

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Návrh stejnosměrného stroje s derivačním buzením

vedoucí práce: Doc. Ing. Josef Červený, CSc.

2012

autor: Miroslav Blohmann

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Miroslav BLOHMANN**
Osobní číslo: **E09B0035P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**
Název tématu: **Návrh stejnosměrného stroje s derivačním buzením**
Zadávací katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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


1. Proveďte elektromagnetický návrh stejnosměrného motoru s parametry: $P = 25 \text{ kW}$, $U = 200 \text{ V}$, $n = 1800 \text{ ot./min.}$, derivační buzení, provedení IP22, tvar M101.
2. Nakreslete schématicky příčný a podélný řez strojem.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Rozsah pracovní zprávy: **20 - 30 stran**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:

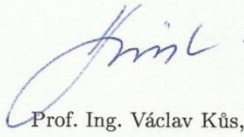
- 1. Kopylov, I. P.: Stavba elektrických strojů**
- 2. L. Cigánek: Stavba elektrických strojů**

Vedoucí bakalářské práce: **Doc. Ing. Josef Červený, CSc.**
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání bakalářské práce: **17. října 2011**
Termín odevzdání bakalářské práce: **3. června 2012**


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




Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 17. října 2011

Abstrakt

Návrh stejnosměrného stroje s derivačním buzením

Předkládaná bakalářská práce se zabývá elektromagnetickým návrhem stejnosměrného stroje s derivačním buzením o výkonu 25 kW. Hlavním úkolem práce je vypracování elektromagnetického návrhu dle zadaných parametrů. Součástí práce je i schematicky kreslený podélný a příčný řez stroje.

Klíčová slova

stejnospměrný stroj, derivační buzení, elektromagnetický návrh, návrh vinutí, komutátor, hlavní póly, komutační póly, schématický řez, kotva, rotorová drážka

Abstract

Design of the shunt-excited dc machine

The submitted thesis deals with the electromagnetic design of DC shunt excited machine with an output 25 kW. The main task of this work is the development of electromagnetic design according to given parameters. The work also contains longitudinal and cross schematic cut of the machine.

Key words

DC machine, shunt excited, electromagnetic design, design of windings, commutator, the main poles, commutation poles, schematic cut, rotor canal

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni. Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce. Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

V Plzni dne 3.6.2012

Miroslav Blohmann

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce panu Doc. Ing. Josefu Červenému, CSc. za velmi cenné a profesionální rady, připomínky, metodické vedení práce a velmi vstřícný přístup. Dále bych chtěl poděkovat svým rodičům za podporu při studiu.

Obsah

OBSAH	8
1. ÚVOD	9
2. ZADANÉ PARAMETRY	11
3. NÁVRH A VÝPOČET MOTORU	12
3.1. ZÁKLADNÍ ROZMĚRY A VYUŽITÍ STROJE.....	12
3.2. VÝPOČET VINUTÍ KOTVY	13
3.3. VÝPOČET VELIKOSTI DRÁŽEK A ZUBŮ KOTVY	16
3.4. URČENÍ ROZMĚRŮ MAGNETICKÉHO OBVODU	19
3.5. MAGNETICKÁ NAPĚTÍ V JEDNOTLIVÝCH ČÁSTECH OBVODU	20
3.6. VÝPOČET PARALELNÍHO BUDÍCÍHO VINUTÍ.....	22
3.7. VÝPOČET BUDÍCÍHO PROUDU A CÍVKY BUZENÍ	22
3.8. VÝPOČET PÓLOVÉHO NÁSTAVCE HLAVNÍHO PÓLU.....	23
3.9. VÝPOČET ROZMĚRŮ KOMUTÁTORU	24
3.10. VÝPOČET KOMUTAČNÍCH PÓLŮ	26
3.11. VÝPOČET PÓLOVÉHO NÁSTAVCE KOMUTAČNÍHO PÓLU.....	27
3.12. VÝPOČET VINUTÍ KOMUTAČNÍHO PÓLU.....	28
3.13. VOLBA A VÝPOČET KARTÁČŮ.....	29
3.14. VÝPOČET ZTRÁT A ÚČINNOSTI STROJE	30
3.15. SHRNUTÍ ZÁKLADNÍCH ROZMĚRŮ	33
4. ZÁVĚR	34
5. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	35
6. PŘÍLOHY	36

1. Úvod

Historie stejnosměrného stroje

Stejnospměrný stroj je historicky nejstarší točivý elektrický stroj. Každý stejnosměrný stroj je schopen pracovat jako motor i jako generátor. V minulosti se tyto stroje používaly jako zdroje elektrické energie v podobě dynam. Postupem času byla dynam ve výrobě elektrické energie nahrazena synchronními stroji. [3]

Stejnospměrné motory slouží k přeměně elektrické energie na mechanickou. Jejich největší výhodou oproti jiným motorům je snadná a plynulá regulace otáček. S rozvojem polovodičových frekvenčních měničů jsou stejnosměrné motory postupně nahrazovány motory jinými, zejména asynchronními, kvůli jejich jednodušší konstrukci a menším nárokům na údržbu. Největší nevýhodou stejnosměrných motorů je mechanický střídač - komutátor. Na komutátor dosedají kartáče, na kterých vlivem nedokonalého kontaktu dochází k jiskření a tím pádem ke ztrátám a také k tvorbě elektromagnetického rušení do okolí. Dosažení správné komutace je proto poměrně složitá věc. I přes to nacházejí stejnosměrné motory v dnešní době využití. Stejnospměrné motory jsou schopné pracovat v libovolných otáčkách, omezených pouze jejich mechanickou konstrukcí. Využívají se například v obráběcích strojích, válcovnách, jako pohony čerpadel, ventilátorů, lisů atd. Další využití nacházejí v elektrické trakci, ať už u silničních nebo železničních vozidel nebo například jako pohony vleků či lanovek. Horní výkonová hranice proveditelnosti těchto strojů je přibližně 5 MW. [3]

Konstrukce stejnosměrného stroje

Stejnospměrný stroj se skládá ze statoru, odlitého nebo poskládaného z plechů, na kterém se nachází hlavní a komutační póly. Póly jsou vyrobeny z oceli a je na nich navinuta cívka, kterou se vytváří magnetické pole. Požadovaný tvar magnetického pole je dosažený vhodným tvarem pólových nástavců. [4]

Pohyblivá část stroje se nazývá rotor neboli kotva. Kotva je složena vždy z plechů. Po obvodu kotvy jsou drážky, do kterých jsou buď vsypávány drátové vodiče, nebo vkládány pravoúhlé vodiče. Vodiče jsou obvykle měděné. Podle konstrukce drážky je drážka buď uzavřená, polouzavřená nebo otevřená. Podle typu drážky se vinutí může zajistit proti pohybu

2. Zadané parametry

Výkon stroje	$P = 25 \text{ kW}$
Napětí stroje	$U = 200 \text{ V}$
Jmenovité otáčky	$n = 1800 \text{ ot. / min}$
Buzení	derivační
Provedení	IP22
Tvar	M101

Tab. 1.1. Zadané parametry motoru

3. Návrh a výpočet motoru

3.1. Základní rozměry a využití stroje

Vnitřní výkon kotvy na otáčku

$$\frac{P}{\mu n} = \frac{25000}{0,85 \cdot 1800} = 16,4 \text{ W/ot.} \quad (1.1)$$

- Předpokládám účinnost 85%
- Pro vypočtenou hodnotu 16,4 W/ot. podle [1], str. 591, obr. 765 odečteny hodnoty:

$$D = 0,25 \text{ m} \quad D_e = 0,445 \text{ m} \quad A = 22000 \text{ A/m} \quad B_\delta = 0,8 \text{ T} \quad h = 0,022 \text{ m}$$

Vnitřní výkon stroje

$$P_i = \frac{P}{\mu n} \cdot n = 16,4 \cdot 1800 = 29520 \text{ W} \quad (1.2)$$

Výpočet vnějšího průměru kotvy

$$D = 0,12 \cdot \left(\frac{P_i}{n}\right)^{0,27} = 0,12 \cdot \left(\frac{29520}{1800}\right)^{0,27} = 0,25 \text{ m} \quad (1.3)$$

Počet pólů podle [1], str. 591, obr. 765

$$2p = 4 \text{ póly} \quad (1.4)$$

- Volím počet pólů $2p = 4$

Frekvence proudu v rotoru

$$f = \frac{p \cdot n}{60} = \frac{2 \cdot 1800}{60} = 60 \text{ Hz} \quad (1.5)$$

Pólová rozteč

$$\tau_p = \frac{\pi \cdot D}{2p} = \frac{\pi \cdot 0,25}{2 \cdot 2} = 0,196 \text{ m} \quad (1.6)$$

3.2. Výpočet vinutí kotvy

Proud v kotvě

$$I_1 = \frac{P_i}{U} = \frac{29520}{200} = 148 \text{ A} \quad (1.7)$$

Počet závitů kotvy zapojených v sérii

$$N_s = \frac{\pi \cdot D \cdot A}{2 \cdot I_1} = \frac{\pi \cdot 0,25 \cdot 22000}{2 \cdot 148} = 58,4 \text{ závitů} \quad (1.8)$$

Počet drážek kotvy podle [1], str. 592, tab. 1

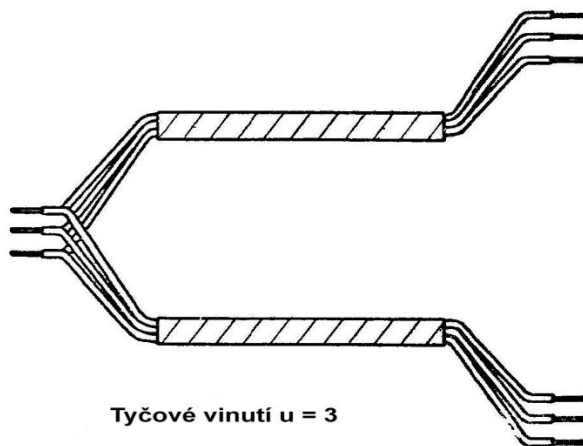
$$Q = 35 \text{ drážek} \quad (1.9)$$

- *Volím $Q = 35$ drážek*

Počet vodičů v drážce

$$n_d = \frac{4 \cdot a \cdot N_s}{Q} = \frac{4 \cdot 1 \cdot 58,4}{35} = 6,67 \rightarrow 6 \quad (1.10)$$

- *Volím sériové vlnové vinutí nekřížené, s počtem paralelních větví $a = 1$*
- *Vinutí má pouze jeden závit v cívce – vinutí tyčové (viz Obr. 1.2.)*
- *Volím počet vodičů v drážce $n_d = 6$*
- *Počet aktivních cívek v jedné vrstvě drážky $u = 3$*



Obr. 1.2. Schéma použitého vinutí (upraveno z [1])

Úprava proudové hustoty a počtu závitů v sérii

- Protože počet vodičů v drážce jsem zaokrouhlil na 6 (vypočteno 6,67), je potřeba upravit počet závitů kotvy v sérii a velikost proudové hustoty

Upravený počet závitů kotvy zapojených v sérii

$$N_s = \frac{n_d \cdot Q}{4 \cdot a} = \frac{6 \cdot 35}{4 \cdot 1} = 52,5 \text{ závitů} \quad (1.11)$$

Upravená proudová hustota

$$A = \frac{2 \cdot N_s \cdot I_1}{\pi \cdot D} = \frac{2 \cdot 52,5 \cdot 148}{\pi \cdot 0,25} = 19800 \text{ A} \quad (1.12)$$

Krok cívky v drážce

$$y_k = \frac{Q - a}{p} = \frac{35 - 1}{2} = 17 \text{ drážek} \quad (1.13)$$

Počet drážek na pól

$$Q_p = \frac{Q}{2 \cdot p} = \frac{35}{4} = 8,75 \text{ drážky na pól} \quad (1.14)$$

Počet lamel komutátoru

$$K = u \cdot Q = 3 \cdot 35 = 105 \text{ lamel} \quad (1.15)$$

Střední lamelové napětí

$$E_1 = \frac{2 \cdot p \cdot U}{K} = \frac{2 \cdot 2 \cdot 200}{105} = 7,6 \text{ V} \quad (1.16)$$

- Střední lamelové napětí je menší než 16 V → je splněno

Ztráty v mědi

$$P_{cu1} = P_{cu1\%} \cdot P_0 = 0,034 \cdot \frac{25000}{0,85} = 1000 \text{ W} \quad (1.17)$$

- Ztráty v mědi v % podle [1], str.564, obr. 723, předpokládám 3,4%
- Příkon $P_0 = \frac{P}{\eta} = \frac{25000}{0,85}$

Odpor vinutí kotvy

$$R_1 = \frac{P_{cu1}}{I_1^2} = \frac{1000}{148^2} = 0,046 \ \Omega \quad (1.18)$$

Elektromotorická síla kotvy

$$E = U - R_1 \cdot I_1 = 200 - 0,046 \cdot 148 = 192 \text{ V} \quad (1.19)$$

Magnetický tok jednoho pólu

$$\Phi = \frac{E}{4 \cdot f \cdot N_s} = \frac{193}{4 \cdot 60 \cdot 52,5} = 0,015 \text{ Wb} \quad (1.20)$$

Efektivní délka železa kotvy

$$L_e = \frac{\Phi}{\alpha \cdot B_\delta \cdot \tau_p} = \frac{0,015}{0,65 \cdot 0,8 \cdot 0,196} = 0,15 \text{ m} \quad (1.21)$$

- Pólové krytí pro stroj s komutačními póly volím $\alpha = 0,65$

Délka čela vinutí kotvy

$$l_c = 1,5 \cdot \tau_p = 1,5 \cdot 0,196 = 0,3 \text{ m} \quad (1.22)$$

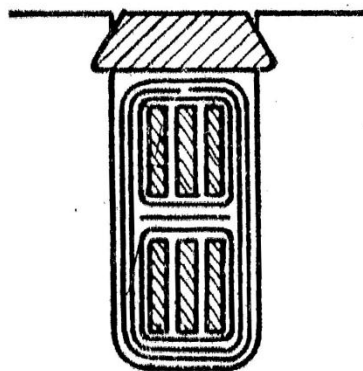
Pistoyovo kriterium – pro volbu komutačních pólů a kompenzačního vinutí

$$\kappa = \frac{N_s^2}{15 \cdot K} \cdot n \cdot I_1^2 \cdot a \cdot (L_e + 0,1 \cdot l_c) \cdot 10^{-5} = \frac{52,5^2}{15 \cdot 105} \cdot 1800 \cdot 148 \cdot 2 \cdot 1 \cdot (0,15 + 0,1 \cdot 0,3) \cdot 10^{-5} = 1,7 \quad (1.23)$$

- Podle [1], str. 593, tab.1 může být stroj navržen bez kompenzačního vinutí
- Motor bude mít komutační póly

Průřez vodiče kotvy

$$S_1 = \frac{2\rho \cdot (L_e + lc) \cdot N_s}{2 \cdot a \cdot R_1} = \frac{2 \cdot 10^{-6} \cdot (0,15 + 0,3) \cdot 52,5}{48 \cdot 2 \cdot 1 \cdot 0,046} = 10,6 \text{ mm}^2 \quad (1.24)$$



Obr. 1.3. Uspořádání vodičů v drážce rotoru (upraveno z [1])

3.3. Výpočet velikosti drážek a zubů kotvy

Rozteč drážek ve vzduchové mezeře

$$t_3 = \frac{\pi \cdot D}{Q} = \frac{\pi \cdot 0,25}{35} = 22,5 \text{ mm} \quad (1.25)$$

Rozteč drážek v 1/3 od kořene

$$t_{\frac{1}{3}} = \frac{\pi \cdot (D - \frac{4}{3} \cdot h)}{Q} = \frac{\pi \cdot (0,25 - \frac{4}{3} \cdot 0,022)}{35} = 20 \text{ mm} \quad (1.26)$$

- Hloubku drážky volím podle [1], str. 591, obr. 765, $h = 22 \text{ mm}$

Šířka v 1/3 zubu

$$b_{z\frac{1}{3}} = t_3 \cdot \frac{B_\delta}{0,9 \cdot B_{\frac{1}{3}}} = 0,0225 \cdot \frac{0,8}{0,9 \cdot 2} = 10 \text{ mm} \quad (1.27)$$

- Indukci v 1/3 zubu předpokládám 2 T

Možná šířka drážky

$$b = t_{\frac{1}{3}} - b_{z\frac{1}{3}} = 20 - 10 = 10 \text{ mm} \quad (1.28)$$

- Volím obdélníkovou drážku typu D podle [2], str. 658, obr. D4.1.

Uspořádání drážky - šířka

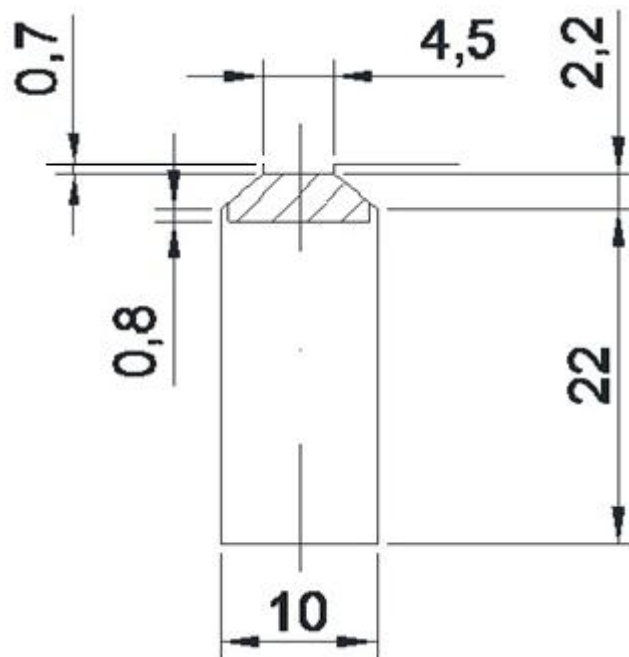
Izolace drážky	2 x 0,5 mm = 1 mm
Izolace vrstvy	2 x 0,3 mm = 0,6 mm
Izolace vodičů	3 x 0,4 mm = 1,2 mm
Vůle na šířku	<u>0,7 mm</u>
Celkem	3,5 mm

- Na vodiče zbývá šířka $10 - 3,5 = 6,5 \text{ mm}$
- Volím vodič o rozměrech 1,25 x 4 mm dle [2], str. 652, tab. D3.2
- Průřez jednoho vodiče je 4,785 $\rightarrow S_{\text{celk}} = 3 \cdot 4,785 = 14,355 \text{ mm}^2$

Uspořádání drážky – hloubka

Izolované vodiče	$2 \times (4 + 0,4) \text{ mm} = 8,8 \text{ mm}$
Izolace drážky	$2 \times 1,5 \text{ mm} = 3 \text{ mm}$
Izolace vrstvy	$4 \times 0,5 \text{ mm} = 2 \text{ mm}$
Vložka mezi vrstvy	2 mm
Klínek	$0,25 \cdot b + 1 = 0,25 \cdot 10 + 1 = 3,5 \text{ mm}$
Vůle na hloubku	<u>2 mm</u>
Celkem	21,3 mm

- Výše zvolená hloubka drážky $h = 22 \text{ mm}$ je odpovídající



Obr. 1.4. Drážka použitá na rotoru - polouzavřená typu D (měřítko 2:1)

3.4. Určení rozměrů magnetického obvodu

Výška jhu rotoru

$$h_{jr} = \frac{\Phi}{2 \cdot L_e \cdot 0,9 \cdot B_{jr}} = \frac{0,015}{2 \cdot 0,15 \cdot 0,9 \cdot 1,3} = 0,043 \text{ m} \quad (1.29)$$

- Indukci ve jhu rotoru předpokládám 1,3 T

Vnitřní průměr plechů rotoru

$$D_i = D - 2 \cdot h - 2 \cdot h_{jr} = 0,25 - 2 \cdot 0,022 - 2 \cdot 0,043 = 0,12 \text{ m} \quad (1.30)$$

Vzduchová mezera pod hlavním pólem

$$\delta = 0,4 \cdot 10^{-6} \cdot \tau_p \cdot \frac{A}{B_\delta} = 0,4 \cdot 10^{-6} \cdot 0,196 \cdot \frac{19800}{0,8} = 2 \text{ mm} \quad (1.31)$$

Vzduchová mezera pod komutačním pólem

$$\delta_{kp} = 0,025 \cdot \tau_p = 0,025 \cdot 0,196 = 5 \text{ mm} \quad (1.32)$$

Délka hlavního pólu

$$L_p = L_e = 0,15 \text{ m} \quad (1.33)$$

- Délku hlavního pólu volím stejnou, jako délku kotvy $L_p = 0,15 \text{ m}$

Šířka hlavního pólu

$$b_p = \frac{\Phi \cdot (1 + v)}{B_p \cdot L_p} = \frac{0,015 \cdot 1,15}{1,6 \cdot 0,15} = 0,072 \text{ m} \quad (1.34)$$

- Indukci v hlavním pólu předpokládám 1,6 T
- Rozptyl hlavního pólu předpokládám 15 % $\rightarrow v = 0,15$

Výška jha statoru

$$h_{js} = \frac{\Phi \cdot (1 + \nu)}{2 \cdot B_{js} \cdot (L_p + b_p)} = \frac{0,015 \cdot 1,15}{2 \cdot 1,2 \cdot (0,15 + 0,072)} = 0,032 \text{ m} \quad (1.35)$$

- Indukci ve jhu statoru předpokládám 1,2 T

Carterův číselník pro vzduchovou mezeru

$$k_c = \frac{t_3}{t_3 + \delta - 0,75 \cdot b} = \frac{23}{23 + 2 - 0,75 \cdot 10} = 1,3 \quad (1.36)$$

Upřesnění indukce v 1/3 zubu

Skutečná rozteč v 1/3 zubu

$$t_{\frac{1}{3}skut.} = \frac{\pi \cdot (D - \frac{4}{3} \cdot h)}{Q} = \frac{\pi \cdot (0,25 - \frac{4}{3} \cdot 0,022)}{35} = 20 \text{ mm} \quad (1.37)$$

Skutečná šířka zubu v 1/3

$$b_{z\frac{1}{3}skut.} = t_{\frac{1}{3}} - b = 20 - 10 = 10 \text{ mm} \quad (1.38)$$

Skutečná indukce v 1/3 zubu

$$B_{z\frac{1}{3}skut.} = \frac{b_{z\frac{1}{3}}}{b_{z\frac{1}{3}skut.}} \cdot B_{z\frac{1}{3}} = \frac{10}{10} \cdot 2 = 2 \text{ T} \quad (1.39)$$

- Opravená indukce v 1/3 zubu vychází stejně jako předem předpokládaná

3.5. Magnetická napětí v jednotlivých částech obvodu

Magnetické napětí pro vzduchovou mezeru

$$U_\delta = 1,6 \cdot 10^6 \cdot B_\delta \cdot k_c \cdot \delta = 1,6 \cdot 10^6 \cdot 0,8 \cdot 1,3 \cdot 0,002 = 3330 \text{ A} \quad (1.40)$$

Intenzita v zubu podle [2], str. 629, tab. D2.8 pro indukci $B_{z1/3} = 2 \text{ T}$

$$H_z = 38800 \text{ A/m} \quad (1.41)$$

Magnetické napětí pro zuby

$$U_z = 2 \cdot h \cdot H_z = 2 \cdot 0,022 \cdot 38800 = 1707 \text{ A} \quad (1.42)$$

Intenzita ve jhu rotoru podle [2], str. 629, tab. D2.8 pro indukci $B_{jr} = 1,3 \text{ T}$

$$H_{jr} = 550 \text{ A/m} \quad (1.43)$$

Magnetické napětí jha rotoru

$$U_{jr} = l_{jr} \cdot H_{jr} = 0,196 \cdot 550 = 108 \text{ A} \quad (1.44)$$

- l_{jr} odpovídá $\tau_p \rightarrow 0,196 \text{ m}$

Přibližná délka indukční čáry v pólu

$$l_p = 0,5 \cdot (D_e - D) = 0,5 \cdot (0,445 - 0,25) = 0,0975 \text{ m} \quad (1.45)$$

Intenzita v hlavním pólu podle [2], str. 629, tab. D2.8 pro indukci $B_p = 1,6 \text{ T}$

$$H_p = 3400 \text{ A/m} \quad (1.46)$$

Magnetické napětí pro póly

$$U_p = 2 \cdot l_p \cdot H_p = 2 \cdot 0,0975 \cdot 3400 = 663 \text{ A} \quad (1.47)$$

Délka indukční čáry ve jhu statoru

$$l_{js} = \frac{\pi \cdot D_e}{2p} = \frac{\pi \cdot 0,445}{2 \cdot 2} = 0,35 \text{ m} \quad (1.48)$$

Intenzita ve jhu statoru podle [2], str. 629, tab. D2.8 pro indukci $B_{js} = 1,2 \text{ T}$

$$H_{js} = 400 \text{ A/m} \quad (1.49)$$

Magnetické napětí pro jho statoru

$$U_{js} = l_{js} \cdot H_{js} = 0,35 \cdot 400 = 140 \text{ A} \quad (1.50)$$

Magnetomotorická síla na dvojpólí

$$F_m = 1,05 \cdot (U_\delta + U_z + U_{jr} + U_p + U_{js}) = 1,05 \cdot (3330 + 1707 + 108 + 663 + 140) = 6245 \text{ A} \quad (1.51)$$

- Zvětšení magnetomotorické síly pro krytí vlivu reakce kotvy odhaduji na 5 %

3.6. Výpočet paralelního budícího vinutí

Střední délka závitu

$$l_s = 2 \cdot (L_p + b_p) + \pi \cdot b_c = 2 \cdot (0,15 + 0,072) + \pi \cdot 0,038 = 0,56 \text{ m} \quad (1.52)$$

- Tloušťku cívky předpokládám $b_c = 38 \text{ mm}$

Průřez vodiče buzení

$$S_2 = \frac{\rho \cdot p \cdot F_m \cdot l_s}{U} = \frac{10^{-6} \cdot 2 \cdot 6593 \cdot 0,56}{48 \cdot 200} = 0,769 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \quad (1.53)$$

- Podle [2], str. 650, tab. D3.1 volím drát o průměru 1 mm, průřez $S_2 = 0,785 \text{ mm}^2$

3.7. Výpočet budícího proudu a cívky buzení

$$I_2 = S_2 \cdot J_2 = 0,785 \cdot 4,5 = 3,53 \text{ A} \quad (1.54)$$

- Proudovou hustotu J_2 volím $4,5 \text{ A/mm}^2$

Počet závitů cívky buzení

$$N_c = \frac{F_m}{2 \cdot I_2} = \frac{6245}{2 \cdot 3,53} = 885 \text{ závitů} \quad (1.55)$$

Ověření zda se vinutí vejde na pól

Předpokládaná výška hlavního pólu

$$h_p = 50 \text{ mm} \quad (1.56)$$

Počet závitů na výšku pólu

$$\text{poč. záv} = \frac{\text{výška pólu}}{d_{v.lak.}} = \frac{50}{1,1} = 45 \quad (1.57)$$

- Průměr vodiče lakovaného tereftalátovým lakem podle [2], str. 650, tab. D3.1 volím s rezervou

$$d_{v.lak.} = 1,1 \text{ mm} \quad (1.58)$$

- S rezervou pro navinutí cívky předpokládám, že se vejde 40 závitů na výšku

Počet vrstev cívky

$$\text{poč. vrstev} = \frac{N_c}{\text{poč. záv. na jednu výšku}} = \frac{885}{40} \doteq 23 \text{ vrstev} \quad (1.59)$$

Skutečná tloušťka cívky

$$b_{cskut.} = \text{poč. vrstev} \cdot d_{v.lak.} = 23 \cdot 1,1 \doteq 26 \text{ mm} \quad (1.60)$$

- Cívka se bez problému vejde do mnou zvolené tloušťky cívky $b_c = 38 \text{ mm}$

3.8. Výpočet pólového nástavce hlavního pólu

Výška hlavního pólu

$$h_p = 50 \text{ mm} \quad (1.61)$$

Výška dvou protilehlých pólových nástavců hlavních pólů

$$h_{2pn} = D_e - (D + 2 \cdot (h_p + \delta_p + h_{js})) = 0,445 - (0,25 + 2 \cdot (0,05 + 0,002 + 0,032)) = 0,027 \text{ m} \quad (1.62)$$

Výška jednoho pólového nástavce hlavního pólu

$$h_{pn} = \frac{h_{2pn}}{2} = \frac{0,027}{2} = 13,5 \text{ mm} \quad (1.63)$$

Šířka pólového nástavce hlavního pólu

$$b_{pn} = \alpha \cdot \tau_p = 0,65 \cdot 0,196 = 0,13 \text{ m} \quad (1.64)$$

3.9. Výpočet rozměrů komutátoru

Rozteč lamel komutátoru

$$t_l = \frac{\pi \cdot D_k}{K} = \frac{\pi \cdot 0,18}{105} = 5,4 \text{ mm} \quad (1.65)$$

- Na lamelu předpokládám 4,6 mm a 0,8 mm na mezilamelovou izolaci

Rozteč lamel redukovaná na obvod kotvy

$$t_{1'} = \frac{\pi \cdot D}{K} = \frac{\pi \cdot 0,25}{105} = 7,5 \text{ mm} \quad (1.66)$$

Krok cívky na komutátoru

$$y_k = \frac{K - a}{p} = \frac{105 - 1}{2} = 52 \text{ lamel} \quad (1.67)$$

Pólová rozteč v počtu drážek (drážkový krok)

$$y_{d1} = \frac{Q}{2p} = \frac{35}{2 \cdot 2} = 8,75 \text{ drážek} \quad (1.68)$$

- Drážkový krok vyšel $y_{d1} = 8,75$
- Drážkový krok volím $y_{d1} = 9$ drážek – šablonové vinutí

Cívkový krok pro $y_{d1} = 9$ drážek

$$y_c = u \cdot y_d = 3 \cdot 9 = 27 \text{ drážek} \quad (1.69)$$

Zpětný krok

$$y_z = y_k - y_c = 52 - 27 = 25 \text{ drážek} \quad (1.70)$$

Rozptylové číslo

$$\xi = 5 \quad (1.71)$$

- Rozptylové číslo zvoleno $\xi = 5$ podle [1]

Šířka komutačního pásma ve vzduchové mezeře

$$b_k = t_1' \cdot \left(\beta - \frac{a}{p} + u + \Delta y \right) = 7,5 \cdot \left(2 - \frac{1}{2} + 3 + \frac{0,25}{8,75} \right) = 34 \text{ mm} \quad (1.72)$$

- Krytí uhlíků předpokládám $\beta = 2$
- Δy vychází podle drážkového a cívkového kroku $\frac{0,25}{8,75}$

Střední hodnota reaktančního napětí

$$E_r = \frac{2 \cdot I_1 \cdot N_z^2}{b_k} \cdot v \cdot \mu_0 \cdot \xi \cdot L_e \cdot \frac{p}{a} = \frac{2 \cdot 148 \cdot 1^2}{0,034} \cdot 23,6 \cdot 0,4 \cdot \pi \cdot 10^{-6} \cdot 5 \cdot 0,15 \cdot \frac{2}{1} = 0,39 \text{ V} \quad (1.73)$$

- Reaktanční napětí je téměř zanedbatelné

Průměr komutátoru

$$D_k = 0,7 \cdot D = 0,7 \cdot 0,25 = 0,175 \text{ m} \quad (1.74)$$

- Průměr komutátoru D_k volím dle ČSN 35 0846 podle [2], str. 456

$$D_k = 0,180 \text{ m} \quad (1.75)$$

Obvodová rychlost komutátoru

$$v_k = \frac{\pi \cdot D_k \cdot n}{60} = \frac{\pi \cdot 0,18 \cdot 1800}{60} = 16,96 \text{ ms}^{-1} \quad (1.76)$$

Obvodová rychlost kotvy

$$v = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{60} = \frac{\pi \cdot 0,25 \cdot 1800}{60} = 23,6 \text{ ms}^{-1} \quad (1.77)$$

3.10. Výpočet komutačních pólů

Délka komutačního pólu

$$L_{kp} = L_e = 0,15 \text{ m} \quad (1.78)$$

- *Délku komutačního pólu volím stejnou, jako délku kotvy*

Indukce ve vzduchu pod komutačním pólem

$$B_{\delta k} = \frac{E_r}{2 \cdot v \cdot L_{kp}} = \frac{0,39}{2 \cdot 23,6 \cdot 0,15} = 0,055 \text{ T} \quad (1.79)$$

Magnetické napětí pro komutační mezeru

$$U_{\delta k} = 1,6 \cdot 10^6 \cdot B_{\delta k} \cdot \delta_{kp} = 1,6 \cdot 10^6 \cdot 0,055 \cdot 0,005 = 440 \text{ A} \quad (1.80)$$

Magnetomotorická síla na kompenzaci reakce kotvy

$$F_r = A \cdot \tau_p = 19800 \cdot 0,196 = 3881 \text{ A} \quad (1.81)$$

- *Magnetické napětí pro cestu železem zanedbávám ($\mu_{fe} \rightarrow \infty$)*

Počet závitů cívky komutačních pólů

$$N_{ck} = \frac{U_{\delta k} + F_r}{2 \cdot I_1} = \frac{440 + 3881}{2 \cdot 148} = 14,6 \doteq 15 \text{ závitů} \quad (1.82)$$

Magnetický tok kompenzačního pólu

$$\Phi_{kp} = b_k \cdot L_{kp} \cdot B_{\delta k} = 0,034 \cdot 0,15 \cdot 0,055 = 2,8 \cdot 10^{-4} \text{ Wb} \quad (1.83)$$

- Činitel rozptylu komutačního pólu předpokládám 300 %

$$v_k = 3 \quad (1.84)$$

- Indukci v komutačním pólu předpokládám 1,2 T

$$B_{kp} = 1,2 \text{ T} \quad (1.85)$$

Šířka komutačního pólu

$$b_{kp} = \frac{\Phi_{kp} \cdot (1 + v_k)}{L_{kp} \cdot B_{kp}} = \frac{2,8 \cdot 10^{-4} \cdot (1 + 3)}{0,15 \cdot 1,2} = 0,0062 \text{ m} \quad (1.86)$$

- Vzhledem k mechanickým vlastnostem a k přechodu toku do kostry volím $b_{kp} = 20 \text{ mm}$

$$b_{kp} = 20 \text{ mm} \quad (1.87)$$

3.11. Výpočet pólového nástavce komutačního pólu

Šířka pólového nástavce komutačního pólu

$$b_{knp} = (0,55 \text{ až } 0,75) \cdot b_k = (0,55 \text{ až } 0,75) \cdot 34 = 18,7 \text{ až } 25,5 \text{ mm} \quad (1.88)$$

- Šířku nástavce komutačního pólu volím 40 mm kvůli jednoduššímu umístění vinutí

$$b_{knp} = 40 \text{ mm} \quad (1.89)$$

- Výšku komutačního pólu volím stejnou, jako výšku hlavního pólu $h_{kp} = 50 \text{ mm}$

$$h_{kp} = 50 \text{ mm} \quad (1.90)$$

Výška protilehlých pólových nástavců komutačních pólů

$$h_{2knp} = D_e - (D + 2 \cdot (h_{kp} + \delta_{kp} + h_{js})) = 0,445 - (0,25 + 2 \cdot (0,05 + 0,005 + 0,032)) = 0,021 \text{ m} \quad (1.91)$$

Výška jednoho pólového nástavce komutačního pólu

$$h_{knp} = \frac{h_{2knp}}{2} = \frac{0,021}{2} = 10,5 \text{ mm} \quad (1.92)$$

Vnitřní průměr statoru

$$D_{is} = D_e - 2 \cdot h_{js} = 0,445 - 2 \cdot 0,032 = 0,381 \text{ m} \quad (1.93)$$

3.12. Výpočet vinutí komutačního pólu

- Ve vodiči předpokládám proudovou hustotu $\sigma = 4,5 \text{ A/mm}^2$

$$\sigma = 4,5 \text{ A/mm}^2 \quad (1.94)$$

Průřez vodiče cívky komutačního pólu

$$S_{kc} = \frac{I_1}{\sigma} = \frac{148}{4,5} = 32,9 \text{ mm}^2 \quad (1.95)$$

- Podle [2], str. 654, tab. D3.2 volím vodič o rozměrech $10 \times 3,55 \text{ mm}$ o průřezu $S_{kc} = 34,95 \text{ mm}^2$

$$S_{kc \text{ skut.}} = 34,95 \text{ mm}^2 \quad (1.96)$$

- Rozměry izolovaného vodiče podle [2], str. 655, tab. D3.3 při izolaci křemičitou páskou a lakem jsou $10,37 \times 3,92 \text{ mm}^2$

Upřesněná proudová hustota vodiče komutačního pólu

$$\sigma_{skut.} = \frac{I_1}{S_{kc \text{ skut.}}} = \frac{148}{34,95} = 4,22 \text{ A/mm}^2 \quad (1.97)$$

Počet závitů cívky na výšku

$$\frac{h_{pp}}{\text{výška vodiče}} = \frac{50}{10,37} = 4,82 \text{ závitů} \quad (1.98)$$

- S rezervou volím 4 závity na výšku

Počet vrstev cívky

$$\frac{N_c}{\text{závity na výšku}} = \frac{15}{4} = 3,75 \text{ vrstvy} \quad (1.99)$$

- S rezervou předpokládám 4 vrstvy cívky

Šířka cívky komutačního pólu

$$b_{ckp} = \text{počet vrstev} \cdot \text{šířka vodiče} = 4 \cdot 3,92 = 15,68 \text{ mm} \quad (1.100)$$

- Šířku cívky komutačního pólu předpokládám s rezervou $b_{ckp \text{ skut.}} = 18 \text{ mm}$

$$b_{ckp \text{ skut.}} = 18 \text{ mm} \quad (1.101)$$

Střední délka závitu cívky komutačního pólu

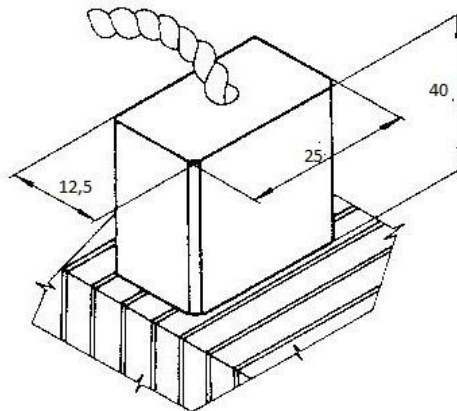
$$l_{sk} = 2 \cdot (L_{kp} + b_{kp}) + \pi \cdot b_{ckp} = 2 \cdot (0,15 + 0,02) + \pi \cdot 0,018 = 0,4 \text{ m} \quad (1.102)$$

3.13. Volba a výpočet kartáčů

Šířka jednoho kartáče

$$b_u = \beta \cdot t_1 = 2 \cdot 5,4 = 10,8 \text{ mm} \quad (1.103)$$

- Krytí uhlíků předpokládám $\beta = 2$
- Podle [2], str. 666, tab. D5.1 volím kartáč o rozměrech $12,5 \times 25 \text{ mm}$ při výšce kartáče 40 mm



Obr. 1.5. Rozměry kartáče [2]

Styková plocha kartáče

$$S_u = b_u \cdot a_u = 12,5 \cdot 25 = 312 \text{ mm}^2 \quad (1.104)$$

Počet kartáčů na roubíku

$$N_u = \frac{I_1}{\sigma_u \cdot p \cdot S_u} = \frac{148}{0,1 \cdot 2 \cdot 312} = 1,8 \rightarrow 2 \text{ kartáče na roubík} \quad (1.105)$$

- Proudové zatížení předpokládám $\sigma_u = 0,1 \text{ A/mm}^2$
- Volím 2 kartáče na roubíku

Délka komutátoru

$$L_k = (N_u + 0,5) \cdot a_u + (N_u - 1) \cdot 5 + 30 = (2 + 0,5) \cdot 25 + (2 - 1) \cdot 5 + 30 = 97,5 \text{ mm} \quad (1.106)$$

- Délku komutátoru volím 100 mm

$$L_{k \text{ skut.}} = 100 \text{ mm} \quad (1.107)$$

3.14. Výpočet ztrát a účinnosti stroje

Odpor vinutí kotvy

$$R_1 = \frac{2 \cdot \rho \cdot (L + lc) \cdot N_s}{2 \cdot a \cdot S_1} = \frac{2 \cdot 10^{-6} \cdot (0,15 + 0,3) \cdot 52,5}{48 \cdot 2 \cdot 14,355 \cdot 10^{-6}} = 0,034 \Omega \quad (1.108)$$

Ztráty ve vinutí kotvy

$$P_{cu1} = R_1 \cdot I_1^2 = 0,034 \cdot 148^2 = 745 \text{ W} \quad (1.109)$$

Odpor jedné cívky hlavního pólu

$$R_p = \rho \cdot \frac{l_s \cdot N_c}{S_2} = \frac{10^{-6} \cdot 0,56 \cdot 885}{48 \cdot 0,785 \cdot 10^{-6}} = 13,15 \Omega \quad (1.110)$$

Ztráty ve vinutí hlavních pólů

$$P_{cu2} = 2 \cdot p \cdot R_p \cdot I_2^2 = 2 \cdot 2 \cdot 13,15 \cdot 3,53^2 = 655 \text{ W} \quad (1.111)$$

Odpor jedné cívky komutačního pólu

$$R_{kp} = \rho \cdot \frac{l_{sk} \cdot N_{ck}}{S_{kc}} = \frac{10^{-6} \cdot 0,4 \cdot 15}{48 \cdot 34,95 \cdot 10^{-6}} = 0,0036 \Omega \quad (1.112)$$

Ztráty ve vinutí komutačních pólů

$$P_{kp} = 2 \cdot p \cdot R_{kp} \cdot I_1^2 = 2 \cdot 2 \cdot 0,0036 \cdot 148^2 = 316 \text{ W} \quad (1.113)$$

Hmotnost zubů kotvy

$$G_z = Q \cdot h \cdot b_{zs} \cdot 0,9 \cdot L_e \cdot \gamma = 35 \cdot 0,022 \cdot 0,013 \cdot 0,9 \cdot 0,15 \cdot 7700 = 10,4 \text{ kg} \quad (1.114)$$

- Hustota oceli $\gamma = 7700 \text{ kg/m}^3$

Hmotnost jha kotvy

$$G_{jr} = \frac{\pi}{4} \cdot [(D - 2 \cdot h)^2 - D_i^2] \cdot 0,9 \cdot L_e \cdot \gamma = \quad (1.115)$$

$$\frac{\pi}{4} \cdot [(0,25 - 2 \cdot 0,022)^2 - 0,12^2] \cdot 0,9 \cdot 0,15 \cdot 7700 = 23 \text{ kg}$$

Ztráty v železe

$$P_{fe} = G_z \cdot B_{zs}^2 \cdot \left[1,2 \cdot 1,5 \cdot \frac{f}{50} + 3 \cdot 1,1 \cdot \left(\frac{f}{50} \right)^2 \right] + G_{jr} \cdot B_{jr}^2$$

$$\cdot \left[2 \cdot 1,5 \cdot \frac{f}{50} + 2,3 \cdot 1,1 \cdot \left(\frac{f}{50} \right)^2 \right]$$

$$= 10,4 \cdot 2,4^2 \cdot \left[1,2 \cdot 1,5 \cdot \frac{60}{50} + 3 \cdot 1,1 \cdot \left(\frac{60}{50} \right)^2 \right] + 23 \cdot 0,86^2 \quad (1.116)$$

$$\cdot \left[2 \cdot 1,5 \cdot \frac{60}{50} + 2,3 \cdot 1,1 \cdot \left(\frac{60}{50} \right)^2 \right] = 538 \text{ W}$$

- Ztráty v železe jsou spočteny pro plechy se ztrátovým číslem 2,6 W/kg
- Střední hodnotu indukce v zubu předpokládám $B_{zs} = 2,4 \text{ T}$
- Střední hodnotu indukce ve jhu rotoru předpokládám $B_{jr} = 0,86 \text{ T}$

Ztráty třením kartáčů

$$P_{tk} = 9,81 \cdot f \cdot p \cdot v_k \cdot \sum S_k = 9,81 \cdot 0,17 \cdot 0,4 \cdot 17 \cdot 4 \cdot 2 \cdot 1,25 \cdot 2,5 = 284 \text{ W} \quad (1.117)$$

- Měrný tlak na kartáče předpokládám $p = 0,4 \text{ kg/cm}^2$
- Koeficient tření kartáčů podle [1], str. 564, obr. 724 volím $f = 0,17$ pro elektrografit

Ztráty přechodem

$$P_{\Delta} = 2 \cdot \Delta U \cdot I_1 = 2 \cdot 1,3 \cdot 148 = 384 \text{ W} \quad (1.118)$$

- Úbytek napětí na přechodu podle [1], str. 565, obr. 725 pro elektrografit je $\Delta U = 1,3 \text{ V}$

Mechanické ztráty podle typového výkonu

$$P_m = 4 \cdot P^{0,9} \cdot n^{0,25} = 4 \cdot 25^{0,9} \cdot 1800^{0,25} = 472 \text{ W} \quad (1.119)$$

Přídavné ztráty

$$P_d = \frac{P}{100} = \frac{25000}{100} = 250 \text{ W} \quad (1.120)$$

- Přídavné ztráty předpokládám 1% jmenovitého výkonu

Celkové ztráty

$$\begin{aligned} P_z &= P_{cu1} + P_{cu2} + P_{kp} + P_{fe} + P_{tk} + P_{\Delta} + P_m + P_d \\ &= 744,7 + 655 + 316 + 538 + 284 + 384 + 472 + 250 \\ &= 3644 \text{ W} \end{aligned} \quad (1.121)$$

Účinnost stroje

$$\mu = 1 - \frac{P_z}{P + P_z} = 1 - \frac{3644}{25000 + 3644} = 0,87 \rightarrow 87 \% \quad (1.122)$$

- Účinnost stroje 87% je mírně lepší, než předpokládaná účinnost na začátku návrhu

3.15. Shrnutí základních rozměrů

Vnější průměr statoru	$D_e = 0,445 \text{ m}$
Vnitřní průměr statoru	$D_{is} = 0,381 \text{ m}$
Výška jha statoru	$h_{js} = 0,032 \text{ m}$
Vnější průměr kotvy	$D = 0,250 \text{ m}$
Výška jha rotoru	$h_{jr} = 0,043 \text{ m}$
Výška hlavního pólu	$h_p = 0,050 \text{ m}$
Šířka hlavního pólu	$b_p = 0,072 \text{ m}$
Výška pólového nástavce hlavního pólu	$h_{pn} = 0,0135 \text{ m}$
Šířka pólového nástavce hlavního pólu	$b_{pn} = 0,130 \text{ m}$
Velikost vzduch. mezery pod hlavním pólem	$\delta = 0,002 \text{ m}$
Šířka cívky hlavního pólu	$b_c = 0,026 \text{ m}$
Výška komutačního pólu	$h_{kp} = 0,050 \text{ m}$
Šířka komutačního pólu	$b_{kp} = 0,020 \text{ m}$
Výška pólového nástavce komutačního pólu	$h_{knp} = 0,0105 \text{ m}$
Šířka pólového nástavce komutačního pólu	$b_{knp} = 0,040 \text{ m}$
Velikost vzduch. mezery pod komutačním pólem	$\delta_{kp} = 0,005 \text{ m}$
Šířka cívky komutačního pólu	$b_{ckp} = 0,018 \text{ mm}$

Tab. 1.2. Shrnutí základních rozměrů stroje

4. Závěr

Předmětem této práce bylo vytvořit elektromagnetický návrh stejnosměrného motoru s derivačním buzením se zadanými parametry a schematicky nakreslit jeho podélný a příčný řez. Práce dále obsahuje v měřítku nakreslenou drážku rotoru.

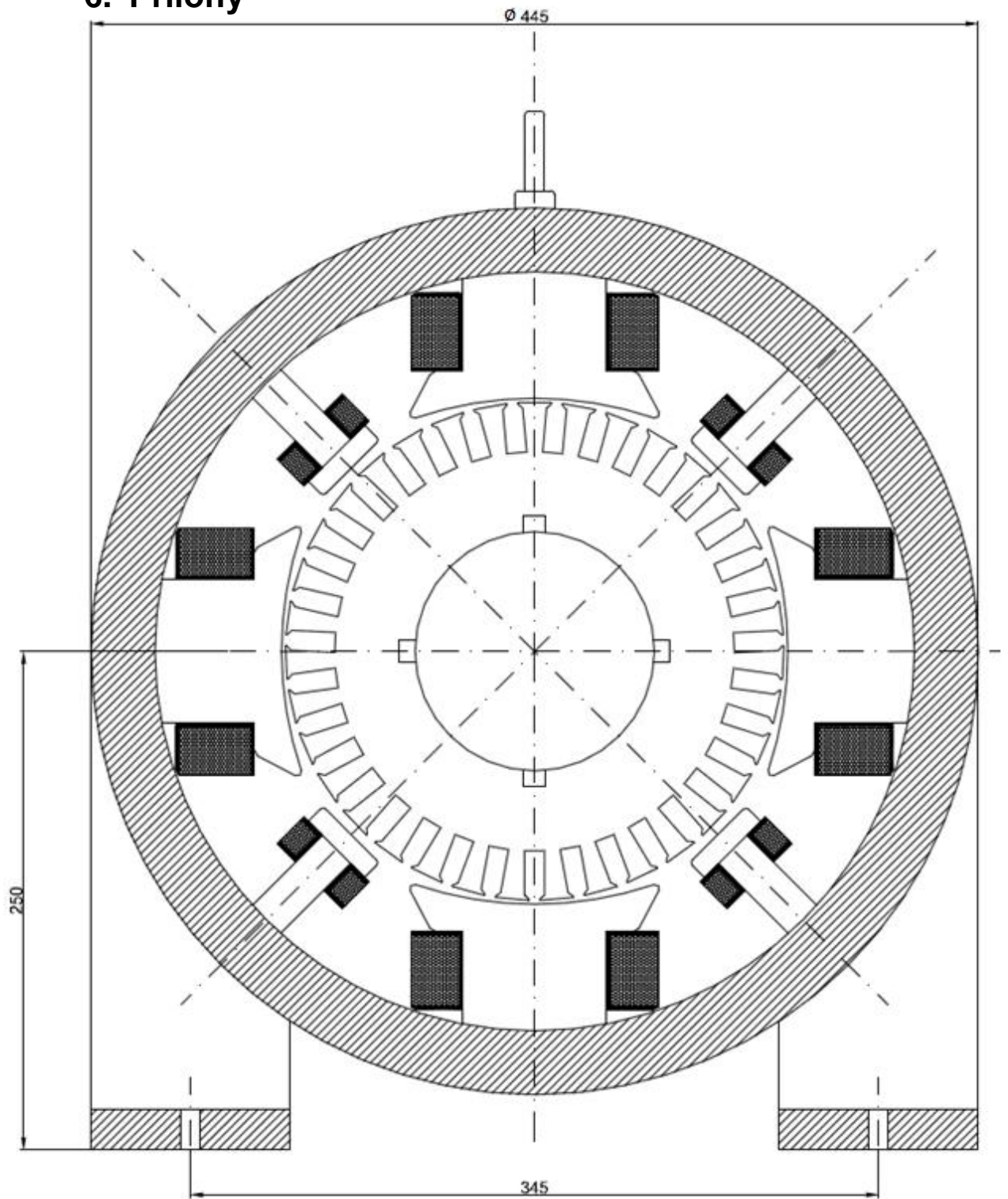
Práce se skládá z úvodu, ve kterém je stručně popsána historie stejnosměrných strojů, dále jejich konstrukce a základní princip. Výpočet začíná volbou a dopočtením několika základních rozměrů stroje a jeho předpokládaným využitím. Jako další jsem počítal vinutí kotvy a s tím související výpočet drážek a zubů kotvy. Vinutí jsem zvolil vlnové šablonové a drážku jsem zvolil polouzavřenou obdélníkovou typu D. Poté jsem určil rozměry magnetického obvodu a magnetická napětí v jednotlivých částech stroje. Návrh pokračuje výpočtem budícího vinutí, rozměrů hlavních pólů a pólových nástavců hlavních pólů. Dále jsem vypočetl rozměry komutátoru, komutačních pólů a jejich pólových nástavců. Jako další jsem počítal vinutí komutačních pólů. Vzhledem k velikosti stroje není potřeba použít kompenzační vinutí. Poté jsem vypočítal a následně zvolil vhodné kartáče, které dosedají na komutátor. Kartáče předpokládám z elektrografitu. Jako poslední jsem spočítal ztráty ve stroji a jeho účinnost. Účinnost vyšla 87 %, což je ještě o trochu lepší, než předpokládaná účinnost na začátku. Na konci elektromagnetického návrhu je tabulka se stručným shrnutím vybraných základních rozměrů.

V příloze jsou vloženy schématické řezy, příčný a podélný, dále pak nákres hlavního a vedlejšího pólu a pohled z čela a z boku na model rotoru a póly.

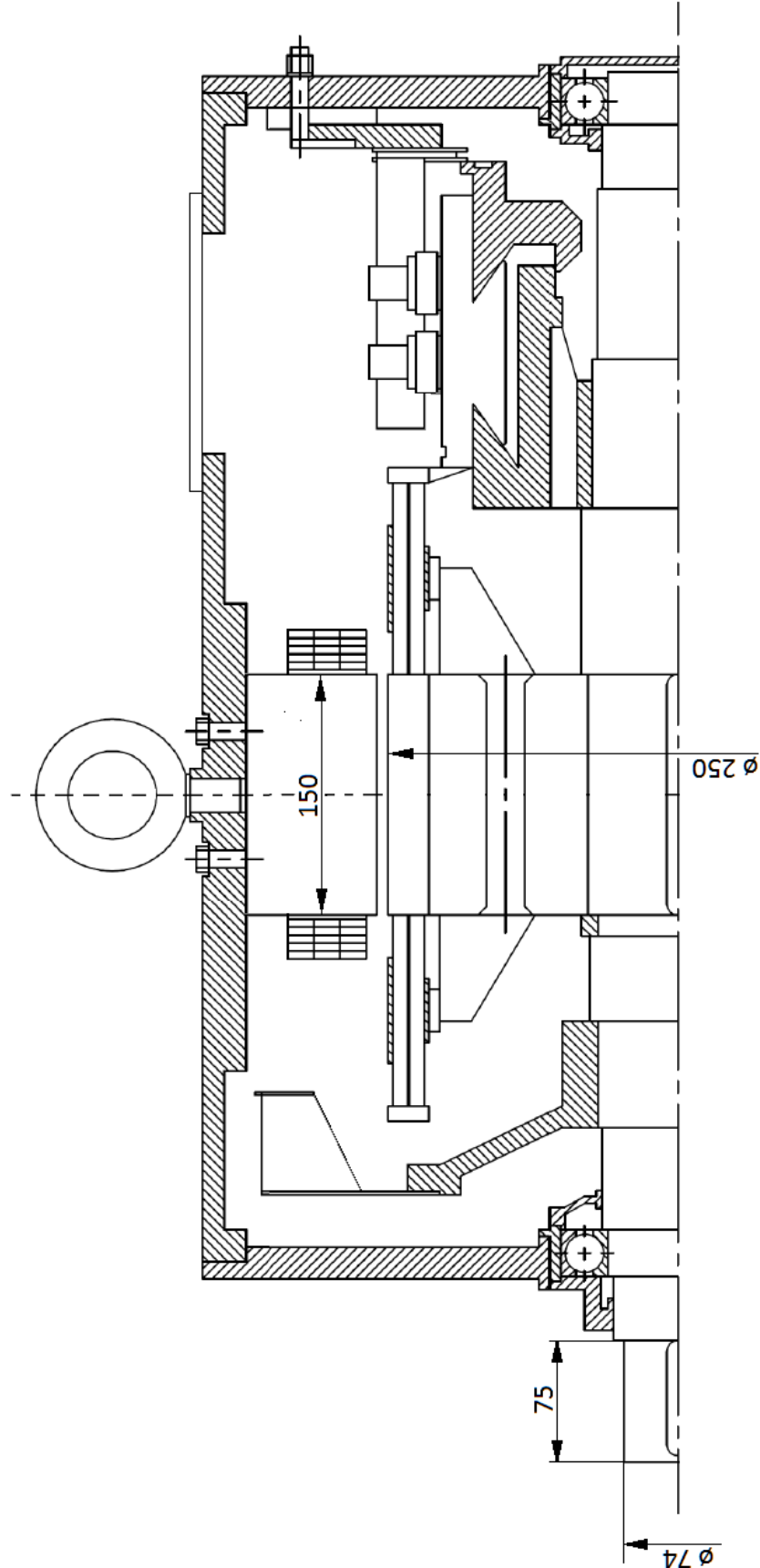
5. Seznam použité literatury

- [1] CIGÁNEK, Ladislav. *Stavba elektrických strojů: Celost. vysokoškol. učebnice*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1958, 714 s.
- [2] KOPYLOV, Igor Petrovič. *Stavba elektrických strojů*. Praha: SNLT, 1988, 688 s.
- [3] BARTOŠ, Václav, Josef ČERVENÝ, Josef HRUŠKA, Anna KOTLANOVÁ a Bohumil SKALA. *Elektrické stroje*. 1. vyd. Plzeň: ZČU v Plzni, 2006.
- [4] UHLÍŘ, Ivan a kolektiv, *Elektrické stroje a pohony*. Praha: ČVUT, 2004, 120 s.
- [5] OPAVA, Zdeněk. *Elektrina kolem nás*. 2. vyd. Praha: Albatros, 1985.
- [6] ROUBÍČEK, Ota. *Elektrické motory a pohony: příručka techniky, volby a užití vybraných druhů*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2004, 191 s. ISBN 80-730-0092-X.

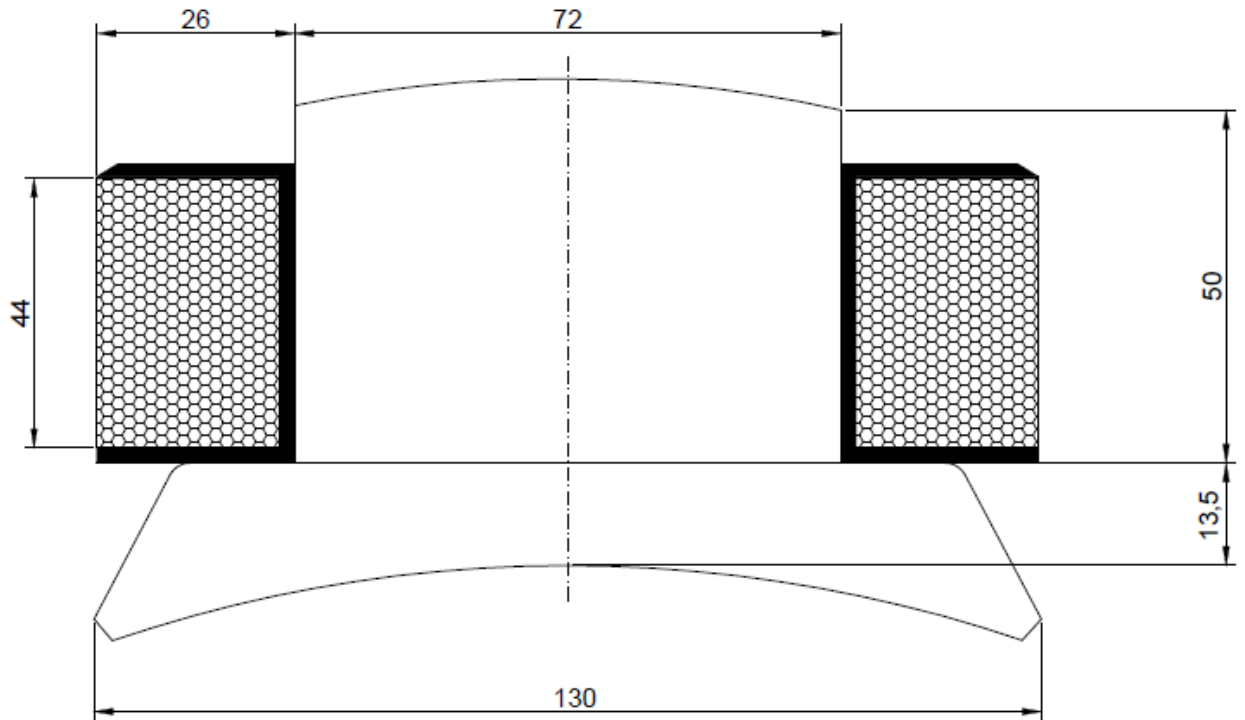
6. Přílohy



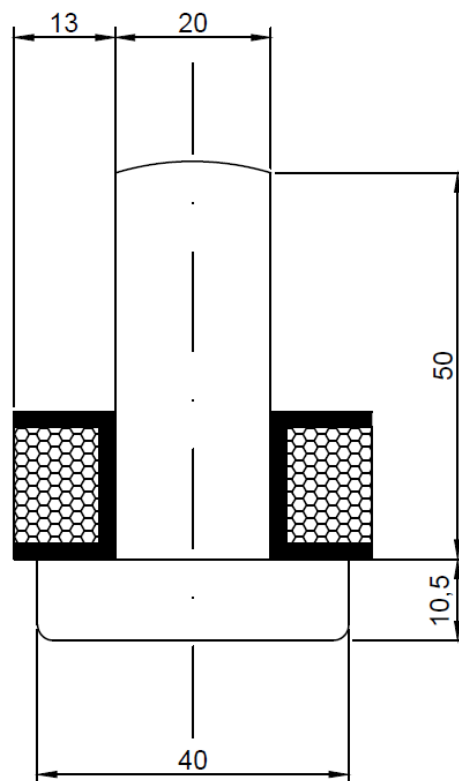
Obr. P1.1. Schématický nákres příčného řezu (měřítko 1:3)



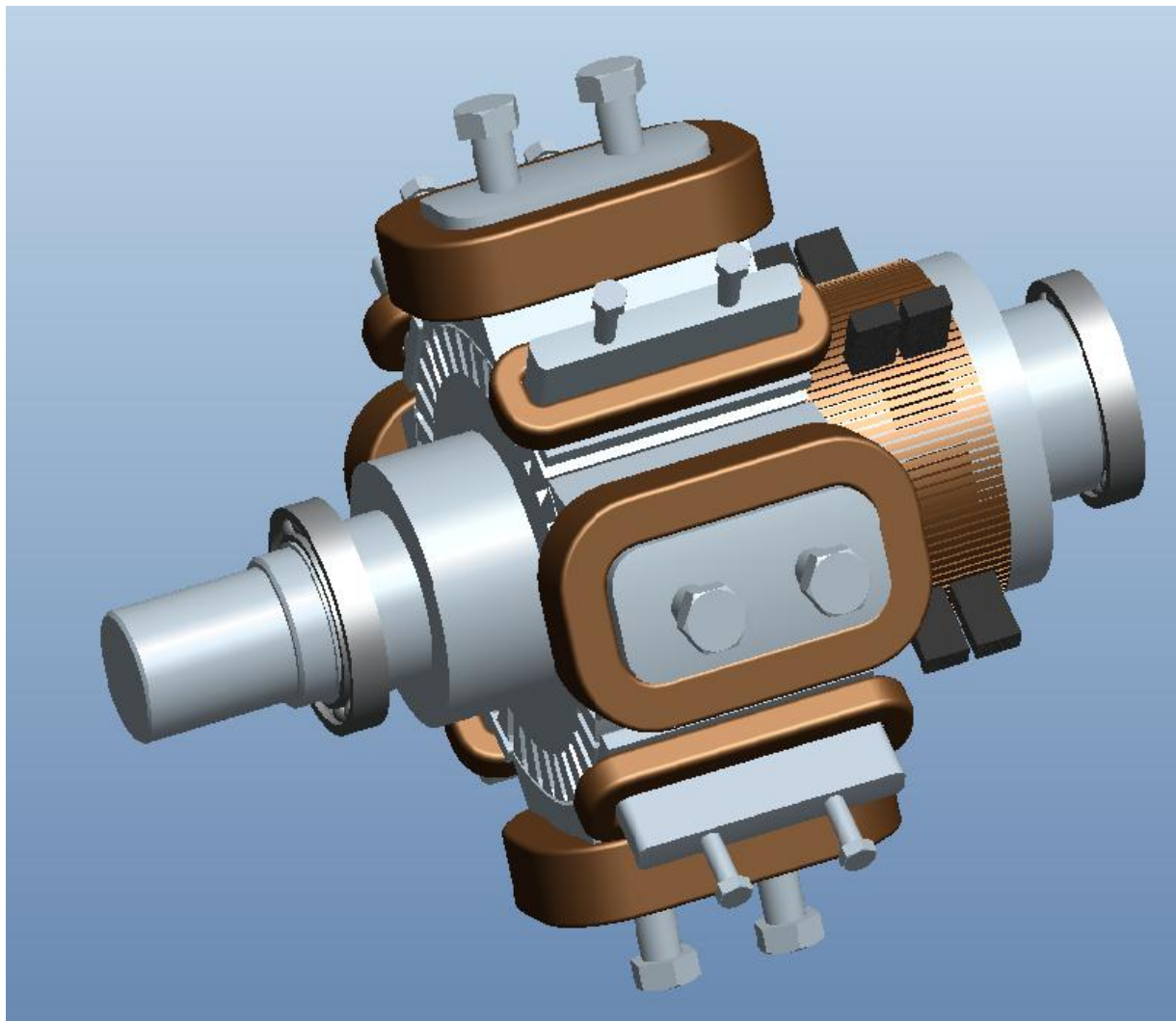
Obr. P1.2. Schématický nákres podélného řezu (podle [1])



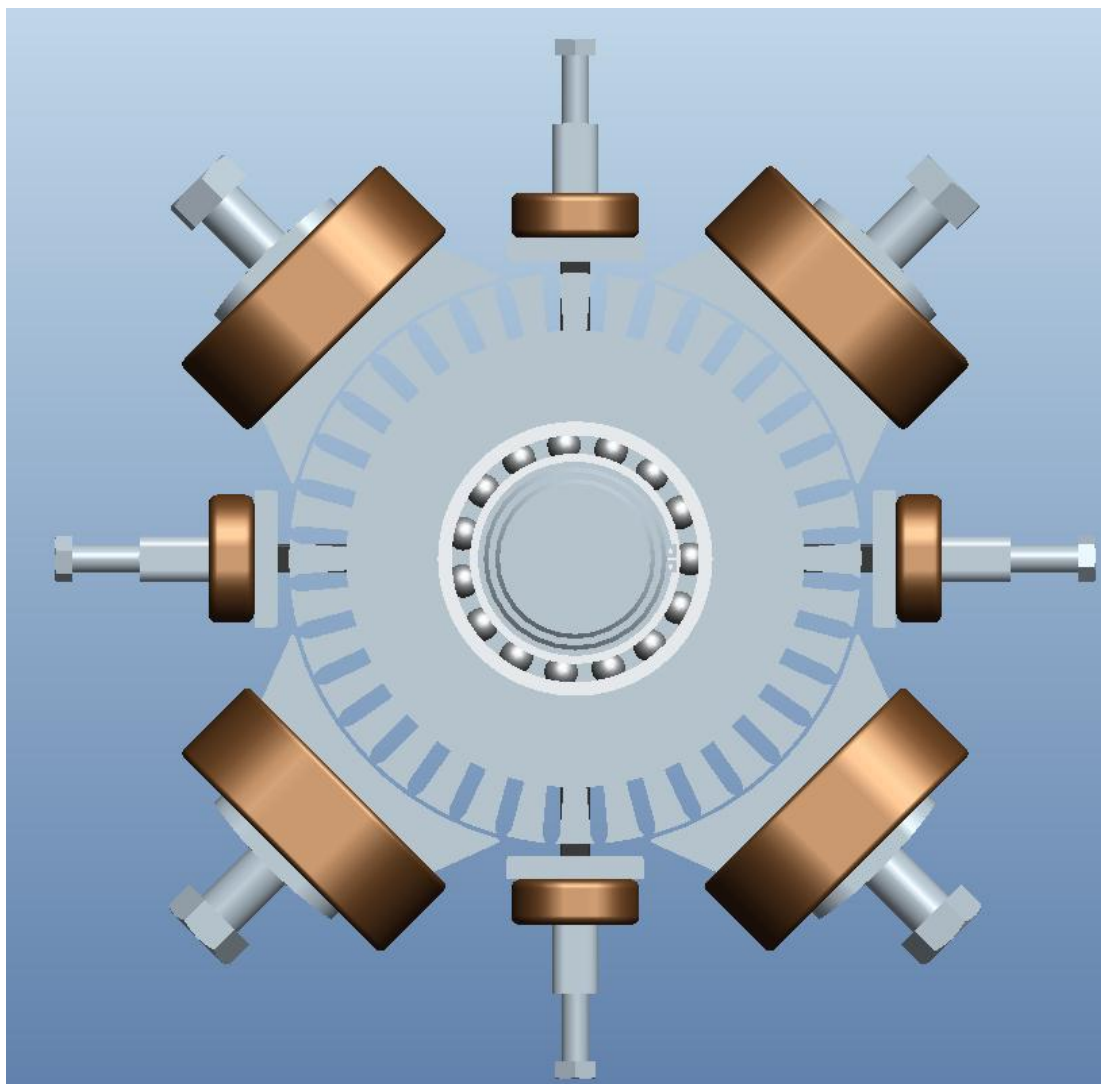
Obr. P1.3. Hlavní pól (měřítko 1:1)



Obr. P1.4. Pomocný pól (měřítko 1:1)



Obr. P1.5. Pohled z boku na model rotoru a pólů (kresleno v programu ProEngineer)



Obr. P1.6. Pohled z čela na model rotoru a pólů (kresleno v programu ProEngineer)