

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE

DIPLOMOVÁ PRÁCE
Návrh stejnosměrného stroje

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Martin PETŘINA**
Osobní číslo: **E13N0028K**
Studijní program: **N2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu: **Návrh stejnosměrného stroje**
Zadávající katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

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

1. Navrhněte stejnosměrný motor se sériovým buzením a kompenzačním vinutím s parametry: $P = 80 \text{ kW}$, $U = 400 \text{ V}$, $n = 1\,800 \text{ ot/min}$, provedení IP23, tvar IM1001.
2. Metodou náhradních tepelných obvodů proveďte výpočet oteplení induktu.
3. Nakreslete schematicky podélný a příčný řez stroje.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 30 - 40 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. Cigánek L.: Stavba elektrických strojů, SNTL, 1958
2. Kopylov I.P. : Stavba elektrických strojů, SNTL, 1988
3. Červený J.: Stavba elektrických strojů, portál ZCU, Courseware 2012

Vedoucí diplomové práce:

Doc. Ing. Josef Červený, CSc.

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání diplomové práce: **15. října 2015**

Termín odevzdání diplomové práce: **16. května 2016**

Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.

děkan



Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.

vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2015

Prohlášení

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

V Plzni dne 16.5.2016

Martin Petřina

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu mé diplomové práce, doc. Ing. Josefovi Červenému, za odborné vedení diplomové práce, cenné připomínky a trpělivost před termínem odevzdání.

Abstrakt

Diplomová práce v první části řeší návrh stejnosměrného motoru se sériovým buzením a kompenzačním vinutím s parametry: $P = 80 \text{ kW}$, $U = 400\text{V}$, $n = 1800 \text{ ot/min}$, provedení IP23 a tvaru IM1001. Druhá část představuje výpočet oteplení induktu metodou náhradních tepelných obvodů. Ve třetí části je schématický podélný a příčný řez stroje.

Klíčová slova

Návrh, stejnosměrný motor,

Abstract

The first part of master thesis solves a draft of DC motor with serial excitation and compensation windings with parameters: $P = 80 \text{ kW}$, $U = 400\text{V}$, $n = 1800 \text{ rev/min}$, IP23 and shape IM1001. The second part presents the calculation method of temperature rise of induct. The third part of the thesis contains a schematic longitudinal and crosswise section representation of the DC motor.

Key words

Project, DC motor,

Obsah

1	ÚVOD.....	11
2	NÁVRH A VÝPOČET MOTORU	13
2.1	ZADANÉ PARAMETRY NAVRHOVANÉHO MOTORU	13
2.2	ZÁKLADNÍ ROZMĚRY.....	13
2.3	NÁVRH VINUTÍ KOTVY	13
2.4	NÁVRH DRÁŽEK KOTVY	16
2.5	NÁVRH ROZMĚRŮ MAGNETICKÉHO OBVODU	18
2.6	NÁVRH HLAVNÍHO PÓLU	20
2.7	NÁVRH KOMUTAČNÍHO PÓLU.....	22
2.8	NÁVRH KOMPENZAČNÍHO VINUTÍ	24
2.8.1	<i>Návrh pólového nastavce hlavního pólu.....</i>	24
2.8.2	<i>Návrh kompenzačního vinutí</i>	24
2.9	NÁVRH ROZMĚRŮ KOMUTÁTORU.....	26
2.10	NÁVRH KARTÁČŮ.....	27
2.11	VÝPOČET ZTRÁT A ÚČINNOSTI STROJE.....	28
2.11.1	<i>Ztráty ve vinutí kotvy</i>	28
2.11.2	<i>Ztráty ve vinutí hlavního pólu</i>	28
2.11.3	<i>Ztráty ve vinutí komutačních pólů.....</i>	28
2.11.4	<i>Ztráty v železe</i>	28
2.11.5	<i>Ztráty v kompenzačním vinutí.....</i>	29
2.11.6	<i>Ztráty třením kartáčů.....</i>	30
2.11.7	<i>Ztráty přechodem na kartáčích</i>	30
2.11.8	<i>Povrchové ztráty</i>	30
2.11.9	<i>Mechanické ztráty podle typového výkonu.....</i>	30
2.11.10	<i>Přídavné ztráty.....</i>	30
2.11.11	<i>Celkové ztráty.....</i>	30
2.11.12	<i>Účinnost stroje</i>	30
3	VÝPOČET OTEPLENÍ KOTVY	31
3.1	DRÁŽKOVÁ ČÁST	31
3.1.1	<i>Vstupní hodnoty.....</i>	31
3.1.2	<i>Ztráty v drážkové části kotvy</i>	31
3.1.3	<i>Střední rychlost proudění v radiálním kanálu kotvy</i>	31
3.1.4	<i>Ztráty v uvažovaných úsecích (tekoucí do uzlu).....</i>	32
3.1.5	<i>Oteplení v radiálním kanálu.....</i>	32
	33

3.1.6	Výpočet tepelných odporů	33
3.1.7	Oteplení uzlů:	37
3.2	ČELA STATOROVÉHO VINUTÍ	38
3.2.1	Vstupní hodnoty:	38
4	ŘEZY STROJEM	39
4.1	PŘÍČNÝ ŘEZ STROJEM	39
4.2	PODÉLNÝ ŘEZ STROJEM	40
5	ZÁVĚR	41
6	SEZNAM POŽITÉ LITERATURY	42
7	PŘÍLOHY	43

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

a_u	tloušťka kartáčů	F_{js}	magnetické napětí pro jho rotoru
α	pólové krytí	F_p	magnetické napětí pro póly
A	intenzita proudové vrstvy	$F_{\delta k}$	magnetické napětí pro kom. mezeru
β	krytí uhlíků	F_{ak}	magnetomotorická síla na kompenzační kotvy
B_δ	indukce ve vzduchové mezeře	F_m	magnetomotorická síla na dvojpólí
B_p	Indukce hl. pólu	h_d	hloubka drážky
B_{js}	Indukce ve statoru	h_{jr}	výška jha rotoru
B_z	indukce v zubu	h_{js}	výška jha statoru
B_{jr}	indukce jha rotoru	h_p	výška hlavního pólu
B_p	indukce v hlavním pólu	h_{2pn}	výška 2 protilehlých pólových nástavců
B_{js}	indukce ve jhu statoru	h_{dk}	hloubka drážky komp. vinutí
$B_{\delta k}$	indukce ve vzduchové mezeře	H_z	intenzita v zubu
b_d	šířka drážky	H_{jr}	intenzita jha rotoru
b_p	šířka hlavního pólu	H_p	Intenzita v hl. pólu
b_c	tloušťka cívky	H_{js}	intenzita ve jhu statoru
b_{kc}	tloušťka kostry cívky	I_1	proud v kotvě
b_k	šířka radiálního kanálu	κ	Pistoyovo kritérium
b_{kp}	šířka komutačního pólu	k_{Fe}	činitel železa
b_{pn}	šířka pólového nástavce	k_v	činitel vinutí
b_k	šířka kom. pásma	k_c	Carterův činitel
b_u	šířka kartáčů	K	počet lamel
C	Essonův činitel	l_e	čistá délka železa kotvy
δ_{kp}	vzduchová mezera pod kom. pólem	$l_{\check{c}}$	délka čela vinutí
δ_p	Vzduchová mezera pod hl. póly	l_p	délka indukční čáry pólu
D	vnější průměr kotvy	l_{js}	délka indukční čáry ve jhu statoru
D_e	vnitřní průměr kostry	l_{jr}	délka jha rotoru
D_3	rozteč mezi protilehlými kořeny zubu	l_s	střední délka závitů hl. pólu
D_i	vnitřní průměr plechů rotoru	l_{sk}	střední délka závitů kom. pólu
D_k	průměr komutátoru	I_k	proud vodičem kotvy
\emptyset_{kp}	magnetický tok kom. pólem	L	délka kotvy
\emptyset	magnetický tok jednoho pólu	L_p	délka hlavního pólu
f	střední kmitočet	L_{kp}	délka komutačního pólu
F_δ	Magnetické napětí pro vzd. Mezeru	L_k	délka komutátoru
F_{jr}	Magnetické napětí jha rotoru	m_z	hmotnost zubů kotvy
F_z	Magnetické napětí pro zuby		

m_{jr}	hmotnost jha rotoru	R_{kv}	odpor cívky kom. pólu
n	otáčky	σ	proudová hustota
η	účinnost	σ_k	proudová hustota komp. vinutí
n_d	počet vodičů v jedné drážce	S_1	průřez vodiče kotvy
n_k	počet radiálních kanálů	S_b	průřez budícího vinutí
N_s	počet závitů kotvy	S_u	styková plocha kartáčů
N_s	počet závitů kotvy	S_k	průřez komp. vinutí
N_b	počet závitů cívky hl. pólu	S_{kp}	průřez vodiče komutačního pólu
N_{ck}	počet závitů cívky kom. pólu	ϑ_{Cud}	oteplení drážky kotvy
N_u	počet kartáčů na roubíku	ϑ_z	oteplení zubů
N_k	počet drážek v komp. vinutí	ϑ_j	oteplení jha kotvy
p	počet pólů	ϑ	rozptyl hl. pólu
ΔP_{Fez}	ztráty v železe – zuby	t_p	pólová rozteč
ΔP_{Fejr}	ztráty v železe – jho rotoru	t_{d1}	rozteč mezi vrcholy zubu
ΔP_{rv}	ztráty odvedené rotorovou větví	t_{d3}	rozteč mezi kořeny zubu
P_{Cu1}	ztráty ve vinutí kotvy	t_1	rozteč lamel komutátoru
P_{Cu2}	ztráty ve vinutí hlavního pólu	t_{dk}	drážková rozteč komp. vinutí
P_{kp}	ztráty ve vinutí komp. pólu	u	počet cívkových stran v drážce
P_{tk}	ztráty třením kartáčů	U_1	střední lamelové napětí
P_{tk}	ztráty přechodem	U_r	reaktanční napětí
P_{kv}	ztráty v komp. vinutí	v	obvodová rychlost kotvy
P_p	ztráty přechodem	v_k	obvodová rychlost komutátoru
P_m	mechanické ztráty	V_{kz}	střední rychlost proudění
P_d	přídavné ztráty		v prostoru zubů
P_z	celkové ztráty	V_{kJ}	střední rychlost proudění
P_i	vnitřní výkon		v prostoru jádra
Q	počet drážek kotvy	ξ	činitel plnění
Q_p	počet drážek na pól	Y_k	krok cívky komutátoru
Q_{rv}	množství vzduchu v rotorové větví	Y_{d1}	drážkový krok
Q_{r1}	množství vzduchu na jeden kanál	Y_c	cívkový krok
R_1	odpor vinutí kotvy	Y_z	zpětný krok
R_p	odpor cívky hl. pólu	z	počet závitů jedné cívky
R_{kp}	odpor cívky komp. pólu	Z_3	šířka kořene zubu

1 Úvod

Konstrukce stejnosměrného motoru

Stejnoseměrné stroje se zpravidla stavějí pro zvláštní účely, pro něž mají střídavé stroje nevhodné vlastnosti. Jsou to například dynama pro elektrolýs a galvanické pokovování, dynama k svařování, motory k regulaci otáček v širokých mezích a k nim příslušná napájecí dynama, a konečně motory. Dynama i motory se vyskytují asi stejně často a mají také stejné provedení.

Malé a střední stroje normálního provedení využívají zpravidla konstrukčních částí z indukčních strojů a řada stejnosměrných strojů se navrhuje tak, aby bylo možno využít hlavně ložiskových štítů od indukčních motorů. Štítové stroje jsou obvykle otevřené, zřídka zavřené se žebrovým chladičem. U zavřených strojů působí těžkosti chlazení rotoru, který má většinu ztrát. Proto se u těchto strojů nejčastěji využívá průtahové větrání.

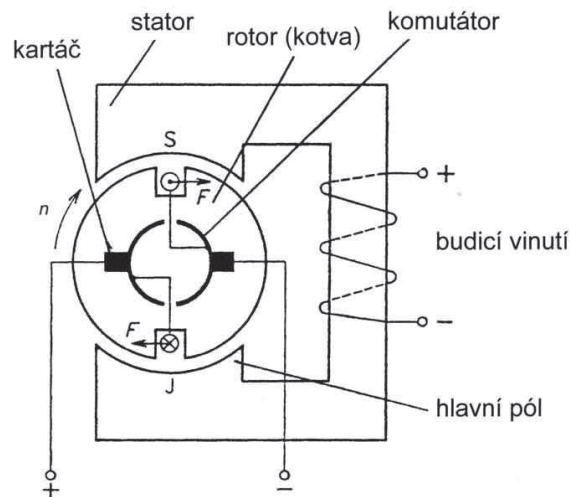
Velké stejnosměrné stroje jsou hlavně válcovací a těžní motory a dynama pro jejich napájení. Hřídel dynama může být spojena tuhou spojkou s hřídelem motoru nebo může mít také po dvou samostatných ložiskách.

Zvláštní skupinou stejnosměrných strojů tvoří motory pro elektrická vozidla. Motory jsou velmi stísněny pod vozem a přitom musí mít co největší výkon. Jsou proto otevřené a dokonale větrané proudem vzduchu. Vzduch prochází strojem strojem dvěma proudy jednak mezi póly a jednak dutinou rotoru. Každý tento proud má obvykle svůj ventilátor.

Hromadně se vyrábějí pouze drobné motory a dynama pro elektrickou výzbroj vozidel a letadel. Mají obvykle jednoduchý tvar. Kostra je řezána z trubky, štíty jsou ploché a všechny části se vyrábějí metodami hromadné výroby na automatech.[1]

Princip stejnosměrného motoru

Přivedením stejnosměrného proudu na budící vinutí, které je umístěné na hlavních pólech, se vytvoří magnetické pole. Přes kartáče se přivádí proud také na komutátor, a tím do rotoru, kde se také vytvoří magnetické pole. Vzájemným působením těchto dvou polí se rotor začne otáčet. Komutátor zajišťuje, že proud kotvy změní při každém pootočení rotoru svoji polaritu ve vodiči, a proto se motor po pootočení nezastaví. [4]



Obr 1. Princip stejnosměrného motoru. (obrázek použit z WEBu ELEKTRIKA.CZ)

2 Návrh a výpočet motoru

2.1 Zadané parametry navrhovaného motoru

Výkon	P = 80 kW
Napětí	U = 400 V
Jmenovité otáčky	1800 ot./min
Buzení	Sériové
Provedení	IP23
Tvar	IM1001

Tab 1. Zadané parametry motory

2.2 Základní rozměry

Vnitřní výkon kotvy na otáčku

$$\frac{P_i}{n} = \frac{P}{\eta n} = \frac{80\,000}{0,88 \cdot 1800} = 50,5 \text{ W/min} \quad (1.1.)$$

- Účinnost podle [1] obr. 723 $\mu = 88\%$

Z poměru $\frac{P_i}{n} = 50$ a podle grafu [1] obr. 765 určíme rozměry a využití stroje

$B_\delta = 0,85 \text{ Vs/m}^2$ - Indukce ve vzduchové mezeře

$A = 27\,000 \text{ A/m}$ - Intenzita proudové vrstvy

$D_e = 0,65 \text{ m}$ - Vnitřní průměr kostry

$p = 2$ - Počet pólpárů

$$D = 0,12 \left(\frac{P_i}{n}\right)^{0,27} = 0,12 \left(\frac{90909}{1800}\right)^{0,27} = 0,346 \text{ m} \quad - \text{Vnější průměr kotvy} \quad (1.2.)$$

2.3 Návrh vinutí kotvy

Střední kmitočet

$$f = \frac{pn}{60} = \frac{2 \cdot 1800}{60} = 60 \text{ Hz} \quad (1.3.)$$

Proud v kotvě

$$I_1 = \frac{P_i}{U} = \frac{90909,1}{400} = 227,3 \text{ A} \quad (1.4.)$$

Počet závitů kotvy v sérii

$$N_s = \frac{\pi D A}{2 I_1} = \frac{\pi \cdot 0,346 \cdot 27000}{2 \cdot 227,3} = 64,56 \text{ závitů} \quad (1.5.)$$

Počet vodičů v jedné drážce

$$n_d = \frac{4 a N_s}{Q} = \frac{4 \cdot 2 \cdot 64,56}{42} = 12,3 \text{ závitů} \rightarrow \text{volím } 12 \text{ závitů} \quad (1.6.)$$

→ volím $u = 3$ a $z = 2$

- Podle orientační tabulky [1] str. 592 zvoleno $Q = 42$
- u ... počet cívkových stran v drážce
- z ... počet závitů jedné cívky

→ zvoleno smyčkové vinutí

Protože jsem zaokrouhlil počet vodičů v jedné drážce, je nutné přepočítat počet závitů v kotvy a velikost proudové hustoty:

Upravený počet závitů kotvy v sérii

$$N_s = \frac{n_d Q}{4a} = \frac{12 \cdot 42}{4 \cdot 2} = 63 \text{ závitů} \quad (1.7.)$$

Upravená velikost proudové hustoty

$$A = \frac{2 N_s I_1}{\pi D} = \frac{2 \cdot 63 \cdot 227,3}{\pi \cdot 0,346} \cong 26350 A \quad (1.8.)$$

Počet drážek na pól

$$Q_p = \frac{Q}{2p} = \frac{42}{2 \cdot 2} = 10,5 \text{ drážek na pól} \quad (1.9.)$$

Pólová rozteč

$$t_p = \frac{\pi D}{2p} = \frac{\pi \cdot 0,346}{2 \cdot 2} = 0,272 m \quad (1.10.)$$

Magnetický tok jednoho pólu

$$\Phi = B_\delta \alpha t_p l_e = 0,85 \cdot 0,65 \cdot 0,272 \cdot 0,162 = 0,024 Wb \quad (1.11.)$$

Essonův činitel

$$C = \frac{\pi^2}{60} AB_{\delta} \alpha_i = \frac{\pi^2}{60} 26350 \cdot 0,85 \cdot 0,65 = 2,39 \text{ kW/m}^3 \text{ ot./min} \quad (1.12.)$$

Výkonová rovnice

$$P_i = CD_i^2 l_e n \rightarrow l_e = \frac{P_i}{CD_i^2 n} = \frac{90909}{2,39 \cdot 0,346^2 \cdot 1800} = 0,176 \text{ m} \quad (1.13.)$$

Výpočet efektivní délky železa

$$l_{Fe} = l_e \cdot k_{Fe} = 0,176 \cdot 0,92 = 0,162 \text{ m} \quad (1.14.)$$

- činitel vinutí $k_{Fe} = (0,92 \div 0,95) \rightarrow$ volím $k_v = 0,92$

Železo rozdělíme na 4 svazky a 3 kanály. Celková délka železa je tedy

$$L = l_{Fe} + n_k b_k = 0,162 + 3 \cdot 0,01 = 0,192 \text{ m} \quad (1.15.)$$

- počet radiálních kanálů $n_k = 3$

- šířka radiálního kanálu $b_k = 0,01 \text{ m}$

Délka čela pro tyčové vinutí

$$l_{\zeta} \cong \sqrt{2} \cdot t_p = \sqrt{2} \cdot 0,272 = 0,385 \text{ m} \quad (1.16.)$$

Počet lamel

$$K = uQ = 3 \cdot 42 = 126 \text{ lamel} \quad (1.17.)$$

Střední lamelové napětí

$$U_1 = \frac{2pU}{K} = \frac{2 \cdot 2 \cdot 400}{126} = 12,7 \text{ V} \quad (1.18.)$$

Napětí nepřesáhlo 20V (kritérium pro stroje s kompenzačním vinutím) \rightarrow OK

Průřez vodiče kotvy

$$I_k = \frac{I_1}{4} = 56,825 \text{ A} \quad (1.19.)$$

$$S_1 = \frac{I_k}{\sigma_k} = \frac{56,825}{4,7} = 12,09 \text{ mm}^2 \quad (1.20.)$$

- volím vyšší proudovou hustotu $\sigma_k = 4,7 \text{ A/mm}^2$ pro lepší chlazení rotoru

Pistoyovo kritérium pro volbu pomocných pólů a kompenzačního vinutí

$$\begin{aligned} \kappa &= \frac{N_s^2}{15K} n I_1 2a(L + 0,1l_z) \cdot 10^{-5} = & (1.21.) \\ &= \frac{63^2}{15 \cdot 126} \cdot 1800 \cdot 227,3 \cdot 2 \cdot 2(0,192 + 0,1 \cdot 0,385) \cdot 10^{-5} \cong 8 \end{aligned}$$

→ Podle [1] str. 593 Stroj s komutačními póly

→ Podle zadání volím i kompenzační vinutí

2.4 Návrh drážek kotvy

Rozteč mezi protilehlými kořeny zubu

$$D_3 = D_1 - 2h_d = 0,346 - 2 \cdot 0,032 = 0,282m \quad (1.22.)$$

Rozteč mezi vrcholy zubů

$$t_{d1} = \frac{\pi D}{Q} = \frac{\pi \cdot 0,346}{42} = 0,0259m \quad (1.23.)$$

Rozteč mezi kořeny zubů

$$t_{d3} = \frac{\pi D_3}{Q} = \frac{\pi \cdot 0,282}{42} = 0,0211m \quad (1.24.)$$

Šířka kořene zubu

$$Z_3 = \frac{B_\delta \cdot l_e \cdot t_{d1}}{B'_{z3} \cdot l_e \cdot k_{Fe}} = \frac{0,85 \cdot 0,176 \cdot 0,0259}{2,3 \cdot 0,176 \cdot 0,92} = 0,0104m \quad (1.25.)$$

- Předpoklad $B'_{z3} = 2,3T$

Šířka drážky

$$b_d = t_{d3} - Z_3 = 0,0211 - 0,0104 = 0,0107m \quad (1.26.)$$

→ podle Příloha 2. volím šířku drážky 10,5mm

→ podle Příloha 3. volím drážku TYP N

Uspořádání izolace v drážce na výšku podle [2] Tabulka 3.16 str. 122

Izolace vodiče 4 x 0,4mm =>	1,6mm
Celková izolace v drážce pro $N_c = 4 + \text{vůle}$ =>	5,7mm
<u>Klínek (tab. -11-)</u>	<u>4,5mm</u>
Celkem	11,8mm

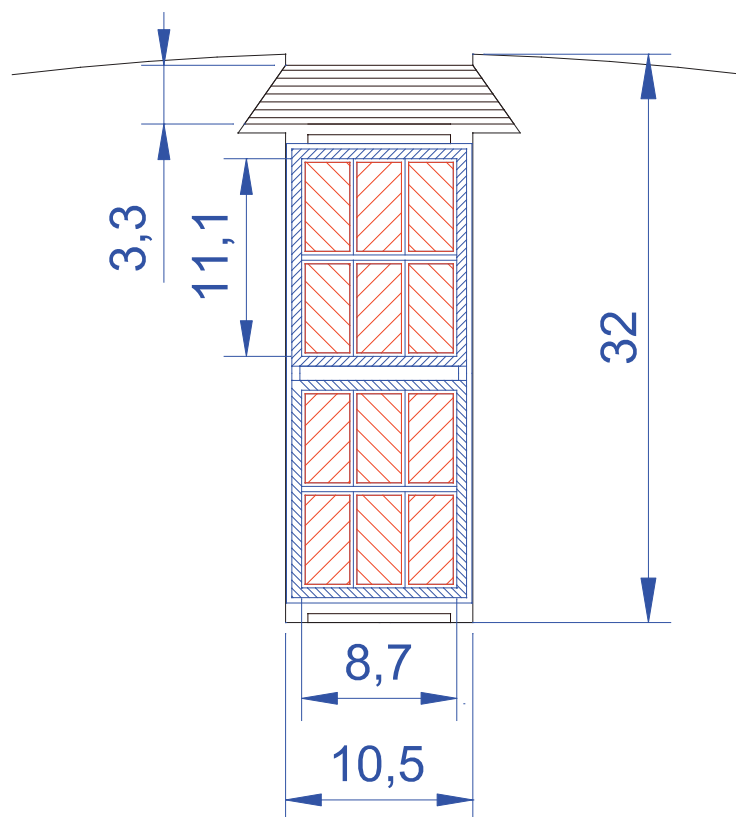
Na vodič na výšku zbývá: $h_d - 11,8 = 32 - 11,8 = 20,2\text{mm}$

Uspořádání izolace v drážce na šířku podle [2] Tabulka 3.16 str. 122

Izolace vodiče 3 x 0,4mm =>	1,2mm
<u>Celková izolace v drážce + vůle</u>	<u>1,7mm</u>
Celkem	2,9mm

Na vodič na šířku zbývá: $b_d - 2,9 = 10,5 - 2,9 = 7,6\text{mm}$

*Podle prostoru v drážce a průřezu vodiče $S_1 = 12,09\text{mm}^2$
volím vodič podle Příloha 1. o rozměrech 2,5 X 5mm ($S = 12\text{mm}^2$)*



Obr 2. Uspořádání v drážce v kotvy – rozměry v mm

2.5 Návrh rozměrů magnetického obvodu

Výška jha rotoru

$$h_{jr} = \frac{\emptyset}{2 \cdot l_{Fe} \cdot 0,9 \cdot 1,3} = \frac{0,025}{2 \cdot 0,162 \cdot 0,9 \cdot 1,3} = 0,063m \quad (1.27.)$$

- Indukce ve jhu rotoru je zvolena $B_{jr} = 1,3T$

Vnitřní průměr plechů rotoru

$$D_i = D - 2h_d - 2h_{jr} = 0,346 - 2 \cdot 0,032 - 2 \cdot 0,063 = 0,156m \quad (1.28.)$$

Vzduchová mezera pod hlavním pólem

$$\delta_p = 0,45 \cdot 10^{-6} \cdot t_p \frac{A}{B_\delta} = 0,45 \cdot 10^{-6} \cdot 0,272 \frac{26350}{0,85} = 0,004m \quad (1.29.)$$

Délka hlavního pólu (Stejná jako délka kotvy)

$$L_p = L = 0,192m \quad (1.30.)$$

Šířka hlavního pólu

$$b_p = \frac{\emptyset(1 + \vartheta)}{B_p L_p} = \frac{0,024(1 + 0,18)}{1,6 \cdot 0,192} = 0,092m \quad (1.31.)$$

- Předpokládám indukci $B_p = 1,6T$ a rozptyl hlavního pólu $\vartheta = 18\%$

Výška jha statoru

$$h_{js} = \frac{\emptyset(1 + \vartheta)}{2B_{js}(L_p + b_p)} = \frac{0,024(1 + 0,18)}{2 \cdot 1,2 \cdot (0,192 + 0,092)} = 0,042m \quad (1.32.)$$

- Předpokládám indukci $B_{js} = 1,2T$ a rozptyl hlavního pólu $\vartheta = 18\%$

Carterův činitel pro vzduchovou mezera

$$k_c = \frac{t_{d1}}{t_{d1} + \delta - 0,75b_d} = \frac{0,0259}{0,0259 + 0,004 - 0,75 \cdot 0,0105} = 1,176 \cong 1,2 \quad (1.33.)$$

Magnetické napětí pro vzduchovou mezera

$$F_\delta = 1,6 \cdot 10^6 \cdot B_\delta \cdot k_c \cdot \delta = 1,6 \cdot 10^6 \cdot 0,85 \cdot 1,2 \cdot 0,004 = 6528A \quad (1.34.)$$

Intenzita v $\frac{1}{3}$ od kořene zubu

$$H_z = 38800 \text{ A/m}$$

- odečteno z [2] str. 629 tab D 2.8 pro indukci v $\frac{1}{3}$ zubu $B_{z\frac{1}{3}} = 2T$

Magnetické napětí pro zuby

$$F_z = 2h_d H_z = 2 \cdot 0,032 \cdot 38800 = 2483A \quad (1.35.)$$

Intenzita ve jhu rotoru

$$H_{jr} = 550 \text{ A/m}$$

- odečteno z [2] str. 629 tab D 2.8 pro indukci ve jhu rotoru $B_{jr} = 1,3T$

Magnetické napětí jha rotoru

$$F_{jr} = l_{jr} \cdot H_{jr} = 0,272 \cdot 550 = 150A \quad (1.36.)$$

- $l_{jr} = t_p = 0,272m$

Přibližná délka indukční čáry v pólu

$$l_p = 0,5(D_e - D) = 0,5(0,65 - 0,346) = 0,152m \quad (1.37.)$$

Intenzita v hlavním pólu

$$H_p = 3400 \text{ A/m}$$

- odečteno z [2] str. 629 tab D 2.8 pro indukci v hlavním pólu $B_p = 1,6T$

Magnetické napětí pro póly

$$F_p = 2l_p H_p = 2 \cdot 0,152 \cdot 3400 = 1034A \quad (1.38.)$$

Délka indukční čáry ve jhu statoru

$$l_{js} = \frac{\pi \cdot D_e}{2a} = \frac{\pi \cdot 0,65}{2 \cdot 2} = 0,5105m \quad (1.39.)$$

Intenzita ve jhu statoru

$$H_{jS} = 400 \text{ A/m}$$

- odečteno z [2] str. 629 tab D 2.8 pro indukci ve jhu statoru $B_{jS} = 1,2T$

Magnetické napětí pro jho statoru

$$F_{jS} = l_{jS} \cdot H_{jS} = 0,5105 \cdot 400 = 204A \quad (1.40.)$$

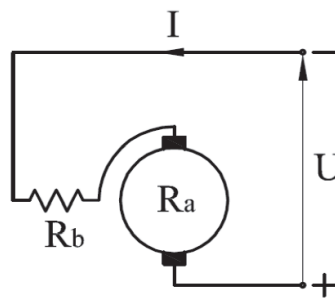
Magnetomotorická síla na dvojpólí

$$F_m = 1,05(F_\delta + F_z + F_{jr} + F_p + F_{jS}) = \quad (1.41.)$$

$$1,05(6528 + 2483 + 150 + 1034 + 204) = 10919A$$

2.6 Návrh hlavního pólu

Je použito sériové buzení. To znamená, že budící vinutí je v sérii s kotvou viz. Obr



Obr 3. Zapojení sériového buzení (převzato z [3] str. 83)

Průřez vodiče budícího vinutí

$$S_b = \frac{I_1}{\sigma_b} = \frac{227,3}{3,7} = 61,43 \text{ mm}^2 \quad (1.42.)$$

- volím $\sigma_b = 3,7A/\text{mm}^2$

Počet závitů cívky hlavního pólu

$$N_b = \frac{F_m}{2I_1} = \frac{10919}{2 \cdot 227,3} = 24,02 \cong 24 \text{ závitů} \quad (1.43.)$$

- volím 12 závitů ve 2 vrstvách

Výška hlavního pólu

zvolena $h_p = 0,070m$

Rozměr vodiče budícího vinutí

Zvolen rozměr $3,5 \times 18/3,9 \times 18,4$ (s izolací) $\rightarrow S = 62,1mm^2$

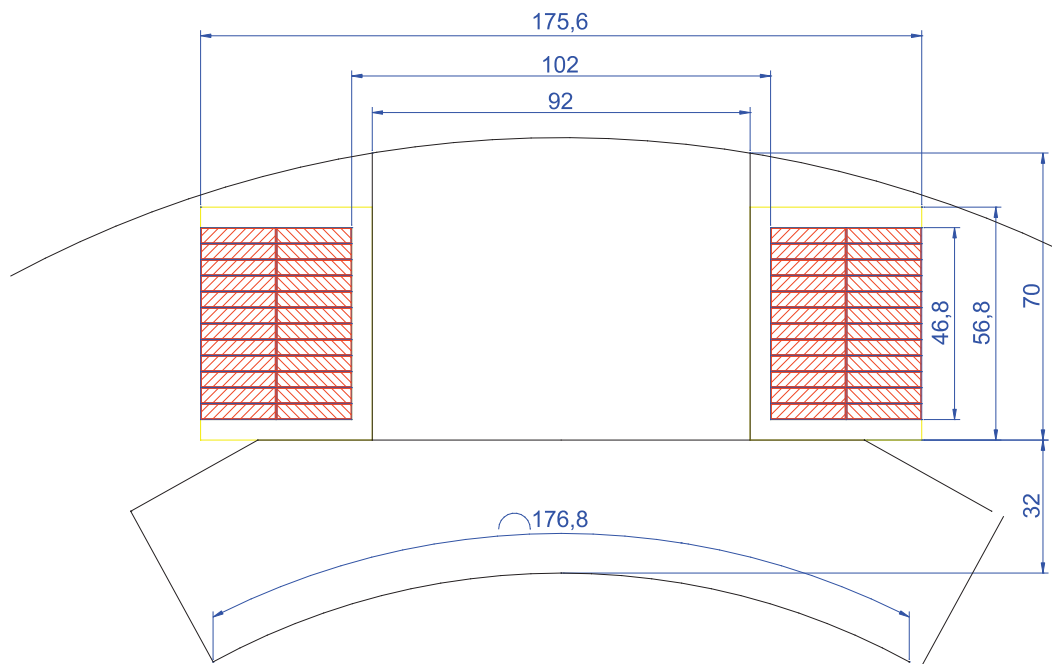
- zvolen podle Příloha 1. pro vypočtený $S_b = 61,43mm^2$

Střední délka závitu

$$l_s = 2(L_p + b_p + 4b_{kc}) + \pi \cdot b_c = \quad (1.44.)$$

$$= 2(0,192 + 0,092 + 4 \cdot 0,005) + \pi \cdot 0,0368 = 0,72m$$

- tloušťka cívky $b_c = 2 \cdot$ tloušťka izolovaného vodiče $= 2 \cdot 18,4 = 36,8mm$
- tloušťka kostry cívky zvolena $b_{kc} = 0,005m$



Obr 4. Uspořádání na hlavním pólu – rozměry v mm

2.7 Návrh komutačního pólu

Obvodová rychlost kotvy

$$v = \frac{\pi D n}{60} = \frac{\pi \cdot 0,346 \cdot 1800}{60} = 32,6 \text{ ms}^{-1} \quad (1.45.)$$

Délka komutačního pólu

$$L_{kp} = L = 0,192 \text{ m} \quad (1.46.)$$

- Volím stejnou délku jako délku kotvy

Reaktanční napětí pomocí Habartova čísla

$$U_r = 2vALz\xi = 2 \cdot 32,6 \cdot 26350 \cdot 0,192 \cdot 2 \cdot 6 \cdot 10^{-6} = 4 \text{ V} \quad (1.47.)$$

- Zvoleno $\xi = 6 \cdot 10^{-6}$

- Napětí nepřesáhlo kritérium 15V → OK

Indukce ve vzduchové mezeře pod komutačním pólem

$$B_{\delta k} = \frac{U_r}{2vL_{kp}} = \frac{4}{2 \cdot 32,6 \cdot 0,192} = 0,319 \text{ T} \quad (1.48.)$$

Vzduchová mezera pod komutačním pólem

$$\delta_{kp} = 0,025t_p = 0,025 \cdot 0,272 = 0,0068 \text{ m} \quad (1.49.)$$

Magnetické napětí pro komutační mezeru

$$F_{\delta k} = 1,6 \cdot 10^6 \cdot B_{\delta k} \delta_{\delta k} = 1,6 \cdot 10^6 \cdot 0,319 \cdot 0,0068 = 3470 \text{ A} \quad (1.50.)$$

Magnetomotorická síla na kompenzaci reakce kotvy

$$F_{ak} = \frac{1}{2} A (1 - \alpha) t_p = \frac{1}{2} \cdot 26350 \cdot (1 - 0,65) \cdot 0,272 = 2500 \text{ A} \quad (1.51.)$$

- Magnetické napětí pro cestu železem zanedbám ($\mu_{Fe} \rightarrow \infty$)

Počet závitů cívky komutačních pólů

$$N_{ck} = \frac{F_{\delta k} + F_{ak}}{2I_1} = \frac{3470 + 2500}{2 \cdot 227,3} = 13,13 \cong 13 \text{ závitů} \quad (1.52.)$$

Šířka komutačního pásma ve vzduchové mezeře

$$b_k = t_1 \left(\beta - \frac{a}{p} + u \right) = 0,008627 \left(2,5 - \frac{2}{2} + 3 \right) = 0,039m \quad (1.53.)$$

$$- \quad t_1 = \frac{\pi D}{K} = \frac{\pi \cdot 0,346}{126} = 0,008627m \dots \text{rozteč lamel redukována na obvod}$$

Magnetický tok komutačním pólem

$$\Phi_{kp} = b_k \cdot L_{kp} \cdot B_{\delta k} = 0,039 \cdot 0,192 \cdot 0,319 = 0,002Wb \quad (1.54.)$$

Šířka komutačního pólu

$$b_{kp} = \frac{\Phi_{kp}(1 + v_k)}{L_{kp} B_{kp}} = \frac{0,002(1 + 2)}{0,192 \cdot 1,1} = 0,029m \rightarrow \text{zvolena } b_{kp} = 0,04m \quad (1.55.)$$

$$- \quad \text{Činitel rozptylu komutačního pólu předpokládán } v_k = 200\%$$

$$- \quad \text{Indukci v komutačním pólu předpokládám } B_{kp} = 1,1T$$

Průřez vodiče komutačního pólu

$$S_{kp} = \frac{I_1}{\sigma_{kp}} = \frac{227,3}{3,8} = 59,82mm^2 \quad (1.56.)$$

$$- \quad \text{Zvolena } \sigma_{kp} = 3,8 A/mm^2$$

Rozměr vodiče komutačního pólu

$$\text{Zvolen rozměr } 4,5 \times 14 / 4,9 \times 14,4 \text{ (s izolací)} \rightarrow S = 61,8mm^2$$

$$- \quad \text{zvolen podle Příloha 1. pro vypočtený } S_{kp} = 59,82mm^2$$

Střední délka závitu

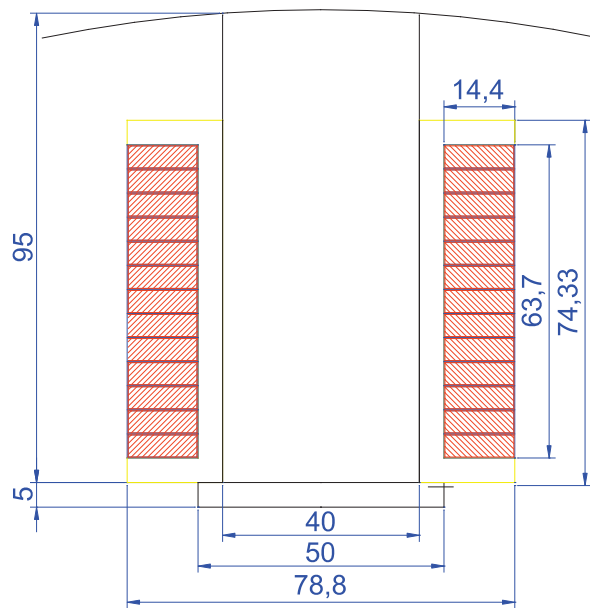
$$l_{sk} = 2(L_{kp} + b_{kp} + 4b_{kc}) + \pi \cdot b_c = \quad (1.57.)$$

$$= 2(0,192 + 0,04 + 4 \cdot 0,005) + \pi \cdot 0,0144 = 0,55m$$

$$- \quad \text{tloušťka cívky } b_c = \text{tloušťka izolovaného vodiče} = 14,4mm$$

$$- \quad \text{tloušťka kostry cívky zvolena } b_{kc} = 0,005m$$

Volím pólový nástavec o rozměrech 5mm viz obr. 5



Obr 5. Uspořádání na kompenzačním pólu - rozměry v mm

2.8 Návrh kompenzačního vinutí

2.8.1 Návrh pólového nástavce hlavního pólu

Výška 2 protilehlých pólových nástavců

$$h_{2pn} = D_e - (D + 2(h_{ps} + \delta_p + h_{js})) = \quad (1.58.)$$

$$= 0,65 - (0,346 + 2(0,074 + 0,004 + 0,042)) = 0,064m$$

→ Výška ve středu hlavního pólu $h_{ps} = 0,074m$

→ Výška 1 pólového nástavce $h_{1pn} = 0,032m$

Šířka pólového nástavce

$$b_{pn} = \alpha t_p = 0,65 \cdot 0,272 = 0,1768m \quad (1.59.)$$

2.8.2 Návrh kompenzačního vinutí

Drážková rozteč kompenzačního vinutí

$$t_{dk} = \frac{n_{dk}}{n_d} \cdot t_{d1} \cdot \frac{2a}{a_k} = \frac{2}{12} \cdot 0,0259 \cdot \frac{2 \cdot 2}{1} = 0,01726m \quad (1.60.)$$

- Počet vodičů v drážce volím $n_{dk} = 2$
- Počet paralelních větví se zpravidla volí $a_k = 1$

Počet drážek v kompenzačním vinutí

$$N_k = \frac{\alpha t_p}{t_{dk}} = \frac{0,65 \cdot 0,272}{0,01726} = 10,24 \rightarrow 10 \text{ drážek} \quad (1.61.)$$

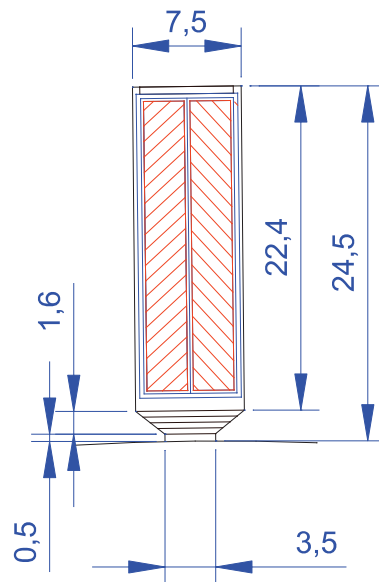
→ podle tabulky Příloha 3. volím šířku drážky $b_{dk} = 7,5\text{mm}$

a hloubkou $h_{dk} = 24,5\text{mm TYP D}$

Průřez kompenzačního vinutí

$$S_k = \frac{I_1}{\sigma_k} = \frac{227,3}{4} = 56,3\text{mm}^2 \quad (1.62.)$$

- Proudová hustota zvolena $\sigma_k = 4 \text{ A/mm}^2$



Obr 6. Rozložení v drážce pólového nástavce

Uspořádání izolace v drážce na výšku podle [2] Tabulka 3.16 str. 122

Izolace vodiče 0,4mm =>	0,4mm
Celková izolace v drážce + vůle (0,5mm)	1,5mm
<u>Klínek + vstupní otvor (viz. příloha č.4)</u>	<u>2,1mm</u>
Celkem	4,0mm

Na vodič na výšku zůstává: $h_{dk} - 4 = 24,5 - 4 = 20,5\text{mm}$

Uspořádání izolace v drážce na šířku podle [2] Tabulka 3.16 str. 122

Izolace vodiče 2 x 0,4mm =>	0,8mm
<u>Celková izolace v drážce + vůle</u>	<u>0,9mm</u>
Celkem	1,7mm

Na vodič na šířku zbývá: $b_{ak} - 1,7 = 7,5 - 1,7 = 5,8\text{mm}$

Podle prostoru v drážce a spočítaného průřezu vodiče $S_k = 56,3\text{mm}^2$
volím podle Příloha 1. vodič o rozměrech 2,8 X 20mm ($S = 55,4\text{mm}^2$)

2.9 Návrh rozměrů komutátoru

Průměr komutátoru

$$D_k = 0,7D = 0,7 \cdot 0,346 = 0,2422\text{m} \rightarrow \text{zvolen } D_k = 0,25\text{m} \quad (1.63.)$$

Obvodová rychlost komutátoru

$$v_k = \frac{\pi D_k n}{60} = \frac{\pi \cdot 0,25 \cdot 1800}{60} = 23,56\text{ms}^{-1} \quad (1.64.)$$

Rozteč lamel komutátoru

$$t_1 = \frac{\pi D_k}{K} = \frac{\pi \cdot 0,25}{126} = 0,0062\text{m} = 6,2\text{mm} \quad (1.65.)$$

- Předpokládáme 5,4mm lamelu a 0,8mm mezilamelovou izolaci

Krok cívky komutátoru

$$Y_k = \frac{K - a}{p} = \frac{126 - 2}{2} = 62 \text{ lamel} \quad (1.66.)$$

Pólová rozteč v počtu drážek (drážkový krok)

$$Y_{d1} = \frac{Q}{2p} = \frac{42}{2 \cdot 2} = 10,5 \text{ drážek} \quad (1.67.)$$

Cívkový krok pro Y_{d1}

$$Y_c = u \cdot Y_{d1} = 3 \cdot 10,5 = 31,5 \text{ drážek} \quad (1.68.)$$

Zpětný krok

$$Y_z = Y_k - Y_c = 62 - 31,5 = 30,5 \text{ drážek} \quad (1.69.)$$

2.10 Návrh kartáčů

Šířka kartáčů

$$b_u = t_1 \cdot \beta = 0,0062 \cdot 2,5 = 0,0155m = 15,5mm \rightarrow \text{volím } 16mm \quad (1.70.)$$

- Krytí uhlíků předpokládám $\beta = 2,5$

Styková plocha kartáče

- Podle [2] tab D5.1. zvolím rozměr kartáčů 16x25mm při výšce kartáče 50mm

$$S_u = b_u a_u = 16 \cdot 25 = 400mm^2$$

Počet kartáčů na roubíku

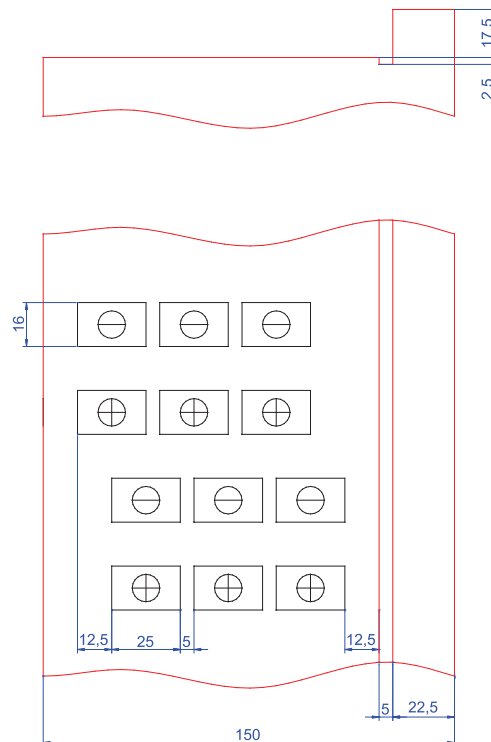
$$N_u = \frac{I_1}{\sigma_u p S_u} = \frac{227,3}{0,1 \cdot 2 \cdot 400} = 2,84 \rightarrow \text{volím } 3 \text{ kartáče na roubík} \quad (1.71.)$$

Délka komutátoru

$$L_k = (N_u + 0,5)a_u + (N_u - 1)5 + 50 = \quad (1.72.)$$

$$= (3 + 0,5) \cdot 25 + (3 - 1)5 + 50 = 147,5mm$$

\rightarrow volím $L_k = 150mm$



Obr 7. Rozložení uhlíků na komutátoru - rozměry v mm

2.11 Výpočet ztrát a účinnosti stroje

2.11.1 Ztráty ve vinutí kotvy

Odpor vinutí kotvy

$$R_1 = \frac{2\rho(L + L_c)N_s}{2aS_1} = \frac{2 \cdot 10^{-6}(0,192 + 0,385) \cdot 63}{48 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 12,09 \cdot 10^{-6}} = 0,0313\Omega \quad (1.73.)$$

Ztráty ve vinutí kotvy

$$P_{Cu1} = R_1 I_1^2 = 0,0313 \cdot 227,3^2 = 1617W \quad (1.74.)$$

2.11.2 Ztráty ve vinutí hlavního pólu

Odpor jedné cívky hlavního pólu

$$R_p = \rho \frac{l_s N_b}{S_2} = \frac{10^{-6} \cdot 0,72 \cdot 24}{48 \cdot 64,94 \cdot 10^{-6}} = 0,0055\Omega \quad (1.75.)$$

Ztráty ve vinutí hlavního pólu

$$P_{Cu2} = 2pR_p I_1^2 = 2 \cdot 2 \cdot 0,0055 \cdot 227,3^2 = 1137W \quad (1.76.)$$

2.11.3 Ztráty ve vinutí komutačních pólů

Odpor cívky komutačního pólu

$$R_{kp} = \rho \frac{l_{sk} N_{ck}}{S_{kp}} = \frac{10^{-6} \cdot 0,55 \cdot 13}{48 \cdot 61,8 \cdot 10^{-6}} = 0,0024\Omega \quad (1.77.)$$

Ztráty ve vinutí komutačních pólů

$$P_{kp} = 2pR_{kp} I_1^2 = 2 \cdot 2 \cdot 0,0024 \cdot 227,3^2 = 496W \quad (1.78.)$$

2.11.4 Ztráty v železe

Hmotnost zubů kotvy

$$m_z = Qhb_{zs}0,9L\sigma_o = 42 \cdot 0,032 \cdot 0,013 \cdot 0,9 \cdot 0,192 \cdot 7700 = 23,2kg \quad (1.79.)$$

- Hustota oceli $\sigma_o = 7700 \text{ kg/m}^3$
- Výpočet střední šířka zubu $D_2 = D_1 - h_d = 0,346 - 0,032 = 0,314$

$$t_{d2} = \frac{\pi D_2}{Q} = \frac{\pi \cdot 0,314}{42} = 0,0235$$

$$b_{z2} = t_{d2} - b_d = 0,0235 - 0,0105 = 0,0154m$$

Hmotnost jha kotvy

$$m_{jr} = \frac{\pi}{4} [(D - 2h)^2 - D_i^2] \cdot 0,9 \cdot l_{Fe} \sigma_o = \quad (1.80.)$$

$$= \frac{\pi}{4} [(0,346 - 2 \cdot 0,032)^2 - 0,156^2] \cdot 0,9 \cdot 0,162 \cdot 7700 = 48,6 \text{ kg}$$

Ztráty v železe - zuby

$$\Delta P_{Fez} = k_p \Delta p_{Fe} m_z B_{Fe}^2 \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} = 2 \cdot 2,6 \cdot 23,2 \cdot 2^2 \left(\frac{60}{50}\right)^{1,3} = 611 \text{ W} \quad (1.81.)$$

- činitel zvětšení ztrát pro zuby se volí $k_p = 2$
- indukce pro zuby je $B_{Fe} = 2 \text{ T}$
- ztrátové číslo plechů $\Delta p_{Fe} = 2,6 \text{ W/kg}$

Ztráty v železe – jho rotoru

$$\Delta P_{Fejr} = k_p \Delta p_{Fe} m_z B_{Fe}^2 \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} = 1,8 \cdot 2,6 \cdot 48,6 \cdot 1,3^2 \left(\frac{60}{50}\right)^{1,3} = 487 \text{ W} \quad (1.82.)$$

- činitel zvětšení ztrát pro jho se volí $k_p = 1,8$
- indukce pro jho je $B_{Fe} = 1,3 \text{ T}$
- ztrátové číslo plechů $\Delta p_{Fe} = 2,6 \text{ W/kg}$

Ztráty v železe celkem

$$\Delta P_{Fe} = \Delta P_{Fez} + \Delta P_{Fejr} = 611 + 487 = 1098 \text{ W} \quad (1.83.)$$

2.11.5 Ztráty v kompenzačním vinutí

Odpor cívky komutačního pólu

$$R_{kv} = \rho \frac{l_{skv} N_k n_{dk}}{S_{kv}} = \frac{10^{-6} \cdot 0,287 \cdot 12 \cdot 2}{48 \cdot 56,3 \cdot 10^{-6}} = 0,0026 \Omega \quad (1.84.)$$

- Délka čela vinutí $l_{\check{c}k} = \text{odsazení} + \frac{t_p}{2} - \frac{b_{pn}}{4} = 0,03 + \frac{0,272}{2} - \frac{0,178}{4} = 0,122 \text{ m}$
- Střední délka závitů $l_{skv} = L_p + l_{\check{c}k} = 0,165 + 0,122 = 0,287 \text{ m}$

Ztráty v kompenzačním vinutí

$$P_{kv} = 2p R_{kv} I_1^2 = 2 \cdot 2 \cdot 0,0026 \cdot 227,3^2 = 537 \text{ W} \quad (1.85.)$$

2.11.6 Ztráty třením kartáčů

$$P_{tk} = 9,81 f p v_k \Sigma S_k = 9,81 \cdot 0,15 \cdot 0,25 \cdot 23,56 \cdot 12 \cdot 4 = 416W \quad (1.86.)$$

- pro normální stroje je $p = 0,25 \text{ kg/cm}^2$
- podle [1] obr. 724 pro elektrografit se $f = 0,15$

2.11.7 Ztráty přechodem na kartáčích

$$P_{\Delta} = 2 \Delta U I_1 = 2 \cdot 1,95 \cdot 227,3 = 886W \quad (1.87.)$$

- úbytek napětí na kartáčích $\Delta U = 1,95V$

2.11.8 Povrchové ztráty

$$P_p = 2 p a t_{p1} L_p k_0 \left(\frac{Qn}{10000} \right) (t_3 \beta \cdot 1000 \cdot B_{\delta} k_c)^2 = \quad (1.88.)$$

$$= 2 \cdot 2 \cdot 0,65 \cdot 0,272 \cdot 0,192 \cdot 4$$

$$\cdot \left(\frac{42 \cdot 1800}{10000} \right)^{1,5} (0,0259 \cdot 0,18 \cdot 1000 \cdot 0,85 \cdot 1,2)^2 = 255W$$

- koeficienty volím $k_0 = 4, k_c = 1,2, \beta = 0,18$

2.11.9 Mechanické ztráty podle typového výkonu

$$P_m = 4 p^{0,9} n^{0,25} = 4 \cdot 80^{0,9} \cdot 1800^{0,25} = 1345W \quad (1.89.)$$

2.11.10 Přídavné ztráty

$$P_d = 0,5\% P = \frac{80000}{200} = 400W \quad (1.90.)$$

- pro stroje s kompenzačním vinutím se ztráty volí 0,5%

2.11.11 Celkové ztráty

$$P_z = P_{Cu1} + P_{Cu2} + P_{kp} + \Delta P_{Fe} + P_{kv} + P_{tk} + P_{\Delta} + P_p + P_m + P_d = \quad (1.91.)$$

$$= 1617 + 1137 + 496 + 1098 + 537 + 416 + 886 + 255 + 1345 + 400 =$$

$$= 8007W$$

2.11.12 Účinnost stroje

$$\mu = 1 - \frac{P_z}{P + P_z} = 1 - \frac{8007}{80000 + 8007} = 0,909 \rightarrow 91\% \quad (1.92.)$$

Účinnost motoru $\mu = 91\%$ je lepší než předpokládaná účinnost na začátku návrhu (předpokládaná byla $\mu = 88\%$)

3 Výpočet oteplení kotvy

3.1 Drážková část

3.1.1 Vstupní hodnoty

$$D = 0,346m, l_e = 0,162m, L = 0,192m, Q = 42, l_d = 0,192m, l_{\check{c}} = 0,385m, i = 4,$$

$$\check{S}_p = 0,0405m, \check{S}_k = 0,01m, \check{S}_t = \check{S}_p + \check{S}_k = 0,0505m, t_{d1} = 0,0259m, b_d = 0,0105m,$$

$$h_d = 0,032m, h_{jr} = 0,063m, \delta_{iz} = 0,0011, \delta'_{iz} = 0,00615, z_1 = 0,0154m,$$

$$z_{1s} = 0,0148m, z_2 = 0,0142m, z_{2s} = 0,0136m, z_3 = 0,013m, \check{S}_{j1} = 0,0223m,$$

$$\check{S}_{j2} = 0,0211m, \check{S}_{j3} = 0,02m, \check{S}_{j4} = 0,0188m$$

3.1.2 Ztráty v drážkové části kotvy

$$P_{cud} = 538W, P_{cu\check{c}} = 1079W, P_{Fez} = 611W, P_{Fejr} = 487W, P_m = 1345W,$$

$$P_d = 400W, P_p = 255W$$

Celkové ztráty

$$\Delta P = \Sigma P_i = 4715W \quad (1.93.)$$

Ztráty odvedené rotorovou větví

$$\Delta P_{rv} = \Delta P - (P_{cu\check{c}} + P_m + P_d) = 4715 - (1079 + 1345 + 400) = 1891W \quad (1.94.)$$

3.1.3 Střední rychlost proudění v radiálním kanálu kotvi

Budeme vycházet z předpokladu, že chladicí vzduch proudící kanálem by se měl ohřát na $\Delta\vartheta_r = 15^\circ\text{C}$. Zpravidla se volí 12 až 15°C při celkovém oteplení prošlého vzduchu stroje o 20°C .

Množství vzduchu v rotorové větvi

$$Q_{rv} = \frac{P_{Fejr} + P_{Fez} + P_{cud}}{c_v \Delta\vartheta_r} = \frac{487 + 611 + 538}{1250 \cdot 15} = 0,087 \text{ m}^3/\text{s} \quad (1.95.)$$

- objemové měrné teplo chladiva pro vzduch $c_v = 1250 \text{ Ws}/^\circ\text{Cm}^3$

Množství na jeden kanál a drážkovou rozteč

$$Q_{r1} = \frac{Q_{rv}}{Q_i} = \frac{0,087}{42 \cdot 4} = 0,00052 \text{ m}^3/\text{s} \quad (1.96.)$$

Střední rychlost proudění v prostoru

ZUBŮ

$$V_{kz} = \frac{Q_{r1}}{z_2 \cdot \check{s}_k} = \frac{0,00052}{0,0142 \cdot 0,01} = 3,7 \text{ m/s} \quad (1.97.)$$

JÁDRA

$$V_{kJ} = \frac{Q_{r1}}{\check{s}_{J2} \cdot \check{s}_k} = \frac{0,00052}{0,0211 \cdot 0,01} = 2,5 \text{ m/s} \quad (1.98.)$$

Těmto rychlostem odpovídají součinitele přestupu tepla z grafu [1] obr. 45 :

$$\alpha_z = 40 \text{ W/}^\circ\text{Cm}^2, \alpha_j = 32 \text{ W/}^\circ\text{Cm}^2, \alpha_4 = 30 \text{ W/}^\circ\text{Cm}^2 (\text{odhad})$$

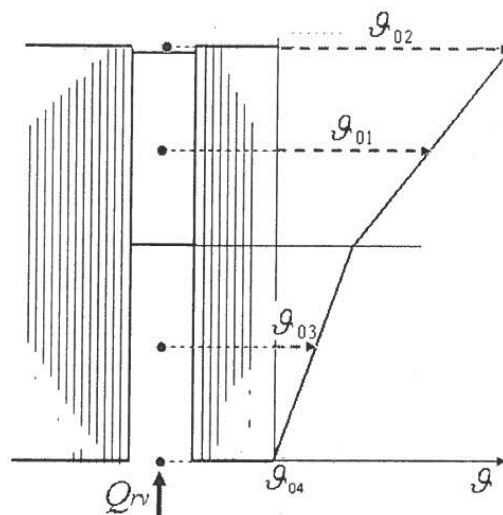
3.1.4 Ztráty v uvažovaných úsecích (tekoucí do uzlu)

$$\Delta P_{Cud1} = \frac{P_{Cud}}{2Qi} = \frac{538}{2 \cdot 42 \cdot 4} = 1,6 \text{ W} \quad (1.99.)$$

$$\Delta P_{Fez1} = \frac{P_{Fez}}{2Qi} = \frac{611}{2 \cdot 42 \cdot 4} = 1,82 \text{ W} \quad (1.100.)$$

$$\Delta P_{Fejr1} = \frac{P_{Fejr}}{2Qi} = \frac{487}{2 \cdot 42 \cdot 4} = 1,45 \text{ W} \quad (1.101.)$$

3.1.5 Oteplení v radiálním kanálu



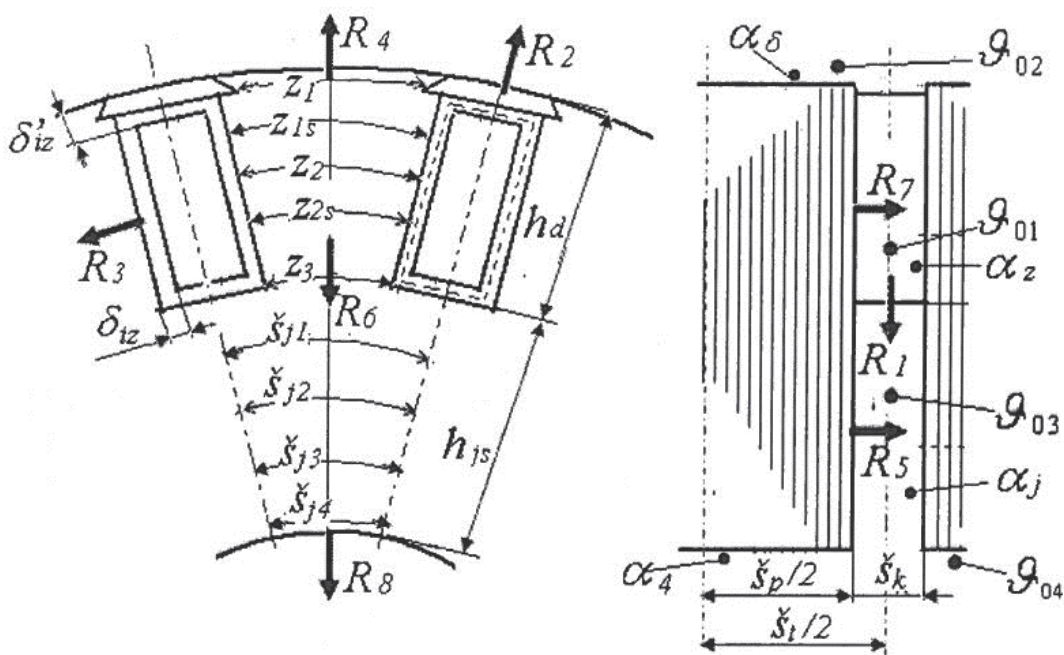
Obr 8. Nákres kanálu (převzato z [3])

$$\vartheta_{04} = 0^{\circ}\text{C} \quad (1.102.)$$

$$\vartheta_{03} = \frac{P_{Fejr}}{2c_v Q_{rv}} = \frac{487}{2 \cdot 1250 \cdot 0,087} = 2,2^{\circ}\text{C} \quad (1.103.)$$

$$\vartheta_{01} = \frac{P_{Fejr} + \frac{1}{2}(P_{Fez} + P_{Cud})}{c_v Q_{rv}} = \frac{487 + \frac{1}{2}(611 + 538)}{1250 \cdot 0,087} = 9,8^{\circ}\text{C} \quad (1.104.)$$

$$\vartheta_{02} = \frac{P_{Fejr} + P_{Fez} + P_{Cud}}{c_v Q_{rv}} = \frac{487 + 611 + 538}{1250 \cdot 0,087} = 15^{\circ}\text{C} \quad (1.105.)$$



Obr. 9. Návrh kotvy (převzato z [3])

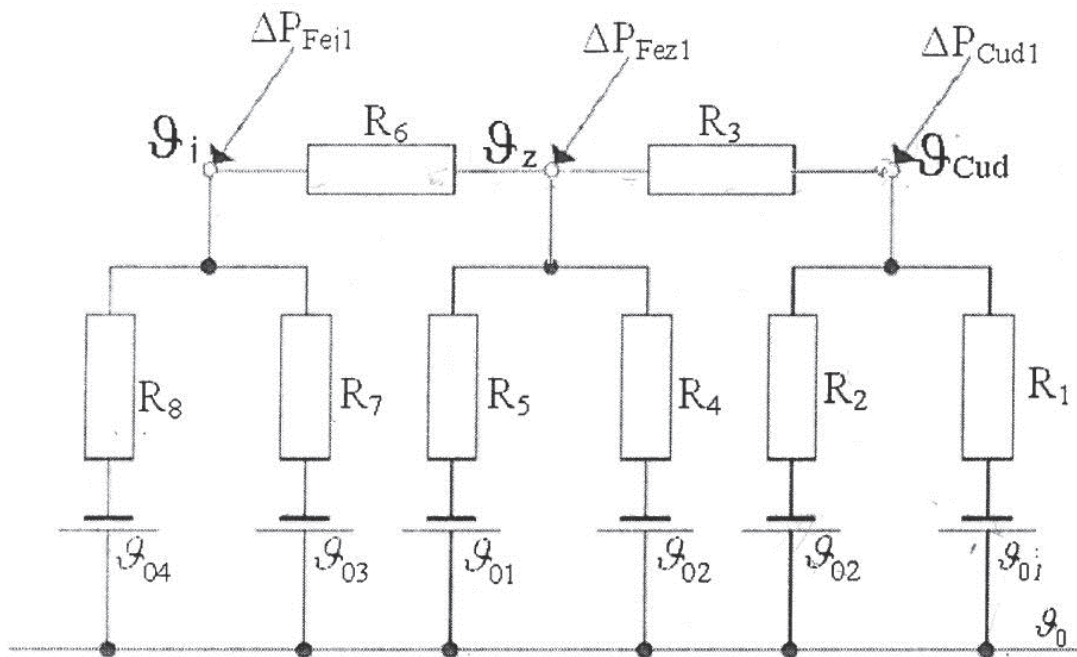
3.1.6 Výpočet tepelných odporů

$$\lambda_{iz} = 0,2 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}, \lambda_{Fed} = 45 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}, \lambda_{Feq} = 1 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}, \lambda_{vzd} = 0,028 \text{ W/m}^{\circ}\text{C},$$

$$\alpha_z = 40 \text{ W/}^{\circ}\text{Cm}^2, \alpha_j = 32 \text{ W/}^{\circ}\text{Cm}^2, \alpha_4 = 30 \text{ W/}^{\circ}\text{Cm}^2, \delta_{vzd} = 0,0001 \text{ m},$$

$$\alpha_{\delta} = 30 \text{ W/}^{\circ}\text{Cm}^2,$$

$$O_{iz} = 2(h_d - h_{klínek}) + b_d = 2(0,032 - 0,0045) + 0,0105 = 0,0655 \text{ m}$$



Obr 10. Náčrt tepelného schéma (převzato z [3])

Z vinutí do ventilačního kanálu:

$$\begin{aligned}
 R_1 &= \frac{\delta_{iz}}{\lambda_{iz} O_{iz} \frac{\check{S}_k}{2}} + \frac{\delta_{vzd}}{\lambda_{vzd} O_{iz} \frac{\check{S}_k}{2}} + \frac{1}{\alpha_z O_{iz} \frac{\check{S}_k}{2}} = & (1.106.) \\
 &= \frac{0,0011}{0,2 \cdot 0,0655 \cdot \frac{0,01}{2}} + \frac{0,0001}{0,028 \cdot 0,0655 \cdot \frac{0,01}{2}} + \frac{1}{40 \cdot 0,0655 \cdot \frac{0,01}{2}} = 104
 \end{aligned}$$

Z vinutí do vzduchové mezery:

$$\begin{aligned}
 R_2 &= \frac{\delta'_{iz}}{\lambda_{iz} b_d \frac{\check{S}_t}{2}} + \frac{\delta_{vzd}}{\lambda_{vzd} b_d \frac{\check{S}_t}{2}} + \frac{1}{\alpha_\delta b_d \frac{\check{S}_t}{2}} = & (1.107.) \\
 &= \frac{0,00615}{0,2 \cdot 0,0105 \cdot \frac{0,0505}{2}} + \frac{0,0001}{0,028 \cdot 0,0105 \cdot \frac{0,0505}{2}} + \frac{1}{90 \cdot 0,0105 \cdot \frac{0,0505}{2}} \\
 &= 156,4
 \end{aligned}$$

Z vinutí do zuby:

$$\begin{aligned}
 R_3 &= \frac{\delta_{iz}}{\lambda_{iz} O_{iz} \frac{\check{S}_p}{2}} + \frac{\delta_{vzd}}{\lambda_{vzd} O_{iz} \frac{\check{S}_p}{2}} + \frac{\frac{z_2}{2}}{3 \alpha_{Fed} O_{iz} \frac{\check{S}_p}{2}} = & (1.108.) \\
 &= \frac{0,0011}{0,2 \cdot 0,0655 \cdot \frac{0,0405}{2}} + \frac{0,0001}{0,028 \cdot 0,0655 \cdot \frac{0,0405}{2}} + \frac{\frac{0,0142}{2}}{3 \cdot 45 \cdot 0,0655 \cdot \frac{0,0405}{2}} \\
 &= 6,88
 \end{aligned}$$

Ze zuby do vzduchové mezery:

$$\begin{aligned}
 R_4 &= \frac{\frac{h_d}{2}}{3 \lambda_{Feq} z_{1s} \frac{\check{S}_p}{2}} + \frac{1}{\alpha_{\delta} z_1 \frac{\check{S}_p}{2}} = & (1.109.) \\
 &= \frac{\frac{0,032}{2}}{3 \cdot 1 \cdot 0,0148 \cdot \frac{0,0405}{2}} + \frac{1}{140 \cdot 0,0154 \cdot \frac{0,0405}{2}} = 40,7
 \end{aligned}$$

Ze zuby do ventilačního kanálu:

$$\begin{aligned}
 R_5 &= \frac{\frac{\check{S}_p}{2}}{3 \lambda_{Feq} z_2 h_d} + \frac{1}{\alpha_z z_2 h_d} = & (1.110.) \\
 &= \frac{\frac{0,0405}{2}}{3 \cdot 1 \cdot 0,0142 \cdot 0,032} + \frac{1}{40 \cdot 0,0142 \cdot 0,032} = 69,9
 \end{aligned}$$

Z plechů zuby do plechů jádra:

$$\begin{aligned}
 R_6 &= \frac{\frac{h_d}{2}}{3 \lambda_{Fed} z_{2s} \frac{\check{S}_p}{2}} + \frac{\frac{h_{jr}}{2}}{3 \lambda_{Fed} \check{S}_{j1} \frac{\check{S}_p}{2}} = & (1.111.) \\
 &= \frac{\frac{0,032}{2}}{3 \cdot 45 \cdot 0,0136 \cdot \frac{0,0405}{2}} + \frac{\frac{0,063}{2}}{3 \cdot 45 \cdot 0,0223 \cdot \frac{0,0405}{2}} = 0,95
 \end{aligned}$$

Z plechů jádra do ventilačního kanálu:

$$R_7 = \frac{\frac{\check{S}_p}{2}}{3\lambda_{Feq}\check{S}_{j2}h_{jr}} + \frac{1}{\alpha_j\check{S}_{j2}h_{jr}} = \quad (1.112.)$$

$$= \frac{\frac{0,0405}{2}}{3 \cdot 1 \cdot 0,0211 \cdot 0,063} + \frac{1}{32 \cdot 0,0211 \cdot 0,063} = 28,6$$

Z plechů jádra na vnější obvod statoru:

$$R_8 = \frac{\frac{h_{jr}}{2}}{3\lambda_{Fed}\check{S}_{j3}\frac{\check{S}_p}{2}} + \frac{1}{\alpha_4\check{S}_{j4}\frac{\check{S}_p}{2}} = \quad (1.113.)$$

$$= \frac{\frac{0,063}{2}}{3 \cdot 45 \cdot 0,02 \cdot \frac{0,0405}{2}} + \frac{1}{30 \cdot 0,0188 \cdot \frac{0,0405}{2}} = 88,1$$

Neznáme veličiny: ϑ_{Cud} , ϑ_z , ϑ_j ,

$$\frac{\vartheta_{Cud} - \vartheta_{01}}{R_1} + \frac{\vartheta_{Cud} - \vartheta_{02}}{R_2} + \frac{\vartheta_{Cud} - \vartheta_z}{R_3} = \Delta P_{Cud1} \quad (1.114.)$$

$$\frac{\vartheta_z - \vartheta_{Cud}}{R_3} + \frac{\vartheta_z - \vartheta_{02}}{R_4} + \frac{\vartheta_z - \vartheta_{01}}{R_5} + \frac{\vartheta_z - \vartheta_j}{R_6} = \Delta P_{Fez1} \quad (1.115.)$$

$$\frac{\vartheta_j - \vartheta_z}{R_6} + \frac{\vartheta_j - \vartheta_{03}}{R_7} + \frac{\vartheta_j - \vartheta_{04}}{R_8} = \Delta P_{Fej1} \quad (1.116.)$$

Úprava rovnic

$$\vartheta_{Cud} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right) - \frac{\vartheta_z}{R_3} = \Delta P_{Cud1} + \frac{\vartheta_{01}}{R_1} + \frac{\vartheta_{02}}{R_2}$$

$$-\vartheta_{Cud} \frac{1}{R_3} + \vartheta_z \left(\frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5} + \frac{1}{R_6} \right) - \frac{\vartheta_j}{R_6} = \Delta P_{Fez1} + \frac{\vartheta_{02}}{R_4} + \frac{\vartheta_{01}}{R_5}$$

$$\vartheta_j \left(\frac{1}{R_6} + \frac{1}{R_7} + \frac{1}{R_8} \right) - \frac{\vartheta_z}{R_6} = \Delta P_{Fej1} + \frac{\vartheta_{03}}{R_7} + \frac{\vartheta_{04}}{R_8}$$

$$\vartheta_{Cud} \left(\frac{1}{104} + \frac{1}{156,4} + \frac{1}{6,88} \right) - \frac{\vartheta_z}{6,88} = 1,6 + \frac{9,8}{104} + \frac{15}{156,4}$$

$$-\vartheta_{Cud} \frac{1}{6,88} + \vartheta_z \left(\frac{1}{6,88} + \frac{1}{40,7} + \frac{1}{69,9} + \frac{1}{0,95} \right) - \frac{\vartheta_j}{0,95} = 1,82 + \frac{15}{40,7} + \frac{9,8}{69,9}$$

$$\vartheta_j \left(\frac{1}{0,95} + \frac{1}{28,6} + \frac{1}{88,1} \right) - \frac{\vartheta_z}{0,95} = 1,45 + \frac{2,2}{28,6} + \frac{0}{88,1}$$

$$0,162\vartheta_{Cud} - 0,145\vartheta_z + 0\vartheta_j = 1,78$$

$$-0,145\vartheta_{Cud} + 1,237\vartheta_z - 1,053\vartheta_j = 1,96$$

$$0\vartheta_{Cud} - 1,053\vartheta_z + 1,098\vartheta_j = 1,53$$

3.1.7 Oteplení uzlů:

$$\vartheta_{Cud} = 57,1^\circ\text{C}$$

$$\vartheta_z = 51,6^\circ\text{C}$$

$$\vartheta_j = 50,8^\circ\text{C}$$

3.2 Čela statorového vinutí

3.2.1 Vstupní hodnoty:

$$P_{Cu\check{c}} = 1079W, l_{\check{c}} = 0,385m, \alpha_{\check{c}} = 30 W/^{\circ}Cm^2$$

Ztráty v jednom čele

$$\Delta P_{Cu\check{c}1} = \frac{\Delta P_{Cu\check{c}}}{2Q} = \frac{1079}{2 \cdot 42} = 12,8W \quad (1.117.)$$

Obvod čela

$$O_{\check{c}} = 2(h_{\check{c}} + b_{\check{c}}) = 2(0,0122 + 0,0075) = 0,0197m \quad (1.118.)$$

→ $h_{\check{c}}, b_{\check{c}}$ rozměry izolované tyče kotvy

$$\begin{aligned} R_{\check{c}1} &= \frac{\delta_{iz}}{\lambda_{iz} O_{\check{c}} l_{\check{c}}} + \frac{\delta_{vzd}}{\lambda_{vzd} O_{\check{c}} l_{\check{c}}} + \frac{1}{\alpha_{\check{c}} k O_{\check{c}} l_{\check{c}}} = \\ &= \frac{0,0011}{0,2 \cdot 0,0197 \cdot 0,385} + \frac{0,0001}{0,028 \cdot 0,0197 \cdot 0,385} + \frac{1}{45 \cdot 0,6 \cdot 0,0197 \cdot 0,385} \\ &= 6,07 \end{aligned} \quad (1.119.)$$

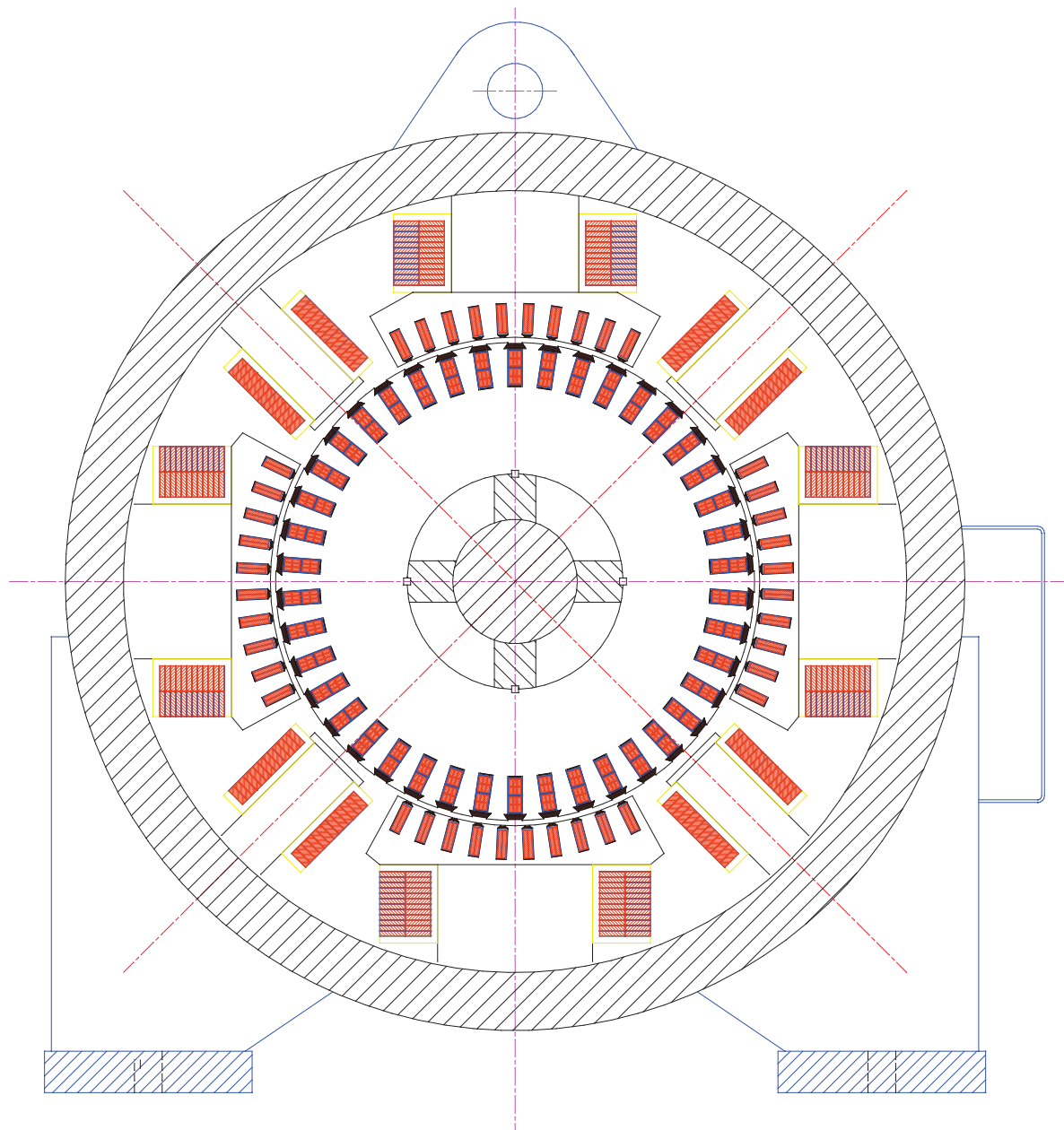
→ volím činitel krytí $k = 0,6$

$$\vartheta_{\check{c}} = \Delta P_{Cu\check{c}1} R_{\check{c}1} = 12,8 \cdot 6,07 = 77,8^{\circ}C \quad (1.120.)$$

4 Řezy strojem

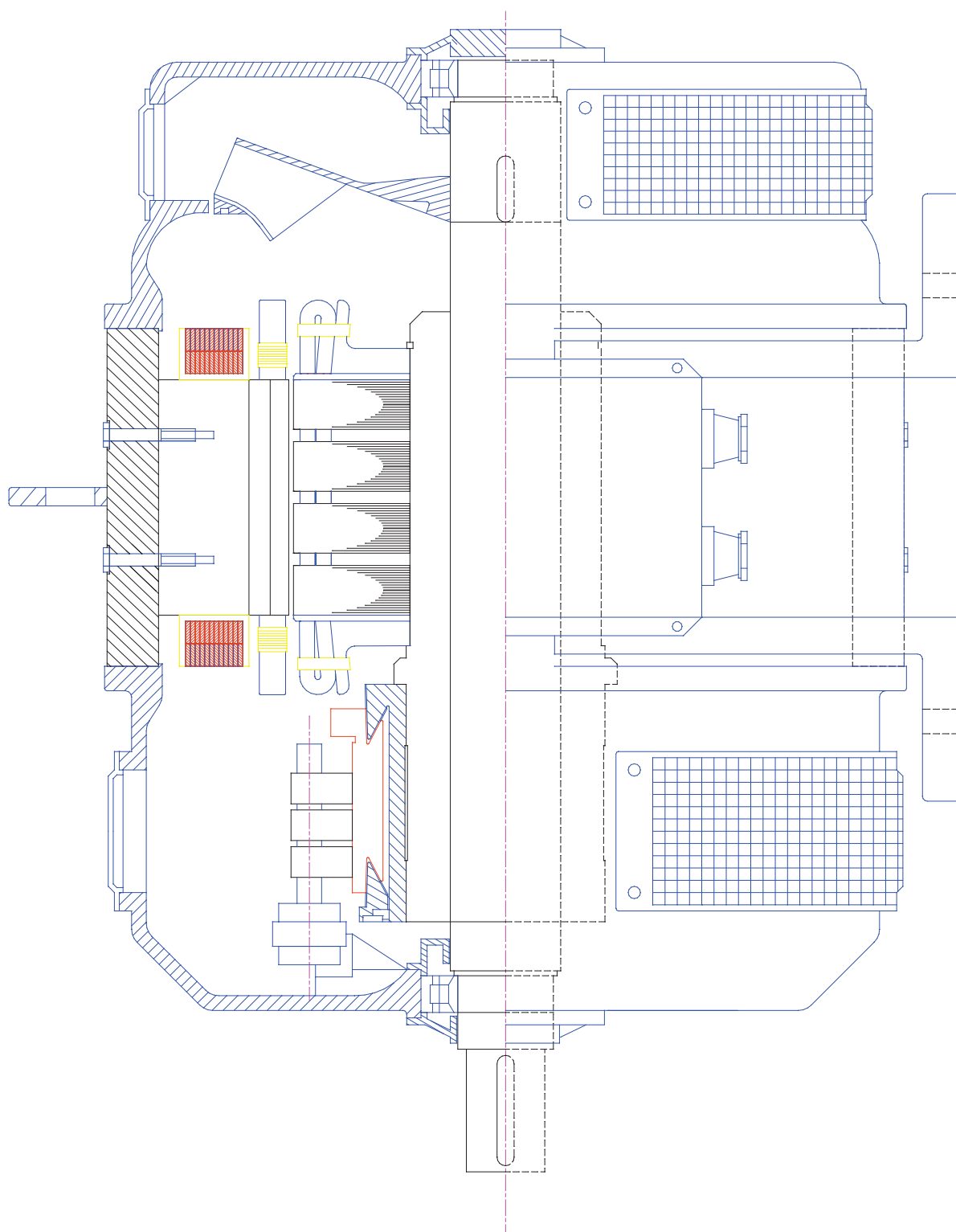
Pro nakreslení řezů stroj byl použit program DraftSight 2016 x64 SP1.

4.1 Příčný řez strojem



Obr 11. Příčný řez strojem

4.2 Podélný řez strojem



Obr 12. podélný řez strojem

5 Závěr

Předmětem této práce bylo vytvořit elektromagnetický návrh stejnosměrného motoru se sériovým buzením a kompenzačním vinutím se zadanými parametry, provést výpočet oteplení induktu metodou náhradních tepelných obvodů a schématicky nakreslit podélný a příčný řez strojem.

Práce je složena z úvodu, kde je stručně shrnuta konstrukce a princip stejnosměrného motoru. V druhé části je samotný návrh, kde bylo nejprve nutné zvolit základní rozměry stroje. Přes návrh vinutí kotvy a návrh magnetického obvodu se kotvy se dále navrhlo vinutí a rozměry hlavního a pomocného pólu. Po vypočtení pólového nástavce hlavního pólu se ještě navrhlo kompenzační vinutí a mohlo se pokračovat k návrhu komutátoru a vhodných kartáčů. V poslední části návrhu motoru se spočetli a celkové ztráty a vypočetla výsledná účinnost motoru, která vyšla 91% (předpokládaná byla menší a to 88%).

V další části práce je výpočet oteplení induktu metodou náhradních tepelných obvodů. Budeme-li uvažovat teplotu okolí 40°C, díky hodnotám oteplení můžeme zvolit izolace Třídy A, která vyhovuje do teplot o velikosti 105°C. Pokud bychom chtěli zvolit izolace vyšších tříd, výsledná cena by se zvětšila, ale mohli bychom zvolit vyšší proudové hustoty.

V poslední části práce jsou vloženy schématické řezy, příčný a podélný, který byl vytvořen v programu DraftSight 2016 na základě spočtených parametrů a rozměrů motoru.

Během návrhu je řada výpočtů, které musí vyhovovat určitým mezím a pokud výsledek nevyhovuje, je nutné zvolit jiné parametry a poté návrh přepočítat a tím zpřesnit. Proto byl tento návrh také značně časově náročný.

6 Seznam použité literatury

- [1] Stavba elektrických strojů – Prof. Ing. Dr. Ladislav Cigánek,
Státní nakladatelství technické literatury, Praha 1958
- [2] Stavba elektrických strojů – Igor Petrovič Kopylov a kolektiv
SNTL Praha – Nakladatelství Mír Moskva
- [3] Projektování elektrických strojů – doc. Ing. Josef Červený CSc.
- [4] Elektrické motory a pohony – Ota Roubíček
BEN – Praha 2004

7 Přílohy

M Ě D Ě N Ě P Á S Y

Rozměry měděných pásů

Výběr z ČSN 42 8808-1959

Jmenovitá tloušťka [mm]	0,8	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	(1,5)	1,6	1,8	2,0	2,2	2,5	2,8
0,30	1,8	1,3	1,66										
	2,0	1,46	1,86	2,18	2,38	2,58	2,69	2,89					
	2,2	1,62	2,06	2,42	2,64	2,86	2,99	3,21					
	2,5	1,86	2,36	2,78	3,03	3,28	3,44	3,69	4,19	4,45			
	2,8	2,1	2,66	2,94	3,14	3,42	3,70	3,89	4,17	4,73	5,05		
0,35	3,0	2,26	2,86	3,16	3,38	3,68	3,98	4,19	4,49	5,09	5,45	6,05	6,9
	3,5	2,66	3,36	3,71	3,98	4,33	4,68	4,94	5,29	5,99	6,45	7,15	8,2
	4,0	3,06	3,86	4,26	4,58	4,98	5,38	5,69	6,09	6,89	7,45	8,25	9,45
	4,5	3,46	4,36	4,81	5,18	5,63	6,08	6,44	6,89	7,79	8,45	9,35	10,7
	5,0	3,86	4,86	5,36	5,78	6,28	6,78	7,19	7,69	8,69	9,45	10,4	12,0
	5,5	4,26	5,36	5,91	6,38	6,93	7,48	7,94	8,49	9,59	10,4	11,5	13,2
	6,0	4,66	5,86	6,46	6,98	7,58	8,18	8,69	9,29	10,5	11,4	12,6	14,5
0,40	(6,5)	5,06	6,36	7,01	7,58	8,23	8,88	9,44	10,1	11,4	12,4	13,7	17,6
	7	5,46	6,86	7,56	8,18	8,88	9,58	10,2	10,9	12,3	13,4	14,8	17,0
	8	6,26	7,86	8,66	9,38	10,2	11,0	11,7	12,5	14,1	15,4	17,0	19,5
	9	7,06	8,86		10,6	11,5	12,4	13,2	14,1	15,9	17,4	19,2	22,0
	10	7,86	9,86		11,8	12,8	13,8	14,7	15,7	17,7	19,4	21,4	24,5
	11	8,66	10,9		13,0	14,1	15,2	16,2	17,3	19,5	21,4	23,6	27,0
	12	9,46	11,9		14,2	15,4	16,6	17,7	18,9	21,3	23,4	25,8	29,5
0,50	(13)									23,1	25,4	28,0	32,0
	14									20,7	22,1	24,9	27,4
	(15)												
	16												
	18												
	20												
0,65	25												
	30												

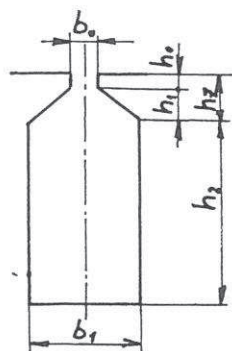
Rozměry v závorkách neplatí pro nové konstrukce.

3,0	(3,2)	3,5	4	4,5	5	5,5	6	(6,5)	7	8	9	10
11,4												
12,9												
14,4												
15,9												
17,4												
18,9	19,9	21,9	25,1									
20,4	21,4	23,6	27,1	30,3								
23,4	24,7	27,1	31,1	34,8	38,8	42,8	46,8					
26,4	27,9	30,6	35,1	39,3	43,8	48,3	52,5					
29,4	31,1	34,1	39,1	43,8	48,8	53,8	58,5					
32,4	34,3	37,6	43,1	48,3	53,8	59,3	64,5					
35,4	37,5	41,1	47,1	52,8	58,8	64,8	70,5			93,8		
38,4	40,7	44,6								101,8		
41,4	43,9	48,1	55,1	61,8	68,8	75,8	82,5			109,8		
44,4	47,1	51,6	59,1	66,3						117,8		147,8
47,4	50,3	55,1	63,1	70,8	78,8	86,8	94,5	102,5	110,5	125,8		157,8
53,4	56,7	62,1	71,1	79,8	88,8	97,8	106,5	115,5	124,5	141,8	159,8	177,8
59,4	63,1	69,1	79,1	88,8	98,8	108,8	118,8	128,8	138,5	157,3	178,8	197,8
74,4	79,1	86,6	99,1	111,3	123,8	136,3	148,5	161,0	173,5	197,8	222,8	247,8
89,4	95,1	104,1	119,1	138,8	148,8	163,8	178,5	193,5	208,5	237,8	267,8	297,8

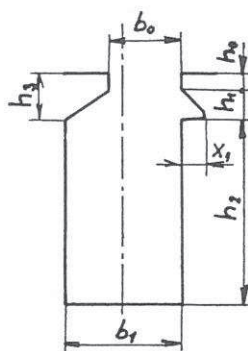
Příklad: pás 3,5 x 6 má průřez 20,1 mm²; rozměry izolovaného pásu jsou 3,9 x 6,4 mm.

Příloha 1. Rozměry měděných pásových vodičů

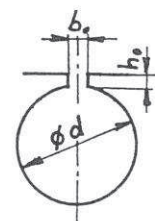
TVARY DRÁŽEK PRO VINUTÍ



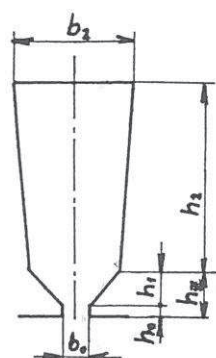
drážka D



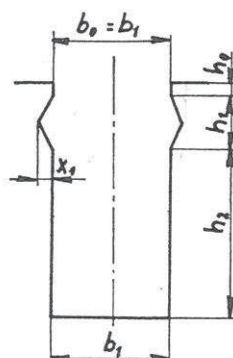
drážka F



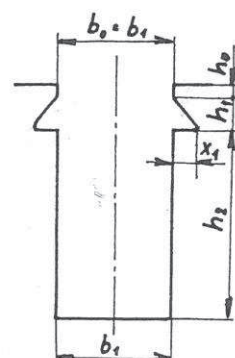
drážka K



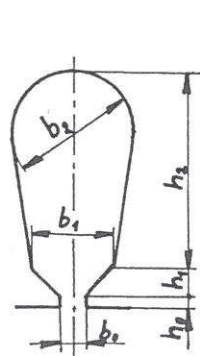
drážka L



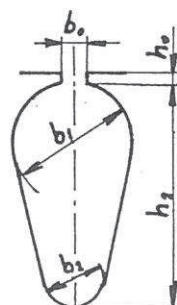
drážka M



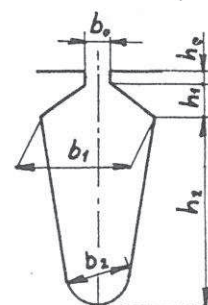
drážka N



drážka S



drážka V



drážka W

Příloha 2. Tvary drážek pro vinutí

Drážka M				Drážka N			
b_1	h_0	h_1	x_1	b_1	h_0	h_1	x_1
5	0,7	3,5	1,2	5	0,7	3,3	2,31
5,2		3,3	1,1	5,2			
5,5		3,6	1,2	5,5			
5,8		3,5	1,2	5,8			
6		3,3	1,1	6			
6,3		4	1,4	6,2			
6,6		3,6	1,25	6,5			
7		4	1,4	6,8			
7,3		3,6	1,25	7			
7,6		4	1,4	7,2			
8		4	1,4	7,5			
8,5		3,6	1,15	7,8			
9		4	1,4	8			
9,5	3,6	1,15	8,5				
10	1	5	1,65	9	0,7	3,8	2,66
10,5				9,5			
11				10			
11,5				10,5			
12				11			
12,5				11,5			
13				12			
13,5				12,5			
14				13			
/14,5/				13,5			
15				14			
/15,5/				14,5			
16				15			
/16,5/	/15,5/						
17	16						
/17,5/	/16,5/						
18	17						
/18,5/	/17,5/						
19	18						
/19,5/	/18,5/						
20	19						
/20,5/	/19,5/						
21	20						
/21,5/	20						
22	9	2,45		$\lambda_z = \frac{2,3h_1}{2b_1 + x_1} + \frac{h_0}{b_0}$			
/22,5/							
23							
/23,5/							
24							
25							
26							
27							
28							
30							
32							

Příloha 3. Rozměry drážek pro vinutí

		Drážka D			Drážka F						
	b_f	b_o	h_o	h_f	b_o	h_o	h_f	h_3	x_f		
4		2,2	0,5	0,90	2,5	0,7	2,8	1,20	1,6		
4,2				1,00						1,36	
4,4		2,5		0,95	2,8			1,28			
4,6				1,05				1,44			
4,8		2,8		1,15	3			1,60			
5				1,25				1,60			
5,2		3,2		1,35	0,7			3,3		1,76	
5,5				1,35						1,84	
5,8		3		1,50						3,5	2,08
6				1,50							1,50
6,2		3,2	1,60	3,8		1,62					
6,5			1,75			1,62					
6,8		3,5	1,90	4		1,80					
7			1,90			1,80					
7,2		4,2	2,00	0,7		3,3	1,92				
7,5			1,60				1,98				
7,8		4,5	1,72		4,8		2,16				
8			1,80				2,10				
8,5		4	1,80		5,2		2,22				
9			2,00				2,40				
9,5		4,5	2,20		5,5		2,58				
10			2,20				2,25				
10,5		5	2,40		5,8		2,35				
11			2,60				2,50				
11,5		5,5	1,95	6,2	2,65						
12			2,10		2,75						
12,5		6	2,25	6,5	2,85						
13			2,25		3,00						
13,5		7	2,40	7,2	3,15						
14			2,55		3,25						
14,5		7,8	2,55	8	3,35						
15			2,70		3,50						
/15,5/		6	2,85	0,7	4,3						
16			3,00								
/16,5/		7	3,15			1					
17			3,30								
/17,5/		7	3,45			1					
18			3,60								
/18,5/		7	3,75			1					
19			3,90								
/19,5/		7	2,70			1					
20			2,80								
21		7	3,00	1							
22			3,20								
23		7	3,40	1							
24			3,40								
25		7	3,60	1							
26			3,80								
27		7	4,00	1							
28			4,20								
/29/		7	4,40	1							
30			4,60								

$$\lambda_z = \frac{h_f + h_3}{b_f + b_o} + \frac{h_o}{b_o}$$

$$\lambda_z = \frac{2,3h_f}{b_f + b_o} + \frac{h_o}{b_o}$$

Příloha 4. Rozměry drážek pro vinutí