

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Návrh stejnosměrného stroje se sériovým buzením

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Radek ŠVEC**
Osobní číslo: **E10N0019K**
Studijní program: **N2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu: **Návrh stejnosměrného stroje se sériovým buzením**
Zadávatel 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 s parametry: $P = 75 \text{ kW}$, $U = 600 \text{ V}$, $n = 1\,000 \text{ ot/min}$.
2. Nakreslete schématicky podélný a příčný řez stroje.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího
Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran
Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:


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

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

Datum zadání diplomové práce: 17. října 2011
Termín odevzdání diplomové práce: 11. května 2012


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




Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 17. října 2011

Anotace

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na elektromagnetický výpočet stejnosměrného motoru se sériovým buzením dle zadaných parametrů. V programu AutoCAD je nakreslen podélný a příčný řez tohoto stroje.

Klíčová slova

Stejnosměrný elektrický stroj, magnetický obvod, elektromagnetický návrh, komutátor, sériové buzení, komutace, póly

Abstract

The master thesis presents an electromagnetic design of a direct current series excited machine according to the specified parameters. There are drawings of longitudinal and cross sections of the designed synchronous machine made in CAD.

Key words

DC electrical machine, magnetic circuit, electromagnetic design, collector, series excitation, commutation, pole

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity 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.

Souhlasím s tím, aby tato práce byla použita ke studijním účelům.

V Plzni dne 11.5.2012

Bc. Radek Švec

.....

Poděkování

V úvodu této práce bych rád poděkoval všem, kteří mi svoji radou, materiály či psychicky pomáhali při studiu na Západočeské univerzitě a nemalou měrou přispěli k tomu, že jsem mohl vytvořit tuto diplomovou práci. Dále bych chtěl poděkovat vedoucímu této práce Doc. Ing. Josefu Červenému CSc. a všem, kteří v průběhu mého studia přednášeli.

Obsah

OBSAH	7
ÚVOD	8
SEZNAM SYMBOLŮ	11
1 ZADANÉ PARAMETRY	14
2 HLAVNÍ ROZMĚRY STROJE	14
3 OSTATNÍ ROZMĚRY STROJE	15
4 VINUTÍ KOTVY	15
5 DRÁŽKOVÁNÍ ROTORU	17
6 MAGNETICKÝ OBVOD	18
7 VINUTÍ PÓLŮ	20
8 KARTÁČE A KOMUTÁTOR	22
9 KOMUTACE	23
10 ZTRÁTY A ÚČINNOST	25
11 TEPELNÝ VÝPOČET	27
ZÁVĚR	30
POUŽITÁ LITERATURA	31
SEZNAM PŘÍLOH	32
PŘÍLOHY	33

Úvod

Tato diplomová práce se zabývá návrhem stejnosměrného motoru se sériovým buzením. V příloze této práce je nákres podélného a příčného řezu stroje.

Stejnoseměrné stroje jsou nejstaršími točivými elektrickými stroji. Ze začátku se používaly jako generátory pro výrobu stejnosměrného proudu. Stejnoseměrné stroje mohou pracovat jako generátory, přeměňují mechanickou energii na elektrickou, nebo je lze použít jako motory, které přeměňují elektrickou energii na mechanickou. Generátory, jako svářecí agregáty byly využívány v mnoha odvětvích průmyslu. S rozvojem výkonové elektroniky byly postupně nahrazovány svářecími transformátory s polovodičovými usměrňovači. V dnešní době jsou stejnosměrné stroje používány především jako motory v elektrických regulovaných pohonech např. u obráběcích strojů, válcovacích stolic, v automobilovém průmyslu a v elektrické traktaci jako trakční motory. Stejnoseměrné motory jsou stejně jako dynamy postupně nahrazovány střídavými regulačními pohony s asynchronními motory. Stejnoseměrné stroje jsou složitější, výrobně nákladnější a tedy dražší a mají nákladnější údržbu než asynchronní stroje. V některých oblastech se stejnosměrné stroje stále používají pro své některé výhodné vlastnosti a speciální charakteristiky.

Konstrukční uspořádání

Na statoru jsou umístěny hlavní póly pro vytvoření magnetického toku. Magnetický tok může být vytvořen průchodem proudu vinutím na těchto pólech, nebo permanentními magnety. Hlavní póly se skládají z pólového jádra pro vinutí a pólového nástavce. U motorů větších výkonů jsou na statoru mezi hlavními póly umístěny ještě pomocné póly. Tyto pomocné póly kompenzují demagnetizační účinek magnetického napětí reakce kotvy a také kompenzují reaktanční napětí, které se indukuje v komutující cívce. Neboť obojí závisí na proudu v rotoru, musí být vinutí pomocných pólů zapojeno do série s vinutím kotvy.

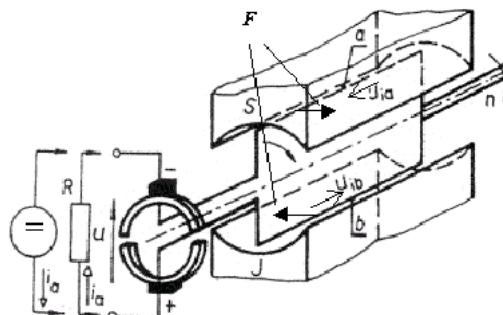
Rotor (kotva) je složen z izolovaných křemíkových plechů v jehož drážkách je umístěno vinutí. Jednotlivé cívky vinutí kotvy jsou připojeny k měděným lamelám komutátoru, které jsou od sebe vzájemně odizolovány. Komutátor je nasazen na hřídeli uvnitř stroje. Na lamely komutátoru dosedají kartáče, umístěné v odizolovaných držácích, kterými se přivádí proud do vinutí kotvy. Komutátor, držáky kartáčů a kartáče tvoří sběrné ústrojí stroje.

Princip činnosti stejnosměrného motoru

Princip činnosti lze vysvětlit na teoretickém stroji, jehož vinutí kotvy tvoří pouze jeden vodič, vytvářející jeden závit rotoru, jehož konce jsou připojeny ke dvěma lamelám

komutátoru. Tento závit rotoru průchodem elektrického proudu vytváří své magnetické pole, které je odpuzováno magnetickým polem statoru. Pootočením rotoru o polovinu otáčky se vlivem komutátoru změní směr proudu v závitě a rotor se otáčí stále stejným směrem.

Pokud chceme u stejnosměrného motoru změnit směr otáčení rotoru (reverzace), lze toto provést změnou směru průchodu proudu statorovým nebo rotorovým vinutím. Změnou polarity napájecího napětí na vstupních svorkách motoru se směr otáčení rotoru nezmění, neboť současně se změní směr magnetického pole statoru i rotoru.



Obr. 1 Stejnosměrný stroj

Reverzaci motoru se doporučuje provádět přepólováním kotvy. Reverzace změnou proudu v budícím vinutí se nedoporučuje z těchto důvodů:

- přemagnetování magnetů vyžaduje určitý krátký čas, vzhledem na protisměrnou remanenci a velkou indukčnost budících cívek,
- přepínáním magnetů se ztrácí elektrická energie, která při častém přepínání tvoří velkou hodnotu,
- okamžitá změna proudu v budícím vinutí vyvolává vlivem velké indukčnosti budících cívek přepětí a tím určité nebezpečí proražení izolace cívek. Tomu lze zabránit pozvolným zmenšováním proudu před přepnutím,
- pokud má motor pracovat i v brzděném režimu, je možné přepojit pouze kotvu, protože přepojením budícího vinutí by se motor odmagnetizoval a brzdící účinek by se nedostavil.

Rozdělení stejnosměrných strojů podle buzení

- stroje se sériovým buzením – budící vinutí hlavních pólů je zapojeno do série s kotvou,
- stroje s derivačním buzením – budící vinutí hlavních pólů je zapojeno paralelně ke kotvě,
- stroje s cizím buzením – budící vinutí hlavních pólů je napájeno z nezávislého stejnosměrného zdroje nebo místo hlavních pólů s vinutím má stroj permanentní magnety,
- stroje s kompaundním buzením – na hlavních pólech je budící vinutí derivační a sériové.

Stejnoseměrný motor se sériovým buzením

Motor má budící vinutí zapojeno do série s obvodem kotvy, proto i proud, který prochází statorem a rotorem je stejný. Motory se sériovým buzením se používají v elektrické trakci jako trakční motory např. pro lokomotivy, nebo jako tzv. univerzální motory, které se mohou napájet jak střídavým tak i stejnosměrným napětím používané pro elektrické nářadí např. vrtačky, brusky a malé kuchyňské spotřebiče. Motorům se sériovým buzením větších výkonů při chodu naprázdno hrozí nebezpečí poškození rotoru vlivem odstředivých sil se vzrůstajícími otáčkami. Toto se týká hlavně trakčních motorů na lokomotivách, kde může dojít vlivem proklouznutí mezi hnacím dvojkolím lokomotivy a kolejnicemi. Trakční motory jsou doplněny obvodem pro paralelní připojení rezistoru k budícímu vinutí statoru. Tím se zeslabí magnetické pole statoru, zvětší se proud v rotoru a zvýší se otáčky motoru. Současně s tím ale dochází k vyššímu tepelnému namáhání rotoru a vlivem Jouleových ztrát se snižuje účinnost motoru. Snížením magnetického toku se současně zmenší i zátěžný moment a zvýší úhlová rychlost.

Seznam symbolů

A [A/m]	Obvodová proudová hustota
B [T]	Magnetická indukce
- k_p	v pólu
- j_s	v kostře
- z_s	Střední indukce v zubech
- $1/3$	Zdánlivá indukce v 1/3
- δ	Indukce ve vzduchové mezeře
- δ_k	pod komutačním pólem
b [m(mm)]	Šířka drážky
- c	cívky
- k	komutačního pásma
- k_p	průřezu pólu
- p	pólu
- u	kartáče
- $z_{1/3}$	zubu v 1/3
D [m]	Vnější průměr kotvy
- e	Vnitřní průměr kostry
- k	Průměr komutátoru
E [V]	Elektromotorická síla
- i	Střední lamelové napětí
- r	Střední hodnota reaktančního napětí
F_m [A]	Magnetomotorické napětí
f [Hz]	Kmitočet rotorového proudu
G_{jr} [kg]	Hmotnost jha kotvy
- z	zubů kotvy
H_z [A/m]	Intenzita magnetického pole
h [m(mm)]	Hloubka drážky
- i	Střední výška drážky nad vodiči
- c	Výška cívky
- j_r	kostry
- j_s	profilu kostry
- k	cívky
I_1 [A]	Proud kotvy
K [-]	Počet lamel
k_c [-]	Carterův činitel
L_e [m(mm)]	Efektivní délka železa
- k	Délka komutátoru
- k_p	pólu
l_c [m(mm)]	Chladicí obvod cívky
- \check{e}	Délka čela
- j_s	indukční čáry v kostře
- j_r	indukční čáry v jádře rotoru
- p	indukční čáry v pólu
- s	Střední délka závitu cívky
- sk	komutačního pólu

N_c [-]	Počet závitů cívky hlavního pólu
- ck	závitů komutační cívky
- s	závitů kotvy v sérii
- u	kartáčů na roubíku
n [ot./min]	Otáčky stroje
n_d [-]	Počet vodičů v drážce
P [W(kW)]	Výkon stroje
- c	Ztráty v cívce
- Cu1	v mědi kotvy
- Cu2	v hlavních pólech
- d	Přídavné ztráty
- Fe	Ztráty v železe
- kp	v komutačních pólech
- m	Mechanické ztráty
- tk	Ztráty třením kartáčů
- Δ	přechodem
P_z [%]	Celkové ztráty
p [-]	Počet pólpárů
Q [-]	Počet drážek
- p	drážek na pól
R_l [Ω]	Odpor kotvy
- c	cívky hlavního pólu
- kp	komutačního pólu
S_1 [$m^2(mm^2)$]	Průřez vodiče kotvy
- 2	vodiče cívky
- c	Chladicí povrch
- e	plášť plechů
- i	Celková vnitřní plocha
- k	Postranní chladicí plochy svazků plechů
- u	Plocha kartáče
t_1 [mm]	Lamelová rozteč
- 1/3	Rozteč drážek v 1/3 od kořene zubu
- 3	Rozteč drážek ve vzduchové mezeře
U [V]	Napětí
U_{jr} [A]	Magnetické napětí pro kostru
- js	jho kostry
- p	póly
- δ	vzduchovou mezeru
- δk	komutační mezeru
z	zuby
V_1 [m^3]	Objem plechů
v [m/s]	Obvodová rychlost rotoru
- k	komutátoru
- v	Rychlost vzduchu mezi póly
α [-]	Pólové krytí
- nc	Střední chladivost čel

β [-]	Krytí kartáčů
δ [mm]	Vzduchová mezera
- k	pod komutačním pólem
η [%]	Účinnost
λ_d [-]	Jednotková vodivost drážkového rozptylu
- c	čel
- z	rozptylu mezi zuby
σ_u [A/mm ²]	zatížení grafitických kartáčů
τ_p	Pólová rozteč
ξ	Rozptylové číslo
$\Delta\theta_{Cu1}$ [°C]	Oteplení mědi
- Fe	železa
- k	komutátoru
Φ [Vs]	Magnetický tok pólu
- k	komutačního pólu

1. Zadané parametry:

Výkon stroje $P = 75 \text{ kW}$,

Napětí $U = 600 \text{ V}$,

Otáčky $n = 1000 \text{ ot./min.}$

2. Hlavní rozměry stroje

U stejnosměrného stroje jsou jeho hlavními rozměry vnější průměr kotvy D a efektivní délka kotvy l . Předpokládaná účinnost dle grafu na obr. 2 je 88 %, budící ztráty $P_{Cu2} = 0,8\%$. Jsou to ztráty v budícím vinutí hlavních pólů.

$$P_{Cu2} = 0,016 \cdot \frac{P}{\eta} = 0,016 \cdot \frac{75000}{0,88} = 1364 \text{ W} \quad (1)$$

Vnitřní výkon kotvy na otáčku

$$\frac{P_i}{n} = \frac{P}{\eta n} = \frac{75000}{1000 \cdot 0,88} = 85,23 \text{ W / ot / min} \quad (2)$$

Níže uvedené hodnoty jsem odečetl z grafu, příloha č. 1

Vnější průměr kotvy: $D = 0,4 \text{ m}$

Indukce ve vzduchové mezeře: $B_\delta = 0,9 \text{ T}$

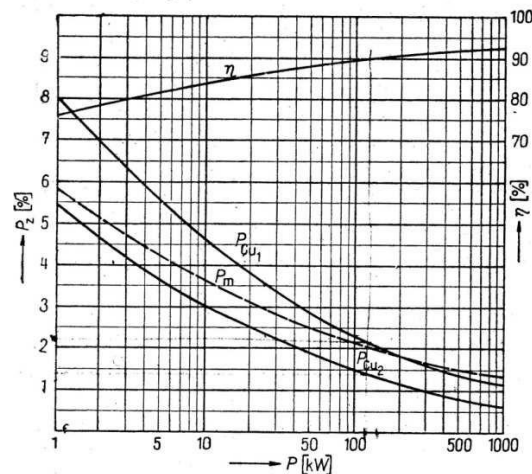
Obvodová proudová hustota: $A = 27000 \text{ A/m}$

Neboť se jedná o stroj s komutačními póly, proto bylo zvoleno pólové krytí $\alpha = 0,65$

Průměru kotvy odpovídá počet pólů $2p = 4$

Ztráty v mědi kotvy jsou podle obr. 2 2,5 % takže:

$$P_{Cu1} = 0,025 \cdot \frac{75000}{0,88} = 2130 \text{ W} \quad (3)$$



Obr. 2 Ztráty a účinnost st. strojů

3. Ostatní rozměry stroje

Pólová rozteč

$$\tau_p = \frac{\pi D}{2p} = \frac{\pi \cdot 0,4}{4} = 0,314\text{m} \quad (4)$$

Indukce v pólu se zvolí $B_p = 1,6$ T.

$$\text{Délka pólu } L_p = L = 0,22 \text{ m.} \quad (5)$$

Rozptyl pólů se odhadne na 25%. Šířka pólu

$$b_p = \frac{\Phi(1 + \nu)}{L_p \cdot B_p} = \frac{0,0407 \cdot 1,25}{0,22 \cdot 1,6} = 0,145\text{m} \quad (6)$$

Délka čela

$$l_\xi = \sqrt{2} \cdot \tau_p = \sqrt{2} \cdot 0,314 = 0,45\text{m} \quad (7)$$

Efektivní délka železa:

$$L_e = \frac{\Phi}{\alpha B_\delta \tau_p} = \frac{0,0407}{0,65 \cdot 0,9 \cdot 0,314} = 0,22\text{m} \quad (8)$$

Osové větrání bez větracích štěrbin, proto

$$L = L_e = 0,22\text{m} \quad (9)$$

4. Vinutí kotvy

Proud kotvy

$$I_1 = \frac{P_i}{U} = \frac{P}{\eta U} = \frac{75000}{0,88 \cdot 600} = 142\text{A} \quad (10)$$

Počet závitů kotvy v sérii

$$N_s = \frac{\pi D A}{2 I_1} = \frac{\pi \cdot 0,4 \cdot 27000}{2 \cdot 142} = 119,5 \quad (11)$$

Podle tabulky č. 1 má být počet drážek $Q = 54$

Tab. 1 Průměrné počty drážek kotvy jsou pro průměr

D (m)	0,15	0,2	0,3	0,5	0,7	1	1,5	2
Q	29	33	39	68	85	125	180	230

Počet pólů

$$2p = 4$$

Počet vodičů v drážce

$$n_d = \frac{4N_s}{Q} = \frac{4 \cdot 119,5}{54} = 8,8 \quad (12)$$

$n_d = 8,8$; zaokrouhleno na 8

Tím se změní počet závitů kotvy v sérii a obvodová proudová hustota

$$N_s = \frac{n_d Q}{4} = \frac{8 \cdot 54}{4} = 108 \quad (13)$$

$$A = \frac{2I_1 N_s}{\pi D} = \frac{2 \cdot 142 \cdot 108}{\pi \cdot 0,4} = 24,4 \cdot 10^3 \text{ A/m} \quad (14)$$

Je zvoleno tyčové vinutí

$$2a = 2$$

Počet cívkových stran

$$u = 4$$

Počet drážek na pól

$$Q_p = \frac{Q}{2p} = \frac{54}{4} = 13,5 \quad (15)$$

Počet lamel

$$K = uQ = 4 \cdot 54 = 216 \quad (16)$$

Střední lamelové napětí

$$E_1 = \frac{2pU}{K} = \frac{4 \cdot 600}{216} = 11,1 \text{ V} \quad (17)$$

Odpor kotvy

$$R_1 = \frac{P_{Cu1}}{I_1^2} = \frac{2130}{142^2} = 0,1056 \Omega \quad (18)$$

5. Drážkování rotoru

Kmitočet rotorového proudu

$$f = \frac{pn}{60} = \frac{2 \cdot 1000}{60} = 33,3 \text{ Hz} \quad (19)$$

Rozteč drážek v 1/3 od kořene zuby je při drážce hluboké 41 mm

$$t_{1/3} = \frac{\pi \left(D - \frac{4}{3} h \right)}{Q} = \frac{\pi \cdot \left(400 - \frac{4}{3} \cdot 41 \right)}{54} = 20,09 \text{ mm} \quad (20)$$

Indukce v 1/3 se zvolí $B_{1/3} = 2,2 \text{ T}$. Šířka zuby v 1/3

$$b_{z1/3} = t_3 \frac{B_\delta}{0,9 B_{1/3}} = 23,3 \cdot \frac{0,9}{0,9 \cdot 2,2} = 10,59 \text{ mm} \quad (21)$$

Možná šířka drážky

$$b = t_{1/3} - b_{z1/3} = 20,09 - 10,59 = 9,5 \text{ mm} \quad (22)$$

Zvoleno $b = 10 \text{ mm}$

Šířka drážky (mm):

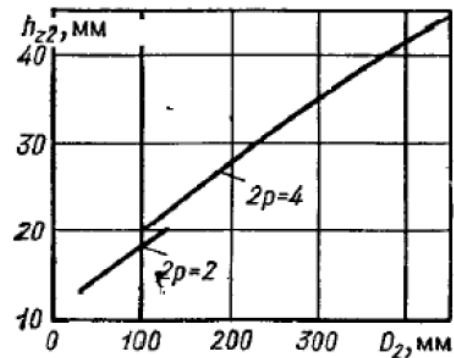
Izolace drážky	2 x 0,5	= 1
izolace vrstvy	2 x 0,3	= 0,6
izolace vodičů	4 x 0,4	= 1,6
vůle na šířku		= 0,5
celkem		= 3,7 mm

Na vodiče zbývá:

$$10 - 3,7 = 6,3 \text{ mm}$$

Zvoleny vodiče

$$1,2 \times 9,0 / 1,6 \times 9,4 \text{ mm}$$



Obr. 3 Střední hodnoty h_d

Hloubka drážky:

izolované vodiče	$4 \times 9,4 = 37,6$
izolace drážky	$2 \times 0,3 = 0,6$
izolace vrstvy	$4 \times 0,3 = 1,2$
vložka mezi vrstvy	$= 1$
klínek	$0,25 \times 10 + 1 = 3,5$
vůle na hloubku	$= 1,1$
celkem	$h = 45 \text{ mm}$

Průřez vodiče kotvy

$$S_1 = \frac{2\rho(L + l_c)N_s}{2aR_1} = \frac{2 \cdot 10^{-6} \cdot (0,22 + 0,45) \cdot 108}{48 \cdot 2 \cdot 0,1056} = 14,3 \text{ mm}^2 \quad (23)$$

6. Magnetický obvod

Elektromotorická síla

$$E = U - R_1 I_1 = 600 - 0,1056 \cdot 142 = 585 \text{ V} \quad (24)$$

Magnetický tok pólu

$$\Phi = \frac{E}{4fN_s} = \frac{585}{4 \cdot 33,3 \cdot 108} = 0,0407 \text{ Vs} \quad (25)$$

Rozeč drážek ve vzduchové mezeře

$$t_3 = \frac{\pi D}{Q} = \frac{\pi \cdot 0,4}{54} = 23,3 \text{ mm} \quad (26)$$

Carterův činitel pro vzduchovou mezeru

$$k_c = \frac{t_3}{t_3 + \delta - 0,75b} = \frac{23,3}{23,3 + 2,09 - 0,75 \cdot 10} = 1,3 \quad (27)$$

Magnetické napětí pro vzduchovou mezeru

$$U_\delta = 1,6 \cdot 10^6 \cdot B_\delta k_c \delta = 1,6 \cdot 10^6 \cdot 0,9 \cdot 1,3 \cdot 0,0021 = 3931 \text{ A} \quad (28)$$

Pro indukci $B_{jr} = 1,3 \text{ T}$ by měla být výška kostry

$$h_{jr} = \frac{\Phi}{2L_e \cdot 0,9B_{jr}} = \frac{0,0407}{2 \cdot 0,22 \cdot 0,9 \cdot 1,3} = 0,079 \text{ m} \quad (29)$$

Skutečná rozteč v 1/3

$$t_{1/3} = \frac{\pi \left(400 - \frac{4}{3} h \right)}{Q} = \frac{\pi \cdot \left(400 - \frac{4}{3} \cdot 45 \right)}{54} = 19,78 \text{ mm} \quad (30)$$

Šířka zubu v 1/3

$$b_{z1/3} = 19,78 - 10,59 = 9,19 \text{ mm} \quad (31)$$

Zdánlivá indukce v 1/3

$$B'_{1/3} = \frac{10,59}{9,19} \cdot 2 = 2,31 \text{ T} \quad (32)$$

Podle obr. 4 je skutečná indukce $B'_{1/3} = 2,18 \text{ T}$ a intenzita (při $k_z = 2$)

$$H_z = 45\,000 \text{ A/m}$$

Magnetické napětí pro zuby

$$U_z = 2hH_z = 2 \cdot 0,045 \cdot 45\,000 = 4050 \text{ A} \quad (33)$$

Délka indukční čáry v jádře rotoru

$$l_{jr} = \tau_p = 0,314 \text{ m} \quad (34)$$

Pro indukci $B_{jr} = 1,3 \text{ T}$ je intenzita $H_{jr} = 650 \text{ A/m}$

Magnetické napětí pro kostru

$$U_{jr} = l_{jr} H_{jr} = 0,314 \cdot 650 = 204,1 \text{ A} \quad (35)$$

Indukce v pólu se zvolí $B_p = 1,6 \text{ T}$. Tomu odpovídá intenzita $H_p = 3500 \text{ A/m}$.

$$\text{Délka indukční čáry v pólu } l_p = 0,5(D_e - D) = 0,5 \cdot (655 - 400) = 128 \text{ mm} \quad (36)$$

Vnitřní průměr kostry D_e se vypočte

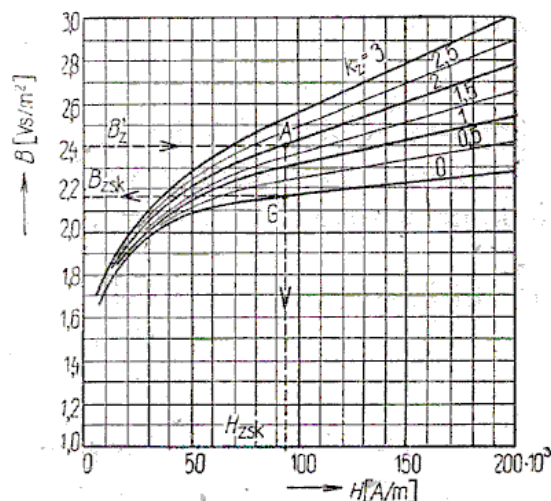
$$D_e = D + 2 \cdot (\delta + h_n + h_p) = 0,4 + 2 \cdot (0,0021 + 0,0314 + 0,0942) = 0,655 \text{ m} \quad (37)$$

$$h_p \cong 0,3\tau_p = 0,3 \cdot 0,314 = 0,0942 \quad (38)$$

$$h_n \cong 0,1\tau_p = 0,1 \cdot 0,314 = 0,0314$$

Magnetické napětí pro póly

$$U_p = 2l_p H_p = 2 \cdot 0,128 \cdot 3500 = 896 \text{ A} \quad (39)$$



Obr. 4 Magnetizační čáry pro zuby

Indukce v kostře se zvolí $B_{js} = 1,2$ T. Tomu odpovídá intenzita $H_{js} = 500$ A/m.

Délka indukční čáry v kostře

$$l_{js} = \frac{\pi D_e}{2p} = \frac{\pi \cdot 0,655}{4} = 0,51 \text{ m} \quad (40)$$

Magnetické napětí pro jho kostry

$$U_{js} = l_{js} H_{js} = 0,51 \cdot 500 = 255 \text{ A} \quad (41)$$

Zvětšení magnetomotorického napětí pro krytí reakce kotvy se odhadne na 5%.

Magnetomotorické napětí na pólovou dvojici

$$F_m = 1,05 \cdot (U_\delta + U_z + U_{jr} + U_p + U_{js}) = 1,05 \cdot (3931 + 4050 + 204 + 896 + 255) = 9803 \text{ A} \quad (42)$$

7. Vinutí pólů

Jedna cívka hlavního pólu bude mít závitů

$$N_c = \frac{F_m}{2I_1} = \frac{10160}{2 \cdot 142} = 34 \quad (43)$$

Výška profilu kostry

$$h_{js} = \frac{\Phi(1 + \nu)}{2B_{js}(L_p + b_p)} = \frac{0,0407 \cdot 1,25}{2 \cdot 1,2 \cdot (0,22 + 0,145)} = 0,058 \text{ m} \quad (44)$$

Ploušťka cívky se odhadne na $b_c = 40$ mm. Střední délka závitů cívky

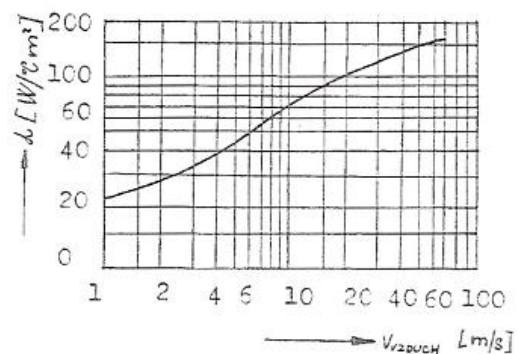
$$l_s = 2(L_p + b_p) + \pi b_c = 2 \cdot (0,22 + 0,145) + \pi \cdot 0,04 = 0,85 \text{ m} \quad (45)$$

Chladicí obvod cívky

$$l_c = 2(L_p + b_p) + 2\pi b_c = 2 \cdot (0,22 + 0,145) + 2 \cdot \pi \cdot 0,04 = 0,98 \text{ m} \quad (46)$$

Rychlost vzduchu mezi póly odhadnuta na 35 % obvodové rychlosti rotoru

$$v_v = 0,35 \cdot 20,9 = 7,3 \text{ m/s} \quad (47)$$



Obr. 5 Chladivost v proudícím vzduchu

Pro rychlost v_v je podle obr. 5 chladivost

$$\alpha_2 = 60 \text{ W / } ^\circ\text{Cm}^2$$

Oteplení povrchu cívky proti vzduchu se předpokládá $\Delta v_c = 60 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Pro předpokládané ztráty musí být chladicí výška cívky

$$h_c = \frac{P_{Cu2}}{2p\alpha_2 l_c \Delta v_c} = \frac{1364}{4 \cdot 60 \cdot 0,98 \cdot 60} = 0,097 \text{ m} \quad (48)$$

Chladicí povrch

$$S_c = l_c h_c = 0,98 \cdot 0,097 = 0,095 \text{ m}^2 \quad (49)$$

Při trvalém chodu a oteplení povrchu $\Delta v_c = 60 \text{ } ^\circ\text{C}$ mohou být v cívice ztráty

$$P_c = S_c \alpha_2 \Delta v_c = 0,095 \cdot 60 \cdot 60 = 342 \text{ W} \quad (50)$$

Možný odpor cívky

$$R_c = \frac{P_c}{I^2} = \frac{342}{142^2} = 0,0169 \Omega \quad (51)$$

Průřez vodiče cívky

$$S_2 = \frac{\rho l_s N_c}{R_c} = \frac{10^{-6} \cdot 0,85 \cdot 34}{48 \cdot 0,0169} = 36 \text{ mm}^2 \quad (52)$$

Zvolen vodič 4 x 9/4,5 x 9,5 izolovaný sklem

Výška cívky je 97 mm. Závity se vinou na plocho. Při šířce s vůlí 9 mm se vejde do polohy

$$\frac{97}{9,5} - 1 = 9 \text{ závitů} \quad (53)$$

Potřebný počet vrstev

$$\frac{36}{9} = 4 \quad (54)$$

Střední tloušťka cívky

$$b_c = 5 \cdot 4 = 20 \text{ mm, méně než předpokládáno} \quad (55)$$

Vzduchová mezera pod komutačním pólem

$$\delta_k = 0,025\tau_p = 0,025 \cdot 314 = 7,9\text{mm} \quad (56)$$

Magnetomotorické napětí

$$F_r = A\tau_p = 24400 \cdot 0,314 = 7662\text{A} \quad (57)$$

Magnetické napětí pro cestu železem se zanedbá.

Počet závitů komutační cívky

$$N_{ck} = \frac{F_r + U_{\delta k}}{2I_1} = \frac{7662 + 1176}{2 \cdot 142} = 32 \quad (58)$$

Vzduchová mezera se zvolí co nejmenší

$$\delta = 0,25 \cdot 10^{-6} \tau_p \frac{A}{B_\delta} = 0,25 \cdot 10^{-6} \cdot 314 \cdot \frac{24400}{0,9} = 2,13\text{mm} \quad (59)$$

Zvolena $\delta = 2,1$ mm

8. Kartáče a komutátor

Mezera mezi póly

$$(1 - \alpha)\tau_p = (1 - 0,65) \cdot 314 = 110\text{mm} \quad (60)$$

Lamelová rozteč převedená na obvod kotvy

$$t_1' = \frac{\pi D}{K} = \frac{\pi \cdot 400}{216} = 5,8\text{mm} \quad (61)$$

Krytí kartáčů $\beta = 2,5$; krok cívky 13/13,5

Šířka komutačního pásma

$$b_k = t_1' \left(\beta + u - \frac{a}{p} + \Delta y \right) = 5,8 \cdot \left(2,5 + 4 - \frac{1}{2} + \frac{0,5}{13,5} \right) = 35\text{mm} \quad (62)$$

Průměr komutátoru zvolen co největší se zřetelem na průtahové větrání

$$D_k = D - h = 0,4 - 0,045 = 0,355\text{m} \quad (63)$$

Rozteč lamel

$$t_1 = \frac{\pi D_k}{K} = \frac{\pi \cdot 355}{216} = 5,2\text{mm} \quad (64)$$

Lamela 4,4 mm, izolace 0,8 mm.

Šířka kartáče

$$b_u = \beta t_1 = 2,9 \cdot 4,4 = 12,75 \text{ mm} \quad (65)$$

Zvolen normální kartáč 12,5 x 32 mm. Ten má plochu

$$S_u = 400 \text{ mm}^2$$

Zatížení grafitických kartáčů se zvolí $\sigma_u = 0,1 \text{ A/mm}^2$.

Počet kartáčů na roubíku

$$N_u = \frac{I_1}{\sigma_u p S_u} = \frac{142}{0,1 \cdot 2 \cdot 400} = 1,8 \quad (66)$$

Zvoleny 2 kartáče na roubíku.

Délka komutátoru

$$L_k = (2 + 0,5) \cdot 32 + (2 - 1) \cdot 5 + 40 = 125 \text{ mm} \quad (67)$$

Komutátor není třeba kontrolovat na odstředivou sílu.

9. Komutace

Obvodová rychlost rotoru

$$v = \frac{\pi D n}{60} = \frac{\pi \cdot 0,4 \cdot 1000}{60} = 20,9 \text{ m/s} \quad (68)$$

Střední výška drážky nad vodiči

$$h_1 = 0,5 \cdot (24 + 5) = 14,5 \text{ mm} \quad (69)$$

Jednotková vodivost drážkového rozptylu

$$\lambda_d = \frac{c}{3b} + \frac{h_1}{b} = \frac{19}{3 \cdot 10} + \frac{14,5}{10} = 2,08 \quad (70)$$

Jednotková vodivost rozptylu mezi zuby

$$\lambda_z = \frac{t_3}{2\delta_k} = \frac{23,3}{2 \cdot 7,9} = 1,5 \quad (71)$$

Jednotková vodivost čel pro krok 13 drážek

$$\lambda_c = 0,48$$

Rozptylové číslo

$$\xi = \lambda_d + \lambda_z + \lambda_c \frac{l_c}{L_e} = 2,08 + 1,5 + 0,48 \cdot \frac{0,45}{0,22} = 4,56 \quad (72)$$

Střední hodnota reaktančního napětí

$$E_r = \frac{2I_1 N_c^2 v}{b_k} \cdot \frac{p}{a} \mu \xi L_e = \frac{2 \cdot 142 \cdot 2^2 \cdot 20,9}{0,035} \cdot \frac{2}{1} \cdot 0,4\pi \cdot 10^{-6} \cdot 4,56 \cdot 0,22 = 1,71V \quad (73)$$

Indukce pod komutačním pólem

$$B_{\delta k} = \frac{E_r}{2N_c v L_e} = \frac{1,71}{2 \cdot 2 \cdot 20,9 \cdot 0,22} = 0,093T \quad (74)$$

Magnetické napětí pro komutační mezeru

$$U_{\delta k} = 1,6 \cdot 10^6 B_{\delta k} \delta_k = 1,6 \cdot 10^6 \cdot 0,093 \cdot 0,0079 = 1176A \quad (75)$$

Magnetický tok komutačního pólu

$$\Phi_k = b_k L_{kp} B_{\delta k} = 0,035 \cdot 0,22 \cdot 0,093 = 7,2 \cdot 10^{-4} Vs \quad (76)$$

Rozptyl komutačního pólu odhadnut na 300%. Indukce v pólu $B_{kp} = 1,2$ T.

Šířka průřezu pólu

$$b_{kp} = \frac{\Phi_k (1 + v_k)}{L_{kp} B_{kp}} = \frac{7,2 \cdot 10^{-4} \cdot (1 + 3)}{0,22 \cdot 1,2} = 0,01 \text{ m} \quad (77)$$

Se zřetelem na pevnost a přechod toku do kostry se zvolí

$$b_{kp} = 30 \text{ mm}$$

Komutační pól má stejný proud jako hlavní pól, proto zvolen stejný vodič

$$4 \times 9/4,5 \times 9,5$$

Ztráty jsou menší v poměru počtu závitů, a proto se v tomto poměru může zmenšit výška cívky

$$h_k = h \frac{N_{ck}}{N_c} = 97 \cdot \frac{32}{34} = 91 \text{ mm} \quad (78)$$

$$\frac{91}{9,5} - 1 = 8 \text{ závitů} \quad (79)$$

Jsou třeba 4 vrstvy. Tloušťka cívky

$$b_{ck} = 5 \cdot 4 = 20 \text{ mm} \quad (80)$$

Odpor kotvy

$$R_1 = \frac{2\rho(L + l_\xi)N_s}{2aS_1} = \frac{2 \cdot 10^{-6} \cdot (0,22 + 0,45) \cdot 108}{48 \cdot 2 \cdot 1,2 \cdot 9 \cdot 10^{-6}} = 0,140 \Omega \quad (81)$$

Odpor cívky hlavního pólu

$$R_c = \frac{\rho l_s N_c}{S_2} = \frac{10^{-6} \cdot 0,85 \cdot 34}{48 \cdot 36 \cdot 10^{-6}} = 0,017 \Omega \quad (82)$$

Střední délka závitu komutačního pólu

$$l_{sk} = 2(L_{kp} + b_{kp}) + \pi b_{ck} = 2 \cdot (0,22 + 0,03) + \pi \cdot 0,02 = 0,56 \text{ m} \quad (83)$$

Odpor komutační cívky

$$R_{kp} = \frac{\rho l_{sk} N_{ck}}{S_2} = \frac{10^{-6} \cdot 0,56 \cdot 32}{48 \cdot 36 \cdot 10^{-6}} = 0,0104 \Omega \quad (84)$$

10. Ztráty a účinnost

Ztráty v mědi kotvy

$$P_{Cu1} = R_1 I_1^2 = 0,140 \cdot 142^2 = 2823 \text{ W} \quad (85)$$

Ztráty v hlavních pólech

$$P_{Cu2} = 2pR_c I_1^2 = 4 \cdot 0,017 \cdot 142^2 = 1370 \text{ W} \quad (86)$$

Ztráty v komutačních pólech

$$P_{kp} = 2pR_{kp}I_1^2 = 4 \cdot 0,0104 \cdot 142^2 = 838W \quad (87)$$

Hmotnost zubů kotvy

$$G_z = Qhb_{zs} \cdot 0,9L_e\gamma = 54 \cdot 0,045 \cdot 0,0109 \cdot 0,9 \cdot 0,22 \cdot 7700 = 40,4kg \quad (88)$$

Hmotnost jha kotvy

$$G_{jr} = \pi D_s h_{jr} \cdot 0,9L_e\gamma = \pi \cdot 0,231 \cdot 0,079 \cdot 0,9 \cdot 0,22 \cdot 7700 = 87,4kg \quad (89)$$

Střední indukce v zubech $B_{zs} = 2,18$ T, ve jhu $B_{jr} = 1,3$ T. Plechy se ztrátovým číslem 2,6 W/kg mají ztráty

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

$$40,4 \cdot 2,18^2 \left[1,2 \cdot 1,5 \frac{33,3}{50} + 3 \cdot 1,1 \left(\frac{33,3}{50} \right)^2 \right] + 87,4 \cdot 1,3^2 \left[2 \cdot 1,5 \frac{33,3}{50} + 2,3 \cdot 1,1 \left(\frac{33,3}{50} \right)^2 \right] = 972W \quad (90)$$

Obvodová rychlost komutátoru

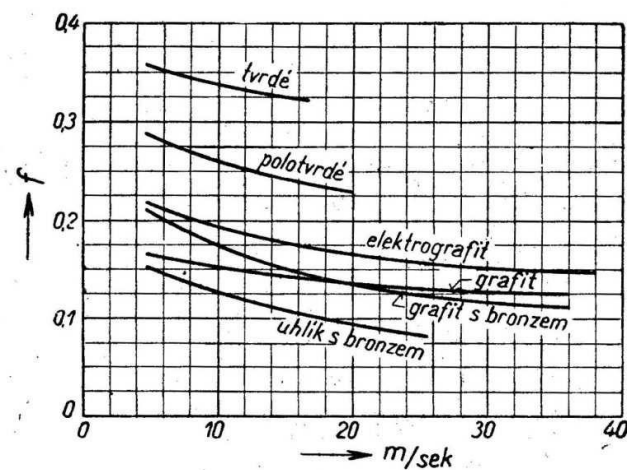
$$v_k = \frac{\pi D_k n}{60} = \frac{\pi \cdot 0,355 \cdot 1000}{60} = 18,6m/s \quad (91)$$

Tlak na kartáče zvolen

$$p = 0,4 \text{ kg/cm}^2.$$

Koeficient tření podle obr. 6

$$f = 0,17.$$

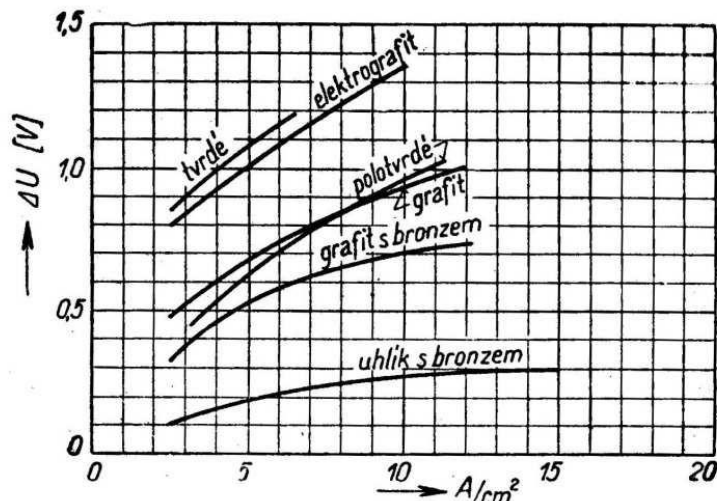


Obr. 6 Koeficient tření kartáčů na komutátoru podle Humburga

Ztráty třením kartáčů

$$P_{tk} = 9,81fpv_k \sum S_k = 9,81 \cdot 0,17 \cdot 0,4 \cdot 18,6 \cdot 4 \cdot 2 \cdot 1,25 \cdot 3,2 = 397W \quad (92)$$

Úbytek na přechodu podle
obr. 7 $\Delta U = 1,35V$



Ztráty přechodem

Obr. 7 Úbytek napětí na kartáčích podle Humburga

$$P_{\Delta} = 2\Delta UI_1 = 2 \cdot 1,35 \cdot 142 = 383W \quad (93)$$

Mechanické ztráty podle typového výkonu 75kW

$$P_m = 4P^{0,9}n^{0,25} = 4 \cdot 75^{0,9} \cdot 1000^{0,25} = 1100W \quad (94)$$

Přídavné ztráty odhadnuty na 1%.

$$P_d = 750W$$

Celkové ztráty v [%].

$$P_z = \frac{P_{Cu1} + P_{Cu2} + P_{kp} + P_{Fe} + P_{tk} + P_{\Delta} + P_m + P_d}{P + \sum P_z} \cdot 100 =$$

$$= \frac{2823 + 1370 + 838 + 972 + 397 + 383 + 1100 + 750}{75000 + 8633} \cdot 100 = 10,3\% \quad (95)$$

Účinnost

$$\eta = 100 - 10,3 = 89,7\% \quad (96)$$

11. Tepelný výpočet

Objem plechů

$$V_1 = \frac{G_z + G_{jr}}{\gamma_{Fe}} = \frac{40,4 + 87,4}{7700} = 0,017m^3 \quad (97)$$

Chladicí plášť plechů je polovina pláště nepřekrytá póly.

$$S_e = 0,5 \cdot \pi \cdot D \cdot L_e = 0,5 \cdot \pi \cdot 0,4 \cdot 0,22 = 0,138\text{m}^2 \quad (98)$$

Pro obvodovou rychlost $v = 20,9$ m/s je podle obr. 5 chladivost $\alpha_e = 110\text{W}/^\circ\text{Cm}^2$.
60% vnitřního pláště nezakrytého žebry má povrch

$$S_v = 0,6 \cdot \pi D_i L_e = 0,6 \cdot \pi \cdot 0,152 \cdot 0,22 = 0,063\text{m}^2 \quad (99)$$

Postranní chladicí plochy svazků plechů (8 stěn)

$$S_k = 8 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (0,355^2 - 0,152^2) = 0,65\text{m}^2 \quad (100)$$

Celková vnitřní plocha

$$S_i = S_v + S_k = 0,063 + 0,65 = 0,71\text{m}^2 \quad (101)$$

Chladivost v kanálech pro 10% rychlosti tedy pro 2,1 m/s

$$\alpha_i = 30\text{W}/^\circ\text{Cm}^2$$

Oteplení železa

$$\Delta\theta_{\text{Fe}} = \frac{P_{\text{Fe}} + R_{\text{id}}}{\alpha_e S_e + \alpha_i S_i} + \Delta\theta_v = \frac{972 + 0,046}{110 \cdot 0,138 + 30 \cdot 0,71} + 12 = 38,6^\circ\text{C} \quad (102)$$

$$R_{\text{id}} = \frac{R_1}{L + l_c} \cdot L = \frac{0,140}{0,22 + 0,45} \cdot 0,22 = 0,046 \quad (103)$$

Rychlost vzduchu okolo čel vinutí odhadnuta na 20% v , tedy na 4 m/s. Chladivost podle obr. 5 $\alpha_c = 41\text{W}/^\circ\text{Cm}^2$. Čela mají izolaci 1 mm s vodivostí $0,24\text{W}/^\circ\text{Cm}$.

Střední chladivost čel

$$\alpha_{\text{nc}} = \frac{\alpha_c \lambda_i}{\lambda_i + \alpha_c l_i} = \frac{41 \cdot 0,24}{0,24 + 41 \cdot 0,001} = 35\text{W}/^\circ\text{Cm}^2 \quad (104)$$

Chladicí povrch čel vinutí je 50% celkového povrchu 216 čel.

$$S_c = 0,5 \cdot 2 \cdot l_c \cdot 0,042 \cdot 216 = 0,5 \cdot 2 \cdot 0,45 \cdot 0,042 \cdot 216 = 4,1\text{m}^2 \quad (105)$$

Předpokládá se, že čela odvedou všechny ztráty v mědi. Oteplení mědi

$$\Delta\theta_{\text{Cu1}} = \frac{P_{\text{Cu1}}}{S_c \alpha_{\text{nc}}} + \Delta\theta_v = \frac{2823}{4 \cdot 35} + 12 = 33,6^\circ\text{C} \quad (106)$$

Zde je rezerva pro eventuální horší chlazení čel.

Chladicí povrch komutátoru

$$S_k = \pi D_k L_k = \pi \cdot 0,355 \cdot 0,125 = 0,139 \text{m}^2 \quad (107)$$

Chladivost komutátoru

$$\alpha_k = 40(1 + 0,7\sqrt{v_k}) = 40 \cdot (1 + 0,7\sqrt{18,6}) = 161 \text{W} / ^\circ\text{Cm}^2 \quad (108)$$

Vzduch přichází na komutátor studený. $\Delta\vartheta_v = 4 ^\circ\text{C}$.

Oteplení komutátoru

$$\Delta\vartheta_k = \frac{P_{ik} + P_\Delta}{\alpha_k S_k} + \Delta\vartheta_v = \frac{397 + 383}{161 \cdot 0,139} + 4 = 39^\circ\text{C} \quad (109)$$

Závěr

Ve své diplomové práci jsem provedl návrh stejnosměrného stroje se sériovým buzením dle zadaných parametrů. Vypočetl jsem, že účinnost stroje je 89,7 %.

Výpočtem jsem stanovil počet vodičů v drážce $n_d = 8,8$. Tuto hodnotu jsem zaokrouhlil na číslo 8, neboť z konstrukčních důvodů musela být tato hodnota upravena na sudé číslo. Tímto zaokrouhlením se částečně snížila obvodová proudová hustota A , která byla původně odečtena z grafu.

U oteplení železa a vinutí byly vypočteny nízké hodnoty, což mohlo být způsobeno vysokými činiteli přestupu tepla, malým využitím stroje nebo zjednodušeným výpočtem. Pokud by při podrobnějším výpočtu byly tyto hodnoty opět nízké, řešil bych toto větším využitím stroje.

V poslední části této práce jsem nakreslil v programu AutoCAD podélný a příčný řez navrhovaného stroje. V této práci jsem si ověřil své znalosti, kterých jsem dosáhl v průběhu studia.

Použitá literatura

I. LITERATURA

- [1] CIGÁNEK L.: *Stavba elektrických strojů*, SNTL – Nakladatelství technické literatury, Praha 1958. 714 s.
- [2] ČERVENÝ J.: *Konstrukční tabulky*, ZČU Plzeň, 2010. 20 s.
- [3] DON D.: *Návrh stejnosměrného stroje se sériovým buzením*, diplomová práce, ZČU Plzeň, 2011. 41 s.
- [4] KOPYLOV I. P. A KOL.: *Stavba elektrických strojů*, SNTL – Nakladatelství technické literatury, Praha 1988. 685 s. ISBN 04-532-88
- [5] POLIAK F., FEDÁK V., ZBORAY L.: *Elektrické pohony*, SNTL – Alfa, Praha 1987. 614 s. ISBN 063-568-87

II. INTERNET

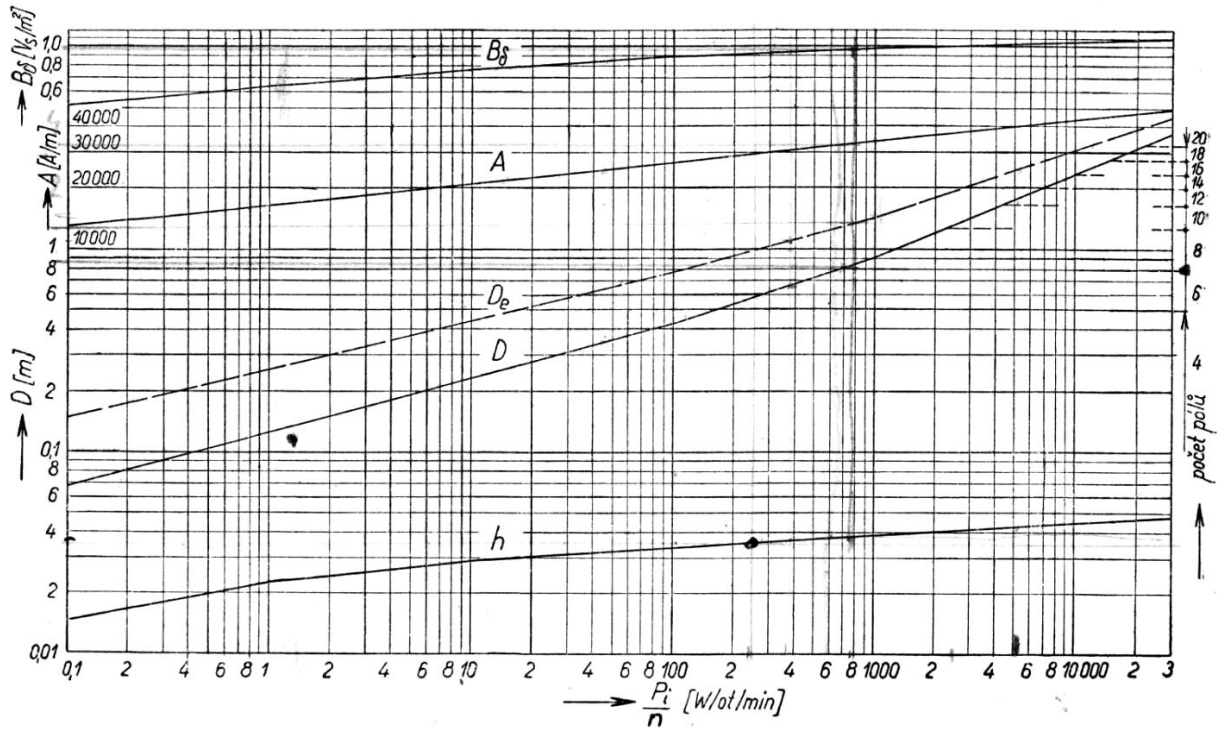
- [5] http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/hgf/elektrotechnika/sylab_stejnosermerne_stroje_bc.pdf

Seznam příloh

- [1] Rozměry a využití stejnosměrných strojů
- [2] Rozměry měděných pásů
- [3] Tabulka doporučených rozměrů kartáčů
- [4] Podélný řez stroje
- [5] Příčný řez stroje

Příloha č. 1

Rozměry a využití stejnosměrných strojů

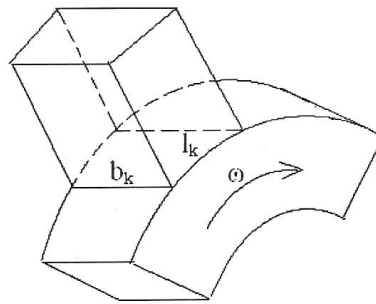


Příloha č. 3

Tabulka doporučených rozměrů kartáčů

Doporučené rozměry kartáčů

[mm]	Rozměr ve směru osy b_k									
	10	12,5	16	20	25	32	40	50	64	80
Tečný směr l_k	4	4	5	5	5	5	5	25	12,5	40
		5	6,3	6,3	6,3	6,3	6,3	40	20	
		6,3	8	8	8	8	8	50	25	
				10	10	10	10		32	
					12,5	12,5	12,5		50	
					16	16	16			
					20	20	20			
						25	25			
						32	32			
							40			

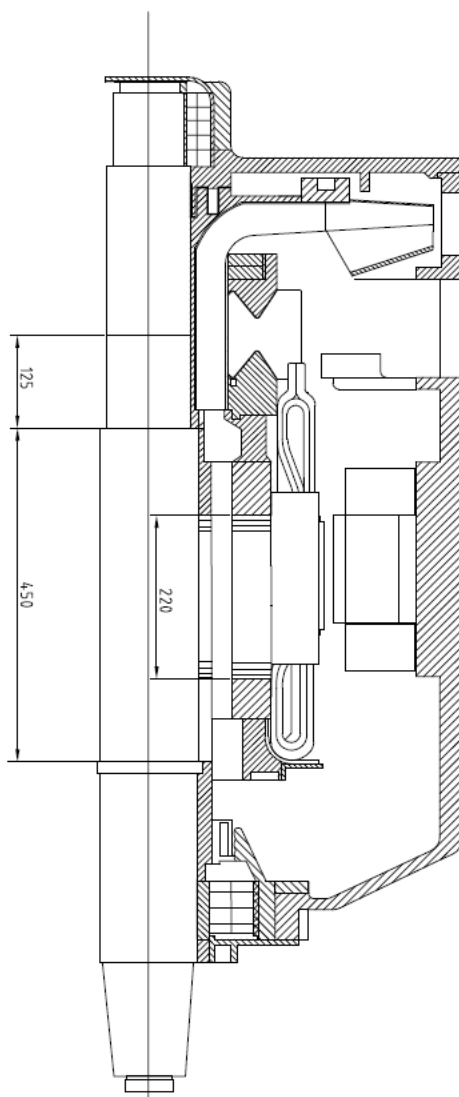


Kartáče pro kroužky – vlastnosti

Materiál	Označení	Proudová hustota [A/cm ²]	Max. obvodová rychlost [m/s]	Měrný tlak [kPa]	Celkový úbytek napětí [V]
Grafit	RGE	8	75	14	3,8
Elektrografit	EK24	10	40	18	2,1
Kovografit	K11	18	20	22	0,5
	K31	15	25	22	1,1
	K75	12	30	20	1,4
	O67	16	30	20	1,9
	MG 440	18	20	20	0,5

Příloha č. 4

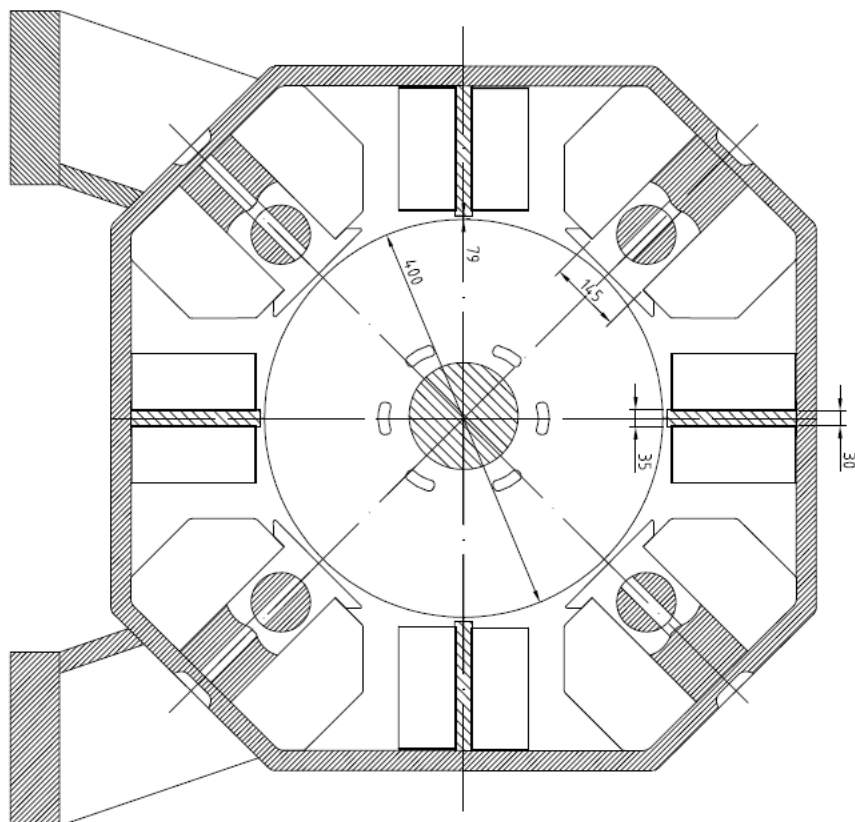
Podélný řez stroje



Diplomová práce		ZČU/FEL/KEE	
Typ: Podélný řez			
Název: Návrh stejnosměrného stroje se sériovým buzením	Měřítko: 1:10	Kreslil: Bc. Radek Švec	
Číslo výkresu: DP\EI0N0019K\101	Fotomátna:	Šel: Doc. Ing. Josef Červený CSc.	

Příloha č. 5

Příčný řez stroje



Diplomová práce	ZČU/FEL/KEE	
Typ: Příčný řez		
Název: Návrh stejnosměrného stroje se sériovým buzením	Měřítko: 1:10	Kreštil: Bc. Radek Švec
Číslo výkresu: DP\E\00019K\02	Poznámka:	Schválil: Doc. Ing. Josef Kemrný, CSc.