

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Návrh stejnosměrného stroje s cizím buzením

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2017/2018

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**

Zadávací 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: $P=20$ kW, $U=220$ V, $n=1400$ ot/min, kompenzační vinutí, IP23, IM1001, IC01.
2. Provedte 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: **10. října 2017**

Termín odevzdání diplomové práce: **24. května 2018**


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




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

V Plzni dne 15. června 2017

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

stejnokmĚrný 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

V Plzni dne 24.5.2018

Jiří Kubát

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	9
Seznam symbolů	12
1. Návrh stejnosměrného stroje	17
1.1 Zadané parametry	17
1.2 Návrh rozměrů stroje a dalších parametrů stroje	17
1.3 Výpočet vinutí kotvy	19
1.3.1 Výpočet vinutí kotvy	22
1.4 Výpočet drážky kotvy a zubů kotvy	23
1.5 Stanovení rozměrů magnetického obvodu	25
1.6 Magnetická napětí v jednotlivých částech	26
1.7 Výpočet budícího vinutí hlavního pólu	29
1.8 Výpočet kompenzačního vinutí hlavního pólu	30
1.9 Výpočet komutačního pólu	33
1.10 Výpočet komutátoru	35
1.11 Ztráty a účinnost	36
1.11 Charakteristika naprázdno	39
1.12 Shrnutí základních rozměrů	39
Závěr	40
Použitá literatura	41
Přílohy	42
P – 1 - <i>Rozměry a průřezy (mm²) měděných a hliníkových vodičů pravoúhlého průřezu</i>	42
P – 2 - <i>Rozměry drážek pro vinutí</i>	43
P – 3 - <i>Měděné izolované dráty pro vinutí podle ČSN 3473</i>	44
P - 3 - <i>pokračování -Měděné izolované dráty pro vinutí podle ČSN 3473</i>	45
P - 4 - <i>Rozměry kartáčů</i>	46
P - 4 - <i>pokračování -Rozměry kartáčů</i>	47
P – 5 - <i>Tabulka výpočtů charakteristiky naprázdno</i>	48
P – 6 - <i>Charakteristika naprázdno</i>	49
P – 7 - <i>Magnetizační charakteristika dynamových plechů- viz.[3]</i>	50

P – 8 - Magnetizační charakteristika konstrukční oceli- viz.[3]	51
P – 9 - Nomogram skutečné indukce- viz.[3]	52
P – 10 - Graf pro určení Carterova činitele k_c - viz.[3]	53
P – 11 - Pilové schéma vinutí kotvy	54
P – 12 - Hvězdicový diagram vinutí kotvy	55
P – 13 - Schematický nákres příčného řezu stroje	56
P – 14 - Schematický nákres podélného řezu stroje	57

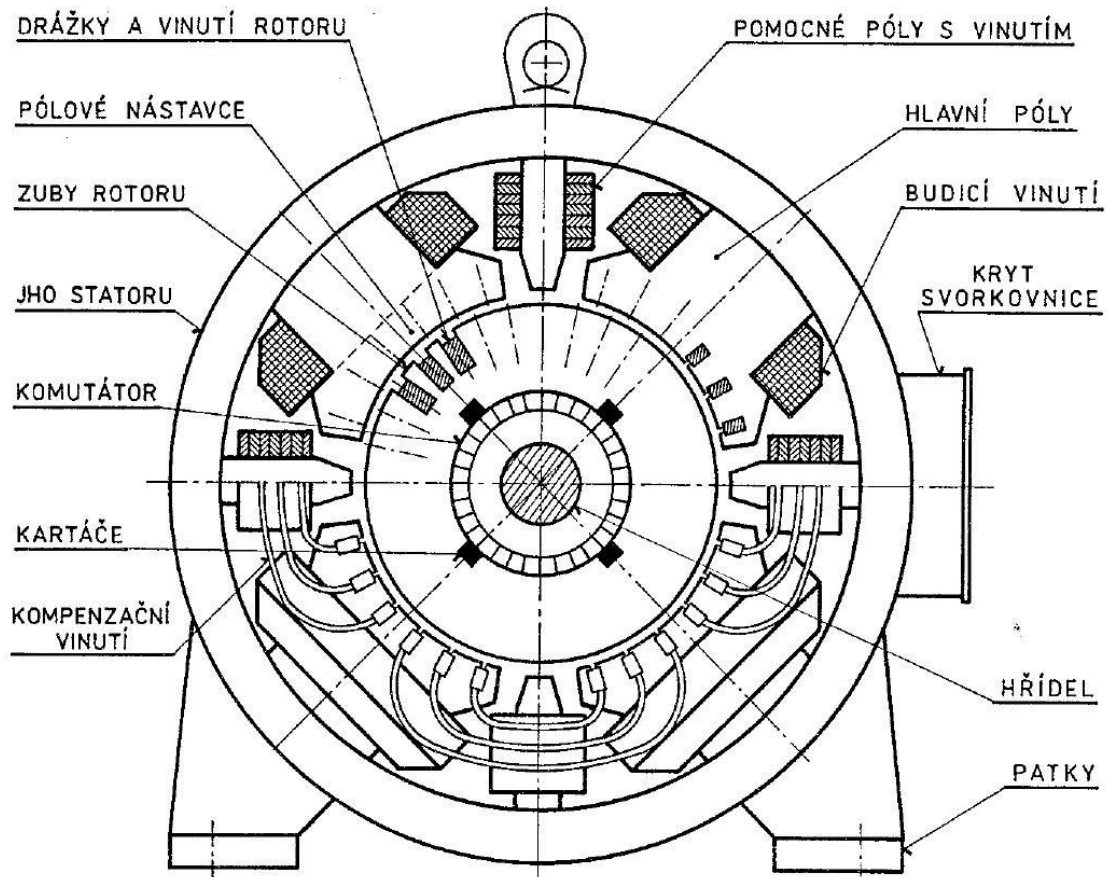
Úvod

Cílem předkládané práce je elektromagnetický návrh stejnosměrného motoru s cizím buzením a s kompenzačním vinutím. Samotný text je rozdělen do více částí, v každé části je prováděn výpočet a návrh určitých částí stroje. Součástí práce je potom schematický náčrtek příčného a podélného řezu stroje.

Stejnoseměrné stroje patří z historického hlediska mezi nejstarší točivé elektrické stroje. Vynálezcem stejnosměrných strojů byl v roce 1821 M. Faraday, ale v jeho době bylo výhodnější používat parní stroje, protože nepotřebovali ke své funkci drahé baterie, které byli jediným zdrojem elektrické energie v tehdejší době. V dnešní době se používají jako generátory nebo jako motory. Generátory jsou postupně nahrazovány polovodičovými měniči a motory jsou nahrazovány střídavými regulovanými pohony s asynchronními motory, ale pořád existují oblasti, kde je stejnosměrný stroj nenahraditelný pro své vlastnosti a speciální charakteristiky. Využití pro stejnosměrný stroj je zejména v trakcích a servopohonech.

Konstrukční uspořádání

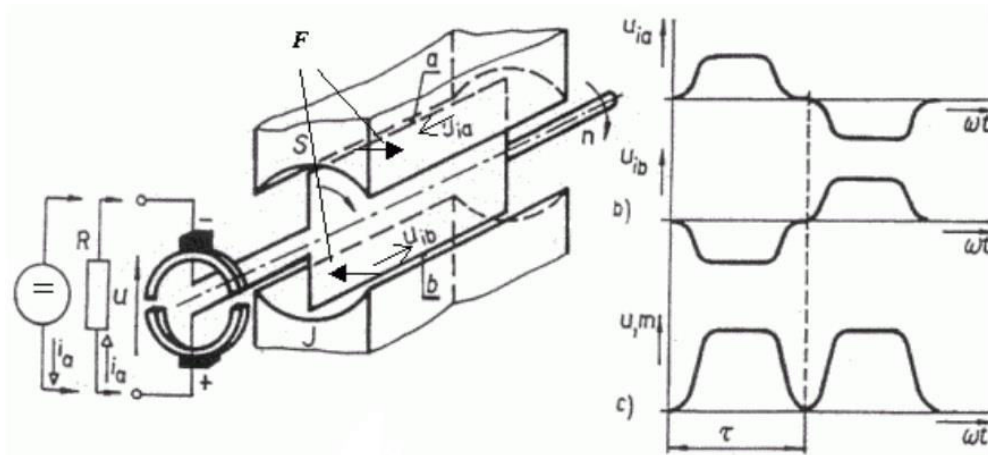
Stejnoseměrný stroj se skládá z těchto částí stator (kostra), rotor (kotva) a komutátor. Na statoru (kostře) jsou hlavní póly k vytvoření magnetického toku. Hlavní pól se skládá z pólového jádra a pólového nástavce, kde se může nacházet i kompenzační vinutí. Dále na statoru (kostře) mohou být pomocné (komutační) póly, které jsou umístěny mezi hlavní póly, a které kompenzují a demagnetizují účinek magnetického napětí reakce kotvy a kompenzují reaktanční napětí, které se indukují v komutující cívkě. Rotor (kotva) je složen z izolovaných křemíkových plechů. V rotoru (kotvě) jsou drážky, ve kterých je uloženo vinutí. Cívky rotoru (kotvy) tohoto vinutí jsou propojeny k měděným lamelám komutátoru, které jsou vzájemně odizolovány. Poslední částí je komutátor, který se nachází na hřídelce 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.



Obr.1.1 – Konstrukční uspořádání stejnosměrného stroje - viz.[9], Obr. 1, str. 2

Princip

Na budící vinutí hlavního pólu přivedeme stejnosměrný proud a vytvoříme magnetické pole statoru (kostry) nebo hlavní pól mohou tvořit permanentní magnety. Proud kotvy přivádíme přes kartáče komutátoru a vytvoříme magnetické pole rotoru (kotvy). Vzájemným působením magnetického pole statoru (kostry) a rotoru (kotvy) se začne stroj otáčet. Komutátor zajišťuje, že proud změni svoji polaritu ve vodiči při každém potočení rotoru, to má za následek, že se motor po potočení nezastaví.



Obr.1.2 – Princip stejnosměrného stroje - viz.[9], Obr. 2, str. 3

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 spouštění stejnosměrného stroje 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, který musíme omezit. Velikost záběru proudu omezíme spouštěním 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 se nachází 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
		-kv	Počet paralelních větví kompenzačního vinutí
a	[m];[mm]	-u	Délka kartáče
A	[A/m]		Velikost proudové hustoty po úpravě
A ^I	[A/m]		Předpokládaná obvodová proudová hustota
B	[T]	-δ	Indukce ve vzduchové mezeře
		-kp	Magnetická indukce v komutačním pólu
		-zkv	Magnetická indukce v nejmenším průřezu
		-δk	Magnetická indukce ve vzduchové mezeře
		-p	Předpokládaná indukce v hlavní pólu
		-js	Předpokládaná indukce ve jhu kostry
		-jr	Předpokládaná indukce ve jhu rotoru
		-Z1	Skutečná magnetická indukce v horní vrstvě
		-Z3	Skutečná magnetická indukce ve spodní vrstvě
		-Z2	Skutečná magnetická indukce ve střední vrstvě
		-zav	Střední indukce v zubu kotvy
B ^I	[T]	-Z1	Zdávlivá magnetická indukce v horní vrstvě
		-Z3	Zdávlivá magnetická indukce ve spodní vrstvě
		-Z2	Zdávlivá magnetická indukce ve střední vrstvě
b	[m];[mm]		Možná šířka drážky
		-dkv	Skutečná šířka drážky kompenzačního vinutí
		-zkv	Skutečná šířka zubu kompenzačního vinutí
		-z1	Skutečná šířka zubu kotvy v horní vrstvě
		-z3	Skutečná šířka zubu kotvy ve spodní vrstvě
		-z2	Skutečná šířka zubu kotvy ve střední vrstvě
		-ckv	Střední šířka cívky kompenzačního vinutí
		-zs	Střední šířka zubu kotvy
		-c	Šířka cívky hlavního pólu
		-ck	Šířka cívky komutačního pólu
		-d	Šířka drážky
		-p	Šířka hlavního pólu
		-u	Šířka kartáče
		-k	Šířka komutačního pásma ve vzduchové mezeře
		-kp	Šířka komutačního pólu
		-pn	Šířka pólového nástavce hlavního pólu
-z1/3	Šířka zubu v 1/3 drážky		
b ^I	[m];[mm]	-c	Předpokládaná tloušťka cívky hlavního pólu
		-dkv	Světlná šířka drážky kompenzačního vinutí
		-pn	Šířka pólového nástavce bez okrajů
		-zkv	Šířka zubu kompenzačního vinutí
C	[W.min/m ³ .ot]		Přepočítaný Essonův činitel
C ^I	[W.min/m ³ .ot]		Předpokládaný Essonův činitel

D	[m];[mm]		Vnější průměr kotvy		
		-hř	Nejmenší průměr hřídele		
		-k	Průměr komutátoru		
		-h	Průměr vnitřního povrchu hlavního pólu		
		✓-1	Skutečný průměr kotvy v horní vrstvě dráž		
		✓-3	Skutečný průměr kotvy ve spodní vrstvě d		
		✓-2	Skutečný průměr kotvy ve střední vrstvě c		
		-e	Skutečný vnější průměr kostry		
		-ei	Skutečný vnitřní průměr kostry		
		-i	Vnitřní průměr plechu kotvy		
D ^I	[m];[mm]	-e	Předpokládaný vnitřní průměr kostry		
E	[V]		Elektromagnetická síla		
		✓-1	Střední lamelové napětí		
f	[Hz]		Frekvence proudu v kotvě		
F	[A]	-kp	Magnetické napětí komutačního pólu		
		-a	Magnetické napětí reakce kotvy		
		-m	Magnetomotorická síla		
		-mk	Výsledné magnetické napětí komutačního		
H	[A/m]	-jr	Intenzita magnetického pole jha kotvy		
		-p	Intenzita magnetického pole v hlavním pó		
		-Z1	Intenzita magnetického pole v horní vrstv		
		-Z3	Intenzita magnetického pole ve spodní vr		
		-Z2	Intenzita magnetického pole ve střední vr		
		-Z	Střední hodnota magnetického pole v zub		
		-ZAV	Střední hodnota magnetického pole v zub		
h	[m];[mm]	-d	Hloubka drážky		
		-c	Výška cívky hlavního pólu		
		-ck	Výška cívky komutačního pólu		
		-p	Výška hlavního pólu		
		-pn	Výška jednoho pólového nástavce		
		-js	Výška jha kostry		
		-jr	Výška jha rotoru		
		-kp	Výška komutačního pólu		
h ^I	[m];[mm]		Předpokládaná hloubka drážky		
I	[A]	✓-1	Proud v kotvě		
		✓-2	Budící proud		
iv	[m];[mm]	✓-2	Oboustraný izolační přrůstek vodiče hlavr		
		-2k	Oboustraný izolační přrůstek vodiče komu		
k	[-]		Činitel rezervy buzení		
		-z2	Činitel k_z		
		-z3	Činitel k_z		
		-Fe	Činitel plnění železa		
		-c	Carterův činitel		
		✓-0	Činitel povrchových ztrát		

K	[-]		Počet lamel komutátoru	
L	[m];[mm]		Celková délka železa	
		-p	Délka hlavního pólu	
		-kp	Délka komutačního pólu	
		-k	Délka komutátoru	
		-e	Efektivní délka železa	
l	[m];[mm]	-a	Celková délka vodičů vinutí kotvy	
		-c	Délka čela tyčového vinutí	
		-js	Délka indukční čáry ve jhu kostry	
		-jr	Délka indukční čáry ve jhu kotvy	
		-c	Chladící obvod cívky hlavního pólu	
		-ck	Chladící obvod cívky komutačního pólu	
		-i	Ideální délka kotvy	
		-p	Přibližná délka indukční čáry v hlavním pólu	
		-čkv	Střední délka čel kompenzačního vinutí	
		-dkv	Střední délka přímkové části cívky kompenzačního vinutí	
		-kvav	Střední délka půlsvitu kompenzačního vinutí	
		-s	Střední délka závitů hlavního pólu	
		-sk	Střední délka závitů komutačního pólu	
		-ZAV	Střední délka závitů vinutí kotvy	
l'	[m];[mm]	-s	Předpokládaná střední délka závitů hlavního pólu	
m	[kg]	-Fejr	Hmotnost jha kotvy	
		-Fez	Hmotnost zubů kotvy	
N	[-]	-iu	Celkový počet vodičů pro jednu vrstvu vinutí	
		-i	Celkový počet vodičů vinutí kotvy	
		-b	Celkový počet závitů jedné cívky hlavního pólu	
		-ck	Celkový počet závitů jedné cívky komutačního pólu	
		-u	Počet kartáčů na roubík	
		-2	Počet závitů jedné cívky hlavního pólu	
		-2k	Počet závitů jedné cívky komutačního pólu	
-s	Počet závitů kotvy v sérii po úpravě			
N'	[-]	-s	Počet závitů kotvy v sérii	
n	[ot/min]		Otáčky	
n	[-]	-d	Počet vodičů v drážce	
		-dkv	Počet vodičů v drážce kompenzačního vinutí	
∅	[Wb]		Magnetický tok jednoho pólu	
		-k	Magnetický tok komutačního pólu	
∅	[m];[mm]	-2	Průměr budícího vodiče	
P	[-]	-h	Počet paprsků hvězdice	

P	[kW];[W]		Výkon stroje		
		-z	Celkové ztráty		
		-m	Mechanické ztráty podle typového výkonu		
		-d	Přídavné ztráty		
		-i	Vnitřní výkon		
		-c	Ztráty oteplením v cívce hlavního pólu		
		-ck	Ztráty oteplením v cívce komutačního pólu		
		-Δ	Ztráty přechodem		
		-tk	Ztráty třením kartáčů		
		-Cu2	Ztráty v hlavních pólech		
		-kv	Ztráty v kompenzačním vinutí		
		-k	Ztráty v komutačních pólech		
		-Fez	Ztráty v železe v zubech kotvy		
		-Fejr	Ztráty v železe ve jhu kotvy		
-Cu1	Ztráty ve vinutí kotvy				
P ^l	[kW];[W]	-Cu1	Předpokládané ztráty v mědi		
p	[kPa]		Měrný tlak kartáče		
Pi/n	[W/ot/min]		Vnitřní výkon kotvy na otáčku		
Q	[-]		Počet drážek		
		-kv	Počet drážek kompenzačního vinutí		
		-p	Počet drážek na pól		
R	[Ω]	-kv(20°C)	Odpor kompenzačního vinutí při 20°C		
		-kv(75°C)	Odpor kompenzačního vinutí při 75°C		
		-k(20°C)	Odpor komutačního pólu při 20°C		
		-k(75°C)	Odpor komutačního pólu při 75°C		
		-2(20°C)	Odpor vinutí hlavního pólu při 20°C		
		-2(75°C)	Odpor vinutí hlavního pólu při 75°C		
		-1(20°C)	Odpor vinutí kotvy při 20°C		
-1(75°C)	Odpor vinutí kotvy při 75°C				
R ^l	[Ω]	-1	Předpokládaný odpor vinutí kotvy		
S	[m ²];[mm ²]	-c	Chladící povrch cívky hlavního pólu		
		-ck	Chladící povrch cívky komutačního pólu		
		-Cu2	Průřez drátu budící cívky		
		-kv	Průřez vodiče kompenzačního vinutí		
		-kp	Průřez vodiče komutačního pólu		
		-Cu1	Průřez vodiče kotvy		
		-u	Styková plocha kartáče		
-2	Zvolený průřez vodiče kostry				
-1	Zvolený průřez vodiče kotvy				
t	[m];[mm]	-dkv	Drážková rozteč kompenzačního vinutí		
		-1	Rozteč drážek ve vzduchové mezeře		
		-1k	Rozteč lamel komutátoru		
		-1/3	Rozteč v 1/3 od kořene		
		-d1	Skutečná rozteč drážek kotvy v horní vrstvě		
		-d3	Skutečná rozteč drážek kotvy ve spodní vrstvě		
-d2	Skutečná rozteč drážek kotvy ve střední vrstvě				

t^l	[m];[mm]	-1	Rozteč lamel redukována na obvod kotvy
U	[V]		Napětí
		-b	Budící napětí
U	[A]	-p	Magnetické napětí pro hlavní póly
		-js	Magnetické napětí pro jho kostry
		-jr	Magnetické napětí pro jho rotoru
		- δ	Magnetické napětí pro vzduchovou mezeru
		-z	Magnetické napětí pro zuby
u	[-]		Počet cívkových stran
v	[m/s]		Obvodová rychlost rotoru
		-k	Obvodová rychlost komutátoru
		-v	Rychlost vzduchu mezi póly
V	[-]	-2	Počet vrstev závitů jedné cívky hlavního p
		-2k	Počet vrstev závitů jedné cívky komutační
γ	[-]	-d1	Cívkový krok
		-k	Komutátorový krok
		-2	Zpětný cívkový krok
α	[-]	- δ	Činitel pólového krytí
α	[W/°Cm ²]	-2	Chladihost budící cívky
β	[-]		Krytí uhlíku
δ	[m];[mm]		Vzduchová mezera pod hlavním pólem
		-k	Vzduchová mezera pod komutačním pólem
ΔP	[W]	-p	Ztráty povrchové
Δv	[°C]	-c	Oteplení povrchu budící cívky
η^l	[%]		Předpokládaná účinnost
λ	[-]		Poměr délky kotvy k jejímu průměru
μ	[%]		Účinnost
ξ	[H/m]		Habartovo číslo
ρ	[kg/m ³]	-Fe	Hustota oceli
σ	[-]	-p	Činitel rozptylu hlavních pólů
σ	[A/mm ²]	-Cu1	Proudová hustota
		-u	Proudové zatížení elektrografitových kart
		-kv	Proudové zatížení vodiče kompenzačního
		-Cu2	Proudové zatížení budícího vodiče
τ	[m];[mm]	-p	Pólová rozteč

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

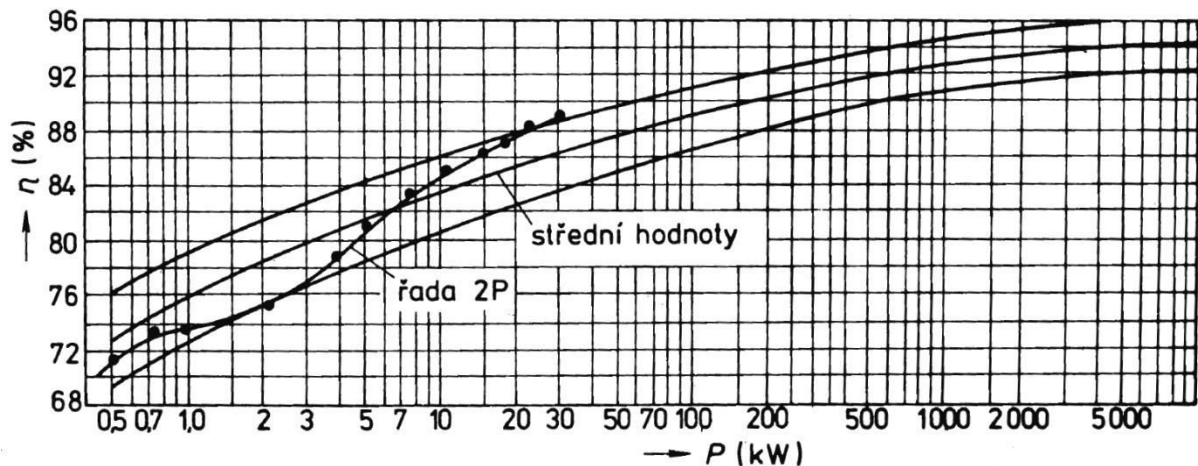
1.2 Návrh rozměrů stroje a dalších parametrů stroje

Předpokládaný Essonův činitel = strojová konstanta

$$C^I = \frac{\pi^2}{60} AB_{\delta} \alpha_{\delta} = \frac{\pi^2}{60} \cdot 22000 \cdot 0,65 \cdot 0,65 = 1528,97 [\text{W} \cdot \text{min} / \text{m}^3 \cdot \text{ot}] \quad (1)$$

Předpokládaná účinnost

$$\eta^I = 85,5 [\%].$$



Obr.1.3 - Závislost účinnosti η na jmenovitém výkonu - viz.[1], Obr. 8.6, str. 452

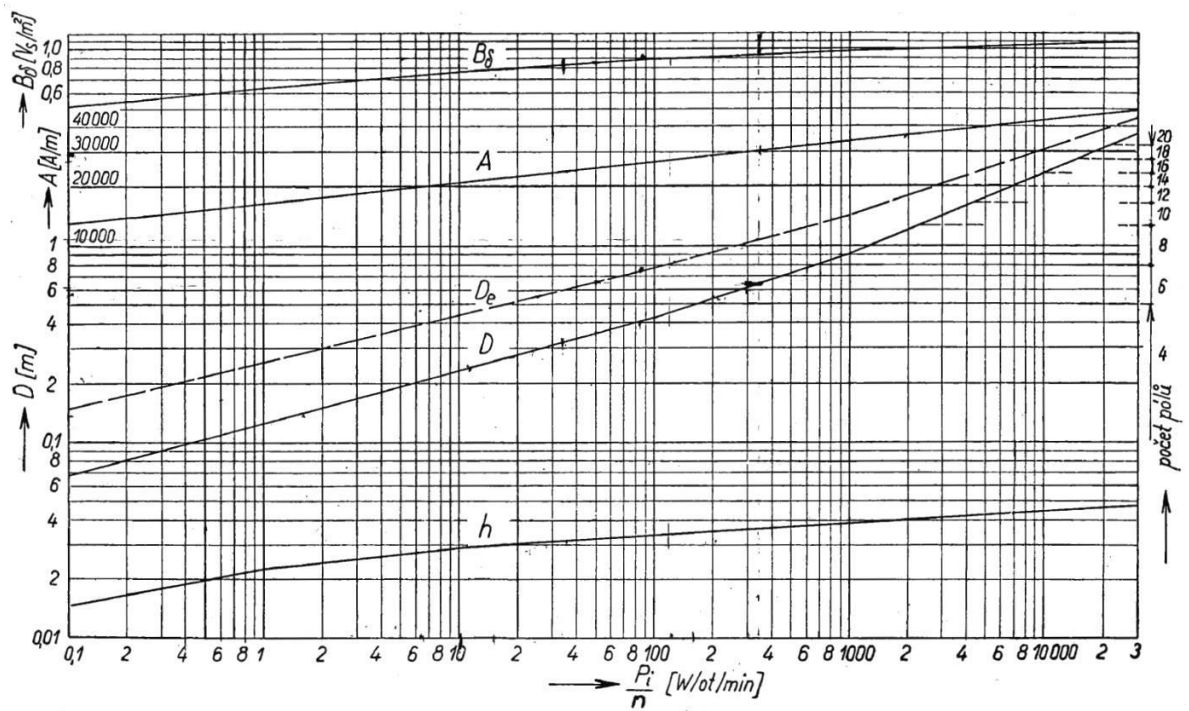
Vnitřní výkon kotvy na otáčku

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

Následující hodnoty byly odečteny z grafu na Obr.1.pro hodnotu vnitřního výkonu na otáčku

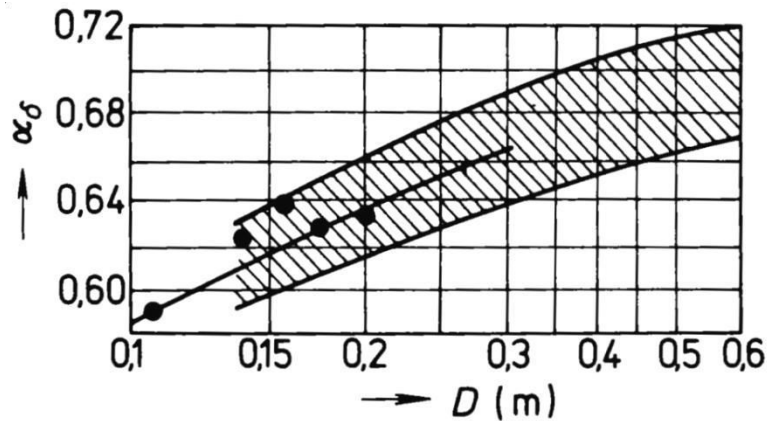
$$P_i/n=16,708[\text{W} / \text{ot} / \text{min}].$$

Vnější průměr kotvy	$D=0,26$ [m]
Předpokládaný vnitřní průměr kostry	$D_e^I=0,5$ [m]
Indukce ve vzduchové mezeře	$B_{\delta}=0,65$ [T]
Předpokládaná obvodová proudová hustota	$A^I=22000$ [A/m]



Obr.1.4 - Rozměry a využití stejnosměrných strojů - viz.[2], Obr. 765., str. 591

Činitel pólového krytí podle odečteme z grafu na Obr. 1.5, $\alpha_\delta=0,65$ pro $D=0,26$ [m]



Obr.1.5 - Závislost činitele pólového krytí $\alpha_\delta = f(D)$ -viz.[1], Obr. 8.7, str. 453

Vnitřní výkon

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

Ideální délka kotvy

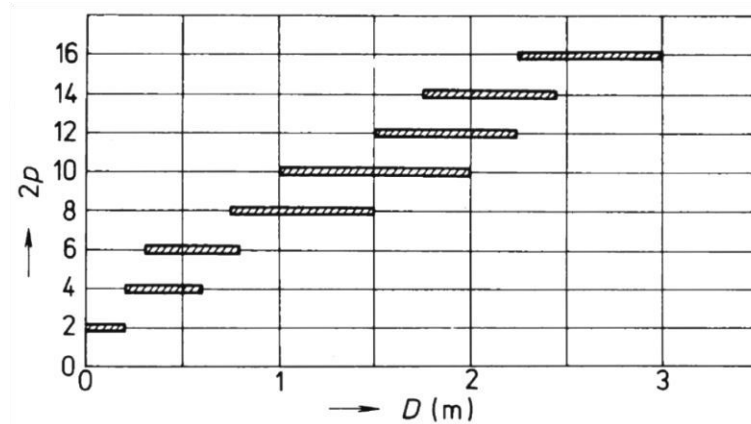
$$l_i = \frac{6,1P_i}{\alpha_\delta A^2 B_\delta D^2 n} = \frac{6,1 \cdot 23391,813}{0,65 \cdot 22000 \cdot 0,65 \cdot 0,26^2 \cdot 1400} = 0,162 \text{ [m]} \quad (4)$$

Poměr délky kotvy k jejímu průměru

$$\lambda = \frac{l_i}{D} = \frac{0,162}{0,26} = 0,624 \text{ [-]} \quad (5)$$

1.3 Výpočet vinutí kotvy

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



Obr.1.6- 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 $Q=36$.

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

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

Volím smyčkové vinutí, protože oproti vlnovému vinutí se převážně používá pro stroje s vyššími proudy a nízkým napětím, vinutí bude závitové. 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

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

Počet vodičů v drážce

$$n_d = \frac{4a N_s^I}{Q} = \frac{4 \cdot 2 \cdot 84}{36} = 18,67 \Rightarrow 18 \text{ [-]} \quad (10)$$

Volím počet vodičů v drážce 18, pro tento počet vodičů v drážce se musí upravit i počet závitů kotvy v sérii N_s , a velikost proudové hustoty A .

Počet závitů kotvy v sérii po úpravě

$$n_d = \frac{4aN_s}{Q} \rightarrow N_s = \frac{n_d \cdot Q}{4 \cdot a} = \frac{18 \cdot 36}{4 \cdot 2} = 81 [-] \quad (11)$$

Velikost proudové hustoty po úpravě

$$A = \frac{2 \cdot N_s \cdot I_1}{\pi \cdot D} = \frac{2 \cdot 81 \cdot 107}{\pi \cdot 0,26} = 21221,5 \doteq 21200 \text{ [A/m]} \quad (12)$$

Přepočítaný Essonův činitel = strojová konstanta

$$C = \frac{\pi^2}{60} AB_\delta \alpha_\delta = \frac{\pi^2}{60} \cdot 21200 \cdot 0,65 \cdot 0,65 = 1473,37 \doteq 1473,4 \text{ [W. min/m}^3 \cdot \text{ot]} \quad (13)$$

Počet cívkových stran

možné varianty cívkových stran

$$u=1 \dots z=9 \dots n_d=18$$

$$u=2 \dots z=4 \dots n_d=16$$

$$u=3 \dots z=3 \dots n_d=18$$

zvoleno

$$u = 3 [-] \dots z = 3 [-] \dots n_d = 18 [-]$$

Počet drážek na pól

$$Q_p = \frac{Q}{2p} = \frac{36}{4} = 9 [-] \quad (14)$$

Počet lamel komutátoru

$$K = u \cdot Q = 3 \cdot 36 = 108 [-] \quad (15)$$

Střední lamelové napětí

$$E_1 = \frac{2pU}{K} = \frac{2 \cdot 2 \cdot 220}{108} = 8,148 \doteq 8,15 \text{ [V]} \quad (16)$$

Střední lamelové napětí splňuje podmínku **E1<16 [V]**

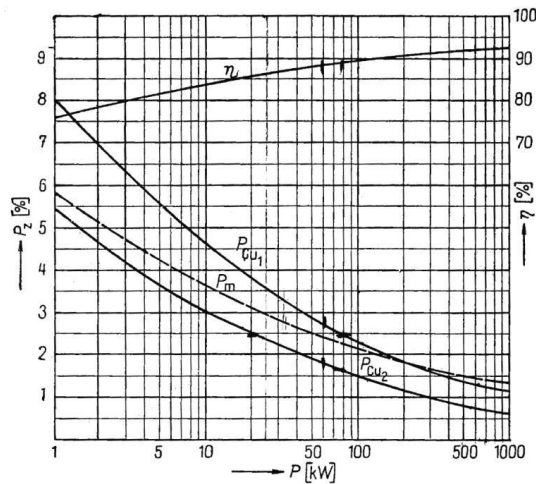
Předpokládané ztráty v mědi kotvy

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

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

Předpokládaný odpor vinutí kotvy

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



Obr. 1.7- Ztráty a účinnost stejnosměrných strojů -viz.[2], Obr. 723., str. 564

Elektromagnetická síla

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

Frekvence proudu v kotvě (rotoru)

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

Efektivní délka železa

$$P = C \cdot D_i^2 \cdot L_e \cdot n \Rightarrow L_e = \frac{P}{C \cdot D_i^2 \cdot n} = \frac{20000}{1473,4 \cdot 0,26^2 \cdot 1400} = 0,1434 \doteq 0,143 \text{ [m]} \quad (21)$$

Magnetický tok jednoho pólu

$$\Phi = B_\delta \cdot L_e \cdot \alpha_\delta \cdot \tau_p = 0,65 \cdot 0,143 \cdot 0,65 \cdot 0,204 = 0,01233 \doteq 0,0123 \text{ [Wb]} \quad (22)$$

Délka čela tyčového vinutí

$$l_c = 1,5\tau_p = 1,5 \cdot 0,204 = 0,306 \text{ [m]} \quad (23)$$

Celková délka železa (rotorového svazku)

$$L = L_e = l_d = 0,143 \text{ [m]} \quad (24)$$

Sřřední délka závitů vinutí kotvy

$$l_{ZAV} = 2 \cdot (l_d + l_c) = 2 \cdot (0,143 + 0,306) = 0,898 \text{ [m]} \quad (25)$$

Celkový počet vodičů vinutí kotvy

$$N_i = n_d \cdot Q = 18 \cdot 36 = 648 [-] \quad (26)$$

Celkový počet vodičů pro jednu vrstvu vinutí kotvy

$$N_{iu} = \frac{N_i}{2} = \frac{648}{2} = 324 [-] \quad (27)$$

Celková délka vodičů vinutí kotvy

$$l_a = N_{iu} \cdot l_{ZAV} = 324 \cdot 0,898 = 290,952 \doteq 290,95 \text{ [m]} \quad (28)$$

Odpor vinutí kotvy při 20°C

$$R_{1(20^\circ\text{C})} = \rho_v \frac{l_a}{(2 \cdot a)^2 \cdot S_{Cu}} = \frac{1}{57 \cdot 10^6} \cdot \frac{290,95}{(2 \cdot 2)^2 \cdot 5,35 \cdot 10^{-6}} = 0,0596 \text{ [\Omega]} \quad (29)$$

Odpor vinutí kotvy při 75°C

$$R_{1(75^\circ\text{C})} = R_{1(20^\circ\text{C})} \cdot \frac{57}{48} = 0,0596 \cdot \frac{57}{48} = 0,07078 \doteq 0,0708 \text{ [\Omega]} \quad (30)$$

1.3.1 Výpočet vinutí kotvy

Vypočtené parametry

$$Q=36$$

$$K=108$$

$$a=2$$

$$p=2$$

$$u=3$$

Samotný výpočet

Komutátorový krok

$$y_k = \frac{a}{p} = \frac{2}{2} = 1[-] \quad (31)$$

Pólová rozteč

$$Q_p = \frac{Q}{2 \cdot p} = \frac{36}{2 \cdot 2} = 9[-] \quad (32)$$

Zvolen plný drážkový krok $y_{d1} = 9[-]$

Cívkový krok

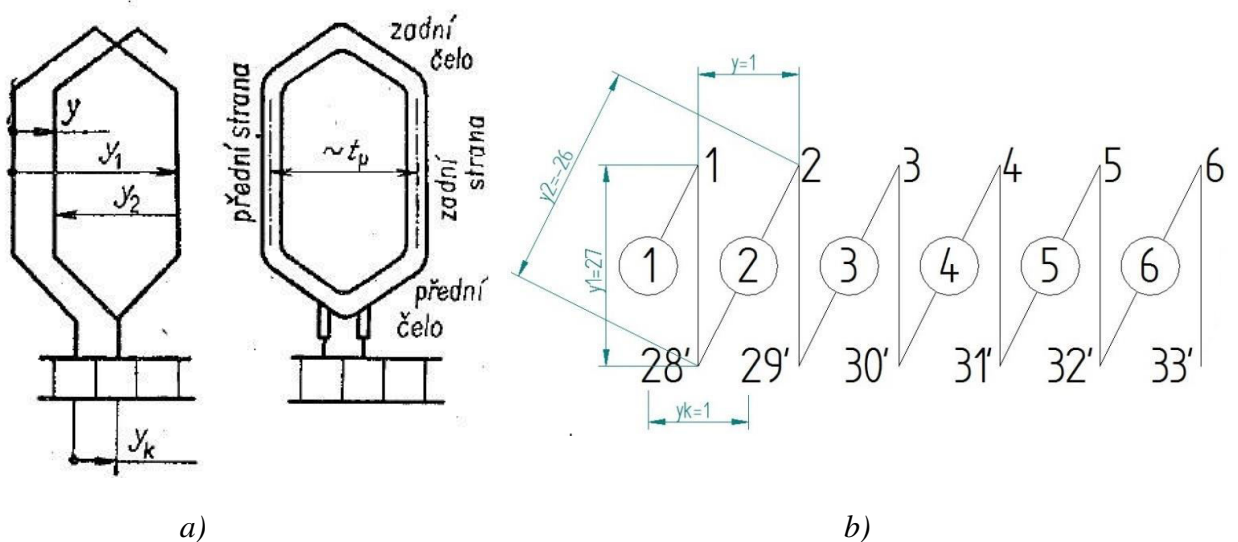
$$y_1 = u \cdot y_{d1} = 3 \cdot 9 = 27[-] \quad (33)$$

Zpětný cívkový krok

$$y_2 = y_k - y_1 = 1 - 27 = -26[-] \quad (34)$$

Počet paprsků hvězdice

$$P_h = \frac{Q}{p} = \frac{36}{2} = 18[-] \quad (35)$$



**Obr.1.8 - a) Smyčkové vinutí a význam kroků - viz.[4], Obr. 25., str. 80
b) Ukázka výpočtu pilového schématu**

1.4 Výpočet drážky kotvy a zubů kotvy

Předpokládaná hloubka drážky odečtena z grafu **Obr.1**.

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

Průřez vodiče kotvy

$$S_{Cu1} = \frac{I_1}{2a \cdot \sigma_{Cu1}} = \frac{107}{2 \cdot 2 \cdot 5} = 5,35 \text{ [mm}^2\text{]} \quad (37)$$

Pro výpočet průřezu vodiče byla zvolena proudová hustota $\sigma_{Cu1} = 5[-]$

Vypočítanému průřezu vodiče se nejvíce přibližuje vodič o rozměrech 2 x 2,8[mm].

Vodič bude uložen v drážce typu **N**, v drážce budou 3 cívkové strany uspořádané podle **Obr. 1.9**, jedna cívková strana se bude skládat ze svazku, složených ze tří ($z = 3$) vodičů. Z uspořádání vodičů je potom možné stanovit šířku a výšku drážky.

Rozteč drážek ve vzduchové mezeře

$$t_1 = \frac{\pi D}{Q} = \frac{\pi \cdot 0,26}{36} = 0,02269 \text{ [m]} \doteq 22,7 \text{ [mm]} \quad (38)$$

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

$$t_{1/3} = \frac{\pi (D - \frac{4}{3}h)}{Q} = \frac{\pi (260 - \frac{4}{3}30)}{36} = 19,19 \doteq 19,2 \text{ [mm]} \quad (39)$$

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

Šířka zubu v 1/3 drážky

$$b_{z1/3} = t_1 \frac{B_\delta}{0,9 \cdot B_{1/3}} = 22,7 \frac{0,65}{0,9 \cdot 2,2} = 7,452 \doteq 7,45 \text{ [mm]} \quad (40)$$

Možná šířka drážky

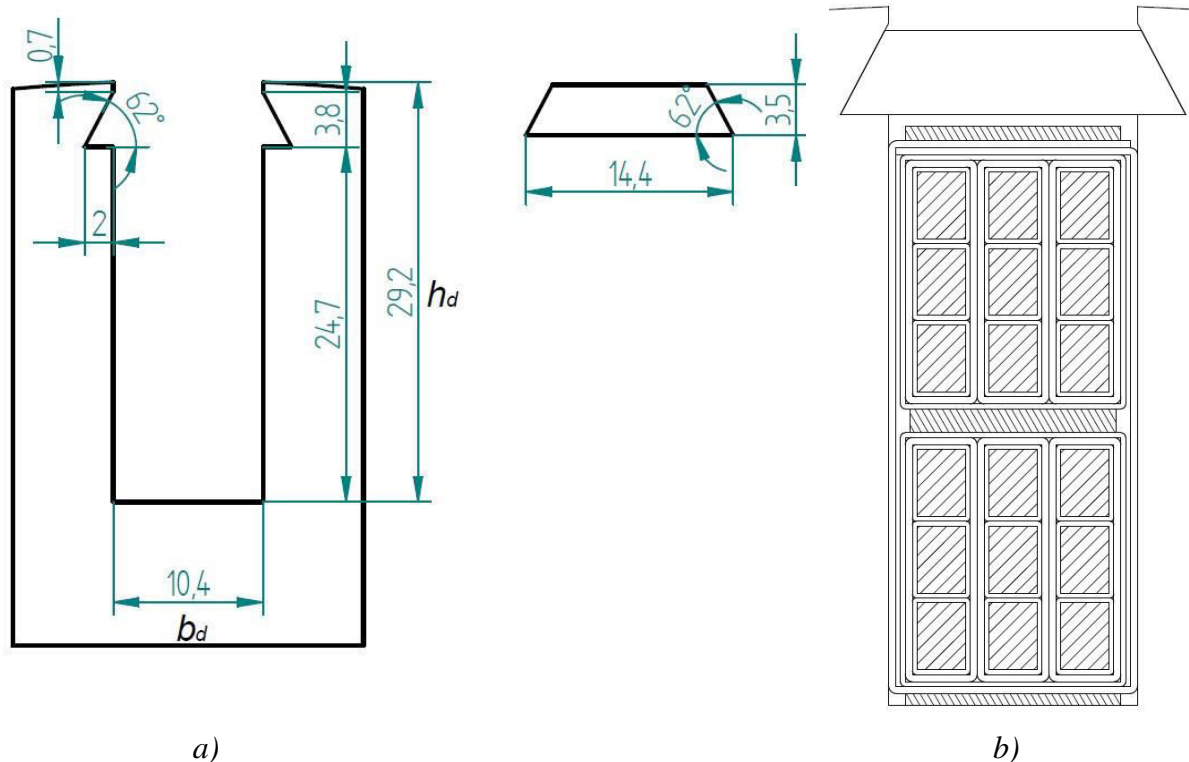
$$b = t_{1/3} - b_{z1/3} = 19,2 - 7,45 = 11,75 \text{ [mm]} \quad (41)$$

Šířka drážky

Izolace vodiče	6 x 0,2[mm]	= 1,2[mm]
Izolace svazku vodičů	6 x 0,3[mm]	= 1,8[mm]
Izolace drážky	2 x 0,3[mm]	= 0,6[mm]
Izolace cívky	2 x 0,2[mm]	= 0,4[mm]
Vůle	0,4[mm]	= 0,4[mm]
Šířka vodiče	3 x 2[mm]	= 6,0[mm]
Celkem		10,4[mm]

Hloubka drážky

Vložka na dno	1 x 0,5[mm]	= 0,5[mm]
Izolace vodiče	12 x 0,2[mm]	= 2,4[mm]
Izolace svazku vodičů	4 x 0,3[mm]	= 1,2[mm]
Izolace drážky	3 x 0,3[mm]	= 0,9[mm]
Izolace cívky	4 x 0,2[mm]	= 0,8[mm]
Vložka mezi vrstvami	1[mm]	= 1[mm]
Vložka pod klín	0,6[mm]	= 0,6[mm]
Výřez pro klín	3,8[mm]	= 3,8[mm]
Výška krčku	0,7[mm]	= 0,7[mm]
Vůle	0,5[mm]	= 0,5[mm]
Výška vodiče	6 x 2,8[mm]	= 16,8[mm]
Celkem		29,2[mm]



Obr.1.9 - a) Rozměry drážky a vloženého klínu
b) Ukázka výplně drážky kotvy

1.5 Stanovení rozměrů magnetického obvodu

Výška jha rotoru

$$h_{jr} = \frac{\emptyset}{2L_e \cdot 0,9B_{jr}} = \frac{0,0123}{2 \cdot 0,143 \cdot 0,9 \cdot 1,3} = 0,03676 \doteq 0,037 [\text{m}] \quad (42)$$

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

Vnitřní průměr plechů kotvy

$$D_i = D - 2h - 2h_{jr} = 0,26 - 2 \cdot 0,0292 - 2 \cdot 0,037 = 0,1276 \doteq 0,128 [\text{m}] \quad (43)$$

Vzduchová mezera pod hlavním pólem

$$\delta = 0,45 \cdot 10^{-6} \cdot \tau_p \cdot \frac{A}{B_\delta} = 0,45 \cdot 10^{-6} \cdot 204 \cdot \frac{22530}{0,8} = 2,99 \doteq 3 [\text{mm}] \quad (44)$$

Délka hlavního pólu

$$L_p = L = 0,143 [\text{m}]$$

Výška hlavního pólu

$$h_p = 0,3 \cdot \tau_p = 0,3 \cdot 0,204 = 61,2 [\text{mm}] \quad (45)$$

Výška jednoho pólového nástavce hlavního pólu

$$h_{pn} = 0,1 \cdot \tau_p = 0,1 \cdot 0,204 = 0,0204 [\text{m}] = 20,4 [\text{mm}] \quad (46)$$

Šířka pólového nástavce hlavního pólu

$$b_{pn} = \alpha \cdot \tau_p = 0,65 \cdot 0,204 = 0,1326 [\text{m}] = 132,6 [\text{mm}] \quad (47)$$

Šířka hlavního pólu

$$b_p = \frac{\emptyset \cdot (1+\nu)}{B_p \cdot L} = \frac{0,0123 \cdot (1+0,2)}{1,5 \cdot 0,143} = 0,06881 \doteq 0,069 [\text{m}] \quad (48)$$

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

Výška jha kostry

$$h_{js} = \frac{\emptyset \cdot (1+\nu)}{2B_{js}(L+b_p)} = \frac{0,0123 \cdot (1+0,2)}{2 \cdot 1,1 \cdot (0,143+0,069)} = 0,03165 \doteq 0,032 [\text{m}] \quad (49)$$

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

Carterův činitel pro vzduchovou mezeru

$$k_c = 1,25 [-]$$

Odečten z grafu **P-10**

Magnetické napětí pro vzduchovou mezeru

$$U_\delta = 0,8 \cdot 10^6 \cdot B_\delta k_c \delta = 0,8 \cdot 10^6 \cdot 0,65 \cdot 1,25 \cdot 0,003 = 1950 [\text{A}] \quad (50)$$

1.6 Magnetická napětí v jednotlivých částech

Skutečný průměr kotvy v horní vrstvě drážky

$$D_1 = D = 0,26 \text{ [m]} \Rightarrow 260 \text{ [mm]} \quad (51)$$

Skutečný průměr kotvy ve střední vrstvě drážky

$$D_2 = D - h = 260 - 29,2 = 230,8 \text{ [mm]} \quad (52)$$

Skutečný průměr kotvy vespodní vrstvě drážky

$$D_3 = D - 2 \cdot h = 260 - 2 \cdot 29,2 = 201,6 \text{ [mm]} \quad (53)$$

Skutečná rozteč drážek kotvy v horní vrstvě

$$t_{d1} = t_1 = \frac{\pi \cdot D_1}{Q} = \frac{\pi \cdot 0,26}{36} = 0,02269 \text{ [m]} \doteq 22,7 \text{ [mm]} \quad (54)$$

Skutečná rozteč drážek kotvy ve střední vrstvě

$$t_{d2} = \frac{\pi \cdot D_2}{Q} = \frac{\pi \cdot 0,2308}{36} = 0,02014 \text{ [m]} \doteq 20,1 \text{ [mm]} \quad (55)$$

Skutečná rozteč drážek kotvy ve spodní vrstvě

$$t_{d3} = \frac{\pi \cdot D_3}{Q} = \frac{\pi \cdot 0,2016}{36} = 0,01759 \text{ [m]} \doteq 17,6 \text{ [mm]} \quad (56)$$

Skutečná šířka zubu kotvy v horní vrstvě

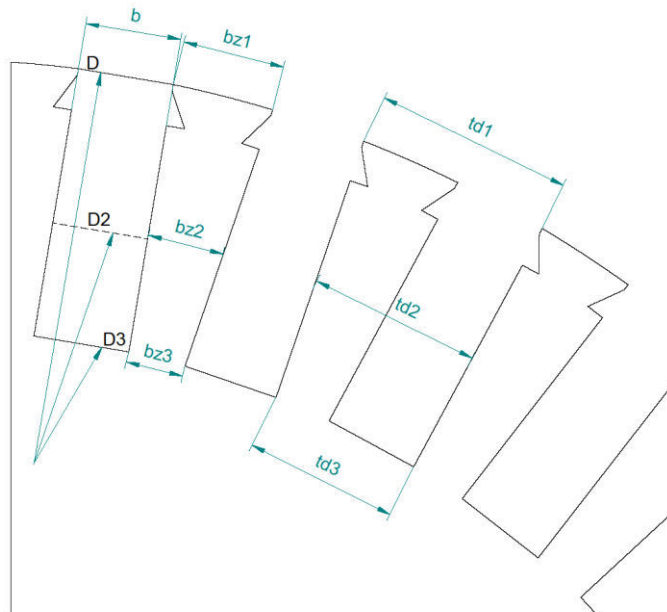
$$b_{z1} = t_{d1} - b = 22,7 - 10,4 = 12,3 \text{ [mm]} \quad (57)$$

Skutečná šířka zubu kotvy ve střední vrstvě

$$b_{z2} = t_{d2} - b = 20,1 - 10,4 = 9,7 \text{ [mm]} \quad (58)$$

Skutečná šířka zubu kotvy ve spodní vrstvě

$$b_{z3} = t_{d3} - b = 17,6 - 10,4 = 7,2 \text{ [mm]} \quad (59)$$



Obr.1.10 - Rozměry drážky a šířky zubu v jednotlivých vrstvách vloženého klínu

Činitel plnění železa k_{Fe}

$k_{Fe} = 0,93[-]$ zvoleno

Zdánlivá magnetická indukce v horní vrstvě drážky

$$B_{Z1}^I = \frac{B_\delta \cdot t_{d1}}{k_{Fe} \cdot b_{z1}} = \frac{0,65 \cdot 22,7}{0,93 \cdot 12,3} = 1,289 \doteq 1,29 [\text{T}] \quad (60)$$

Zdánlivá magnetická indukce B_{Z1}^I se rovná skutečné magnetické indukci B_{Z1} a odpovídá jí podle **P-9** intenzita magnetického pole $H_{Z1} = 630 [\text{A} \cdot \text{m}^{-1}]$

Zdánlivá magnetická indukce ve střední vrstvě drážky

$$B_{Z2}^I = \frac{B_\delta \cdot t_{d1}}{k_{Fe} \cdot b_{z2}} = \frac{0,65 \cdot 22,7}{0,93 \cdot 9,7} = 1,635 \doteq 1,64 [\text{T}] \quad (61)$$

Činitel k_{z2}

$$k_{z2} = \frac{t_{d2}}{k_{Fe} \cdot b_{z2}} - 1 = \frac{20,1}{0,93 \cdot 9,7} - 1 = 1,228 \doteq 1,23 [-] \quad (62)$$

Zdánlivé magnetické indukci B_{Z2}^I odpovídá skutečná magnetická indukce $B_{Z2} = 1,63 [\text{T}]$ a podle **P-9** jí odpovídá intenzita magnetického pole $H_{Z2} = 3800 [\text{A} \cdot \text{m}^{-1}]$

Magnetická indukce ve spodní vrstvě drážky

$$B_{Z3}^I = \frac{B_\delta \cdot t_{d1}}{k_{Fe} \cdot b_{z3}} = \frac{0,65 \cdot 22,7}{0,93 \cdot 7,2} = 2,203 \doteq 2,2 [\text{T}] \quad (63)$$

Činitel k_{z3}

$$k_{z3} = \frac{t_{d3}}{k_{Fe} \cdot b_{z3}} - 1 = \frac{17,6}{0,93 \cdot 7,2} - 1 = 1,635 \doteq 1,64 [\text{T}] \quad (64)$$

Zdánlivé magnetické indukci B_{Z2}^I odpovídá skutečná magnetická indukce $B_{Z3} = 2,05 [\text{T}]$ a podle **P-9** jí odpovídá intenzita magnetického pole $H_{Z3} = 34000 [\text{A} \cdot \text{m}^{-1}]$

Střední hodnota intenzity magnetického pole v zubech kotvy (rotoru)

$$H_Z = H_{ZAV} = \frac{H_{Z1} + 4 \cdot H_{Z2} + H_{Z3}}{6} = \frac{630 + 4 \cdot 3800 + 34000}{6} = 8305 [\text{A} \cdot \text{m}^{-1}] \quad (65)$$

Magnetické napětí pro zuby

$$U_z = h H_Z = 0,0292 \cdot 8305 = 242,5 [\text{A}] \quad (66)$$

Podle grafu **P-7** odpovídá indukci $B_{jr} = 1,3 [\text{T}]$ intenzita $H_{jr} = 650 [\text{A/m}]$

Délka indukční čáry ve jhu

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

Magnetické napětí pro jho rotoru

$$U_{jr} = l_{jr} \cdot H_{jr} = 0,204 \cdot 650 = 132,6 [\text{A}] \quad (67)$$

Skutečný vnitřní průměr kostry

$$D_{ei} = D + 2 \cdot (\delta + h_p + h_{pn}) = 260 + 2 \cdot (3 + 61,2 + 20,4) = 429,2 [\text{mm}] \quad (68)$$

Skutečný vnější průměr kostry

$$D_e = D + 2 \cdot (\delta + h_p + h_{pn} + h_{js}) = 260 + 2 \cdot (3 + 61,2 + 20,4 + 32) = 493,2 [\text{mm}] \quad (69)$$

Přibližná délka indukční čáry v hlavním pólu

$$l_p = h_p + h_{pn} = 61,2 + 20,4 = 81,6 [\text{mm}] \quad (70)$$

Podle grafu **P-7** odpovídá indukci $B_p = 1,5$ [T] intenzita $H_p = 2500$ [A/m]

Magnetické napětí pro hlavní póly

$$U_p = l_p H_p = 0,0816 \cdot 2500 = 204 \text{ [A]} \quad (71)$$

Délka indukční čáry ve jhu kostry

$$l_{js} = \frac{\pi D_e}{2 \cdot 2p} = \frac{\pi \cdot 0,4932}{2 \cdot 2} = 0,19368 \doteq 0,194 \text{ [m]} = 194 \text{ [mm]} \quad (72)$$

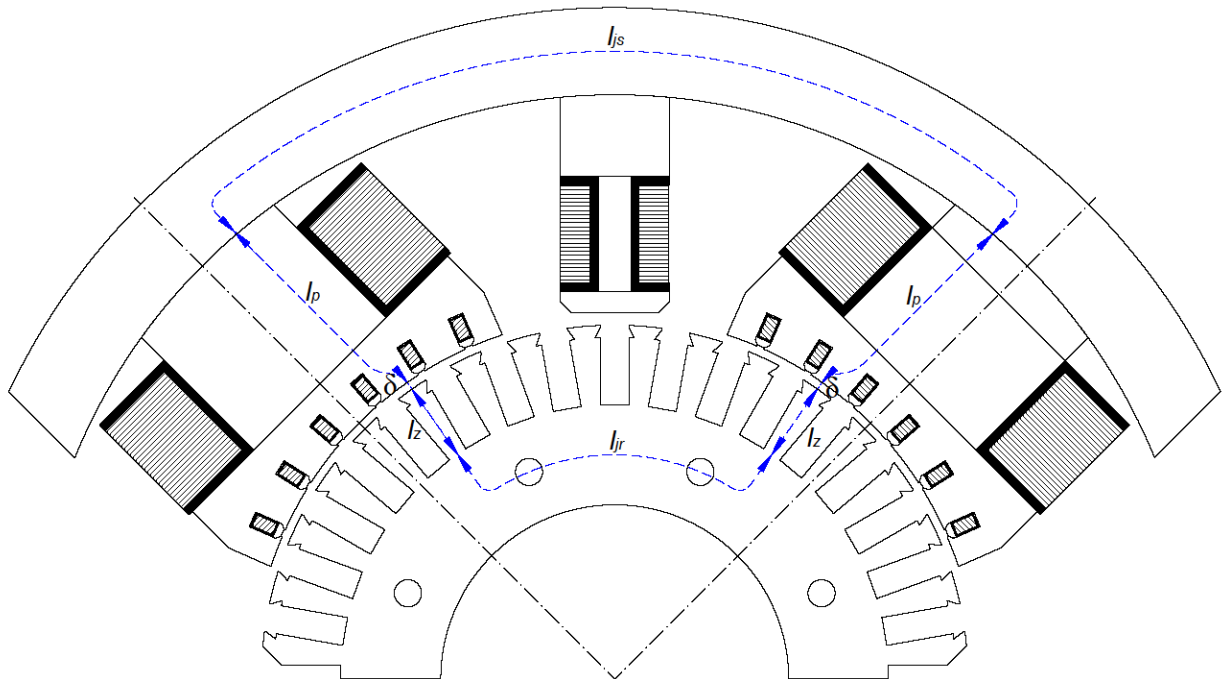
Podle grafu **P-8** odpovídá indukci $B_{js} = 1,1$ [T] intenzita $H_{js} = 360$ [A/m]

Magnetické napětí pro jho kostry

$$U_{js} = l_{js} \cdot H_{js} = 0,194 \cdot 360 = 69,84 \text{ [A]} \quad (73)$$

Magnetomotorická síla

$$F_m = 1,05 \cdot (U_\delta + U_z + U_{jr} + U_p + U_{js}) = 1,05 \cdot (1950 + 242,5 + 132,6 + 204 + 69,84) = 2728,89 \doteq 2729 \text{ [A]} \quad (74)$$



Obr.1.11 - Znáznornění délek indukčních čar

1.7 Výpočet budícího vinutí hlavního pólu

Budící napětí zvoleno $U_b = 200$ [V]

Předpoklad tloušťky cívky je $b_c^I = 40$ [mm]

Předpokládaná střední délka závitů hlavního pólu

$$l_s^I = 2(L_p + b_p) + \pi b_c^I = 2 \cdot (0,143 + 0,069) + \pi \cdot 0,04 \doteq 0,549 \doteq 0,55 \text{ [m]} \quad (75)$$

Průřez drátu budící cívky

$$S_{Cu2} = \frac{\rho \cdot p \cdot F_m \cdot l_s^I}{k \cdot U} = \frac{10^{-6} \cdot 2 \cdot 2803 \cdot 0,55}{48 \cdot 0,9 \cdot 200} = 0,69488 \doteq 0,695 \text{ [mm}^2\text{]} \quad (76)$$

Činitel rezervy buzení $k = 0,9$ [–]

Zvolen vodič o průřezu $S_2 = 0,709$ [mm²]; $\phi_2 = 0,950$ [mm]

Budící proud

Proudové zatížení vodičů se volí $\sigma_{Cu2} = 2,5 \div 4$ [A/mm²], zvoleno $\sigma_{Cu2} = 3,2$ [A/mm²]

$$I_2 = \sigma_{Cu2} \cdot S_2 = 3,2 \cdot 0,709 = 2,2688 \doteq 2,27 \text{ [A]} \quad (77)$$

Celkový počet závitů jedné cívky hlavního pólu

$$N_b = \frac{F_m}{I_2} = \frac{2729}{2,27} = 1202,2 \doteq 1200 \text{ [–]} \quad (78)$$

Cívka hlavního pólu bude obsahovat $N_2 = 40$ [–] závitů po $V_2 = 32$ [–] vrstvách, vodič bude mít izolaci, jejíž oboustranný přírůstek se rovná $iv_2 = 0,05$ [mm].

Výška cívky hlavního pólu

$$h_c = N_2 \cdot (\phi_2 + iv_2) + v_{\text{úle}} = 40 \cdot (0,95 + 0,05) + 0,5 = 40,5 \text{ [mm]} \quad (79)$$

Šířka cívky hlavního pólu

$$b_c = V_2 \cdot (\phi_2 + iv_2) + v_{\text{úle}} = 30 \cdot (0,95 + 0,05) + 0,5 = 30,5 \text{ [mm]} \quad (80)$$

Střední délka závitů hlavního pólu

$$l_s = 2(L_p + b_p) + \pi b_c = 2 \cdot (0,143 + 0,069) + \pi \cdot 0,0325 = 0,51982 \doteq 0,52 \text{ [m]} \quad (81)$$

Chladicí obvod cívky hlavního pólu

$$l_c = 2(L_p + b_p) + 2 \cdot \pi \cdot b_c = 2 \cdot (0,143 + 0,069) + 2 \cdot \pi \cdot 0,0325 = 0,6156 \doteq 0,616 \text{ [m]} \quad (82)$$

Chladicí povrch cívky hlavního pólu

$$S_c = l_c \cdot h_c = 0,616 \cdot 0,0405 = 0,02495 \doteq 0,025 \text{ [m}^2\text{]} \quad (83)$$

Obvodová rychlost rotoru

$$v = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{60} = \frac{\pi \cdot 0,26 \cdot 1400}{60} = 19,059 \doteq 19,06 \text{ [m/s]} \quad (84)$$

Rychlost vzduchu mezi póly

$$v_v = 0,4 \cdot v = 0,4 \cdot 19,06 = 7,624 \text{ [m/s]} \quad (85)$$

Rychlost vzduchu mezi póly odhadnuta na 40% obvodové rychlosti rotoru. Pro tuto rychlost je podle obrázku chladivost $\alpha_2 = 60$ [W/°Cm²] a oteplení povrchu cívky při trvalém chodu se předpokládá $\Delta v_c = 60$ [°C]

Ztráty oteplením v cívce hlavního pólu

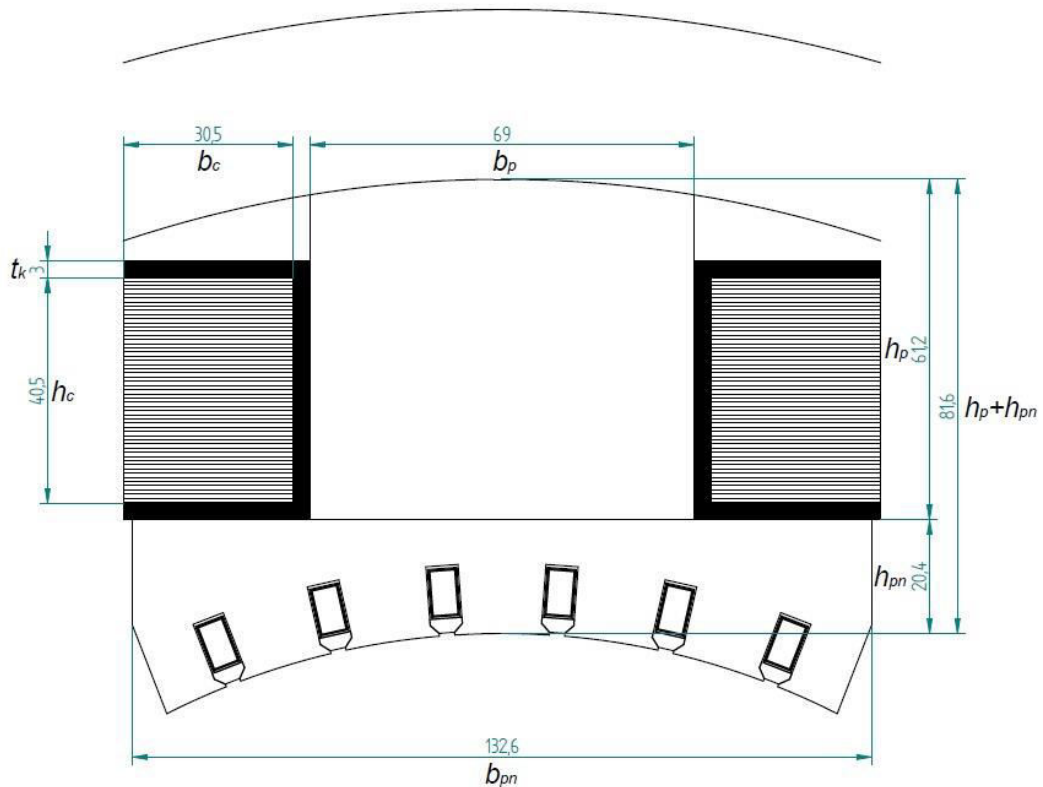
$$P_c = S_c \cdot \alpha_2 \cdot \Delta v_c = 0,025 \cdot 60 \cdot 60 = 90 \text{ [W]} \quad (86)$$

Odpor vinutí hlavního pólu při 20°C

$$R_{2(20^\circ\text{C})} = \rho_v \frac{l_s \cdot N_b \cdot 2 \cdot p}{S_{Cu2}} = \frac{1}{57 \cdot 10^6} \cdot \frac{0,52 \cdot 1200 \cdot 2 \cdot 2}{0,709 \cdot 10^{-6}} = 61,76 [\Omega] \quad (87)$$

Odpor vinutí hlavního pólu při 75°C

$$R_{2(75^\circ\text{C})} = R_{2(20^\circ\text{C})} \cdot \frac{57}{48} = 61,76 \cdot \frac{57}{48} = 73,34 [\Omega] \quad (88)$$



Obr.1.12 - Rozměry hlavního pólu

1.8 Výpočet kompenzačního vinutí hlavního pólu**Počet drážek kompenzačního vinutí**

Počet drážek se volí mezi 6 až 12, musí se jednat o sudé číslo kvůli zachování souměrnosti sousedních cívek.

$$Q_{kv} = 6 [-]$$

Počet paralelních větví kompenzačního vinutí

$$a_{kv} = 1 [-]$$

Šířka pólového nástavce bez okrajů

$$b_{pn}^I = b_{pn} - 20 = 132,6 - 20 = 112,6 \text{ [mm]} \quad (89)$$

Počet vodičů v drážce kompenzačního vinutí

$$n_{dkv} = 1 [-]$$

Drážková rozteč kompenzačního vinutí

$$t_{dkv} = \frac{b_{pn}^I}{Q_{kv}} = \frac{112,6}{6} = 18,76 \doteq 18,8 [\text{mm}] \quad (90)$$

Činitel rozptylu hlavních pólů

$$\sigma_p = 1,05 [-]$$

Magnetická indukce v nejmenším průřezu zubu kompenzačního vinutí

$$B_{z_{kv}} \text{ se volí mezi } 1,6 \div 1,8 [\text{T}]$$

$$B_{z_{kv}} = 1,6 [\text{T}]$$

Šířka zubu kompenzačního vinutí

$$b_{z_{kv}}^I = \frac{t_{dkv} \cdot B_{\delta} \cdot \sigma_p}{B_{z_{kv}} \cdot k_{Fe}} = \frac{18,8 \cdot 0,65 \cdot 1,05}{1,6 \cdot 0,93} = 8,623 \doteq 8,6 [\text{mm}] \quad (91)$$

Světla šířka drážky kompenzačního vinutí

$$b_{dkv}^I = t_{dkv} - b_{z_{kv}}^I = 18,8 - 8,6 = 10,2 [\text{mm}] \quad (92)$$

Proudové zatížení vodiče kompenzačního vinutí

$$\sigma_{kv} = 3 [\text{A}/\text{mm}^2]$$

Průřez vodiče kompenzačního vinutí

$$S_{kv} = \frac{I_1}{a_{kv} \cdot \sigma_{kv}} = \frac{107}{1 \cdot 3} = 35,66 [\text{mm}^2] \quad (93)$$

Kompenzační vinutí bude uloženo v drážce typu **D**, vinutí bude zhotoveno vodičem o průřezu

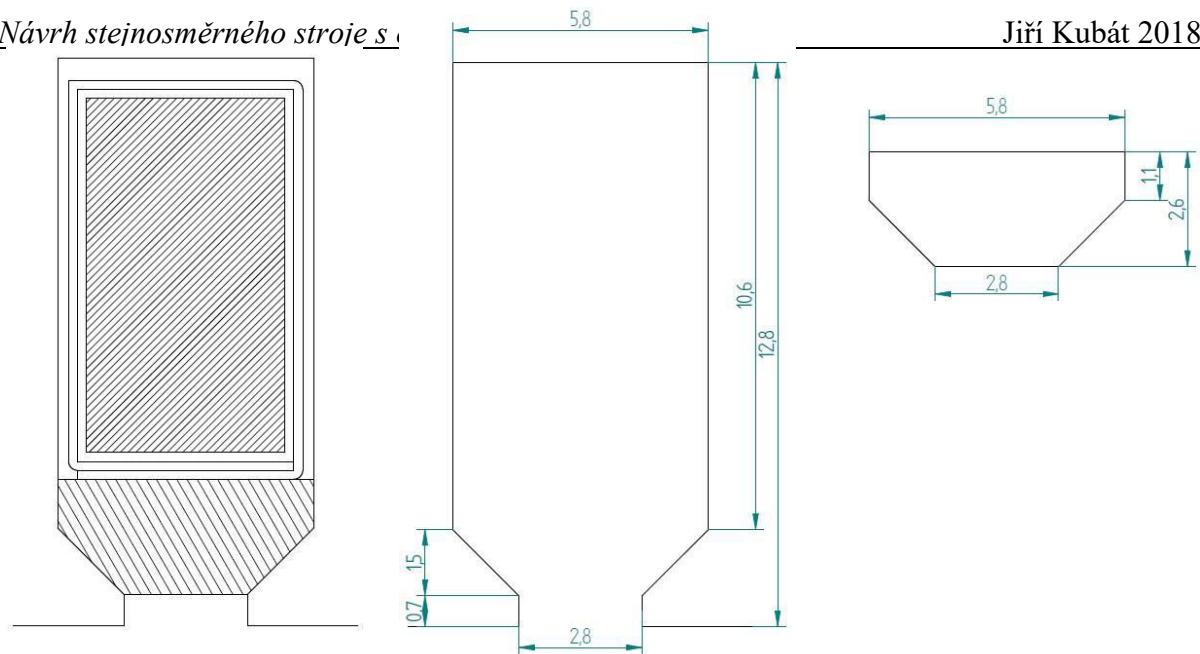
$$S_{kv} = 35,14 [\text{mm}^2] \Rightarrow 8 \times 4,5 [\text{mm}].$$

Šířka drážky kompenzačního vinutí

Izolace vodiče	2 x 0,2[mm]	= 0,4[mm]
Izolace drážky	2 x 0,2[mm]	= 0,4[mm]
Vůle	0,5[mm]	= 0,5[mm]
Šířka vodiče	4,5[mm]	= 4,5[mm]
Celkem		5,8[mm]

Hloubka drážky kompenzačního vinutí

Izolace vodiče	2 x 0,2[mm]	= 0,6[mm]
Izolace drážky	3 x 0,2[mm]	= 0,9[mm]
Výřez pro klín	1,5+1,1[mm]	= 2,6[mm]
Výška krčku	0,7[mm]	= 0,7[mm]
Vůle	0,5[mm]	= 0,5[mm]
Výška vodiče	8[mm]	= 8,0[mm]
Celkem		12,6[mm]



Obr.1.13 - Rozměry drážky kompenzačního vinutí a její výplň

Skutečná šířka zubu kompenzačního vinutí

$$b_{z_{kv}} = t_{dkv} - b_{dkv} = 18,8 - 5,8 = 13[\text{mm}] \quad (94)$$

Průměr vnitřního povrchu hlavního pólu

$$D_h = D + 2 \cdot \delta = 0,26 + 2 \cdot 0,003 = 0,266[\text{m}] \quad (99)$$

Střední šířka cívky kompenzačního vinutí

$$b_{ckv} = \frac{\pi \cdot (D_h + h_{dkv})}{2 \cdot p} - \frac{b_{pn} \cdot (D_h + h_{dkv})}{2 \cdot D_h} = \frac{\pi \cdot (0,266 + 0,0126)}{2 \cdot 2} - \frac{0,1326 \cdot (0,266 + 0,0126)}{2 \cdot 0,266} = 0,14937 \doteq 0,1494[\text{m}] \quad (100)$$

Střední délka čel kompenzačního vinutí

$$l_{\check{c}kv} = 1,2 \cdot b_{ckv} = 1,2 \cdot 0,1494 = 0,17928[\text{m}] \quad (101)$$

Výběh z cívky kompenzačního vinutí

$$b_{\check{c}kv} = 0,05[\text{m}] \text{ platí pro tyčové vinutí}$$

Střední délka přímkové části cívky kompenzačního vinutí

$$l_{dkv} = L_p + 2 \cdot b_{\check{c}kv} = 0,143 + 2 \cdot 0,05 = 0,243[\text{m}] \quad (102)$$

Střední délka půlsvitu kompenzačního vinutí

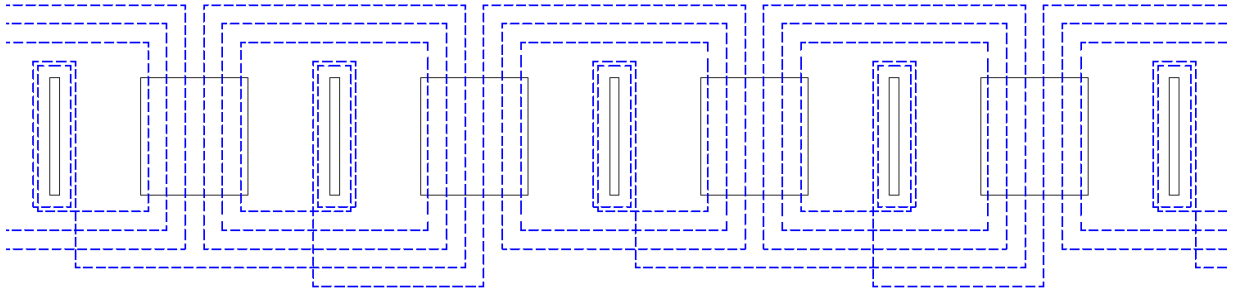
$$l_{kvav} = l_{dkv} + l_{\check{c}kv} = 0,243 + 0,1793 = 0,4223[\text{m}] \quad (103)$$

Odpor kompenzačního vinutí při 20°C

$$R_{kv(20^\circ\text{C})} = \rho_v \frac{l_{kvav} \cdot 2 \cdot p}{S_{Cu}} = \frac{1}{57 \cdot 10^6} \cdot \frac{0,4223 \cdot 2 \cdot 2}{35,14 \cdot 10^{-6}} = 0,00084[\Omega] \quad (104)$$

Odpor kompenzačního vinutí při 75°C

$$R_{kv(75^\circ\text{C})} = R_{kv(20^\circ\text{C})} \cdot \frac{57}{48} = 0,00084 \cdot \frac{57}{48} \doteq 0,001[\Omega] \quad (105)$$



Obr.1.14 - Zapojení kompenzačního vinutí

1.9 Výpočet komutačního pólu

Vzduchová mezera pod komutačním pólem

$$\delta_k = 1,5 \cdot \delta = 1,5 \cdot 3 = 4,5 \text{ [mm]} \quad (106)$$

Délka komutačního pólu

$$L_{kp} = L_p = L = 0,143 \text{ [m]}$$

Rozteč lamel redukovaná na obvod kotvy

$$t_1^I = \frac{\pi \cdot D}{K} = \frac{\pi \cdot 0,26}{108} = 0,00756 \text{ [m]} \doteq 7,6 \text{ [mm]} \quad (107)$$

Habartovo číslo

$$\xi = 4 \cdot 10^{-6} \text{ [H} \cdot \text{m}^{-1}]$$

Magnetická indukce ve vzduchové mezeře pod komutačním pólem

$$B_{\delta k} = \xi \cdot A \cdot \frac{I_e}{L_p} = 4 \cdot 10^{-6} \cdot 21200 \cdot \frac{0,143}{0,143} = 0,0848 \doteq 0,085 \text{ [T]} \quad (108)$$

Magnetické napětí komutačního pólu

$$F_{kp} = \frac{1}{\mu_0} \cdot B_{\delta k} \cdot \delta_k = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \cdot 0,085 \cdot 0,0045 = 304,384 \doteq 304,4 \text{ [A]} \quad (109)$$

Magnetické napětí reakce kotvy

$$F_a = \frac{1}{2} \cdot (1 - \alpha) \cdot A \cdot \tau_p = \frac{1}{2} \cdot (1 - 0,65) \cdot 21200 \cdot 0,204 = 756,84 \doteq 757 \text{ [A]} \quad (110)$$

Výsledné magnetické napětí komutačního pólu

$$F_{mk} = F_a + F_{kp} = 757 + 304,4 = 1061,4 \text{ [A]} \quad (111)$$

Průřez vodiče komutačního pólu

$$S_{kp} = \frac{I_1}{\sigma_{kp}} = \frac{107}{3,5} = 30,57 \text{ [mm}^2] \quad (112)$$

Pro komutační vinutí bude použit vodič o průřezu $S_{kp} = 30,95 \text{ [mm}^2] \Rightarrow 10 \times 3,15 \text{ [mm]}$.

Celkový počet závitů jedné cívky komutačního pólu

$$N_{ck} = \frac{F_{mk}}{I_1} = \frac{1061,4}{107} = 9,919 \Rightarrow 10 \text{ [-]} \quad (113)$$

Cívka komutačního pólu bude obsahovat $N_{2k} = 10 \text{ [-]}$ závitů po $V_{2k} = 1 \text{ [-]}$ vrstvách, vodič bude mít izolaci, jejíž oboustranný přírůstek se rovná $iv_2 = 0,4 \text{ [mm]}$.

Výška cívky komutačního pólu

$$h_{ck} = N_{2k} \cdot (a_2 + iv_2) + v_{\text{ůle}} = 10 \cdot (3,15 + 0,4) + 0,5 = 36 \text{ [mm]} \quad (114)$$

Šířka cívky komutačního pólu

$$b_{ck} = V_{2k} \cdot (b_2 + iv_2) + v_{\text{ůle}} = 1 \cdot (10 + 0,4) + 0,5 = 10,9 \text{ [mm]} \quad (115)$$

Šířka komutačního pásma ve vzduchové mezeře

$$b_k = t_1^I \left(\beta - \frac{a}{p} + u + \Delta y \right) = 7,6 \cdot \left(3 - \frac{2}{2} + 3 + 0 \right) = 38 \text{ [mm]} \quad (116)$$

$$\Delta y \Rightarrow 0[-]$$

Magnetický tok komutačního pólu

$$\Phi_k = b_k \cdot L_{kp} \cdot B_{\delta k} = 0,038 \cdot 0,143 \cdot 0,085 = 0,00046 \doteq 0,0005 \text{ [Wb]} \quad (117)$$

Šířka komutačního pólu

$$b_{kp} = \frac{\Phi_k \cdot (1 + v_k)}{B_{kp} \cdot L_{kp}} = \frac{0,0005 \cdot (1 + 3)}{1,2 \cdot 0,143} = 0,01166 \doteq 0,012 \text{ [m]} = 12 \text{ [mm]} \quad (118)$$

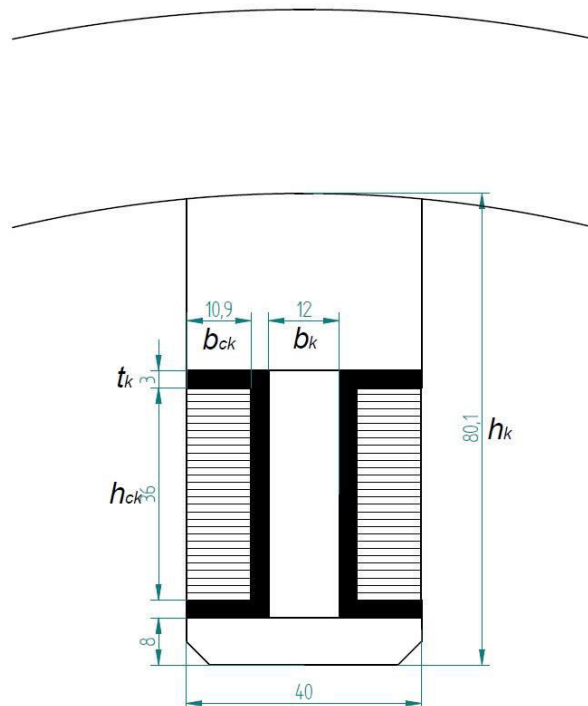
Činitel komutačního pólu je odhadnut na $v_k = 3[-]$ a indukce v komutačním pólu $B_{kp} = 1,2 \text{ [T]}$.

Výška komutačního pólu

$$h_{kp} = \frac{D_{ei} - D - 2 \cdot \delta_k}{2} = \frac{429,2 - 260 - 2 \cdot 4,5}{2} = 80,1 \text{ [mm]} \quad (119)$$

Střední délka závitukomutačního pólu

$$l_{sk} = 2(L_p + b_{kp}) + \pi b_{ck} = 2 \cdot (0,143 + 0,012) + \pi \cdot 0,0109 = 0,34425 \doteq 0,344 \text{ [m]} \quad (120)$$



Obr.1.15 - Rozměry komutačního (pomocného) pólu

Chladicí obvod cívky komutačního pólu

$$l_{ck} = 2(L_p + b_{kp}) + 2 \cdot \pi \cdot b_{ck} = 2 \cdot (0,143 + 0,012) + 2 \cdot \pi \cdot 0,0109 = 0,37849 \doteq 0,38 \text{ [m]} \quad (121)$$

Chladicí povrch cívky komutačního pólu

$$S_{ck} = l_{ck} \cdot h_{ck} = 0,38 \cdot 0,036 = 0,01369 \doteq 0,0137 \text{ [m}^2\text{]} \quad (122)$$

Ztráty oteplením v cívce komutačního pólu

$$P_{ck} = S_{ck} \cdot \alpha_2 \cdot \Delta v_c = 0,0137 \cdot 60 \cdot 60 = 49,32 \text{ [W]} \quad (123)$$

Odpor vinutí komutačního pólu při 20°C

$$R_{k(20^\circ\text{C})} = \rho_v \frac{l_{sk} \cdot N_{ck} \cdot 2 \cdot p}{S_{Cu2k}} = \frac{1}{57 \cdot 10^6} \cdot \frac{0,344 \cdot 10 \cdot 2 \cdot 2}{30,95 \cdot 10^{-6}} = 0,00078 \text{ [\Omega]} \quad (124)$$

Odpor vinutí komutačního pólu při 75°C

$$R_{k(75^\circ\text{C})} = R_{k(20^\circ\text{C})} \cdot \frac{57}{48} = 0,00078 \cdot \frac{57}{48} = 0,00093 \text{ [\Omega]} \quad (125)$$

1.10 Výpočet komutátoru**Průměr komutátoru**

$$D_k = D - 2h = 0,26 - 2 \cdot 0,025 = 0,216 \doteq 0,2 \text{ [m]} \quad (126)$$

Rozteč lamel komutátoru

$$t_{1k} = \frac{\pi \cdot D_k}{K} = \frac{\pi \cdot 0,2}{108} = 5,817 \doteq 5,8 \text{ [mm]} \quad (127)$$

Lamela bude mít šířku 5,20 [mm] a 0,6[mm] bude šířka mezilamelové izolace

Obvodová rychlost komutátoru

$$v_k = \frac{\pi \cdot D_k \cdot n}{60} = \frac{\pi \cdot 0,2 \cdot 1400}{60} = 17,22 \text{ [m/s]} \quad (128)$$

Šířka kartáče

$$b_u = \beta \cdot t_1 = 3 \cdot 5,8 = 17,4 \doteq 20 \text{ [mm]} \quad (129)$$

Předpoklad krytí uhlíku $\beta \approx u = 3[-]$

Podle tabulky P-4 bude použit kartáč o rozměrech 20 x 12,5 [mm], výška kartáče je 32 [mm].

Styková plocha kartáče

$$S_u = b_u \cdot a_u = 20 \cdot 12,5 = 250 \text{ [mm}^2\text{]} = 0,25 \text{ [m}^2\text{]} \quad (130)$$

Počet kartáčů na roubíku

$$N_u = \frac{I_1}{\sigma_{up} S_u} = \frac{107}{0,08 \cdot 2 \cdot 250} = 2,675 \doteq 3 \text{ [-]} \quad (131)$$

Bude použit grafitový kartáč s proudovou hustotou $\sigma_u = 8 \text{ [A/cm}^2\text{]} \Rightarrow 0,08 \text{ [A/mm}^2\text{]}$,

viz **Tab. 2**

Délka komutátoru

$$L_k = (N_u + 0,5) \cdot a_u + (N_u - 1) \cdot 5 + 30 = (3 + 0,5) \cdot 12,5 + (3 - 1) \cdot 5 + 30 = 83,75 \text{ [mm]} \doteq 90 \text{ [mm]} \quad (132)$$

Nejmenší průměr hřídele

$$D_{hř} = 0,135 \cdot \sqrt[4]{\frac{P}{n}} = 0,135 \cdot \sqrt[4]{\frac{20}{1400}} = 0,04667 \text{ [m]} \doteq 50 \text{ [mm]} \quad (133)$$

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

Přechodové napětí:	$u_{př}$	= 2,1 V	Měrný tlak	p_k	= 18 kPa
Maximální proudové zatížení	σ_k	= 10 A/cm ²	Součinitel tření	μ	= 0,15
Maximální obvodová rychlost	v_o	= 40 m/s			

Tab. 2 - Vlastnosti kartáčů pro kroužky

1.11 Ztráty a účinnost**Ztráty ve vinutí kotvy**

$$P_{Cu1} = R_{1(75^\circ C)} \cdot I_1^2 = 0,0708 \cdot 107^2 = 810,589 \doteq 810,6 \text{ [W]} \quad (134)$$

Ztráty v hlavních pólech

$$P_{Cu2} = R_{2(75^\circ C)} \cdot I_2^2 = 73,34 \cdot 2,27^2 = 377,9 \text{ [W]} \quad (135)$$

Ztráty v kompenzačním vinutí

$$P_{kv} = R_{kv(75^\circ C)} \cdot I_1^2 = 0,001 \cdot 107^2 \doteq 11,5 \text{ [W]} \quad (136)$$

Ztráty v komutačních pólech

$$P_k = R_{k(75^\circ C)} \cdot I_1^2 = 0,00093 \cdot 107^2 = 10,6 \text{ [W]} \quad (137)$$

Střední šířka zubu

$$b_{zs} = \frac{\pi \cdot (D-h)}{q} - b = \frac{\pi \cdot (260-29,2)}{36} - 10,4 = 9,741 \doteq 9,74 \text{ [mm]} \quad (138)$$

Hmotnost zubů kotvy

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

$$m_{Fez} = Q \cdot h \cdot b_{zs} \cdot k_{Fe} \cdot L_e \cdot \rho_{Fe} = 36 \cdot 0,0292 \cdot 0,00974 \cdot 0,93 \cdot 0,143 \cdot 7700 = 10,48 \doteq 10,5 \text{ [kg]} \quad (139)$$

Hmotnost jha kotvy

$$m_{Fejr} = \frac{\pi \cdot [(D-2 \cdot h)^2 - D_i^2]}{4} \cdot k_{Fe} \cdot L_e \cdot \rho_{Fe} = \frac{\pi \cdot [(0,26-2 \cdot 0,0292)^2 - 0,128^2]}{4} \cdot 0,93 \cdot 0,143 \cdot 7700 = 19,51 \doteq 19,5 \text{ [kg]} \quad (140)$$

Střední indukce v zubu kotvy

$$B_{zav} = \frac{B_{Z1} + 4 \cdot B_{Z2} + B_{Z3}}{6} = \frac{1,29 + 4 \cdot 1,63 + 2,05}{6} = 1,643 \doteq 1,64 \text{ [T]} \quad (141)$$

Ztráty v železe ve jhu kotvy

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

Ztráty v železe jsou spočteny pro plechy se ztrátovým číslem 1,75 [W/kg]

$$P_{Fejr} = 1,8 \cdot \Delta p_{Fe} \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} \cdot B_{jr}^2 \cdot m_{Fejr} = 1,8 \cdot 1,75 \cdot \left(\frac{46,67}{50}\right)^{1,3} \cdot 1,3^2 \cdot 19,5 = 94,91 \doteq 94,9 \text{ [W]} \quad (142)$$

Ztráty v železe v zubech kotvy

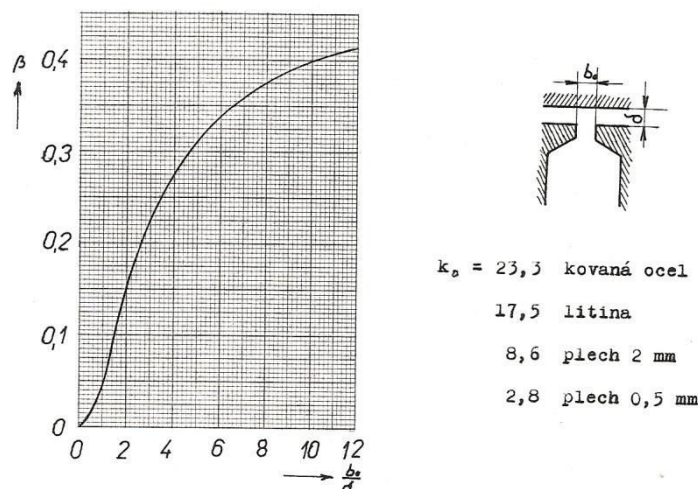
Ztráty v železe jsou spočteny pro plechy se ztrátovým číslem 1,75 [W/kg]

$$P_{Fez} = 2,3 \cdot \Delta p_{Fe} \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} \cdot B_{zav}^2 \cdot m_{Fez} = 2,3 \cdot 1,75 \cdot \left(\frac{46,67}{50}\right)^{1,3} \cdot 1,64^2 \cdot 10,5 = 103,927 \doteq 103,9 \text{ [W]} \quad (143)$$

Ztráty povrchové

$$\Delta P_p = \frac{\pi}{2} \cdot D \cdot \alpha_\delta \cdot L_p \cdot k_0 \cdot \left(\frac{Q \cdot n}{10000}\right)^{1,5} \cdot (t_{d1} \cdot \beta \cdot 1000 \cdot B_\delta \cdot k_c)^2 = \frac{\pi}{2} \cdot 0,26 \cdot 0,65 \cdot 0,143 \cdot 2,8 \cdot \left(\frac{36 \cdot 1400}{10000}\right)^{1,5} \cdot (22,7 \cdot 2,5 \cdot 1000 \cdot 0,65 \cdot 1,25)^2 = 25,569 \doteq 25,5 \text{ [W]} \quad (144)$$

Hodnota β a k_0 odečtena z **Obr.1.16**



Obr.1.16 - Rozměry komutačního (pomocného) pólu

Ztráty třením kartáčů

$$P_{tk} = 9,81 \cdot f \cdot p \cdot v_k \cdot \sum S_k = 9,81 \cdot 0,15 \cdot 1,4 \cdot 10^4 \cdot 14,66 \cdot 3 \cdot 20 \cdot 12,5 \cdot 10^{-6} = 226,5 [\text{W}] \quad (145)$$

Měrný tlak na kartáče $p = 14 [\text{kPa}]$

Koeficient $f = 0,15 [-]$

Ztráty přechodem

$$P_{\Delta} = 2 \cdot \Delta U \cdot I_1 = 2 \cdot 3,8 \cdot 107 = 813,2 [\text{W}] \quad (146)$$

Podle **Tab. 2** bude pro grafitové kartáče při $\sigma_u = 8 [\text{A/cm}^2]$ $\Delta U = 3,8 [\text{V}]$

Mechanické ztráty podle typového výkonu

$$P_m = 4 \cdot P^{0,9} \cdot n^{0,25} = 4 \cdot 20^{0,9} \cdot 1400^{0,25} = 362,67 \doteq 362,7 [\text{W}] \quad (147)$$

Přídavné ztráty

$$P_d = \frac{P}{100} = \frac{20000}{100} = 200 [\text{W}] \quad (148)$$

Přídavné ztráty = 1% P_N

Celkové ztráty

$$P_z = P_{Cu1} + P_{Cu2} + P_{kv} + P_k + P_{Fejr} + P_{Fez} + \Delta P_p + P_{tk} + P_{\Delta} + P_m + P_d = 810,6 + 377,9 + 11,5 + 10,6 + 94,9 + 103,9 + 25,5 + 226,5 + 813,2 + 362,7 + 200 = 3037,3 [\text{W}] \quad (149)$$

Účinnost navrženého stroje

$$\mu = 1 - \frac{P_z}{P + P_z} = 1 - \frac{3037,3}{20000 + 3037,3} \doteq 86,8 [\%] \quad (150)$$

1.11 Charakteristika naprázdno

Pro výpočet a sestrojení charakteristiky naprázdno byly použity grafy, viz příloha **P- 7** a **P-9** a následující vzorce, vypočtené a odečtené hodnoty z grafů jsou zaneseny do tabulky **P-5** a výsledná charakteristika je pod přílohou **P-6**

Některé výpočty pro sestrojení charakteristiky

$$k_1 = 0,7 \quad [-]$$

$$k_2 = 0,9 \quad [-]$$

$$k = 1 \quad [-]$$

$$k_3 = 1,1 \quad [-]$$

$$k_4 = 1,2 \quad [-]$$

$$h_p = 0,3 \cdot \tau_p = 0,3 \cdot 0,204 = 0,0612 \text{ [m]} = 61,2 \text{ [mm]}$$

$$h_{pn} = 0,1 \cdot \tau_p = 0,1 \cdot 0,204 = 0,0204 \text{ [m]} = 20,4 \text{ [mm]}$$

$$l_p = h_p + h_{pn} = 0,0612 + 0,0204 = 0,0816 \text{ [m]} = 81,6 \text{ [mm]}$$

$$l_r = \frac{\pi \cdot [D - 2 \cdot (\delta + h_p + h_{pn})]}{4p} = \frac{\pi \cdot [0,26 - 2 \cdot (0,003 + 0,0612 + 0,0204)]}{4 \cdot 2} = 0,0356 \text{ [m]}$$

$$l_s = \frac{\pi \cdot [D + 2 \cdot (h_d + h_{js})]}{4p} = \frac{\pi \cdot [0,26 + 2 \cdot (0,0292 + 0,032)]}{4 \cdot 2} = 0,15 \text{ [m]}$$

1.12 Shrnutí základních rozměrů

Vnější průměr statoru	$D_e = 493,2 \text{ [mm]}$
Vnitřní průměr statoru	$D_{is} = 429,2 \text{ [mm]}$
Výška jha statoru	$h_{js} = 32 \text{ [mm]}$
Vnější průměr kotvy	$D = 260 \text{ [mm]}$
Výška jha rotoru	$h_{jr} = 37 \text{ [mm]}$
Hloubka drážky kotvy	$h = 29,2 \text{ [mm]}$
Šířka drážky kotvy	$b = 10,4 \text{ [mm]}$
Výška hlavního pólu	$h_p = 61,2 \text{ [mm]}$
Šířka hlavního pólu	$b_p = 69 \text{ [mm]}$
Výška pólového nástavce hlavního pólu	$h_{pn} = 20,4 \text{ [mm]}$
Šířka pólového nástavce hlavního pólu	$b_{pn} = 132,6 \text{ [mm]}$
Výška komutačního pólu	$h_{kp} = 59,7 \text{ [mm]}$
Šířka komutačního pólu	$b_{kp} = 12 \text{ [mm]}$
Velikost vzduchové mezery pod hlavním pólem	$\delta = 3 \text{ [mm]}$
Velikost vzduchové mezery pod komutačním pólem	$\delta_k = 4,5 \text{ [mm]}$
Šířka cívky hlavního pólu	$b_c = 30,5 \text{ [mm]}$
Výška cívky hlavního pólu	$h_c = 40,5 \text{ [mm]}$
Šířka cívky komutačního pólu	$b_{ck} = 10,9 \text{ [mm]}$
Výška cívky komutačního pólu	$h_{ck} = 36 \text{ [mm]}$
Průměr komutátoru	$D_k = 200 \text{ [mm]}$
Délka komutátoru	$l_k = 90 \text{ [mm]}$
Nejmenší průměr hřídele	$D_{nr} = 50 \text{ [mm]}$

Tab. 3 - Základní rozměry stroje

Závěr

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

Práce se dělí do několika částí, z nichž první část je 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, který obsahoval i výpočet kompenzačního vinutí, které je zapojeno do série s kotvou. V sérii s kotvou je zapojeno i výpočet komutačního vinutí, které bylo také vypočteno. Jako poslední bylo třeba navrhnout komutátor a vypočítat ztráty a účinnost, která vyšla 86,8 [%], což je nepatrně více 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.

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]
- [4] Ing. RUDOLF MRAVEC.: *Elektrické stroje a přístroje, III. Navrhování elektrických točivých strojů, SNTL - Nakladatelství technické literatury*, Praha 1986
- [5] BLOHMANN M.: Bakalářská práce - *Návrh stejnosměrného stroje s derivačním buzením, ZČU Plzeň 2012*
- [6] Bc. DMITRIJ D.: Diplomová práce - *Návrh stejnosměrného stroje s derivačním buzením, ZČU Plzeň 2011*
- [7] Bc. ŠVEC R.: Diplomová práce - *Návrh stejnosměrného stroje se sériovým buzením, ZČU Plzeň 2012*
- [8] Bc. Houška K.: Diplomová práce - *Návrh stejnosměrného stroje s derivačním buzením, ZČU Plzeň 2013*

INTERNET

- [9] http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/Bakalarske_FMMI/Prednasky/12_stejnstr_sylab_bc_06.pdf

Přílohy

P - 1-Rozměry a průřezy (mm²) měděných a hliníkových vodičů pravouhlého 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		3,561					
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		4,025		4,407			
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		4,585		5,038		5,638	
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		5,145		5,667		6,337	
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		5,785		6,387		7,137	
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		6,585		7,287		8,137	
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		7,385		8,188		9,137	
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		8,265		9,177		10,24	
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		9,385		10,44		11,64	
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		10,51		11,70		13,04	
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		11,79		13,14		14,64	
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	—	13,39	—	14,94	—	16,64	—
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		0,7	1,95	1,05	0,412
12				0,370	5,0		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	6,0		3,45	0,55	0,504
18		4,8	2,5	0,325			3,60	0,40	0,512
18,5				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 (Ω · 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								
0,100	0,007 85	2 233,8		0,093			0,01	0,032	—	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							
0,600 +	0,283	62,049		0,145						
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						
0,900	0,636	27,576			0,24	0,24				
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	0,093	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	—	0,3	0,3	0,12	0,18	—
1,80	2,545	6,895 0							
1,90	2,835	6,187 6							
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	—	0,345	0,365	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							
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,

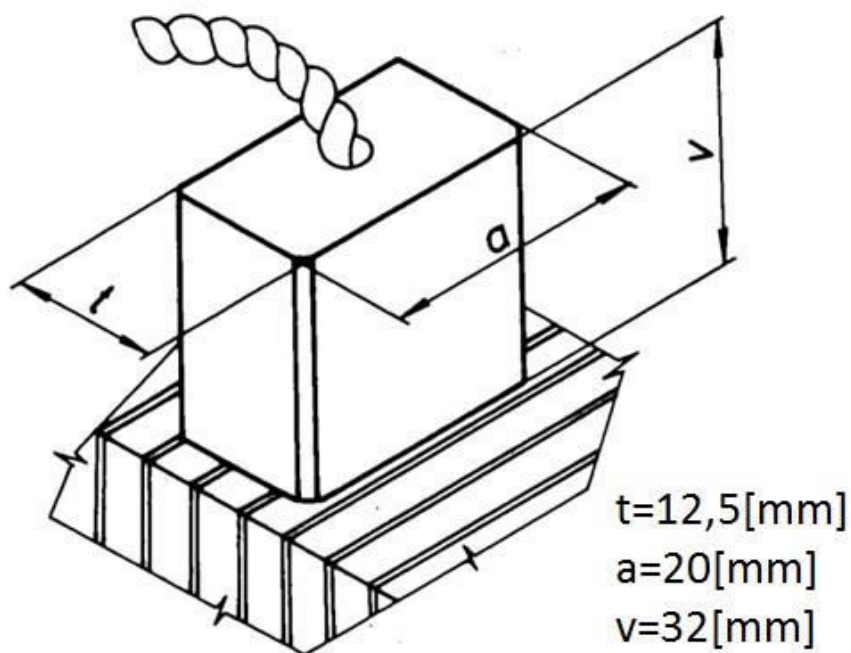
T — jednoduchá izolace tereftalátovým lakem,

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	—	—	—
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	40	40	—	—
6,3	—	12,5	12,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	—	—	16	16	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	—	—	—	—	—	20	20	20	—	—	—	—	—	—
	—	—	—	—	—	25	25	25	25	25	—	—	—	—
	—	—	—	—	—	—	32	32	32	32	—	—	—	—
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	40	40	40	—	—
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	50	50	50	—	—
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

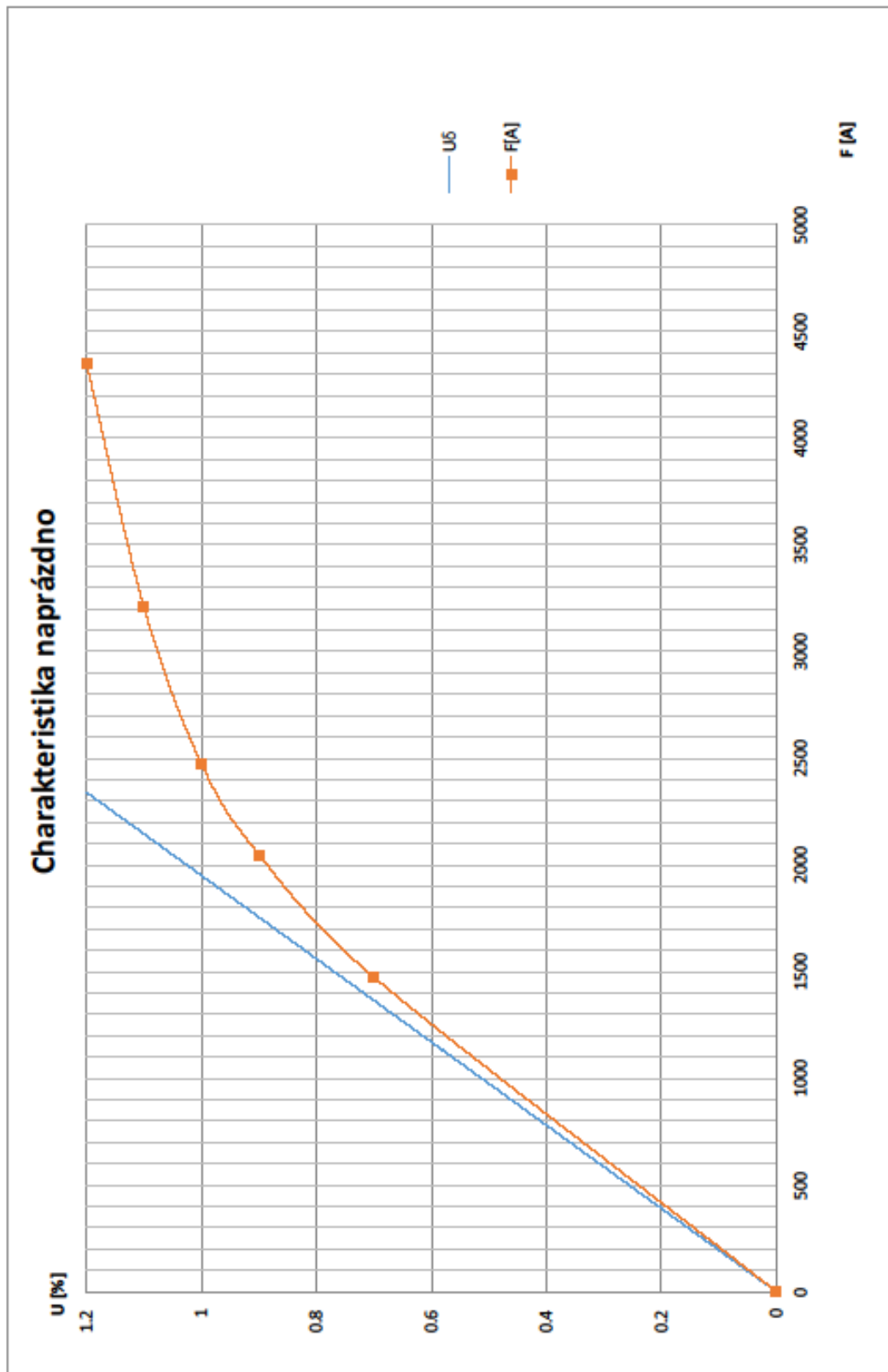
P - 4 -pokračování -Rozměry kartáčů - viz.[1], Tab. D.5.1., str. 667

Tečný rozměr <i>t</i> (mm)	Osový rozměr <i>a</i> (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	—
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	64	—	—
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	—
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	64	64	64	64	—
12,5	—	—	—	—	20	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	—	—	—	—	25	25	25	—	25	—	—	—	—	—
	—	—	—	—	—	32	32	—	32	32	32	32	—	—
	—	—	—	—	—	—	—	—	40	40	40	40	40	—
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	50	50	50	50	50
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	64	64	64	64
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	80	80	80
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
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	80	80	80
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
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	100
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

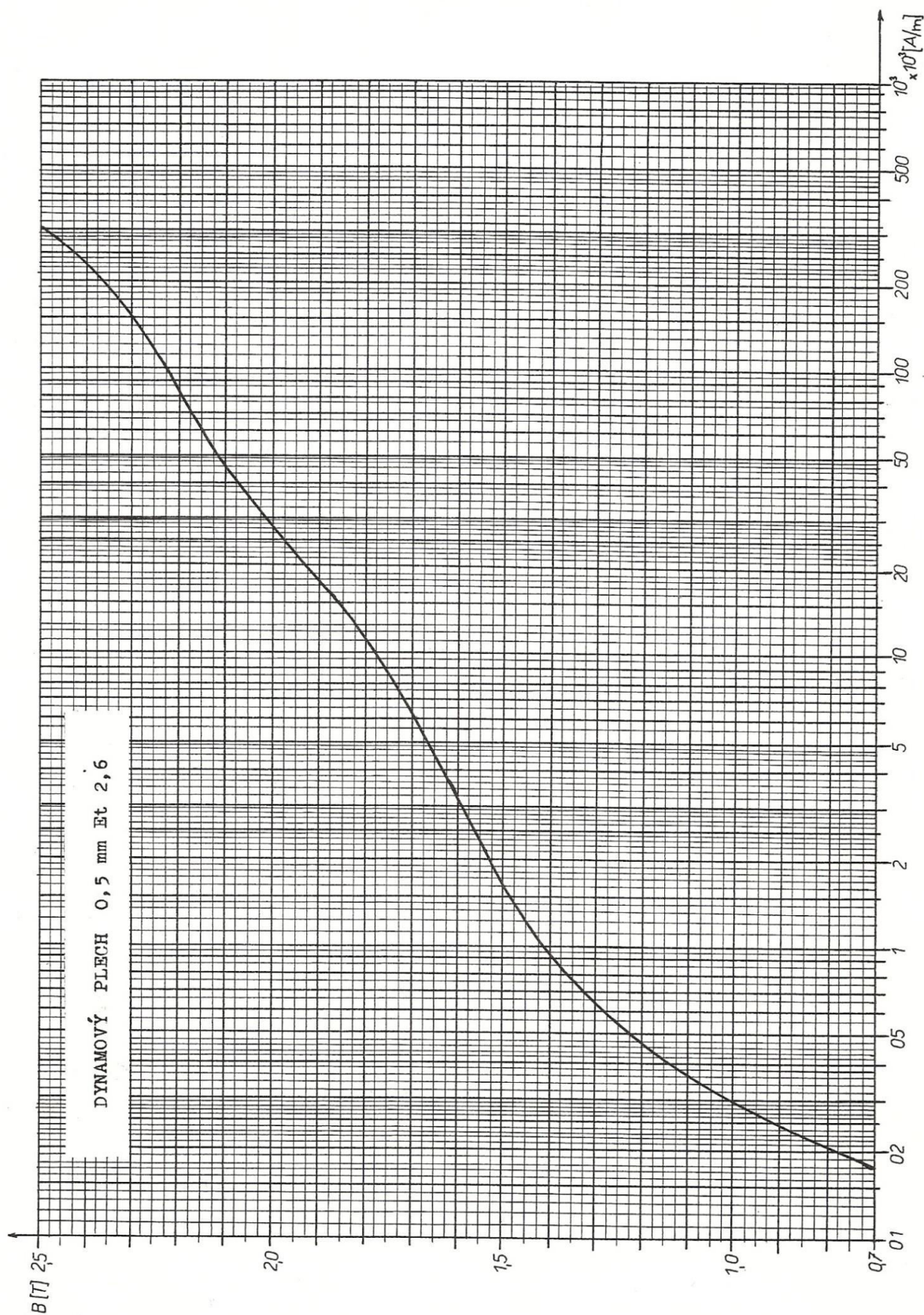
P - 5-Tabulka výpočtu charakteristiky naprázdno

	$k_1 \cdot \Phi$			$k_2 \cdot \Phi$			Φ			$k_3 \cdot \Phi$			$k_4 \cdot \Phi$			
	B [T]	H [A/m]	F [A]	B [T]	H [A/m]	F [A]	B [T]	H [A/m]	F [A]	B [T]	H [A/m]	F [A]	B [T]	H [A/m]	F [A]	
Vzduchová mezera	$\delta = 0,003$ [m]		1365	0,585		1755	0,65		1950	0,715		2145	0,78		2340	
Hlava	$k_{z1} = 0,99$	$B_{z1} = 0,9$	250	1,16	432		1,29	630		1,42	1080		1,5	1600		
		$B_{z1} = 0,9$		1,16			1,29			1,42			1,55			
Zuby	$k_{z2} = 1,22$	$B_{z2} = 1,14$	408	1,47	1405		1,63	3800		1,77	9575		1,91	19000		
		$B_{z2} = 1,14$		1,47			1,63			1,79			1,95			
Dno	$k_{z3} = 1,63$	$B_{z3} = 1,53$	2080	1,92	20000		2,05	34000		2,15	63000		2,22	94000		
		$B_{z3} = 1,54$		1,98			2,2			2,43			2,65			
Stř. hodnota	$h_z =$		660,3	19,28	4342	126,8	8305	242,5		17063	498,2		28600	835,1		
Jádro induktu	$l_s = 0,15016813$		0,77	208	31,23	44,3	1,1	360	54,06	1,21	495	74,33	1,32	694	104,2	
			$F = F_6 + F_z + F_{ij}$				$2246,566526$				$2717,582557$			$3279,336681$		
Pól	$l_p = 0,0816$		1,05	600	48,96	106,1	1,5	2500	204	1,65	5500	448,8	1,8	12000	979,2	
Jho	$l_j = 0,03565708$		0,91	255	9,093	15,83	1,3	650	23,18	1,43	1145	40,83	1,56	2560	91,28	
			$F = F_p + F_j$				$121,911742$				$489,6273527$			$1070,482116$		
			$F = F_6 + F_z + F_{ij} + F_p + F_j$				$2047,99774$				$3207,20991$			$4349,818798$		

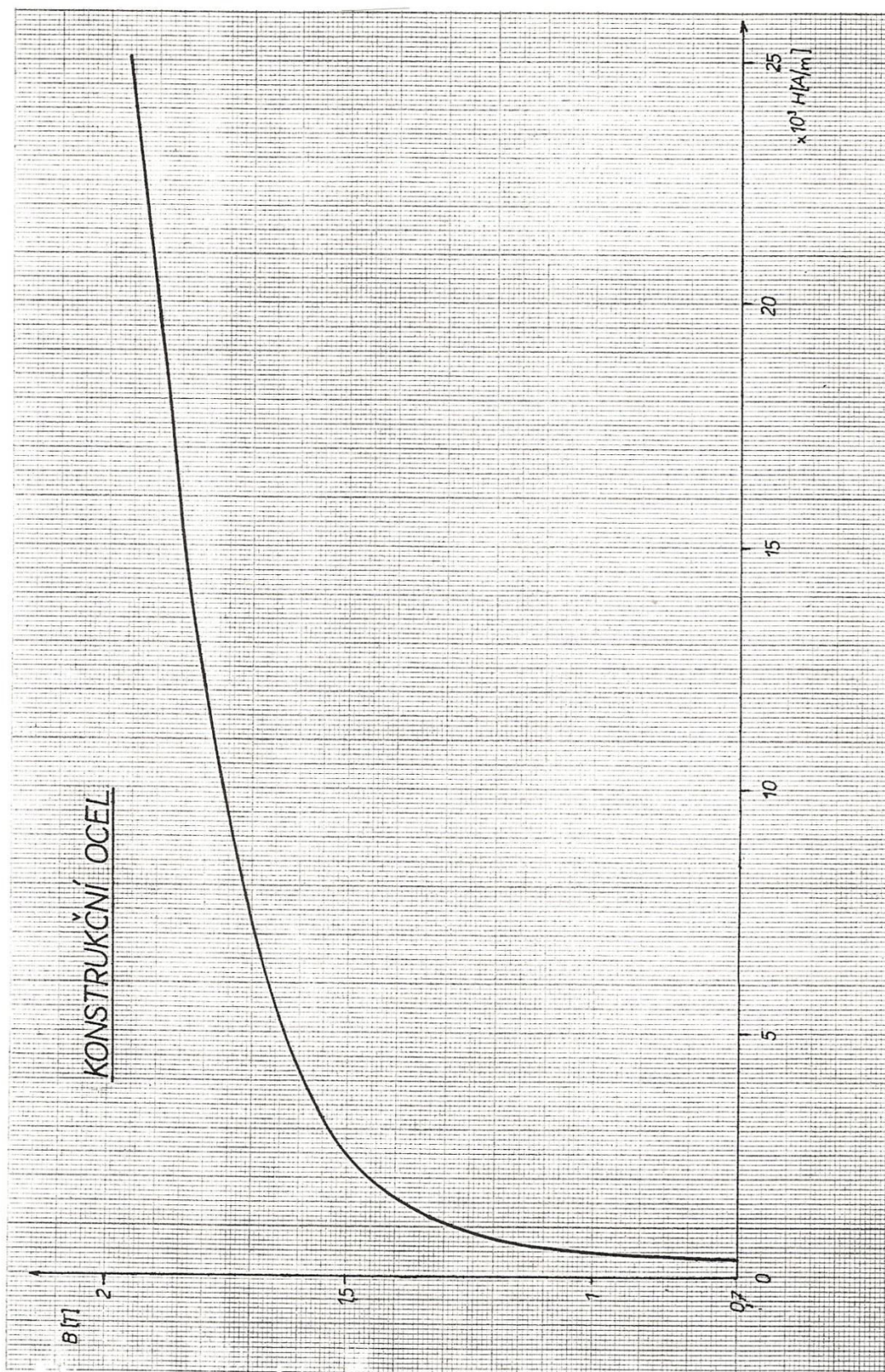
P - 6-Charakteristika naprázdno



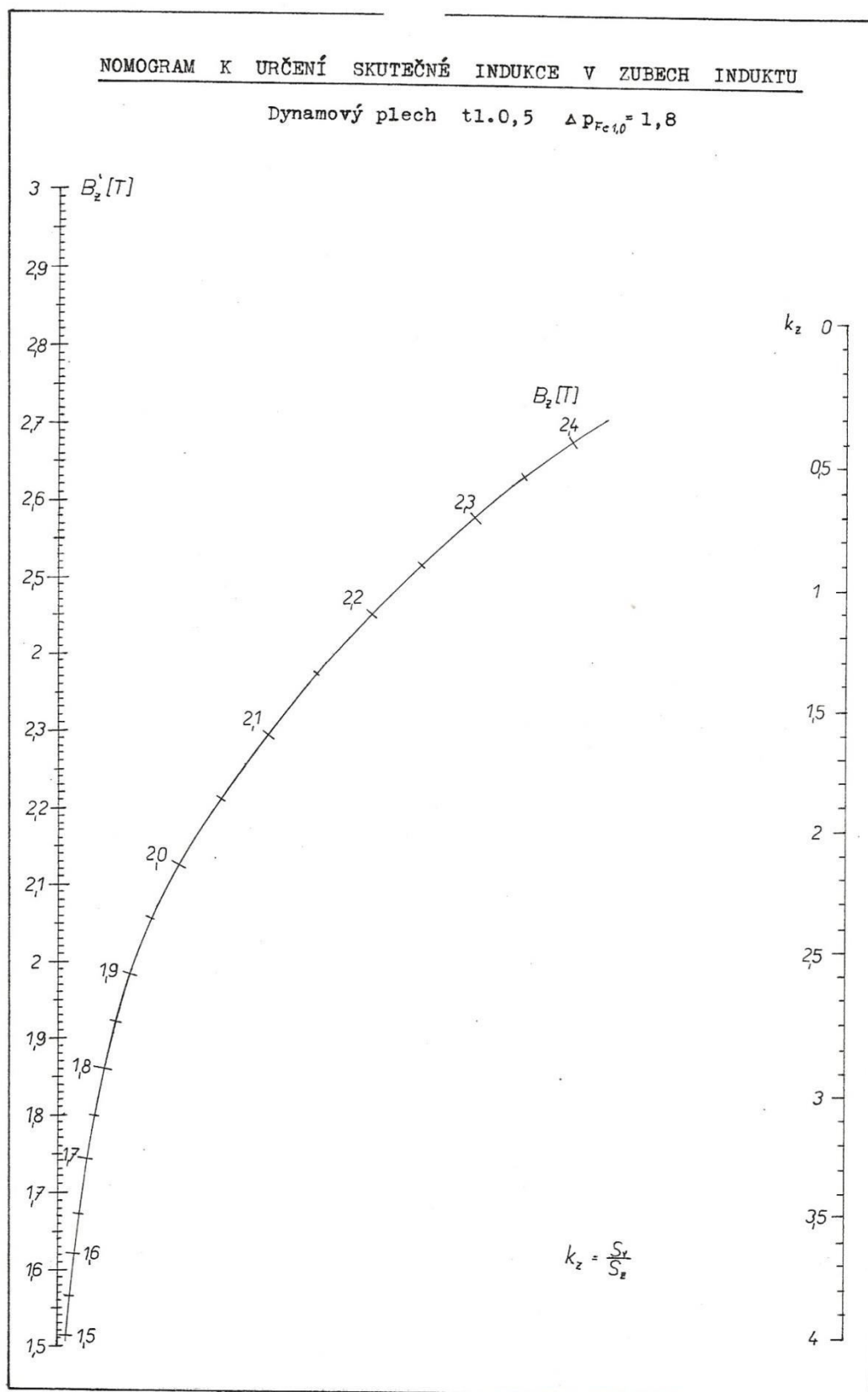
P - 7-Magnetizační charakteristika dynamových plechů- viz.[3]



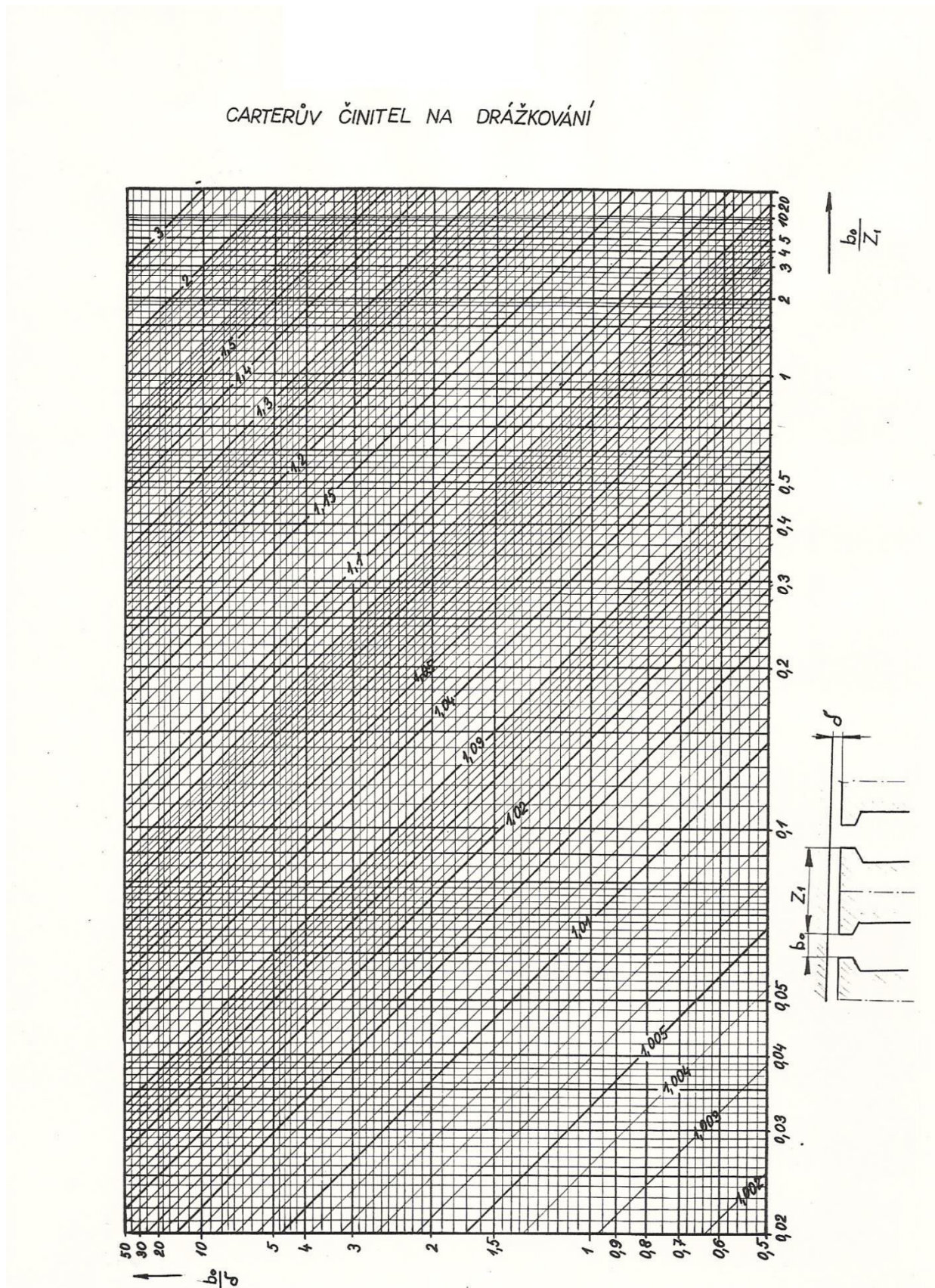
P - 8-Magnetizační charakteristika konstrukční oceli- viz.[3]



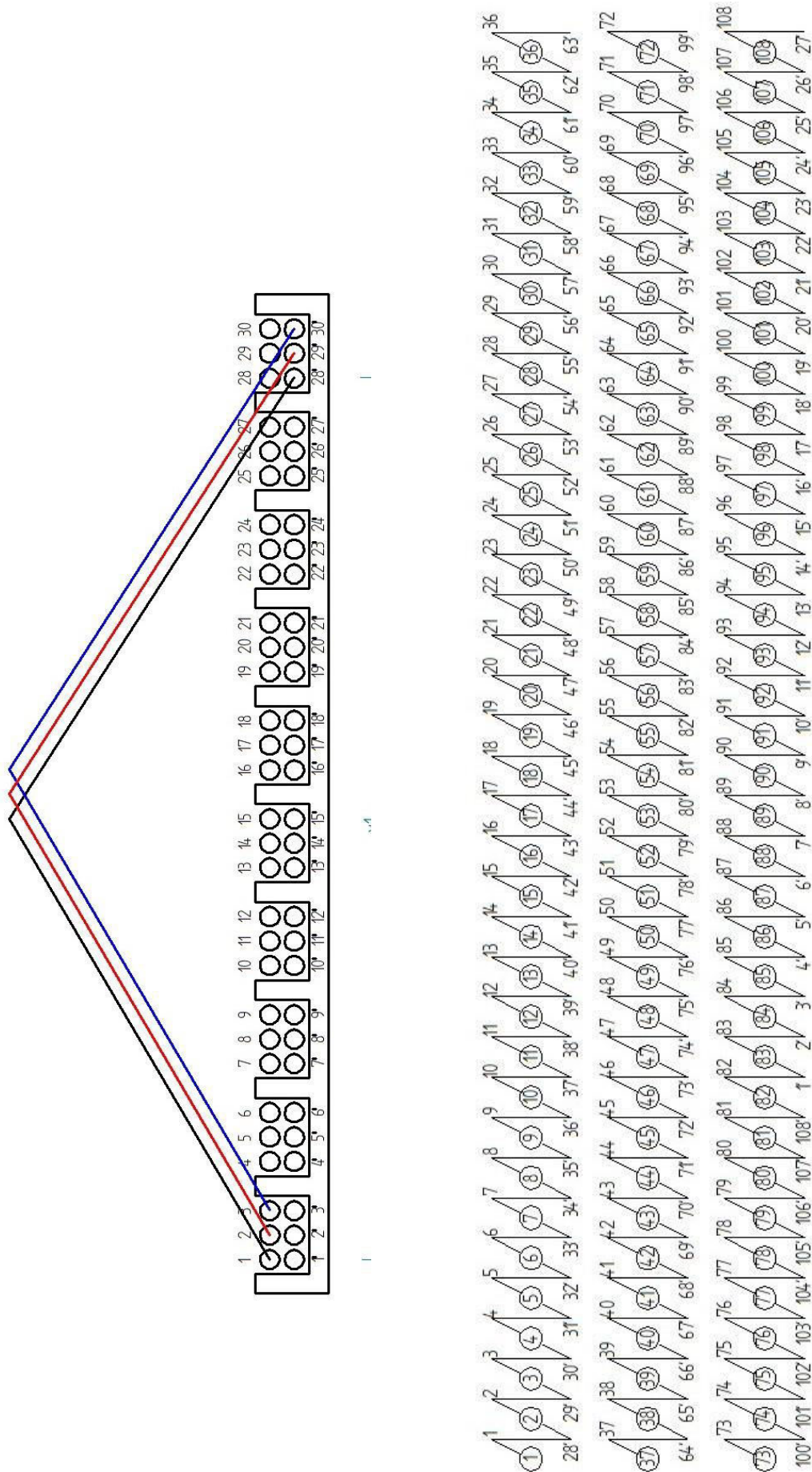
P - 9-Nomogram skutečné indukce- viz.[3]



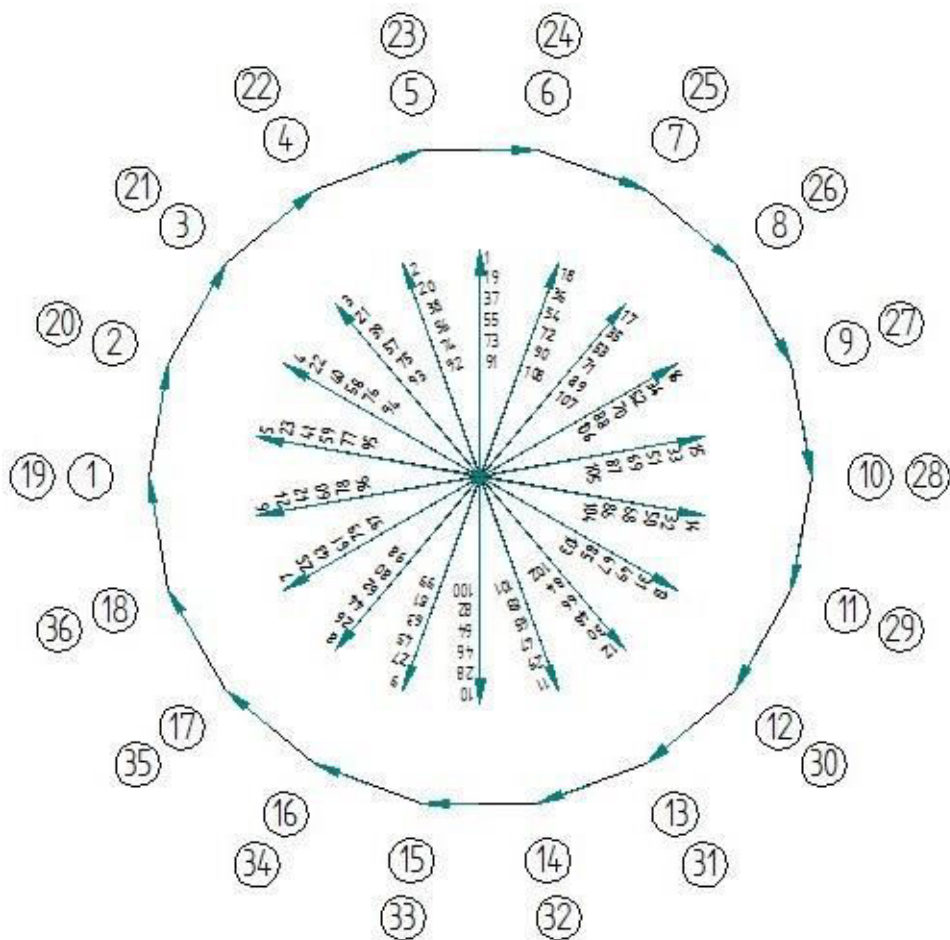
P - 10-Graf pro určení Carterova činitele k_c - viz.[3]



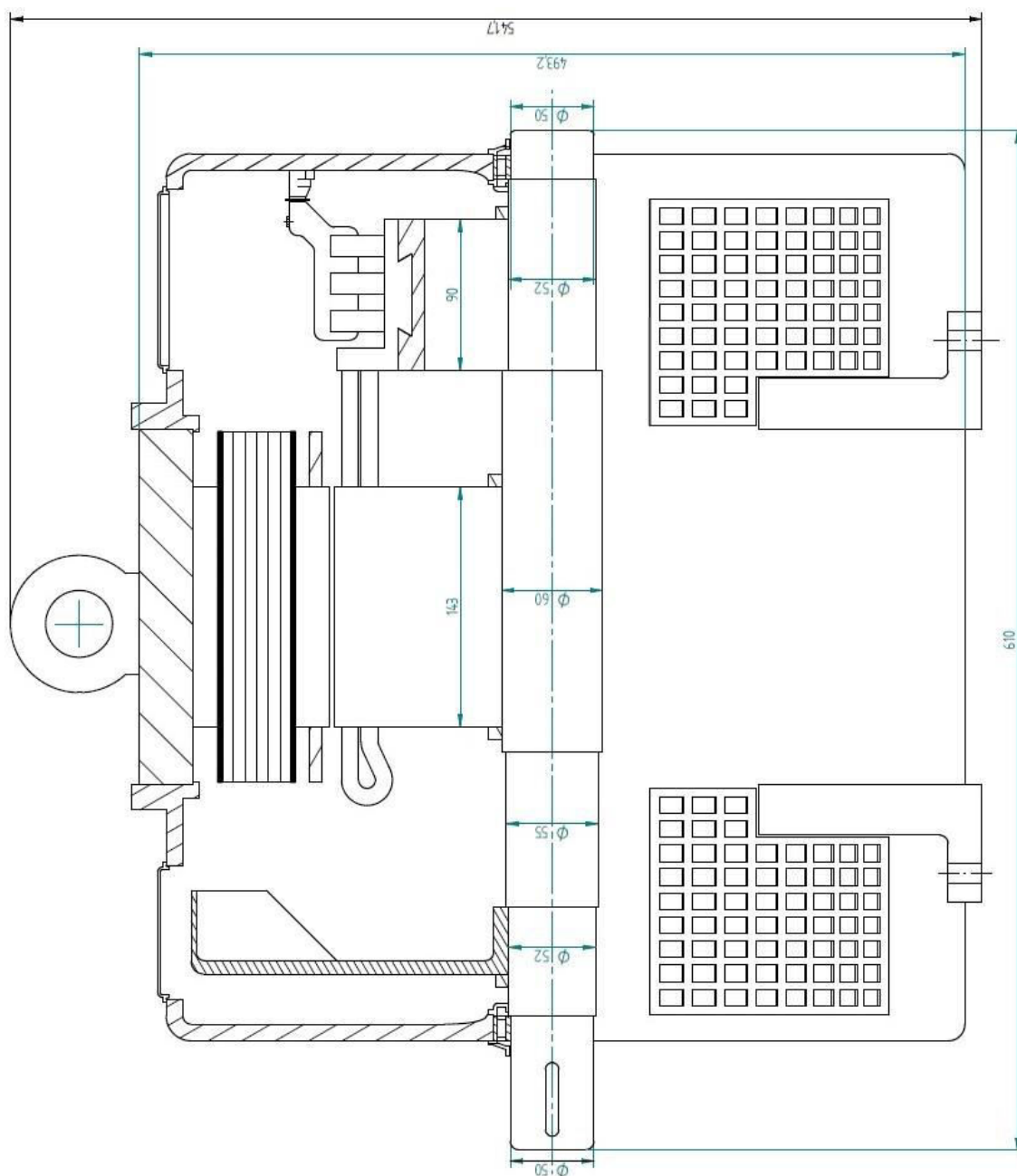
P - 11-Pilové schéma vinutí kotvy



P - 12-Hvězdicový diagram vinutí kotvy



P - 13-Schematický nákres příčného řezu stroje



P - 14- Schematický náčrtek podélného řezu stroje

