

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE

DIPLOMOVÁ PRÁCE
Návrh stejnosměrného stroje s cizím buzením

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jiří KUBÁT**
Osobní číslo: **E14N0015K**
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 s cizím buzením o parametrech: $P=20\text{kW}$, $U=220\text{V}$, $n=1400\text{ ot/min}$, kompenzační vinutí, IP23, IM1001, IC01.
2. Proveďte elektromagnetický návrh stroje.
3. Nakreslete konstrukční uspořádání stroje v podélné a příčné poloze.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah kvalifikační práce: **40 - 60 stran**

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. **I. P. Kopylov : Stavba elektrických strojů, SNTL, 1988**
2. **L. Cigánek, : Stavba elektrických strojů, SNTL, 1958**
3. **J. Červený : 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

Abstrakt

Návrh stejnosměrného stroje s cizím buzením.

Předkládaná diplomová práce se zabývá návrhem stejnosměrného stroje s cizím buzením, výkon stroje je 20 kW. Hlavním úkolem bylo vypracování elektromagnetického návrhu podle zadaných parametrů a nakreslit schematicky příčný a podélný řez stroje.

Klíčová slova

stejnospěrný stroj, cizí buzení, elektromagnetický návrh, budící vinutí, kostra, kotva, komutátor, hlavní pól, drážka

Abstract

Proposal of DC machine with separate excitation.

The submitted thesis deals with design of DC machines with separate excitation, The machine output is 20 kW. The main task was to develop a proposal of the electromagnetic according to specified parameters and draw a schematic cross and longitudinal section of the machine.

Key words

DC machine, separate excitation, electromagnetic design, exciter windings, stator, rotor, commutator, main pole, groove

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou/bakalářskou 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 bakalářské/diplomové práce, je legální.

.....

podpis

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Doc. Ing. Josefovi Červenému, CSc. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

Obsah	7
Úvod.....	8
Seznam symbolů	10
1. Návrh stejnosměrného stroje	13
1.1 Zadané parametry	13
1.2 Návrh rozměrů stroje a dalších parametrů stroje	13
1.3 Výpočet vinutí kotvy	15
1.4 Výpočet drážky kotvy a zubů kotvy	18
1.5 Stanovení rozměrů magnetického obvodu.....	20
1.6 Magnetická napětí v jednotlivých částech	21
1.7 Výpočet budícího vinutí hlavního pólu	22
1.8 Výpočet komutačních pólů	24
1.9 Výpočet komutátoru	25
1.10 Ztráty a účinnost	26
1.11 Charakteristika naprázdno	28
1.12 Shrnutí základních rozměrů	30
Závěr	31
Použitá literatura	32
Přílohy.....	33
P - 1 - <i>Rozměry a průřezy měděných a hliníkových vodičů</i>	33
P - 2 - <i>Rozměry drážek pro vinutí</i>	34
P - 3 - <i>Měděné izolované dráty pro vinutí podle ČSN 3473</i>	35
P - 4 - <i>Rozměry kartáčů</i>	37
P - 5 - <i>Drážka N - rozměry a klín drážky - rozměry</i>	39
P - 6 - <i>Rozměry hlavního pólu</i>	39
P - 7 - <i>Příčný řez stroje</i>	40
P - 8 - <i>Podélný řez stroje</i>	41
P - 9 - <i>Monogram k určení skutečné indukce v zubech induktu</i>	42
P - 10 - <i>Magnetizační charakteristika plechu 0,5 mm</i>	43
P - 11 - <i>Tabulka výpočtu charakteristiky naprázdno</i>	44
P - 12 - <i>Charakteristika naprázdno</i>	45

Úvod

Předmětem této diplomové práce je provést elektromagnetický návrh stejnosměrného stroje s cizím buzením a nakreslit příčný a podélný řez stroje. Práce je rozdělena do dvou částí v první části je proveden elektromagnetický návrh stroje podle zadaných parametrů a v druhé části je nakreslen příčný a podélný řez stroje.

Stejnospměrný stroj patří k historicky nejstarším točivým elektrickým strojům, jehož vynálezce byl v roce 1821 M. Faraday, ale v jeho době bylo výhodnější používat parní stroje, protože ke své funkci nepotřebovali drahé baterie, které byli jediným zdrojem elektrické energie v tehdejší době. V dnešní době jsou stejnosměrné stroje nahrazovány asynchronními motory, ale pořád existují oblasti, kde je stejnosměrný stroj nenahraditelný pro svoji přizpůsobivost výrobním nárokům současného průmyslu a automatizace. Využití stejnosměrného stroje je zejména v trakcích a servopohonech.

Stejnospměrný stroj může pracovat jako generátor stejnosměrného napětí, ale v dnešní době se používá zejména jako motor.

Konstrukce

Stejnospměrný stroj se skládá ze statoru, rotoru a komutátoru. Na statoru (kostře) se nachází hlavní póly, které vytváří magnetický tok, tento tok může být vytvořen průchodem proudu ve vinutí hlavního pólu nebo permanentními magnety. Hlavní pól se skládá z pólového jádra a pólového nástavce, v případě motorů o větších výkonech mohou být na statoru ještě pomocné póly, které kompenzují a demagnetizují účinek magnetického napětí reakce kotvy a kompenzují reaktanční napětí, které se indukuje v komutující cívce. Rotor (kotva) se skládá z izolovaných křemíkových plechů a v drážkách rotoru je umístěno vinutí. Jednotlivé cívky vinutí kotvy jsou propojeny k měděným lamelám komutátoru, které jsou vzájemně odizolovány. Komutátor se nachází na hřídeli stroje a na jeho lamely dosedají uhlíkové kartáče umístěné v odizolovaných drážkách, kterými se přivádí proud do vinutí kotvy. Komutátor, držáky kartáčů a samotné kartáče tvoří sběrné ústrojí stroje.

Princip

Na hlavní pól, kde je budící vinutí přivedeme stejnosměrný proud a vytvoříme magnetické pole nebo hlavní pól můžou tvořit permanentní magnety. Na kotvu se přes kartáče komutátoru přivede proud, který vytváří magnetické pole kotvy. Vzájemným působením magnetického pole kostry a kotvy se začne rotor otáčet. Komutátor zajišťuje, že proud při každém pootočení rotoru změní svoji polaritu ve vodiči, to má za následek, že se motor po pootočení nezastaví.

Dělení stejnosměrných strojů podle buzení

- Stroje se sériovým buzením - budící vinutí hlavního pólu je zapojeno do série s kotvou.
- Stroje s derivačním buzením - budící vinutí hlavního pólu je zapojeno paralelně ke kotvě.
- Stroje s cizím buzením - budící vinutí hlavního pólu je napájeno z nezávislého stejnosměrného zdroje nebo je použit jako hlavní pól permanentní magnet.
- Stroje s kompaundním buzením - na hlavních pólech je budící vinutí sériové i derivační.

Motory s cizím buzením

Při spuštění připojíme nejdříve na budící vinutí zdroj napětí a nastavíme příslušný budící proud, dále pak připojíme zdroj napětí na vinutí rotoru. V tomto okamžiku nastává velký proudový ráz a musíme omezit velikost záběru proudu, tu omezíme spuštěním motoru rezistorem zapojeným sériově k vinutí rotoru, nebo snížením napětí rotorového zdroje. Brzdění stejnosměrného stroje s cizím buzením se provádí odporem, rekuperací nebo reverzací. Použití stejnosměrných strojů s cizím buzením je v automobilovém průmyslu, v pohonech obráběcích strojů, v elektromobilech, ve válcovacích stolicích, v těžních strojích a podobně.

Seznam symbolů

$2p$ [-]		počet pólů
a [-]		Počet dvojic paralelních větví
A [A/m]		Odporová proudová hustota
a [m];[mm]	-u	Rozměr kartáče
b [m];[mm]		Šířka drážky
	-c	Tloušťka cívky
	-K	Šířka jednoho ventilačního kanálu
	-p	Šířka hlavního pólu
	-pn	Šířka pólového nástavce hlavního pólu
	-u	Rozměr kartáče
	-z1/3	Šířka zubu v 1/3 drážky
	-z1/3	Skutečná šířka zubu v 1/3 drážky
	-zs	Střední šířka zubu
B [T]		Magnetická indukce
	-jr	Indukce ve jhu rotoru
	-js	Indukce ve jhu kostry
	-p	Indukce v hlavním pólu
	-z	Indukce v zubu
	-z	Indukce v zubu
	-z1/3	Skutečná indukce v 1/3 zubu
	- δ	Magnetická indukce ve vzduchové mezeře
C [W.min/m ³ .ot]		Essonův činitel
D [m];[mm]		Vnější průměr kotvy
	-e	Vnější průměr kostry
	-i	Vnitřní průměr plechů kotvy
	-ie	Vnitřní průměr kostry
	-k	Průměr komutátoru
E [V]	-	Elektromagnetická síla
	-1	Střední lamelové napětí
F [A]	-m	Magnetomotorická síla na dvojpólí
f [Hz]		Frekvence proudu v rotoru
G [kg]	-jr	Hmotnost jha kotvy
	-z	Hmotnost zubu kotvy
H [A/m]	-jr	Intenzita jha rotoru
	-js	Intenzita ve jhu kostry
	-p	Intenzita v hlavním pólu
	-z	Intenzita v zubu
h [m];[mm]	-	Hloubka drážky
	-c	Výška chladičí cívky
	-jr	Výška jha kotvy
	-js	Výška jha kostry
	-p	Výška hlavního pólu
	-pn	Výška jednoho pólového nástavce

I [A]	-1	Proud v kotvě	
	-2	Budící proud	
k [-]	-c	Carterův činitel pro vzduchovou mezeru	
	-Fe	koeficient plnění železa	
	-z	Indukční činitel	
K [-]		Počet lamel komutátoru	
l [m];[mm]	-c	Délka čela tyčového vinutí	
	-c	Chladicí obvod cívky	
	-i	Ideální délka kotvy	
	-jr	Délka indukční čáry ve jhu rotoru	
	-js	Délka indukční čáry ve jhu kostry	
	-p	Přibližná délka indukční čáry v pólu	
	-s	Střední délka závitů	
L [m];[mm]	-	Celková délka železa (rotorového svazku)	
	-e	Efektivní délka kotvy (železa)	
	-k	Délka komutátoru	
	-p	Délka hlavního pólu	
n [-]	-d	Počet vodičů v drážce	
	-K	Počet ventilačních kanálů	
N [-]	-c	Počet závitů jedné cívky hlavního pólu	
	-s	Počet závitů v sérii	
	-u	Počet kartáčů na roubíku	
	-v	Počet vrstev cívky	
n [ot/min]		Otáčky	
P [kW];[W]		Výkon stroje	
	-c	Ztráty v cívce	
	-Cu1	Ztráty v mědi kotvy	
	-Cu2	Ztráty v mědi magnetů	
	-d	Přídavné ztráty	
	-Fe	Ztráty v železe	
	-i	Vnitřní výkon stroje	
	-m	Mechanické ztráty	
	-tk	Ztráty třením kartáčů	
	-z	Celkové ztráty	
	-Δ	Ztráty přechodem	
	Q [-]		Počet drážek
		-p	Počet drážek na pól
R [Ω]	-1	Odpor vinutí kotvy	
	-c	Odpor cívky	
S [m];[mm]	-P	Šířka jednoho svazku	
S [m ²];[mm ²]	-2	Průřez vodiče budící cívky	
	-c	Chladicí povrch	
	-Cu	Průřez vodiče	
	-u	Šířka kartáče	

t [m];[mm]	-1	Rozteč lamel komutátoru
	-1/3	Rozteč v 1/3 od kořene
	-3	Rozteč drážek ve vzduchové mezeře
u [-]		Počet cívkových stran
U [A]	-jr	Magnetické napětí pro jho rotoru
	-js	Magnetické napětí pro jho kosrty
	-p	Magnetické napětí pro póly
	-z	Magnetické napětí pro zuby
	-δ	Magnetické napětí pro vzduchovou mezeru
U [V]		Napětí
v [m/s]	-	Obvodová rychlost rotoru
	-k	Obvodová rychlost komutátoru
	-v	Rychlost vzduchu
y [-]	-c	Cívkový krok
	-d1	Drážkový krok
	-k	Krok cívky komutátoru
	-z	Zpětný krok
α [W/°C.m ²]	-2	Chladivost
α [-]	-δ	Činitel pólového krytí
β [-]		Krytí uhlíku
γ [kg/m ³]		Hustota oceli
δ [m];[mm]		Vzduchová mezera
Δv [°C]	-c	Oteplení
η [%]		Účinnost stroje
κ [-]		Pistoyovo kritérium
λ [-]		Poměr délky kotvy k jejímu průměru
ν [%]		Rozptyl hlavního pólu
τ [m];[mm]	-p	Pólová rozteč
Φ [Wb]		Magnetický pól jednoho pólu

1. Návrh stejnosměrného stroje

1.1 Zadané parametry

$P=20$ [kW]	Výkon stroje
$U=220$ [V]	Napětí
$n=1400$ [ot/min]	Otáčky
kompenzační vinutí, IP23, IM1001, IC01	

1.2 Návrh rozměrů stroje a dalších parametrů stroje

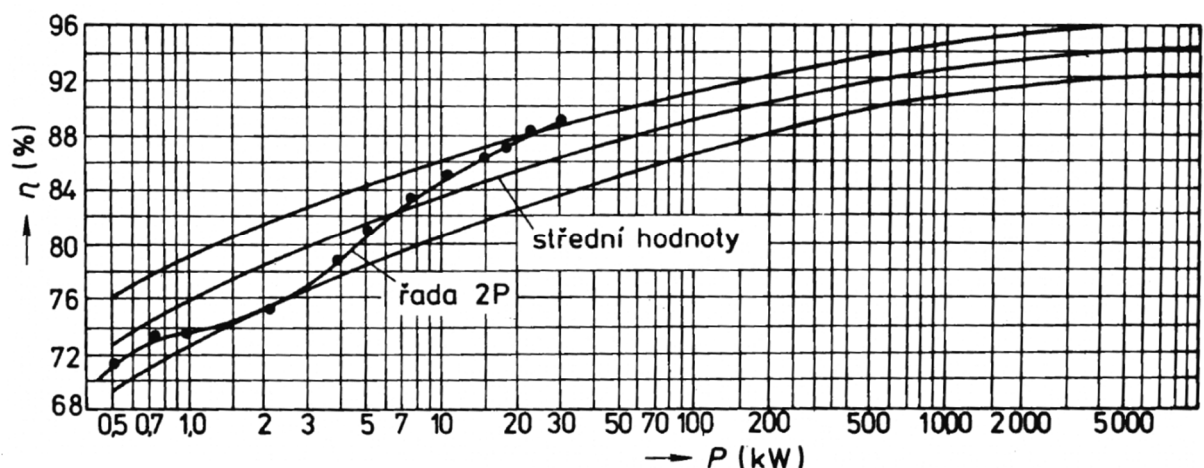
Při návrhu elektrických strojů je nutné brát v úvahu velké množství faktorů. Ve většině případů navrhování je použita výpočtová metodika, která vychází ze součinitele využití stroje (tzv. strojové konstanty), tento součinitel je určován z přípustných elektromagnetických zatížení.

Essonův činitel = strojová konstanta

$$C = \frac{\pi^2}{60} AB_{\delta} \alpha_{\delta} = \frac{\pi^2}{60} \cdot 22000 \cdot 0,8 \cdot 0,65 = 1881,8 [W \cdot \text{min}/m^3 \cdot \text{ot}] \quad (1)$$

Dalšími faktory, které mohou ovlivnit konstantu C je elektromagnetické zatížení, napětí, typ izolace, způsob chlazení, cena materiálu, spolehlivost stroje, hlavní a provozní ztráty atd.

Při návrhu stejnosměrného stroje potřebujeme zjistit jeho hlavní rozměry, kterými jsou vnější průměr kotvy D a efektivní délka kotvy l . Předpokládanou účinnost zjistíme z grafu Obr 1. 1, kterou odečteme pro $P=20$ [kW]. Odečtená hodnota účinnosti $\eta=85,5$ [%]. Dalším krokem je stanovit vnitřní výkon kotvy na otáčku.



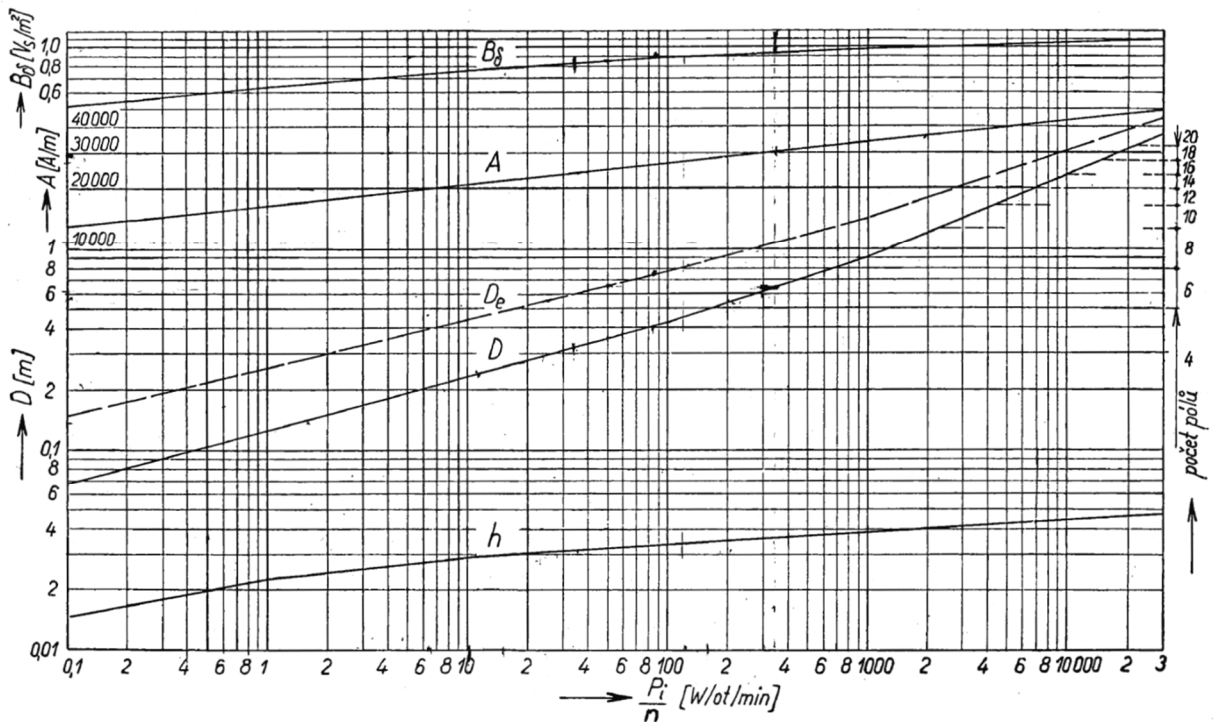
Obr 1. 1 - Závislost účinnosti η na jmenovitém výkonu - viz.[1], Obr. 8.6, str. 452

Vnitřní výkon kotvy na otáčku

$$\frac{P_i}{n} = \frac{P_N}{\eta_n} = \frac{20000}{0,855 \cdot 1400} = 16,708 \text{ [W/ot/min]} \quad (2)$$

Následující hodnoty byly odečteny z grafu na Obr 1. 2 pro hodnotu vnitřního výkonu na otáčku $P_i/n=16,708$ [W/ot/min].

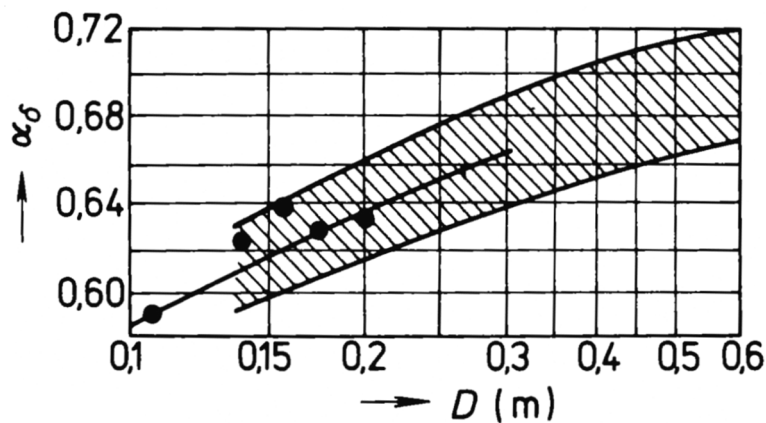
Vnější průměr kotvy	D=0,26 [m]
Vnitřní průměr kostry	D_e=0,5 [m]
Indukce ve vzduchové mezeře	B_δ=0,8 [T]
Obvodová proudová hustota	A=22000 [A/m]



Obr 1. 2 - Rozměry a využití stejnosměrných strojů - viz.[2], Obr. 765., str. 591

Činitel pólového krytí podle odečteme z grafu na

Obr 1. 3, $\alpha_\delta=0,65$ pro $D=0,26$ [m]



Obr 1. 3 - Závislost činitele pólového krytí $\alpha_\delta = f(D)$ - viz.[1], Obr. 8.7, str. 453

Vnitřní výkon

$$P_i = \frac{P}{\eta n} = \frac{20000}{0,855 \cdot 1400} \cdot 1400 = 23391,813 \text{ [W]} \quad (3)$$

Ideální délka kotvy

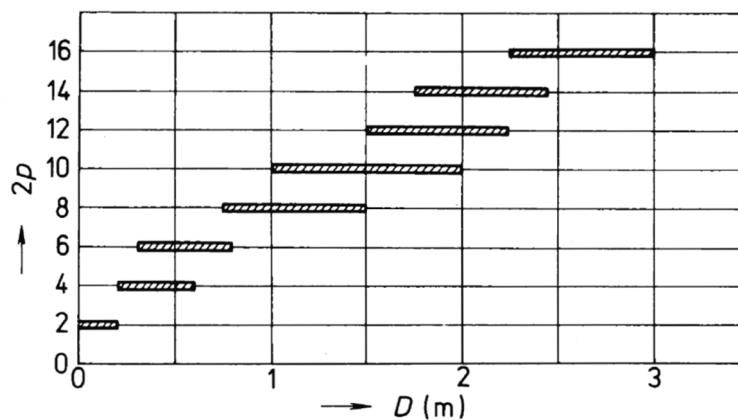
$$l_i = \frac{6,1P_i}{\alpha_s AB_\delta D^2 n} = \frac{6,1 \cdot 23391,813}{0,65 \cdot 22000 \cdot 0,8 \cdot 0,26^2 \cdot 1400} = 0,1318 \text{ [m]} \quad (4)$$

Poměr délky kotvy k jejímu průměru

$$\lambda = \frac{l_i}{D} = \frac{0,1318}{0,26} = 0,507 \text{ [-]} \quad (5)$$

1.3 Výpočet vinutí kotvy

Z grafu na Obr 1. 4 odpovídá vnějšímu průměru kotvy $D=0,26$ [m] počet pólů $2p=4$



Obr 1. 4 - Závislost počtu pólů na průměru kotvy stejnosměrného stroje - viz.[1], Obr. 8.10, str. 455

Pólová rozteč

$$\tau_p = \frac{\pi D}{2p} = \frac{\pi \cdot 0,26}{4} = 0,204 \text{ [m]} \quad (6)$$

Podle Tab. 1 by mělo odpovídat vnějšímu průměru kotvy $D=0,26$ [m] počet drážek $Q=38$.

D[m]	0,15	0,2	0,3	0,5	0,7	1	1,5	2
Q[-]	29	33	39	65	85	125	180	230

Tab. 1 - Průměrné počty drážek kotvy pro průměr D

Proud v kotvě

$$I_1 = \frac{P_i}{U} = \frac{20000}{0,855 \cdot 220} = 106,33 \doteq 107 \text{ [A]} \quad (7)$$

Počet závitů kotvy v sérii

$$N_s = \frac{\pi D A}{2 I_1} = \frac{\pi \cdot 0,26 \cdot 22000}{2 \cdot 107} = 83,97 \doteq 84 \text{ [-]} \quad (8)$$

Volím smyčkové vinutí, protože oproti vlnovému vinutí se převážně používá pro stroje s vyššími proudy a nízkým napětím, vinutí bude tyčové. Pro smyčkové vinutí platí vztah $a \geq p$, počet dvojic paralelních větví je větší nebo roven počtu pólových dvojic. Smyčkové vinutí je prováděno paralelně.

Počet dvojic paralelních větví

$$2a = 2p = 4 \rightarrow a = 2 [-] \quad (9)$$

Počet vodičů v drážce

$$n_d = \frac{4aN_s}{Q} = \frac{4 \cdot 2 \cdot 84}{38} = 17,68 \Rightarrow 16 [-] \quad (10)$$

Počet vodičů v drážce má být celé číslo dělitelné čtyřmi, proto volím počet vodičů v drážce na 16. Jelikož se změnil počet vodičů v drážce, tak se musí také upravit i počet závitů kotvy v sérii N_s a velikost proudové hustoty A .

Počet závitů kotvy v sérii po úpravě

$$n_d^I = \frac{4aN_s}{Q} \rightarrow N_s = \frac{n_d \cdot Q}{4 \cdot a} = \frac{16 \cdot 38}{4 \cdot 2} = 76 [-] \quad (11)$$

Velikost proudové hustoty po úpravě

$$A^I = \frac{2 \cdot N_s \cdot I_1}{\pi \cdot D} = \frac{2 \cdot 76 \cdot 107}{\pi \cdot 0,26} = 19911,507 \doteq 19911,5 \text{ [A/m]} \quad (12)$$

Počet cívkových stran

$$u = 4 [-] \quad (13)$$

Počet drážek na pól

$$Q_p = \frac{Q}{2p} = \frac{38}{4} = 9,5 [-] \quad (14)$$

Počet lamel komutátoru

$$K = uQ = 4 \cdot 38 = 152 [-] \quad (15)$$

Střední lamelové napětí

$$E_1 = \frac{2pU}{K} = \frac{2 \cdot 2 \cdot 220}{152} = 5,79 \text{ [V]} \quad (16)$$

Střední lamelové napětí splňuje podmínku $E_1 < 16 \text{ [V]}$

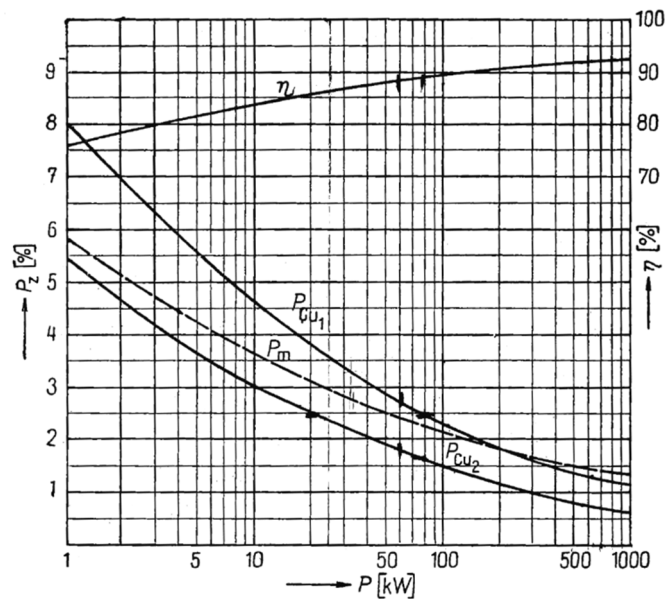
Ztráty v mědi kotvy

Z grafu na Obr 1. 5 odečteme předpokládané ztráty v mědi kotvy $P_{Cu1\%} = 3,8 \text{ [%]}$

$$P_{Cu1} = P_{Cu1\%} \cdot P_0 = P_{Cu1\%} \cdot \frac{P}{\eta} = 0,038 \cdot \frac{20000}{0,855} = 888,88 = 889 \text{ [W]} \quad (17)$$

Odpor vinutí kotvy

$$R_1 = \frac{P_{Cu1}}{I_1^2} = \frac{889}{107^2} = 0,0776 \text{ [\Omega]} \quad (18)$$



Obr 1. 5 - Ztráty a účinnost stejnosměrných strojů - viz.[2], Obr. 723., str. 564

Elektromagnetická síla

$$E = U - R_1 I_1 = 220 - 0,0776 \cdot 107 = 211,7 \text{ [V]} \quad (19)$$

Frekvence proudu v rotoru

$$f = \frac{pn}{60} = \frac{2 \cdot 1400}{60} = 46,67 \text{ [Hz]} \quad (20)$$

Magnetický tok jednoho pólu

$$\Phi = \frac{E}{4fN_s} = \frac{211,7}{4 \cdot 46,67 \cdot 76} = 0,0149 \text{ [Wb]} \quad (21)$$

Kontrola výpočtu magnetického toku

$$\Phi^I = B_\delta \cdot L_e \cdot \alpha_\delta \cdot \tau_p = 0,8 \cdot 0,14 \cdot 0,65 \cdot 0,204 = 0,01485 \text{ [Wb]} \quad (22)$$

Efektivní délka kotvy (železa)

$\alpha_\delta=0,65$ odečteno z grafu Obr. 1.3

$$L_e = \frac{\Phi}{\alpha \tau_p B_\delta} = \frac{0,0149}{0,65 \cdot 0,204 \cdot 0,8} = 0,140 \text{ [m]} \quad (23)$$

Železo rotorového svazku je rozděleno na 4 svazky po 32 [mm] a 4 kanály po 8 [mm].

Počet ventilačních kanálů

$$n_K = 4 \quad (24)$$

Šířka jednoho ventilačního kanálu

$$b_K = 0,008 \text{ [m]} \quad (25)$$

Šířka jednoho svazku

$$S_p = 0,032 \text{ [m]} \quad (26)$$

Délka čela tyčového vinutí

$$l_c = 1,5\tau_p = 1,5 \cdot 0,204 = 0,306 \text{ [m]} \quad (27)$$

Celková délka železa (rotorového svazku)

$$L = L_e + n_K b_K = 0,140 + 4 \cdot 0,008 = 0,172 \text{ [m]} \quad (28)$$

Volba komutačních pólů a kompenzačního vinutí podle Pistoyova kritéria

$$\kappa = \frac{N_s^2}{15K} n I_1 2a (L + 0,1l_c) 10^{-5} = \frac{76^2}{15 \cdot 152} \cdot 1400 \cdot 107 \cdot 2 \cdot 2 \cdot (0,172 + 0,1 \cdot 0,306) \cdot 10^{-5}$$

$$\kappa = 3,07 \text{ [-]} \quad (29)$$

Podle tabulky Tab. 2, která znázorňuje nejvyšší hodnotu Pistoyova kritéria, může být navrhovaný stroj bez komutačních pólů s posunutými kartáči. Kartáče budou tvrdé.

	Kartáče		
	měkké	polotvrdé	tvrdé
Stroje bez komutačních pólů a bez posunutí kartáčů	$\kappa = 0,7$	0,9	1,3
S posunutím kartáčů	2,1	2,7	4
Stroje s komutačními póly a cívkovým vinutím	6,3	8,1	
S tyčovým vinutím	10	12	
Stroje s komutačními póly a s kompenzačním vinutím	24	30	

Tab. 2 - Pistoyova kritéria - viz.[2], str. 593

1.4 Výpočet drážky kotvy a zubů kotvy

Předpokládaná hloubka drážky odečtena z grafu Obr 1. 2

$$h = 0,03 \text{ [m]} = 30 \text{ [mm]}$$

Rozteč drážek ve vzduchové mezeře

$$t_3 = \frac{\pi D}{Q} = \frac{\pi \cdot 0,26}{38} = 0,02149 \text{ [m]} \doteq 21,5 \text{ [mm]} \quad (30)$$

Rozteč v 1/3 od kořene při hloubce drážky $h = 30$ [mm]

$$t_{1/3} = \frac{\pi (D - \frac{4}{3}h)}{Q} = \frac{\pi \cdot (260 - \frac{4}{3} \cdot 30)}{38} = 18,19 \doteq 18,2 \text{ [mm]} \quad (31)$$

Předpokládaná maximální indukce v 1/3 zubu $B_{1/3} = 2,2 \text{ [T]}$

Šířka zubu v 1/3 drážky

$$b_{z1/3} = t_3 \frac{B_\delta}{0,9 \cdot B_{1/3}} = 21,5 \frac{0,8}{0,9 \cdot 2,2} = 8,68 \doteq 8,7 \text{ [mm]} \quad (32)$$

Možná šířka drážky

$$b = t_{1/3} - b_{z1/3} = 18,2 - 8,7 = 9,5 \text{ [mm]} \quad (33)$$

Zvolena šířka drážky $b = 10 \text{ [mm]}$

Bude použita drážka typu N, viz Obr 1. 6 s dvouvrstvým vinutím, v každé vrstvě budou dvě řady a v každé řadě 4 vodiče. Svazek vodičů 2x4 bude izolován. Rozměry drážky jsou, znázorněny viz příloha P - 5.

Šířka drážky

Izolace vodiče	4 x 0,4[mm]	= 1,6[mm]
Izolace svazku vodičů	2 x 0,5[mm]	= 1[mm]
Izolace drážky	2 x 0,15[mm]	= 0,3[mm]
Vůle	0,3[mm]	= 0,3[mm]

Celkem 3,2[mm]

Zbylé místo pro vodiče $10 - 3,2 = 6,8$ [mm]

Šířka jednoho vodiče se rovná **1,7 [mm]** ; $4 \times 1,7 = 6,8$ [mm].

Průřez vodiče

$$S_{Cu} = \frac{I_1}{2a \cdot \sigma} = \frac{107}{2 \cdot 2 \cdot 5} = 5,35 \text{ [mm}^2\text{]} \quad (34)$$

Pro výpočet průřezu vodiče byla zvolena $\sigma = 5[-]$

Výška vodiče

Průřezu vodiče $S_{Cu} = 5,35 \text{ [mm}^2\text{]}$ odpovídá vodič $1,7 \times 3,55 \Rightarrow$ výška vodiče = 3,55 [mm]

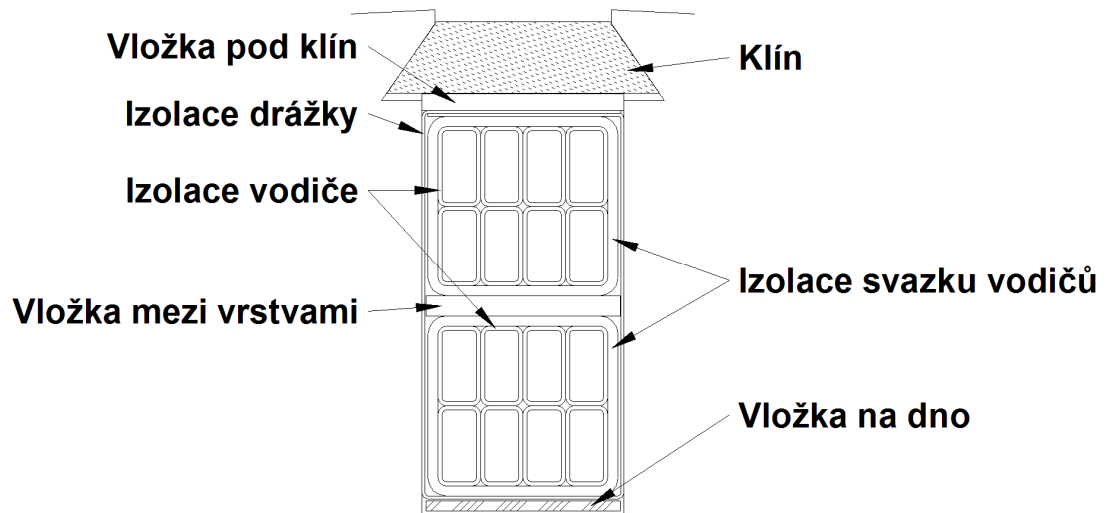
Ve vinutí rotoru bude použit vodič o rozměrech podle P - 1 ; $1,7 \times 3,55$ [mm].

Celková hloubka drážky

Vložka na dno	0,5[mm]	= 0,5[mm]
Izolace drážky	3 x 0,15[mm]	= 0,45[mm]
Izolace vodiče	4 x 0,4[mm]	= 1,6[mm]
Izolace svazku vodičů	4 x 0,5[mm]	= 2[mm]
Vložka mezi vrstvami	1[mm]	= 1[mm]
Vložka pod klín	0,8[mm]	= 0,8[mm]
Klín	3,5[mm]	= 3,5[mm]
Výška krčku	0,7[mm]	= 0,7[mm]
Výška vodiče	4 x 3,55[mm]	= 14,2[mm]
Vůle	0,25[mm]	= 0,25[mm]

Celkem 25[mm]

Hloubka drážky $h = 25$ [mm]



Obr 1. 6 - Drážka N a její vyskládání

1.5 Stanovení rozměrů magnetického obvodu

Výška jha

$$h_{jr} = \frac{\phi}{2L_e \cdot 0,9B_{jr}} = \frac{0,0149}{2 \cdot 0,140 \cdot 0,9 \cdot 1,3} = 0,0455 \doteq 0,045 [\text{m}] \quad (35)$$

Předpokládaná indukce ve jhu rotoru je $B_{jr} = 1,3$ [T]

Vnitřní průměr plechů kotvy

$$D_i = D - 2h - 2h_{jr} = 0,26 - 2 \cdot 0,025 - 2 \cdot 0,045 = 0,12 [\text{m}] \quad (36)$$

Vzduchová mezera pod hlavním pólem

$$\delta = 0,45 \cdot 10^{-6} \cdot \tau_p \cdot \frac{A}{B_\delta} = 0,45 \cdot 10^{-6} \cdot 204 \cdot \frac{19911,5}{0,8} = 2,28 \doteq 2,3 [\text{mm}] \quad (37)$$

Délka hlavního pólu

$$L_p = L = 0,172 [\text{m}] \quad (38)$$

Šířka hlavního pólu

$$b_p = \frac{\phi \cdot (1+\nu)}{B_p \cdot L} = \frac{0,0149 \cdot (1+0,2)}{1,5 \cdot 0,172} = 0,0693 \doteq 0,07 [\text{m}] \quad (39)$$

Rozptyl hlavního pólu je odhadnut na 20% a indukce v pólu $B_p = 1,5$ [T]

Výška jha kostry

$$h_{js} = \frac{\phi \cdot (1+\nu)}{2B_{js}(L+b_p)} = \frac{0,0149 \cdot (1+0,2)}{2 \cdot 1,1 \cdot (0,172+0,07)} = 0,336 \doteq 0,035 [\text{m}] \quad (40)$$

Indukce ve jhu kostry zvolena $B_{js} = 1,1$ [T]

Carterův činitel pro vzduchovou mezeru

$$k_c = \frac{t_3}{t_3 + \delta - 0,75b} = \frac{21,5}{21,5 + 2,3 - 0,75 \cdot 10} = 1,32 [-] \quad (41)$$

Magnetické napětí pro vzduchovou mezeru

$$U_{\delta} = 1,6 \cdot 10^6 \cdot B_{\delta} k_c \delta = 1,6 \cdot 10^6 \cdot 0,8 \cdot 1,32 \cdot 0,0023 = 3886,1 \text{ [A]} \quad (42)$$

Přepočítání indukce v 1/3 zubu

Skutečná rozteč v 1/3 od kořene při hloubce drážky $h = 25$ [mm]

$$t_{1/3} = \frac{\pi(D - \frac{4}{3}h)}{q} = \frac{\pi \cdot (260 - \frac{4}{3} \cdot 25)}{38} = 18,74 \doteq 18,80 \text{ [mm]} \quad (43)$$

Skutečná šířka zubu v 1/3 drážky

$$b_{z1/3(skut)} = t_{1/3} - b = 18,80 - 10 = 8,80 \text{ [mm]} \quad (44)$$

Skutečná indukce v 1/3 zubu

$$B_{z1/3(skut)} = \frac{b_{z1/3}}{b_{z1/3(skut)}} \cdot B_{z1/3} = \frac{8,7}{8,8} \cdot 2,2 = 2,175 \doteq 2,2 \text{ [T]} \quad (45)$$

1.6 Magnetická napětí v jednotlivých částech**Činitel k_z**

$$k_z = \frac{t_{1/3}}{b_{z1/3(skut)}} - 1 = \frac{18,8}{8,8} - 1 = 1,136 \doteq 1,14 \text{ [-]} \quad (46)$$

Podle grafu na P-9 a činitele $k_z = 1,14$ [-] se skutečná indukce $B_z = 2,07$ [T], podle tabulky P-10 odpovídá skutečné indukci B_z se intenzita $H_z = 40000$ [A/m].

Magnetické napětí pro zuby

$$U_z = 2hH_z = 2 \cdot 0,025 \cdot 40000 = 2000 \text{ [A]} \quad (47)$$

Podle grafu P - 10 odpovídá indukci $B_{jr} = 1,3$ [T] intenzita $H_{jr} = 550$ [A/m]

Délka indukční čáry ve jhu

$$l_{jr} \doteq \tau_p = 0,204 \text{ [m]} \quad (48)$$

Magnetické napětí pro jeho rotoru

$$U_{jr} = l_{jr} \cdot H_{jr} = 0,204 \cdot 550 = 112,2 \text{ [A]} \quad (49)$$

Skutečný vnitřní průměr kostry

$$D_i = D + 2 \cdot (\delta + h_p + h_{pn}) = 260 + 2 \cdot (2,3 + 90 + 20,4) = 485,4 \text{ [mm]} \quad (50)$$

Skutečný vnější průměr kostry

$$D_e = D + 2 \cdot (\delta + h_p + h_{pn} + h_{js}) = 260 + 2 \cdot (2,3 + 90 + 20,4 + 35) = 555,4 \text{ [mm]} \quad (51)$$

Přibližná délka indukční čáry v pólu

$$l_p = 0,5 \cdot (D_e - D) = 0,5 \cdot (555,4 - 260) = 147,7 \text{ [mm]} \quad (52)$$

Podle grafu P - 10 odpovídá indukci $B_p = 1,5$ [T] intenzita $H_p = 1600$ [A/m]

Magnetické napětí pro póly

$$U_p = 2 \cdot l_p H_p = 2 \cdot 0,1477 \cdot 1600 = 472,64 \text{ [A]} \quad (53)$$

Délka indukční čáry ve jhu kostry

$$l_{js} = \frac{\pi D_e}{2p} = \frac{\pi \cdot 0,5554}{2 \cdot 2} = 0,436 \text{ [m]} \quad (54)$$

Podle grafu P - 10 odpovídá indukci $B_{js} = 1,1 \text{ [T]}$ intenzita $H_{js} = 360 \text{ [A/m]}$

Magnetické napětí pro jho kostry

$$U_{js} = l_{js} \cdot H_{js} = 0,436 \cdot 360 = 159,96 \text{ [A]} \quad (55)$$

Magnetomotorická síla na dvojpólí

$$\begin{aligned} F_m &= 1,05 \cdot (U_\delta + U_z + U_{jr} + U_p + U_{js}) = \\ &= 1,05 \cdot (3886,1 + 2000 + 112,2 + 472,64 + 159,96) = 6630,9 \text{ [A]} \end{aligned} \quad (56)$$

1.7 Výpočet budícího vinutí hlavního pólu**Budící proud**

Budící napětí zvoleno $U_b = 100 \text{ [V]}$

$$I_2 = \frac{P_{Cu2}}{U_b} = \frac{584,8}{100} = 5,848 \text{ [A]} \quad (57)$$

Ztráty v mědi magnetů

Z grafu na Obr 1. 5 odečteme předpokládané ztráty v mědi magnetů $P_{Cu2\%}=2,5 \text{ [%]}$

$$P_{Cu2} = P_{Cu2\%} \cdot P_0 = P_{Cu2\%} \cdot \frac{P}{\eta} = 0,025 \cdot \frac{20000}{0,855} = 584,79 = 584,8 \text{ [W]} \quad (58)$$

Střední délka závitů

$$l_s = 2(L_p + b_p) + \pi b_c = 2 \cdot (0,172 + 0,07) + \pi \cdot 0,04 \doteq 0,609 \doteq 0,61 \text{ [m]} \quad (59)$$

Předpoklad tloušťky cívký je $b_c = 40 \text{ [mm]}$

Chladící obvod cívký

$$l_c = 2(L_p + b_p) + 2\pi b_c = 2 \cdot (0,172 + 0,07) + 2 \cdot \pi \cdot 0,04 \doteq 0,735 \text{ [m]} \quad (60)$$

Obvodová rychlost rotoru

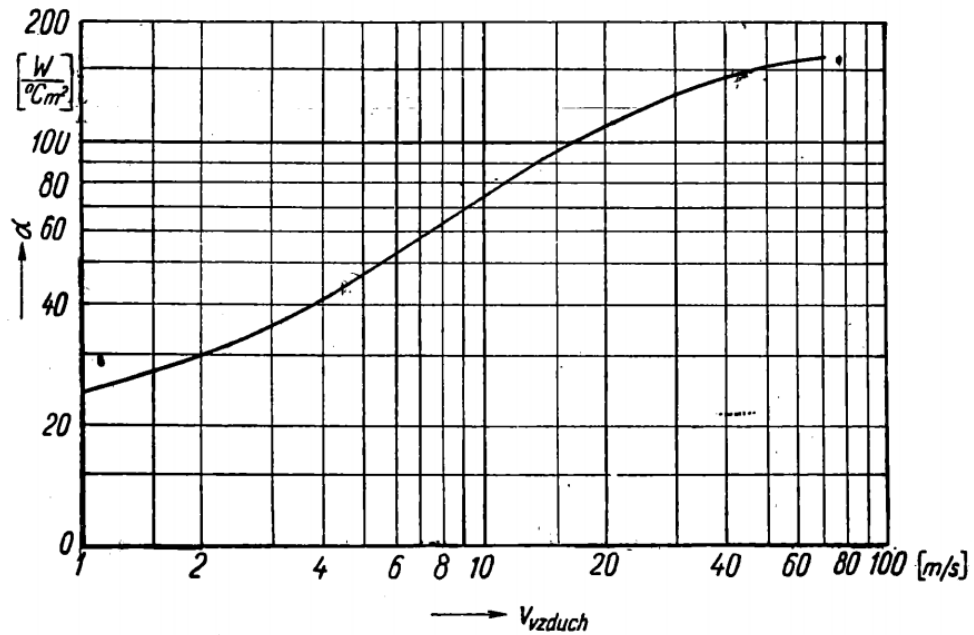
$$v = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{60} = \frac{\pi \cdot 0,26 \cdot n}{60} = 19,06 \text{ [m/s]} \quad (61)$$

Mezi póly je odhadnuta rychlost vzduchu na 40% obvodové rychlosti rotoru

Rychlost vzduchu

$$v_v = 0,4 \cdot v = 0,4 \cdot 19,06 = 7,62 \text{ [m/s]} \quad (62)$$

Pro rychlost vzduchu $v_v = 7,62 \text{ [m/s]}$ odpovídá podle obrázku Obr 1.7 chladivost $\alpha_2 \doteq 60 \text{ [W/}^\circ\text{Cm}^2]$. Předpokládané oteplení cívký proti vzduchu je $\Delta v_c = 65 \text{ [}^\circ\text{C]}$



Obr. 1.7 - Chladivost v proudícím vzduchu - viz.[2], Obr. 45., str. 49

Předpokládaná výška chladičí cívky

$$h_c = \frac{P_{Cu2}}{2 \cdot p \cdot \alpha_2 \cdot l_c \cdot \Delta v_c} = \frac{584,8}{2 \cdot 2 \cdot 60 \cdot 0,735 \cdot 65} = 0,051 \doteq 0,05 \text{ [m]} \quad (63)$$

Chladičí povrch

$$S_c = l_c \cdot h_c = 0,735 \cdot 0,05 = 0,03675 \doteq 0,0375 \text{ [m}^2\text{]} \quad (64)$$

Ztráty v cívce při trvalém chodu a oteplení povrchu $\Delta v_c = 65[^{\circ}C]$

$$P_c = S_c \cdot \alpha_2 \cdot \Delta v_c = 0,0375 \cdot 60 \cdot 65 = 146,25 \text{ [W]} \quad (65)$$

Možný odpor cívky

$$R_c = \frac{P_c}{I_2^2} = \frac{146,25}{5,848^2} = 4,27 \text{ [}\Omega\text{]} \quad (66)$$

Počet závitů jedné cívky hlavního pólu

$$N_c = \frac{F_m}{2 \cdot I_2} = \frac{6630,9}{2 \cdot 5,848} = 566,94 \doteq 567 \text{ [-]} \quad (67)$$

Průřez vodiče budící cívky

$$S_2 = \frac{\rho \cdot l_s \cdot N_c}{R_c} = \frac{10^{-6} \cdot 0,61 \cdot 567}{48 \cdot 4,27} = 16,875 \cdot 10^{-6} \doteq 1,7 \text{ [mm}^2\text{]} \quad (68)$$

Bude použit vodič o průřezu $S_2 = 1,767 \text{ [mm}^2\text{]}$, kterému odpovídá podle tabulky P - 3 vodič o průměru 1,5 [mm] + oboustranná izolace 0,1 [mm] = 1,6 [mm].

Dále uvažujeme vůli u vodiče 0,1 [mm], takže se průměr vodiče zvýší na 1,7 [mm].

Počet závitů na délku $h_c = 0,0511 \doteq 0,05 \text{ [mm]}$

$$N_x = \frac{h_c}{\text{vodič}} - 1 = \frac{50}{1,7} - 1 = 28,41 \doteq 28 \text{ [-]} \quad (69)$$

Potřebný počet vrstev

$$N_v = \frac{N_c}{N_x} = \frac{567}{28} = 20,25 \doteq 20 [-] \quad (70)$$

Střední tloušťka cívk

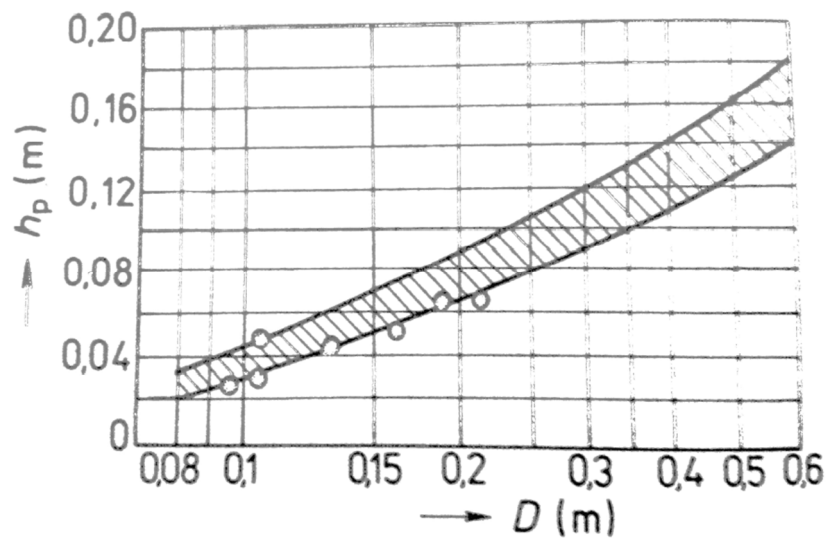
$$b_{c(skut)} = v_{\text{úle}} \cdot N_v = 20 \cdot 1,7 = 34 \text{ [mm]} \quad (71)$$

$b_{c(skut)}$ je menší než předpokládaná tloušťka b_c

Výška hlavního pólu

Odečtena z Obr 1.8

$$h_p = 0,09 \text{ mm}$$



Obr 1.8 - Závislost hloubky drážky na průměru kotvy - viz.[1], Obr. 8.12., str. 458

Výška jednoho pólového nástavce hlavního pólu

$$h_{pn} = 0,1 \cdot \tau_p = 0,1 \cdot 204 = 20,4 \text{ [mm]} \quad (72)$$

Šířka pólového nástavce hlavního pólu

$$b_{pn} = \alpha \cdot \tau_p = 0,65 \cdot 204 = 132,6 \text{ mm} \quad (73)$$

Tloušťka kostičky budící cívk zvolena $t_k = 5 \text{ [mm]}$

1.8 Výpočet komutačních pólů

Výpočet komutačních pólů se neprovádí, protože již dříve bylo zmíněno, že díky Pistoyovu kritériu, může být navrhovaný stroj bez komutačních pólů s posunutými kartáči. Kartáče budou tvrdé.

1.9 Výpočet komutátoru

Průměr komutátoru

$$D_k = D - h = 0,26 - 0,025 = 0,235 \text{ [m]} \quad (74)$$

Rozteč lamel komutátoru

$$t_1 = \frac{\pi \cdot D_k}{K} = \frac{\pi \cdot 0,235}{152} = 4,86 \doteq 4,9 \text{ [mm]} \quad (75)$$

Lamela bude mít šířku 4,00 [mm] a 0,9 bude šířka mezilamelové izolace

Rozteč lamel komutátoru redukovaná na obvod kotvy

$$t_1^I = \frac{\pi \cdot D}{K} = \frac{\pi \cdot 0,26}{152} = 5,37 \doteq 5,4 \text{ [mm]} \quad (76)$$

Krok cívky na komutátoru

$$y_k = \frac{K-a}{p} = \frac{152-2}{2} = 75 \text{ [-]} \quad (77)$$

Drážkový krok

$$y_{d1} = \frac{Q}{2p} = \frac{38}{2 \cdot 2} = 9,5 \doteq 10 \text{ [-]} \quad (78)$$

Cívkový krok

$$y_c = u \cdot y_{d1} = 4 \cdot 10 = 40 \text{ [-]} \quad (79)$$

Zpětný krok

$$y_z = y_k - y_c = 75 - 40 = 35 \text{ [-]} \quad (80)$$

Obvodová rychlost komutátoru

$$v_k = \frac{\pi \cdot D_k \cdot n}{60} = \frac{\pi \cdot 0,235 \cdot 1400}{60} = 17,22 \text{ [m/s]} \quad (81)$$

Mezera mezi póly

$$(1 - \alpha)\tau_p = (1 - 0,65) \cdot 204 = 71,4 \text{ [mm]} \quad (82)$$

Šířka kartáče

$$S_u = \beta \cdot t_l = 2 \cdot 4,9 = 9,8 \text{ [mm]} \quad (83)$$

Předpoklad krytí uhlíku $\beta = 2$

Podle tabulky P - 4 bude použit kartáč o rozměrech 10 x 20 [mm], výška kartáče je 32 [mm].

Styková plocha kartáče

$$S_u = b_u \cdot a_u = 10 \cdot 20 = 200 \text{ [mm}^2\text{]} \quad (84)$$

Počet kartáčů na roubíku

$$N_u = \frac{I_1}{\sigma_u p S_u} = \frac{107}{0,06 \cdot 2 \cdot 200} = 4,46 \doteq 4 \text{ [-]} \quad (85)$$

Elektrografitové tvrdé kartáče se zatíží $\sigma_u = 0,06 \text{ [A/mm}^2\text{]}$

Délka komutátoru

$$L_k = (N_u + 0,5) \cdot a_u + (N_u - 1) \cdot 5 + 30 = (4 + 0,5) \cdot 12,5 + (4 - 1) \cdot 5 + 30 = 101,25 \text{ [mm]} \doteq 100 \text{ [mm]} \quad (86)$$

1.10 Ztráty a účinnost**Odpor vinutí kotvy**

$$R_1 = \frac{2 \cdot \rho \cdot (L + l_c) \cdot N_s}{2 \cdot a \cdot S_1} = \frac{2 \cdot 10^{-6} \cdot (0,172 + 0,735) \cdot 76}{48 \cdot 2 \cdot 1,7 \cdot 3,55 \cdot 10^{-6}} = 0,238 \text{ [\Omega]} \quad (87)$$

Ztráty ve vinutí kotvy

$$P_{Cu1} = R_1 \cdot I_1^2 = 0,238 \cdot 107^2 = 2724,862 \doteq 2725 \text{ [W]} \quad (88)$$

Odpor cívky hlavního pólu

$$R_c = \frac{\rho \cdot l_s \cdot N_c}{S_2} = \frac{10^{-6} \cdot 0,61 \cdot 567}{48 \cdot 1,767 \cdot 10^{-6}} = 4,0778 \doteq 4,08 \text{ [\Omega]} \quad (89)$$

Ztráty v hlavních pólech

$$P_{Cu2} = 2 \cdot p \cdot R_c \cdot I_2^2 = 2 \cdot 2 \cdot 4,13 \cdot 5,848^2 = 564,97 \doteq 565 \text{ [W]} \quad (90)$$

Střední šířka zubu

$$b_{zs} = \frac{\pi \cdot (D - h)}{Q} - b = \frac{\pi \cdot (260 - 25)}{38} - 10 = 9,428 \doteq 9,43 \text{ [mm]} \quad (91)$$

Hmotnost zubů kotvy

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

$$G_z = Q \cdot h \cdot b_{zs} \cdot 0,9 \cdot L_e \cdot \gamma = 38 \cdot 0,025 \cdot 0,00943 \cdot 0,9 \cdot 0,140 \cdot 7700 = 8,69 \doteq 8,7 \text{ [kg]} \quad (92)$$

Hmotnost jha kotvy

$$G_{jr} = \frac{\pi}{4} [(D - 2 \cdot h)^2 - D_i^2] \cdot 0,9 \cdot L_e \cdot \gamma = \frac{\pi}{4} [(0,26 - 2 \cdot 0,025)^2 - 0,119^2] \cdot 0,9 \cdot 0,14 \cdot 7700 = 22,8 \text{ [kg]} \quad (93)$$

Indukce v zubu

$$B_z = \frac{\Phi}{b_{zs} \cdot k_{Fe}} = \frac{0,0149}{0,00943 \cdot 0,93} = 1,6989 \doteq 1,7 \text{ [T]} \quad (94)$$

Podle Tab. 3 je pro použitý plech o tloušťce 0,5 mm koeficient $k_{Fe} = 0,93 \text{ [-]}$

Tloušťka plechu (mm)	Izolace plechů	
	oxid	lak
1	0,98	0,97
0,5	0,95	0,93
0,35	0,93	0,91
0,3	0,92	0,89
0,28	0,91	0,88

Tab. 3- Koeficient plnění železa - viz.[1], Tab. 2.1., str. 45

Ztráty v železe

$$B_{jr} = 1,3 \text{ [T]}$$

Ztráty v železe jsou spočteny pro plechy se ztrátovým číslem 2,6 [W/kg]

$$P_{Fe} = G_z \cdot B_{zs}^2 \cdot \left[1,2 \cdot 1,5 \cdot \frac{f}{50} + 3 \cdot 1,1 \cdot \left(\frac{f}{50} \right)^2 \right] + G_{jr} \cdot B_{jr}^2 \cdot \left[2 \cdot 1,5 \cdot \frac{f}{50} + 2,3 \cdot 1,1 \cdot \left(\frac{f}{50} \right)^2 \right] = 8,7 \cdot 1,7^2 \cdot \left[1,2 \cdot 1,5 \cdot \frac{46,67}{50} + 3 \cdot 1,1 \cdot \left(\frac{46,67}{50} \right)^2 \right] + 22,8 \cdot 1,3^2 \cdot \left[2 \cdot 1,5 \cdot \frac{46,67}{50} + 2,3 \cdot 1,1 \cdot \left(\frac{46,67}{50} \right)^2 \right] = 114,53 + 192,83 = 1159,9 \doteq 307,36 \text{ [W]} \quad (95)$$

Ztráty třením kartáčů

$$P_{tk} = 9,81 \cdot f \cdot p \cdot v_k \cdot \sum S_k = 9,81 \cdot 0,32 \cdot 0,25 \cdot 17,22 \cdot 4 \cdot 1 \cdot 1,25 = 67,57 \doteq 67,6 \text{ [W]} \quad (96)$$

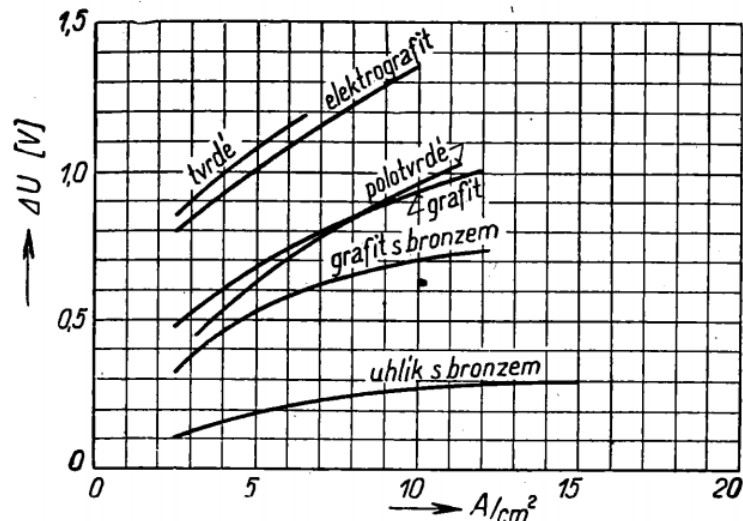
Měrný tlak na kartáče $p = 0,25 \text{ [kg/cm}^3\text{]}$

Koeficient $f = 0,32 \text{ [-]}$

Ztráty přechodem

$$P_{\Delta} = 2 \cdot \Delta U \cdot I_1 = 2 \cdot 1,3 \cdot 107 = 278,2 \text{ [W]} \quad (97)$$

Podle Obr 1.9 bude pro tvrdé kartáče při $\sigma_u = 0,06 \text{ [A/mm}^2\text{]}$ $\Delta U = 1,3 \text{ [A/mm}^2\text{]}$



Obr. 1.9 - Úbytek napětí na kartáčích podle Humburga - viz.[2], Obr. 725., str. 565

Mechanické ztráty podle typového výkonu

$$P_m = 4 \cdot P^{0,9} \cdot n^{0,25} = 4 \cdot 20^{0,9} \cdot 1400^{0,25} = 362,67 \text{ [W]} \quad (98)$$

Přídavné ztráty

$$P_d = \frac{P}{100} = \frac{20000}{100} = 200 \text{ [W]} \quad (99)$$

$$\text{Přídavné ztráty} = 1\% P_N$$

Celkové ztráty

$$P_z = P_{Cu1} + P_{Cu2} + P_{kp} + P_{Fe} + P_{tk} + P_\Delta + P_m + P_d = 2725 + 565 + 0 + 307,36 + 67,6 + 278,2 + 362,67 + 200 = 4505,83 \text{ [W]} \quad (100)$$

Účinnost navrženého stroje

$$\mu = 1 - \frac{P_z}{P + P_z} = 1 - \frac{4505,83}{20000 + 4505,83} = 0,816 \Rightarrow 81,6 \text{ [%]} \quad (101)$$

1.11 Charakteristika naprázdno

Pro výpočet a sestavení charakteristiky naprázdno byly použity grafy, viz příloha P - 9 a P - 10 a následující vzorce, vypočtené a odečtené hodnoty z grafů jsou zaneseny do tabulky P - 11

Průměr kotvy v jednotlivých vrstvách

$$D_1 = D = 260 \text{ [mm]} \quad (102)$$

$$D_2 = D_1 - h = 260 - 25 = 235 \text{ [mm]} \quad (103)$$

$$D_3 = D_1 - 2 \cdot h = 260 - 2 \cdot 25 = 210 \text{ [mm]} \quad (104)$$

$$i = 1,2,3$$

Rozteč zubu v jednotlivých vrstvách

$$t_{di} = \frac{\pi \cdot D_i}{Q} \quad (105)$$

Šířka zubu v jednotlivých vrstvách

$$z_i = t_{di} - b \quad (106)$$

Činitel k_z

$$k_{zi} = \frac{t_{di}}{z_i \cdot k_{Fe}} - 1 \quad (107)$$

Zdánlivá indukce

$$B_{zi}^I = \frac{B_\delta \cdot t_{di}}{z_i \cdot k_{Fe}} \quad (108)$$

Skutečná indukce B_z se zjistí pomocí grafu P - 9 , vždy pro příslušnou zdánlivou indukci B_{zi}^I a činitel k_{zi} .

Střední hodnota intenzity

$$H_{zstr} = \frac{H_{z1} + 4 \cdot H_{z2} + H_{z3}}{6} \quad (109)$$

Magnetomotorická síla

$$F_z = H_{zstr} \cdot h \quad (110)$$

Ukázka výpočtu jednoho řádku v tabulce

$$t_{d2} = \frac{\pi \cdot D_2}{Q} = \frac{\pi \cdot 235}{38} = 19,43 \text{ [mm]} \quad (111)$$

$$z_2 = t_{d2} - b = 19,43 - 10 = 9,43 \text{ [mm]} \quad (112)$$

$$k_{z2} = \frac{t_{d2}}{z_2 \cdot k_{Fe}} - 1 = \frac{19,43}{9,43 \cdot 0,93} - 1 = 1,22 \text{ [-]} \quad (113)$$

$$B_{z2}^I = \frac{B_\delta \cdot t_{d2}}{z_2 \cdot k_{Fe}} = \frac{0,8 \cdot 19,43}{9,43 \cdot 0,93} = 1,77 \text{ [T]} \quad (114)$$

Hodnota $B_{z2} = 1,75 \text{ [T]}$ byla zjištěna z grafu P - 9

Hodnoty H_{z1} , H_{z2} a H_{z3} byly odečteny z grafu P - 10

$$H_{zstr} = \frac{H_{z1} + 4 \cdot H_{z2} + H_{z3}}{6} = \frac{3200 + 8500 + 20000}{6} = 9533,3 \text{ [A/m]} \quad (115)$$

$$F_z = H_{zstr} \cdot h = 9533,3 \cdot 0,025 = 238,33 \text{ [A]} \quad (116)$$

Tabulka pro sestavení charakteristiky naprázdno a samotná charakteristika je součástí přílohy P - 11(tabulka), P - 12(graf)

Sestrojení charakteristiky naprázdno

Pro sestrojení charakteristiky bylo nutné spočítat velikost magnetizačního napětí pro 0%, 20%, 80%, 100% a 110%.

$$F_{m0\%} = 0 \text{ [A]}$$

$$F_{m20\%} = 0,2 \cdot U_{\delta} = 0,2 \cdot 3886,1 = \text{ [A]}$$

$$F_{m80\%} = 0,8 \cdot F_m - H_{zstr80\%} = 0,8 \cdot 6630,9 - 1158,33 = 4146,4 \text{ [A]}$$

$$F_{m100\%} = F_m = 6630,9 \text{ [A]}$$

$$F_{m110\%} = 1,1 \cdot F_m + H_{zstr110\%} = 1,1 \cdot 6630,9 + 19083,33 = 26377,3 \text{ [A]}$$

U [%]	F _m [A]
0	0
20	777,22
80	4146,4
100	6630,9
110	26377,3

Tab. 4 – Hodnoty sestrojení charakteristiky naprázdno

1.12 Shrnutí základních rozměrů

Vnější průměr statoru	D _e =	555,4 [mm]
Vnitřní průměr statoru	D _{is} =	485,4 [mm]
Výška jha statoru	h _{js} =	35 [mm]
Vnější průměr kotvy	D=	260 [mm]
Výška jha rotoru	h _{jr} =	45 [mm]
Hloubka drážky kotvy	h=	25 [mm]
Šířka drážky kotvy	b=	10 [mm]
Výška hlavního pólu	h _p =	90 [mm]
Šířka hlavního pólu	b _p =	70 [mm]
Výška pólového nástavce hlavního pólu	h _{pn} =	20,4 [mm]
Šířka pólového nástavce hlavního pólu	b _{pn} =	132,6 [mm]
Velikost vzduchové mezery pod hlavním pólem	δ=	2,3 [mm]
Šířka cívky hlavního pólu	b _c =	34 [mm]
Výška cívky hlavního pólu	h _c =	50 [mm]
Průměr komutátoru	D _k =	235 [mm]
Délka komutátoru	L _k =	100 [mm]

Závěr

Cílem této práce bylo vytvořit elektromagnetický návrh stejnosměrného stroje s cizím buzením podle zadaných parametrů a nakreslit podélný a příčný řez stroje.

Práce obsahuje úvod, ve kterém je popsána historie, konstrukce, princip, rozdělení podle buzení, a použití stejnosměrných strojů. Práce pak pokračuje návrhy a výpočty rozměrů a dalších parametrů stroje. Poté bylo vypočteno vinutí, drážka a zub kotvy. Jako další krok bylo třeba navrhnout a vypočítat rozměry magnetického obvodu a vypočítání magnetických napětí v jednotlivých částech navrhovaného stroje. Následoval výpočet budícího vinutí hlavního pólu, výpočet komutačního vinutí se neprováděl, protože se stroj podle Pistoyova kritéria obejde bez komutačních pólů. Jako poslední bylo třeba navrhnout komutátor a vypočítat ztráty a účinnost, která vyšla 81,6 [%], což je o trochu méně než předpokládaná účinnost 85,5 [%] stanovená hned na začátku návrhu stejnosměrného stroje. Nakonec byla vypočítána charakteristika naprázdno a na úplném konci je tabulka, kde jsou shrnuty základní rozměry navrhovaného stroje.

Podélný a příčný řez a jednotlivé komponenty nacházející se v příloze byly kresleny v programu SolidEdge ST8.

Navržený stejnosměrný stroj se může nadále upravovat a zdokonalovat. Například navržením a vypočtením komutačního vinutí, které by vedlo ke zlepšení účinnosti stroje.

Použitá literatura

- [1] KOPYLOV I. P. A KOL.: *Stavba elektrických strojů, SNTL - Nakladatelství technické literatury*, Praha 1988
- [2] CIGÁNEK L.: *Stavba elektrických strojů, SNTL - Nakladatelství technické literatury*, Praha 1958
- [3] Přednášky předmětu SES1,2 [online]

Přílohy

P - 1- Rozměry a průřezy (mm²) měděných a hliníkových vodičů pravoúhlého průřezu -

viz.[1], Tab. D.3.2., str. 652

Šířka vodiče (mm)	Výška vodiče (mm)																		
	0,80	(0,85)	0,90	(0,95)	1,00	(1,06)	1,12	(1,18)	1,25	(1,32)	1,40	(1,50)	1,60	(1,70)	1,80	(1,90)	2,00	(2,12)	
2,00	1,463	1,545	1,626	1,706	1,785	1,905	2,025	2,145	2,285	2,425	2,585								
(2,12)	1,559	—	1,734	—	1,905	—	2,160	—	2,435	—	2,753								
2,24	1,655	1,749	1,842	1,934	2,025	2,160	2,294	2,429	2,585	2,742	2,921	3,145	3,369						
(2,36)	1,751	—	1,950	—	2,145	—	2,429	—	2,735	—	3,089								
2,50	1,863	1,970	2,076	2,181	2,285	2,435	2,585	2,736	2,910	3,085	3,285	3,535	3,785	3,887	4,137				
(2,65)	1,983	—	2,211	—	2,435	—	2,753	—	3,098	—	3,495								
2,80	2,103	2,225	2,346	2,466	2,585	2,753	2,921	3,089	3,285	3,481	3,705	3,985	4,265	4,397	4,677	4,957	5,237		
(3,00)	2,263	—	2,526	—	2,785	—	3,145	—	3,535	—	3,985								
3,15	2,383	2,522	2,661	2,799	2,935	3,124	3,313	3,502	3,723	3,943	4,195	4,510	4,825	4,992	5,307	5,622	5,937	6,315	
(3,35)	2,543	—	2,841	—	3,135	—	3,537	—	3,973	—	4,475								
3,55	2,703	2,862	3,021	3,179	3,335	3,548	3,761	3,974	4,223	4,471	4,755	5,110	5,465	5,672	6,027	6,382	6,737	7,163	
(3,75)	2,803	—	3,201	—	3,535	—	3,985	—	4,473	—	5,035								
4,00	3,063	3,245	3,426	3,606	3,785	4,025	4,265	4,505	4,785	5,065	5,385	5,785	6,185	6,437	6,837	7,237	7,637	8,117	
(4,25)	3,263	—	3,651	—	4,035	—	4,545	—	5,098	—	5,735								
4,50	3,463	3,670	3,876	4,081	4,285	4,555	4,825	5,095	5,410	5,725	6,085	6,535	6,985	7,287	7,737	8,187	8,637	9,177	
(4,75)	3,663	—	4,101	—	4,535	—	5,105	—	5,723	—	6,435								
5,00	3,863	4,095	4,326	4,556	4,785	5,085	5,385	5,685	6,035	6,385	6,785	7,285	7,785	8,137	8,637	9,137	9,637	10,24	
(5,30)	4,103	—	4,596	—	5,085	—	5,721	—	6,410	—	7,205								
5,60	4,343	4,605	4,866	5,126	5,385	5,721	6,057	6,393	6,785	7,177	7,625	8,185	8,745	9,157	9,717	10,28	10,84	11,51	
(6,00)	4,663	—	5,226	—	5,785	—	6,505	—	7,285	—	8,185								
6,30	4,903	5,200	5,496	5,791	6,085	6,463	6,841	7,219	7,660	8,101	8,605	9,235	9,865	10,35	10,98	11,61	12,24	12,99	
(6,70)			5,856	—	6,485	—	7,289	—	8,160	—	9,165								
7,10			6,216	6,551	6,885	7,311	7,737	8,163	8,660	9,157	9,725	10,44	11,15	11,71	12,42	13,13	13,84	14,69	
(7,50)					7,285	—	8,185	—	9,160	—	10,29								
8,00					7,785	8,265	8,745	9,225	9,785	10,35	10,99	11,79	12,59	13,24	14,04	14,85	15,64	16,60	
(8,50)							9,305	—	10,41	—	11,69								
9,00							9,865	10,41	11,04	11,67	12,39	13,29	14,19	14,94	15,84	16,74	17,64	18,72	
(9,50)									11,66	—	13,09	—	14,99	—	16,74	—	18,64	—	
10,0									12,29	12,99	13,79	14,79	15,79	16,64	17,64	18,64	19,64	20,84	
(10,6)											14,63	—	16,75	—	18,72	—	20,84	—	

P - 2- Rozměry drážek pro vinutí - viz.[1], Tab. D.4.1a., str. 659

b_1	Drážka N				Drážka D				
	h_0	h_1	x_1	λ_z	b_0	h_0	h_1	u	λ_z
4					2,2		0,90	1,50	0,561
4,2							1,00	1,40	0,587
4,4	—	—	—	—			0,95	1,55	0,517
4,6							1,05	1,45	0,540
4,8					2,5		1,15	1,35	0,562
5				0,702			1,25	1,25	0,583
5,2				0,681			1,35	1,15	0,603
5,5				0,649	2,8	0,5	1,35	1,25	0,553
5,8				0,624			1,50	1,10	0,580
6				0,606			1,50	1,00	0,550
6,2				0,590	3,0		1,60	0,90	0,567
6,5				0,568			1,75	0,75	0,590
6,8				0,549			1,90	0,60	0,613
7		3,3	1,75	0,534			1,90	0,50	0,585
7,2				0,521	3,2		2,00	0,40	0,599
7,5				0,504			1,60	1,40	0,477
7,8				0,487	3,5		1,72	1,28	0,493
8				0,477			1,80	1,20	0,503
8,5	0,7			0,453			1,80	1,20	0,506
9				0,431	4,0		2,00	1,00	0,529
9,5				0,411			2,20	0,80	0,550
10				0,434			2,20	0,80	0,505
10,5				0,416	4,5		2,40	0,60	0,524
11				0,400			2,60	0,40	0,541
11,5		3,8	2,0	0,385	5,0	0,7	1,95	1,05	0,412
12				0,370			2,10	0,90	0,424
12,5				0,357			2,25	0,75	0,436
13				0,345			2,25	1,25	0,407
13,5				0,334	5,5		2,40	1,10	0,418
14				0,354			2,55	0,95	0,428
14,5				0,343			2,55	0,95	0,403
15		4,3	2,25	0,335			2,70	0,80	0,412
15,5				0,343			2,85	0,65	0,472
16				0,333			3,00	0,50	0,480
16,5				0,324			3,15	0,85	0,489
17				0,342			3,30	0,70	0,497
17,5	1,0			0,333			3,45	0,55	0,504
18				0,325	6,0		3,60	0,40	0,512
18,5		4,8	2,5	0,317			—	—	—
19				0,309			3,90	0,10	0,525
19,5				0,302			—	—	—
20				0,295		1,0	2,80	1,20	0,414
21							3,00	1,00	0,422
22							3,20	0,80	0,430
23							3,40	0,60	0,436
24							3,40	0,60	0,395
25							3,60	0,40	0,402
26	—	—	—	—			3,80	0,20	0,408
27					7,0		4,00	0,00	0,413
28							4,20	0,80	0,419
29							4,40	0,60	0,424
30							4,60	0,40	0,429

P - 3 - Měděné izolované dráty pro vinutí podle ČSN 3473 - viz.[1], Tab. D 3.1., str. 650

Průměr jádra (mm)	Průřez jádra (mm ²)	Střední odpor při 20 °C ($\Omega \cdot \text{km}^{-1}$)	Největší oboustranný izolační přírůstek (mm)						
			2B	L2H	2KT	2KS	T	2T	2I
0,080	0,005 03	3 490,2							
0,090	0,006 36	2 757,6		0,093			0,01	0,032	—
0,100	0,007 85	2 233,8							0,032
0,112	0,009 85	1 780,8							
0,125	0,012 3	1 429,6							
0,132	0,013 7	1 281,9					0,027	0,044	0,044
0,140	0,015 4	1 139,7							
0,150	0,017 7	992,73		0,1					
0,160	0,020 1	872,54							
0,170	0,022 7	772,92	—						
0,180	0,025 5	689,41							
0,190	0,028 3	618,75							
0,200	0,031 4	558,42					0,035	0,056	0,056
0,212	0,035 3	497,00							
0,224	0,039 4	445,15							
0,236	0,043 7	401,15							
0,250	0,049 1	357,41		0,107					
0,265	0,055 1	318,02			—	—			
0,280	0,061 6	284,92							
0,300 +	0,070 7	248,19							
0,315	0,077 9	225,12					0,045	0,07	0,07
0,335 +	0,088 4	199,04	0,17						
0,355	0,090	177,24		0,125					
0,375 +	0,111	158,84							
0,400	0,126	139,61							
0,425 +	0,141 8	123,66							
0,450	0,159	110,31	0,185	0,132					
0,475	0,177 2	99,004							
0,500	0,196	89,350							
0,530 +	0,221	79,519					0,055	0,086	0,086
0,560	0,346	71,230	0,215	0,145					
0,600 +	0,283	62,049							
0,630	0,312	56,279							
0,670 +	0,353	49,760							
0,710	0,396	44,311							
0,750	0,442	39,710							
0,800	0,503	34,903	0,22				0,07	0,106	0,106
0,850	0,567	30,916		0,155	0,24	0,24			
0,900	0,636	27,576							
0,950	0,709	24,751							
1,000	0,785	22,332							

P - 3 - pokračování - Měděné izolované dráty pro vinutí podle ČSN 3473 - viz.[1], Tab. D

3.1., str. 651

Průměr jádra (mm)	Průřez jádra (mm ²)	Střední odpor při 20 °C (Ω · km ⁻¹)	Největší oboustranný izolační přírůstek (mm)						
			2B	L2H	2KT	2KS	T	2T	2I
1,06	0,882	19,880	0,27		0,27	0,27	0,095	0,14	0,14
1,12	0,985	17,807							
1,18	1,094	16,042							
1,25	1,227	14,296							
1,32	1,369	12,820							
1,40	1,539	11,397							
1,50	1,767	9,927 8							
1,60	2,011	8,725 6							
1,70	2,270	7,729 1	0,275	—					
1,80	2,545	6,895 0							
1,90	2,835	6,187 6	0,325		0,3	0,3	0,12	0,18	—
2,00	3,142	5,584 3							
2,12	3,530	4,969 9							
2,24	3,941	4,451 7							
2,36	4,374	4,010 6	—						
2,50	4,909	3,574 1							
2,65	5,515	3,180 7	0,335				0,15	0,24	
2,80	6,158	2,849 1							
3,00	7,069	2,481 9							
3,15	7,793	1,962 0	0,385		0,345	0,365			
Tepelná třída izolace			A	A	F	H	B	B	F

Poznámky: 1. Hliníkové vodiče se vyrábějí až od průměru 0,5 mm.

2. Uvedeny jsou izolace nejběžněji používané:

2B — dvojnásobné protisměrné opředění bavlnou nebo umělou přízí,

L2H — lakovaný drát s dvojnásobným opředěním hedvábím,

2KT — dvojnásobné opředění skleněnou přízí (podlepenou), lakované tereftalátovým lakem,

2KS — dvojnásobné opředění skleněnou přízí, lakované silikonovým lakem,

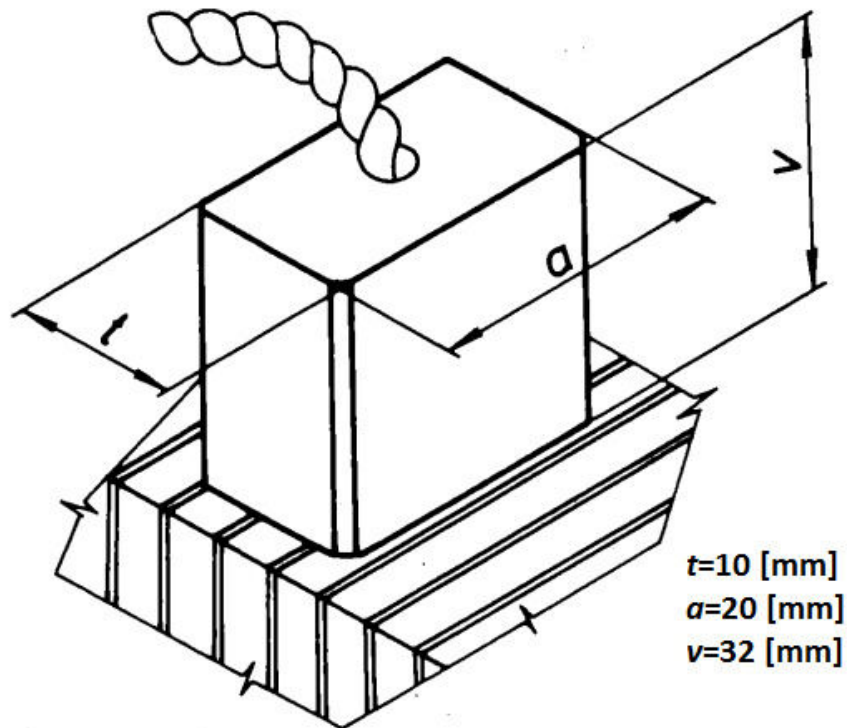
T — jednoduchá izolace tereftalátovým lakem,

2T — zesílená izolace tereftalátovým lakem,

2I — zesílená izolace polyesterimidovým lakem.

3. Jmenovité průměry označené křížkem (+) se nedoporučují na nové výrobky.

P - 4 - Rozměry kartáčů - viz.[1], Tab. D.5.1., str. 666

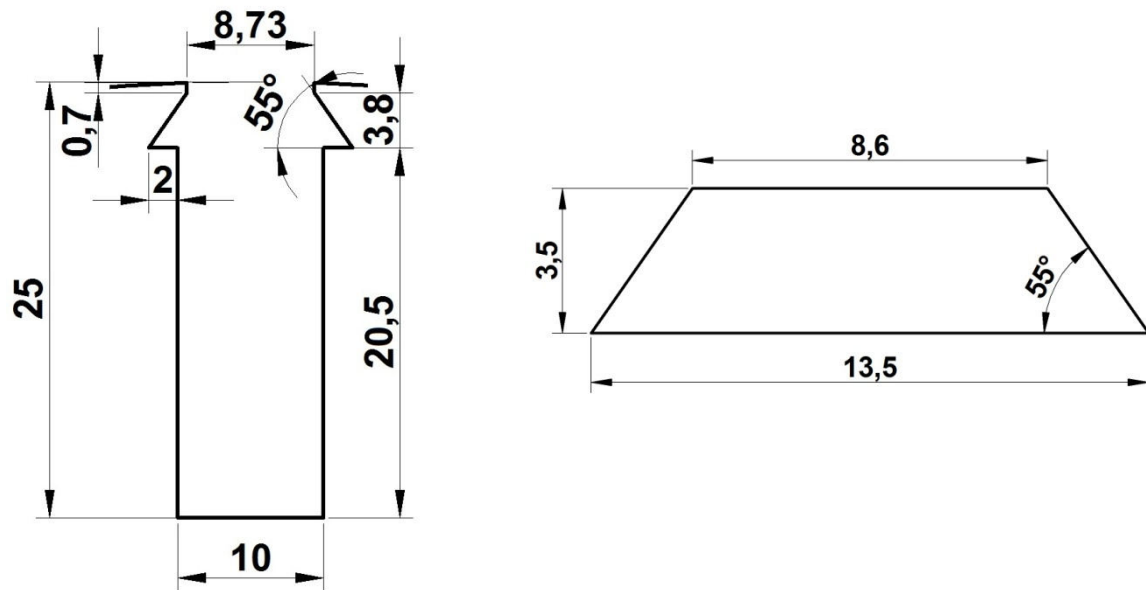


Tečný rozměr t (mm)	Osový rozměr a (mm)													
	2,5	3,2	4	5	6,3	8	10	12,5	16	20	25	32	40	50
4	10	10	—	10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	—	—	—	12,5	12,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	—	—	—	—	16	16	16	—	—	—	—	—	—	—
	—	—	—	—	—	20	20	—	—	—	—	—	—	—
5	—	12,5	12,5	—	12,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	—	—	—	—	16	16	16	—	—	—	—	—	—	—
	—	—	—	—	—	20	20	20	20	—	—	—	—	—
	—	—	—	—	—	25	25	25	25	25	—	—	—	—
	—	—	—	—	—	—	—	32	32	32	32	32	—	—
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	40	40	—	—
6,3	—	12,5	12,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	—	—	16	16	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	—	—	—	—	—	20	20	20	—	—	—	—	—	—
	—	—	—	—	—	25	25	25	25	25	—	—	—	—
	—	—	—	—	—	—	32	32	32	32	32	32	—	—
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	40	40	40	—	—
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	50	50	50	—	—
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

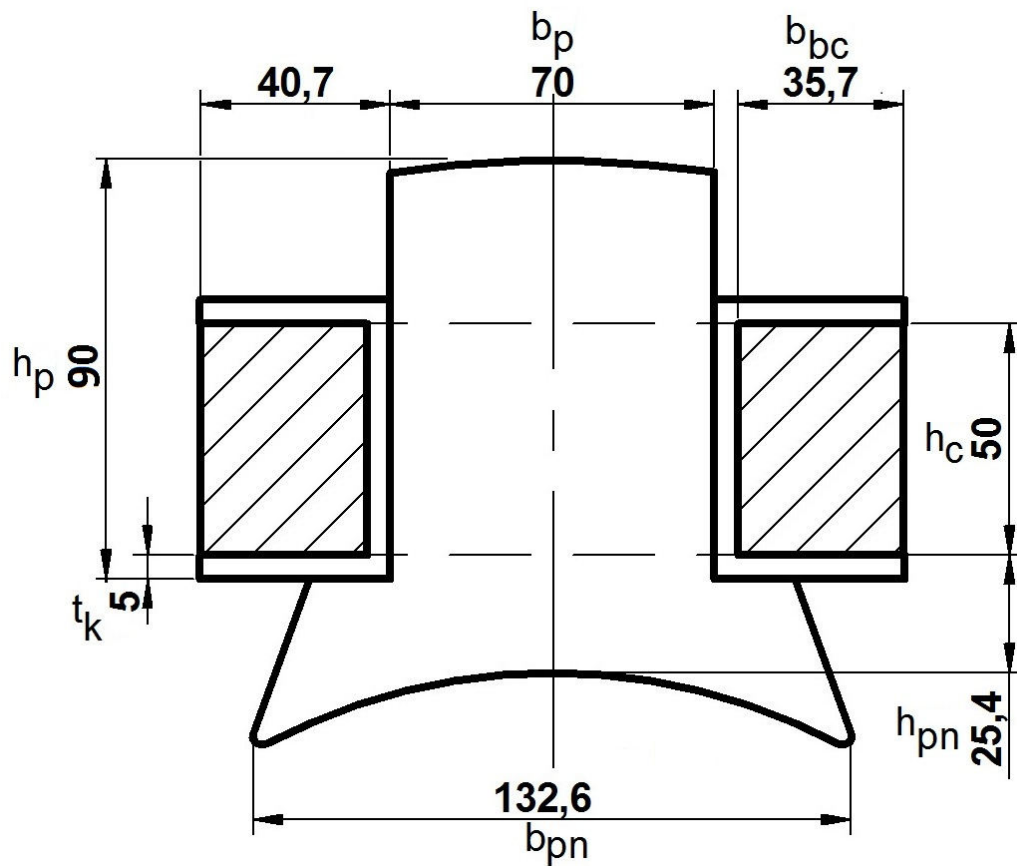
P - 4 - pokračování - Rozměry kartáčů - viz.[1], Tab. D.5.1., str. 667

Tečný rozměr t (mm)	Osový rozměr a (mm)													
	2,5	3,2	4	5	6,3	8	10	12,5	16	20	25	32	40	50
8	—	—	16	16	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	—	—	20	20	20	—	20	—	—	—	—	—	—	—
	—	—	—	—	—	—	25	25	25	25	—	—	—	—
	—	—	—	—	—	—	32	32	32	32	32	32	—	—
	—	—	—	—	—	—	—	—	40	40	40	40	40	—
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	50	50	50	50	—
10	—	—	—	16	16	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	—	—	—	20	20	20	—	—	—	—	—	—	—	—
	—	—	—	—	25	25	—	25	25	25	—	—	—	—
	—	—	—	—	—	32	—	32	32	32	32	32	—	—
	—	—	—	—	—	—	—	—	40	40	40	40	40	40
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	50	50	50	50	50
12,5	—	—	—	—	20	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	—	—	—	—	25	25	25	—	25	—	—	—	—	—
	—	—	—	—	—	32	32	—	32	32	32	32	—	—
	—	—	—	—	—	—	—	—	40	40	40	40	40	40
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	50	50	50	50	50
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	64	64	64	64
16	—	—	—	—	20	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	—	—	—	—	25	25	25	—	—	—	—	—	—	—
	—	—	—	—	—	32	32	32	—	32	32	32	—	—
	—	—	—	—	—	—	40	40	—	40	40	40	40	—
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	50	50	50	50	50
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	64	64	64	64
20	—	—	—	—	—	25	25	—	—	—	—	—	—	—
	—	—	—	—	—	32	32	32	32	—	32	32	—	—
	—	—	—	—	—	—	40	40	40	—	40	40	40	—
	—	—	—	—	—	—	—	50	50	—	50	50	50	50
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	64	64	64	64
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	80	80	80
25	—	—	—	—	—	32	32	32	32	32	—	—	—	—
	—	—	—	—	—	40	40	40	40	40	—	40	40	—
	—	—	—	—	—	50	50	50	50	50	—	50	50	50
	—	—	—	—	—	—	—	—	64	64	—	64	64	64
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	100	100
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	100

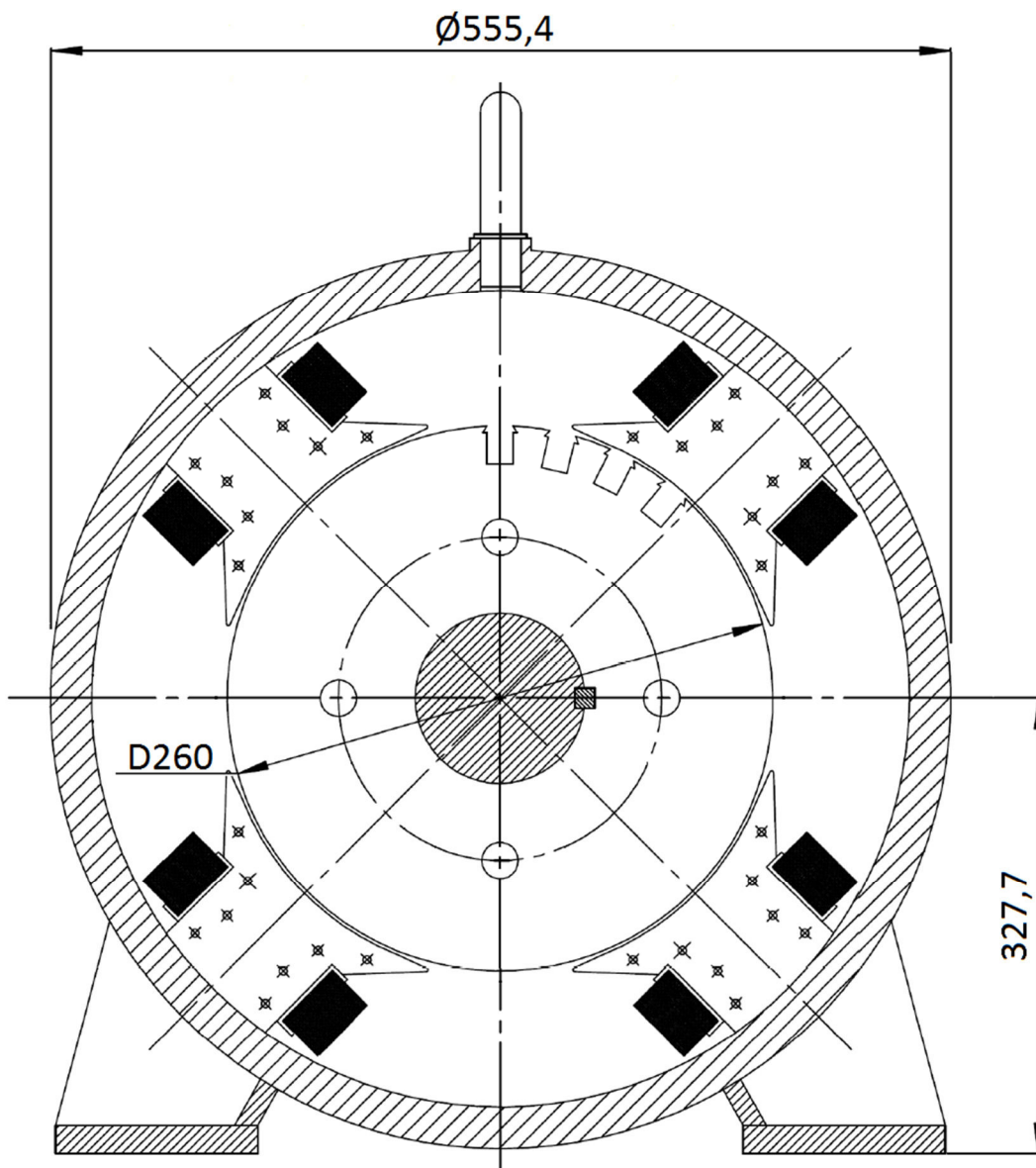
P - 5 - Drážka N - rozměry a klín drážky - rozměry



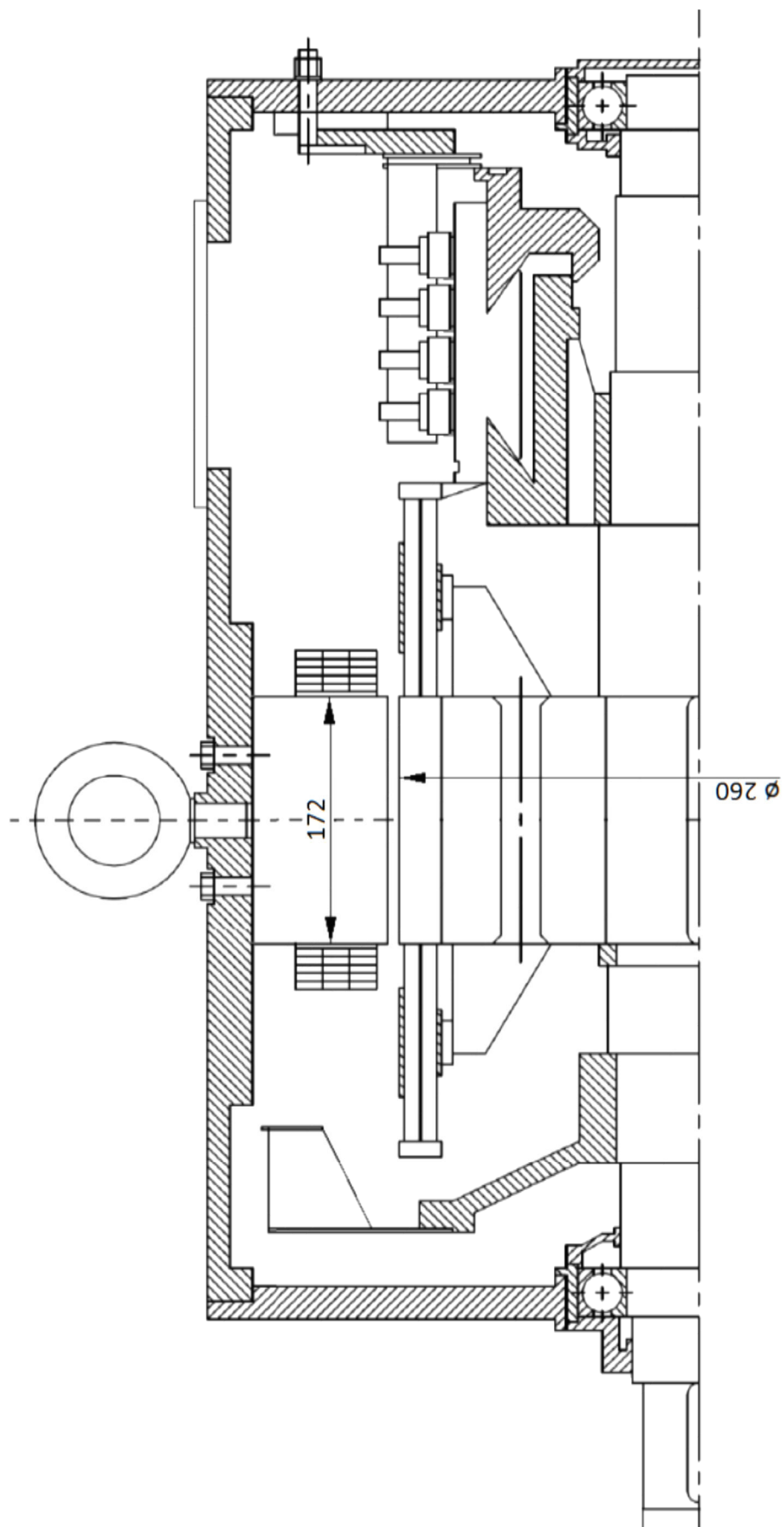
P - 6 - Rozměry hlavního pólu



P - 7 - Příčný řez stroje



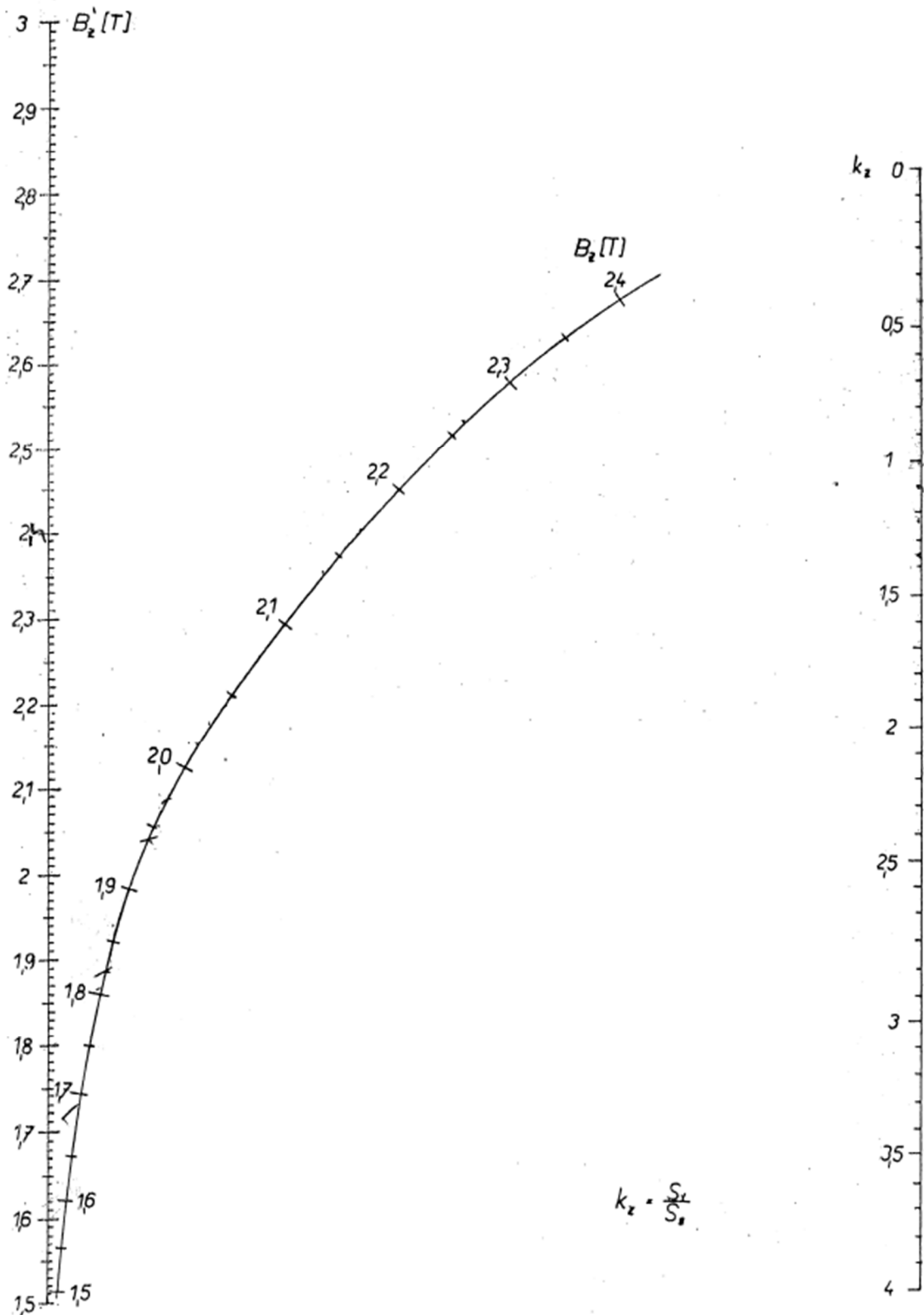
P - 8 - Podélný řez stroje



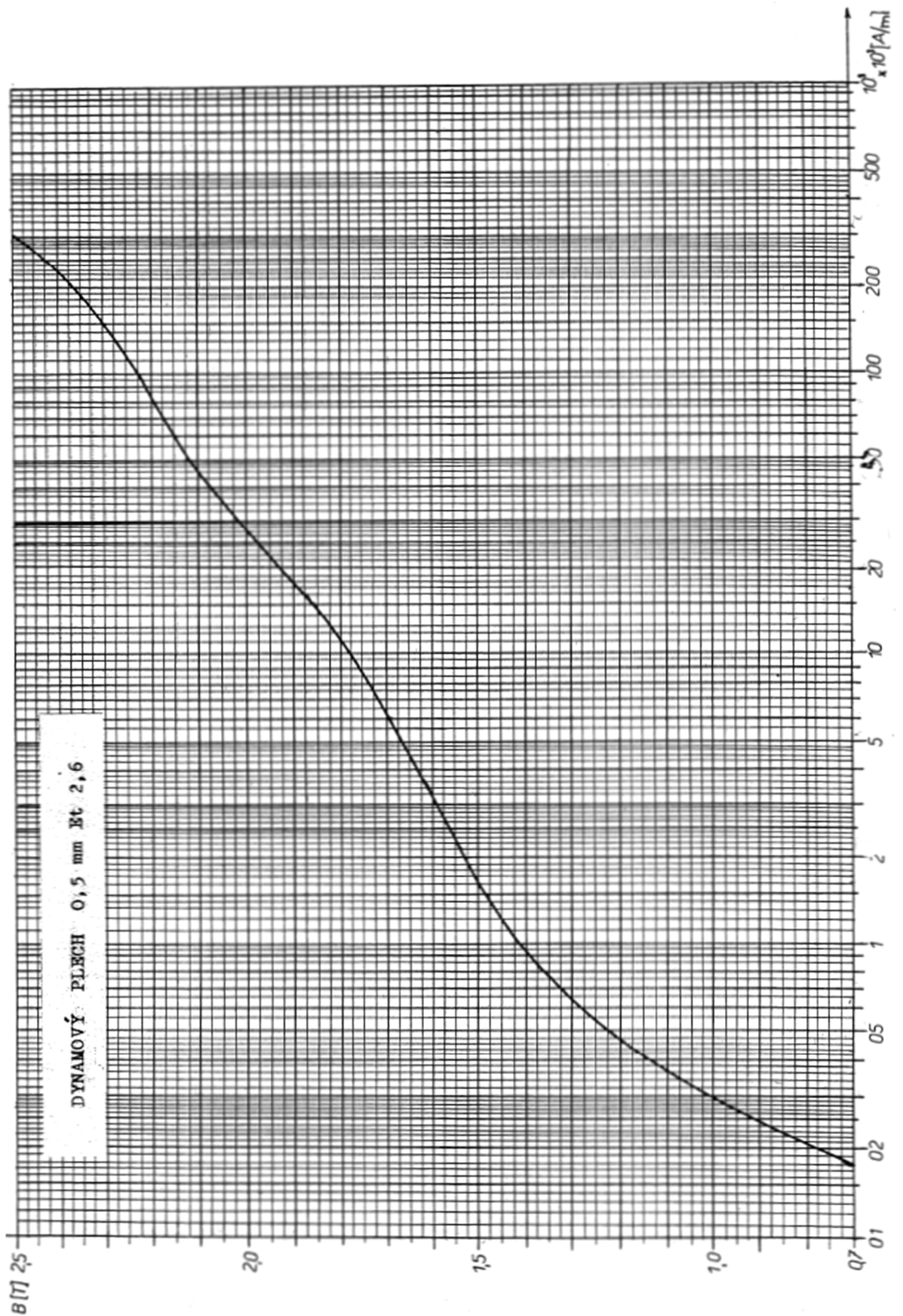
P - 9

NOMOGRAM K URČENÍ SKUTEČNÉ INDUKCE V ZUBECH INDUKTU

Dynamový plech tl.0,5 $\Delta p_{Fe10} = 1,8$



P - 10



P - 11 - Tabulka výpočtu charakteristiky naprázdno

D1=D	D1= 260	$t_{d1}= 21,50$	$z_1= 11,50$	$k_{z1}= 1,01$	$B'_{z1}= 1,61$	$B_{z1}= 1,6$	$H_{z1}= 3200$	$H_{zst}= 9533,33$	$F_z= 238,33$
D2=D-h	D2= 235	$t_{d2}= 19,43$	$z_2= 9,43$	$k_{z2}= 1,22$	$B'_{z2}= 1,77$	$B_{z2}= 1,75$	$H_{z2}= 8500$		
D3=D-2h	D3= 210	$t_{d3}= 17,36$	$z_3= 7,36$	$k_{z3}= 1,54$	$B'_{z3}= 2,03$	$B_{z3}= 1,93$	$H_{z3}= 20000$		
k_1 = 0,4				$k_1 \cdot \phi$	$B'_{z1}= 0,64$ $B'_{z2}= 0,71$ $B'_{z3}= 0,81$	$B_{z1}= 0,64$ $B_{z2}= 0,71$ $B_{z3}= 0,81$	$H_{z1}= 150$ $H_{z2}= 180$ $H_{z3}= 210$	$H_{zst}= 180,00$	$F_z= 4,50$
k_2 = 0,5				$k_2 \cdot \phi$	$B'_{z1}= 0,80$ $B'_{z2}= 0,89$ $B'_{z3}= 1,01$	$B_{z1}= 0,80$ $B_{z2}= 0,89$ $B_{z3}= 1,01$	$H_{z1}= 205$ $H_{z2}= 250$ $H_{z3}= 300$	$H_{zst}= 250,83$	$F_z= 6,27$
k_3 = 0,6				$k_3 \cdot \phi$	$B'_{z1}= 0,97$ $B'_{z2}= 1,06$ $B'_{z3}= 1,22$	$B_{z1}= 0,97$ $B_{z2}= 1,06$ $B_{z3}= 1,22$	$H_{z1}= 280$ $H_{z2}= 320$ $H_{z3}= 500$	$H_{zst}= 343,33$	$F_z= 8,58$
k_4 = 0,7				$k_4 \cdot \phi$	$B'_{z1}= 1,13$ $B'_{z2}= 1,24$ $B'_{z3}= 1,42$	$B_{z1}= 1,13$ $B_{z2}= 1,24$ $B_{z3}= 1,42$	$H_{z1}= 380$ $H_{z2}= 520$ $H_{z3}= 1050$	$H_{zst}= 585,00$	$F_z= 14,63$
k_5 = 0,8				$k_5 \cdot \phi$	$B'_{z1}= 1,29$ $B'_{z2}= 1,42$ $B'_{z3}= 1,62$	$B_{z1}= 1,29$ $B_{z2}= 1,42$ $B_{z3}= 1,61$	$H_{z1}= 650$ $H_{z2}= 800$ $H_{z3}= 3100$	$H_{zst}= 1158,33$	$F_z= 28,96$
k_6 = 0,9				$k_6 \cdot \phi$	$B'_{z1}= 1,45$ $B'_{z2}= 1,60$ $B'_{z3}= 1,83$	$B_{z1}= 1,45$ $B_{z2}= 1,59$ $B_{z3}= 1,79$	$H_{z1}= 950$ $H_{z2}= 3050$ $H_{z3}= 10000$	$H_{zst}= 3858,33$	$F_z= 96,46$
k_7 = 1				$k_7 \cdot \phi$	$B'_{z1}= 1,61$ $B'_{z2}= 1,77$ $B'_{z3}= 2,03$	$B_{z1}= 1,6$ $B_{z2}= 1,75$ $B_{z3}= 1,93$	$H_{z1}= 3200$ $H_{z2}= 8500$ $H_{z3}= 20000$	$H_{zst}= 9533,33$	$F_z= 238,33$
k_8 = 1,1				$k_8 \cdot \phi$	$B'_{z1}= 1,77$ $B'_{z2}= 1,95$ $B'_{z3}= 2,23$	$B_{z1}= 1,75$ $B_{z2}= 1,91$ $B_{z3}= 2,07$	$H_{z1}= 8500$ $H_{z2}= 19500$ $H_{z3}= 28000$	$H_{zst}= 19083,33$	$F_z= 477,08$
k_9 = 1,2				$k_9 \cdot \phi$	$B'_{z1}= 1,93$ $B'_{z2}= 2,13$ $B'_{z3}= 2,43$	$B_{z1}= 1,89$ $B_{z2}= 2,04$ $B_{z3}= 2,16$	$H_{z1}= 18700$ $H_{z2}= 26000$ $H_{z3}= 61000$	$H_{zst}= 30616,67$	$F_z= 765,42$
k_{10} = 1,3				$k_{10} \cdot \phi$	$B'_{z1}= 2,09$ $B'_{z2}= 2,30$ $B'_{z3}= 2,64$	$B_{z1}= 2,02$ $B_{z2}= 2,13$ $B_{z3}= 2,23$	$H_{z1}= 22000$ $H_{z2}= 59000$ $H_{z3}= 98000$	$H_{zst}= 59333,33$	$F_z= 1483,33$
k_{11} = 1,4				$k_{11} \cdot \phi$	$B'_{z1}= 2,25$ $B'_{z2}= 2,48$ $B'_{z3}= 2,84$	$B_{z1}= 2,15$ $B_{z2}= 2,2$ $B_{z3}= 2,29$	$H_{z1}= 60250$ $H_{z2}= 96000$ $H_{z3}= 102000$	$H_{zst}= 91041,67$	$F_z= 2276,04$
k_{12} = 1,5				$k_{12} \cdot \phi$	$B'_{z1}= 2,41$ $B'_{z2}= 2,66$ $B'_{z3}= 3,04$	$B_{z1}= 2,19$ $B_{z2}= 2,27$ $B_{z3}= 2,34$	$H_{z1}= 93000$ $H_{z2}= 101000$ $H_{z3}= 180000$	$H_{zst}= 112833,33$	$F_z= 2820,83$
k_{13} = 1,6				$k_{13} \cdot \phi$	$B'_{z1}= 2,57$ $B'_{z2}= 2,84$ $B'_{z3}= 3,25$	$B_{z1}= 2,26$ $B_{z2}= 2,32$ $B_{z3}= 2,38$	$H_{z1}= 100500$ $H_{z2}= 170000$ $H_{z3}= 200000$	$H_{zst}= 163416,67$	$F_z= 4085,42$
k_{14} = 1,7				$k_{14} \cdot \phi$	$B'_{z1}= 2,73$ $B'_{z2}= 3,01$ $B'_{z3}= 3,45$	$B_{z1}= 2,32$ $B_{z2}= 2,37$ $B_{z3}= 2,41$	$H_{z1}= 170000$ $H_{z2}= 190000$ $H_{z3}= 230000$	$H_{zst}= 193333,33$	$F_z= 4833,33$
k_{15} = 1,8				$k_{15} \cdot \phi$	$B'_{z1}= 2,90$ $B'_{z2}= 3,19$ $B'_{z3}= 3,65$	$B_{z1}= 2,37$ $B_{z2}= 2,41$ $B_{z3}= 2,44$	$H_{z1}= 190000$ $H_{z2}= 230000$ $H_{z3}= 265000$	$H_{zst}= 229166,67$	$F_z= 5729,17$
k_{16} = 1,9				$k_{16} \cdot \phi$	$B'_{z1}= 3,06$ $B'_{z2}= 3,37$ $B'_{z3}= 3,85$	$B_{z1}= 2,39$ $B_{z2}= 2,43$ $B_{z3}= 2,47$	$H_{z1}= 220000$ $H_{z2}= 250000$ $H_{z3}= 270000$	$H_{zst}= 248333,33$	$F_z= 6208,33$

P - 12 - Charakteristika naprázdno

