{b1v} \cdot v_b = 15 \cdot 10 = 150, \quad (2.290)$$

s jehož pomocí lze určit přepočtený budící proud:

$$I_b = \frac{F_{bn}}{N_b} = \frac{1391,94}{150} = 9,28 \text{ A}. \quad (2.291)$$

Pro ověření toho, zda se navržené budící vinutí, při uvažování stejného počtu závitů ve všech vrstvách, vejde pod pólový nástavec, je vypočtena celková šířka budícího vinutí včetně izolace:

$$\begin{aligned} b_{bvc} &= v_b \cdot (D_b + p_{ib}) + t_b = \\ &= 10 \cdot (1,250 + 0,07) + 0,5 = 13,7 \text{ mm}, \end{aligned} \quad (2.292)$$

šířka prostoru pro budící vinutí a izolaci pod pólovým nástavcem:

$$b_{ppv} = \frac{b_{pn}' - b_p}{2} = \frac{87,2 - 51,7}{2} = 17,75 \text{ mm}, \quad (2.293)$$

a rozdíl těchto hodnot má význam šířky volného prostoru, který zůstane pod pólovým nástavcem:

$$\Delta b = b_{ppv} - b_{bvc} = 17,75 - 13,7 = 4,05 \text{ mm}. \quad (2.294)$$

Je také možné určit celkovou výšku budícího vinutí včetně izolace:

$$\begin{aligned} h_{bvc} &= N_{b1v} \cdot (D_b + p_{ib}) + 2 \cdot t_b = \\ &= 15 \cdot (1,250 + 0,07) + 2 \cdot 0,5 = 20,8 \text{ mm}, \end{aligned} \quad (2.295)$$

jejímž odečtením od výšky pólu získáme výšku volného prostoru, který zůstane mezi budícím vinutím a pólovým nástavcem, respektive jhem rotoru:

$$\Delta h = h_p - h_{bvc} = 22,3 - 20,8 = 1,5 \text{ mm.} \quad (2.296)$$

Následně může být určena skutečná střední délka závitů budícího vinutí:

$$\begin{aligned} l_b &= 2 \cdot (L_p + b_p + 2 \cdot t_{sd} + 4 \cdot t_b) + \pi \cdot (v_b \cdot (D_b + p_{ib})) = \\ &= 2 \cdot (0,1705 \cdot 10^3 + 51,7 + 2 \cdot 1,0 + 4 \cdot 0,5) + \\ &\quad + \pi \cdot (10 \cdot (1,250 + 0,07)) = 493,87 \text{ mm,} \end{aligned} \quad (2.297)$$

jejíž chybu oproti přibližné hodnotě určené ve vztahu (2.281) lze určit jako:

$$\Delta l_b = \frac{l_b' - l_b}{l_b'} \cdot 100 = \frac{506,59 - 493,87}{506,59} \cdot 100 = 2,51 \%. \quad (2.298)$$

Tato chyba je způsobena tím, že při výpočtu přibližné střední délky závitů budícího vinutí, bylo uvažováno, že vinutí bude zabírat celý prostor pod pólovým nástavcem, což nebylo splněno.

Poslední částí návrhu budícího vinutí je výpočet jeho odporu:

$$R_b = \frac{2p \cdot N_b \cdot l_b}{\gamma_{Cu155} \cdot S_b} = \frac{4 \cdot 150 \cdot 493,87 \cdot 10^{-3}}{37,05 \cdot 1,227} = 6,519 \Omega, \quad (2.299)$$

a jeho rozptylové indukčnosti podle [1]:

$$L_{b\sigma} = 2p \cdot N_b^2 \cdot \Lambda_\sigma = 4 \cdot 150^2 \cdot 177,27 \cdot 10^{-6} = 15,954 \text{ mH.} \quad (2.300)$$

2.8 Ztráty

Pro výpočet účinnosti stroje je nutné určit velikost všech typů ztrát, které ve stroji vznikají. Jsou určeny Jouleovy ztráty:

$$\Delta P_j = m \cdot R_{a \sim 155} \cdot I_n^2 = 3 \cdot 0,029720 \cdot 105,38^2 = 990,13 \text{ W,} \quad (2.301)$$

přídavné ztráty:

$$\Delta P_p = 0,01 \cdot P_n = 0,01 \cdot 35000 = 350 \text{ W,} \quad (2.302)$$

a při uvažování činitele mechanických ztrát:

$$k_m = 10, \quad (2.303)$$

určeného podle (Tab. 2.3), a rychlosti rotoru:

$$v = \frac{\pi \cdot D_2 \cdot n_n}{60} = \frac{\pi \cdot 0,157 \cdot 3500}{60} = 28,77 \text{ m/s,} \quad (2.304)$$

jsou vypočteny také mechanické ztráty:

$$\begin{aligned}\Delta P_m &= k_m \cdot D_2 \cdot (l_{Fe} + 0,8^3 \cdot 0,6 \cdot t_{p2}) \cdot v^2 = \\ &= 10 \cdot 0,157 \cdot (0,1705 + 0,8^3 \cdot 0,6 \cdot 123,31 \cdot 10^{-3}) \cdot 28,77^2 = \\ &= 270,82 \text{ W.}\end{aligned}\quad (2.305)$$

Tab. 2.3: Hodnoty činitele mechanických ztrát pro jednotlivé způsoby chlazení (převzato a přeloženo z [3])

typ chlazení	$k_m(-)$
povrchové, ventilátor na hřídeli	15
profukované s ventilátory na hřídeli	8–10
vzduchem chlazené stroje s hladkým rotorem	5
vodíkem chlazené stroje s hladkým rotorem	<3

Dále je nutné určit objem jha statoru:

$$\begin{aligned}V_{j1} &= \pi \cdot \left[\left(\frac{D_e}{2} \right)^2 - \left(\frac{D_e - 2 \cdot h_{j1}}{2} \right)^2 \right] \cdot l_{Fe} = \\ &= \pi \cdot \left[\left(\frac{0,250}{2} \right)^2 - \left(\frac{0,250 - 2 \cdot 25,00 \cdot 10^{-3}}{2} \right)^2 \right] \cdot 0,1705 = \\ &= 0,00301 \text{ m}^3,\end{aligned}\quad (2.306)$$

a díky znalosti hustoty použitých elektrotechnických plechů:

$$\rho_{Fe} = 7650 \text{ kg/m}^3, \quad (2.307)$$

lze určit hmotnost jha statoru:

$$m_{j1} = \rho_{Fe} \cdot V_{j1} = 7650 \cdot 0,00301 = 23,05 \text{ kg.} \quad (2.308)$$

Pro jho statoru je podle (Příloha 1) určeno ztrátové číslo:

$$\Delta p_{j1(100-1,4)} = 7,53 \text{ W/kg}, \quad (2.309)$$

které je přepočteno tak, aby odpovídalo daným hodnotám frekvence a magnetické indukce:

$$\begin{aligned}\Delta p_{j1} &= \left(\frac{f}{f_{ref}} \right)^{1,5} \cdot \left(\frac{B_{j1n}}{B_{refj1}} \right)^2 \cdot \Delta p_{j1(100-1,4)} = \\ &= \left(\frac{116,67}{100} \right)^{1,5} \cdot \left(\frac{1,42}{1,4} \right)^2 \cdot 7,53 = 9,71 \text{ W/kg.}\end{aligned}\quad (2.310)$$

Při uvažování činitele opracování jha:

$$k_{tj1} = 1,7, \quad (2.311)$$

jsou pak ztráty ve jhu statoru:

$$\Delta P_{Fej1} = k_{tj1} \cdot \Delta p_{j1} \cdot m_{j1} = 1,7 \cdot 9,71 \cdot 23,05 = 380,59 \text{ W.} \quad (2.312)$$

Stejným způsobem jako v případě jha statoru se postupuje i v případě zubů. Zde je však pro větší přesnost výpočtu zub rozdělen na horní a spodní část. Objem části zubu mezi jeho vrcholem a středem lze vypočítat jako:

$$\begin{aligned} V_{z1} &= \frac{b_{z1} + b_{z2}}{2} \cdot \frac{h_d}{2} \cdot l_{Fe} = \\ &= \frac{4,77 \cdot 10^{-3} + 6,08 \cdot 10^{-3}}{2} \cdot \frac{20,00 \cdot 10^{-3}}{2} \cdot 0,1705 = \\ &= 9,25 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3, \end{aligned} \quad (2.313)$$

a stejným způsobem je určen objem části zubu mezi jeho středem a patou:

$$\begin{aligned} V_{z2} &= \frac{b_{z2} + b_{z3}}{2} \cdot \frac{h_d}{2} \cdot l_{Fe} = \\ &= \frac{6,08 \cdot 10^{-3} + 7,39 \cdot 10^{-3}}{2} \cdot \frac{20,00 \cdot 10^{-3}}{2} \cdot 0,1705 = \\ &= 1,15 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3, \end{aligned} \quad (2.314)$$

přičemž hmotnost části zubu mezi jeho vrcholem a středem je:

$$m_{z1} = \rho_{Fe} \cdot V_{z1} = 7650 \cdot 9,25 \cdot 10^{-6} = 0,071 \text{ kg}, \quad (2.315)$$

a stejným způsobem je určena i hmotnost části zubu mezi jeho středem a patou:

$$m_{z2} = \rho_{Fe} \cdot V_{z2} = 7650 \cdot 1,15 \cdot 10^{-5} = 0,088 \text{ kg}. \quad (2.316)$$

Ztrátové číslo pro zuby:

$$\Delta p_{z(100-1,5)} = 8,99 \text{ W/kg}, \quad (2.317)$$

je přepočteno zvlášť pro část zubu mezi jeho vrcholem a středem:

$$\begin{aligned} \Delta p_{z1} &= \left(\frac{f}{f_{ref}} \right)^{1,5} \cdot \left(\frac{B_{zn1}}{B_{refz}} \right)^2 \cdot \Delta p_{z(100-1,5)} = \\ &= \left(\frac{116,67}{100} \right)^{1,5} \cdot \left(\frac{1,80}{1,5} \right)^2 \cdot 8,99 = 16,31 \text{ W/kg}, \end{aligned} \quad (2.318)$$

a pro část zubu mezi jeho středem a patou:

$$\begin{aligned} \Delta p_{z2} &= \left(\frac{f}{f_{ref}} \right)^{1,5} \cdot \left(\frac{B_{zn2}}{B_{refz}} \right)^2 \cdot \Delta p_{z(100-1,5)} = \\ &= \left(\frac{116,67}{100} \right)^{1,5} \cdot \left(\frac{1,43}{1,5} \right)^2 \cdot 8,99 = 10,30 \text{ W/kg}. \end{aligned} \quad (2.319)$$

S využitím činitele opracování zubů:

$$k_{tz} = 2, \quad (2.320)$$

lze vypočítat ztráty v části zubu mezi jeho vrcholem a středem:

$$\Delta P_{Fesz1} = Q \cdot k_{tz} \cdot \Delta p_{z1} \cdot m_{z1} = 48 \cdot 2 \cdot 16,31 \cdot 0,071 = 110,85 \text{ W}, \quad (2.321)$$

a ztráty v části zuby mezi jeho středem a patou:

$$\Delta P_{Fez2} = Q \cdot k_{tz} \cdot \Delta p_{z2} \cdot m_{z2} = 48 \cdot 2 \cdot 10,30 \cdot 0,088 = 86,83 \text{ W.} \quad (2.322)$$

Je uvažován i vznik pulzačních ztrát, přičemž pro jejich výpočet jsou póly na rotoru uvažovány jako zuby, a vzdálenost mezi pólovými nastavci určená ve vztahu (2.206) je uvažována jako šířka drážky, respektive šířka jejího otevření. S tímto předpokladem je možné určit činitel γ :

$$\begin{aligned} \gamma_3 &= \frac{2}{\pi} \cdot \left\{ \operatorname{atan} \left(\frac{l_{pn}}{2 \cdot \delta} \right) - \frac{\delta}{l_{pn}} \cdot \ln \left[1 + \left(\frac{l_{pn}}{2 \cdot \delta} \right)^2 \right] \right\} = \\ &= \frac{2}{\pi} \cdot \left\{ \operatorname{atan} \left(\frac{30,83}{2 \cdot 1,5} \right) - \frac{1,5}{30,83} \cdot \ln \left[1 + \left(\frac{30,83}{2 \cdot 1,5} \right)^2 \right] \right\} = 0,794, \end{aligned} \quad (2.323)$$

který je použit pro výpočet Carterova činitele rotoru:

$$k_{c2} = \frac{t_{p2}}{t_{p2} - \gamma_3 \cdot l_{pn}} = \frac{123,31}{123,31 - 0,794 \cdot 30,83} = 1,248, \quad (2.324)$$

díky kterému lze určit amplitudu pulzací v pólových nastavcích:

$$\begin{aligned} B_{p2} &= \frac{t_{d1}}{2 \cdot t_{p2}} \cdot k_{c2} \cdot (k_{c1} - 1) \cdot B_{pnn} = \\ &= \frac{10,47 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 123,31 \cdot 10^{-3}} \cdot 1,248 \cdot (1,311 - 1) \cdot 0,78 = 0,01287 \text{ T.} \end{aligned} \quad (2.325)$$

Je také určeno ztrátové číslo pro pólové nastavce:

$$\Delta p_{pn(100-0,8)} = 2,62 \text{ W/kg,} \quad (2.326)$$

přičemž pro určení ztrátového čísla pro vířivé proudy v pólových nastavcích je použit vztah:

$$\Delta p_{v_{pn}} = \frac{\Delta p_{pn(100-0,8)}}{2} = \frac{2,62}{2} = 1,31 \text{ W/kg.} \quad (2.327)$$

Dále je určen objem pólového nastavce:

$$\begin{aligned} V_{pn} &= h_{pn}'' \cdot b_{pn}' \cdot L_p + \frac{D_2^2}{8} \cdot \left(\frac{2 \cdot b_{pn}}{D_2} - \sin \left(\frac{2 \cdot b_{pn}}{D_2} \right) \right) \cdot L_p = \\ &= 3,00 \cdot 10^{-3} \cdot 87,2 \cdot 10^{-3} \cdot 0,1705 + \\ &+ \frac{0,157^2}{8} \cdot \left(\frac{2 \cdot 92,5 \cdot 10^{-3}}{0,157} - \sin \left(\frac{2 \cdot 92,5 \cdot 10^{-3}}{0,157} \right) \right) \cdot 0,1705 = \\ &= 1,78 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3, \end{aligned} \quad (2.328)$$

a jeho hmotnost:

$$m_{pn} = \rho_{Fe} \cdot V_{pn} = 7650 \cdot 1,78 \cdot 10^{-4} = 1,364 \text{ kg,} \quad (2.329)$$

díky čemuž může být proveden výpočet pulzačních ztrát v pólových návstavech:

$$\begin{aligned}\Delta P_{pulz2} &= 8,3 \cdot \Delta p_{vpn} \cdot \left(\frac{Q \cdot n_n}{10000}\right)^2 \cdot \left(\frac{B_{p2}}{B_{refpn}}\right)^2 \cdot 2p \cdot m_{pn} = \\ &= 8,3 \cdot 1,31 \cdot \left(\frac{48 \cdot 3500}{10000}\right)^2 \cdot \left(\frac{0,01287}{0,8}\right)^2 \cdot 4 \cdot 1,364 = 4,33 \text{ W.}\end{aligned}\quad (2.330)$$

Jsou určeny také Jouleovy ztráty v budícím vinutí:

$$\Delta P_{jb} = R_b \cdot I_b^2 = 6,519 \cdot 9,28^2 = 628,14 \text{ W}, \quad (2.331)$$

a celkové ztráty ve stroji:

$$\begin{aligned}\Delta P &= \Delta P_j + \Delta P_p + \Delta P_m + \Delta P_{Fej1} + \Delta P_{Fez1} + \Delta P_{Fez2} + \Delta P_{pulz2} = \\ &= 990,13 + 350 + 270,82 + 380,59 + 110,85 + 86,83 + 4,33 = \\ &= 2193,56 \text{ W},\end{aligned}\quad (2.332)$$

přičemž Jouleovy ztráty v budícím vinutí nejsou do celkových ztrát započteny kvůli tomu, že celkové ztráty jsou využity k výpočtu účinnosti navrhovaného stroje, zatímco u budícího vinutí je předpokládáno napájení ze samostatného zdroje. Potřebný příkon budícího vinutí se tedy v potřebném příkonu navrhovaného stroje nijak neprojeví.

S využitím celkových ztrát lze tedy určit účinnost stroje při napájení sinusovým napětím:

$$\eta_{sin} = \frac{P_n}{P_n + \Delta P} = \frac{35 \cdot 10^3}{35 \cdot 10^3 + 2193,56} = 0,941, \quad (2.333)$$

účinnost stroje při napájení pomocí PWM:

$$\eta_{PWM} = \frac{P_n}{P_n + 1,2 \cdot \Delta P} = \frac{35 \cdot 10^3}{35 \cdot 10^3 + 1,2 \cdot 2193,56} = 0,9301, \quad (2.334)$$

a chybu účinnosti při napájení pomocí PWM při porovnání s hodnotou η zvolenou v (2.13):

$$\Delta \eta_{PWM} = \frac{\eta - \eta_{PWM}}{\eta} \cdot 100 = \frac{0,93 - 0,9301}{0,93} \cdot 100 = -0,006 \%. \quad (2.335)$$

2.9 Zatěžovací charakteristiky

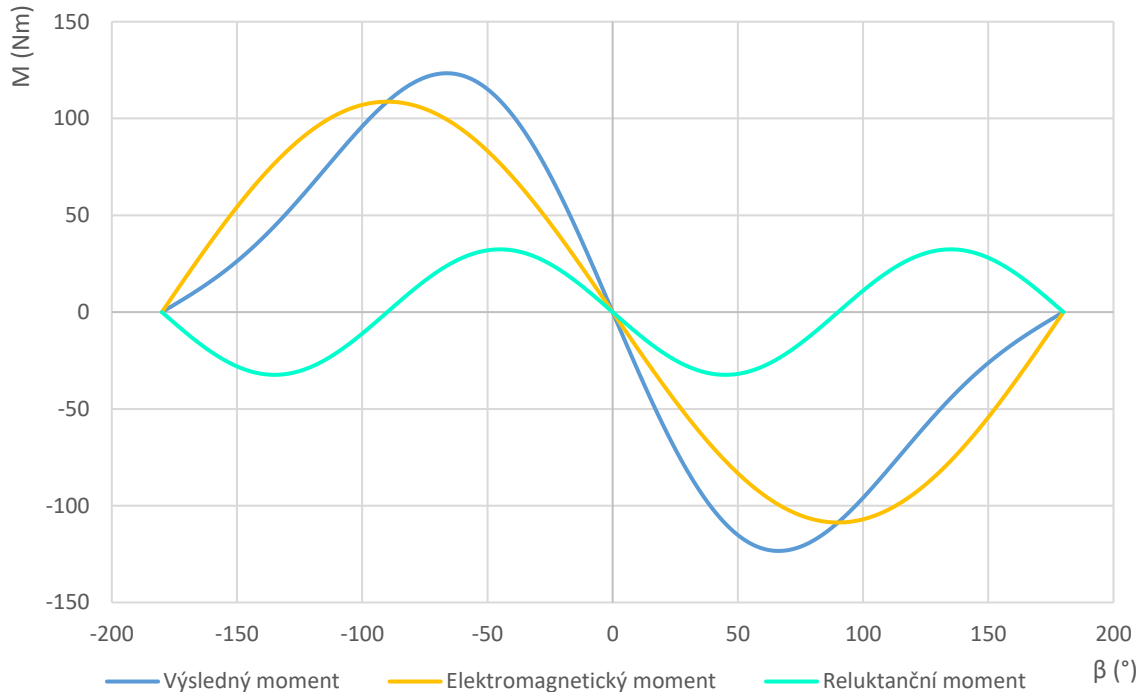
Pro navržený stroj platí vztah pro jmenovitý moment:

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n} = \frac{P_n}{\frac{\pi \cdot n_n}{30}} = \frac{35 \cdot 10^3}{\frac{\pi \cdot 3500}{30}} = 95,49 \text{ Nm}, \quad (2.336)$$

který odpovídá jedné hodnotě zátěžného úhlu β . Pro získání závislosti momentu a výkonu stroje na zátěžném úhlu jsou zkonstruovány zatěžovací charakteristiky.

Závislost momentu stroje na zátěžném úhlu, tedy momentová charakteristika, je získána rovnicí:

$$M = -\frac{p \cdot m}{\omega_1} \cdot U_{fn} \cdot \left[\frac{U_{ib}}{X_d} \cdot \sin(\beta) + \frac{U_{fn}}{2} \cdot \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cdot \sin(2 \cdot \beta) \right]. \quad (2.337)$$



Obr. 2.9: Momentová charakteristika

Na (Obr. 2.9) je vidět elektromagnetický moment navrženého stroje, který v (2.337) odpovídá části rovnice s funkcí $\sin(\beta)$, i jeho reluktanční moment, který v (2.337) odpovídá části rovnice s funkcí $\sin(2 \cdot \beta)$, přičemž výsledný moment stroje je tvořen součtem těchto dvou složek.

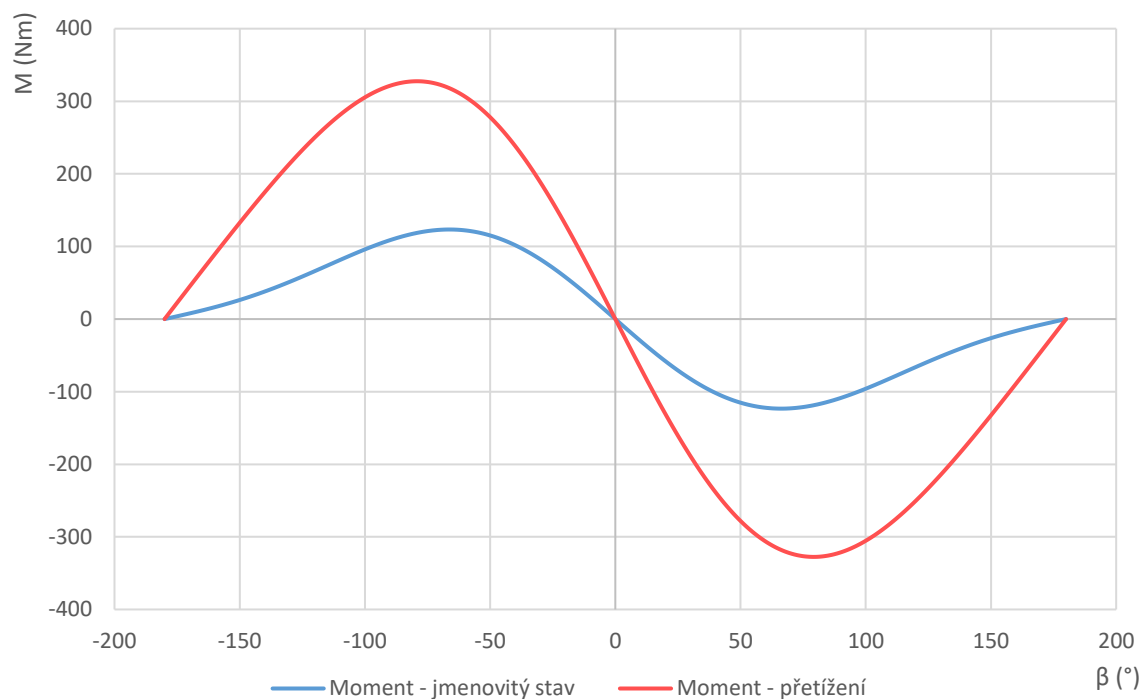
Momentová charakteristika na (Obr. 2.9) odpovídá jmenovitému stavu stroje, kdy budící proud má hodnotu určenou vztahem (2.291). V tomto stavu však není možné dosáhnout přetížení stroje určeného v (2.2), tedy 100 kW. Postupným zvyšováním hodnoty indukovaného napětí U_{ib} v (2.340) lze nalézt hodnotu indukovaného napětí:

$$U_{ibp} = 395,00 \text{ V}, \quad (2.338)$$

při kterém je umožněno přetížení až na výkon 120 kW, čímž je i při přetížení na požadovaných 100 kW ponechána 20% rezerva výkonu.

Potřebný budící proud pro dosažení U_{ibp} pak lze jednoduše určit jako:

$$I_{bp} = \frac{U_{ibp}}{U_{ib}} \cdot I_b = \frac{395,00}{133,59} \cdot 9,28 = 27,44 \text{ A}. \quad (2.339)$$

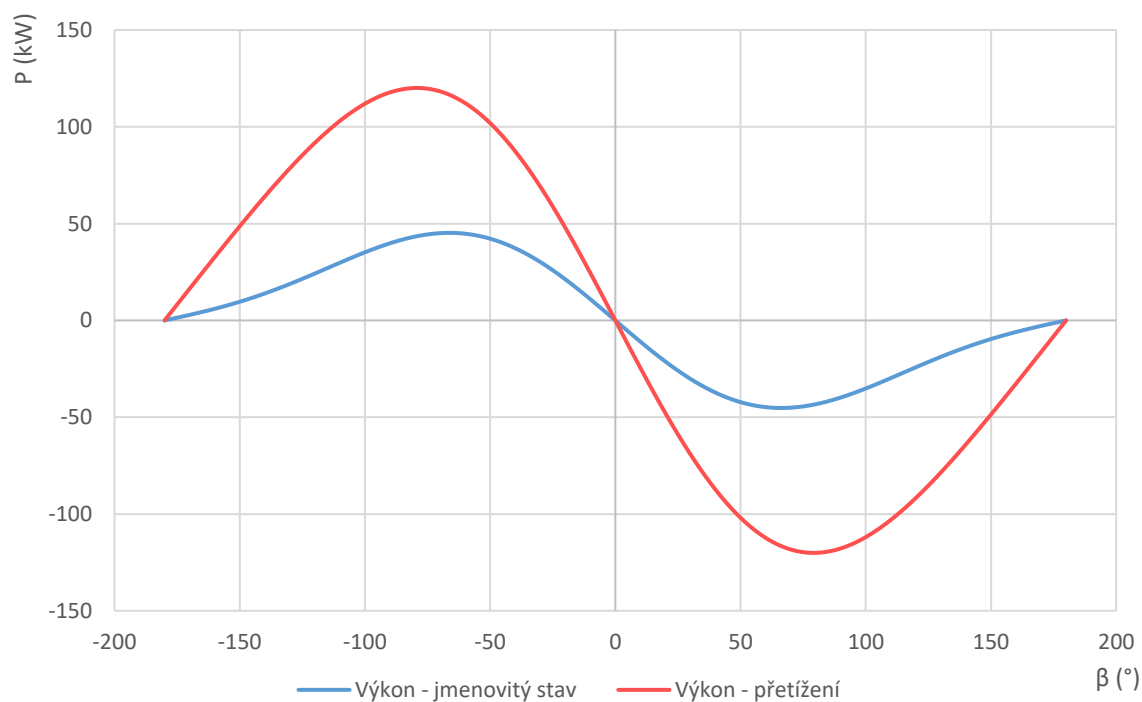


Obr. 2.10: Momentová charakteristika pro jmenovitý stav i přetížení

Na (Obr. 2.10) je vynesena momentová charakteristika navrženého stroje jak pro jmenovitý stav, tak i pro stav zvýšeného budícího proudu, který umožňuje přetížení stroje.

Pro získání závislosti výkonu stroje na zátěžném úhlu je využita rovnice:

$$P = -m \cdot U_{fn} \cdot \left[\frac{U_{ib}}{X_d} \cdot \sin(\beta) + \frac{U_{fn}}{2} \cdot \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cdot \sin(2 \cdot \beta) \right]. \quad (2.340)$$



Obr. 2.11: Závislost výkonu stroje na zátěžném úhlu pro jmenovitý stav i přetížení

Na (Obr. 2.11) je vynesena závislost výkonu stroje na zátěžném úhlu pro jmenovitý stav, ale i pro stav přetížení, kdy je ve stroji zvýšen budící proud tak, aby bylo možné dosáhnout požadovaného přetížení na 100 kW. Je zde, stejně jako na (Obr. 2.10), patrné, že při zvýšení budícího proudu dochází ke zvětšování maximálního zátěžného úhlu, neboť elektromagnetický moment je v tomto stavu navýšen, zatímco k navýšení reluktančního momentu nedochází.

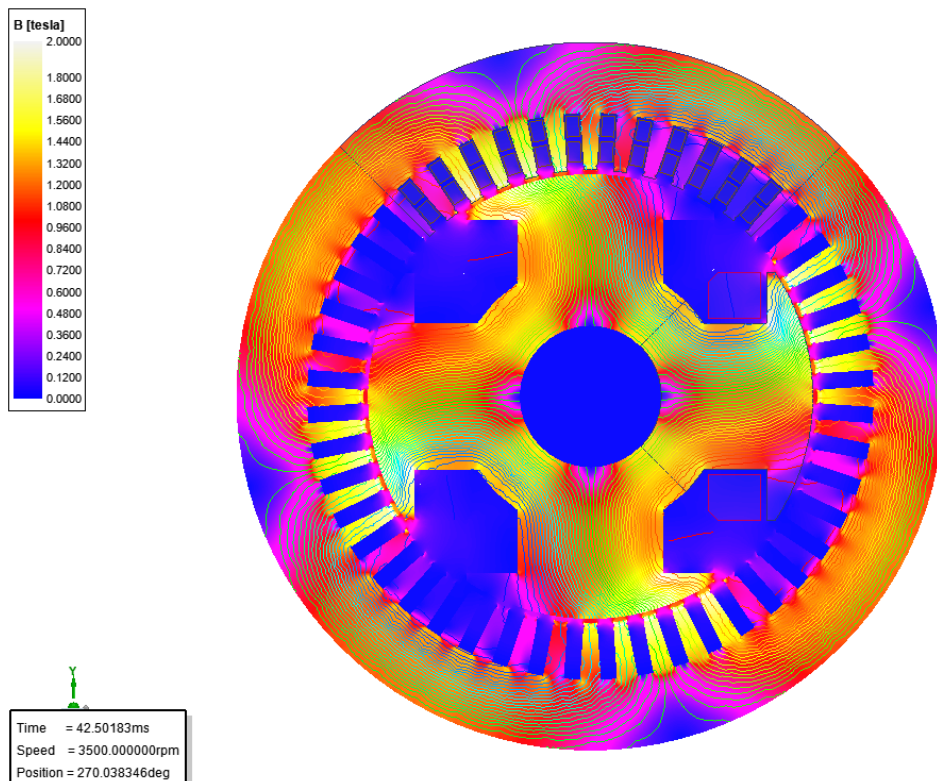
3 Analýza vlivu magnetických bariér

Navržený stroj má poměr indukčností v podélné a příčné ose daný svou konstrukcí. Jelikož velikost tohoto poměru indukčností má přímý vliv na velikost reluktančního momentu stroje, je vhodné tento poměr indukčností co nejvíce navýšit. Pokud má totiž stroj větší reluktanční moment, je u něj možné, při stejném zátěžném úhlu, dosáhnout požadovaného momentu při nižším budícím proudu, případně je možné při stejném budícím proudu a zátěžném úhlu stroj více zatížit.

Je tedy snaha, dosáhnout co nejmenší indukčnosti v příčné ose q , při zachování co největší indukčnosti v podélné ose d . Toho je možné dosáhnout pomocí magnetických bariér v rotoru stroje. V této kapitole je analyzován vliv počtu, umístění a rozměrů těchto magnetických bariér v několika vybraných uspořádáních na velikost indukčností stroje v podélné i příčné ose a na velikost jejich poměru.

3.1 Rotor bez magnetických bariér

Pro ověření analytického návrhu stroje, je nejprve provedena numerická analýza navrženého stroje bez magnetických bariér v rotoru.

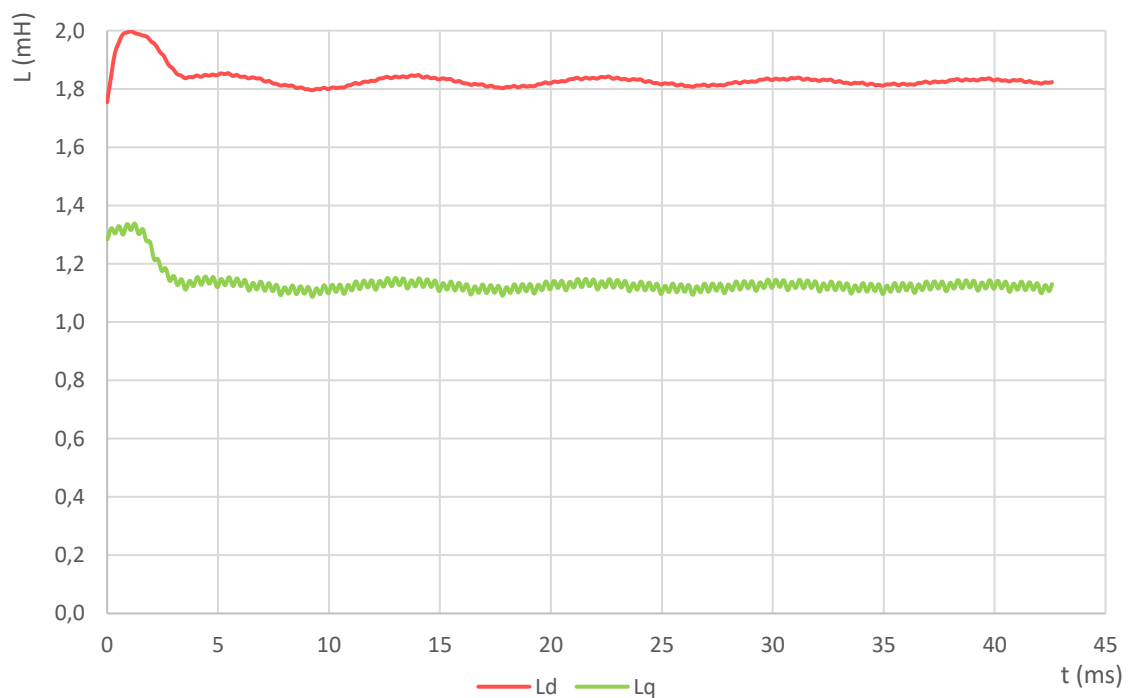


Obr. 3.1: Magnetická indukce a siločáry magnetického pole ve stroji bez magnetických bariér

Vzhledem k průběhu siločar magnetického pole a hodnotám indukce, které jsou patrné z (Obr. 3.1) je zřejmé, že kvůli zatížení stroje, které se projeví určitou velikostí zátěžného úhlu, dochází v rotorovém pólu k nerovnoměrnému rozložení magnetického toku, což se projeví různými hodnotami indukce v jednotlivých částech pólu. Tento vliv je podstatný zejména v pólovém nastavci, jehož jedna část je magnetickým tokem přesycována, zatímco v druhé části dosahuje indukce pouze velmi malých hodnot.

Pro navržený stroj bez magnetických bariér v rotoru jsou pomocí numerické analýzy vypočteny indukčnosti v podélné i příčné ose, aby bylo možné ověřit jejich hodnoty, které jsou získány během návrhu stroje.

Pro stroj bez magnetických bariér v rotoru je, stejně jako téměř ve všech ostatních analyzovaných případech, numerická analýza nastavena na pět period napájecího napětí, přičemž střední hodnoty indukčností jsou určovány pouze z poslední zaznamenané periody napájecího napětí.



Obr. 3.2: Indukčnosti stroje bez magnetických bariér v závislosti na čase

Na (Obr. 3.2) je vidět časový průběh indukčností stroje, jejichž střední hodnoty v ustáleném stavu jsou zaznamenány v (Tab. 3.1), kde je uveden i poměr indukčností v podélné a příčné ose, který udává vyniklost stroje.

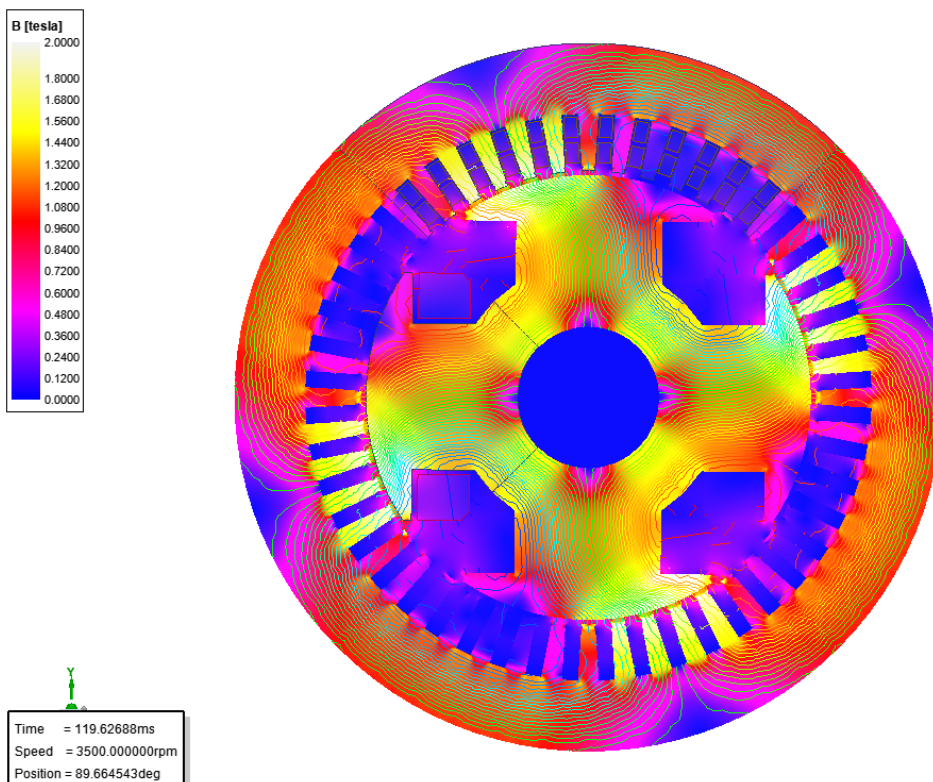
Tab. 3.1: Střední hodnoty indukčností stroje bez magnetických bariér a jejich poměr

L_d (mH)	L_q (mH)	L_d/L_q (-)
1,82	1,12	1,63

Tyto hodnoty poměrně přesně odpovídají hodnotám získaným během analytického návrhu vztahy (2.247) až (2.249), a kromě ověření analytického návrhu stroje jsou potřebné pro pozdější analýzu vlivu rotorových bariér na velikost indukčností stroje a jejich poměr.

3.2 Rotor bez magnetických bariér – přetížení

Pro navržený stroj bez magnetických bariér v rotoru je provedena numerická analýza také pro stav, kdy je buzen větším budícím proudem a je přetížen na výkon 100 kW. Díky tomu je možné získat například hodnoty indukčností stroje v tomto stavu, které nebyly určovány při jeho analytickém návrhu.

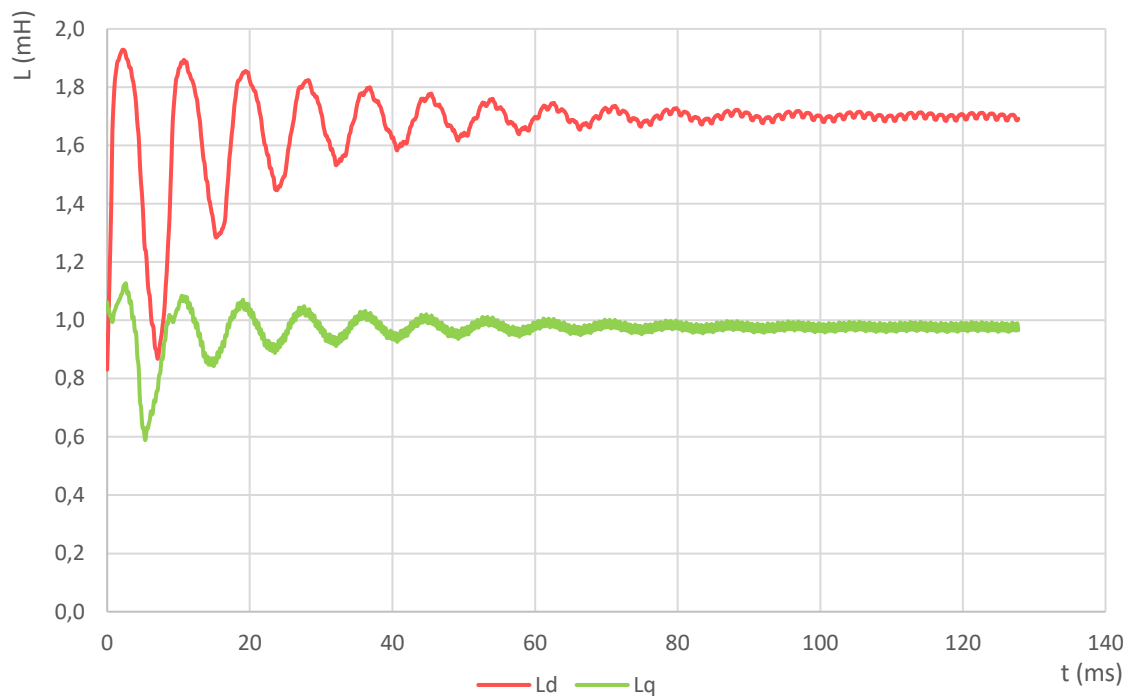


Obr. 3.3: Magnetická indukce a siločáry magnetického pole ve stroji bez magnetických bariér při přetížení

Na (Obr. 3.3) je, stejně jako na (Obr. 3.1), patrné stahování siločar magnetického pole k jedné straně rotorového pólu. Při porovnání se jmenovitým zatížením na (Obr. 3.1) zde dochází k podobně rovnoměrnému rozložení indukce v těle pólu. V rotoru vzhledem k přetížení motoru dochází k o něco výraznějšímu přesycování magnetického obvodu. V pólových nástavcích také stahování siločar k jedné straně nástavce způsobí, stejně jako na (Obr. 3.1), snížení indukce na jeho druhé straně. I přes tuto část pólového nástavce však protéká více magnetického toku, takže při porovnání s (Obr. 3.1), jsou v pravé části pólového

nástavce patrné vyšší hodnoty indukce. Na straně statoru pak dochází k výraznějšímu přesycování vybraných zubů, přes které protéká převážná část magnetického toku.

Pro stroj bez magnetických bariér v rotoru ve stavu přetížení je, jako pro jediný ze všech analyzovaných případů, numerická analýza nastavena na patnáct period napájecího napětí, přičemž střední hodnoty indukčností jsou i v tomto případě určovány pouze z poslední zaznamenané periody napájecího napětí.



Obr. 3.4: Indukčnosti stroje bez magnetických bariér při přetížení v závislosti na čase

Na (Obr. 3.4) jsou patrné závislosti indukčností v podélné i příčné ose na čase. Z poslední zaznamenané periody těchto průběhů jsou vypočteny střední hodnoty indukčností, které jsou, spolu s jejich poměrem, uvedeny v (Tab. 3.2).

Tab. 3.2: Střední hodnoty indukčností stroje bez magnetických bariér při přetížení a jejich poměr

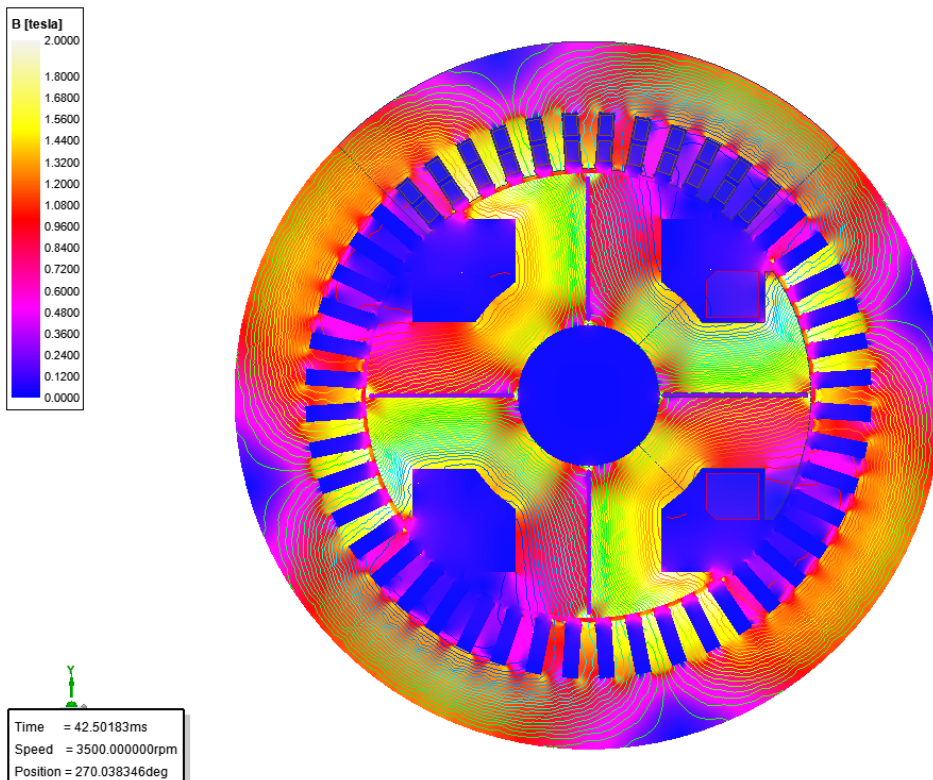
L_d (mH)	L_q (mH)	L_d/L_q (-)
1,70	0,98	1,74

Ze zaznamenaných hodnot je, při porovnání s hodnotami při jmenovitém zatížení stroje, patrný například delší čas, který je potřebný pro ustálení hodnot indukčností. Dále je zřejmé, že při přetížení dochází ke snížení střední hodnoty indukčností v podélné ose d , i v příčné ose q , přičemž indukčnost v příčné ose je omezena více. Důsledkem toho je zvýšení poměru

indukčností v podélné a příčné ose v porovnání s jeho hodnotou při jmenovitém zatížení stroje.

3.3 Jedna magnetická bariéra

Z vybraných uspořádání je jako první analyzován vliv jedné bariéry uprostřed pólu. Je zde popsán vliv šířky bariéry a její vzdálenosti od vnějšího i vnitřního průměru stroje. Jako bariéra je zde použita obdélníková drážka se zakulacenými konci, přičemž stejný tvar je použit i u všech ostatních analyzovaných uspořádání bariér.



Obr. 3.5: Magnetická indukce a siločáry magnetického pole ve stroji s jednou magnetickou bariérou

Na (Obr. 3.5) je vidět výrazný rozdíl mezi hodnotami indukci v levé a pravé části pólu. Stahování siločar magnetického pole k jedné straně pólu je sice způsobeno zátěžným úhlem stroje, nicméně tak vysoký rozdíl v hodnotách indukci na levé a pravé straně pólu způsobuje právě magnetická bariéra. Je zde patrné i přesycování magnetického obvodu v prostoru mezi bariérou a vnějším i vnitřním průměrem rotoru.

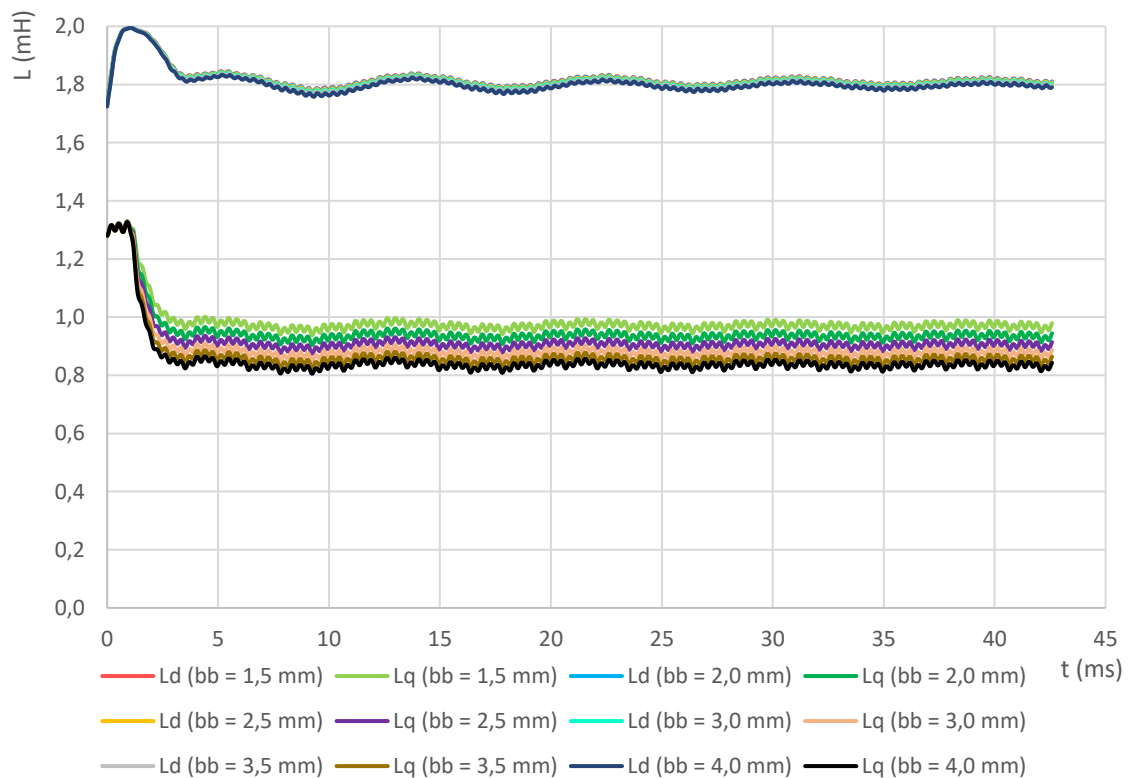
Vzhledem k množství různých rozměrů bariéry, které jsou analyzovány, je na (Obr. 3.5) zachyceno pouze magnetické pole při parametrech bariéry uvedených v (Tab. 3.3), kde b_b – šířka magnetické bariéry, d_{y1} – vzdálenost mezi bariérou a vnějším průměrem rotoru a d_{y2} – vzdálenost mezi bariérou a vnitřním průměrem rotoru.

Tab. 3.3: Jmenovité parametry magnetické bariéry stroje s jednou bariérou

b_b (mm)	1,5
d_{y1} (mm)	1,0
d_{y2} (mm)	1,0

Všechny hodnoty indukčností v podélné i příčné ose stroje jsou zaznamenávány v podobě grafů jejich závislostí na čase, ve kterých každé kombinaci parametrů magnetické bariéry odpovídá jeden průběh závislosti indukčností v podélné ose na čase a jeden průběh závislosti indukčností v příčné ose na čase. Pro větší přehlednost jsou pak střední hodnoty indukčností a jejich poměry zaznamenány v tabulkách.

3.3.1 Vliv šířky bariéry



Obr. 3.6: Indukčnosti stroje s jednou magnetickou bariérou v závislosti na čase pro různou šířku magnetické bariéry

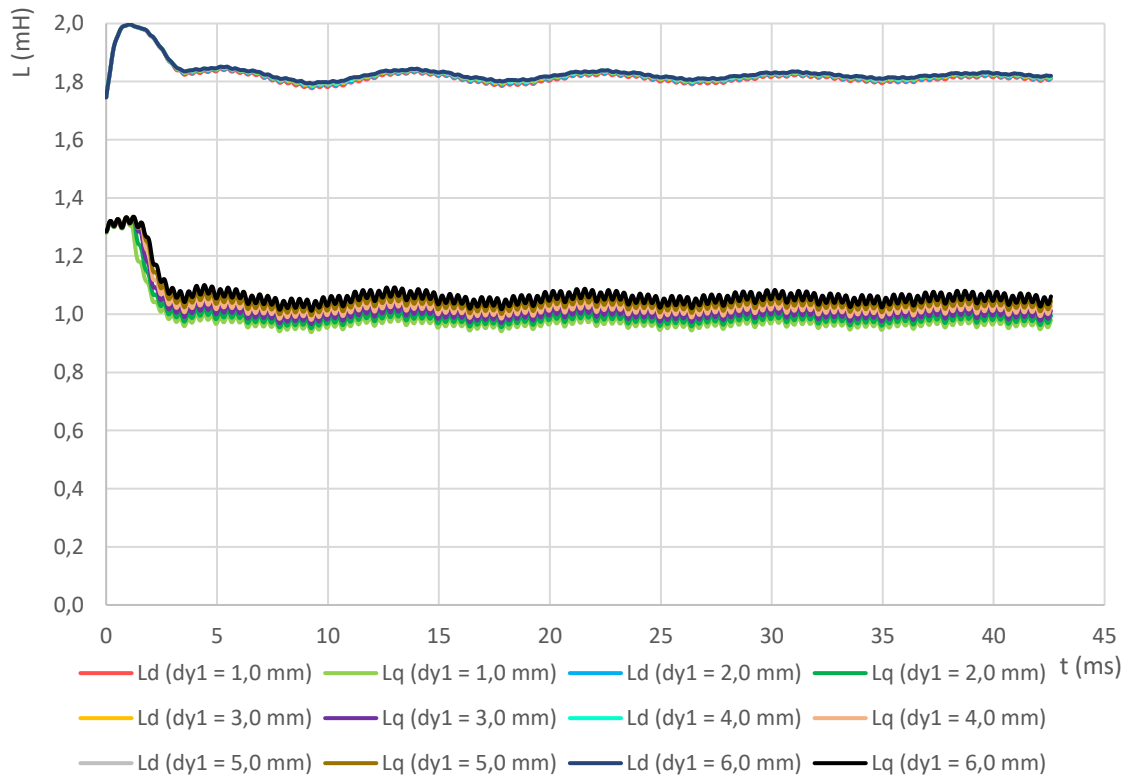
Na (Obr. 3.6) jsou zaznamenány časové průběhy indukčností stroje v podélné i příčné ose stroje. Parametrem magnetické bariéry, který je zde analyzován, je její šířka, zatímco ostatní parametry zůstávají na hodnotách uvedených v (Tab. 3.3). Střední hodnoty indukčností a jejich poměry jsou uvedeny v tabulce (Tab. 3.4).

Je zde vidět, že magnetická bariéra uprostřed pólu má již při šířce, která odpovídá velikosti vzduchové mezery analyzovaného stroje, významný vliv na zvýšení poměru indukčností stroje, přičemž při zvyšování šířky bariéry tento poměr dále roste. Dochází zde k významnému omezení indukčnosti v příčné ose q , zatímco indukčnost v podélné ose d je omezována minimálně.

Tab. 3.4: Střední hodnoty indukčností stroje s jednou magnetickou bariérou a jejich poměr v závislosti na šířce bariéry

b_b (mm)	L_d (mH)	L_q (mH)	L_d/L_q (-)
1,5	1,81	0,97	1,87
2,0	1,81	0,94	1,93
2,5	1,81	0,91	1,99
3,0	1,80	0,88	2,05
3,5	1,80	0,86	2,09
4,0	1,79	0,83	2,16

3.3.1 Vliv vzdálenosti mezi bariérou a vnějším průměrem rotoru



Obr. 3.7: Indukčnosti stroje s jednou magnetickou bariérou v závislosti na čase pro různou vzdálenost mezi bariérou a vnějším průměrem rotoru

Na (Obr. 3.7) je možné vidět závislost indukčností stroje na čase, a to při různých hodnotách vzdálenosti magnetické bariéry od vnějšího průměru rotoru. Hodnoty ostatních parametrů jsou ponechány na jmenovitých hodnotách, které jsou uvedeny v (Tab. 3.3). Z těchto závislostí jsou získány střední hodnoty indukčností, které jsou spolu s jejich poměry uvedeny v (Tab. 3.5).

Z uvedených hodnot je patrné, že při zvětšující se vzdálenosti bariéry od vnějšího průměru rotoru dochází k nárůstu indukčností v podélné i příčné ose, přičemž indukčnost v příčné ose se zvyšuje výrazněji a dochází tak ke snižování vyniklosti. Velikost této vzdálenosti má však na poměr indukčností v podélné a příčné ose menší vliv než šířka magnetické bariéry.

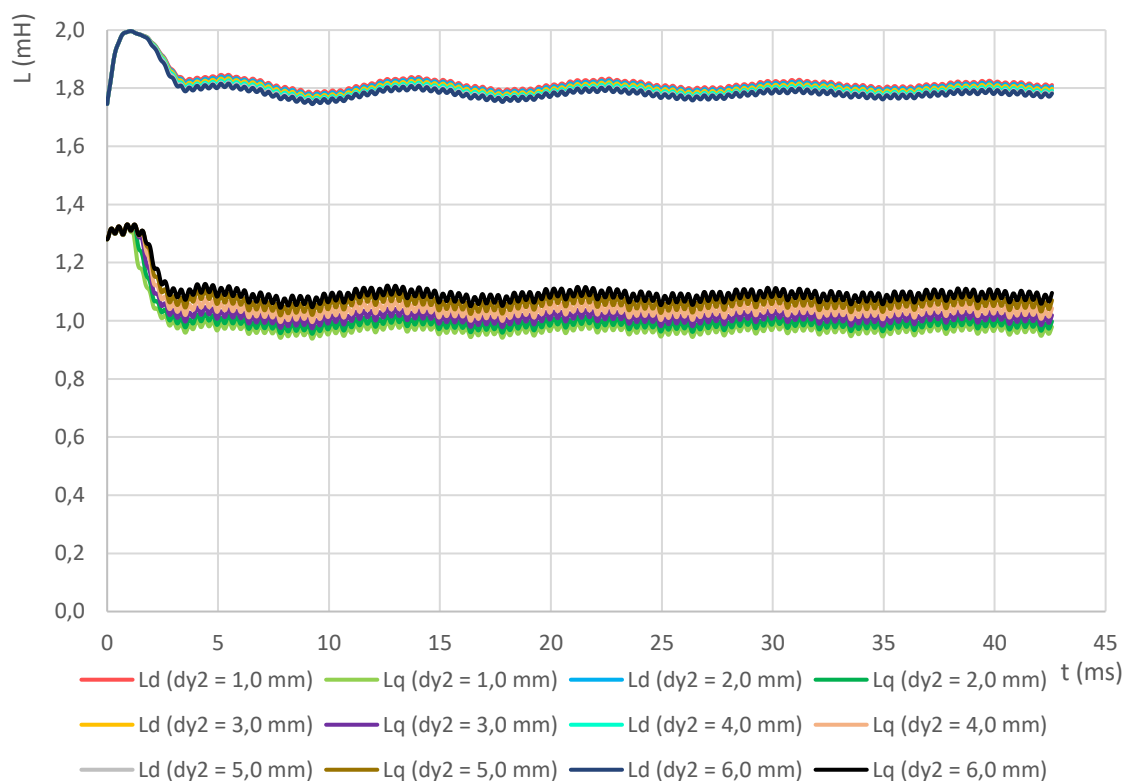
Tab. 3.5: Střední hodnoty indukčností stroje s jednou magnetickou bariérou a jejich poměr v závislosti na vzdálenosti bariéry od vnějšího průměru rotoru

d_{y1} (mm)	L_d (mH)	L_q (mH)	L_d/L_q (-)
1,0	1,81	0,97	1,87
2,0	1,81	0,99	1,83
3,0	1,82	1,00	1,82
4,0	1,82	1,02	1,78
5,0	1,82	1,04	1,75
6,0	1,82	1,05	1,73

3.3.2 Vliv vzdálenosti mezi bariérou a vnitřním průměrem rotoru

Na (Obr. 3.8) jsou patrné indukčnosti stroje v jeho podélné i příčné ose v závislosti na čase, přičemž je zde vidět vliv vzdálenosti magnetické bariéry od vnitřního průměru rotoru. Ostatním parametrům jsou opět ponechány hodnoty podle (Tab. 3.3). V (Tab. 3.6) jsou pak zapsány střední hodnoty získané z uvedených průběhů včetně poměru těchto středních hodnot pro podélnou a příčnou osu stroje.

Jak je ze zaznamenaných hodnot patrné, dochází při růstu vzdálenosti mezi bariérou a vnitřním průměrem rotoru k růstu indukčnosti v příčné ose, zatímco indukčnost v podélné ose stroje mírně klesá, na rozdíl od předchozího případu, kdy zvětšující se vzdálenost mezi bariérou a vnějším průměrem rotoru způsobila mírné zvětšení indukčnosti v podélné ose. Důsledkem toho je snižování poměru indukčností v podélné a příčné ose stroje, tedy snižování vyniklosti navrženého stroje.



Obr. 3.8: Indukčnosti stroje s jednou magnetickou bariérou v závislosti na čase pro různou vzdálenost mezi bariérou a vnitřním průměrem rotoru

Tab. 3.6: Střední hodnoty indukčností stroje s jednou magnetickou bariérou a jejich poměr v závislosti na vzdálenosti bariéry od vnitřního průměru rotoru

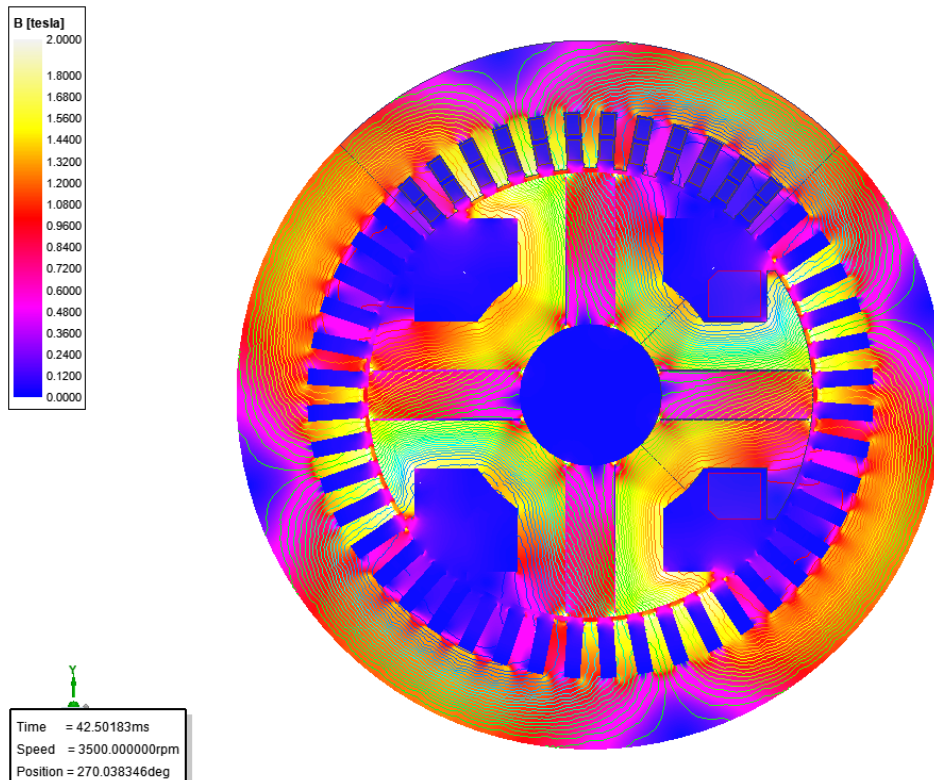
d_{y2} (mm)	L_d (mH)	L_q (mH)	L_d/L_q (-)
1,0	1,81	0,97	1,87
2,0	1,80	0,99	1,82
3,0	1,80	1,01	1,78
4,0	1,79	1,03	1,74
5,0	1,78	1,06	1,68
6,0	1,78	1,09	1,63

Při porovnání hodnot poměru indukčností v podélné a příčné ose stroje, které jsou uvedeny v (Tab. 3.5), s hodnotami z (Tab. 3.6), je patrné, že zvyšování vzdálenosti mezi magnetickou bariérou a vnitřním průměrem rotoru má na vyniklost stroje větší vliv než zvyšování vzdálenosti mezi magnetickou bariérou a vnějším průměrem rotoru. Na základě získaných výsledků lze tedy prohlásit, že pokud je nutné zvětšovat prostor pro magnetický

obvod v ose bariéry, je lepší toto provést v prostoru nad bariérou, a nikoliv v prostoru pod ní.

3.4 Dvě magnetické bariéry

Dalším analyzovaným uspořádáním magnetických bariér jsou dvě bariéry, které dělí tělo pólu na třetiny. I zde je popsán vliv šířky bariéry a její vzdálenosti od vnějšího i vnitřního průměru stroje.



Obr. 3.9: Magnetická indukce a siločáry magnetického pole ve stroji se dvěma magnetickými bariérami

Na (Obr. 3.9) je patrné nerovnoměrné rozložení indukce v pólu. V levé části pólu dochází místy k přesycování magnetického obvodu, zatímco v prostřední části pólu je indukce mnohem menší. V pravé části pólu je pak indukce rozložena podobně jako ve stroji bez bariér (Obr. 3.1), tedy tak, že u dolního okraje pólu je magnetický obvod přesycován, a směrem nahoru se indukce snižuje, přičemž v pravé části pólového nástavce je, podobně jako u ostatních uspořádání, téměř nulová. Podobně jako v předchozím uspořádání s jednou magnetickou bariérou dochází i zde k přesycování magnetického obvodu v prostoru mezi bariérou a vnějším i vnitřním průměrem rotoru.

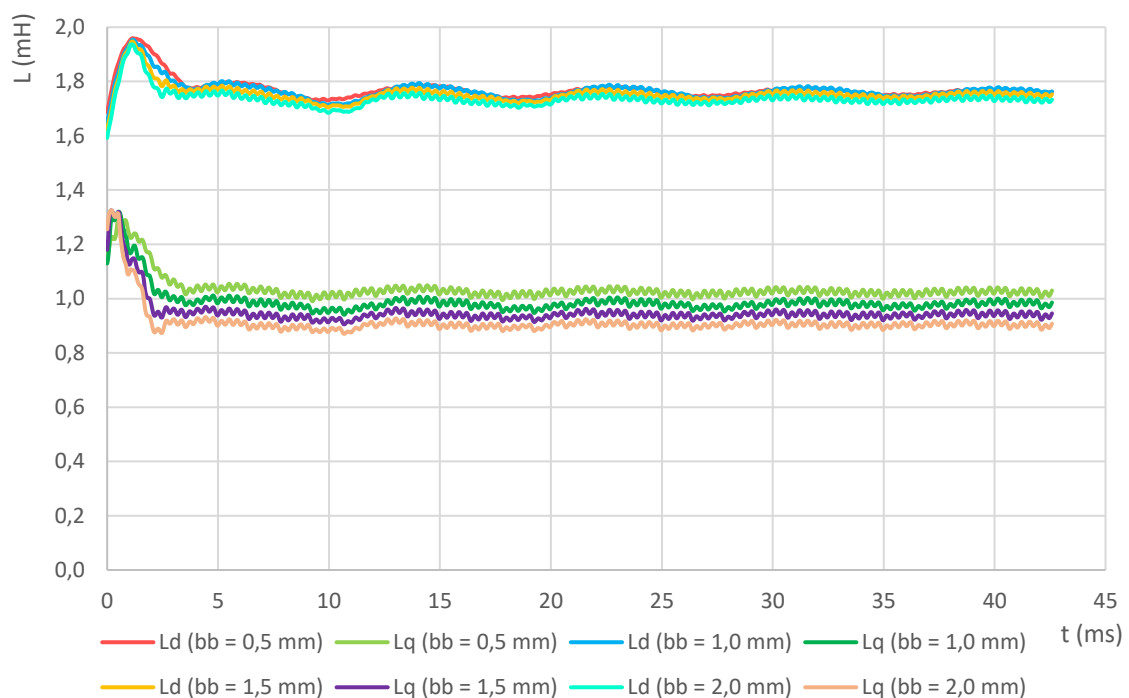
Z různých analyzovaných rozměrů bariéry je na (Obr. 3.9) zachycen pouze stav, kdy rozměry jedné bariéry odpovídají hodnotám uvedeným v (Tab. 3.7), kde b_b – šířka

magnetické bariéry, d_{y1} – vzdálenost mezi bariérou a vnějším průměrem rotoru a d_{y2} – vzdálenost mezi bariérou a vnitřním průměrem rotoru.

Tab. 3.7: Jmenovité parametry magnetických bariér stroje se dvěma bariérami

b_b (mm)	0,5
d_{y1} (mm)	1,0
d_{y2} (mm)	1,0

3.4.1 Vliv šířky bariéry



Obr. 3.10: Indukčnosti stroje se dvěma magnetickými bariérami v závislosti na čase pro různou šířku magnetické bariéry

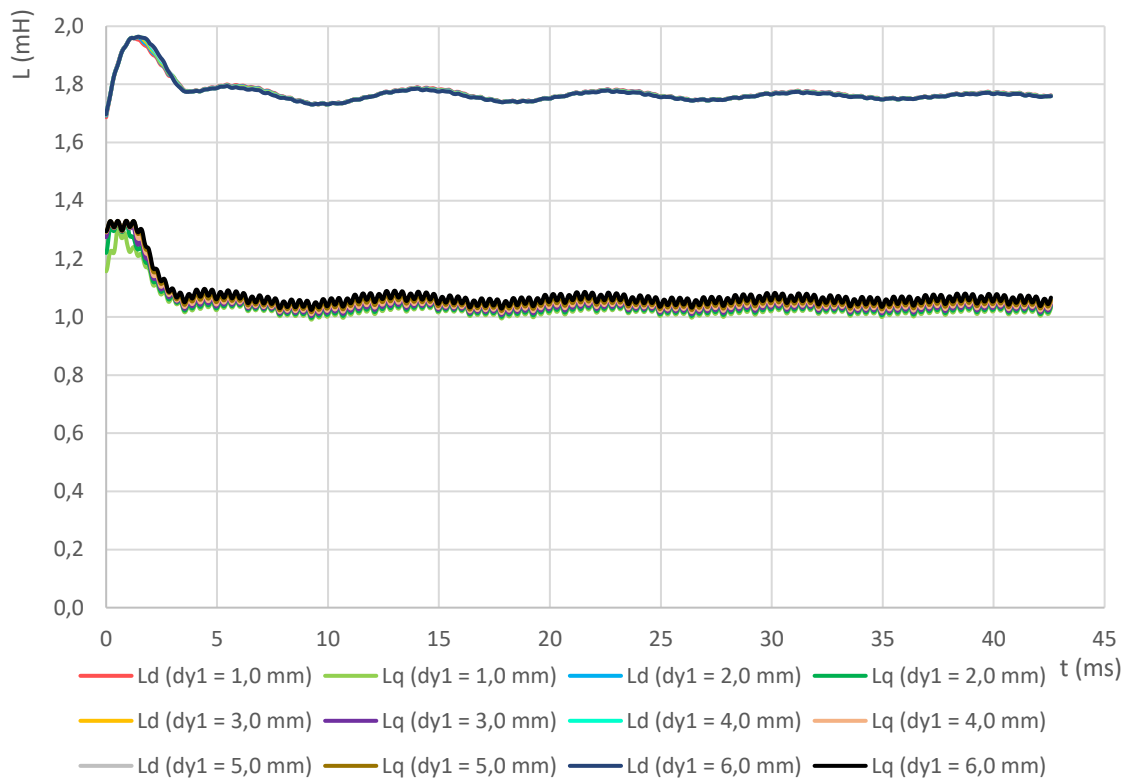
Na (Obr. 3.10) jsou zobrazeny závislosti indukčností stroje na čase. Je zde analyzován vliv šířky magnetické bariéry, přičemž se jedná o šířku každé ze dvou bariér v pólu. Ostatní parametry bariéry zůstávají na hodnotách uvedených v (Tab. 3.7). Z poslední zaznamenané periody těchto průběhů jsou vypočteny střední hodnoty indukčností, které jsou spolu s jejich poměry uvedeny v (Tab. 3.8).

Ze zaznamenaných hodnot je zřejmé, že při zvětšování šířky bariér dochází k nepatrnému snížení indukčností stroje v podélné ose, zatímco indukčnost v příčné ose je omezoována výrazně více, díky čemuž se při zvětšující se šířce bariér zvyšuje poměr indukčností stroje v podélné a příčné ose.

Tab. 3.8: Střední hodnoty indukčností stroje se dvěma magnetickými bariérami a jejich poměr v závislosti na šířce bariéry

b_b (mm)	L_d (mH)	L_q (mH)	L_d/L_q (-)
0,5	1,76	1,02	1,73
1,0	1,76	0,98	1,80
1,5	1,75	0,94	1,86
2,0	1,73	0,90	1,92

3.4.2 Vliv vzdálenosti mezi bariérou a vnějším průměrem rotoru



Obr. 3.11: Indukčnosti stroje se dvěma magnetickými bariérami v závislosti na čase pro různou vzdálenost mezi bariérou a vnějším průměrem rotoru

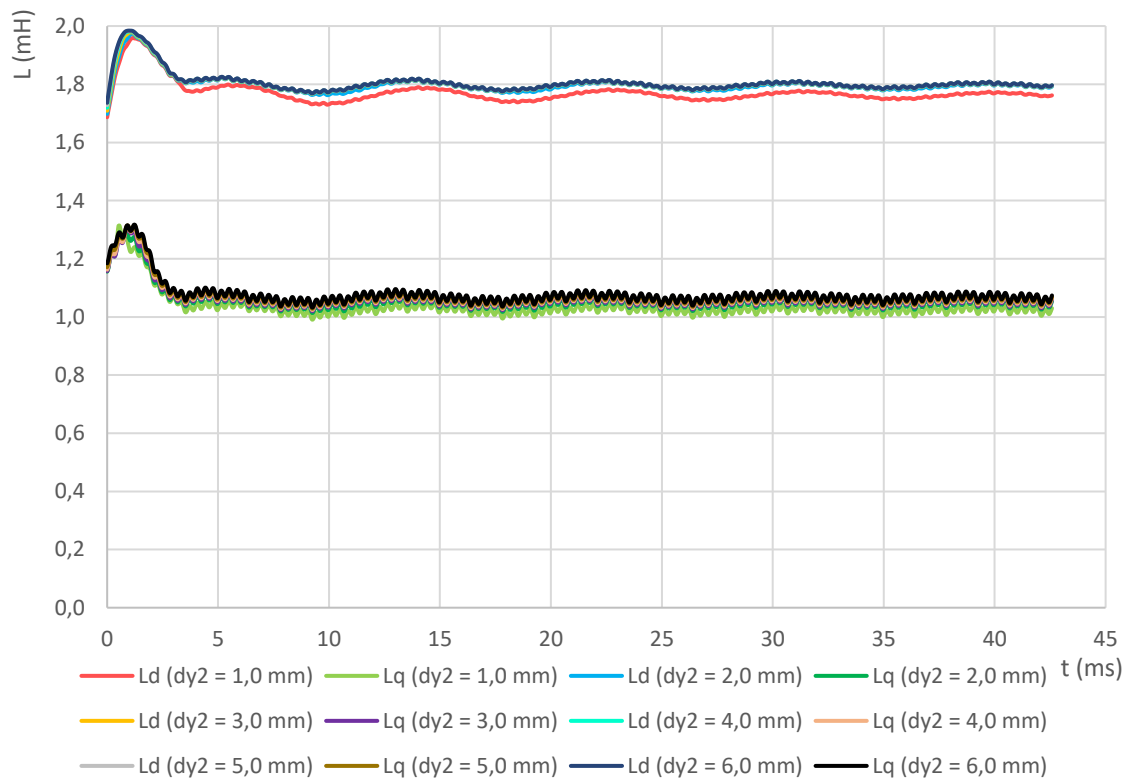
Na (Obr. 3.11) jsou zachyceny časové závislosti indukčností stroje v podélné i příčné ose. Parametrem, který je zde analyzován, je vzdálenost magnetické bariéry od vnějšího průměru rotoru, přičemž tato vzdálenost je pro obě bariéry stejná. Ostatním parametrům jsou ponechány jmenovité hodnoty, uvedené v (Tab. 3.7). Střední hodnoty těchto indukčností jsou spolu s jejich poměry uvedeny v (Tab. 3.9).

Z těchto hodnot je patrné, že zvětšující se vzdálenost mezi bariérou a vnějším průměrem rotoru nemá vliv na indukčnost v podélné ose d , ale dochází ke zvětšování indukčnosti v příčné ose q . Zvětšování této vzdálenosti tedy způsobuje snižování vyniklosti stroje.

Tab. 3.9: Střední hodnoty indukčností stroje se dvěma magnetickými bariérami a jejich poměr v závislosti na vzdálenosti bariéry od vnějšího průměru rotoru

d_{y1} (mm)	L_d (mH)	L_q (mH)	L_d/L_q (-)
1,0	1,76	1,02	1,73
2,0	1,76	1,03	1,71
3,0	1,76	1,04	1,69
4,0	1,76	1,04	1,69
5,0	1,76	1,05	1,68
6,0	1,76	1,06	1,66

3.4.3 Vliv vzdálenosti mezi bariérou a vnitřním průměrem rotoru



Obr. 3.12: Indukčnosti stroje se dvěma magnetickými bariérami v závislosti na čase pro různou vzdálenost mezi bariérou a vnitřním průměrem rotoru

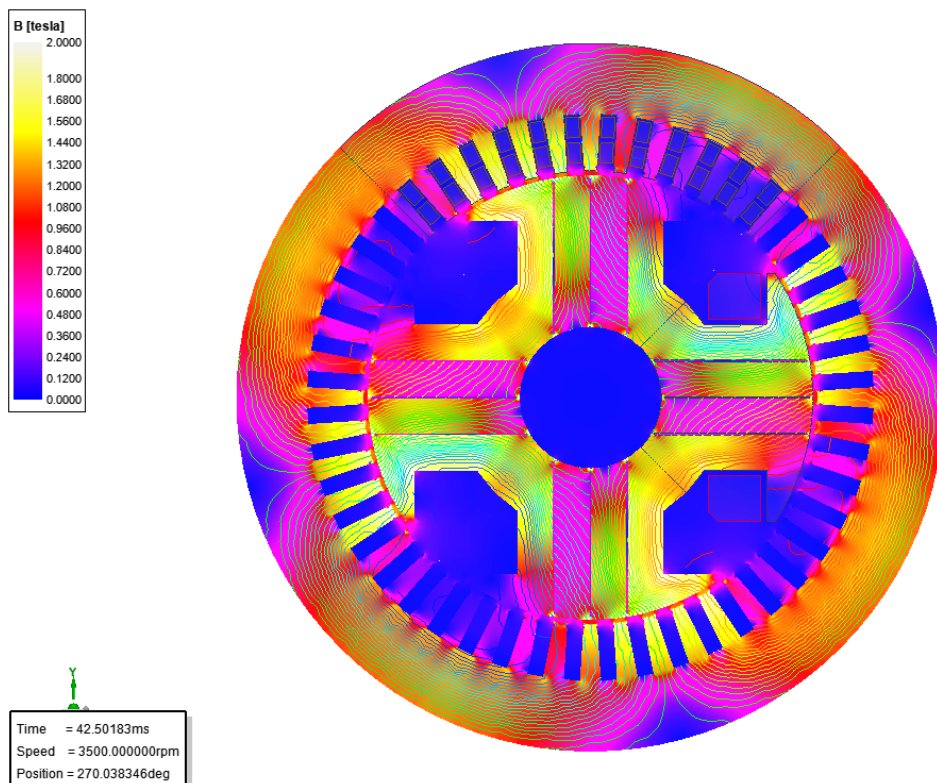
Na (Obr. 3.12) jsou zaznamenány indukčnosti stroje v závislosti na čase. Je zde analyzován vliv vzdálenosti mezi magnetickou bariérou a vnitřním průměrem stroje, která je stejná pro obě bariéry. Ostatním parametrům bariéry jsou pak ponechány jmenovité hodnoty, které jsou uvedeny v (Tab. 3.7). V (Tab. 3.10) jsou zapsány střední hodnoty indukčností, získané z poslední zaznamenané periody uvedených průběhů, včetně jejich poměru.

Z uvedených hodnot je zřejmé, že při zvětšování vzdálenosti mezi bariérou a vnitřním průměrem rotoru, dochází ke zvětšování indukčnosti jak v podélné, tak příčné ose stroje, přičemž indukčnost v příčné ose roste rychleji a růst této vzdálenosti tak způsobuje snižování poměru indukčností v podélné a příčné ose.

Tab. 3.10: Střední hodnoty indukčností stroje se dvěma magnetickými bariérami a jejich poměr v závislosti na vzdálenosti bariéry od vnitřního průměru rotoru

d_{y2} (mm)	L_d (mH)	L_q (mH)	L_d/L_q (-)
1,0	1,76	1,02	1,73
2,0	1,79	1,05	1,70
3,0	1,80	1,05	1,71
4,0	1,80	1,06	1,70
5,0	1,80	1,06	1,70
6,0	1,80	1,07	1,68

3.5 Tři magnetické bariéry



Obr. 3.13: Magnetická indukce a siločáry magnetického pole ve stroji se třemi magnetickými bariérami

Dalším analyzovaným uspořádáním magnetických bariér v pólu stroje jsou tři bariéry, které jsou přes šířku pólu rovnoměrně rozmístěny a dělí tak tělo pólu na čtvrtiny. Je zde popsán vliv šířky bariéry a její vzdálenosti od vnějšího i vnitřního průměru stroje, ale na rozdíl od předchozího uspořádání jsou zde kromě případů, kdy mají všechny bariéry nastaveny stejnou šířku i vzdálenost od vnějšího i vnitřního průměru stroje, analyzovány i případy, kdy se tyto parametry pro krajní bariéry liší od prostřední bariéry.

Na (Obr. 3.13) je vidět, že i při uspořádání se třemi bariérami dochází k nerovnoměrnému rozložení indukce v pólu. Levá část pólu je opět přesycována a v pravé části dochází od spodní části pólu směrem k jeho horní části ke snižování indukce. Výrazný rozdíl je však patrný především v místech mezi bariérami. Mezi prostřední a levou bariérou dosahuje indukce menších hodnot ve spodní části tohoto prostoru a v horní části dochází k přesycování. V prostoru mezi prostřední a pravou bariérou jsou pak poměrně malé hodnoty indukce, jejíž hodnota je navíc podobná v celém tomto prostoru.

Kvůli velkému množství analyzovaných rozměrů bariér je na (Obr. 3.13) zachycen pouze stav, kdy parametry bariér odpovídají hodnotám uvedeným v (Tab. 3.11), kde b_{b1} – šířka prostřední magnetické bariéry, b_{b2} – šířka krajní magnetické bariéry, d_{y1a} – vzdálenost mezi prostřední bariérou a vnějším průměrem rotoru, d_{y1b} – vzdálenost mezi krajní bariérou a vnějším průměrem rotoru, d_{y2a} – vzdálenost mezi prostřední bariérou a vnitřním průměrem rotoru a d_{y2b} – vzdálenost mezi krajní bariérou a vnitřním průměrem rotoru.

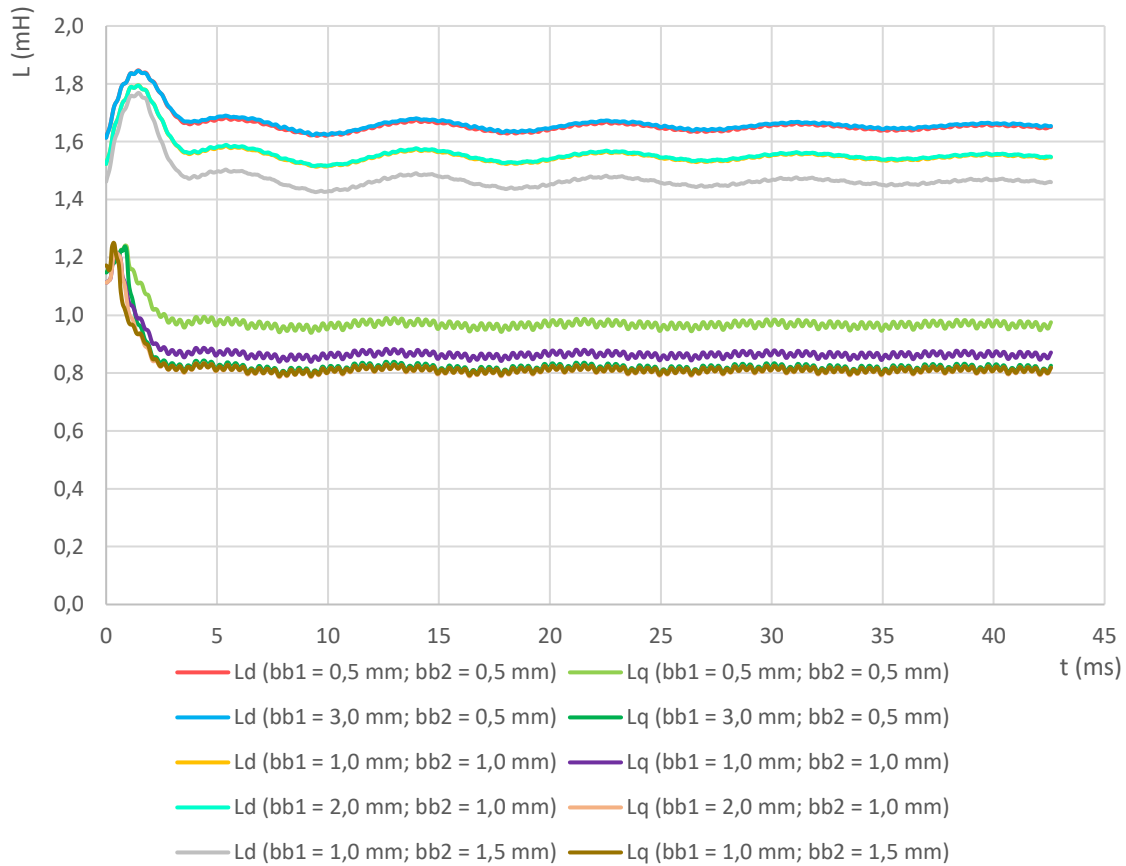
Tab. 3.11: Jmenovité parametry magnetických bariér stroje se třemi bariérami

b_{b1} (mm)	0,5
b_{b2} (mm)	0,5
d_{y1a} (mm)	1,0
d_{y1b} (mm)	1,0
d_{y2a} (mm)	1,0
d_{y2b} (mm)	1,0

3.5.1 Vliv šířky bariér

Na (Obr. 3.14) jsou zaznamenány indukčnosti stroje v jeho podélné i příčné ose v závislosti na čase. Je zde analyzován vliv šířky bariér, přičemž šířka každé ze dvou krajních bariér b_{b2} a šířka prostřední bariéry b_{b1} jsou nastavovány buď na stejné hodnoty tak, aby jejich souhrnná šířka nepřesáhla 4 mm, tedy maximální šířku bariéry v uspořádání

s jednou magnetickou bariérou, nebo na rozdílné hodnoty, ale vždy tak, aby součet šířek všech tří bariér dal dohromady souhrnnou šířku 4 mm. Ostatní parametry zůstávají na hodnotách, které jsou uvedeny v (Tab. 3.11). Získané střední hodnoty indukčností a jejich poměry jsou pak zaznamenány v (Tab. 3.12).



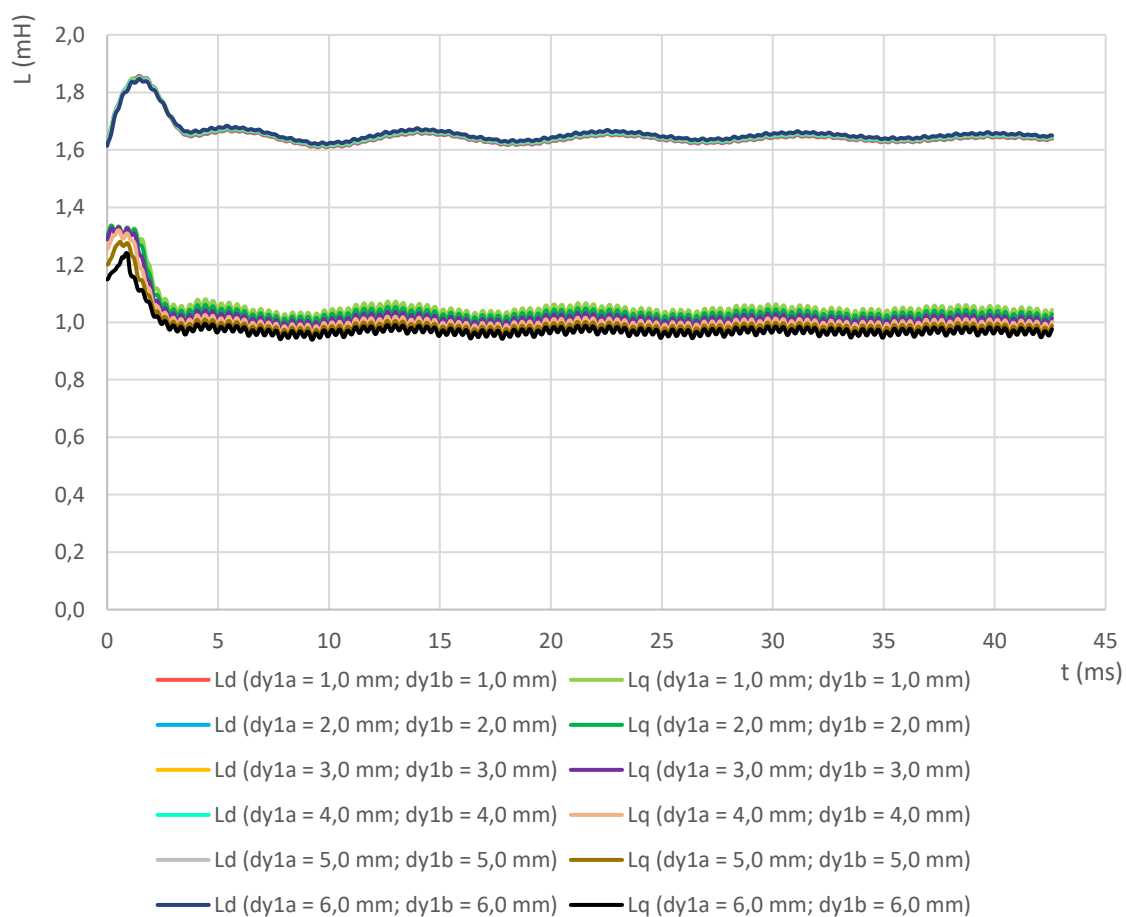
Obr. 3.14: Indukčnosti stroje se třemi magnetickými bariérami v závislosti na čase pro různé šířky magnetických bariér

Z těchto hodnot je zřejmé, že v případě, kdy je jak prostřední, tak každé z krajních bariér nastavena stejná šířka, způsobuje větší šířka bariér omezení indukčnosti v podélné ose d , tak i v příčné ose q , přičemž indukčnost v příčné ose je omezena o trochu více, což způsobuje zvětšení poměru indukčností v podélné a příčné ose, tedy zvýšení vyniklosti. Pokud se však šířka prostřední bariéry liší od šířky krajní bariéry, a souhrnná šířka všech tří bariér je 4 mm, je ze zaznamenaných hodnot patrné, že výhodnější je případ, kdy je prostřední bariéra široká a krajní bariéry jsou úzké, neboť při postupném zužování prostřední bariéry a současném rozšiřování krajních bariér dochází ke snižování poměru indukčností v podélné a příčné ose stroje, tedy ke snižování vyniklosti. Podle (Tab. 3.12) je tedy z analyzovaných kombinací šířek bariér nejvýhodnější případ, kdy $b_{b1} = 3,0$ mm, a $b_{b2} = 0,5$ mm.

Tab. 3.12: Střední hodnoty indukčností stroje se třemi magnetickými bariérami a jejich poměr v závislosti na šířce bariér

b_{b1} (mm)	b_{b2} (mm)	L_d (mH)	L_q (mH)	L_d/L_q (-)
0,5	0,5	1,65	0,97	1,70
3,0	0,5	1,66	0,82	2,02
1,0	1,0	1,55	0,86	1,80
2,0	1,0	1,55	0,81	1,91
1,0	1,5	1,46	0,81	1,80

3.5.2 Vliv vzdálenosti mezi bariérou a vnějším průměrem rotoru



Obr. 3.15: Indukčností stroje se třemi magnetickými bariérami v závislosti na čase pro různou vzdálenost mezi bariérami a vnějším průměrem rotoru (stejně hodnoty vzdáleností)

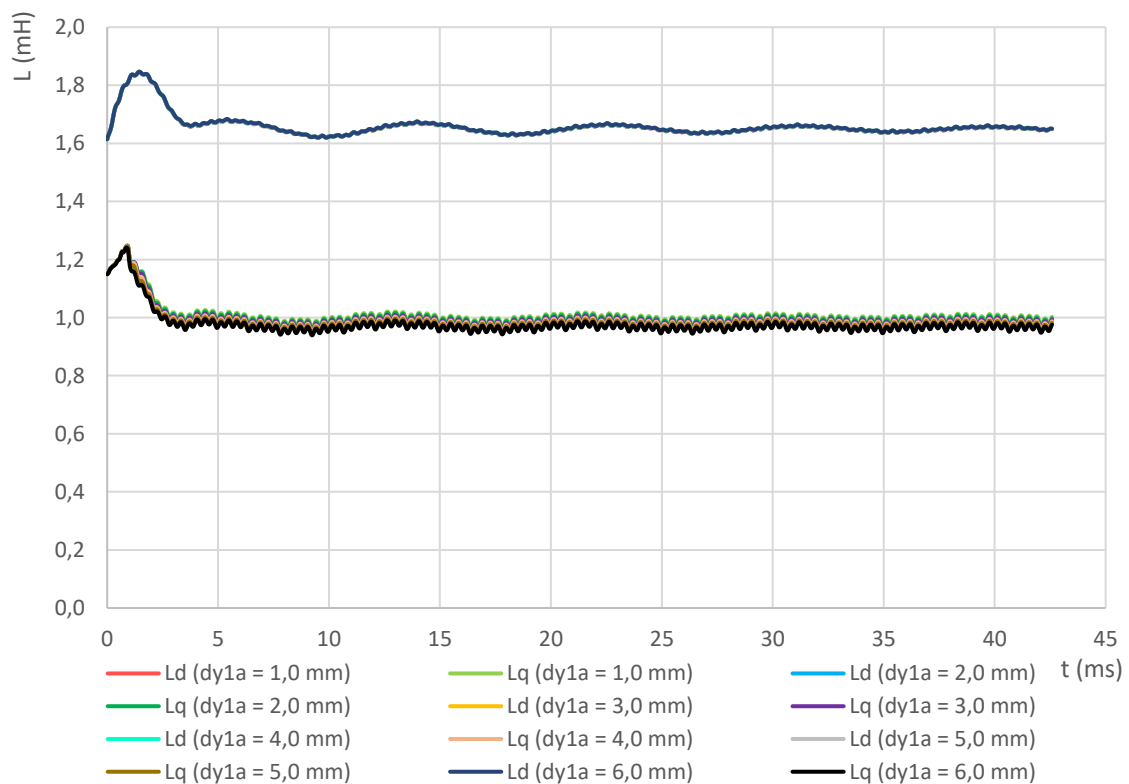
Na (Obr. 3.15) jsou patrné závislosti indukčností stroje na čase. Analyzovaným parametrem je zde vzdálenost bariér od vnějšího průměru rotoru, která je zde nastavena na stejné hodnoty jak pro prostřední bariéru, tak i pro krajní bariéry. Ostatní parametry jsou ponechány na jmenovitých hodnotách, které jsou uvedeny v (Tab. 3.11). Z poslední

zaznamenané periody uvedených průběhů jsou získány střední hodnoty indukčností, jejichž hodnoty jsou zapsány v (Tab. 3.13).

Z těchto hodnot je patrné, že pokud je vzdálenost mezi všemi bariérami a vnějším průměrem rotoru nastavena na stejnou hodnotu, tak při zvětšování této vzdálenosti dochází k mírnému poklesu indukčností v podélné ose a k mírnému nárůstu indukčností v příčné ose, tedy ke snižování poměru těchto indukčností.

Tab. 3.13: Střední hodnoty indukčností stroje se třemi magnetickými bariérami a jejich poměr v závislosti na vzdálenosti bariér od vnějšího průměru rotoru (stejně hodnoty vzdáleností)

d_{y1a} (mm)	d_{y1b} (mm)	L_d (mH)	L_q (mH)	L_d/L_q (-)
1,0	1,0	1,65	0,97	1,70
2,0	2,0	1,65	0,98	1,68
3,0	3,0	1,65	0,99	1,67
4,0	4,0	1,64	1,01	1,62
5,0	5,0	1,64	1,02	1,61
6,0	6,0	1,64	1,04	1,58



Obr. 3.16: Indukčnosti stroje se třemi magnetickými bariérami v závislosti na čase pro různou vzdálenost mezi prostřední bariérou a vnějším průměrem rotoru

Vzdálenost bariéry od vnějšího průměru rotoru však nemusí být nastavena pro všechny bariéry na stejnou hodnotu. Časová závislost indukčností stroje pro tento případ je vynesena na (Obr. 3.16). Je zde analyzován vliv vzdálenosti mezi bariérami a vnějším průměrem rotoru pro případ, kdy je zvětšována pouze vzdálenost mezi vnějším průměrem rotoru a prostřední bariérou. Vzdálenost mezi vnějším průměrem rotoru a krajními bariérami je ponechána na jmenovitých hodnotách, které jsou, stejně jako jmenovité hodnoty ostatních parametrů bariér, zapsány v (Tab. 3.11). Střední hodnoty indukčností, získané z těchto průběhů, jsou spolu s jejich poměry uvedeny v (Tab. 3.14).

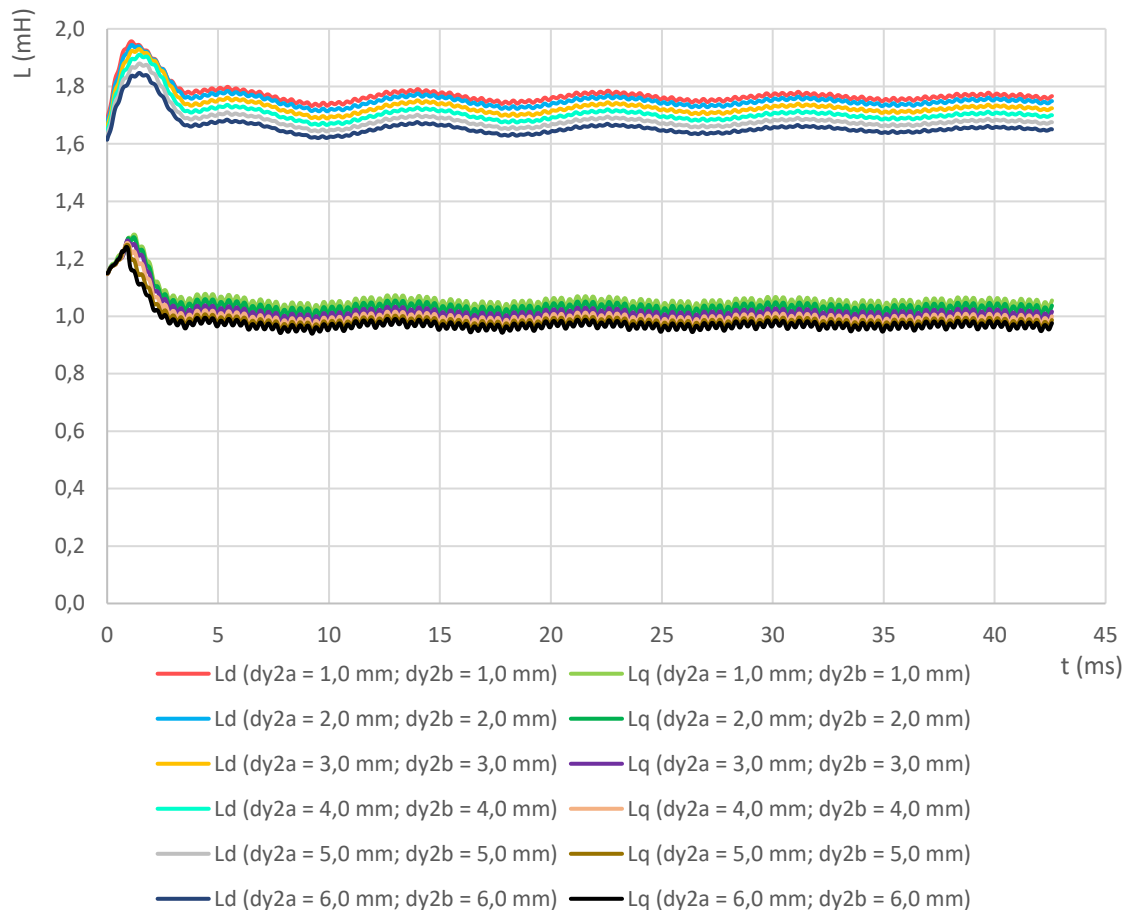
Ze zaznamenaných hodnot je zřejmé, že pokud roste vzdálenost mezi prostřední bariérou a vnějším průměrem rotoru, není indukčnost v podélné ose d nijak ovlivněna, ale dochází k nárůstu indukčnosti v příčné ose q . Důsledkem toho je snižování vyniklosti stroje. Při porovnání s hodnotami uvedenými v (Tab. 3.13) však dochází ke snižování vyniklosti pozvolněji. Zatímco při zvětšování vzdálenosti mezi vnějším průměrem rotoru a všemi bariérami současně dochází již při nárůstu této vzdálenosti na hodnotu 4 mm ke snižování vyniklosti pod úroveň navrženého stroje bez bariér (Tab. 3.1), tak v případě, kdy tato vzdálenost roste pouze u prostřední bariéry, dochází i při $d_{y1a} = 6$ mm k mírnému zvýšení vyniklosti oproti navrženému stroji bez magnetických bariér.

Tab. 3.14: Střední hodnoty indukčností stroje se třemi magnetickými bariérami a jejich poměr v závislosti na vzdálenosti prostřední bariéry od vnějšího průměru rotoru

d_{y1a} (mm)	L_d (mH)	L_q (mH)	L_d/L_q (-)
1,0	1,65	0,97	1,70
2,0	1,65	0,97	1,70
3,0	1,65	0,98	1,68
4,0	1,65	0,98	1,68
5,0	1,65	0,99	1,67
6,0	1,65	1,00	1,65

3.5.3 Vliv vzdálenosti mezi bariérou a vnitřním průměrem rotoru

Na (Obr. 3.17) jsou zachyceny časové závislosti indukčností stroje v podélné i příčné ose. Parametrem, který je zde analyzován, je vzdálenost bariér od vnitřního průměru rotoru, která je zde stejná pro prostřední bariéru i krajní bariéry. Ostatním parametrům bariéry jsou opět ponechány hodnoty z (Tab. 3.11). Střední hodnoty indukčností jsou spolu s jejich poměry zaznamenány v (Tab. 3.15).

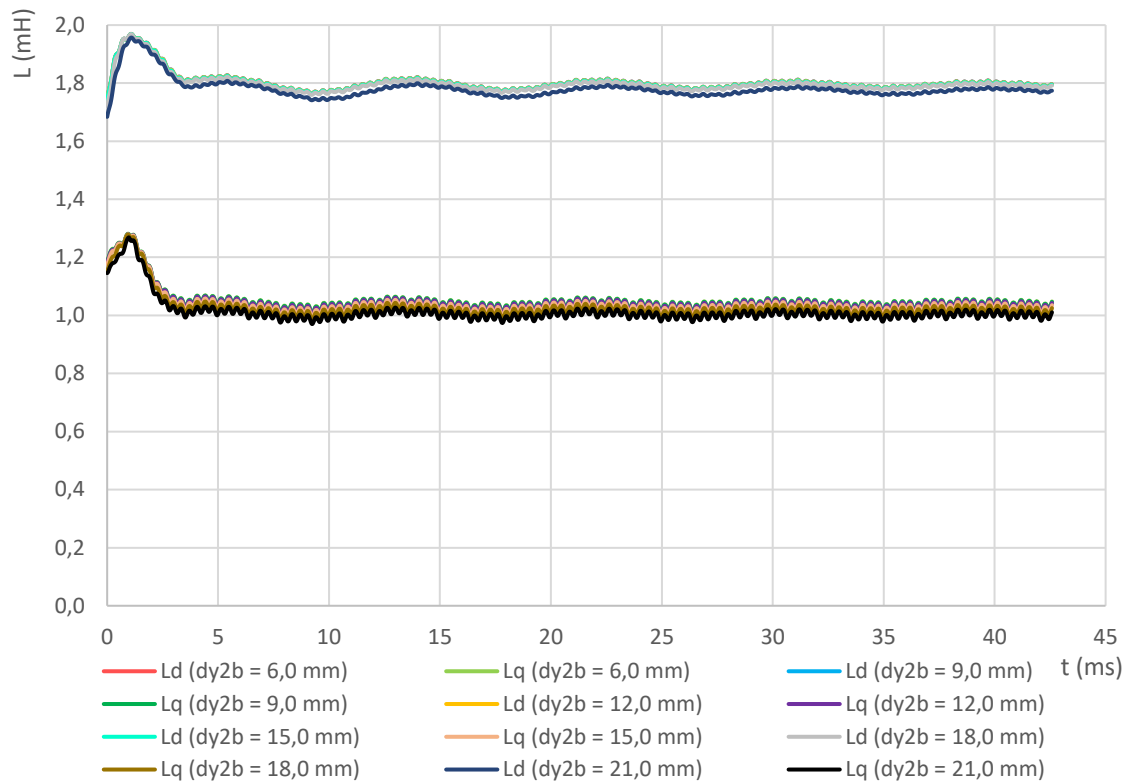


Obr. 3.17: Indukčnosti stroje se třemi magnetickými bariérami v závislosti na čase pro různou vzdálenost mezi bariérami a vnitřním průměrem rotoru (stejné hodnoty vzdáleností)

Ze zaznamenaných hodnot je vidět, že v případě, kdy je vzdálenost mezi bariérou a vnitřním průměrem rotoru nastavena na stejnou hodnotu pro všechny bariéry, dochází při zvětšování této vzdálenosti k nárůstu indukčnosti v podélné i příčné ose. Pro většinu vzdáleností pak zůstává konstantní vyniklost stroje, pouze při vzdálenosti 3 mm dochází k jejímu mírnému zvýšení, a při vzdálenosti 6 mm k jejímu mírnému snížení.

Tab. 3.15: Střední hodnoty indukčností stroje se třemi magnetickými bariérami a jejich poměr v závislosti na vzdálenosti bariér od vnitřního průměru rotoru (stejné hodnoty vzdáleností)

d_{y2a} (mm)	d_{y2b} (mm)	L_d (mH)	L_q (mH)	L_d/L_q (-)
1,0	1,0	1,65	0,97	1,70
2,0	2,0	1,67	0,98	1,70
3,0	3,0	1,70	0,99	1,72
4,0	4,0	1,72	1,01	1,70
5,0	5,0	1,75	1,03	1,70
6,0	6,0	1,76	1,05	1,68



Obr. 3.18: Indukčnosti stroje se třemi magnetickými bariérami v závislosti na čase pro různou vzdálenost mezi krajními bariérami a vnitřním průměrem rotoru

Vzdálenost mezi bariérou a vnitřním průměrem rotoru však nemusí mít nutně stejnou hodnotu pro všechny bariéry. Závislosti indukčností stroje na čase pro tento případ je zobrazena na (Obr. 3.18). Parametrem, který je zde analyzován, je vzdálenost mezi krajními bariérami a vnitřním průměrem rotoru. Vzdálenost mezi prostřední bariérou a vnitřním průměrem rotoru zůstává na jmenovité hodnotě, která je spolu se jmenovitými hodnotami ostatních parametrů uvedena v (Tab. 3.11). V (Tab. 3.16) jsou pak zapsány střední hodnoty těchto indukčností i jejich poměry.

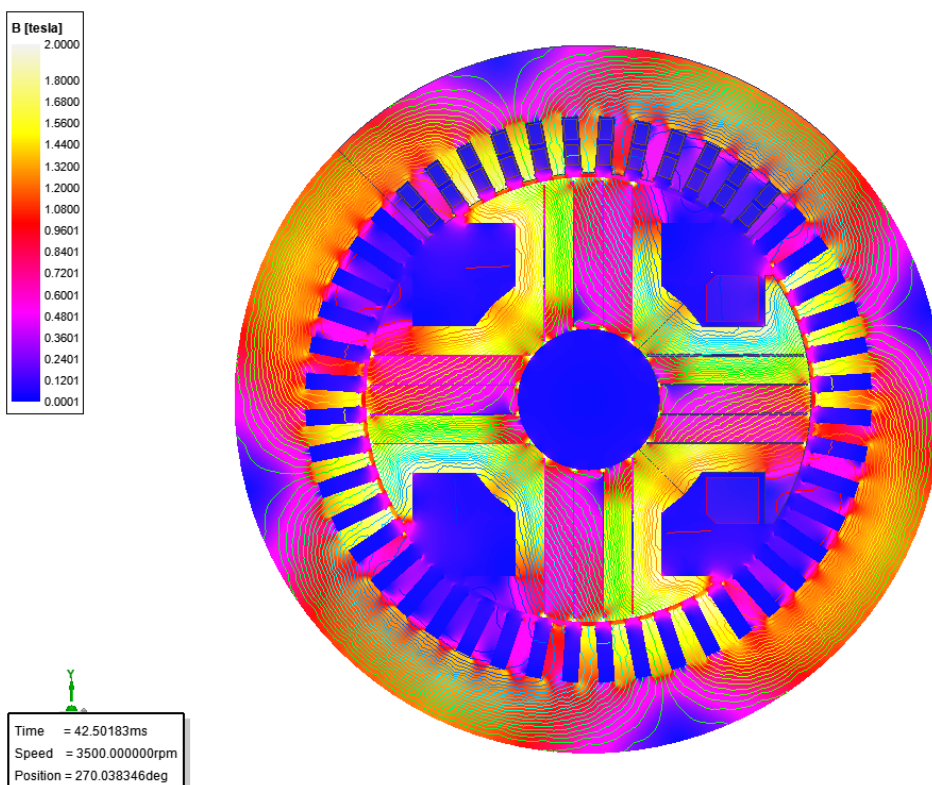
Tab. 3.16: Střední hodnoty indukčností stroje se třemi magnetickými bariérami a jejich poměr v závislosti na vzdálenosti krajních bariér od vnitřního průměru rotoru

d_{y2b} (mm)	L_d (mH)	L_q (mH)	L_d/L_q (-)
6,0	1,77	1,00	1,77
9,0	1,79	1,02	1,75
12,0	1,79	1,03	1,74
15,0	1,79	1,03	1,74
18,0	1,79	1,04	1,72
21,0	1,79	1,04	1,72

Ze získaných hodnot je zřejmé, že při nárůstu vzdálenosti mezi krajními bariérami a vnitřním průměrem rotoru až na takovou úroveň, že krajní bariéry nezasahují do rotorového jha a jsou tak umístěny pouze v pólu a pólovém nástavci, je indukčnost v podélné ose pro většinu rozměrů konstantní a pouze při počáteční hodnotě vzdálenosti 6 mm dochází k jejímu mírnému snížení, zatímco indukčnost v příčné ose mírně roste. Výsledkem zvětšování této vzdálenosti je tedy snížení vyniklosti

3.6 Čtyři magnetické bariéry

Zde je analyzováno uspořádání čtyř magnetických bariér v pólu stroje, které jsou přes šířku pólu rovnoměrně rozmístěny a dělí tak tělo pólu na pětiny. Je zde, stejně jako v předchozích případech, popsán vliv šířky bariéry a její vzdálenosti od vnějšího i vnitřního průměru stroje. Stejně jako u předchozího uspořádání se třemi bariérami jsou i zde kromě případů, kdy mají všechny bariéry nastaveny stejnou šířku i vzdálenost od vnějšího i vnitřního průměru stroje, analyzovány i případy, kdy se tyto parametry pro krajní bariéry liší od bariér u středu pólu.



Obr. 3.19: Magnetická indukce a siločáry magnetického pole ve stroji se čtyřmi magnetickými bariérami

Na (Obr. 3.19) je patrné, že při uspořádání se čtyřmi bariérami je rozložení indukce podobné jako při uspořádání se třemi bariérami (Obr. 3.13). Levá část pólu je opět přesycována a v pravé části pólu hodnota indukce klesá směrem od dolní k horní části pólu.

Při počítání bariér zleva doprava pak dochází mezi druhou a čtvrtou bariérou k tomu, že indukce dosahuje poměrně malých hodnot, které jsou ve většině tohoto prostoru podobné.

I zde je analyzováno množství různých rozměrů bariér, a na (Obr. 3.19) je tedy zachycen pouze stav, kdy parametry bariér dosahují hodnot, které jsou uvedeny v (Tab. 3.17), kde b_{b1} – šířka magnetické bariéry u středu pólu, b_{b2} – šířka krajní magnetické bariéry, d_{y1a} – vzdálenost mezi bariérou u středu pólu a vnějším průměrem rotoru, d_{y1b} – vzdálenost mezi krajní bariérou a vnějším průměrem rotoru, d_{y2a} – vzdálenost mezi bariérou u středu pólu a vnitřním průměrem rotoru a d_{y2b} – vzdálenost mezi krajní bariérou a vnitřním průměrem rotoru.

Tab. 3.17: Jmenovité parametry magnetických bariér stroje se čtyřmi bariérami

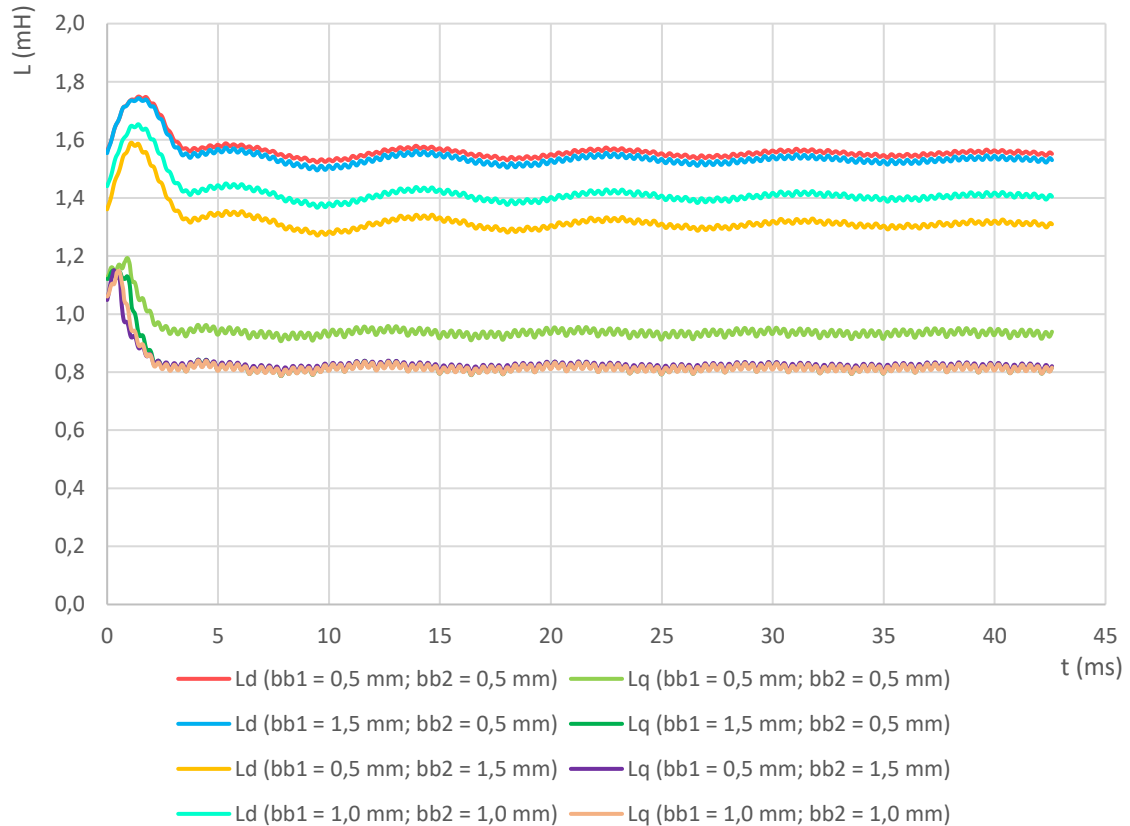
b_{b1} (mm)	0,5
b_{b2} (mm)	0,5
d_{y1a} (mm)	1,0
d_{y1b} (mm)	1,0
d_{y2a} (mm)	1,0
d_{y2b} (mm)	1,0

3.6.1 Vliv šířky bariéry

Na (Obr. 3.20) je zaznamenána časová závislost indukčností stroje pro podélnou osu d i příčnou osu q . Analyzovaným parametrem je zde šířka bariér, přičemž šířka každé ze dvou krajních bariér b_{b2} a šířka každé se dvou bariér u středu pólu b_{b1} jsou nastavovány buď na stejné hodnoty tak, aby jejich souhrnná šířka dosáhla maximálně hodnoty 4 mm, tedy maximální šířky bariéry v uspořádání s jednou magnetickou bariérou, nebo na rozdílné hodnoty, ale vždy tak, aby součet šířek všech čtyř bariér dal dohromady souhrnnou šířku 4 mm. Ostatní parametry bariér zůstávají na hodnotách uvedených v (Tab. 3.17). Střední hodnoty indukčností a jejich poměry jsou uvedeny v (Tab. 3.18).

Z těchto získaných hodnot je patrné, že v případě, kdy všechny čtyři bariéry mají stejnou šířku, dochází při zvětšování šířky těchto bariér k omezení indukčností v podélné i příčné ose a vyniklost stroje se zvyšuje. Pokud jsou však šířky bariér u středu pólu a bariér u okrajů pólu nastaveny na rozdílné hodnoty, a jejich souhrnná šířka je 4 mm, je z analyzovaných kombinací parametrů bariéry jednoznačně výhodnější případ, kdy bariéry blíže středu pólu mají každá šířku 1,5 mm a krajní bariéry mají každá šířku 0,5 mm. Pokud jsou totiž šířky

bariér nastaveny opačně, dochází, jako v jediném ze všech případů analýzy vlivu šířky bariér, ke snížení vyniklosti navrženého stroje.



Obr. 3.20: Indukčnosti stroje se čtyřmi magnetickými bariérami v závislosti na čase pro různou šířku magnetické bariéry

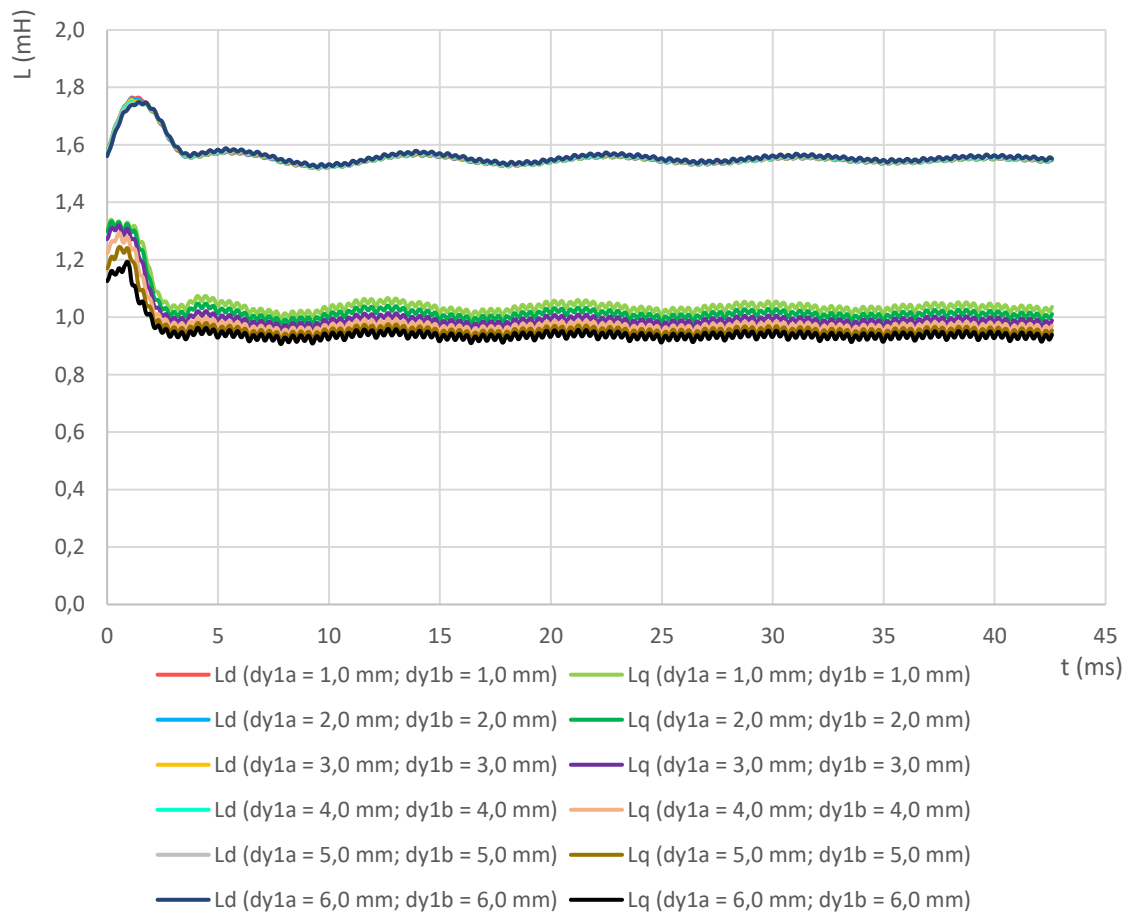
Tab. 3.18: Střední hodnoty indukčností stroje se čtyřmi magnetickými bariérami a jejich poměr v závislosti na šířce bariér

b_{b1} (mm)	b_{b2} (mm)	L_d (mH)	L_q (mH)	L_d/L_q (-)
0,5	0,5	1,55	0,94	1,65
1,5	0,5	1,53	0,82	1,87
0,5	1,5	1,31	0,82	1,60
1,0	1,0	1,40	0,81	1,73

3.6.2 Vliv vzdálenosti mezi bariérou a vnějším průměrem rotoru

Na (Obr. 3.21) jsou zaznamenány závislosti indukčností stroje v podélné i příčné ose. Je zde analyzován vliv vzdálenosti mezi bariérami a vnějším průměrem rotoru, přičemž je zde tato vzdálenost pro všechny bariéry nastavena na stejnou hodnotu. Ostatní parametry jsou

nastaveny na jmenovité hodnoty podle (Tab. 3.17). Z poslední zaznamenané periody zobrazených závislostí jsou určeny střední hodnoty indukčností, které jsou i s jejich poměry zapsány v (Tab. 3.19).

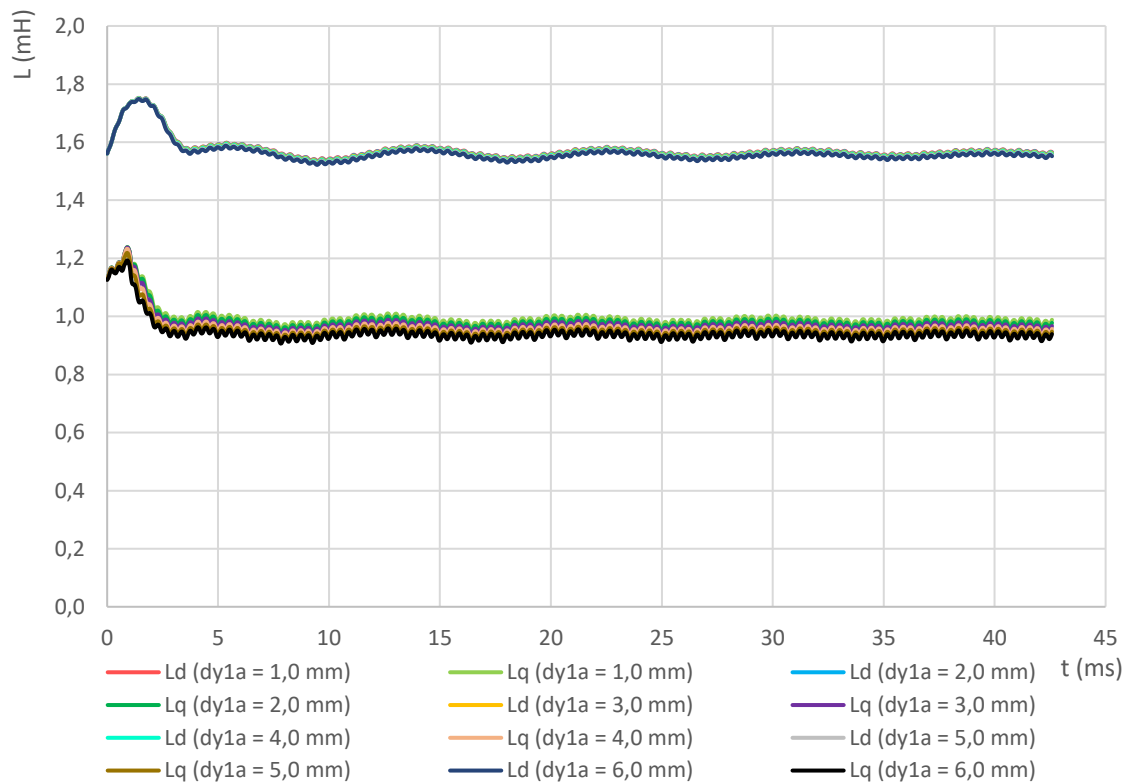


Obr. 3.21: Indukčnosti stroje se čtyřmi magnetickými bariérami v závislosti na čase pro různou vzdálenost mezi bariérami a vnějším průměrem rotoru (stejně hodnoty vzdáleností)

Tab. 3.19: Střední hodnoty indukčností stroje se čtyřmi magnetickými bariérami a jejich poměr v závislosti na vzdálenosti bariér od vnějšího průměru rotoru (stejně hodnoty vzdáleností)

d_{y1a} (mm)	d_{y1b} (mm)	L_d (mH)	L_q (mH)	L_d/L_q (-)
1,0	1,0	1,55	0,94	1,65
2,0	2,0	1,55	0,95	1,63
3,0	3,0	1,55	0,97	1,60
4,0	4,0	1,55	0,99	1,57
5,0	5,0	1,55	1,01	1,53
6,0	6,0	1,55	1,03	1,50

Z těchto hodnot vyplývá, že pokud je nastavena stejná vzdálenost mezi vnějším průměrem rotoru a všemi bariérami, tak při zvětšování této vzdálenosti nedochází k ovlivnění indukčnosti v podélné ose, ale dochází k růstu indukčnosti v příčné ose. To způsobuje pokles poměru indukčností v podélné a příčné ose.



Obr. 3.22: Indukčnosti stroje se čtyřmi magnetickými bariérami v závislosti na čase pro různou vzdálenost mezi bariérami u středu pólu a vnějším průměrem rotoru

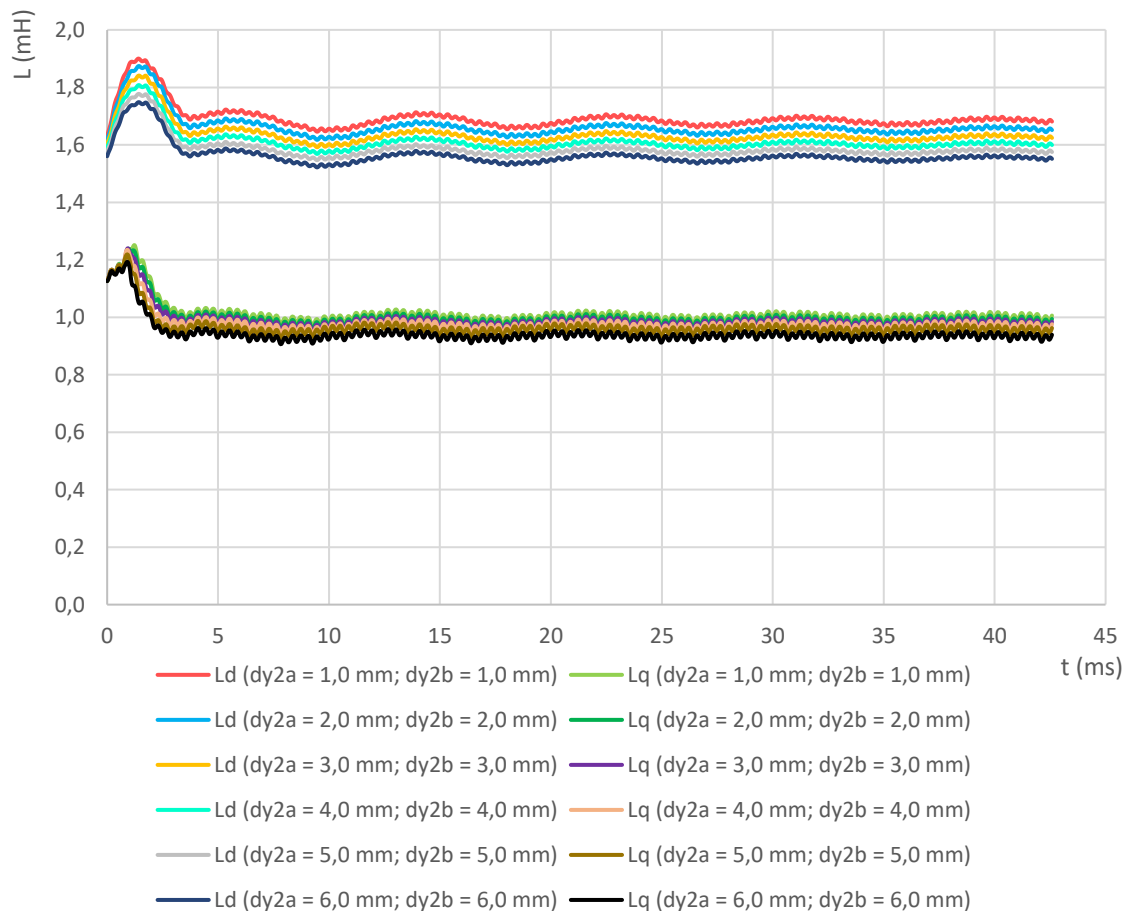
Na (Obr. 3.22) jsou zaznamenány indukčnosti stroje pro případ, kdy vzdálenost mezi bariérou a vnějším průměrem rotoru nemá u všech bariér stejnou hodnotu. Analyzovaným parametrem je zde vzdálenost mezi vnějším průměrem rotoru a bariérami u středu pólu. Vzdálenost mezi vnějším průměrem rotoru a krajními magnetickými bariérami je nastavena na jmenovitou hodnotu, která je spolu se jmenovitými hodnotami ostatních parametrů magnetických bariér zapsána v (Tab. 3.17). Střední hodnoty indukčností a jejich poměry jsou pak uvedeny v (Tab. 3.20).

Z těchto hodnot je patrné, že při zvětšování vzdálenosti mezi bariérami u středu pólu a vnějším průměrem rotoru téměř nedochází k ovlivnění indukčnosti v podélné ose, zatímco indukčnost v příčné ose roste, což způsobuje snižování podílu indukčností v podélné a příčné ose. Při porovnání s hodnotami uvedenými v (Tab. 3.19) však v tomto případě, kdy je analyzována vzdálenost od vnějšího průměru rotoru pouze pro bariéry u středu pólu, dochází k pomalejšímu poklesu poměru indukčností stroje.

Tab. 3.20: Střední hodnoty indukčností stroje se čtyřmi magnetickými bariérami a jejich poměr v závislosti na vzdálenosti bariér u středu pólu od vnějšího průměru rotoru

d_{y1a} (mm)	L_d (mH)	L_q (mH)	L_d/L_q (-)
1,0	1,55	0,94	1,65
2,0	1,56	0,94	1,66
3,0	1,56	0,95	1,64
4,0	1,56	0,96	1,63
5,0	1,56	0,97	1,61
6,0	1,56	0,98	1,59

3.6.3 Vliv vzdálenosti mezi bariérou a vnitřním průměrem rotoru



Obr. 3.23: Indukčnosti stroje se čtyřmi magnetickými bariérami v závislosti na čase pro různou vzdálenost mezi bariérami a vnitřním průměrem rotoru (stejně hodnoty vzdáleností)

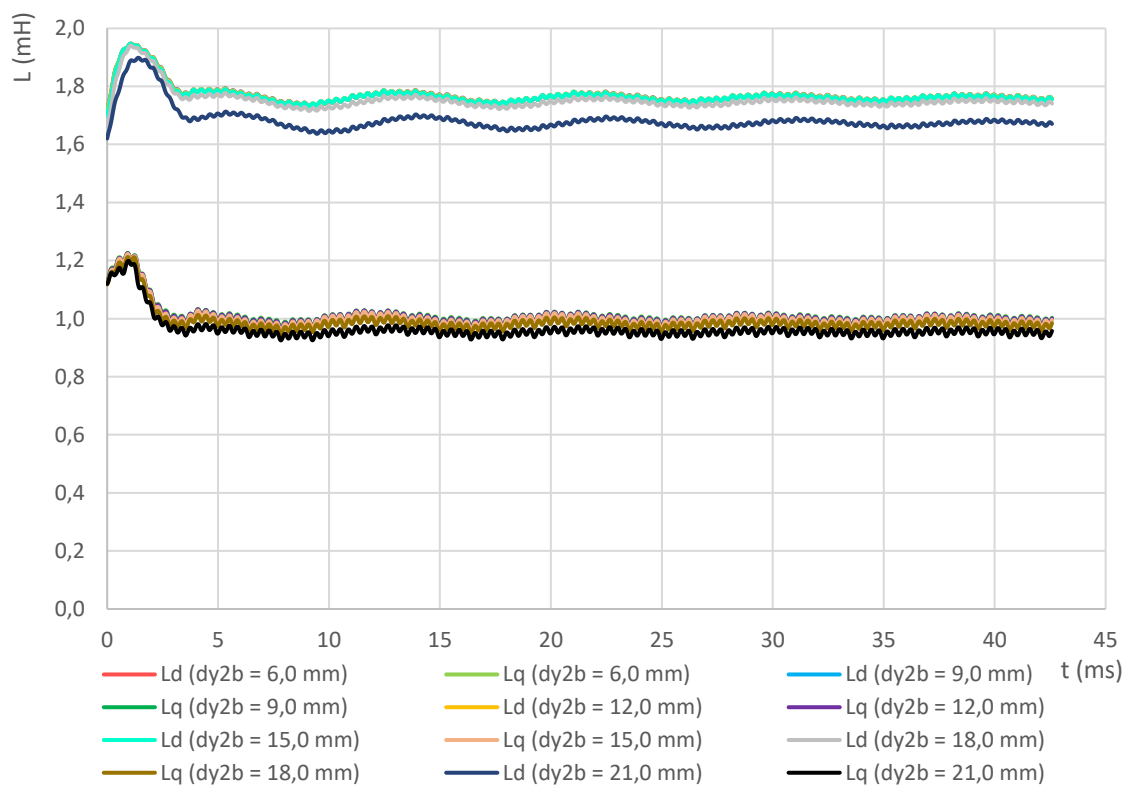
Na (Obr. 3.23) jsou vyneseny časové závislosti indukčností stroje v podélné ose d i příčné ose q . Je zde analyzován vliv vzdálenosti magnetických bariér od vnitřního průměru rotoru. Ostatním parametrům jsou ponechány jmenovité hodnoty, které jsou zapsány v (Tab. 3.17).

Z poslední zaznamenané periody uvedených průběhů jsou vypočteny střední hodnoty indukčností stroje v podélné a příčné ose, které jsou i s jejich poměry zapsány v (Tab. 3.21).

Ze zaznamenaných hodnot je zřejmé, že pokud je vzdálenost mezi vnitřním průměrem rotoru a bariérami nastavena na stejnou hodnotu u všech bariér, dochází při růstu této vzdálenosti k nárůstu indukčností v podélné i příčné ose, přičemž indukčnost v podélné ose roste rychleji a dochází ke zvyšování vyniklosti stroje.

Tab. 3.21: Střední hodnoty indukčností stroje se čtyřmi magnetickými bariérami a jejich poměr v závislosti na vzdálenosti bariér od vnitřního průměru rotoru (stejně hodnoty vzdáleností)

d_{y2a} (mm)	d_{y2b} (mm)	L_d (mH)	L_q (mH)	L_d/L_q (-)
1,0	1,0	1,55	0,94	1,65
2,0	2,0	1,58	0,96	1,65
3,0	3,0	1,60	0,97	1,65
4,0	4,0	1,63	0,98	1,66
5,0	5,0	1,65	0,99	1,67
6,0	6,0	1,68	1,00	1,68



Obr. 3.24: Indukčností stroje se čtyřmi magnetickými bariérami v závislosti na čase pro různou vzdálenost mezi krajními bariérami a vnitřním průměrem rotoru

Vzdálenost mezi bariérou a vnitřním průměrem však nemusí být stejná pro všechny bariéry. Závislost indukčností stroje v podélné a příčné ose na čase pro tento případ je zaznamenána na (Obr. 3.24). Parametrem, jehož vliv je zde analyzován, je vzdálenost krajních magnetických bariér od vnitřního průměru rotoru. Všechny ostatní parametry jsou ponechány na jmenovitých hodnotách, které jsou uvedeny v (Tab. 3.17). V (Tab. 3.22) jsou pak uvedeny střední hodnoty indukčností těchto průběhů, včetně jejich poměrů.

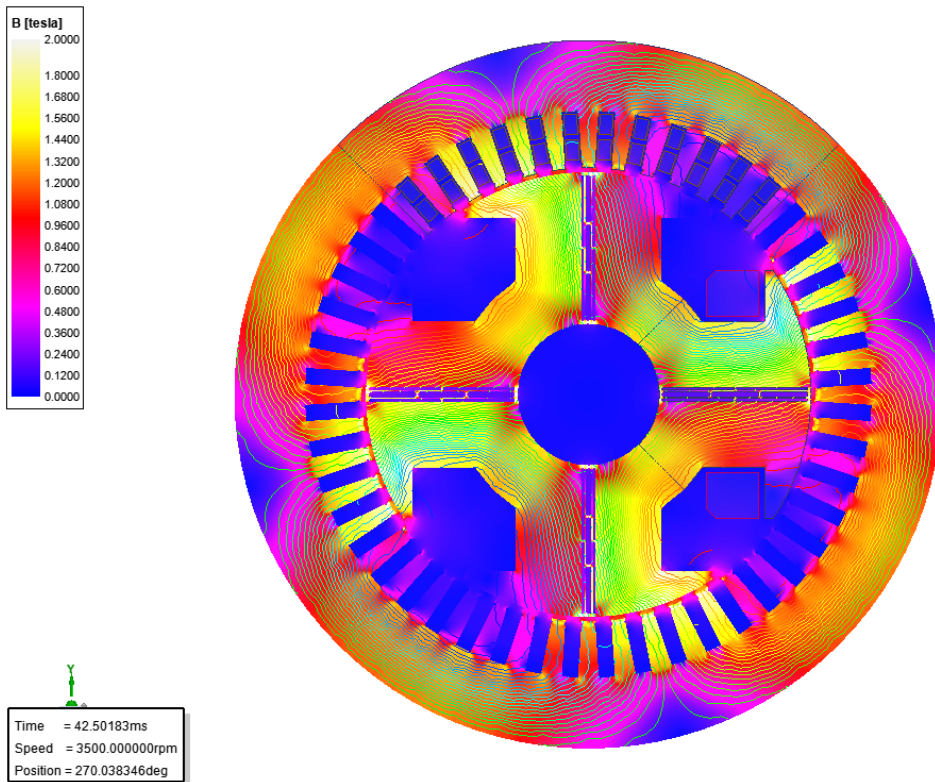
Z těchto hodnot je patrné, že při zvětšování vzdálenosti mezi krajními bariérami a vnitřním průměrem rotoru až do úrovně, kdy krajní bariéry nezasahují do jha rotoru, dochází z počátku k růstu indukčností v podélné i příčné ose, přičemž pro tyto indukčnosti platí, že po počátečním růstu dojde k ustálení na konstantní hodnotě. Poměr indukčností v podélné a příčné ose se z počátku zvětšování vzdálenosti bariér mírně zvětší, ale při dalším zvětšování vzdálenosti nastává pokles poměru indukčností na původní hodnotu.

Tab. 3.22: Střední hodnoty indukčností stroje se čtyřmi magnetickými bariérami a jejich poměr v závislosti na vzdálenosti krajních bariér od vnitřního průměru rotoru

d_{y2b} (mm)	L_d (mH)	L_q (mH)	L_d/L_q (-)
6,0	1,67	0,95	1,76
9,0	1,74	0,98	1,78
12,0	1,76	0,99	1,78
15,0	1,76	1,00	1,76
18,0	1,76	1,00	1,76
21,0	1,76	1,00	1,76

3.7 Labyrint magnetických bariér

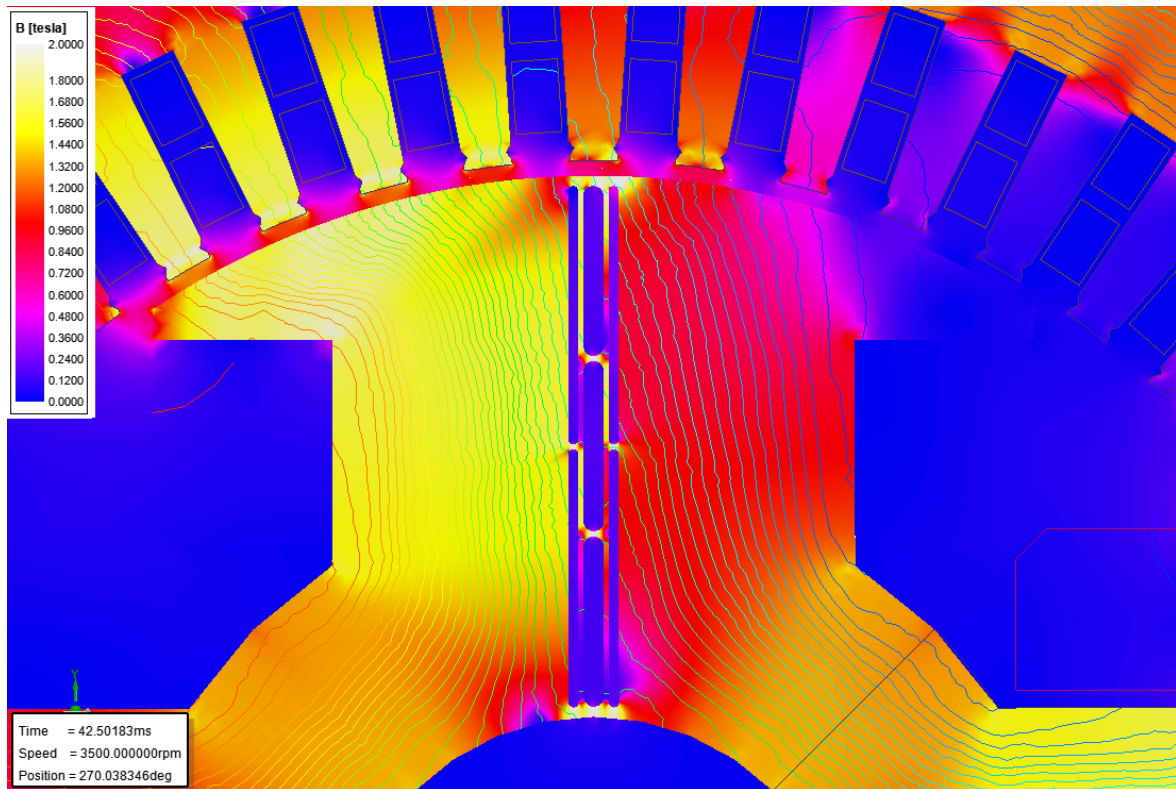
Jedním z analyzovaných uspořádání magnetických bariér je sedm bariér, které jsou však uspořádány kolem podélné osy pólu tak, že pro magnetický tok procházející pólem v příčném směru tvoří jakýsi labyrint. Na rozdíl od předchozích uspořádání jsou zde však nastaveny konstantní vzdálenosti mezi bariérami a vnitřním i vnějším průměrem rotoru, i konstantní šířky jak krajních bariér, tak i prostředních bariér. Při volbě těchto parametrů je přitom využito výsledků analýz předchozích uspořádání, a kromě umístění bariér co nejbližší podélné osy pólu je tak prostřední bariéře nastavena větší šířka než krajním bariérám, a vzdálenost mezi bariérami a vnějším i vnitřním průměrem je nastavena na nízkou hodnotu. Je zde však popsán vliv vzdálenosti mezi bariérami ve vertikálním i horizontálním směru.



Obr. 3.25: Magnetická indukce a siločáry magnetického pole ve stroji s labyrintem magnetických bariér

Na (Obr. 3.25) a (Obr. 3.26) je patrné nerovnoměrné rozložení indukce v pólu. Rozložení indukce v pólu je pak velice podobné, jako při uspořádání s jednou magnetickou bariérou, které je zachyceno na (Obr. 3.5). I zde dochází ke značným rozdílům mezi hodnotami indukce v levé a pravé části pólu. V levé části pólu dosahuje indukce poměrně vysokých hodnot, a tato část magnetického obvodu je přesycována. V pravé části pólu dosahuje indukce nižších hodnot, přičemž se hodnota indukce snižuje směrem k horní části pólu. Podobně jako u předchozích uspořádání je pak indukce v pravé části pólového nástavce téměř nulová. Je také zřejmé, že v oblastech vertikálních mezer mezi bariérami a v oblastech mezi bariérami a vnějším i vnitřním průměrem rotoru dochází k přesycování magnetického obvodu.

Vzhledem k mnoha různým hodnotám vzdáleností mezi bariérami, které jsou analyzovány, je na (Obr. 3.25) a (Obr. 3.26) zachycen pouze stav, kdy parametry bariér odpovídají jmenovitým hodnotám uvedeným v (Tab. 3.23), kde b_{b1} – šířka střední magnetické bariéry, b_{b2} – šířka krajní magnetické bariéry, d_{y1} – vzdálenost mezi bariérou a vnějším průměrem rotoru, d_{y2} – vzdálenost mezi bariérou a vnitřním průměrem rotoru, d_{y3} – vertikální vzdálenost mezi bariérami, d_x – horizontální vzdálenost mezi bariérami. Vzdálenosti d_{y1} a d_{y2} jsou myšleny pro bariéry nejbližší vnitřnímu, respektive vnějšímu průměru rotoru. U d_{y3} a d_x je pak myšlena vzdálenost mezi dvěma nejbližšími bariérami.



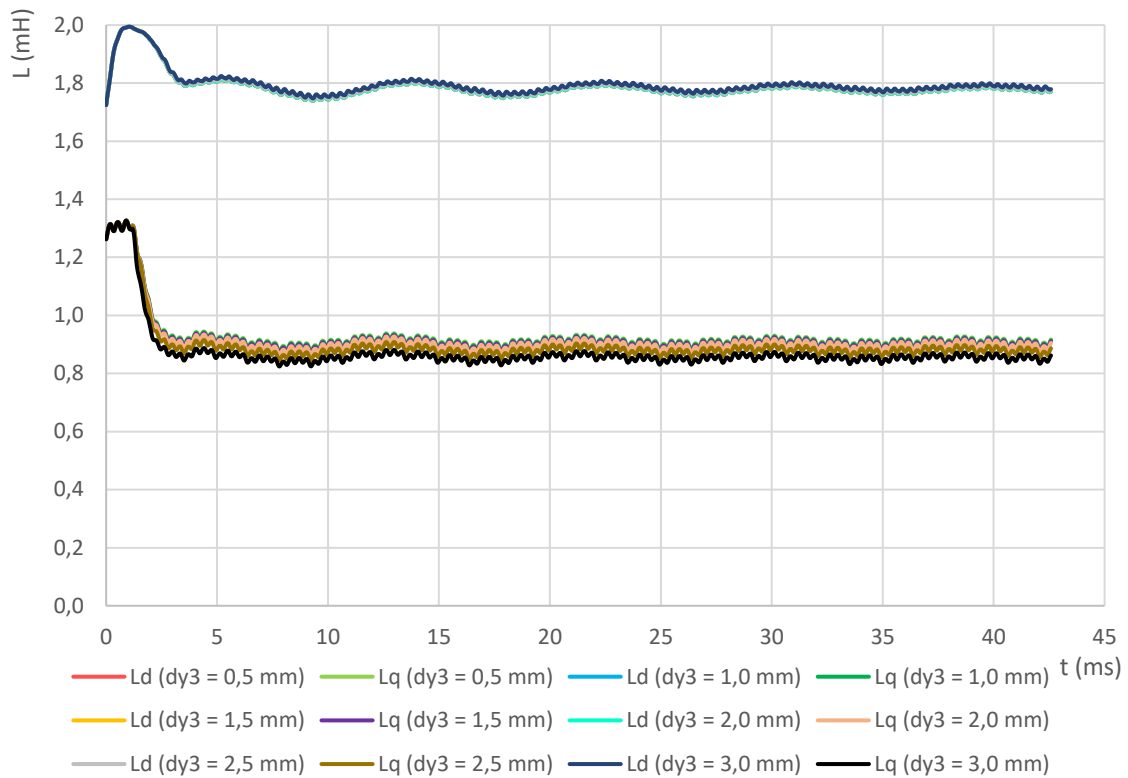
Obr. 3.26: Magnetická indukce a siločáry magnetického pole ve stroji s labyrintem magnetických bariér (detail magnetických bariér)

Tab. 3.23: Jmenovité parametry magnetických bariér stroje s labyrintem bariér

b_{b1} (mm)	2,0
b_{b1} (mm)	1,0
d_{y1} (mm)	1,0
d_{y2} (mm)	1,0
d_{y3} (mm)	0,5
dx (mm)	2,0

3.7.1 Vliv vertikální vzdálenosti bariér

Na (Obr. 3.27) jsou zobrazeny závislosti indukčností stroje v podélné a příčné ose na čase. Je zde analyzován vliv vertikální vzdálenosti mezi jednotlivými bariérami. Ostatní parametry zůstávají na jmenovitých hodnotách, které jsou uvedeny v (Tab. 3.23). Z uvedených průběhů jsou získány střední hodnoty indukčností, které jsou spolu s jejich poměry uvedeny v (Tab. 3.24).



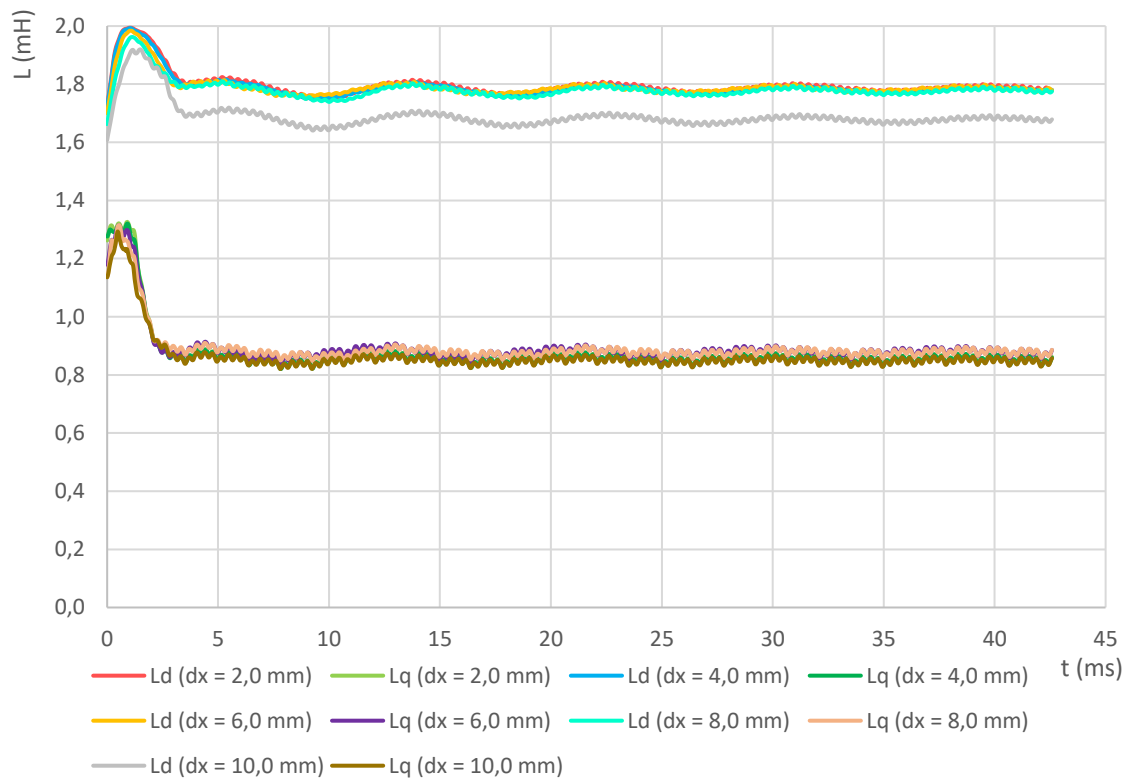
Obr. 3.27: Indukčnosti stroje s labyrintem magnetických bariér v závislosti na čase pro různou vertikální vzdálenost bariér

Ze získaných hodnot je zřejmé, že pokud se zvětšuje vertikální vzdálenost mezi jednotlivými bariérami, nedochází k žádnému ovlivnění indukčnosti v podélné ose, zatímco indukčnost v příčné ose roste, a zvětšování této vzdálenosti tak způsobuje snižování poměru mezi indukčnostmi v podélné a příčné ose stroje.

Tab. 3.24: Střední hodnoty indukčností stroje s labyrintem magnetických bariér a jejich poměr v závislosti na vertikální vzdálenosti bariér

d_{y3} (mm)	L_d (mH)	L_q (mH)	L_d/L_q (-)
0,5	1,78	0,85	2,09
1,0	1,78	0,88	2,02
1,5	1,78	0,90	1,98
2,0	1,78	0,90	1,98
2,5	1,78	0,91	1,96
3,0	1,78	0,91	1,96

3.7.2 Vliv horizontální vzdálenosti bariér



Obr. 3.28: Indukčnosti stroje s labyrintem magnetických bariér v závislosti na čase pro různou horizontální vzdálenost bariér

Na (Obr. 3.28) jsou zaznamenány časové závislosti indukčností pro podélnou osu d i příčnou osu q . Parametrem, jehož vliv je zde analyzován, je horizontální vzdálenost bariér. Ostatním parametrům jsou ponechány jmenovité hodnoty uvedené v (Tab. 3.23). Z poslední zaznamenané periody uvedených průběhů jsou získány střední hodnoty indukčností, které jsou i s jejich poměry uvedeny v (Tab. 3.25).

Tab. 3.25: Střední hodnoty indukčností stroje s labyrintem magnetických bariér a jejich poměr v závislosti na horizontální vzdálenosti bariér

d_x (mm)	L_d (mH)	L_q (mH)	L_d/L_q (-)
2,0	1,78	0,85	2,09
4,0	1,78	0,85	2,09
6,0	1,78	0,88	2,02
8,0	1,78	0,88	2,02
10,0	1,68	0,85	1,98

Z těchto hodnot je zřejmé, že pokud je zvětšována horizontální vzdálenost mezi bariérami, nedochází ve většině případů k ovlivnění indukčnosti s podélné ose, kromě

případu $d_x = 10$ mm, kdy je tato indukčnost omezena. Indukčnost v příčné ose se při zvyšování horizontální vzdálenosti bariér nejprve zvýší, ale při $d_x = 10$ mm opět klesne na původní hodnotu. Výsledkem zvětšování této vzdálenosti je postupné snižování vniklosti stroje.

Závěr

Podle zadaných parametrů byl proveden elektromagnetický návrh elektricky buzeného synchronního stroje se jmenovitým výkonem 35 kW a s možností přetížení na 100 kW. Parametry tohoto stroje byly následně ověřeny v programu RMxpert, pomocí kterého byl také vytvořen model stroje v programu Maxwell 2D, kde byla provedena numerická analýza stroje metodou konečných prvků. Ověřován byl především poměr indukčností v podélné a příčné ose stroje, jelikož cílem práce bylo analyzovat vliv geometrie rotorových bariér právě na velikost tohoto poměru. Z analytického návrhu vyšla hodnota tohoto poměru 1,60. Numerickou analýzou v programu Maxwell 2D byla získána hodnota 1,63, což poměrně přesně odpovídá hodnotě získané analytickým návrhem.

Pomocí programu Maxwell 2D pak byl pro uspořádání s jednou až čtyřmi magnetickými bariérami, rovnoměrně rozmístěnými v pólu rotoru symetricky vůči jeho podélné ose, analyzován vliv šířky bariér a vliv vzdálenosti bariér od vnějšího i vnitřního průměru stroje. Bylo vytvořeno také uspořádání sedmi bariér, s pracovním názvem „Labyrint magnetických bariér,“ kde byly bariéry soustředěny v těsné blízkosti podélné osy pólu. Zde byl analyzován vliv horizontální i vertikální vzájemné vzdálenosti bariér.

Šířka bariéry má největší vliv na vlniklost stroje v uspořádání s jednou bariérou. V uspořádání se dvěma bariérami vliv šířky bariér poměrně značně klesá. U třech bariér však záleží na rozložení šířek bariér mezi jednotlivé bariéry. Pokud je prostřední bariéře nastavena stejná šířka jako každé z krajních bariér, pak má šířka bariér na vlniklost stroje ještě menší vliv než u dvou bariér. Pokud je však prostřední bariéře nastavena větší šířka než každé z krajních bariér, vlniklost stroje se zvyšuje. Čím větší je rozdíl mezi šířkami jednotlivých bariér, tím vyšší je i vlniklost stroje. Pokud rozdíl mezi šířkami není dostatečný, nebo je každá z krajních bariér širší než prostřední bariéra, dosahuje stroj podobné vlniklosti, jako v případě dvou bariér. Podobná závislost platí i u uspořádání se čtyřmi bariérami. Zde je však dosahováno ještě nižších vlniklostí než u předchozích uspořádání.

Při zvyšování vzdálenosti bariéry od vnějšího průměru rotoru dochází u všech uspořádání bariér ke snižování vlniklosti stroje. Tato vzdálenost má poměrně značný vliv v případě jedné bariéry. U uspořádání se dvěma bariérami je pak vliv zvyšování této vzdálenosti nižší než u jedné bariéry, ale je zde obecně dosahováno menších vlniklostí. O něco menších vlniklostí je dosaženo také při použití tří bariér, přičemž zde opět závisí na tom, zda je tato vzdálenost stejná pro všechny bariéry, nebo jestli se zvyšuje pouze u prostřední bariéry, zatímco u krajních bariér zůstává stejná. Pokud je vzdálenost od vnějšího průměru rotoru

zvyšována u všech bariér, je její vliv na snižování vyniklosti podobně značný, jako v případě uspořádání s jednou bariérou. Když se však tato vzdálenost zvětšuje jen u prostřední bariéry, je vliv na snižování vyniklosti přibližně poloviční, díky čemuž je dosaženo podobných hodnot vyniklosti, jako v případě použití dvou bariér. Téměř stejná závislost se projevuje také u uspořádání se čtyřmi bariérami, kde je však dosahováno menších vyniklostí v porovnání s předchozími uspořádáními.

Při zvyšování vzdálenosti mezi bariérou a vnitřním průměrem rotoru dochází v uspořádání s jednou bariérou ke značnému poklesu vyniklosti stroje. V případě dvou bariér se vyniklost snižuje pomaleji, ale je zde obecně dosahováno nižších vyniklostí než u jedné bariéry. Při použití tří bariér záleží na tom, zda je vzdálenost od vnitřního průměru rotoru zvyšována u všech bariér stejně, nebo jestli je zvyšována pouze u krajních bariér, zatímco u prostřední bariéry zůstává stejná. Při zvětšování této vzdálenosti současně u všech bariér téměř nedochází k ovlivnění vyniklosti stroje. Pokud je tato vzdálenost zvětšována pouze u krajních bariér, dochází především při nižších vzdálenostech ke zvyšování vyniklosti. Může tak být dosaženo lepší vyniklosti než při použití dvou bariér. Pokud je však tato vzdálenost u krajních bariér tak výrazná, že bariéry nezasahují do rotorového jha, pak ke zvyšování vyniklosti téměř nedochází. Tyto závislosti platí i v případě použití čtyř bariér, zde však dochází ke zvýšení vyniklosti i v případě, že krajní bariéry nezasahují do rotorového jha.

V uspořádání se sedmi magnetickými bariérami, nazvanému „Labyrint magnetických bariér,“ dochází při zvětšování vertikální vzdálenosti bariér ke snižování vyniklosti stroje. Pokud je zvětšována horizontální vzdálenost mezi bariérami, nastává o něco mírnější pokles vyniklosti. V tomto uspořádání je pak obecně dosahováno poměrně vysoké vyniklosti. Poměr indukčností v podélné a příčné ose je zde srovnatelný s hodnotami při použití jedné bariéry. Toto uspořádání sice může být, při porovnání s uspořádáním s jednou bariérou, náročnější na výrobu, nicméně může být výhodné z hlediska rozdílných mechanických vlastností rotoru.

Největšího poměru indukčností v podélné a příčné ose bylo dosaženo při použití jedné bariéry. Hodnota tohoto poměru zde byla 2,16. O něco nižší byl pak tento poměr v případě uspořádání „Labyrint magnetických bariér,“ kde bylo dosaženo hodnoty 2,09. Hodnoty poměru indukčností 2,02 bylo dosaženo při použití tří bariér. Nižší hodnoty vyniklosti pak bylo dosaženo při použití dvou bariér, kde byla maximální dosažená hodnota poměru indukčností 1,92. Poměr indukčností byl nejnižší u uspořádání se čtyřmi bariérami, kde bylo dosaženo hodnoty 1,87.

Literatura

- [1] PYRHÖNEN, Juha, JOKINEN, Tapani, HRABOVCOVÁ, Valéria. *Design of rotating electrical machines*. 2nd ed. Chichester: Wiley, 2014. ISBN 978-1-118-58157-5.
- [2] KOPYLOV, Igor Petrovič a kolektiv. *Stavba elektrických strojů*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1988.
- [3] MÜLLER, Germar, VOGT, Karl, PONICK, Bernd. *Berechnung elektrischer Maschinen*. Weinheim: Wiley-VCH, 2007. ISBN 978-3-527-40525-1.
- [4] HRUŠKA, Karel. *Stavba elektrických strojů 1*. Plzeň, Západočeská univerzita v Plzni, 2021.
- [5] ČSN EN 60317-0-1. *Specifikace jednotlivých typů vodičů pro vinutí – Část 0-1: Obecné požadavky – Lakovaný měděný vodič kruhového průřezu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.
- [6] ČSN EN IEC 60317-0-2. *Specifikace jednotlivých typů vodičů pro vinutí – Část 0-2: Obecné požadavky – Lakovaný měděný vodič pravoúhlého průřezu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2021.
- [7] ILLIANO, Enzo Michele: *Design of a highly efficient brushless current excited synchronous motor for automotive purposes*. Zürich, 2014. Doctoral Thesis, ETH Zürich.
- [8] QINGSONG, Wang, SHUANGXIA, Niu. Overview of flux-controllable machines: Electrically excited machines, hybrid excited machines and memory machines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017, 68, 475–491. ISSN 1364-0321.
- [9] ROSSI, Claudio, CASADEI, Domenico, PILATI, Alessio, MARANO, Matteo. Wound Rotor Salient Pole Synchronous Machine Drive for Electric Traction, Conference Record of the 2006 *IEEE Industry Applications Conference Forty-First IAS Annual Meeting*, 2006, pp. 1235-1241, doi: 10.1109/IAS.2006.256689. ISBN 1-4244-0364-2.
- [10] LIU, Wenbo, LIPO, Thomas A. Saliency enhancement of salient pole wound field synchronous machines for variable speed applications, 2017 *IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC)*, 2017, pp. 1-7, doi: 10.1109/IEMDC.2017.8002119. ISBN 978-1-5090-4281-4.
- [11] GIOIA, Antonio Di, et al. Design and Demonstration of a Wound Field Synchronous Machine for Electric Vehicle Traction With Brushless Capacitive Field Excitation, in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 54, no. 2, pp. 1390-1403, March-April 2018, doi: 10.1109/TIA.2017.2784799. ISSN 0093-9994.

Seznam obrázků

Obr. 1.1: Závislost výkonu na rychlosti pro asynchronní motor (vlevo) a elektricky buzený synchronní motor (převzato a přeloženo z [7])	- 4 -
Obr. 1.2: Řez modelem rotačního kondenzátoru [11]	- 6 -
Obr. 2.1: Görgesův obrazec	- 13 -
Obr. 2.2: Rozměry drážky	- 15 -
Obr. 2.3: Magnetizační charakteristika elektrotechnických plechů M350-50A a charakteristiky sycení jednotlivých částí zubu při jmenovitém zatížení	- 19 -
Obr. 2.4: Nomogram pro určení činitele korekce magnetického napětí j_{ha} (převzato a přeloženo z [3]).....	- 21 -
Obr. 2.5: Rozměry pólu	- 22 -
Obr. 2.6: Magnetizační charakteristika elektrotechnických plechů M350-50A a charakteristiky sycení jednotlivých částí zubu při chodu naprázdno	- 26 -
Obr. 2.7: Siločáry rozptylového magnetického pole budících pólů (převzato a upraveno z [4])	- 29 -
Obr. 2.8: Fázorový diagram.....	- 37 -
Obr. 2.9: Momentová charakteristika	- 47 -
Obr. 2.10: Momentová charakteristika pro jmenovitý stav i přetížení	- 48 -
Obr. 2.11: Závislost výkonu stroje na zátěžném úhlu pro jmenovitý stav i přetížení	- 48 -
Obr. 3.1: Magnetická indukce a siločáry magnetického pole ve stroji bez magnetických bariér.....	- 50 -
Obr. 3.2: Indukčnosti stroje bez magnetických bariér v závislosti na čase.....	- 51 -
Obr. 3.3: Magnetická indukce a siločáry magnetického pole ve stroji bez magnetických bariér při přetížení	- 52 -
Obr. 3.4: Indukčnosti stroje bez magnetických bariér při přetížení v závislosti na čase -	53 -
Obr. 3.5: Magnetická indukce a siločáry magnetického pole ve stroji s jednou magnetickou bariérou.....	- 54 -
Obr. 3.6: Indukčnosti stroje s jednou magnetickou bariérou v závislosti na čase pro různou šířku magnetické bariéry	- 55 -
Obr. 3.7: Indukčnosti stroje s jednou magnetickou bariérou v závislosti na čase pro různou vzdálenost mezi bariérou a vnějším průměrem rotoru	- 56 -
Obr. 3.8: Indukčnosti stroje s jednou magnetickou bariérou v závislosti na čase pro různou vzdálenost mezi bariérou a vnitřním průměrem rotoru	- 58 -

Obr. 3.9: Magnetická indukce a siločáry magnetického pole ve stroji se dvěma magnetickými bariérami	- 59 -
Obr. 3.10: Indukčnosti stroje se dvěma magnetickými bariérami v závislosti na čase pro různou šířku magnetické bariéry	- 60 -
Obr. 3.11: Indukčnosti stroje se dvěma magnetickými bariérami v závislosti na čase pro různou vzdálenost mezi bariérou a vnějším průměrem rotoru	- 61 -
Obr. 3.12: Indukčnosti stroje se dvěma magnetickými bariérami v závislosti na čase pro různou vzdálenost mezi bariérou a vnitřním průměrem rotoru	- 62 -
Obr. 3.13: Magnetická indukce a siločáry magnetického pole ve stroji se třemi magnetickými bariérami	- 63 -
Obr. 3.14: Indukčnosti stroje se třemi magnetickými bariérami v závislosti na čase pro různé šířky magnetických bariér	- 65 -
Obr. 3.15: Indukčnosti stroje se třemi magnetickými bariérami v závislosti na čase pro různou vzdálenost mezi bariérami a vnějším průměrem rotoru (stejně hodnoty vzdáleností)	- 66 -
Obr. 3.16: Indukčnosti stroje se třemi magnetickými bariérami v závislosti na čase pro různou vzdálenost mezi prostřední bariérou a vnějším průměrem rotoru	- 67 -
Obr. 3.17: Indukčnosti stroje se třemi magnetickými bariérami v závislosti na čase pro různou vzdálenost mezi bariérami a vnitřním průměrem rotoru (stejně hodnoty vzdáleností)	- 69 -
Obr. 3.18: Indukčnosti stroje se třemi magnetickými bariérami v závislosti na čase pro různou vzdálenost mezi krajními bariérami a vnitřním průměrem rotoru	- 70 -
Obr. 3.19: Magnetická indukce a siločáry magnetického pole ve stroji se čtyřmi magnetickými bariérami	- 71 -
Obr. 3.20: Indukčnosti stroje se čtyřmi magnetickými bariérami v závislosti na čase pro různou šířku magnetické bariéry	- 73 -
Obr. 3.21: Indukčnosti stroje se čtyřmi magnetickými bariérami v závislosti na čase pro různou vzdálenost mezi bariérami a vnějším průměrem rotoru (stejně hodnoty vzdáleností)	- 74 -
Obr. 3.22: Indukčnosti stroje se čtyřmi magnetickými bariérami v závislosti na čase pro různou vzdálenost mezi bariérami u středu pólu a vnějším průměrem rotoru	- 75 -
Obr. 3.23: Indukčnosti stroje se čtyřmi magnetickými bariérami v závislosti na čase pro různou vzdálenost mezi bariérami a vnitřním průměrem rotoru (stejně hodnoty vzdáleností)	- 76 -

Obr. 3.24: Indukčnosti stroje se čtyřmi magnetickými bariérami v závislosti na čase pro různou vzdálenost mezi krajními bariérami a vnitřním průměrem rotoru.....	- 77 -
Obr. 3.25: Magnetická indukce a siločáry magnetického pole ve stroji s labyrintem magnetických bariér	- 79 -
Obr. 3.26: Magnetická indukce a siločáry magnetického pole ve stroji s labyrintem magnetických bariér (detail magnetických bariér)	- 80 -
Obr. 3.27: Indukčnosti stroje s labyrintem magnetických bariér v závislosti na čase pro různou vertikální vzdálenost bariér	- 81 -
Obr. 3.28: Indukčnosti stroje s labyrintem magnetických bariér v závislosti na čase pro různou horizontální vzdálenost bariér	- 82 -
Obr. I.1: Ztrátová čísla a hodnoty pro sestavení magnetizační charakteristiky elektrotechnických plechů M350-50A	I
Obr. II.1: Pilové schéma	II
Obr. II.2: Schéma zapojení cívek	III
Obr. II.3: Křivka magnetických napětí	IV
Obr. III.1: Výkres statorového paketu	V
Obr. III.2: Výkres rotorového paketu	VI

Seznam tabulek

Tab. 2.1: Závislost poměru kD na počtu pólů [2]	- 9 -
Tab. 2.2: Tingleyho schéma	- 12 -
Tab. 2.3: Hodnoty činitele mechanických ztrát pro jednotlivé způsoby chlazení (převzato a přeloženo z [3]).....	- 43 -
Tab. 3.1: Střední hodnoty indukčností stroje bez magnetických bariér a jejich poměr .	- 51 -
Tab. 3.2: Střední hodnoty indukčností stroje bez magnetických bariér při přetížení a jejich poměr	- 53 -
Tab. 3.3: Jmenovité parametry magnetické bariéry stroje s jednou bariérou.....	- 55 -
Tab. 3.4: Střední hodnoty indukčností stroje s jednou magnetickou bariérou a jejich poměr v závislosti na šířce bariéry	- 56 -
Tab. 3.5: Střední hodnoty indukčností stroje s jednou magnetickou bariérou a jejich poměr v závislosti na vzdálenosti bariéry od vnějšího průměru rotoru	- 57 -
Tab. 3.6: Střední hodnoty indukčností stroje s jednou magnetickou bariérou a jejich poměr v závislosti na vzdálenosti bariéry od vnitřního průměru rotoru.....	- 58 -
Tab. 3.7: Jmenovité parametry magnetických bariér stroje se dvěma bariérami	- 60 -
Tab. 3.8: Střední hodnoty indukčností stroje se dvěma magnetickými bariérami a jejich poměr v závislosti na šířce bariéry	- 61 -
Tab. 3.9: Střední hodnoty indukčností stroje se dvěma magnetickými bariérami a jejich poměr v závislosti na vzdálenosti bariéry od vnějšího průměru rotoru.....	- 62 -
Tab. 3.10: Střední hodnoty indukčností stroje se dvěma magnetickými bariérami a jejich poměr v závislosti na vzdálenosti bariéry od vnitřního průměru rotoru.....	- 63 -
Tab. 3.11: Jmenovité parametry magnetických bariér stroje se třemi bariérami	- 64 -
Tab. 3.12: Střední hodnoty indukčností stroje se třemi magnetickými bariérami a jejich poměr v závislosti na šířce bariér	- 66 -
Tab. 3.13: Střední hodnoty indukčností stroje se třemi magnetickými bariérami a jejich poměr v závislosti na vzdálenosti bariér od vnějšího průměru rotoru (stejně hodnoty vzdáleností).....	- 67 -
Tab. 3.14: Střední hodnoty indukčností stroje se třemi magnetickými bariérami a jejich poměr v závislosti na vzdálenosti prostřední bariéry od vnějšího průměru rotoru	- 68 -
Tab. 3.15: Střední hodnoty indukčností stroje se třemi magnetickými bariérami a jejich poměr v závislosti na vzdálenosti bariér od vnitřního průměru rotoru (stejně hodnoty vzdáleností).....	- 69 -

Tab. 3.16: Střední hodnoty indukčností stroje se třemi magnetickými bariérami a jejich poměr v závislosti na vzdálenosti krajních bariér od vnitřního průměru rotoru	- 70 -
Tab. 3.17: Jmenovité parametry magnetických bariér stroje se čtyřmi bariérami	- 72 -
Tab. 3.18: Střední hodnoty indukčností stroje se čtyřmi magnetickými bariérami a jejich poměr v závislosti na šířce bariér	- 73 -
Tab. 3.19: Střední hodnoty indukčností stroje se čtyřmi magnetickými bariérami a jejich poměr v závislosti na vzdálenosti bariér od vnějšího průměru rotoru (stejně hodnoty vzdáleností).....	- 74 -
Tab. 3.20: Střední hodnoty indukčností stroje se čtyřmi magnetickými bariérami a jejich poměr v závislosti na vzdálenosti bariér u středu pólu od vnějšího průměru rotoru.....	- 76 -
Tab. 3.21: Střední hodnoty indukčností stroje se čtyřmi magnetickými bariérami a jejich poměr v závislosti na vzdálenosti bariér od vnitřního průměru rotoru (stejně hodnoty vzdáleností).....	- 77 -
Tab. 3.22: Střední hodnoty indukčností stroje se čtyřmi magnetickými bariérami a jejich poměr v závislosti na vzdálenosti krajních bariér od vnitřního průměru rotoru	- 78 -
Tab. 3.23: Jmenovité parametry magnetických bariér stroje s labyrintem bariér	- 80 -
Tab. 3.24: Střední hodnoty indukčností stroje s labyrintem magnetických bariér a jejich poměr v závislosti na vertikální vzdálenosti bariér	- 81 -
Tab. 3.25: Střední hodnoty indukčností stroje s labyrintem magnetických bariér a jejich poměr v závislosti na horizontální vzdálenosti bariér	- 82 -

Přílohy

I. Příloha 1

Typical data for SURA® M350-50A

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

Loss at 1.5 T, 50 Hz, W/kg	3,29
Loss at 1.0 T, 50 Hz, W/kg	1,39
Anisotropy of loss, %	10

Magnetic polarization at 50 Hz

H = 2500 A/m, T	1,58
H = 5000 A/m, T	1,67
H = 10000 A/m, T	1,78

Coercivity (DC), A/m	45
Relative permeability at 1.5 T	1050
Resistivity, $\mu\Omega\text{cm}$	42

Yield strength, N/mm ²	320
Tensile strength, N/mm ²	460
Young's modulus, RD, N/mm ²	200 000
Young's modulus, TD, N/mm ²	210 000
Hardness HV5 (VPN)	160

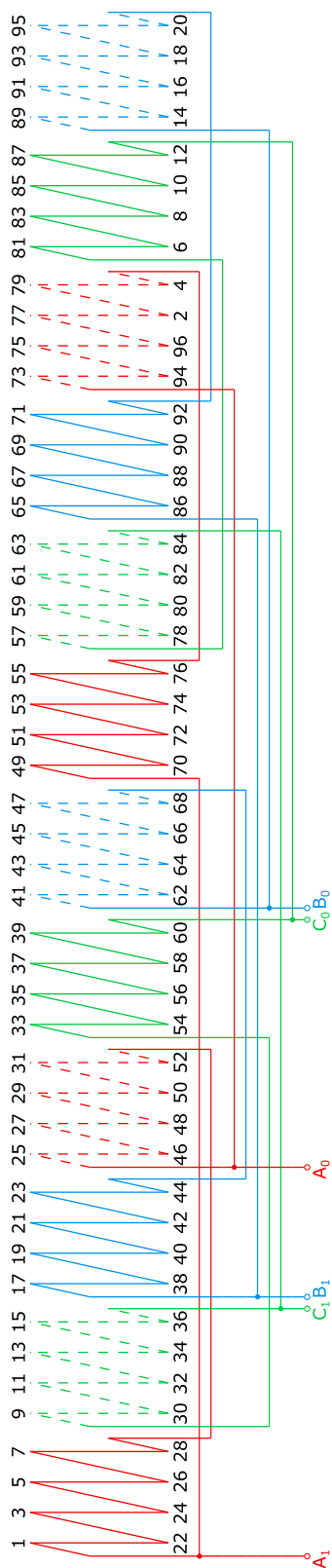
RD represents the rolling direction
 TD represents the transverse direction
 Values for yield strength (0.2 % proof strength)
 and tensile strength are given for the rolling direction
 Values for the transverse direction are approximately 5% higher



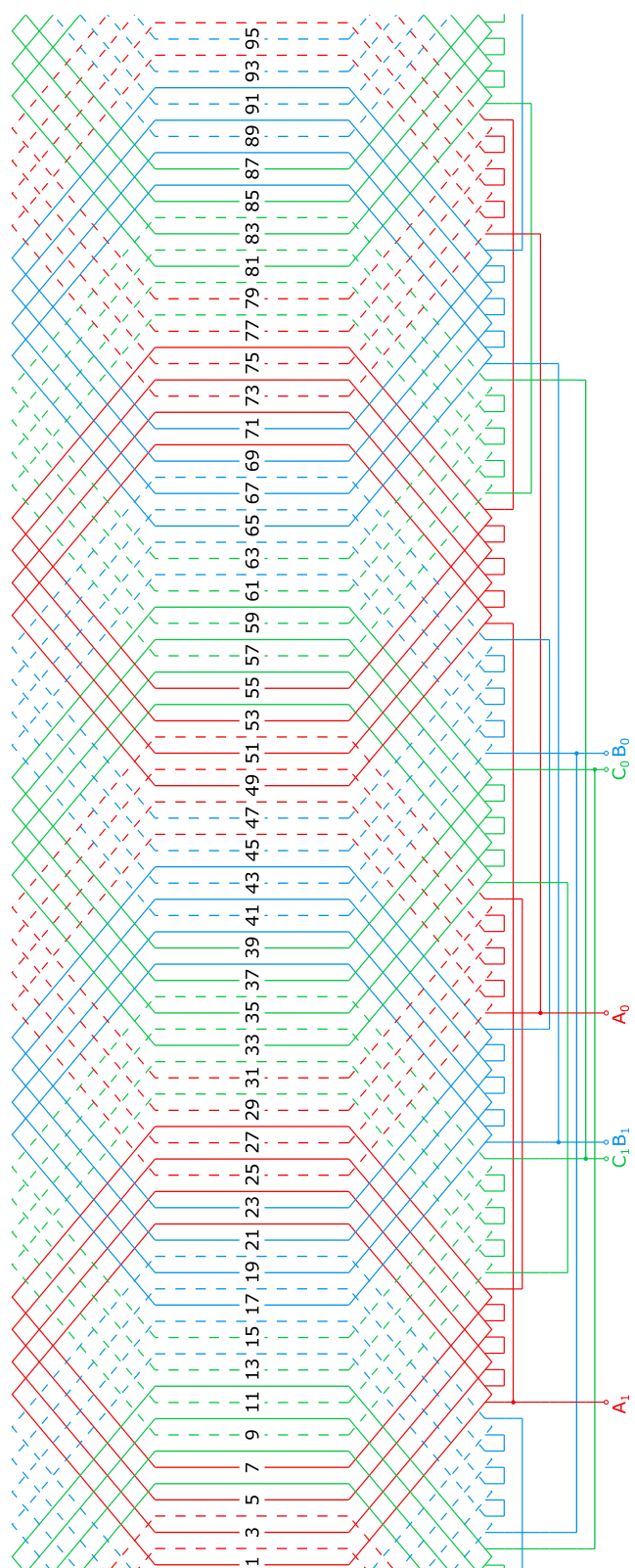
Oct 2009

Obr. I.1: Ztrátová čísla a hodnoty pro sestavení magnetizační charakteristiky elektrotechnických plechů M350-50A

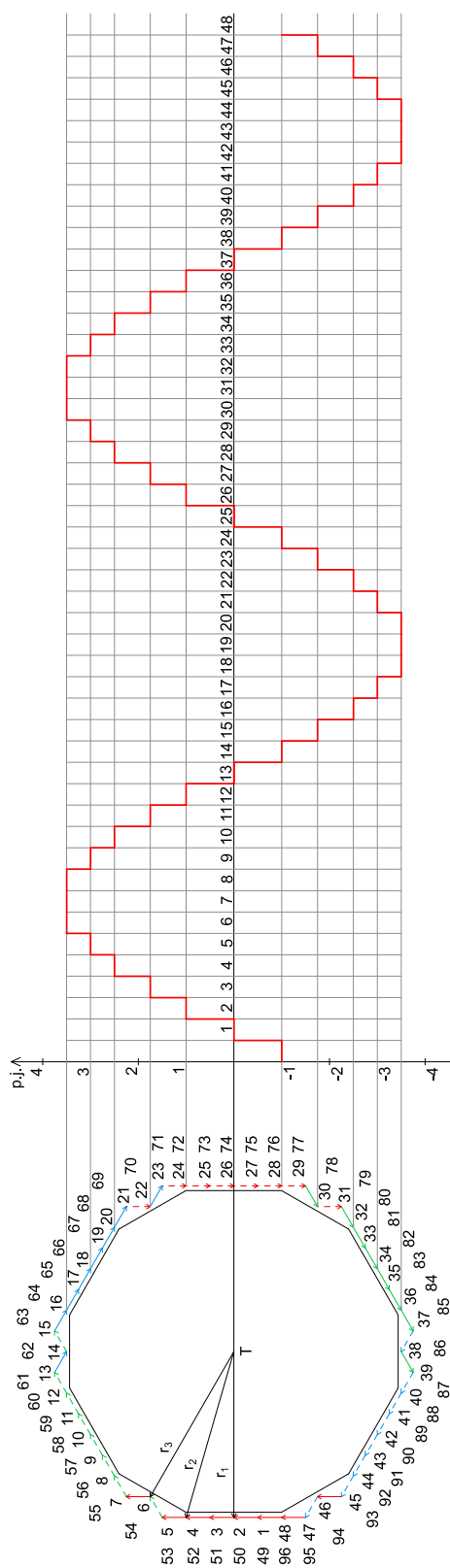
II. Příloha 2



Obr. II.1: Pilové schéma

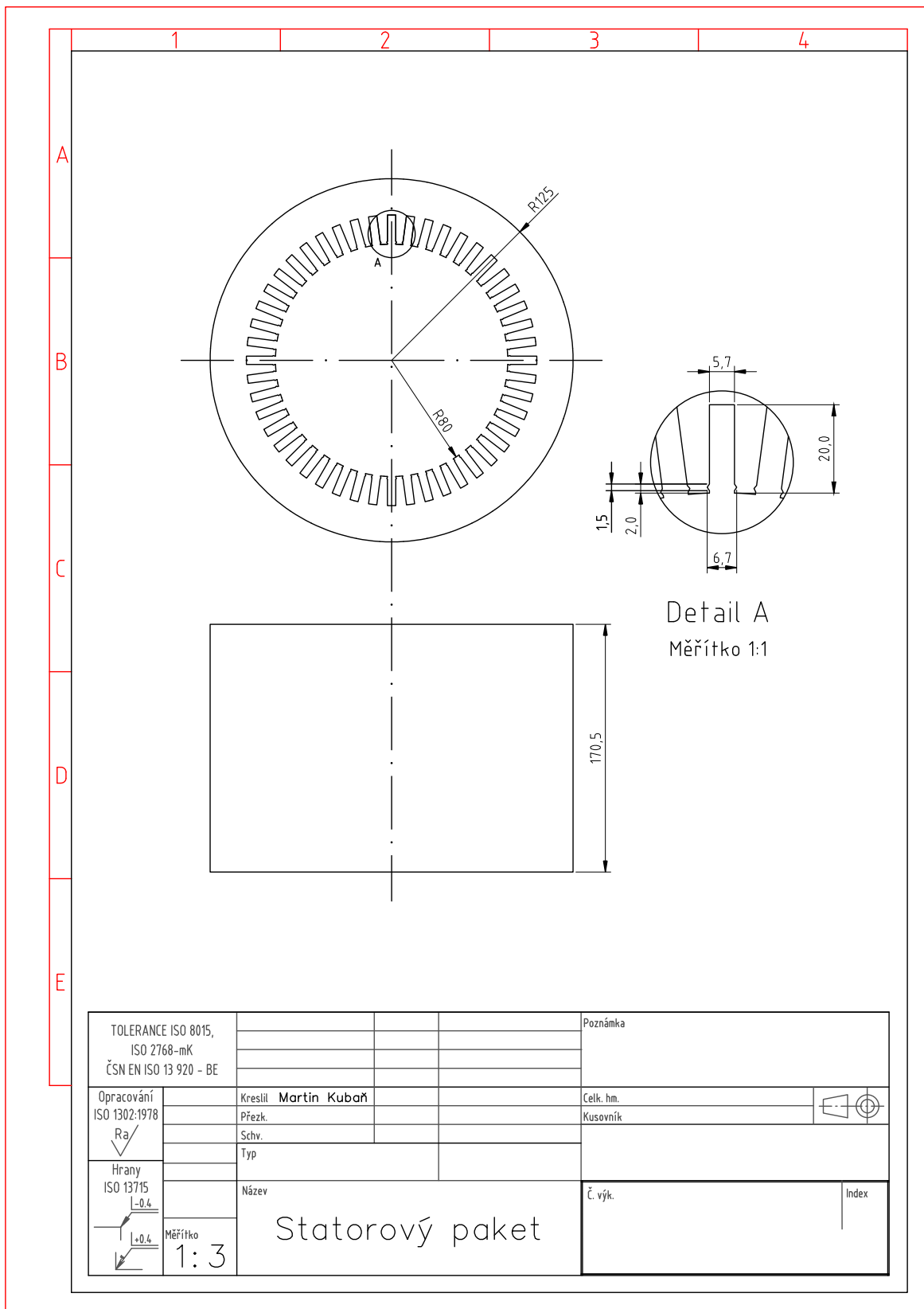


Obr. II.2: Schéma zapojení cívek

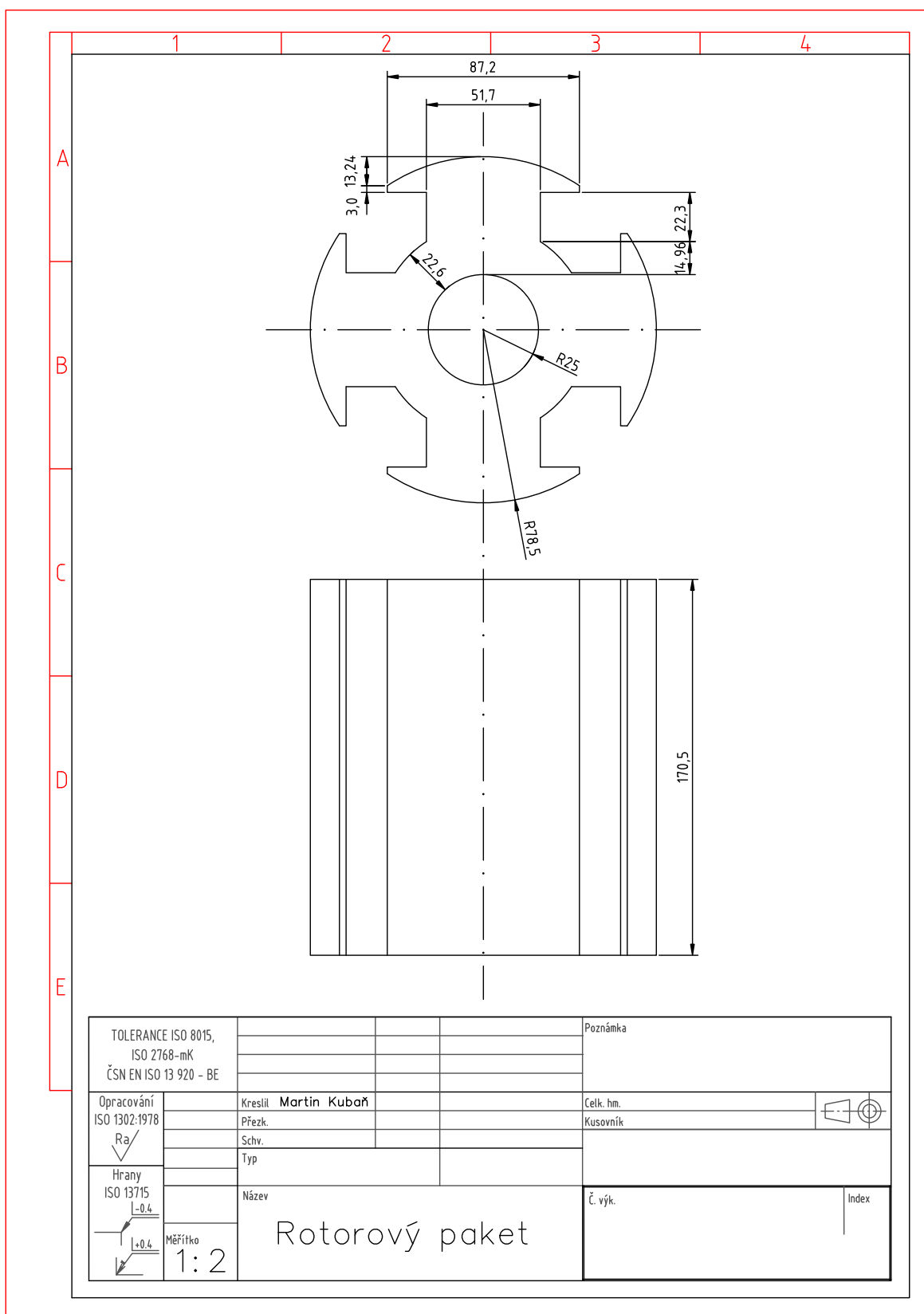


Obr. II.3: Křivka magnetických napětí

III. Příloha 3



Obr. III.1: Výkres statorového paketu



Obr. III.2: Výkres rotorového paketu