

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**  
**FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Vliv velikosti napětí na vlastnosti synchronního stroje**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2014/2015

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Lukáš VEG**  
Osobní číslo: **E13N0048P**  
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Průmyslová elektronika a elektromechanika**  
Název tématu: **Vliv velikosti napětí na vlastnosti synchronního stroje**  
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

1. Provedte elektromagnetický návrh synchronního generátoru těchto parametrů:  $S = 5000$  kVA;  $U = 10500\text{V}$ ;  $n = 750$  ot/min.;  $\cos \varphi = 0,8$ ;  $m = 3$ ;  $X_d = 137\%$ .
2. Provedte návrh stroje se stejnými parametry, ale s napětím  $U = 3\,000$  V.
3. Porovnejte a zdůvodněte vlastnosti obou strojů.
4. Nakreslete schématicky konstrukční uspořádání jednoho z navržených strojů v podélné a příčné poloze.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. Cigánek L. : Stavba elektrických strojů, SNTL 1988.
2. Kopylov I.P. : Stavba elektrických strojů, SNTL 1988.
3. Červený J.: Stavba elektrických strojů, portál ZČU, Courseware 2012.
4. Červený J.: Postup při elektromagnetickém návrhu synchronního stroje, portál ZČU, Courseware 2012.

Vedoucí diplomové práce:

**Doc. Ing. Josef Červený, CSc.**

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání diplomové práce: 15. října 2014

Termín odevzdání diplomové práce: 11. května 2015

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



Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2014

## **Anotace**

Předložená diplomová práce se zabývá vlivem napětí na vlastnosti synchronního generátoru. V rámci práce porovnávám dva stroje se stejným výkonem 5MVA, ale rozdílným sdruženým napětím. V závěru je provedeno vyhodnocení a doporučení jak se řídit při volbě toho napětí.

## **Klíčová slova**

Vliv sdruženého napětí, návrh synchronního generátoru, synchronní stroje s vyniklými póly, elektromagnetický návrh, problematika návrhu točivých strojů, přirozené napětí stroje

## **Abstract**

The present diploma thesis deals with the influence of voltage on the properties of synchronous generator. In this thesis, I compare two machines with the same performance 5MVA but different voltages. In conclusion, there is an evaluation and recommendations on how to proceed when the voltage is being selected.

## **Key words**

Effect of phase voltage, design of synchronous generator, synchronous machines with salient poles, electromagnetic design, design issues for rotating machinery, natural voltage of machines

## Prohlášení

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

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této práce, je legální.

V Plzni dne 1.5.2015

Jméno a příjmení

.....

## **Poděkování**

Tímto bych velice rád poděkoval vedoucímu mé diplomové práce doc. Ing. Josefovi Červenému, CSc. za cenné profesionální rady, vstřícnost, upřímnost, připomínky, metodické vedení práce a zejména za velice obsáhlý a podrobný rozbor problematiky stavby strojů, díky kterému jsem získal přehled v daném oboru. Dále bych rád poděkoval své rodině a přátelům za podporu při studiu i v životě.

## OBSAH

<b>OBSAH .....</b>	<b>8</b>
<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK (LATINSKÉ PÍSMO) .....</b>	<b>10</b>
<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK (ŘECKÉ PÍSMO) .....</b>	<b>15</b>
<b>1 ÚVOD.....</b>	<b>16</b>
1.1 OBLASTI VYUŽITÍ SYNCHRONNÍCH STROJŮ.....	16
1.2 ÚVOD DO PROBLEMATIKY VOLBY HLADINY NAPĚTÍ.....	17
<b>2 ELEKTROMAGNETICKÝ NÁVRH SYNCHRONNÍHO STROJE NA 10 KV.....</b>	<b>18</b>
2.1 ZADÁNÍ OBOU STROJŮ.....	18
2.1.1 Základní hodnoty .....	18
2.1.2 Návrh vinutí induktu (statoru) a ověření proveditelnosti paralelních větví.....	19
2.1.3 Parametry vinutí .....	22
2.1.4 Výpočet činitelů vinutí.....	23
2.1.5 Odpor a rozptylová reaktance statorového vinutí.....	28
2.1.6 Návrh magnetického obvodu.....	31
2.1.7 Velikost vzduchové mezery .....	32
2.1.8 Magnetické napětí reakce kotvy.....	32
2.1.9 Dimenzování magnetického obvodu.....	33
2.1.10 Charakteristika naprázdno .....	34
2.1.11 Návrh budícího vinutí.....	36
2.1.12 Orientační výpočet oteplení budící cívky .....	38
2.1.13 Kroužky a kartáče .....	40
2.1.14 Výpočet tlumiče .....	41
2.2 ZTRÁTY A ÚČINNOST .....	42
2.2.1 Ztráty.....	42
2.2.2 Účinnost .....	44
2.3 MEZIPÓLOVÝ ROZPTYL .....	44
<b>3 NÁVRH DRUHÉHO STROJE SE STEJNÝMI PARAMETRY, ALE NA NAPĚTÍ 3KV .....</b>	<b>48</b>



3.1.1	Návrh vinutí induktu (statoru) .....	48
3.1.2	Odpor a rozptylová reaktance statorového vinutí .....	53
3.1.3	Návrh magnetického obvodu .....	55
3.1.4	Velikost vzduchové mezery .....	56
3.1.5	Magnetické napětí reakce kotvy .....	56
3.1.6	Dimenzování magnetického obvodu .....	56
3.1.7	Charakteristika naprázdno .....	57
3.1.8	Návrh budícího vinutí .....	59
3.1.9	Orientační výpočet oteplení budící cívky .....	60
3.1.10	Kroužky a kartáče .....	60
3.2	ZTRÁTY A ÚČINNOST .....	62
3.2.1	Ztráty .....	62
3.2.2	Účinnost .....	63
3.3	MEZIPÓLOVÝ ROZPTYL .....	63
<b>4</b>	<b>POROVNÁNÍ VLASTNOSTÍ OBOU STROJŮ A VLIV ROZDÍLNÉHO NAPĚTÍ .....</b>	<b>65</b>
4.1	ODLIŠNOSTI STATORU A KONSTRUKČNÍ USPOŘÁDÁNÍ DRÁŽKY .....	65
4.2	ROZDÍLNÉ ODPORY A ROZPTYLOVÁ REAKTANCE STATOROVÉHO VINUTÍ .....	67
4.3	POROVNÁNÍ MAGNETICKÝCH OBVODŮ A BUDÍCÍCH VINUTÍ .....	68
4.4	VLIV VELIKOSTI FÁZOVÉHO NAPĚTÍ NA ZTRÁTY A ÚČINNOST .....	69
<b>5</b>	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>71</b>
	<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ .....</b>	<b>72</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH .....</b>	<b>73</b>
<b>6</b>	<b>PŘÍLOHY .....</b>	<b>74</b>

**Seznam použitých symbolů a zkratk (latinské písmo)**

$2p$ .....	Počet pólů	[-]
$A$ .....	Obvodová proudová hustota	[A/m]
$a$ .....	Přesahující část pólového nástavce	[m]
$a \approx (a_{st})$ .....	Počet paralelních větví každé fáze střídavého vinutí	[-]
$B$ .....	Magnetická indukce	[T]
$B'_{z1}$ .....	Imaginární magnetická indukce v hlavě zubu	[T]
$B'_{z2}$ .....	Imaginární magnetická indukce ve středu zubu	[T]
$B'_{z3}$ .....	Imaginární magnetická indukce v patě zubu	[T]
$B_{z1}$ .....	Magnetická indukce v hlavě zubu	[T]
$b_c$ .....	Šířka čela	[m]
$b_d$ .....	Šířka drážky	[m]
$B_{jr}$ .....	Magnetická indukce ve jhu rotoru	[T]
$b_k$ .....	Šířka kartáčů (rozměr v osovému směru stroje)	[m]
$b_n$ .....	Šířka pólového nástavce	[m]
$b_p$ .....	Šířka pólu	[m]
$B_{z1}$ .....	Skutečná magnetická indukce v hlavě zubu	[T]
$B_{z2}$ .....	Skutečná magnetická indukce ve středu zubu	[T]
$B_{z3}$ .....	Skutečná magnetická indukce v patě zubu	[T]
$B_\delta$ .....	Indukce ve vzduchové mezeře	[T]
$C$ .....	Essonův činitel elektromagnetického využití stroje	[kVa/m <sup>3</sup> ot/min]
$C_1$ .....	Činitel základní harmonické mag. indukce ve vzd. mezeře	[-]
$C_{d1}$ .....	Carterův činitel v podélném směru	[-]
$\cos\varphi$ .....	Účinník	[-]
$C_{q1}$ .....	Carterův činitel v příčném směru	[-]
$D_1$ .....	Průměr induktu	[m]
$D_2$ .....	Průměr statoru, připočítána polovina drážky pro určení $t_{d2}$	[m]
$D_3$ .....	Průměr statoru, připočítány 2x rozměry drážky pro určení $t_{d3}$	[m]
$d_H$ .....	Průměr hřídele	[m]
$d_t$ .....	Průměr tyče tlumiče	[m]
$D_{je}$ .....	Vnější průměr statoru	[m]

$D_k$ .....	Vnější průměr kroužků	[m]
$E$ .....	Vyložení čel	[m]
$f$ .....	Frekvence	[Hz]
$F$ .....	Magnetické napětí	[A]
$F'_a$ .....	Amplituda základní harmonické reakce kotvy	[A]
$F_b$ .....	Budící magnetické napětí	[A]
$F_b$ .....	Počet závitů budící cívky	[m]
$F_{d1}$ .....	Amplituda základní harmonické mag. nap. v podélném směru	[A]
$F_{q1}$ .....	Amplituda základní harmonické mag. nap. v příčném směru	[A]
$F_z$ .....	Magnetické napětí v zubu	[A]
$F_\delta$ .....	Magnetické napětí ve vzduchové mezeře	[A]
$H$ .....	Intenzita magnetického pole	[A/m]
$h_c$ .....	Výška cívky	[m]
$h_{js}$ .....	Výška jádra induktu	[m]
$h_n$ .....	Výška nástavce	[m]
$h_p$ .....	Výška těla pólu	[m]
$H_{stř}$ .....	Střední hodnota magnetické indukce v zubu	[A/m]
$h_v$ .....	Výška vodiče	[m]
$i$ .....	Počet paketů	[-]
$I_1$ .....	Fázový proud	[A]
$I_b$ .....	Budící proud	[A]
$i_k$ .....	Počet kanálů	[-]
$i_k$ .....	Délka kartáčů (rozměr v obvodovém směru)	[m]
$k$ .....	Překladové číslo	[-]
$k_c$ .....	Carterův činitel	[-]
$k_{cd}$ .....	Složka Carterova činitele respektující vliv drážkování induktu	[-]
$k_{ck}$ .....	Složka Carterova činitele respektující vliv ventilačních kanálů	[-]
$k_{Cu}$ .....	Činitel zvýšení elektrického odporu	[-]
$k_{Fe}$ .....	Činitel plnění železa	[-]
$k_{vv}$ .....	Činitel vinutí v-té harmonické	[-]
$k_{z1}$ .....	Činitel pro přepočtení mag. indukce zubu (hlava)	[-]
$k_{z2}$ .....	Činitel pro přepočtení mag. indukce zubu (střed)	[-]

$k_{z3}$ .....	Činitel pro přepočít mag. indukce zubu (pata)	[-]
$L$ .....	Celková délka induktu	[m]
$l_{be}$ .....	Vnější obvod budící cívky	[m]
$l_{bs}$ .....	Střední délka závitů cívky	[m]
$l_{\check{c}}$ .....	Délka čela	[m]
$l_e$ .....	Efektivní délka stroje	[m]
$l_p$ .....	Délka střední siločáry pólu	[m]
$L_r$ .....	Délka rotoru s ohledem na prostor pro dosednutí bud. cívky	[m]
$l_r$ .....	Délka střední siločáry jha rotoru	[m]
$l_s$ .....	Délka střední siločáry jádra induktu	[m]
$l_v$ .....	Délka vodiče	[m]
$m$ .....	Počet fází	[-]
$m_{Fej}$ .....	Hmotnost jádra statoru	[kg]
$m_{Fez}$ .....	Hmotnost zubů statoru	[kg]
$n$ .....	Jmenovité otáčky	[ot./min]
$n_d$ .....	Počet vodičů v drážce	[-]
$n_m$ .....	Maximální otáčky	[ot./min]
$n_s$ .....	Počet segmentů	[-]
$N_s$ .....	Počet závitů v sérii jedné fáze	[-]
$o$ .....	Délka oka	[m]
$O_{2pc}$ .....	Ochlazovací povrch všech cívek	[m <sup>2</sup> ]
$P$ .....	Činný výkon	[W]
$p$ .....	Počet pólpárů	[-]
$p_k$ .....	Měrný tlak kartáčů	[V]
$Q$ .....	Počet drážek induktu	[-]
$q$ .....	Počet drážek na pól a fázi	[-]
$Q_p$ .....	Počet drážek na pól	[-]
$Q_{př}$ .....	Počet drážek na překlad	[-]
$R'_{1/20}$ .....	Elektrický odpor pro stejnosměrný proud	[Ω]
$R_{1/20}$ .....	Odpor při střídavém proudu (20°C)	[Ω]
$R_{1/75}$ .....	Odpor při střídavém proudu (75°C)	[Ω]
$R_{b/75}$ .....	Odpor všech cívek budícího vinutí	[Ω]

$S$ .....	Zdánlivý výkon	[kVA]
$S'_{cub}$ .....	Průřez vodiče budící cívky	[m <sup>2</sup> ]
$S'_{Cu1}$ .....	Průřez vodiče	[mm <sup>2</sup> ]
$S_{Cut}$ .....	Průřez jedné tyče tlumiče	[mm <sup>2</sup> ]
$S_{Cu statoru}$ .....	Průřez vodičů statoru	[mm <sup>2</sup> ]
$S_k$ .....	Celkový průřez kartáčů jedné polarity	[m <sup>2</sup> ]
$S_{kt}$ .....	Celkový průřez kruhu pro pospojování tlumiče	[m <sup>2</sup> ]
$t_{d1}$ .....	Mezidrážková rozteč	[m]
$t_{d2}$ .....	Drážková rozteč stroje ve středu zubu	[m]
$t_{d3}$ .....	Drážková rozteč stroje u paty zubu	[m]
$t_i$ .....	Tloušťka izolace mezi závitů	[m]
$t_k$ .....	Tloušťka kostřičky budící cívky	[m]
$t_k$ .....	Rozteč kartáčů	[m]
$t_t$ .....	Počet tyčí tlumiče	[-]
$t_p$ .....	Mezipólová rozteč	[m]
$U_b$ .....	Budící napětí	[V]
$U_f$ .....	Fázové napětí	[V]
$u_{př}$ .....	Přechodové napětí kartáčů	[V]
$u_R$ .....	Procentní hodnota úbytku napětí na ohmickém odporu	[%]
$U_s$ .....	Sdružené napětí	[V]
$u_\sigma$ .....	Procentní hodnota úbytku napětí na rozptylové reaktanci	[%]
$v$ .....	Výběh cívky z drážky	[m]
$v_k$ .....	Obvodová rychlost kroužků	[m/s]
$v_o$ .....	Maximální obvodová rychlost	[m/s]
$x_d$ .....	Procentní hodnota nesyčené synchronní reaktance	[%]
$X_\sigma$ .....	Rozptylová reaktance statorového vinutí	[Ω]
$x_\sigma$ .....	Procentní hodnota rozptylové reaktance	[%]
$y_1$ .....	Přední cívkový krok	[-]
$y_{1d}$ .....	Cívkový krok v počtu drážek	[-]
$y_2$ .....	Zadní cívkový krok	[-]
$y_k$ .....	Krok na komutátoru	[-]
$z_1$ .....	Šířka zubu	[m]

$z_1$ .....	Šířka zubu (hlava)	[m]
$z_2$ .....	Šířka zubu (střed)	[m]
$z_3$ .....	Šířka zubu (pata)	[m]

**Seznam použitých symbolů a zkratk (řecké písmo)**

$\alpha$ .....	Činitel pólového krytí	[-]
$\alpha_z$ .....	Úhel sklonu čel	[°]
$\beta$ .....	Poměrné zkrácení kroku	[-]
$\delta$ .....	Velikost vzduchové mezery	[m]
$\Delta P$ .....	Celkové ztráty	[W]
$\Delta P_{Cu1}$ .....	Joulové ztráty ve vinutí statoru	[W]
$\Delta P_{Cub}$ .....	Ztráty v budícím vinutí	[W]
$\Delta p_{Fe}$ .....	Ztrátové číslo plechů	[W/kg]
$\Delta P_{Fej}$ .....	Ztráty v jádře induktu	[W]
$\Delta P_{Fez}$ .....	Ztráty v zubech statoru	[W]
$\Delta P_m$ .....	Mechanické ztráty	[W]
$\Delta P_p$ .....	Povrchové ztráty	[W]
$\Delta P_{přid}$ .....	Přídavné ztráty	[W]
$\Delta \vartheta_{Cub}$ .....	Oteplení budící cívky	[°C]
$\eta$ .....	Účinnost	[%]
$\Lambda_{\sigma bn}$ .....	Rozptylová vodivost mezi boky pólových nástavců	[H]
$\Lambda_{\sigma bp}$ .....	Rozptylová vodivost mezi boky pólů	[H]
$\Lambda_{\sigma čn}$ .....	Rozptylová vodivost mezi čely pólových nástavců	[H]
$\Lambda_{\sigma čp}$ .....	Rozptylová vodivost mezi čely pólů	[H]
$\Lambda_{\sigma}$ .....	Celková magnetická vodivost rozptylového toku	[H]
$\mu$ .....	Součinitel tření kartáčů	[-]
$\nu$ .....	Poměrná hodnota mezipólového rozptylového toku	[-]
$\xi$ .....	Náhradní výška vodiče	[-]
$\rho_{Cu}$ .....	Měrný odpor vodiče	[ $\Omega\text{m}/\text{mm}^2$ ]
$\rho_{Cub}$ .....	Proudová hustota ve vodiči	[A/m <sup>2</sup> ]
$\sigma_{Cu1}$ .....	Proudová hustota ve vodiči	[A/m <sup>2</sup> ]
$\sigma_k$ .....	Maximální proudové zatížení kartáčů	[A/cm <sup>2</sup> ]
$\varphi$ .....	Fázový posun	[°]
$\Phi$ .....	Magnetický tok	[Wb]
$\Phi_{\sigma}$ .....	Rozptylový magnetický tok	[Wb]

# 1 Úvod

V předkládané diplomové práci se zabývám vlivem napětí na vlastnosti synchronního stroje. Pod tímto pojmem si lze představit porovnávání jednotlivých úrovní napětí pro jeden stroj, pracující s výkonem 5000kVA. Je důležité si uvědomit, že právě správná volba sdruženého napětí je jedním z nejdůležitějších kroků při elektromagnetickém návrhu. Ve své práci se budu snažit odpovědět na otázky vyvstávající v dané problematice a doporučit některé možnosti postupu při návrhu stroje. V rámci diplomové práce provedu návrh synchronního generátoru pro dvě různé hladiny napětí 3kV a 10kV. Obě dvě varianty budou v závěru práce srovnány a bude provedeno vyhodnocení vlivu napětí na různé části stroje a celkovou účinnost. V rámci práce bude přiložen i schématický příčný a podélný řez stroje a nákres srovnávající lišící se statorové drážky.

## 1.1 Oblasti využití synchronních strojů

Synchronní stroje jsou nejčastěji používány jako alternátory, tj. jako měniče mechanické energie na elektrickou. Dále můžeme nalézt synchronní stroj pracující jako kompenzátor na síti, v tomto případě není rotor stroje vyveden a stroj má za úkol dodávat do sítě jalový výkon. Poslední uplatnění synchronního stroje je pracovat jako motor. Pokud pomíneme problematiku rozběhů a regulace otáček, nalezneme synchronní motory v různých aplikacích. V dnešní době se stále populárnější stávají stroje s permanentními magnety, což jsou synchronní motory, které mají elektrické buzení nahrazené magnety; lze nalézt například jako pohon tramvají ForCity(15T) od společnosti Škoda Transportation. V případě velkých strojů naopak jako pohon v přečerpávacích elektrárnách.

Synchronní stroje se vyrábějí ve velkém rozsahu výkonů, od zlomků wattů (miniaturní motorky pro nejrůznější automatizaci, či pohony) až po tisíce megawattů (turboalternátory v jaderných elektrárnách). V zásadě máme dva typy synchronních generátorů a to s hladkým rotorem a s rotorem s vyniklými póly. Ve své práci se zabývám druhým typem, který by bylo možné použít v zapojení s pomaluběžnou turbínou (např. v malé vodní elektrárně) nebo Dieslovým motorem. V dnešní době se změnil konstrukční přístup, kdy se nyní snažíme o co nejvyšší výkony chlazené vzduchem. V minulých dobách byla hranice pro vzduchové chlazení 100,200MVA, nyní se již podařilo vyrobit 500MVA 4-pólový turboalternátor (Alstom-Francie).



Při kombinovaném chlazení voda-vodík se dokonce vyrobil stroj se zdánlivým výkonem 2191MVA. Jen pro doplnění, rekordmanem z oblasti hydroalternátorů je 840MVA generátor nasazený na vodní elektrárně Itaipu v Brazílii. Když vidíme tyto obrovské výkony a jejich neustálé posouvání vzhůru, vyvstává nám otázka, na jaké napětí vlastně tyto stroje stavět? Bude přínosnější zvolit nižší nebo vyšší napětí? Na tyto a další otázky se budu ve své diplomové práci pokoušet odpovědět. [6,8,9]

## 1.2 Úvod do problematiky volby hladiny napětí

Z čeho se vlastně vychází? Elektromagnetický návrh stroje je velmi specifická oblast kombinující teorii el. strojů a jejich vlastní výrobu. Musí se zohledňovat fyzické zákony a možnosti při výrobě. Prolíná se zde mnoho jednotlivých oborů a zdánlivě spolu nesouvisejících skutečností. Existuje mnoho metod a postupů. Já budu postupovat dle doc. Červeného, který v součinnosti se svými bývalými kolegy ze společnosti Škoda vytvořil určitou metodiku návrhu. Na počátku máme zadání, toto zadání se odvíjí od konkrétního projektu. Určitě máme přesně definován výkon, který od stroje požadujeme a otáčky při kterých bude pracovat. Ty jsou většinou dány fyzikální podstatou „zdrojem momentu“ pro generátor. Další parametry jsou již ale svázány se sítí, do které bude daný stroj pracovat. A zde si můžeme položit další otázku a to, jaké sdružené napětí by mělo být na svorkách stroje? Z logiky věci se nám může zdát, že bude příhodnější napětí vyšší, z důvodu nižších Joulových ztrát (které jsou majoritní složkou ovlivňující účinnost stroje). Dále je ale nutné uvažovat i nad tím, k jaké hladině distribuční síť bude generátor připojen. Kdybychom to vzali obecně, byl by holý nerozum, připojovat stroj na nízké napětí (při stejném výkonu, by byl protékáný mnohonásobně vyššími proudy) přes distribuční transformátor s velkým převodem na vysokou hladinu napětí. Takový transformátor by vycházel zbytečně velký a drahý. Proto je dobré dávat důraz i na tuto stránku věci. Při příliš vysokém napětí je problém jiný. Čím vyšší je napětí statorového vinutí, tím se zvyšuje cena a potřebná tloušťka izolace vůči železu. Je důležité, aby měla drážka určitý podíl mědi a izolace (snažíme o co nejvíce mědi v drážce).

Kde je tedy optimum a dle čeho se řídit? V oboru stavby elektrických strojů se někdy hovoří o takzvaném „přirozeném napětí stroje“, tj. napětí, které odpovídá výkonu a tím i rozměrům stroje. Potíž je v tom, že toto napětí není přesně definované a vlastně ani definovatelné. Vždy je tedy nutné provést více návrhů pro různá napětí a k tomu vypracovat cenovou kalkulaci, návratnost nákladů pro dané řešení a spolehlivost.

## 2 Elektromagnetický návrh synchronního stroje na 10 kV

### 2.1 Zadání obou strojů

Při mém výpočtu postupuji dle předchozích návrhů převzatých z praxe. Na následujících řádcích uvádím výpočet parametrů obou strojů. Pro oba stroje zavedu barevné rozlišení, což předpokládám, pomůže v rychlé orientaci. Společné hodnoty zůstanou označeny černě.

Zdánlivý výkon	$S = 5\,000$ kVA
Sdružené napětí	$U = 10\,500$ V
Sdružené napětí	$U = 3000$ V
Jmenovité otáčky	$n = 750$ ot./min.
Počet fází	$m = 3$
Frekvence	$f = 50$ Hz
Účinnost	$\cos\varphi = 0,8$
Počet pólů	$2p=8$
Činitel pólového krytí	$\alpha=0,7$
Podélná synchronní reaktance	$x_D=137\%$

#### 2.1.1 Základní hodnoty

V této části se určují hlavní rozměry synchronního stroje a jde především o hrubou představu, jaké bude mít výsledný stroj rozměry.

Činný výkon:

$$P = S \cdot \cos \varphi = 5000 \cdot 0,8 = 4000 \text{ kW} \quad (2.1)$$

Fázové napětí stroje A:

$$U_f = \frac{U}{\sqrt{3}} = \frac{10500}{\sqrt{3}} \cong 6062 \text{ V} \quad (2.2)$$

Počet pólpárů:

$$p = \frac{60 f}{n} = \frac{60 \cdot 50}{750} = 4 \quad (2.4)$$

Počet pólů:

$$2p = 8 \quad (2.5)$$

Fázový proud:

$$I_1 = \frac{S}{U_S \sqrt{3}} = \frac{5000}{10500 \sqrt{3}} \cong 275 \text{ A} \quad (2.6)$$

Průměr induktu (statoru) ve vzduchové mezeře (vrtání statoru) odečítám z grafu č. 2 zařazeného v příloze. Tato charakteristika byla vytvořena na základě předchozích návrhů.

Pro oba výpočty je voleno  $D_1 = 1,5 \text{ m}$

Další hodnoty se odečítají z grafu č. 1, viz příloha diplomové práce a jsou společné pro oba stroje:

Obvodová proudová hustota:  $A = 64\,000 \text{ A/m}$

Indukce ve vzduchové mezeře:  $B_\delta = 0,83 \text{ T}$

Mezipólová rozteč:

$$t_p = \frac{\pi D_1}{2p} = \frac{\pi \cdot 1,5}{8} = 0,589 \text{ m} \quad (2.7)$$

### 2.1.2 Návrh vinutí induktu (statoru) a ověření proveditelnosti paralelních větví

Po uvážení průměru statoru a napětí stroje, volím mezidrážkovou rozteč  $t_{d1}=45\text{mm}$ . (zpravidla se volí mezi  $15 \div 50 \text{ mm}$ ). Prvotní volba mezidrážkové rozteče je pouze orientační. Větší drážkovou rozteč volíme s ohledem na narůstající napětí stroje a tudíž i zvětšováním izolace mezi cívkou a železem.

$$Q = \frac{\pi D_1}{t_{d1}} = \frac{\pi \cdot 1,5}{0,045} \approx 105 \quad (2.8)$$

Dále se určuje počet drážek na pól a fázi. Pokud vyjde  $q$  menší než 7 až 8, ve vhodné volit zlomkové vinutí. Zlomkové vinutí se používá, pokud potřebujeme dosáhnout jemnějšího průběhu indukovaného napětí. U zlomkových vinutí např.  $\frac{9}{2}$  je efekt stejný, jako bychom měli 9 drážek na pól a fázi. Ovšem je důležité nezapomenout, že se musí zkontrolovat proveditelnost počtu paralelních vinutí. Některé případy totiž nabízí jen možnost sériového zapojení cívek.

Na generátory je kladen zvlášť velký důraz, aby generovali pokud možno co nejhladší průběh indukovaného napětí základní harmonické (v maximální možné míře potlačovaly harmonické vyšších řádů). To se dále ovlivňuje tvarem pólového nástavce, zaoblením jeho hran a tím vzniká jiná velikost vzduchové mezery na krajích a uprostřed. U synchronních strojů v hladkém rotorem se zásluhou uložení rotorového vinutí v drážkách docílí lichoběžníkového průběhu magnetického napětí, případné korekce je možné provést pomocí krajních drážkových klínů nebo provedením jedné nenavinuté drážky. [1,5]

$$q = \frac{Q}{2pm} = \frac{105}{8 \cdot 3} = 4,375 \rightarrow \text{dále volím zlomkové vlnové vinutí} \rightarrow$$

$$\frac{18}{4} = \frac{9}{2} \text{ a jiný počet drážek, konkrétně } \mathbf{108} \quad (2.9)$$

Je důležité neopomenout, aby vycházelo  $Q_f = \frac{Q}{m} = \frac{2pmq}{m} = 2pq = 2p \frac{n}{c} = \text{č.celé}$  Při skládání plechů je možný poloviční nebo třetinový překlad ( $k=2$  nebo  $k=3$ ), ale musí platit:  $Q = k \cdot n_s \cdot Q_{př}$  kde  $n_s$  je počet segmentů a  $Q_{př}$  počet drážek na překlad. Já volím poloviční překlad; tedy překladové číslo bude  **$k=2$**

$$q = 4 \frac{2}{4} = \frac{9}{2}$$

$$Q = 2pmq = 2 \cdot 4 \cdot 3 \cdot \frac{18}{4} = 108 = 2 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 3 \quad (2.10)$$

Následně po určení překladového čísla volím:

počet segmentů  **$n_s = 6$**

počet drážek na překlad  **$Q_{př} = 9$**

Počet závitů jedné fáze v sérii pro stroj A:

$$N_s = \frac{\pi D_1 A}{2m l_1} = \frac{\pi 1,564\,000}{2 \cdot 3 \cdot 275} \cong 183 \text{ závitů} \quad (2.11)$$

Počet vodičů v drážce:

$$n_d = \frac{a_{\approx} N_s}{p q} = \frac{1,183}{4 \cdot \frac{18}{4}} = 10,166 \cong 10 \text{ vodičů} \quad (2.12)$$

V našem případě dvouvrstvého vinutí, je podmínka sudého počtu. Po této volbě přichází na řadu takzvané úsečkové jednofázové schéma, pomocí něhož ověříme jejich fyzickou proveditelnost.

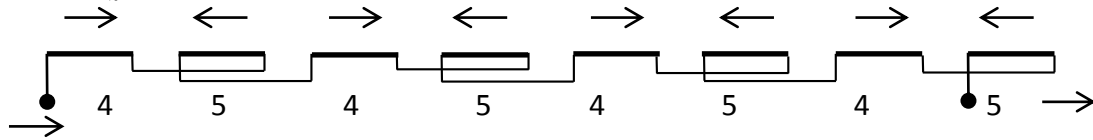
Legenda:

— skupina cívek v jedné fázi (v mém návrhu viz. rov. 2.22 je **v jedné skupině 4,5**

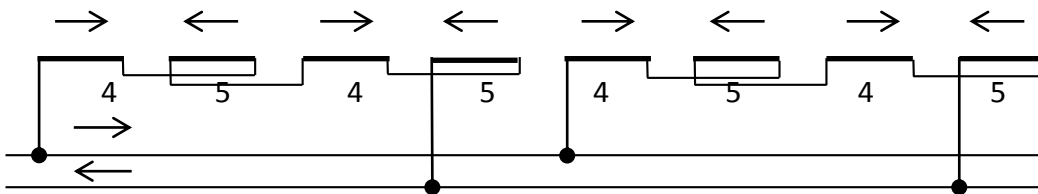
cívky )

→ směr proudu cívkou  
←

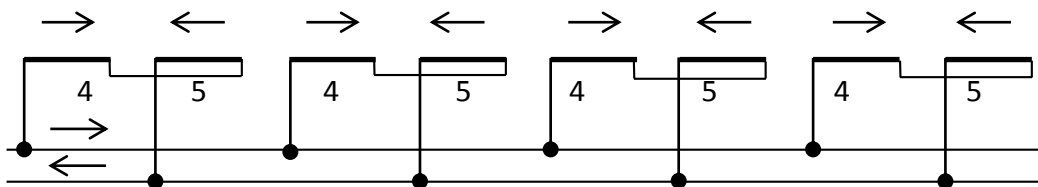
a) pro  $a_{\approx}=1$ :



b) pro  $a_{\approx}=2$ :



c) pro  $a_{\approx}=4$ :



Zapojení vinutí do série můžeme provést vždy, dále je z úsečkového schématu vidět, že můžeme provést i 2 nebo 4 paralelní větve. V případě vyššího počtu paralelních vinutí však roste množství další mědi kvůli propojení skupin cívek (má negativní vliv na účinnost – zvýšení délky neaktivní části vinutí, která se nepodílí na tvorbě magnetického toku) a dále vychází horší činitel plnění drážky kvůli nárůstu mezizávitové izolace. Výhoda je ovšem částečné potlačení nesymetrií (lepší rozložení magnetického pole), jelikož jsou cívky a skupiny rozloženy pod více póly.

Přepoččet počtu závitů v sérii jedné fáze:

$$N_s = \frac{n_d pq}{a_{st}} = \frac{10 \cdot 4 \cdot \frac{9}{2}}{1} = 180 \text{ závitů} \quad (2.13)$$

Skutečná hodnota obvodové proudové hustoty pro stroj A:

$$A = \frac{2mI_1}{\pi D_1} N_s = \frac{2 \cdot 3 \cdot 275}{\pi \cdot 1,5} \cdot 180 \cong 63025 \text{ A/m} \quad (2.14)$$

**2.1.3 Parametry vinutí**Počet drážek  $Q = 108$ Počet pólů  $2p = 8$ Počet fází  $m = 3$ Matematický počet fází  $m' = 6$ Počet drážek na pól a fázi  $q = 4 \frac{1}{2} = \frac{9}{2}$ Typ vinutí: vlnové,  
nekrížené

Počet drážek na pól:

$$Q_p = \frac{Q}{2p} = \frac{108}{8} = 13,5 \quad (2.15)$$

Zvolen cívkový krok:  $y_{1d} = 11$ 

Nejvyšší potlačení 5. a 7. harmonické nastává u poměru 0,8333, to bohužel s danými parametry dosáhnout nešlo a tak jsem zvolil přední cívkový krok v počtu drážek 11.

Poměrné zkrácení kroku:

$$\beta = \frac{y_{1d}}{Q_p} = \frac{11}{13,5} = 0,814 \quad (2.16)$$

Krok na komutátoru:

$$y_k = \frac{\varepsilon K \pm a_{ss}}{p} = \frac{1 \cdot 108 - 4}{4} = 26 \quad (2.17)$$

Základní stejnosměrné vinutí je vlnové ( $\varepsilon = 1$ ), paralelní ( $a_{ss} = 4$ ) a nekrížené.Kroky v počtu cívkových stran:

Zadní cívkový krok:

$$y_1 = 2uy_{1d} + 1 = 2 \cdot 1 \cdot 11 + 1 = 23 \quad (2.18)$$

Přední cívkový krok

$$y_2 = 2y_k - y_1 = 2 \cdot 26 - 23 = 29 \quad (2.19)$$

Vinutí střídavé:Počet skupin vinutí:  $a_{ss} m' = 4 \cdot 6 = 24 \quad (2.20)$ Počet skupin v jedné fázi:  $\frac{a_{ss} m'}{m} = \frac{4 \cdot 6}{3} = 8 \quad (2.21)$

$$\text{Počet cívek ve skupině: } \frac{Q}{a_{ss} m'} = \frac{108}{4.6} = 4,5 \quad (2.22)$$

#### 2.1.4 Výpočet činitelů vinutí

Činitel vinutí  $v$ -té harmonické: ( $v$  – řád harmonické,  $\beta$ -poměrné zkrácení kroku,  $m'$ -matematický počet fází,  $n$  - čísel počet drážek na pól a fázi ( $q = \frac{n}{c}$ ))

$$k_{vv} = \sin\left(v\beta \frac{\pi}{2}\right) \frac{\sin v \frac{\pi}{m'}}{n \cdot \sin v \frac{\pi}{m' n}} \quad (2.23)$$

Činitel základní harmonické ( $v = 1$ ):

$$k_{v1} = \sin\left(1.0,814 \frac{\pi}{2}\right) \frac{\sin 1 \frac{\pi}{6}}{18 \cdot \sin 1 \frac{\pi}{6.18}} = 0,9406 \quad (2.24)$$

Činitel 5-té harmonické:

$$k_{v5} = \sin\left(5.0,814 \frac{\pi}{2}\right) \frac{\sin 5 \frac{\pi}{6}}{18 \cdot \sin 5 \frac{\pi}{6.18}} = 0,1232 \quad (2.25)$$

Činitel 7-té harmonické:

$$k_{v7} = \sin\left(7.0,814 \frac{\pi}{2}\right) \frac{\sin 7 \frac{\pi}{6}}{18 \cdot \sin 7 \frac{\pi}{6.18}} = 0,0470 \quad (2.26)$$

Činitel 11-té harmonické:

$$k_{v11} = \sin\left(11.0,814 \frac{\pi}{2}\right) \frac{\sin 11 \frac{\pi}{6}}{18 \cdot \sin 11 \frac{\pi}{6.18}} = -0,0303 \quad (2.27)$$

Činitel 13-té harmonické:

$$k_{v13} = \sin\left(13.0,814 \frac{\pi}{2}\right) \frac{\sin 13 \frac{\pi}{6}}{18 \cdot \sin 13 \frac{\pi}{6.18}} = -0,0485 \quad (2.28)$$

Nyní již můžeme určit skutečnou hodnotu Essonova činitele elektromagnetického využití stroje:

$$C = \frac{\pi^2}{60\sqrt{2}} AB_{\delta} k_{v1} = \frac{\pi^2}{60\sqrt{2}} \cdot 63025 \cdot 0,83 \cdot 0,9406 = 5,723 \frac{\text{kVA}}{\text{m}^3 \text{ ot/min}} \quad (2.29)$$

Dle Essonova činitele lze následně dopočítat efektivní délku stroje:

$$l_e = \frac{S}{CD_1^2 n} = \frac{5000}{5,723 \cdot 1,5^2 \cdot 750} = 0,518 \text{ m} \quad (2.30)$$

Vzhledem k výkonu stroje a délce stroje se pro zlepšení chlazení dělí statorový svazek na několik paketů, mezi nimiž jsou radiální ventilační kanály. Délka jednotlivých paketů je přibližně  $\check{s}_p = 50\text{mm}$ , přičemž volíme šířku kanálu  $\check{s}_k = 10\text{mm}$ .

Počet paketů:

$$i = \frac{l_e}{\check{s}_p} = \frac{0,518}{0,05} \cong 10 \quad (2.31)$$

Počet kanálů:

$$i_k = i - 1 = 10 - 1 = 9 \quad (2.32)$$

Celková délka induktu (včetně radiálních kanálů):

$$L = l_e + \check{s}_k i_k = 0,518 + 0,01 \cdot 9 \cong 0,608\text{m} \quad (2.33)$$

Velikost drážkové rozteče na průměru  $D_1$  :

Právě v této části výpočtu se projeví rozdílnost obou strojů. Protože se liší počet vodičů v drážce a také velikost proudu protékajícího cívkami, bude se zásadně lišit konstrukční uspořádání drážky pro oba stroje.

$$t_{d1} = \frac{\pi D_1}{Q} = \frac{\pi \cdot 1500}{108} = 43,6 \text{ mm} \quad (2.34)$$

Šířka zubu:

$$z_1 = \frac{B_\delta t_{d1}}{B'_{z1} k_{Fe}} = \frac{0,83 \cdot 43,6}{1,7 \cdot 0,96} = 22,2 \text{ mm}, \quad (2.35)$$

kde:  $B_{z1}$  je zvolená hodnota magnetické indukce v hlavě zubu (na průměru  $D_1$ )

$k_{Fe}$  činitel plnění železa (vzhledem k použití plechů tloušťky 0,5mm a jejich vzájemné chemické izolace je volen vysoký činitel plnění železe a to **0,96**)

Šířka drážky je pak:

$$b_d = t_{d1} - z_1 = 43,6 - 22,2 = 21,4 \text{ mm} \quad (2.36a)$$

Nejbližší normalizovaná šířka určená z tabulky drážky M ([1] str. 662 – tab. D4.1d) je:

$$b_d = 21,5 \text{ mm} \quad (2.36b)$$

a skutečná šířka zubu:

$$z_1 = t_{d1} - b_d = 43,6 - 21,5 = 22,1 \text{ mm}. \quad (2.37)$$

Vzhledem k tomu, že se jedná o závitové vinutí ( $n_d = 10$ ), odpovídá pro napětí 10,5 kV následující uspořádání vodičů a izolace v drážce; dále rozepsané v tab. 1.



Nejprve si určíme proudovou hustotu ve vodiči pomocí empirického vztahu:

$$\sigma_{Cu1} = \sqrt{\frac{K}{b_v}} = \sqrt{\frac{155}{16}} = 3,11 \text{ A/mm}^2 \quad (2.38)$$

kde  $b_v$  šířka holého vodiče v drážce a  $K$  je konstanta závislá na napětí (viz. tab. 1):

U [kV]	0,4	3,0	6,3	<b>10,5</b>
K	250	210	190	<b>155</b>

Tabulka 1 - Určení konstanty  $K$  dle napětí (volená hodnota je zvýrazněna)

Následně dopočítáme průřez vodiče:

$$S'_{Cu1} = \frac{I_1}{a_{st}\sigma_{Cu1}} = \frac{275}{1 \cdot 3,11} \cong 88,35 \text{ mm}^2 \quad (2.39)$$

Výška vodiče  $h_v$  při jeho šířce 16 mm, jak vychází z bilance drážky na šířku:

$$h_v = \frac{S_{Cu1}}{b_v} = \frac{88,35}{16} \cong 5,5 \text{ mm} \quad (2.40)$$

#### Zvoleno $b_v = 16 \text{ mm}$ a $h_v = 2,8$

Při uvažování výšky vodiče 5,5 mm by vznikaly neúměrně vysoké ztráty vlivem skin efektu. Tento problém řeším rozdělením vodiče na více paralelních vodičů menších rozměrů. Vodiče jsou voleny dle normalizovaných rozměrů, viz příloha Graf 5 a jim odpovídajícím skutečným průřezům, které respektují nerovnost povrchu a především zaoblení hran.

Výše navržený původní vodič je tedy rozdělen na výšku na dva vodiče ( $i=2$ ) a na šířku dělen není (tedy  $j=1$ ). Skutečný průřez jednoho vodiče je dle ČSN (příloha graf 5):

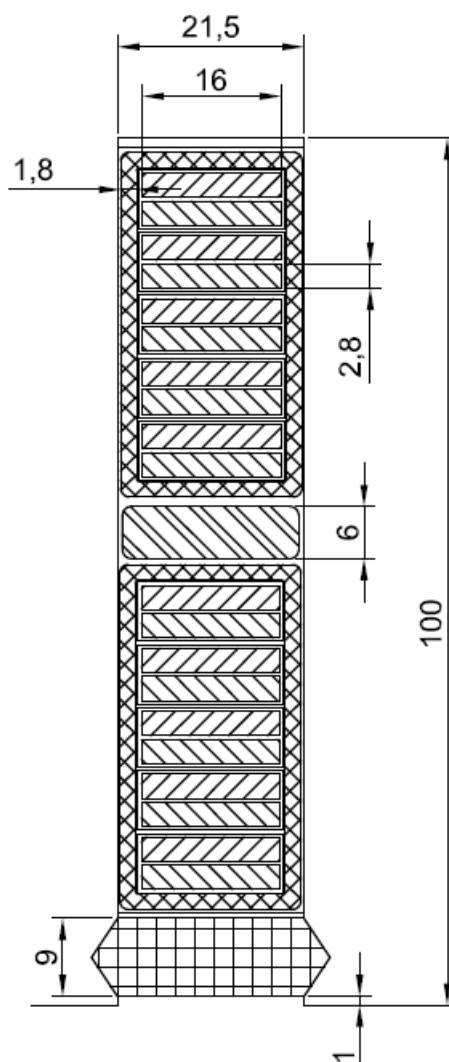
Poz.	Položka	Šířka		Hloubka	
1	Vyložení drážky 1)	----	-	----	-
2	Izolace proti železu	2 · $t_i \rightarrow 2 \cdot 1,8$	3,6	4 · $t_i \rightarrow 4 \cdot 1,8$	7,2
3	Vnější ochrana proti koruně	2 · 0,1	0,2	4 · 0,1	0,40
4	Stažení vodičů	2 · 0,15	0,3	4 · 0,15	0,60
5	Izolace závitů	2 · 0,44	0,88	2 · $n_d \cdot 0,44 \rightarrow 2 \cdot 10 \cdot 0,44$	8,8
6	Izolace vodičů 2)	$j \cdot 0,37 \rightarrow 1 \cdot 0,37$	0,37	$n_d \cdot i \cdot 0,37 \rightarrow 10 \cdot 2 \cdot 0,37$	7,4
7	Mezivrstva	-	-	1 · $m_v \rightarrow 1 \cdot 6$	6,00
8	$\Sigma$ izolace		5,35		30,4

9	Vůle na šířku	0,2 až 0,6	0,15	-	-
10	Holý vodič 3)	$j \cdot b \rightarrow 1.16$	16,00	$n_d \cdot i \cdot h_v \rightarrow 10.2.2,8$	56
11	Vložka na dno	-	-	1 . 1,00	1,00
12	Vložka pod klín	-	-	1 . 1	1,00
13	Vůle na hloubku	-	-	0,4 až 2,0	1,6
14	Rozměr drážky bez klínu	$b_d$	21,5	$h_2$	90
15	Klín + můstek	-	-	$h_0 + h_1 \rightarrow 1 + 9$	10,00
16	<b>Konečný rozměr drážky</b>	<b><math>b_d</math></b>	<b>21,5</b>	<b><math>h_d</math></b>	<b>100,00</b>

Tabulka 2 - Rozpis jednotlivých rozměrů drážky

Komentář:

- 1) platí jen do napětí 3 kV, pro vyšší napětí se povrch cívkky je natírá polovodivým nátěrem a ten musí přijít do styku s povrchem drážky a proto se vyložení drážky nepoužívá
- 2) jde o oboustranný přírůstek izolace
- 3) rozměry vodičů jsou dle ČSN



Obrázek 1 – Řez drážkou stroje pro napětí 10,5kV

V současnosti se již u strojů s pracovním napětím nad 3kV tyče opatřují v celé délce vodivým povlakem nebo se omotávají vodivou páskou. Nátěr přesahuje na obou stranách aktivní železo minimálně o 20 mm a slouží jako ochrana před vytvářením nepříznivých jevů, hlavně korony. Při vyšších napětích je možno u výběhu cívek z drážek dosáhnout pozvolnějšího a příznivějšího rozložení potenciálu (bez velkého gradientu) pomocí odsazených vrstev jednotlivých povlaků provedených odstupňovanou vodivostí jednotlivých nátěrů.

V točivých elektrických strojích se mohou použít dva typy přípravy izolačních systémů. V případě Resin-rich se používá tříložkový kompozit obsahující skleněnou tkaninu a kalcinovaný slídový papír. Jako pojivo se používá novalaková nebo epoxidová pryskyřice. Vzniklá páska se navíjí na vodič s polovičním, třetinovým nebo dvoutřetinovým překrytím a následně se vytvrzuje při dané teplotě.

U VPI technologie máme kompozit obsahující též skleněná vlákna a slídový papír, ovšem tento papír je savý a je připraven pojmout impregnant (epoxidové, polyesterové a silikonové pryskyřice). Proces impregnace pak zahrnuje sušení pro odstranění vlhkosti. Dále se cívka zaplaví v impregnačním kotli (vakuum) a za následného přetlaku se impregnace vtlačí do izolační vrstvy; vytvrzení pak již probíhá při normálním tlaku a teplotě.

Napětí / kV /	Izolace proti železu – t : / mm /						Mezivrstva m <sub>v</sub> : /mm/
	obyčejná	Lepší	Typ: Samicatherm	Typ: Relanex	Typ: Calmica	Typ: Relastik	
0,4 až 1,5	0,45	-	-	-	-	-	3
3,0	1,8	1,6	1,4	1,4	1	1	3
6,3	3,0	2,7	2,4	1,8	1,5	1,3	4
<b>10,5</b>	3,5	3,3	3,1	2,8	<b>1,8</b>	2	<b>6</b>
13,8	4,5	4,2	4,0	3,8	3,2	3	6
15,7		4,6	4,4	4,0	3,8		7
18,0		5,5	5,0	5,0	4,4		7
24,0				6,5			

Tabulka 3 - Tloušťky izolace při různých napětích (zvýrazněna volená izolace) [5 a 10]

$$S_I = 44,2 \text{ mm}^2. \quad (2.41)$$

Výsledný průřez vodičů tvořícího jeden závit je:

$$S_{Cu1} = j.i.S_I = 1.2.44,2 = 88,4 \text{ mm}^2 \quad (2.42)$$

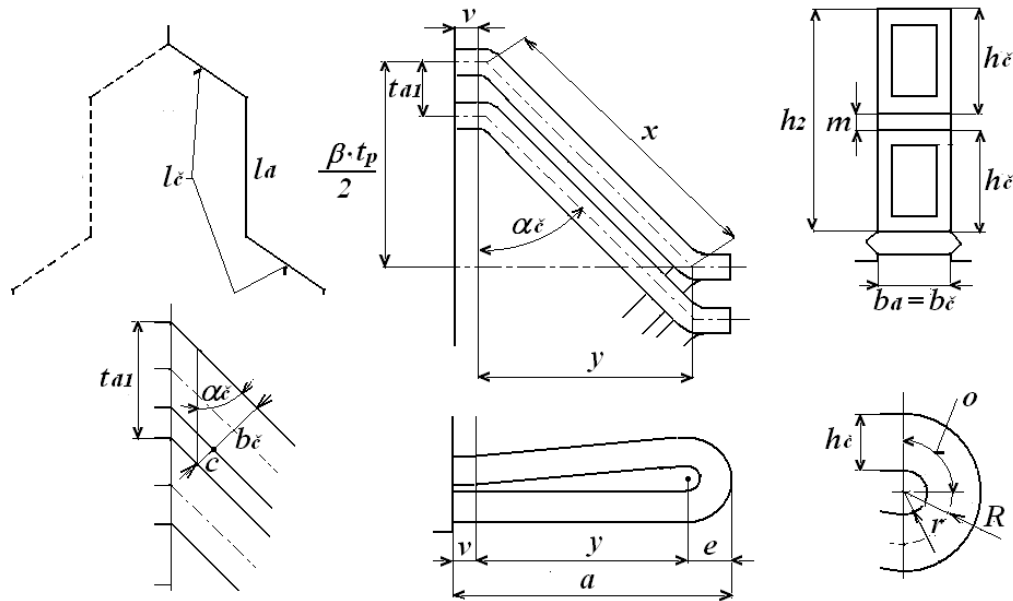
a skutečná proudová hustota:

$$\sigma_{Cu1} = \frac{I_1}{a_{st} S_{Cu1}} = \frac{275}{1.88,4} = 3,11 \text{ A/mm}^2 \quad (2.43)$$

Legenda: synchronní stroj A:  $U_S=10500V$  / synchronní stroj B:  $U_S=3000V$

**2.1.5 Odpor a rozptylová reaktance statorového vinutí**

Délka čela:



Vnitřní poloměr oka  $r$  je závislý především na rozměrech vodiče, dále na velikosti cívek, napětí a požadavku na chlazení čel a pohybuje se v rozmezí:  $r = (5 \div 20) \text{ mm}$ .

Výška čela je rovna přibližně: 
$$h_{\xi} \doteq \frac{1}{2}(h_2 - m) = \frac{1}{2}(90 - 6) = 42 \text{ mm}, \quad (2.44)$$

kde  $h_2$  je hloubka drážky od jejího dna pod klín (viz řez drážkou).

Střední poloměr oka: 
$$R = r + \frac{h_{\xi}}{2} = 15 + \frac{42}{2} = 36 \text{ mm} \quad (2.45)$$

Vzdálenost mezi čely  $c$  se volí např. v závislosti na velikosti napětí podle vztahu:

$$c = 4 + \frac{U[\text{kV}]}{2} = 4 + \frac{10,5}{2} = 9 \text{ mm} \quad (2.46)$$

Úhel sklonu čel válcového vinutí: 
$$\sin \alpha_{\xi} = \frac{b_{\xi} + c}{t_{d1}} = \frac{21,5 + 9}{43,6} = 0,6966 \quad (2.47)$$

$$\alpha_{\xi} = \arcsin 0,6997 = 44,4^{\circ} \quad (2.48)$$

když šířku čela  $b_{\xi}$  volíme stejnou jako šířku drážky  $b_d$ .

Délka šroubovice tvořící část čela: 
$$x = \frac{\beta \cdot t_p}{2 \cos \alpha_{\xi}} = \frac{0,814 \cdot 589}{2 \cdot \cos 44,4^{\circ}} = 366 \text{ mm} \quad (2.49)$$

Délka oka: 
$$o = \frac{\pi \cdot R}{2} = \frac{\pi \cdot 36}{2} = 56,5 \cong 55 \text{ mm} \quad (2.50)$$

Délka čela: 
$$l_{\xi} = 2(v + x + o) = 2(70 + 366 + 55) = 982 \text{ mm} \quad (2.51)$$

Výběh cívky z drážky „ $v$ “ je závislý na napětí stroje podle následující tabulky:

U [kV]	méně než 0,6	3	6	<b>10 ÷ 15</b>
v [mm]	25	35 ÷ 40	40 ÷ 60	<b>60 ÷ 70</b>

Tabulka 4 - Určení výběhu cívky dle jmenovitého napětí stroje (zvýrazněná volená hodnota)

Délka vodiče:

$$l_v = L + l_{\xi} = 0,608 + 0,982 = 1,590 \text{ m} \quad (2.52)$$

Vyložení čel v podélném směru:

Délka oka:  $e = h_{\xi} + r = 80 + 15 = 105 \text{ mm} \quad (2.53)$

Průmět  $x$  do osového směru:

$$y = \frac{\beta \cdot t_p}{2} \tan \alpha_{\xi} = \frac{0,814 \cdot 589}{2} \tan 44,4^{\circ} = 256 \text{ mm} \quad (2.54)$$

Celkové vyložení:  $a = v + y + e = 0,07 + 0,256 + 0,105 = 0,431 \text{ m} \quad (2.55)$

Odpor jedné fáze:

Elektrický odpor pro stejnosměrný proud (tedy bez uvažování vlivu skin efektu):

$$R'_{1/20} = \rho_{Cu} \frac{2 \cdot l_v \cdot N_s}{a_{st} \cdot S_{Cu1}} = \frac{1}{56} \frac{2 \cdot 1,590 \cdot 180}{1,79} = 0,129 \Omega \quad (2.56)$$

kde  $\rho_{Cu}$  je měrný odpor měděného vodiče při teplotě 20°C  $\left[ \Omega \frac{\text{m}}{\text{mm}^2} \right]$

*Vliv skin efektu:*

Náhradní výška vodiče:

$$\xi = 2\pi h_v \sqrt{\frac{j b_v f}{b_d \rho}} 10^{-7} = 2 \cdot \pi \cdot 2,2 \sqrt{\frac{1 \cdot 16 \cdot 50}{21,5 \cdot \frac{1}{56}}} 10^{-7} \cong 0,2 \quad (2.57)$$

Činitel zvýšení elektrického odporu:

$$k_{Cu} = \frac{(i \cdot n_d)^2 - 0,2}{9} \xi^4 = \frac{(2 \cdot 10)^2 - 0,2}{9} \xi^4 = 0,071 \quad (2.58)$$

=> 7,1% (v pořádku, hodnota by měla vycházet nižší než 20%).

Odpor při střídavém proudu při 20 °C:

$$R_{1/20} = (1 + k_{Cu}) R'_{1/20} = (1 + 0,071) \cdot 0,129 = 0,1382 \Omega \quad (2.59)$$

Odpor při 75 °C:

$$R_{1/75} = 1,22 \cdot R_{1/20} = 1,22 \cdot 0,1382 = 0,168 \Omega \quad (2.60)$$

Procentní hodnota úbytku napětí na ohmickém odporu:

$$u_r = \frac{R_{1/75} I_1}{U_f} 100 = \frac{0,168 \cdot 275}{6062} \cdot 100 = 0,76 \% \quad (2.61)$$

Legenda: synchronní stroj A:  $U_s=10500V$  / synchronní stroj B:  $U_s=3000V$

U malých strojů je procentní hodnota úbytku 1-3%, naopak u velkých strojů jsou to jen zlomky procenta.

Rozptylová reaktance statorového vinutí:

Poz.	Položka	Hloubka (mm)	
2	Izolace proti železu	$2 \cdot t_i \rightarrow 2 \cdot 1,8$	3,6
3	Vnější ochrana proti koruně	$2 \cdot 0,1$	0,2
4	Stažení vodičů	$2 \cdot 0,15$	0,3
5	Izolace závitů	$(2 \cdot n_d - 2) \cdot 0,44 \rightarrow (2 \cdot 10 - 2) \cdot 0,44$	7,9
6	Izolace vodičů	$(n_d \cdot i - 2) \cdot 0,37 \rightarrow (10 \cdot 2 - 2) \cdot 0,37$	6,7
7	Mezivrstva	$1 \cdot m_v \rightarrow 1 \cdot 6$	6,0
10	Holý vodič	$n_d \cdot i \cdot h_v \rightarrow 10 \cdot 2 \cdot 2,8$	56
	<b>Konečný součet všech částí pro určení <math>h'_2</math></b>		<b>80,4mm</b>

Tabulka 5 – Výpis všech rozměrů pro určení  $h'_2$

Poz.	Položka	Hloubka (mm)	
2	Izolace proti železu	$\rightarrow 1 \cdot 1,8$	1,8
3	Vnější ochrana proti koruně	$1 \cdot 0,1$	0,1
4	Stažení vodičů	$1 \cdot 0,15$	0,15
5	Izolace závitů	$\rightarrow 1 \cdot 0,44$	0,44
6	Izolace vodičů 2)	$\rightarrow 1 \cdot 0,37$	0,37
12	Vložka pod klín	1	1,00
13	Vůle na hloubku	0,4 až 2,0	0,6
15	Klín + můstek	$h_0 + h_1 \rightarrow 1 + 9$	10,00
16	<b>Konečný součet všech částí pro určení <math>h'_1</math></b>		<b>14,5mm</b>

Tabulka 6 – Výpis všech rozměrů pro určení  $h'_1$

Velikost rozptylové reaktance je dána magnetickou vodivostí drážky induktu, vodivostí čel vinutí a vodivostí mezi sousedními zuby přes vzduchovou mezeru.[5] Na obr. jsou vyznačeny rozměry  $h'_1$  a  $h'_2$  a dále jsou rozepsány jednotlivé příspěvky velikostí v tabulkách uplatněné dále v rovnici 2.58.

$$X_\sigma = \frac{(4\pi)^2 f N_s^2}{p q} l_e \left[ \left( \frac{h'_2}{3b_d} + \frac{h'_1}{b_d} \right) + \frac{l_\xi}{l_e} q \left( 0,187 + 0,166 \frac{t_p}{l_\xi} \beta \right) + \ln \left( 1 + \frac{\pi z_1}{2b_d} \right) \right] 10^{-7}$$

$$X_\sigma = \frac{(4\pi)^2 50.180^2}{4 \cdot \frac{9}{2}} 0,518 \left[ \left( \frac{80,4}{3.21,5} + \frac{14,5}{21,5} \right) + \frac{0,9829}{0,5182} \left( 0,187 + 0,166 \frac{0,589}{0,976} 0,814 \right) + \ln \left( 1 + \frac{\pi \cdot 22,2}{2.21,5} \right) \right] 10^{-7} =$$

$$= 7361935 \cdot [(1,920929) + 8,531 \cdot (0,275958) + 0,963913] \cdot 10^{-7}$$

$$= \mathbf{3,86\Omega} \quad (2.62)$$

Procentní hodnota úbytku napětí na rozptylové reaktanci:

$$u_\sigma = \frac{X_\sigma I_1}{U_f} 100 = \frac{3,86.275}{6062} 100 \cong 17,5 \% \quad (2.63)$$

Procentní hodnota rozptylové reaktance:

$$x_\sigma = u_\sigma = 17,5 \% \quad (2.64)$$

### 2.1.6 Návrh magnetického obvodu

#### Určení magnetického toku:

Z rovnice pro indukované napětí lze určit velikost magnetického toku, je ovšem možné tuto veličinu určovat i z rozměrů stroje a velikosti magnetické indukce ve vzduchové mezeře (při předpokladu sinusového průběhu).

Magnetický tok:

$$\Phi = \frac{U_f}{4,44 f N_s k_{v1}} = \frac{6062}{4,44 \cdot 50 \cdot 180 \cdot 0,9406} = 0,161 \text{ Wb} \quad (2.65)$$

Kontrola:

$$\Phi = \frac{2}{\pi} t_p l_e B_\delta = \frac{2}{\pi} 0,589 \cdot 0,518 \cdot 0,83 = 0,161 \text{ Wb} \quad (2.66)$$

Hodnoty plně souhlasí, výpočet je až dosud správný.

### 2.1.7 Velikost vzduchové mezery

Vzduchová mezera výrazně ovlivňuje technické ukazatele elektrického stroje. Igor Kopylov uvádí, že „Při zvětšení vzduchové mezery se zvětšují rozměry pólů, budícího vinutí a ztráty v budícím vinutí. Naopak, při malé vzduchové mezeře rostou přídavné ztráty na povrchu pólových nástavců a vyvstává nebezpečí odírání rotoru.“ Nárůst budící cívky je způsoben zvětšením magnetického odporu vzduchové mezery a tedy potřebou vyššího magnetického napětí. [1]

$$\delta = k \cdot \frac{A \cdot t_p}{B_\delta} \cdot \frac{10^{-6}}{x_d - x_\sigma} = 47 \cdot \frac{63025 \cdot 0,589}{0,83} \cdot \frac{10^{-6}}{137 - 17,5} = 0,0175 \text{ m, voleno } \mathbf{0,018 \text{ m}} \quad (2.67)$$

kde  $k = (43 \div 50)$  ve výpočtu voleno  $k=47$ , závisí na tvaru pólového nástavce, velikosti Cartérova činitele a dalších parametrech a  $x_d$  je procentní hodnota nesyčené synchronní reaktance; není-li zadána, volí se podle počtu pólů dle tabulky 5.

2p	2	4	6	<b>8</b>	10	12	16	20	24	28	40	56
$x_d$	200÷220	170	150	<b>137</b>	130	120	110	105	100	98	95	93

Tabulka 7 - Volba synchronní reaktance dle počtu pólů[5]

Volíme:

$$\delta = 18 \text{ mm} \quad (2.68)$$

Za účelem pokud možno sinusového průběhu magnetické indukce ve vzduchové mezeře volíme po obvodu proměnnou velikost mezery. Na okrajích pólových nástavců je velikost mezery  $(1,5 \div 2)$  krát větší než v ose pólu, zde:

$$\frac{\delta_{\max}}{\delta} = 1,5 \quad (2.69)$$

### 2.1.8 Magnetické napětí reakce kotvy

Amplituda základní harmonické reakce kotvy:

$$F'_a = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{1}{C_1} A t_p k_{v1} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{1}{1,074} 63025 \cdot 0,589 \cdot 0,9406 = 14635 \text{ A} \quad (2.70)$$

kde  $C_1$  (výpočet viz 2.67) je činitel základní harmonické magnetické indukce ve vzduchové mezeře, tento činitel se určuje z grafu č. 3, tabulka Činitel základní harmonické magnetické indukce, viz příloha.

$$\frac{\delta}{t_p} = \frac{0,018}{0,589} = 0,0306 ; \alpha = 0,7 ; C_1 = a \cdot b = 1,18 \cdot 0,91 = 1,074 \quad (2.71)$$



Amplituda základní harmonické magnetického napětí v podélném ( $F_{d1}$ ) a v příčném ( $F_{q1}$ ) směru:

$$F_{d1} = C_{d1} F_a = 0,88 \cdot 14635 = 12879 \text{ A} \quad (2.72)$$

$$F_{q1} = C_{q1} F_a = 0,49 \cdot 14635 = 7171 \text{ A} \quad (2.73)$$

kde:  $C_{d1} = e \cdot f = 0,81 \cdot 1,09 = 0,88 \quad (2.74)$

$$C_{q1} = g \cdot h = 1,57 \cdot 0,31 = 0,49 \quad (2.75)$$

Činitelé e, f, g, h se odečítají z grafu č.4, viz příloha.

### 2.1.9 Dimenzování magnetického obvodu

výška pólu:

$$h_p = 0,3 \cdot t_p = 0,3 \cdot 0,589 = 0,178 \text{ m} \quad (2.76)$$

výška nástavce:

$$h_n = 0,1 \cdot t_p = 0,1 \cdot 0,589 = 0,059 \text{ m} \quad (2.77)$$

šířka pólu:

$$b_p = \frac{(1 + \nu) \cdot \Phi}{B_p L_p} = \frac{(1 + 0,15) \cdot 0,161}{1,5 \cdot 0,608} = 0,203 \text{ m} \quad (2.78)$$

šířka pólového nástavce:

$$b_n = \alpha \cdot t_p = 0,70 \cdot 0,589 = 0,412 \text{ m}, \quad (2.79)$$

kde  $\nu$  je předpokládaná poměrná hodnota mezipólového rozptylového toku ( $\nu = 0,1 \div 0,2$ ). J8 tuto hodnotu prvotně odhaduji na 15%. **Délka pólu  $L_p = L$  (je to tedy celková délka induktu, včetně radiálních ventilačních kanálů).**

výška jhu rotoru:

$$h_{jr} = \frac{(1 + \nu) \cdot \Phi}{2 B_{jr} L_r} = \frac{(1 + 0,15) \cdot 0,161}{2 \cdot 1,1 \cdot 0,62} = 0,136 \text{ m} \quad (2.80)$$

kde  $B_p$  je zvolená hodnota magnetické indukce ve jhu rotoru

$L_r$  délka rotoru, která je proti délce pólu zvětšená s ohledem na prostor pro dosednutí budící cívky (z každé strany se připočítává 0,05m)

výška jádra induktu:

$$h_{js} = \frac{\Phi}{2 B_{js} k_{Fe} l_e} = \frac{0,161}{2 \cdot 1,3 \cdot 0,96 \cdot 0,518} = 0,125 \text{ m} \quad (2.81)$$

Délky středních siločar částí magnetického obvodu:

pól:

$$l_p = h_p + h_n = 0,178 + 0,059 = 0,237 \text{ m} \quad (2.82)$$

jho rotoru:

$$l_r = \frac{\pi[D_1 - 2(\delta + h_p + h_n)]}{4p} = \frac{\pi[1,5 - 2(0,018 + 0,178 + 0,059)]}{4 \cdot 4} = 0,194 \text{ m} \quad (2.83)$$

jádro induktu:

$$l_s = \frac{\pi[D_1 + 2(h_d + h_{js})]}{4p} = \frac{\pi[1,5 + 2(0,085 + 0,125)]}{4 \cdot 4} = 0,377 \text{ m} \quad (2.84)$$

### 2.1.10 Charakteristika naprázdno

Cartérův činitel respektující vliv drážkování induktu  $k_{cd}$  – odečteno z grafu 6, viz příloha

$$\frac{b_0}{z_1} = \frac{21,5}{22,1} = 0,97 ; \frac{b_0}{\delta} = \frac{21,5}{18} = 1,19 \quad (2.85a, 2.85b)$$

$b_0 = b_d$  platí pro otevřenou drážku

Z nomogramu byla odečtena hodnota:

$$k_{cd} = 1,09 \quad (2.85c)$$

Cartérův činitel respektující vliv radiálních ventilačních kanálů  $k_{ck}$ :

$$k_{ck} = \frac{1}{1 + \frac{\delta}{2 + \delta} \cdot \frac{\check{s}_k \cdot i}{l_e}} = \frac{1}{1 + \frac{18}{2 + 18} \cdot \frac{10 \cdot 10}{589}} = 0,87 \quad (2.86)$$

Kde  $\check{s}_k$  je šířka radiálního kanálu a  $i$  je počet paketů.

Výsledná hodnota Cartérova činitele:

$$k_c = k_{cd} \cdot k_{ck} = 1,09 \cdot 0,86 = 0,95 \quad (2.87)$$

Magnetické napětí na vzduchové mezeře:

$$F_\delta = 0,8 k_c \delta B_\delta \cdot 10^6 = 0,8 \cdot 0,95 \cdot 0,018 \cdot 0,83 \cdot 10^6 = 11354 \text{ A} \quad (2.88)$$

Výpočet charakteristiky naprázdno je proveden z hodnot v následujících tabulkách.

Tabulka 6 uvádí jednotlivé rozměry částí stroje (v mm)<sup>1</sup>.

$D_1$	$D_1 = 1500$	$t_{d1} = 43,6$	$z_1 = 22,1$	$k_{z1} = 1,05$
$D_2 = D_1 \pm h_d$	$D_2 = 1600$	$t_{d2} = 46,5$	$z_2 = 25,0$	$k_{z2} = 0,94$
$D_3 = D_1 \pm 2h_d$	$D_3 = 1700$	$t_{d3} = 49,4$	$z_3 = 27,9$	$k_{z3} = 0,84$

Tabulka 8 - Hodnoty pro charakteristiku naprázdno - 1.část

<sup>1</sup> Všechny hodnoty jsou uvedeny v mm, pouze činitelé  $k_{z1,2,3}$  jsou bezrozměrné

Používané vztahy pro výpočty jednotlivých rozměrů a hodnot pro  $i=1,2,3$ :

$$t_{di} = \frac{\pi D_i}{Q} \tag{2.89}$$

$$k_{zi} = \frac{t_{di}}{z_i k_{Fe}} - 1 \tag{2.90}$$

$$B'_{zi} = \frac{B_{\delta} \cdot t_{d1}}{z_i \cdot k_{Fe}} \tag{2.91}$$

$$z_i = t_{di} - b_d \tag{2.92}$$

$$H_{zstr} = \frac{H_{z1} + 4H_{z2} + H_{z3}}{6} \tag{2.93}$$

$$F_z = H_{zstr} \cdot h_d \tag{2.94}$$

Jednotky:	$[T]^2$	$[T]$	$[A/m]$	$[A/m]$	$[A]$
1,00. $\Phi$	$B'_{z1} = 1,71$	$B_{z1} = 1,70$	$H_{z1} = 6000$	$H_{zstř} = 4017$	$F_z = 313$
	$B'_{z2} = 1,61$	$B_{z2} = 1,61$	$H_{z2} = 4000$		
	$B'_{z3} = 1,53$	$B_{z3} = 1,53$	$H_{z3} = 2100$		
1,15. $\Phi$	$B'_{z1} = 1,96$	$B_{z1} = 1,92$	$H_{z1} = 19000$	$H_{zstř} = 14150$	$F_z = 1104$
	$B'_{z2} = 1,85$	$B_{z2} = 1,84$	$H_{z2} = 14000$		
	$B'_{z3} = 1,76$	$B_{z3} = 1,76$	$H_{z3} = 9900$		
1,30. $\Phi$	$B'_{z1} = 2,22$	$B_{z1} = 2,09$	$H_{z1} = 42000$	$H_{zstř} = 33667$	$F_z = 2626$
	$B'_{z2} = 2,09$	$B_{z2} = 2,04$	$H_{z2} = 34000$		
	$B'_{z3} = 2,03$	$B_{z3} = 1,98$	$H_{z3} = 2400$		

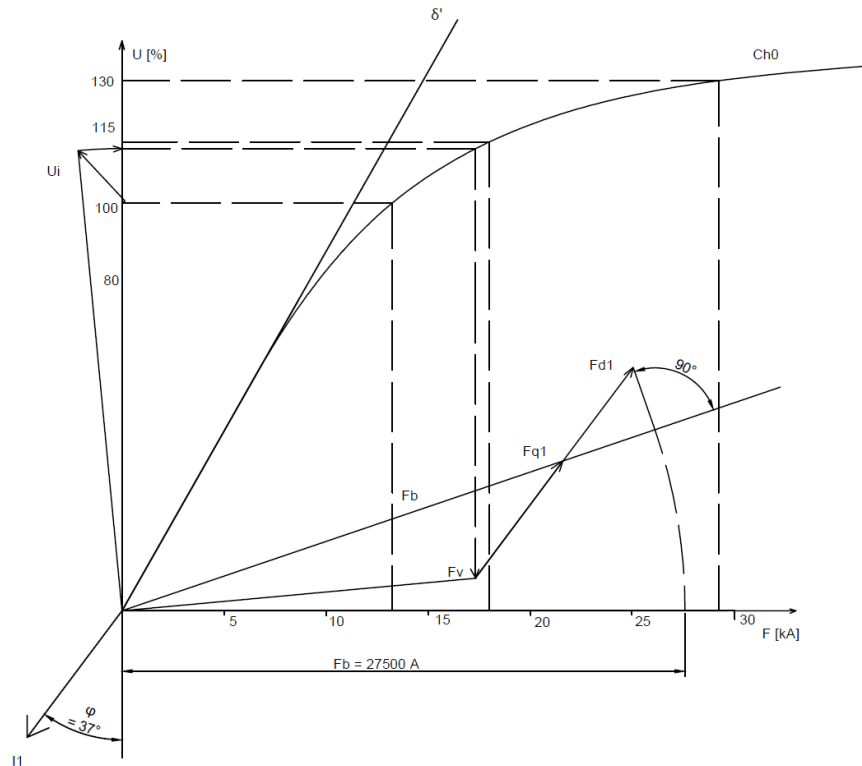
Tabulka 9 - Hodnoty pro charakteristiku naprázdno - 2.část

		1,00. $\Phi$			1,15. $\Phi$			1,30. $\Phi$		
		B	H	F	B	H	F	B	H	F
Vzd. mezera	$\delta = 0,018 \text{ m}$	0,83		11354			13057			14760
Hlava	$k_{z1} = 1,05$	$B_{z1}'$	1,71	6000	1,96	19000		2,22	42000	
		$B_{z1}$	1,70		1,92			2,09		
Střed	$k_{z2} = 0,95$	$B_{z2}'$	1,61	4000	1,85	14000		2,09	34000	
		$B_{z2}$	1,61		1,84			2,04		
Pata	$k_{z3} = 0,87$	$B_{z3}'$	1,53	2100	1,76	9900		2,03	24000	
		$B_{z3}$	1,53		1,76			1,98		

<sup>2</sup>  $B'_{z1,2,3}$  jsou hodnoty zdánlivé indukce,  $B_{z1,2,3}$  jsou hodnoty skutečné indukce  
 $H_{zi}$  hodnoty se odečítají z příloženého grafu č.8 Magnetizační křivka dynamového plechu

stř. hodnota	$h_z = 0,100$		4017	313		14150	1104		33667	2626
jádro induk.	$l_s = 0,377$	1,3	630	245	1,495	2400	905	1,69	6800	2564
pól	$l_p = 0,237$	1,5	2500	593	1,725	8100	1920	1,95	23800	5640
jho	$l_r = 0,194$	1,1	600	116	1,265	950	184	1,43	1900	369
$\sum F = F_\delta + F_z + F_{ji} + F_p + F_j$			12621			17170			25949	

Tabulka 10 - Hodnoty pro konstrukci charakteristiky naprázdno



Obrázek 2 - Sestrojená charakteristika naprázdno:  $F_b = 27\ 500\ A$ .

Pro určení velikosti budícího napětí pro jmenovité zatížení a účinník jsem použil grafickou metodu. Pro konstrukci jsem využil grafů 7 a 8 a také pro zjištění činitele odlehčení graf 9, vše viz příloha práce.

### 2.1.11 Návrh budícího vinutí

Předběžná střední délka závitu budící cívky (za předpokladu, že šířka cívky  $i$  s kostříčkou bude rovna velikosti přečnávajícího pólového nástavce přes tělo pólu)[5]:

Přesahující část pólového nástavce:

$$a = \frac{b_n - b_p}{2} = \frac{0,412 - 0,203}{2} = 0,088m \tag{2.95}$$

Kde  $b_n$  je šířka pólového nástavce tj. 0,412m a  $b_p$  je šířka pólu 0,203 m

Nemá-li cívka přesahovat přes pólový nástavec, tak při tloušťce kostříčky budící cívky

$t_{kc} = 5$  mm zbývá pro šířku cívky 402 mm. Střední délka závitů cívky pak bude:

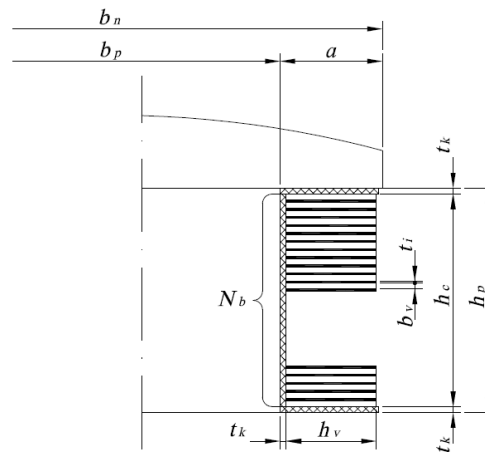
$$l_{bs} = 2(L_p + b_p + 2a) = 2(0,608 + 0,203 + 2,0,088) = 1,974m \quad (2.96)$$

Průřez vodiče budící cívky:

$$S'_{Cub} = \frac{\rho_{Cu} l_{bs} 2p F_b}{0,9 \cdot U_b} = \frac{1}{56} \frac{1,974 \cdot 8,27500}{0,9,60} = 143,6 \text{ mm}^2 \quad (2.97)$$

Ve výpočtu jsem zvolil rozměr vodiče: 75 x 2, kterému odpovídá čistý průřez (při respektování zaoblení hran a nerovnosti povrchu cca 5 mm<sup>2</sup>):  $S_{Cub} = 145 \text{ mm}^2$ . Tento rozměr je též výhodný kvůli ohybu cívky při působení odstředivých sil. Díky vodiči, který by se dal skoro přirovnat k plechu, nebude zapotřebí mezi póly vkládat mezipólové rozpěrky a tudíž se bude budící vinutí lépe chladit proudícím vzduchem.

V této části výpočtu se provádí určité přizpůsobení a to tak, že se volí budící napětí takové, aby vycházel přibližně průřez, který by byl zhotovitelný dle dostupných normalizovaných rozměrů měděných pásů. Já jsem zvolil budící napětí  $U_b = 60 \text{ V}$ . Bude použito holých vodičů a mezi závitů bude vložena izolace tloušťky  $t_i = 0,4 \text{ mm}$ .



Obrázek 3 - Názorná část těla pólu spolu s vyznačenými rozměry [5]

Předběžně volíme proudovou hustotu ve vodiči:

$$\sigma_{Cub} = 2,4 \text{ A/mm}^2 \quad (2.98)$$

Několik slov o  $\sigma_{Cub}$  – ve svém návrhu jsem se přiklonil pro volbu vyšší proudové hustoty než 2 A/mm<sup>2</sup> a to z důvodu, že pro tuto hodnotu vychází potřebná výška vodičů a následná výška pólu příliš velká. Oproti původnímu odhadu (178mm) vychází po upřesňujícím výpočtu (pro  $\sigma_{Cub} = 2 \text{ A/mm}^2$ ) 276mm, tedy přibližně o 100mm. To je netolerovatelně velká odchylka od původního předpokladu a proto jsem se rozhodl zvýšit proudovou hustotu. To má však za

následek neblahý vliv na oteplení budící cívky. Bude potřeba zkontrolovat tepelný výpočet pro tuto část stroje, zda jsme schopni jej uchládit.

Vyjde-li v tepelném výpočtu teplota cívky odlišná od požadované hodnoty, je třeba upravit velikost proudové hustoty.

Budící proud:

$$I_b = \sigma_{Cub} \cdot S_{Cub} = 2,4 \cdot 145 = 348 \text{ A} \quad (2.99)$$

Počet závitů budící cívky:

$$N_b = \frac{F_b}{I_b} = \frac{27500}{348} = 79 \quad (2.100)$$

Výška cívky:

$$h_c = N_b(b_v + t_i) = 79 \cdot (2 + 0,4) = 79 \cdot 2,4 = 189,65 \text{ mm} \cong 190 \text{ mm} \quad (2.101)$$

Výška holého vodiče  $b_v$  je dle ČSN normy 2mm, tato výška se zvýší o oboustranný izolační přírůstek, ten závisí na zvolené technologii nanášení izolace a typicky je tato hodnota 0,4mm.

Výška těla pólu:

$$h_p = h_c + 2t_k = 190 + 2 \cdot 5 = 200 \text{ mm} \quad (2.99)$$

(tloušťka kostřičky cívky:  $t_{kc} = 5 \text{ mm}$ )

Skutečná výška pólu vychází větší, než jsme předpokládali (předpoklad:  $h_p = 178 \text{ mm}$ ).

Ovlivní se velikost magnetického napětí na pól, které bude jen o velmi málo vyšší.

### 2.1.12 Orientační výpočet oteplení budící cívky

Vnější obvod budící cívky:

$$l_{be} = 2(L_p + b_p + 4a) = 2(0,608 + 0,203 + 4 \cdot 0,088) = 2,326 \text{ m} \quad (2.100)$$

Ochlazovací povrch všech cívek:

$$O_{2pc} = h_c l_{be} 2p = 0,190 \cdot 2,326 \cdot 8 = 3,535 \text{ m}^2 \quad (2.101)$$

Odpor všech cívek budícího vinutí:

$$R_{b/75} = 1,22 \cdot \rho \frac{l_{bs} N_b 2p}{S_{Cub}} = 1,22 \cdot \frac{1}{56} \frac{1,974 \cdot 79 \cdot 8}{145} \cong 0,187 \Omega \quad (2.102)$$

Ztráty v budícím vinutí:

$$\Delta P_{Cub} = R_{b/75} I_b^2 = 0,187 \cdot 348^2 = 22\,646 \text{ W} \quad (2.103)$$

Oteplení cívk

$$\Delta \vartheta_{Cub} = \frac{1,18 \cdot \Delta P_{Cub}}{\alpha O_{2pc}} = \frac{1,18 \cdot 22646}{100 \cdot 3,535} = 75,6^\circ \text{C} \quad (2.104)$$

Rychlost proudícího vzduchu kolem cívk lze uvažovat jako třetinu obvodové rychlosti rotoru:

$$v = \frac{1}{3} \frac{\pi D_1 n}{60} = \frac{1}{3} \frac{\pi \cdot 1,5 \cdot 750}{60} \cong 19,6 \text{ m/s} \quad (2.105)$$

V důsledku této rychlosti odhaduji součinitel přestupu tepla  $\alpha = 100 \text{ W/}^\circ\text{C}\cdot\text{m}^2$ .

V tomto bodě výpočtu bylo potřeba provést další iteraci výpočtu. Při volbě nízké proudové hustoty v budícím vinutí, vycházela výsledná výška pólu, velmi rozdílná od odhadované původní hodnoty. Proto bylo potřeba jít na vyšší proudovou hustotu, ovšem to zpětně ovlivnilo oteplení, které vycházelo nad rámec povolené teplotní třídy použité izolace budícího vinutí.

Oteplení cívk velmi dobře odpovídá požité izolaci třídy „B“, pro kterou je maximální velikost oteplení  $80^\circ\text{C}$ . V této části si díky orientačnímu výpočtu můžeme dovolit upravovat součinitel přestupu tepla tak, aby nám oteplení budící cívk vyšlo v toleranci pro danou třídu izolace.

Do práce jsem pro upřesnění výpočtu zařadil další iterační krok a to je přepočítání charakteristiky naprázdno a tedy i změna budícího proudu. Zvýraznil jsem pozměněné hodnoty a budu zkoumat dopad úpravy výšky pólu.

Přepočítané délky středních siločar částí magnetického obvodu:

pól:

$$l_p = h_p + h_n = 0,200 + 0,059 = 0,259 \text{ m} \quad (2.83b)$$

jho rotoru:

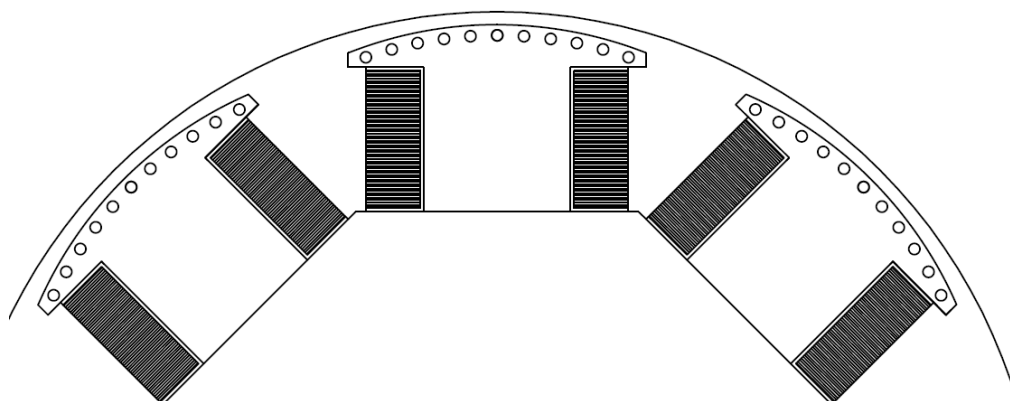
$$l_r = \frac{\pi [D_1 - 2(\delta + h_p + h_n)]}{4p} = \frac{\pi [1,5 - 2(0,018 + 0,200 + 0,059)]}{4 \cdot 4} = 0,186 \text{ m} \quad (2.84b)$$

		1,00.Φ			1,15.Φ			1,30.Φ		
		B	H	F	B	H	F	B	H	F
Vzd. mezera	$\delta = 0,018 \text{ m}$	0,83		11354			13057			14760
Hlava	$k_{z1} = 1,05$	$B_{z1}'$	1,71	6000	1,96	19000		2,22	42000	
		$B_{z1}$			1,70			1,92		

Střed	$k_{z2} = 0,95$	$B_{z2}'$	1,61	4000		1,85	14000		$B_{z2}$	1,61	2,09	34000	
			1,61										
Pata	$k_{z3} = 0,87$	$B_{z3}'$	1,53	2100		1,76	9900		$B_{z3}$	1,53	2,03	24000	
			1,53										
stř. hodnota	$h_z = 0,092$			4017	313		14150	1104				33667	2626
jádro induk.	$l_s = 0,377$		1,3	630	245	1,495	2400	905	1,69			6800	2564
Pól	$l_p = 0,259$		1,5	2500	647	1,725	8100	2098	1,95			23800	6164
Jho	$l_r = 0,186$		1,1	600	112	1,265	950	178	1,43			1900	353
$\sum F = F_\delta + F_z + F_{ji} + F_p + F_j$			12671			17342			26467				

Pro srovnání zde uvádím původní hodnoty pro charakteristiku naprázdno. Je vidět, že nová charakteristika naprázdno se bude od té staré odchylovat v řádech jednotek procent a proto je v tomto návrhu zbytečné překreslovat charakteristiku a znovu určovat budící proud.

$\sum F = F_\delta + F_z + F_{ji} + F_p + F_j$	12621	17170	25949
--	-------	-------	-------



Obrázek 4 – Detail pólů a budících cívek

Na obrázku 3 je detail uspořádání pólů a cívek na rotoru stroje. Je vhodné zařadit prvotní náčrt stroje do výpočtu, aby se ověřilo, zda je možné cívky na pólové nástavce nasadit a zda budou proveditelné pólové rozpěrky.

### 2.1.13 Kroužky a kartáče

Pro přenos budícího proudu na rotor jsem zvolil kovografitové kartáče typ O67, pro které platí následující údaje:

Přechodové napětí:	$u_{př} = 1,9 \text{ V}$
Maximální proudové zatížení	$\sigma_k = 16 \text{ A/cm}^2$
Maximální obvodová rychlost	$v_o = 30 \text{ m/s}$
Měrný tlak	$p_k = 20 \text{ kPa}$
Součinitel tření	$\mu = 0,15$



Celkový průřez kartáčů jedné polaroty:

$$S_k = \frac{I_b}{\sigma_k} = \frac{348}{16} = 21,75 \text{ cm}^2 \quad (2.106)$$

Podle doporučených rozměrů kartáčů volíme rozměr  $b_k \times l_k = 25 \times 20$ , tomu odpovídá průřez:

$S_{k1} = 5 \text{ cm}^2$  kde  $b_k$  je rozměr v osové směru stroje a určuje šířku kroužku a  $l_k$  je rozměr v obvodovém směru.

Počet kartáčů jedné polaroty na obvodu kroužku

$$i_k = \frac{S_k}{S_{k1}} = \frac{21,75}{5} \sim 5 \quad (2.107)$$

Pro jednu polaritu volíme 5 kartáčů ( $i_k = 5$ ), celkový počet kartáčů pro obě polaroty pak bude  $2i_k = 10$ . Dále se provádí kontrola obvodové rychlosti kroužků, a také zda se tento počet kartáčů (včetně pouzdra kartáčových držáků) na obvod kroužků vtěsná.

Průměr hřídele v místě přívodu mechanické energie (volný konec hřídele)

$$d_H = 0,135 \sqrt[3]{\frac{P_{kW}}{n}} = 0,135 \sqrt[3]{\frac{4000}{750}} = 0,236 \text{ m} \quad (2.108)$$

Vnější průměr kroužků budeme předpokládat:

$$D_k = 1,3 \cdot d_H = 1,3 \cdot 0,236 = 0,307 \text{ m}. \quad (2.109)$$

Obvodová rychlost kroužků:

$$v_k = \frac{\pi D_k n_{max}}{60} = \frac{\pi \cdot 0,307 \cdot 1125}{60} \cong 18 \text{ m/s} \quad (2.110)$$

Rychlost je menší než uvedená maximální hodnota. Tzn. výpočet a návrh je v pořádku.

Rozteč kartáčů:

$$t_k = \frac{\pi D_k}{2 \cdot i_k} = \frac{\pi \cdot 0,307}{2 \cdot 5} = 0,096 \text{ m} \quad (2.111)$$

Rozteč je výrazně větší než je délka kartáče ( $l_k$ ), takže i po této stránce je návrh vyhovující.

#### 2.1.14 Výpočet tlumiče

Do své práce jsem zařadil i výpočet tlumiče. Tlumič synchronního stroje je tvořen měděnými tyčemi umístěnými při povrchu pólového nástavce a z obou stran stroje jsou propojeny měděným kruhem.

Protože nejsou zadány konkrétní údaje o nesymetrické zátěži, uvádím zjednodušený návrh.

Počet tyčí tlumiče:

$$0,8 \cdot t_{d1} < t_t < 0,9 \cdot t_{d1} = 0,85 \cdot t_{d1} = 0,85 \cdot 43,6 \approx 37 \text{ mm} \quad (2.112)$$

Při šířce pólového nastavce 412mm bude pod jedním pólovým nastavcem 11 tyčí tlumiče ( $i_t$ ).

Průřez všech tyčí tlumiče:  $\sum S_{Cut} = (15 \div 30)\%$  průřezu statorového vinutí

Celkový průřez statorového vinutí:

$$\sum S_{Cu \text{ statoru}} = Q \cdot n_d \cdot j \cdot b \cdot i \cdot h_v = 108 \cdot 10 \cdot 1 \cdot 16 \cdot 2 \cdot 2,8 = 96 \, 768 \text{ mm}^2 \quad (2.113)$$

Kde:

Q ..... počet drážek

$n_d$  ..... počet vodičů v drážce

$i$  ..... počet tyčí vodiče v drážce vedle sebe

$j$  ..... počet tyčí vodiče v drážce nad sebou

$b$  ..... šířka holého vodiče

$h_v$  ..... výška holého vodiče

$$\sum S_{Cut} = 20\% \text{ z } 96 \, 768 \text{ mm}^2 = 19 \, 353 \text{ mm}^2 \quad (2.114)$$

Průměr jedné tyče:

$$d_t = \sqrt{\frac{4 \cdot \sum S_{Cut}}{\pi \cdot 2p \cdot i_t}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 19353}{\pi \cdot 8 \cdot 11}} = 16,733 \text{ mm} \cong 17 \text{ mm} \quad (2.115)$$

Průřez spojovacího kruhu, kde  $S_{Cutp}$  je průřez všech tyčí na pólovém nastavci:

$$S_{kt} = (0,4 \div 0,5) S_{Cutp} = 0,5 \cdot i_t \cdot \frac{\pi d_t^2}{4} = 0,5 \cdot 11 \cdot \frac{\pi 17^2}{4} \cong 1248 \text{ mm}^2 = 0,1248 \text{ m}^2 \quad (2.116)$$

## 2.2 Ztráty a účinnost

### 2.2.1 Ztráty

Jouleovy:

ve vinutí statoru:

$$\Delta P_{Cu1} = m \cdot R_{1/75} \cdot I_1^2 = 3 \cdot 0,168 \cdot 275^2 = 38115 \text{ W} \quad (2.117)$$

v budícím vinutí:

$$\Delta P_{Cub} = R_{b/75} \cdot I_b^2 = 0,187 \cdot 348^2 = 22646 \text{ W} \quad (2.118)$$

Tyto ztráty již byly určeny při výpočtu oteplení budící cívky.

V železe:

v jádře induktu:

ztrátové číslo plechů:  $\Delta p_{Fe} = 1,8 \text{ W/kg}$

hmotnost jádra statoru:

$$m_{Fej} = \frac{\pi}{4} (D_{je}^2 - D_3^2) l_e k_{Fe} \rho_{Fe} = \frac{\pi}{4} (1,95^2 - 1,70^2) 0,518 \cdot 0,96 \cdot 7800 = 2750 \text{ kg} \quad (2.119)$$

$$\text{kde } D_{je} = D_1 + 2(h_d + h_{js}) = 1,5 + 2 \cdot (0,100 + 0,125) = 1,95 \text{ m} \quad (2.120)$$

je vnější průměr statoru

ztráty v jádře induktu (statoru):

$$\Delta P_{Fej} = 1,8 \cdot \Delta p_{Fe} \cdot B_{js}^2 \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} m_{Fej} = 1,8 \cdot 1,8 \cdot 1,3^2 \left(\frac{50}{50}\right)^{1,3} \cdot 2750 = 15057 \text{ W} \quad (2.121)$$

hmotnost zubů statoru:

$$m_{Fez} = Q \cdot z_2 \cdot h_d \cdot l_e \cdot k_{Fe} \rho_{Fe} = 108 \cdot 0,025 \cdot 0,100 \cdot 0,518 \cdot 0,96 \cdot 7800 = 1047 \text{ kg} \quad (2.122)$$

kde  $z_2$  je střední šířka zubu (viz výpočet zubové vrstvy charakteristiky naprázdno) a  $h_d$  je hloubka drážky

ztráty v zubech statoru:

$$\Delta P_{Fez} = 2 \cdot \Delta p_{Fe} \cdot B_{z2}^2 \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} \cdot m_{Fez} = 2 \cdot 1,8 \cdot 1,79^2 \cdot \left(\frac{50}{50}\right)^{1,3} \cdot 1047 = 12076 \text{ W} \quad (2.123)$$

kde  $B_{z2}$  je mg. indukce ve středu zubu (viz výpočet zubové vrstvy charakteristiky naprázdno)

Povrchové:

$$\begin{aligned} \Delta P_p &= \frac{\pi}{2} \cdot D_1 \alpha L_p k_0 \left(\frac{Q \cdot n}{10000}\right)^{1,5} (t_{d1} \cdot \beta \cdot 1000 \cdot B_\delta \cdot k_c) \\ &= \frac{\pi}{2} \cdot 1,5 \cdot 0,7 \cdot 0,608 \cdot 4,6 \left(\frac{108 \cdot 750}{10000}\right)^{1,5} (0,0436 \cdot 0,888 \cdot 1000 \cdot 0,83 \cdot 0,95) \\ &= 3249 \text{ W} \end{aligned} \quad (2.124)$$

Vlivem drážkování statoru nastává kolísání indukce a tím vznikají na povrchu pólových nástavců povrchové ztráty.[3] Činitel  $k_0$  závisí na volbě materiálu a provedení pólů. U stroje který navrhuji, bude pól a pólový nástavec složený z plechů o tloušťce 1mm (činitel  $k_0$  tedy bude 0,46).

Mechanické:

$$\Delta P_m = v^{2,5} \cdot D_1 \sqrt{l_e} = 58,9^{2,5} \cdot 1,5 \sqrt{0,518} = 28749 \text{ W} \quad (2.125)$$

kde  $v$  je obvodová rychlost rotoru:

$$v = \frac{\pi D_1 n}{60} = \frac{\pi \cdot 1,5 \cdot 750}{60} = 58,9 \text{ m/s} \quad (2.126)$$

Přídavné:

$$\Delta P_{\text{příd}} = 0,003 \cdot S = 0,003 \cdot 5000 \cdot 10^3 = 15000 \text{ W} \quad (2.127)$$

Celkové:

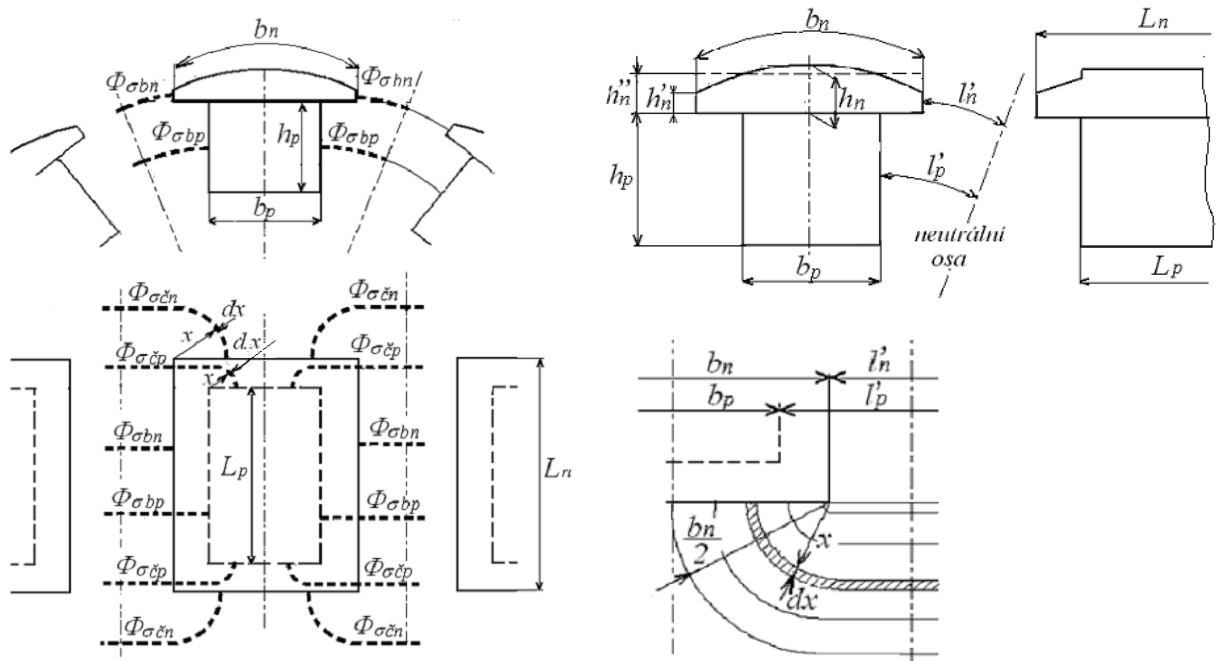
$$\begin{aligned} \Delta P &= \Delta P_{Cu1} + \Delta P_{Cub} + \Delta P_{Fej} + \Delta P_{Fez} + \Delta P_P + \Delta P_m + \Delta P_{\text{příd}} \\ &= (38115 + 22646 + 15057 + 12076 + 3249 + 28749 + 15000) \\ &= 134,89 \cdot 10^3 \text{ W} = 134,89 \text{ kW} \end{aligned} \quad (2.128)$$

**2.2.2 Účinnost**

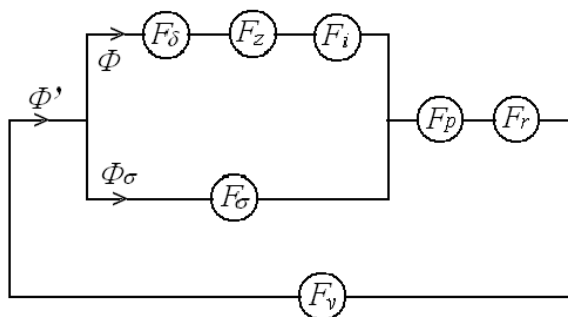
$$\eta = 100 \left( \frac{P}{P + \Delta P} \right) = 100 \left( \frac{4000}{4000 + 134,89} \right) = 96,74 \% \quad (2.129)$$

**2.3 Mezipólový rozptyl**

Hlavním tokem  $\phi$  se rozumí ten, který prochází přes vzduchovou mezeru do induktu a podílí se na indukovaném napětí ve vinutí. Vedle tohoto toku se vyskytuje ještě rozptylový tok  $\Phi_\sigma$ , který se uzavírá mezi boky a čely sousedních pólů jejich nástavců, jak je znázorněno na obrázku, viz další strana.



Na obr. 5 je znázornění uspořádání magnetického toku synchronního stroje, kde  $F_p$  a  $F_r$  jsou úbytky magnetického napětí na pólu a jhu rotoru, kudy protéká celkový magnetický tok  $\Phi'$ .



Obrázek 5 – Schématické uspořádání mag. toku

Rozptylový tok  $\Phi_{\sigma}$  prochází paralelně s hlavním magnetickým tokem uzavírajícím se přes vzduchovou mezeru, zuby a jádrem induktu. Z tohoto schématu vyplývají vztahy:

$$\Phi' = \Phi_{\sigma} + \Phi = (1 + \nu)\Phi$$

$$\text{kde } \Phi_{\sigma} = F_{\sigma} \cdot \Lambda_{\sigma}$$

když magnetické napětí na rozptylové vodivosti (obr. 5)

$$F_{\sigma} = F_{\delta} + F_z + F_i$$

a činitel rozptylu  $\nu = \frac{\Phi_{\sigma}}{\Phi}$

Nyní zbývá určit magnetickou vodivost mezipólového prostoru. Podle obrázku v indexu u jednotlivých rozptylových toků „ $c$ “ odpovídá čelům a „ $b$ “ bokům pólu. Celková rozptylová magnetická vodivost je dána součtem dílčích vodivostí:

$$\Lambda_{\sigma} = 2\Lambda_{obn} + 2\Lambda_{obp} + 4\Lambda_{\acute{c}n} + 4\Lambda_{\acute{c}p}$$

Při výpočtu magnetických vodivostí je třeba brát v úvahu, že na rozptylovém toku z pólového nástavce se podílí magnetické napětí celé budící cívky, zatímco u těla pólu se jedná

o částečný záběr, což se respektuje násobením výrazu  $\frac{1}{2}$ . Dále jsou uvedeny dílčí magnetické vodivosti:

$$\Lambda_{obn} = \mu_0 \frac{h'_n L_n}{l'_n} \quad \Lambda_{obp} = \frac{1}{2} \mu_0 \frac{h_p L_p}{l'_p}$$

$$\Lambda_{\sigma n} = \mu_0 h''_n \int_{x=0}^{\frac{b_n}{2}} \frac{dx}{\frac{\pi}{2} x + l'_n} = \mu_0 \frac{2}{\pi} h''_n \int_{x=0}^{\frac{b_n}{2}} \frac{\frac{\pi}{2}}{\frac{\pi}{2} x + l'_n} dx = \mu_0 h''_n \frac{2}{\pi} \left[ \ln \left( \frac{\pi}{2} x + l'_n \right) \right]_{x=0}^{\frac{b_n}{2}}$$

viz obr. 5. Po dosazení mezí integrálu dostáváme výslednou magnetickou vodivost

rozptylového toku: 
$$\Lambda_{\sigma n} = \mu_0 \frac{2}{\pi} h''_n \ln \frac{\pi \frac{b_n}{4} + l'_n}{l'_n}$$

Stejným postupem se odvodí vztah pro rozptylovou vodivost v čelech pólu:

$$\Lambda_{\sigma p} = \frac{\mu_0}{\pi} h_p \ln \frac{\pi \frac{b_p}{4} + l'_p}{l'_p}$$

Rozměry vyznačeny na obr. 6 vyjadřují:

$l'_p$  vzdálenost od neutrální osy k boku pólu měřené na jeho střední výšce

$l'_n$  vzdálenost od neutrální osy k okraji

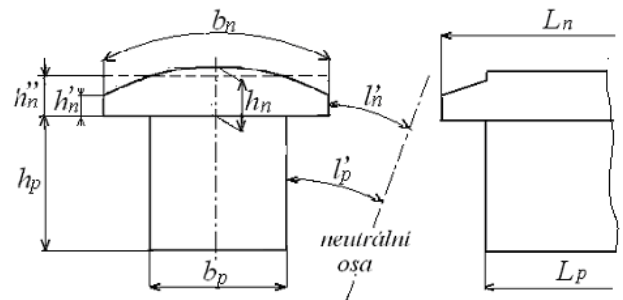
pólového nástavce

$h'_n$  výšku okraje pólového nástavce

$h''_n$  střední výšku pólového nástavce, která

je rovna výšce obdélníka o stejné šířce a ploše

pólového nástavce



Obrázek 6 – Detail pólů

**U stroje A:**

vypočtená výška pólu  $h_p = 0,2$  m:

V této části výpočtu odečítám hodnoty z obr. 4 kde je podrobně rozkreslené konstrukční uspořádání pólu

rozměry v [m]

$L_p = 0,608$

$l'_p = 0,127$

$L_n = 0,784 (L_p + 2 \cdot a)$

$l'_n = 0,071$

$b_p = 0,203$

$h'_n = 0,020$

$b_n = 0,421$

$h''_n = 0,039$

$h_p = 0,200$

Rozptylová vodivost mezi boky pólových nástavců:

$$\Lambda_{\sigma bn} = \mu_0 \frac{h'_n L_n}{l'_n} = 4\pi 10^{-7} \frac{0,020 \cdot 0,784}{0,071} = 2,78 \cdot 10^{-7} \quad (2.130)$$

Rozptylová vodivost mezi boky pólů:

$$\Lambda_{\sigma bp} = \frac{1}{2} \mu_0 \frac{h_p L_p}{l'_p} = 2\pi 10^{-7} \frac{0,200 \cdot 0,608}{0,127} = 6,02 \cdot 10^{-7} \quad (2.131)$$

Rozptylová vodivost mezi čely pólových nástavců:

$$\Lambda_{\sigma \check{c}n} = \mu_0 \frac{2}{\pi} h''_n \ln \frac{\pi \frac{b_n}{4} + l'_n}{l'_n} = 4\pi 10^{-7} \frac{2}{\pi} 0,039 \ln \frac{\pi \frac{0,421}{4} + 0,071}{0,071} = 0,54 \cdot 10^{-7} \quad (2.132)$$

Rozptylová vodivost mezi čely pólů:

$$\Lambda_{\sigma \check{c}p} = \frac{\mu_0}{\pi} h_p \ln \frac{\pi \frac{b_p}{4} + l'_p}{l'_p} = \frac{4\pi 10^{-7}}{\pi} 0,2 \ln \frac{\pi \frac{0,203}{4} + 0,127}{0,127} = 0,65 \cdot 10^{-7} \quad (2.133)$$

Výsledná magnetická vodivost rozptylového toku:

$$\Lambda_{\sigma} = 2\Lambda_{\sigma bn} + 2\Lambda_{\sigma bp} + 4\Lambda_{\sigma \check{c}n} + 4\Lambda_{\sigma \check{c}p} = (2 \cdot 2,78 + 2 \cdot 6,02 + 4 \cdot 0,54 + 4 \cdot 0,65) \cdot 10^{-7} = 22,36 \cdot 10^{-7} \quad (2.134)$$

Magnetické napětí na rozptylové vodivosti:

$$F_{\sigma} = F_{\sigma} + F_z + F_i = 11354 + 313 + 245 = 11912A \quad (2.135)$$

Rozptylový magnetický tok:

$$\Phi_{\sigma} = F_{\sigma} \cdot \Lambda_{\sigma} = 11912 \cdot 22,36 \cdot 10^{-7} = 0,027Wb \quad (2.136)$$

Činitel rozptylu:

$$\nu = \frac{\Phi_{\sigma}}{\Phi} = \frac{0,027}{0,161} = 0,1677 \quad (2.137)$$

Při prvním výpočtu jsem odhadoval velikost činitele mezipólového rozptylu na 15%, ve skutečnosti však vyšlo 16,8%. Vidíme tedy velmi dobrou shodu odhadu s výpočtem. Bylo by tedy možné provést další zpřesňující iteraci výpočtu anebo ponechat tuto nepřesnost a sledovat její vývoj v porovnání s návrhem druhého stroje.

### 3 Návrh druhého stroje se stejnými parametry, ale na napětí 3kV

Činný výkon:

$$P = S \cdot \cos \varphi = 5000 \cdot 0,8 = 4000 \text{ kW} \quad (3.1)$$

Fázové napětí stroje B:

$$U_f = \frac{U}{\sqrt{3}} = \frac{3000}{\sqrt{3}} \cong 1732 \text{ V} \quad (3.2)$$

Počet pólů:

$$p = \frac{60 f}{n} = \frac{60 \cdot 50}{750} = 4 \quad (3.3)$$

Počet pólů:

$$2p = 8 \quad (3.4)$$

Fázový proud:

$$I_1 = \frac{S}{U_s \sqrt{3}} = \frac{5000}{3000 \sqrt{3}} \cong 962 \text{ A} \quad (3.5)$$

Vnitřní průměr induktu  $D_1 = 1,5 \text{ m}$

Obvodová proudová hustota:  $A = 64\,000 \text{ A/m}$

Indukce ve vzduchové mezeře:  $B_\delta = 0,83 \text{ T}$

Mezipólová rozteč:

$$t_p = \frac{\pi D_1}{2 p} = \frac{\pi \cdot 1,5}{8} = 0,589 \text{ m} \quad (3.6)$$

#### 3.1.1 Návrh vinutí induktu (statoru)

Tato část je pro oba stroje stejná, liší se až počet závitů a tím i počet vodičů v drážce to je dáno jiným fázovým napětím (jinými procházejícími proudy)

Zvolena mezidrážková rozteč  $t_{d1} = 45 \text{ mm}$ .

První odhad počtu drážek

$$Q = \frac{\pi D_1}{t_{d1}} = \frac{\pi \cdot 1,5}{0,045} \approx 105$$

$$q = \frac{Q}{2pm} = \frac{105}{8 \cdot 3} = 4,375 \rightarrow \text{dále volím zlomkové vlnové vinutí} \quad (3.7)$$

$$\frac{18}{4} = \frac{9}{2} \text{ a počet drážek stejný jako u první varianty}$$



$$q = 4 \frac{2}{4} = \frac{9}{2}$$

$$Q = 2pmq = 2.4.3. \frac{18}{4} = 108 = 2.2.3.3.3 \quad (3.8)$$

Následně po volbě překladového čísla obdržíme:

$$\text{počet segmentů } n_s = 6$$

$$\text{počet drážek na překlad } Q_{pr} = 9$$

Počet závitů jedné fáze v sérii pro stroj B:

$$N_s = \frac{\pi D_1 A}{2mI_1} = \frac{\pi 1,5.64\,000}{2.3.962} \cong 52 \text{ závitů} \quad (3.9)$$

Počet vodičů v drážce:

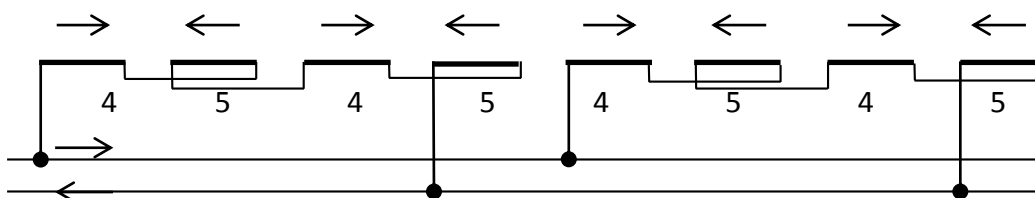
$$n_d = \frac{a_{\approx} N_s}{p q} = \frac{2.52}{4 \frac{18}{4}} = 5,7 \cong 6 \text{ vodičů} \quad (3.10)$$

Pokud bych volil jednu paralelní větev, vycházelo by přibližně 2,7 vodiče na drážku a při uvažování zaokrouhlení na nejbližší sudé číslo by byla zaokrouhlovací chyba příliš velká (nemělo by se lišit od vypočteného o více jak 15 % až 20%). Abychom zvýšili počet vodičů v drážce a zároveň zmenšili zaokrouhlovací chybu, musíme v našem případě volit dvě paralelní větve. Po této volbě přichází na řadu takzvané úsečkové jednofázové schéma, pomocí něhož ověříme jejich fyzickou proveditelnost.

Legenda:

- skupina cívek v jedné fázi (v mém návrhu je **v jedné skupině 4 a 5 cívek**)
- směr proudu cívkou
- ←

b) pro  $a_{\approx}=2$ :



Je zde též vidět i první rozdílnost při návrhu, kdy napětí stroje ovlivňuje počet vodičů. Nízké napětí vede při zachování výkonu na vysoké proudy a to vede na nízký počet vodičů v drážce. Při nízkém počtu vodičů v drážce je výhodné použít tzv. Roeblovu tyč, což je speciální druh tyče, ve které se vodič nachází ve všech pozicích v drážce.

Přepočet počtu závitů v sérii jedné fáze:

$$N_s = \frac{n_d p q}{a_{st}} = \frac{6 \cdot 4 \cdot \frac{9}{2}}{2} = 54 \text{ závitů} \quad (3.11)$$

Skutečná hodnota obvodové proudové hustoty pro stroj B:

$$A = \frac{2mI_1}{\pi D_1} N_s = \frac{2 \cdot 3 \cdot 962}{\pi \cdot 1,5} \cdot 54 \cong 66142 \text{ A/m} \quad (3.12)$$

Pak skuteční hodnota Essonova činitele elektromagnetického využití stroje:

$$C = \frac{\pi^2}{60\sqrt{2}} AB_\delta k_{v1} = \frac{\pi^2}{60\sqrt{2}} \cdot 66142 \cdot 0,83 \cdot 0,9406 = 6,006 \frac{\text{kVA}}{\text{m}^3 \text{ ot/min}} \quad (3.13)$$

Dle Essonova činitele lze následně dopočítat efektivní délku stroje:

$$l_e = \frac{S}{CD_1^2 n} = \frac{5000}{6,006 \cdot 1,5^2 \cdot 750} = 0,493 \text{ m} \quad (3.14)$$

Počet paketů:

$$i = \frac{l_e}{\check{s}_p} = \frac{0,493}{0,05} \cong 10 \quad (3.15)$$

Počet kanálů:

$$i_k = i - 1 = 10 - 1 = 9 \quad (3.16)$$

Celková délka induktu (včetně radiálních kanálů):

$$L = l_e + \check{s}_k i_k = 0,493 + 0,01 \cdot 9 \cong 0,583 \text{ m} \quad (3.17)$$

Velikost drážkové rozteče na průměru  $D_1$  :

$$t_{d1} = \frac{\pi D_1}{Q} = \frac{\pi \cdot 1500}{108} = 43,6 \text{ mm} \quad (3.18)$$

Šířka zubu:

$$z_1 = \frac{B_\delta t_{d1}}{B'_{z1} k_{Fe}} = \frac{0,83 \cdot 43,6}{1,7 \cdot 0,96} = 22,2 \text{ mm}, \quad (3.19)$$

Šířka drážky je pak:

$$b_d = t_{d1} - z_1 = 43,6 - 22,2 = 21,4 \text{ mm} \quad (3.20a)$$

Nejbližší normalizovaná šířka určená z tabulky drážky M ([1] str. 662 – tab. D4.1d) je:

$$b_d = 21,5 \text{ mm} \quad (3.20b)$$

a skutečná šířka zubu:

$$z_1 = t_{d1} - b_d = 43,6 - 21,5 = 22,1 \text{ mm.} \quad (3.21)$$

Nejprve si určíme proudovou hustotu ve vodiči určení z empirického vztahu:

$$\sigma_{Cu1} = \sqrt{\frac{K}{b_v}} = \sqrt{\frac{210}{17}} = 3,51 \text{ A/mm}^2 \quad (3.22)$$

kde  $b_v$  šířka holého vodiče v drážce a  $K$  je konstanta závislá na napětí (viz. tab. 9):

U [kV]	0,4	<b>3,0</b>	6,3	10,5
K	250	<b>210</b>	190	155

Tabulka 11 - Určení konstanty  $K$  dle napětí (volená hodnota je zvýrazněna)

Následně dopočítáme průřez vodiče:

$$S'_{Cu1} = \frac{I_1}{a_{st} \sigma_{Cu1}} = \frac{962}{2 \cdot 3,51} \cong 137,04 \text{ mm}^2 \quad (3.23)$$

Výška vodiče  $h_v$  při jeho šířce 17 mm, jak vychází z bilance drážky na šířku:

$$h_v = \frac{S_{Cu1}}{b_v} = \frac{137,04}{17} \cong 8,1 \text{ mm} \quad (3.24)$$

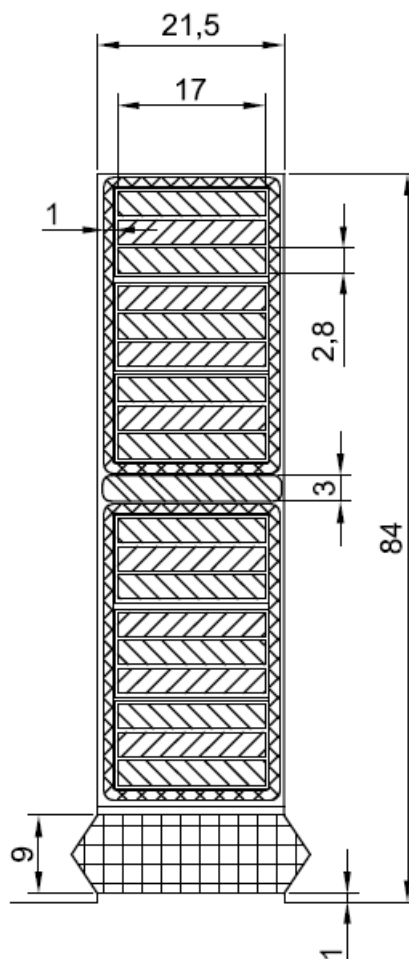
**Zvoleno  $b_v = 17 \text{ mm}$  a  $h_v = 2,8 \text{ mm}$**

Návrh rozměrů drážky pro stroj pracující na nižším napětí:

Poz.	Položka	Šířka		Hloubka	
1	Vyložení drážky 1)	2.0,15	0,3	3.0,15	0,45
2	Izolace proti železu	2 . $t_i \rightarrow 2.1$	2	4 . $t_i \rightarrow 4.1$	4
3	Vnější ochrana proti koruně	2 . 0,1	0,2	4 . 0,1	0,40
4	Stažení vodičů	2 . 0,15	0,3	4 . 0,15	0,60
5	Izolace závitů	2 . 0,44	0,88	2.n <sub>d</sub> .0,44 $\rightarrow$ 2.6.0,44	5,28
6	Izolace vodičů 2)	j . 0,37 $\rightarrow$ 1.0,37	0,37	n <sub>d</sub> . i . 0,37 $\rightarrow$ 6.3.0,37	6,66
7	Mezivrstva	-	-	1 . m <sub>v</sub> $\rightarrow$ 1.3	3,0
8	Σizolace		4,05		20,39
9	Vůle na šířku	0,2 až 0,6	0,45	-	-
10	Holý vodič 3)	j . b $\rightarrow$ 1.17	17,00	n <sub>d</sub> . i . h <sub>v</sub> $\rightarrow$ 6.3.2,8	50,4
11	Vložka na dno	-	-	1 . 1,00	1,00

12	Vložka pod klín	-	-	1 . 1	1,00
13	Vůle na hloubku	-	-	0,4 až 2,0	1,21
14	Rozměr drážky bez klínu	$b_d$	21,5	$h_2$	74
15	Klín + můstek	-	-	$h_0 + h_1 \rightarrow 1 + 9$	10,00
16	<b>Konečný rozměr drážky</b>	<b><math>b_d</math></b>	<b>21,5</b>	<b><math>h_d</math></b>	<b>84,00</b>

Tabulka 12 - Rozpis jednotlivých rozměrů drážky



Obrázek 7 – Řez drážkou stroje pro napětí 3kV

$$S_1 = 47 \text{ mm}^2. \quad (3.25)$$

Výsledný průřez vodičů tvořícího jeden závit je:

$$S_{Cu1} = j \cdot i \cdot S_1 = 1.3 \cdot 47 = 141 \text{ mm}^2 \quad (3.26)$$

a skutečná proudová hustota:

$$\sigma_{Cu1} = \frac{I_1}{a_{st} S_{Cu1}} = \frac{962}{2.141} = 3,41 \text{ A/mm}^2 \quad (3.27)$$

### 3.1.2 Odpor a rozptylová reaktance statorového vinutí

Výška čela je rovna přibližně: 
$$h_{\zeta} \doteq \frac{1}{2}(h_2 - m) = \frac{1}{2}(74 - 3) = 35,5 \text{ mm}, \quad (3.28)$$

kde  $h_2$  je hloubka drážky od jejího dna pod klín (viz řez drážkou).

Střední poloměr oka: 
$$R = r + \frac{h_{\zeta}}{2} = 15 + \frac{35,5}{2} = 32,75 \text{ mm} \quad (3.29)$$

Vzdálenost mezi čely  $c$  se volí např. v závislosti na velikosti napětí podle vztahu:

$$c = 4 + \frac{U[\text{kV}]}{2} = 4 + \frac{3}{2} = 5,5 \text{ mm} \quad (3.30)$$

Úhel sklonu čel válcového vinutí: 
$$\sin \alpha_{\zeta} = \frac{b_{\zeta} + c}{t_{d1}} = \frac{21,5 + 5,5}{43,6} = 0,6193 \quad (3.31)$$

$$\alpha_{\zeta} = \arcsin 0,6193 = 38,3^{\circ} \quad (3.32)$$

když šířku čela  $b_{\zeta}$  volíme stejnou jako šířku drážky  $b_d$ .

Délka šroubovice tvořící část čela: 
$$x = \frac{\beta \cdot t_p}{2 \cos \alpha_{\zeta}} = \frac{0,814 \cdot 589}{2 \cdot \cos 38,3^{\circ}} = 333 \text{ mm} \quad (3.33)$$

Délka oka: 
$$o = \frac{\pi \cdot R}{2} = \frac{\pi \cdot 32,75}{2} = 51,44 \cong 51 \text{ mm} \quad (3.34)$$

Délka čela: 
$$l_{\zeta} = 2(v + x + o) = 2(40 + 333 + 51) = 846 \text{ mm} \quad (3.35)$$

Výběh cívky z drážky „v“ je závislý na napětí stroje podle následující tabulky:

U [kV]	méně než 0,6	<b>3</b>	6	10 ÷ 15
v [mm]	25	<b>35 ÷ 40</b>	40 ÷ 60	60 ÷ 70

Tabulka 13 - Určení výběhu cívky dle jmenovitého napětí stroje (zvýrazněná volená hodnota)

Délka vodiče:

$$l_v = L + l_{\zeta} = 0,583 + 0,846 = 1,429 \text{ m} \quad (3.36)$$

Vyložení čel v podélném směru:

Délka oka: 
$$e = h_{\zeta} + r = 74 + 15 = 89 \text{ mm} \quad (3.37)$$

Průmět  $x$  do osového směru: 
$$y = \frac{\beta \cdot t_p}{2} \operatorname{tg} \alpha_{\zeta} = \frac{0,888 \cdot 589}{2} \operatorname{tg} 44,4^{\circ} = 256 \text{ mm} \quad (3.38)$$

Celkové vyložení: 
$$a = v + y + e = 0,04 + 0,256 + 0,089 = 0,385 \text{ m} \quad (3.39)$$

#### Odpor jedné fáze:

Elektrický odpor pro stejnosměrný proud (tedy bez uvažování vlivu skin efektu):

$$R'_{1/20} = \rho_{Cu} \frac{2 \cdot l_v \cdot N_S}{a_{st} \cdot S_{Cu1}} = \frac{1}{56} \frac{2 \cdot 1,429 \cdot 54}{2 \cdot 141} = 0,009 \Omega \quad (3.40)$$

kde  $\rho_{Cu}$  je měrný odpor měděného vodiče při teplotě 20°C  $\left[ \Omega \frac{\text{m}}{\text{mm}^2} \right]$

Vliv skin efektu:

Náhradní výška vodiče:

$$\xi = 2\pi h_v \sqrt{\frac{j b_v f}{b_d \rho}} 10^{-7} = 2 \cdot \pi \cdot 2,5 \sqrt{\frac{1.17.50}{21,5 \frac{1}{56}}} 10^{-7} \cong 0,23 \cong 0,2 \quad (3.41)$$

Činitel zvýšení elektrického odporu:

$$k_{Cu} = \frac{(i \cdot n_d)^2 - 0,2}{9} \xi^4 = \frac{(3.6)^2 - 0,2}{9} \xi^4 = 0,058 \quad (3.42)$$

Odpor při střídavém proudu při 20 °C:

$$R_{1/20} = (1 + k_{Cu}) R_{1/20} = (1 + 0,058) \cdot 0,009 = 0,010 \Omega \quad (3.43)$$

Odpor při 75 °C:

$$R_{1/75} = 1,22 \cdot R_{1/20} = 1,22 \cdot 0,010 = 0,012 \Omega \quad (3.44)$$

Procentní hodnota úbytku napětí na ohmickém odporu:

$$u_r = \frac{R_{1/75} I_1}{U_f} 100 = \frac{0,012 \cdot 962}{1732} \cdot 100 = 0,66 \% \quad (3.45)$$

Rozptylová reaktance statorového vinutí:

Poz.	Položka	Hloubka (mm)	
2	Izolace proti železu	2 . t <sub>i</sub> → 2.1	2
3	Vnější ochrana proti koruně	2 . 0,1	0,2
4	Stažení vodičů	2 . 0,15	0,3
5	Izolace závitů	(2.n <sub>d</sub> -2) . 0,44 → (2.6-2).0,44	4,4
6	Izolace vodičů	(n <sub>d</sub> . i-2) . 0,37 → (6.3-2).0,37	5,9
7	Mezivrstva	1 . m <sub>v</sub> → 1.3	3,0
10	Holý vodič	n <sub>d</sub> . i . h <sub>v</sub> → 6.3.2,8	50,4
	<b>Konečný součet všech částí pro určení h'<sub>2</sub></b>		<b>66,2mm</b>

Tabulka 14 – Výpis všech rozměrů pro určení h'<sub>2</sub>

Poz.	Položka	Hloubka (mm)	
2	Izolace proti železu	→ 1.1	1
3	Vnější ochrana proti koruně	1 . 0,1	0,1

4	Stažení vodičů	1 . 0,15	0,15
5	Izolace závitů	→ 1.0,44	0,44
6	Izolace vodičů 2)	→ 1.0,37	0,37
12	Vložka pod klín	1	1,00
13	Vůle na hloubku	0,4 až 2,0	0,61
15	Klín + můstek	$h_0 + h_1 \rightarrow 1 + 9$	10,00
16	<b>Konečný součet všech částí pro určení <math>h'_1</math></b>		<b>13,7mm</b>

Tabulka 15 – Výpis všech rozměrů pro určení  $h'_1$ 

$$X_\sigma = \frac{(4\pi)^2 f N_s^2}{p q} l_e \left[ \left( \frac{h'_2}{3b_d} + \frac{h'_1}{b_d} \right) + \frac{l_\xi}{l_e} q \left( 0,187 + 0,166 \frac{t_p}{l_\xi} \beta \right) + \ln \left( 1 + \frac{\pi z_1}{2b_d} \right) \right] 10^{-7} \quad (3.46)$$

$$\begin{aligned} X_\sigma &= \frac{(4\pi)^2 50.54^2}{4 \cdot \frac{9}{2}} 0,493 \left[ \left( \frac{66,2}{3 \cdot 21,5} + \frac{13,7}{21,5} \right) + \frac{0,8469}{0,493 \cdot 2} \left( 0,187 + 0,166 \frac{0,589}{0,844} 0,888 \right) \right. \\ &\quad \left. + \ln \left( 1 + \frac{\pi \cdot 22,2}{2 \cdot 21,5} \right) \right] 10^{-7} = \\ &= 630597 \cdot [(1,663565) + 7,722 \cdot (0,289871) + 0,963913] \cdot 10^{-7} \\ &= \mathbf{0,31\Omega} \end{aligned}$$

Procentní hodnota úbytku napětí na rozptylové reaktanci:

$$u_\sigma = \frac{X_\sigma I_1}{U_f} 100 = \frac{0,31 \cdot 962}{1732} 100 \cong 17,2 \% \quad (3.47)$$

Procentní hodnota rozptylové reaktance:

$$x_\sigma = u_\sigma = 17,2 \% \quad (3.48)$$

### 3.1.3 Návrh magnetického obvodu

Určení magnetického toku:

Magnetický tok:

$$\Phi = \frac{U_f}{4,44 f N_s k_{v1}} = \frac{1732}{4,44 \cdot 50 \cdot 54 \cdot 0,9406} = 0,154 \text{ Wb} \quad (3.49)$$

Kontrola:

$$\Phi = \frac{2}{\pi} t_p l_e B_\delta = \frac{2}{\pi} 0,589 \cdot 0,493 \cdot 0,83 = 0,154 \text{ Wb} \quad (3.50)$$

Hodnoty plně souhlasí, výpočet je až dosud správný.

### 3.1.4 Velikost vzduchové mezery

Velikost vzduchové mezery:

$$\delta = k \cdot \frac{A \cdot t_p}{B_\delta} \cdot \frac{10^{-6}}{x_d - x_\sigma} = 47 \cdot \frac{66142 \cdot 0,589}{0,83} \cdot \frac{10^{-6}}{137 - 17,2} = 0,0183 \text{ m, voleno } 0,018 \text{ m} \quad (3.51)$$

Volíme:

$$\delta = 18 \text{ mm} \quad (3.52)$$

a dále:

$$\frac{\delta_{\max}}{\delta} = 1,5$$

### 3.1.5 Magnetické napětí reakce kotvy

Amplituda základní harmonické reakce kotvy:

$$F'_a = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{1}{C_1} A t_p k_{v1} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{1}{1,074} 66142 \cdot 0,589 \cdot 0,9406 = 15359 \text{ A} \quad (3.53)$$

$$\frac{\delta}{t_p} = \frac{0,018}{0,589} = 0,0306; \alpha = 0,7; C_1 = a \cdot b = 1,18 \cdot 0,91 = 1,074 \quad (3.54)$$

Amplituda základní harmonické magnetického napětí v podélném ( $F_{d1}$ ) a v příčném ( $F_{q1}$ )

směru:

$$F_{d1} = C_{d1} F'_a = 0,88 \cdot 15359 = 13516 \text{ A} \quad (3.55)$$

$$F_{q1} = C_{q1} F'_a = 0,49 \cdot 15359 = 7526 \text{ A} \quad (3.56)$$

kde:  $C_{d1} = e \cdot f = 0,81 \cdot 1,09 = 0,88 \quad (3.57)$

$$C_{q1} = g \cdot h = 1,57 \cdot 0,31 = 0,49 \quad (3.58)$$

### 3.1.6 Dimenzování magnetického obvodu

výška pólu:

$$h_p = 0,3 \cdot t_p = 0,3 \cdot 0,589 = 0,178 \text{ m} \quad (3.59)$$

výška nástavce:

$$h_n = 0,1 \cdot t_p = 0,1 \cdot 0,589 = 0,059 \text{ m} \quad (3.60)$$

šířka pólu:

$$b_p = \frac{(1 + \nu) \cdot \Phi}{B_p L_p} = \frac{(1 + 0,15) \cdot 0,154}{1,5 \cdot 0,583} = 0,203 \text{ m} \quad (3.61)$$

šířka pólového nástavce:

$$b_n = \alpha \cdot t_p = 0,70 \cdot 0,589 = 0,412 \text{ m}, \quad (3.62)$$



výška jha rotoru:

$$h_{jr} = \frac{(1 + \nu) \cdot \Phi}{2 B_{jr} L_r} = \frac{(1 + 0,15) \cdot 0,154}{2 \cdot 1,1 \cdot 0,60} = 0,134 \text{ m} \quad (3.63)$$

výška jádra induktu:

$$h_{js} = \frac{\Phi}{2 B_{js} k_{Fe} l_e} = \frac{0,154}{2 \cdot 1,3 \cdot 0,96 \cdot 0,493} = 0,125 \text{ m} \quad (3.64)$$

Délky středních siločar částí magnetického obvodu:

pól:

$$l_p = h_p + h_n = 0,178 + 0,059 = 0,237 \text{ m} \quad (3.65)$$

jho rotoru:

$$l_r = \frac{\pi [D_1 - 2(\delta + h_p + h_n)]}{4p} = \frac{\pi [1,5 - 2(0,018 + 0,178 + 0,059)]}{4 \cdot 4} = 0,194 \text{ m} \quad (3.66)$$

jádro induktu:

$$l_s = \frac{\pi [D_1 + 2(h_d + h_{js})]}{4p} = \frac{\pi [1,5 + 2(0,078 + 0,125)]}{4 \cdot 4} = 0,374 \text{ m} \quad (3.67)$$

### 3.1.7 Charakteristika naprázdno

Cartérův činitel respektující vliv drážkování induktu  $k_{cd}$  – odečteno z grafu 6, viz příloha

$$\frac{b_0}{z_1} = \frac{21,5}{22,1} = 0,97 ; \frac{b_0}{\delta} = \frac{21,5}{18} = 1,19 \quad (3.68a, 3.68b)$$

$b_0 = b_d$  platí pro otevřenou drážku

Z nomogramu byla odečtena hodnota:

$$k_{cd} = 1,09 \quad (3.69)$$

Cartérův činitel respektující vliv radiálních ventilačních kanálů  $k_{ck}$ :

$$k_{ck} = \frac{1}{1 + \frac{\delta}{2 + \delta} \cdot \frac{\check{s}_k \cdot i}{l_e}} = \frac{1}{1 + \frac{18}{2 + 18} \cdot \frac{9 \cdot 10}{493}} = 0,86 \quad (3.70)$$

Výsledná hodnota Cartérova činitele:

$$k_c = k_{cd} \cdot k_{ck} = 1,09 \cdot 0,86 = 0,94 \quad (3.71)$$

Magnetické napětí na vzduchové mezeře:

$$F_\delta = 0,8 k_c \delta B_\delta \cdot 10^6 = 0,8 \cdot 0,94 \cdot 0,018 \cdot 0,83 \cdot 10^6 = 11235 \text{ A} \quad (3.72)$$

Výpočet charakteristiky naprázdno je proveden z hodnot v následujících tabulkách.

Tabulka 16 uvádí jednotlivé rozměry částí stroje (v mm).

$D_1$	$D_1 = 1500$	$t_{d1} = 43,6$	$z_1 = 22,1$	$k_{z1} = 1,05$
$D_2 = D_1 \pm h_d$	$D_2 = 1578$	$t_{d2} = 46,1$	$z_2 = 24,6$	$k_{z2} = 0,95$
$D_3 = D_1 \pm 2h_d$	$D_3 = 1656$	$t_{d3} = 48,5$	$z_3 = 27$	$k_{z3} = 0,87$

Tabulka 16 - Hodnoty pro charakteristiku naprázdno - 1.část

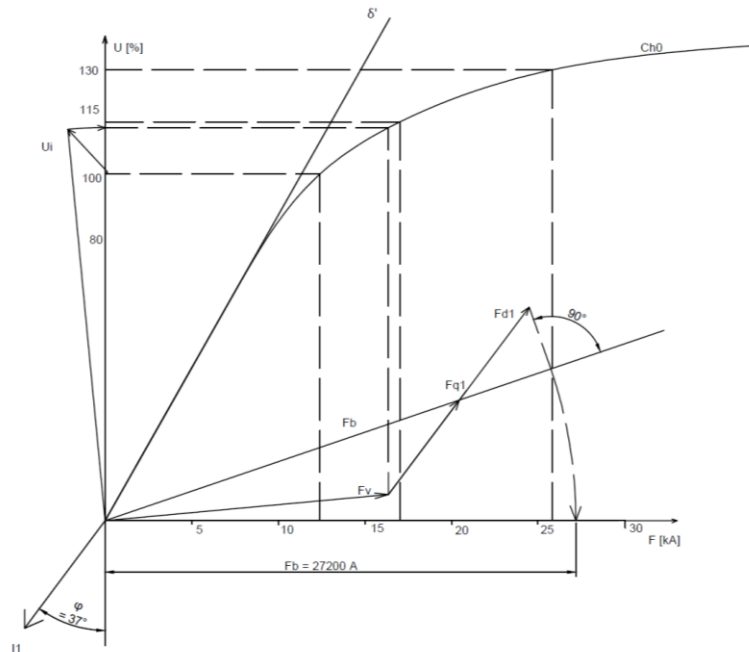
Jednotky:                      [T]                      [T]                      [A/m]                      [A/m]                      [A]

1,00. $\Phi$	$B'_{z1} = 1,71$	$B_{z1} = 1,70$	$H_{z1} = 6000$	$H_{zstř} = 4033$	$F_z = 315$
	$B'_{z2} = 1,63$	$B_{z2} = 1,63$	$H_{z2} = 4000$		
	$B'_{z3} = 1,56$	$B_{z3} = 1,55$	$H_{z3} = 2200$		
1,15. $\Phi$	$B'_{z1} = 1,96$	$B_{z1} = 1,92$	$H_{z1} = 19000$	$H_{zstř} = 14167$	$F_z = 1105$
	$B'_{z2} = 1,86$	$B_{z2} = 1,84$	$H_{z2} = 14000$		
	$B'_{z3} = 1,79$	$B_{z3} = 1,78$	$H_{z3} = 10000$		
1,30. $\Phi$	$B'_{z1} = 2,22$	$B_{z1} = 2,09$	$H_{z1} = 42000$	$H_{zstř} = 33667$	$F_z = 2626$
	$B'_{z2} = 2,11$	$B_{z2} = 2,04$	$H_{z2} = 34000$		
	$B'_{z3} = 2,03$	$B_{z3} = 1,97$	$H_{z3} = 24000$		

Tabulka 17 - Hodnoty pro charakteristiku naprázdno - 2.část

		1,00. $\Phi$			1,15. $\Phi$			1,30. $\Phi$		
		B	H	F	B	H	F	B	H	F
Vzd. mezera	$\delta = 0,018$ m	0,83		11235			12920			14606
Hlava	$k_{z1} = 1,05$	$B_{z1}'$	1,71	6000	1,96	19000		2,22	42000	
		$B_{z1}$	1,70		1,92			2,09		
Střed	$k_{z2} = 0,96$	$B_{z2}'$	1,63	4000	1,86	14000		2,11	34000	
		$B_{z2}$	1,63		1,84			2,04		
Pata	$k_{z3} = 0,88$	$B_{z3}'$	1,56	2200	1,79	10000		2,03	24000	
		$B_{z3}$	1,55		1,78			1,97		
stř. hodnota	$h_z = 0,084$			4033			1105			2626
jádro induk.	$l_s = 0,374$	1,3	630	236	1,495	2400	897	1,69	6800	2543
pól	$l_p = 0,237$	1,5	2500	593	1,725	8100	1920	1,95	23800	5640
jho	$l_r = 0,194$	1,1	600	116	1,265	950	184	1,43	1900	369
$\sum F = F_\delta + F_z + F_{ji} + F_p + F_j$		12495			17026			25784		

Tabulka 18 - Hodnoty pro konstrukci charakteristiky naprázdno

Obrázek 8 - Sestrojená charakteristika naprázdno:  $F_b = 27\,200\text{ A}$ .

### 3.1.8 Návrh budícího vinutí

$$a = \frac{b_n - b_p}{2} = \frac{0,412 - 0,203}{2} = 0,088\text{m} \quad (3.73)$$

$$l_{bs} = 2(L_p + b_p + 2a) = 2(0,583 + 0,203 + 2 \cdot 0,088) = 1,924\text{m} \quad (3.74)$$

Průřez vodiče budící cívky:

$$S'_{Cub} = \frac{\rho_{Cu} l_{bs} 2p F_b}{0,9 \cdot U_b} = \frac{\frac{1}{56} 1,924 \cdot 8 \cdot 27200}{0,9 \cdot 60} = 138,4\text{ mm}^2 \quad (3.75)$$

Ve výpočtu jsem zvolil stejný rozměr vodiče: 75 x 2, jako tomu bylo u stroje A ->  $S_{Cub} = 145\text{ mm}^2$ .

Předběžně volíme proudovou hustotu ve vodiči:

$$\sigma_{Cub} = 2,37\text{ A/mm}^2 \quad (3.76)$$

Budící proud:

$$I_b = \sigma_{Cub} \cdot S_{Cub} = 2,37 \cdot 145 = 344\text{ A} \quad (3.77)$$

Počet závitů budící cívky:

$$N_b = \frac{F_b}{I_b} = \frac{27200}{344} = 79 \quad (3.78)$$

Výška cívky:

$$h_c = N_b(b_v + t_i) = 79 \cdot (2 + 0,4) = 79 \cdot 2,4 = 189,65 \text{ mm} \cong 190 \text{ mm} \quad (3.79)$$

Výška těla pólu:

$$h_p = h_c + 2t_k = 190 + 2 \cdot 5 = 200 \text{ mm} \quad (3.80)$$

### 3.1.9 Orientační výpočet oteplení budící cívky

Vnější obvod budící cívky:

$$l_{be} = 2(L_p + b_p + 4a) = 2(0,583 + 0,203 + 4 \cdot 0,088) = 2,276 \text{ m} \quad (3.81)$$

Ochlazovací povrch všech cívek:

$$O_{2pc} = h_c l_{be} 2p = 0,190 \cdot 2,276 \cdot 8 = 3,460 \text{ m}^2 \quad (3.82)$$

Odpor všech cívek budícího vinutí:

$$R_{b/75} = 1,22 \cdot \rho \frac{l_{bs} N_b 2p}{S_{Cub}} = 1,22 \cdot \frac{1}{56} \frac{1,924 \cdot 79 \cdot 8}{145} \cong 0,183 \ \Omega \quad (3.83)$$

Ztráty v budícím vinutí:

$$\Delta P_{Cub} = R_{b/75} I_b^2 = 0,183 \cdot 344^2 = 21\,619 \text{ W} \quad (3.84)$$

Oteplení cívky

$$\Delta \vartheta_{Cub} = \frac{1,18 \cdot \Delta P_{Cub}}{\alpha O_{2pc}} = \frac{1,18 \cdot 21\,619}{100 \cdot 3,460} = 73,7^\circ \text{C} \quad (3.85)$$

Rychlost proudícího vzduchu kolem cívky lze uvažovat jako třetinu obvodové rychlosti rotoru:

$$v = \frac{1}{3} \frac{\pi D_1 n}{60} = \frac{1}{3} \frac{\pi \cdot 1,5 \cdot 750}{60} \cong 19,6 \text{ m/s} \quad (3.86)$$

### 3.1.10 Kroužky a kartáče

Pro přenos budícího proudu na rotor jsem zvolil stejné kovografitové kartáče typ O67, jako pro první stroj. Základní parametry viz. předchozí návrh.

Celkový průřez kartáčů jedné polarity:

$$S_k = \frac{I_b}{\sigma_k} = \frac{344}{16} = 21,5 \text{ cm}^2 \quad (3.87)$$

Podle doporučených rozměrů kartáčů volíme rozměr  $b_k \times l_k = 25 \times 20$ , tomu odpovídá průřez:

$$S_{k1} = 5 \text{ cm}^2$$

Počet kartáčů jedné polaroty na obvodu kroužku

$$i_k = \frac{S_k}{S_{k1}} = \frac{21,5}{5} \sim 5 \quad (3.88)$$

$$d_H = 0,135 \sqrt[3]{\frac{P_{kW}}{n}} = 0,135 \sqrt[3]{\frac{4000}{750}} = 0,236m \quad (3.89)$$

Vnější průměr kroužků budeme předpokládat:

$$D_k = 1,3 \cdot d_H = 1,3 \cdot 0,236 = 0,307m. \quad (3.90)$$

Obvodová rychlost kroužků:

$$v_k = \frac{\pi D_k n_{max}}{60} = \frac{\pi \cdot 0,307 \cdot 1125}{60} \cong 18m/s \quad (3.91)$$

Rychlost je menší než uvedená maximální hodnota. Tzn. výpočet a návrh je v pořádku.

Rozteč kartáčů:

$$t_k = \frac{\pi D_k}{2 \cdot i_k} = \frac{\pi \cdot 0,307}{2 \cdot 5} = 0,096m \quad (3.92)$$

Rozteč je výrazně větší než je délka kartáče ( $l_k$ ), takže i po této stránce je návrh vyhovující.

Počet tyčí tlumiče:

$$0,8 \cdot t_{d1} < t_t < 0,9 \cdot t_{d1} = 0,85 \cdot t_{d1} = 0,85 \cdot 43,6 \approx 37mm \quad (3.93)$$

Při šířce pólového nastavce 412mm bude pod jedním pólovým nastavcem 11 tyčí tlumiče ( $i_t$ ).

Průřez všech tyčí tlumiče:  $\sum S_{Cut} = (15 \div 30)\%$  průřezu statorového vinutí

Celkový průřez statorového vinutí:

$$\sum S_{Cu\ statoru} = Q \cdot n_d \cdot j \cdot b \cdot i \cdot h_v = 108.6.1.17.3.2,8 = 92\ 534\ mm^2 \quad (3.94)$$

Kde:

$$\sum S_{Cut} = 20\% \text{ z } 82\ 620\ mm^2 = 18\ 506\ mm^2 \quad (3.95)$$

Průměr jedné tyče:

$$d_t = \sqrt{\frac{4 \cdot \sum S_{Cut}}{\pi \cdot 2p \cdot i_t}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 18506}{\pi \cdot 8 \cdot 11}} = 16,36\ mm \cong 16mm \quad (3.96)$$

Průřez spojovacího kruhu, kde  $S_{Cutp}$  je průřez všech tyčí na pólovém nastavci:

$$S_{kt} = (0,4 \div 0,5) S_{Cutp} = 0,5 \cdot i_t \cdot \frac{\pi d_t^2}{4} = 0,5 \cdot 11 \cdot \frac{\pi 16^2}{4} \cong 1105\ mm^2 = 0,1105\ m^2 \quad (3.97)$$

## 3.2 Ztráty a účinnost

### 3.2.1 Ztráty

#### Joulovy:

ve vinutí statoru:

$$\Delta P_{Cu1} = m \cdot R_{1/75} \cdot I_1^2 = 3.0,012 \cdot 962^2 = 33315 \text{ W} \quad (3.98)$$

v budícím vinutí:

$$\Delta P_{Cub} = R_{b/75} \cdot I_b^2 = 0,183 \cdot 344^2 = 21\,619 \text{ W} \quad (3.99)$$

Tyto ztráty již byly určeny při výpočtu oteplení budící cívky.

#### V železe:

v jádře induktu:

ztrátové číslo plechů:  $\Delta p_{Fe} = 1,8 \text{ W/kg}$

hmotnost jádra statoru:

$$m_{Fej} = \frac{\pi}{4} (D_{je}^2 - D_3^2) l_e k_{Fe} \rho_{Fe} = \frac{\pi}{4} (1,918^2 - 1,668^2) 0,493 \cdot 0,96 \cdot 7800 = 2599 \text{ kg} \quad (3.100)$$

$$\text{kde } D_{je} = D_1 + 2(h_d + h_{js}) = 1,5 + 2 \cdot (0,084 + 0,125) = 1,918 \text{ m} \quad (3.101)$$

je vnější průměr statoru

ztráty v jádře induktu (statoru):

$$\Delta P_{Fej} = 1,8 \cdot \Delta p_{Fe} \cdot B_{js}^2 \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} m_{Fej} = 1,8 \cdot 1,8 \cdot 1,3^2 \left(\frac{50}{50}\right)^{1,3} \cdot 2599 = 14231 \text{ W} \quad (3.102)$$

hmotnost zubů statoru:

$$m_{Fez} = Q \cdot z_2 \cdot h_d \cdot l_e \cdot k_{Fe} \rho_{Fe} = 108 \cdot 0,025 \cdot 0,084 \cdot 0,493 \cdot 0,96 \cdot 7800 = 837 \text{ kg} \quad (3.103)$$

kde  $z_2$  je střední šířka zubu (viz výpočet zubové vrstvy charakteristiky naprázdno) a  $h_d$  je hloubka drážky

ztráty v zubech statoru:

$$\Delta P_{Fez} = 2 \cdot \Delta p_{Fe} \cdot B_{z2}^2 \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} \cdot m_{Fez} = 2 \cdot 1,8 \cdot 1,63^2 \cdot \left(\frac{50}{50}\right)^{1,3} \cdot 837 = 8006 \text{ W} \quad (3.104)$$

kde  $B_{z2}$  je mg. indukce ve středu zubu (viz výpočet zubové vrstvy charakteristiky naprázdno)

Povrchové:

$$\begin{aligned}\Delta P_p &= \frac{\pi}{2} \cdot D_1 \alpha L_p k_0 \left( \frac{Q \cdot n}{10000} \right)^{1,5} (t_{d1} \cdot \beta \cdot 1000 \cdot B_\delta \cdot k_c) \\ &= \frac{\pi}{2} \cdot 1,5 \cdot 0,7 \cdot 0,583 \cdot 4,6 \left( \frac{108.750}{10000} \right)^{1,5} (0,0436 \cdot 0,888 \cdot 1000 \cdot 0,83 \cdot 0,94) \\ &= 3080 W\end{aligned}\tag{3.105}$$

Mechanické:

$$\Delta P_m = v^{2,5} \cdot D_1 \sqrt{l_e} = 58,9^{2,5} \cdot 1,5 \sqrt{0,493} = 28042 W\tag{3.106}$$

kde  $v$  je obvodová rychlost rotoru:

$$v = \frac{\pi D_1 n}{60} = \frac{\pi \cdot 1,5 \cdot 750}{60} = 58,9 \text{ m/s}\tag{3.107}$$

Přídavné:

$$\Delta P_{přid} = 0,003 \cdot S = 0,003 \cdot 5000 \cdot 10^3 = 15000 W\tag{3.108}$$

Celkové:

$$\begin{aligned}\Delta P &= \Delta P_{Cu1} + \Delta P_{Cub} + \Delta P_{Fej} + \Delta P_{Fez} + \Delta P_p + \Delta P_m + \Delta P_{přid} \\ &= (33315 + 21619 + 14231 + 8006 + 3080 + 28042 + 15000) \\ &= 123,29 \cdot 10^3 W = 123,29 kW\end{aligned}\tag{3.109}$$

### 3.2.2 Účinnost

$$\eta = 100 \left( \frac{P}{P + \Delta P} \right) = 100 \left( \frac{4000}{4000 + 123,29} \right) = 97,01 \% \tag{3.110}$$

### 3.3 Mezipólový rozptyl

**U stroje B:**vypočtená výška pólu  $h_p = 0,2 \text{ m}$ :  
rozměry v [m]

$$\begin{array}{ll} L_p = 0,583 & l'_p = 0,127 \\ L_n = 0,759 (L_p + 2 \cdot a) & l'_n = 0,071 \\ b_p = 0,203 & h'_n = 0,020 \\ b_n = 0,421 & h''_n = 0,039 \\ h_p = 0,200 & \end{array}$$

Rozptylová vodivost mezi boky pólových nástavců:

$$\Lambda_{\sigma bn} = \mu_0 \frac{h'_n L_n}{l'_n} = 4\pi 10^{-7} \frac{0,020 \cdot 0,759}{0,071} = 2,69 \cdot 10^{-7} \quad (3.111)$$

Rozptylová vodivost mezi boky pólů:

$$\Lambda_{\sigma bp} = \frac{1}{2} \mu_0 \frac{h_p L_p}{l'_p} = 2\pi 10^{-7} \frac{0,200 \cdot 0,583}{0,127} = 5,77 \cdot 10^{-7} \quad (3.112)$$

Rozptylová vodivost mezi čely pólových nástavců:

$$\Lambda_{\sigma \check{c}n} = \mu_0 \frac{2}{\pi} h''_n \ln \frac{\pi \frac{b_n}{4} + l'_n}{l'_n} = 4\pi 10^{-7} \frac{2}{\pi} 0,039 \ln \frac{\pi \frac{0,421}{4} + 0,071}{0,071} = 0,54 \cdot 10^{-7} \quad (3.113)$$

Rozptylová vodivost mezi čely pólů:

$$\Lambda_{\sigma \check{c}p} = \frac{\mu_0}{\pi} h_p \ln \frac{\pi \frac{b_p}{4} + l'_p}{l'_p} = \frac{4\pi 10^{-7}}{\pi} 0,2 \ln \frac{\pi \frac{0,203}{4} + 0,127}{0,127} = 0,65 \cdot 10^{-7} \quad (3.114)$$

Výsledná magnetická vodivost rozptylového toku:

$$\Lambda_{\sigma} = 2\Lambda_{\sigma bn} + 2\Lambda_{\sigma bp} + 4\Lambda_{\sigma \check{c}n} + 4\Lambda_{\sigma \check{c}p} = (2 \cdot 2,69 + 2 \cdot 5,77 + 4 \cdot 0,54 + 4 \cdot 0,65) \cdot 10^{-7} = 21,68 \cdot 10^{-7} \quad (3.115)$$

Magnetické napětí na rozptylové vodivosti:

$$F_{\sigma} = F_{\sigma} + F_z + F_i = 11354 + 313 + 236 = 11905A \quad (3.116)$$

Rozptylový magnetický tok:

$$\Phi_{\sigma} = F_{\sigma} \cdot \Lambda_{\sigma} = 11905 \cdot 21,68 \cdot 10^{-7} = 0,026Wb \quad (3.117)$$

Činitel rozptylu:

$$\nu = \frac{\Phi_{\sigma}}{\Phi} = \frac{0,026}{0,154} = 0,1676 \quad (3.118)$$



## 4 Porovnání vlastností obou strojů a vliv rozdílného napětí

V poslední části své diplomové práce budu srovnávat vlastnosti obou strojů. Lze předpokládat velmi rozdílné hodnoty určitých veličin a rozměry jednotlivých částí strojů. Vždy budu pod sebe barevně vypisovat hodnoty srovnávaných prvků a zdůvodňovat jejich rozdílnosti. V rámci výpočtů obou strojů jsem zavedl barevné odlišení pro oba stroje. Pro stroj pracující na 10kV a pro druhý na 3kV. Všechny ostatní hodnoty a rozměry, které jsou pro oba stroje shodné, ponechávám černou barvou. Ty zde uvádět nebudu, byly již popsány dříve (viz výpočty).

### 4.1 Odlišnosti statoru a konstrukční uspořádání drážky

Poznámka číslo	Stroj varianta A <b>U = 10 500 V</b>	Stroj varianta B <b>U = 3 000 V</b>
1.	$I_1 = 275 \text{ A}$	$I_1 = 962 \text{ A}$
2.	$N_s \cong 180 \text{ závitů}$ $n_d \cong 10$	$N_s \cong 54 \text{ závitů}$ $n_d \cong 6$
3.	$A = 63025 \text{ A/m}$	$A = 66142 \text{ A/m}$
4.	$C = 5,723 \frac{\text{kVA}}{\text{m}^3 \text{ot/min}}$ $l_e = 0,518 \text{ m}$	$C = 6,006 \frac{\text{kVA}}{\text{m}^3 \text{ot/min}}$ $l_e = 0,493 \text{ m}$
5.	$i = 10$ $i_k = 9$ $L = 0,608 \text{ m}$	$i = 10$ $i_k = 9$ $L = 0,583 \text{ m}$
6.	$\sigma_{Cu1} = 3,11 \text{ A/mm}^2$	$\sigma_{Cu1} = 3,41 \text{ A/mm}^2$

#### 1. Fázový proud

#### 2. Počet závitů jedné fáze v sérii a na to navazující počet vodičů v drážce

U stroje na 3kV vycházel počet vodičů v drážce nízké číslo (2,7 vodiče -> 3) a tak jsem se přiklonil k provedení se dvěma paralelními větvemi.

#### 3. Skutečná hodnota obvodové proudové hustoty

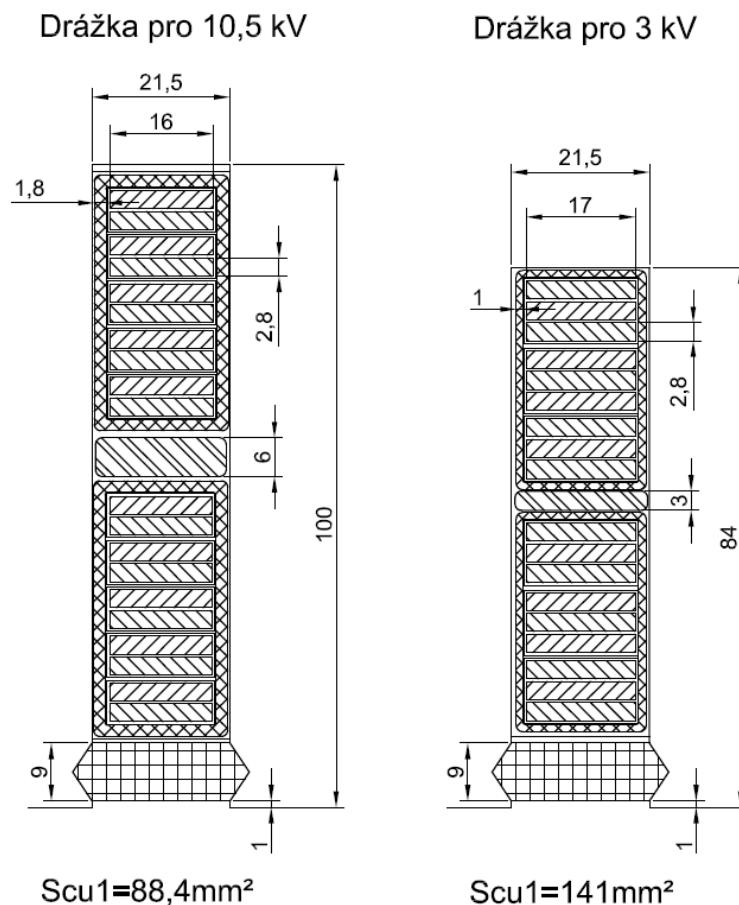
Vzhledem k tomu, že na počátku se vycházelo ze stejné zvolené hodnoty tak i po přepočtu proveditelného počtu závitů v sérii a fázového proudu by měla vycházet proudová hustota stejně velká. V mých návrzích se liší jen o cca 5%.

#### 4. Hodnota Essonova činitele a délka stroje

Protože jsem volil pro oba stroje stejný počet drážek, je činitel vinutí shodný a při určování činitele elektromagnetického využití tedy výslednou hodnotu ovlivňuje především velikost obvodové proudové hustoty. Vidíme, že stroj na nižší napětí je lépe elektromagneticky využit a je tím pádem i kratší. To nám přináší úsporu materiálu, ceny a váhy. Ovšem může to mít i negativní dopad na účinnost, viz. dále.

### 5. Počet paketů, chladicích kanálů a celková délka induktu

Počet paketů i chladicích kanálů jsem volil stejný, statorové pakety budou u stroje na nižší napětí skládány z menšího počtu plechů. Celková délka stroje na nižší napětí bude menší.



Scuc=884mm<sup>2</sup> a obsah drážky  
2150mm<sup>2</sup> činitel plnění drážky 0,411

Scuc=846mm<sup>2</sup> a obsah drážky  
1806mm<sup>2</sup> činitel plnění drážky 0,468

### 6. Skutečná proudová hustota na jeden vodič

Hlavní část, kde se především oba stroje liší je drážka a její uspořádání. Pro porovnání obou drážek přikládám i jejich řez doplněný o rozměry. Jak vidíme z uspořádání drážky, rozdíl mezi drážkami není až tak velký, jak by se dalo předpokládat. Pro vyšší napětí je volena širší izolace vůči železu a větší mezivrstva, celkový obsah mědi je pro vyšší napětí menší a i činitel využití drážky je rovněž nižší. Je to způsobeno především vyšším obsahem izolace v drážce (vyšší

napětí a počet vodičů). Co může být překvapivé, že pro nižší napětí je drážka mělčí jen o 18%. Snažil jsem se pro co nejvyšší podobnost mezi oběma stroji zachovat šířku a měnit jen hloubku drážky. Snažil jsem se zachovat velmi podobnou proudovou hustotu, protože vychází z podobné obvodové proudové hustoty a je díky tomu drážka velmi podobná co do celkového průřezu, ale velmi rozdílná z pohledu činitele plnění drážky. Tento činitel je poměr mezi celkovou plochou a čistým průřezem mědi. Stroj na nižší napětí vychází v tomto srovnání vítězně.

## 4.2 Rozdílné odpory a rozptylová reaktance statorového vinutí

Délka čela je v obou případech velmi podobná a není pro rozdílnost strojů tak důležitá, proto ji zde nebudu dále rozebírat.

Poznámka číslo	Stroj varianta A $U = 10\,500\text{ V}$	Stroj varianta B $U = 3\,000\text{ V}$
7.	$R_{1/75} = 0,168\Omega$ $u_r = 0,76\%$	$R_{1/75} = 0,012\Omega$ $u_r = 0,66\%$
8.	$X_\sigma = 3,85\Omega$ $u_\sigma = 17,5\%$	$X_\sigma = 0,31\Omega$ $u_\sigma = 17,2\%$
9.	$\delta = 0,018m$	$\delta = 0,018m$

### 7. Odpor jedné fáze při 75°C a procentní hodnota úbytku napětí na odporu

Tento odpor je pro vlastnosti a návrh důležitý. Je závislý na celkové délce vodiče a především na počtu závitů cívky, v neposlední řadě i na průřezu vodiče. Drážka pro 3kV na méně závitů cívky a jeden vodič má oproti variantě 10,5kV dvojnásobný průřez. Jak vidíme geometrické rozměry vodiče a také celkové množství mědi vytvoří rozdíl odporu o jeden řád, stroj na nižší napětí je ale protékán vyšším proudem a tak je procentní hodnota úbytku přibližně stejná.

### 8. Rozptylová reaktance a procentní hodnota úbytku napětí na reaktanci

Velikost rozptylové reaktance ovlivňuje uspořádání drážky a především na druhé mocnině počtu závitů v sérii. Ze srovnání vychází varianta na nižší napětí příznivěji, co do velikosti odporu. Ovšem pokud uvažujeme procentuální úbytek napětí na reaktanci, kde se vychází z proudu resp. můžeme říct z fázového napětí, je tato hodnota opět velmi obdobná, protože se nízká reaktance opět eliminovala vyšším proudem statoru. Minimální odlišnosti jsou

způsobeny lehce rozdílnými geometrickými rozměry drážky.

### 9. Velikost vzduchové mezery

Je stejná, jelikož je indukce ve vzduchové mezeře totožná a obvodová proudová hustota obou strojů se liší jen o 5%.

### 4.3 Porovnání magnetických obvodů a budících vinutí

Poznámka číslo	Stroj varianta A <b>U = 10 500 V</b>	Stroj varianta B <b>U = 3 000 V</b>
<b>10.</b>	$\Phi = 0,161 \text{ Wb}$	$\Phi = 0,154 \text{ Wb}$
<b>11.</b>	$F'_a = 14635A$	$F'_a = 15359A$
<b>12.</b>	$F_\delta = 11354A$	$F_\delta = 11235A$
<b>13.</b>	$F_b = 27500A$	$F_b = 27200A$
<b>14.</b>	$\sigma_{Cub} = 2,40A/mm^2$	$\sigma_{Cub} = 2,37A/mm^2$
<b>15.</b>	$I_b = 348A$	$I_b = 344A$

#### 10. Magnetický tok

#### 11. Reakce kotvy – amplituda základní harmonické

#### 12. Magnetické napětí na vzduchové mezeře

#### 13. Velikost budícího napětí

#### 14. Proudová hustota ve vodiči

#### 15. Budící proud

**Pozn. 10-15:** Při porovnání obou variant vidíme, že v podstatě nezáleží na velikosti napájecího napětí. Magnetický tok je v obou případech velmi podobný. To ovlivňuje i pole reakce kotvy a potřebné napětí ve vzduchové mezeře. Snažil jsem se navrhnout oba stroje tak, aby byly budící proudy jako i proudové hustoty pokud možno stejné a tím se co nejvíce projevila rozdílnost statoru. Můžeme tedy prohlásit, že velikost fázového napětí nemá velký vliv na rozměry nebo provedení rotoru. Pouze se změní délka rotoru a to jen o 4%. Oteplení budící cívky se liší v návrhu jen o 2°C a velikost mezipólového rozptylu se při zaokrouhlení neliší.

#### 4.4 Vliv velikosti fázového napětí na ztráty a účinnost

Poznámka číslo	Stroj varianta A $U = 10\,500\text{ V}$	Stroj varianta B $U = 3\,000\text{ V}$
16.	$\Delta P_{Cu1} = 38\,115\text{ W}$	$\Delta P_{Cu1} = 33\,315\text{ W}$
17.	$\Delta P_{Cub} = 22\,646\text{ W}$	$\Delta P_{Cub} = 21\,619\text{ W}$
18.	$\Delta P_{Fej} = 15\,057\text{ W}$	$\Delta P_{Fej} = 14\,231\text{ W}$
19.	$\Delta P_{Fez} = 12\,076\text{ W}$	$\Delta P_{Fez} = 8\,006\text{ W}$
20.	$\Delta P_p = 3\,249\text{ W}$	$\Delta P_p = 3\,080\text{ W}$
21.	$\Delta P_m = 28\,749\text{ W}$	$\Delta P_m = 28\,042\text{ W}$
22.	$\Delta P_{přid} = 15\,000\text{ W}$	$\Delta P_{přid} = 15\,000\text{ W}$
23.	$\Delta P = 134,89\text{ kW}$	$\Delta P = 123,29\text{ kW}$
24.	$\eta = 96,74\%$	$\eta = 97,01\%$

##### 16. Joulovy ztráty ve vinutí statoru

Bez bližší znalosti obou variant, by se dalo u stroje na nižší napětí předpokládat, že pokud jeho statorovým vinutím tekou cca 3,5 krát vyšší proudy, budou i úměrně vyšší Joulovo ztráty, kde proud vystupuje v kvadrátu (tzn. až 12-ti násobek). Tento předpoklad je správný za podmínky, že by odpor vinutí byl shodný. U stroje na 3kV je však odpor statorového vinutí o řád nižší a výsledkem tohoto srovnání je, že celkové ztráty ve statorovém vinutí jsou nižší u varianty na nižší napětí. Odpor je nižší z důvodu úměry mezi počtem závitů a průřezem. Pro vyšší napětí je více závitů o menším průřezu a tedy vyšším odporu.

##### 17. Joulovy ztráty v budícím vinutí

Vzhledem k podobnosti rotorů, by měly být tyto ztráty obdobné. Je zde patrná pouze rozdílnost způsobená nižším odporem a nižším budícím proudem. Nižší odpor je zde kvůli kratšímu rotoru a nižší proud z důvodu o něco menšího napětí.

### 18. Ztráty v jádře induktu

Jsou pro stroj na nižší napětí menší, protože je stroj kratší. Všechny ostatní hodnoty se nemění a ztráty jsou přímo úměrné délce.

### 19. Ztráty v zubech statoru

Hloubka drážky je v obou případech rozdílná a tak jsou i rozdílné indukce v zubech statoru. Vezmeme-li v úvahu kratší stoj s nižší indukcí  $B_{z2}'$  jsou ztráty právem nižší u stroje na 3kV.

### 20. Povrchové ztráty

Tyto ztráty vycházejí přibližně stejné, minimální rozdíl je způsoben jinou délkou rotoru. Ostatní veličiny zůstávají shodné.

### 21. Mechanické ztráty

Kratší rotor znamená menší odpor vzduchu a tím i menší mechanické ztráty.

### 22. Přídavné ztráty

Tyto ztráty se odhadují přímo z velikosti výkonu a napájecí napětí na ně nemá vliv

### 23. – 24. Celkové ztráty a účinnost

Pokud bychom předem soudili dle logiky, odhadovali bychom, že stroj pracující při stejném výkonu na vyšším napětí bude mít vyšší účinnost. Všechny ukazatelé by tomu totiž nasvědčovali. Vyšší napětí znamená nižší proudy, a jelikož jsou majoritním podílem ztráty Joulovy; až v závěsu mechanické a ostatní, měly by celkové ztráty u stroje na vyšší napětí vycházet nižší. V mém přímém srovnání ovšem zjistíme, že tomu tak není. Při pohledu na stroj pracující na 3 kV zjistujeme, že vlastně všechny ztráty jsou nižší. Je to překvapující zjištění, které je ovšem odvoditelné. Všechny důvody jsou rozepsány výše. Lze tedy říci, že v našem případě je vhodnější se přiklonit k návrhu na 3kV. Celkově zvýšené náklady na stroj (větší obsah mědi) se pokryjí samotným dlouhodobým provozem. Je zde ovšem oblast, která by nám toto doporučení mohla zmařit. Při zkratových proudech, které mohou být až mnohonásobky jmenovitých hodnot, totiž vznikají síly v kvadrátu vyšší. Proto na tento stav musí být čela vinutí náležitě dimenzována. Pro samotný výrobní návrh je možné, že by byly zkratové síly tak obrovské, že by provedení na 3 kV ani nebylo možné. Podobné je to i s průchodkami a ostatními částmi stroje, které jsou případným zkratem přetěžovány.

## 5 Závěr

Ve své diplomové práci jsem se zabýval vyhodnocením vlivu velikosti sdruženého napětí na vlastnosti dvou typově a výkonově stejných synchronních strojů. Pokud bych měl komplexně zhodnotit rozdílnosti obou strojů, stator a rotor zůstává v obou případech takřka stejný, mění se jen uspořádání a rozměry statorové drážky. Tato změna však není nijak výrazná. Ovšem vlivem rozdílného napětí se mění ztráty obou strojů.

Hlavní podíl ztrát v elektrických strojích mají ztráty Joulovy, tedy energie přeměněná na teplo. Tato energie je vygenerovaná od procházejícího proudu. U stroje s nižším napětím, je statorový proud mnohonásobně vyšší a proto by se dalo předpokládat, že i ztráty budou vyšší než u varianty na vyšší napětí. Je tomu ovšem přesně naopak. Stroj na napětí 10,5kV má proti železu silnější izolaci, a tak je i jeho činitel plnění drážky (0,411) nižší než činitel u stroje na nižší napětí (0,447). Vzhledem k tomu, že je v drážce stroje na 3kV více mědi, je odpor vinutí o řád nižší. U stroje na 10,5kV je odpor vinutí vyšší díky menšímu průřezu a většímu počtu závitů. Procentní hodnota úbytku je pak v obou případech podobná.

U stroje na nižší napětí vychází celkové ztráty nižší a je i menší a lépe elektromagneticky využit. Pokud bych měl provést zhodnocení a doporučení, prohlásil bych, že je pro nízké výkony vhodné nízké napětí. Např. pro 5MVA je příhodné napětí 3kV. Stroj vychází celkově menší a bude tedy levnější. I účinnost je lepší a ušetřené ztráty 11kW, by v budoucnu ušetřili další prostředky. Celkově vychází všechny hodnoty příznivěji. Jedinou otázkou ovšem zůstává, jak by dopadl tepelný výpočet stroje. Je možné, že z důvodu silnější izolace by měl stroj na vyšší napětí horší odvod tepla. U stroje na 3kV je možnost, že by nevyhověl při výpočtu namáhání od silových účinků zkratových proudů. Zejména by byla namáhána čela vinutí, která by oproti variantě na 10,5kV vyžadovala navíc další podpěrný kruh. V závěru práce je přiložen i schematický příčný a podélný řez stroje pro variantu 10,5kV.

Nemůžeme ovšem hledět pouze na synchronní stroj bez uvažování dalších prvků soustavy, jako např. blokový transformátor. Je důležité vědět, do které napěťové hladiny se bude výkon dodávat. V některých případech by totiž znovu zvítězila varianta na vyšší napětí, protože pak není tak velký činitel převodu jako u stroje na nižší napětí. Při velkém převodu narůstají rozměry transformátoru, jeho cena a ztráty. I přípojnice a přívody by musely být dimenzovány na vyšší proudy, což znamená vyšší objem mědi a vyšší cenu provedení. Záleželo by tedy na konkrétních podmínkách použití stroje a na příslušném zapojení.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] KOPYLOV, Igor Petrovič a kol. autorů. *Stavba elektrických strojů*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1988. 688 s. ISBN 04-532-88
- [2] BARTOŠ, Václav a kol. autorů. *Elektrické stroje*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2006. 140 s. ISBN 80-7043-444-9.
- [3] BARTOŠ, Václav. *Teorie elektrických strojů*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2006. 230 s. ISBN 80-7043-509-7.
- [4] WIEDEMANN, E. a KELLENBERGER W. *Konstrukce elektrických strojů*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1973. 652 s. ISBN 04-532-88
- [5] ČERVENÝ, J. *Postup při elektromagnetickém návrhu synchronního stroje*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2010. 19 s.
- [6] PETROV, G. N. *Elektrické stroje 2*, Academia, Praha 1982
- [7] RYBÁŘ, J., ČERVENÝ, J., *Konstrukční tabulky k elektrickým strojům*, VŠSE Plzeň 1989
- [8] DRUBEL, O. Challenges in calculation and design of large synchronous generators. In: *2013 IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (WEMDCD)* [online]. 2013 [cit. 2015-04-23]. DOI: 10.1109/wemdcd.2013.6525161.
- [9] ŠKODA TRANSPORTATION A.S. [online]. [cit. 2015-04-23]. Dostupné z: <http://skoda.cz/cs/produkty/tramvaje/forcity/tramvaj-forcity-praha/>
- [10] STAUBER, Jiří. *Technická dokumentace k izolacím: BRUSH SEM, CZ*. Plzeň: interní dokument, 2014.



## Seznam příloh

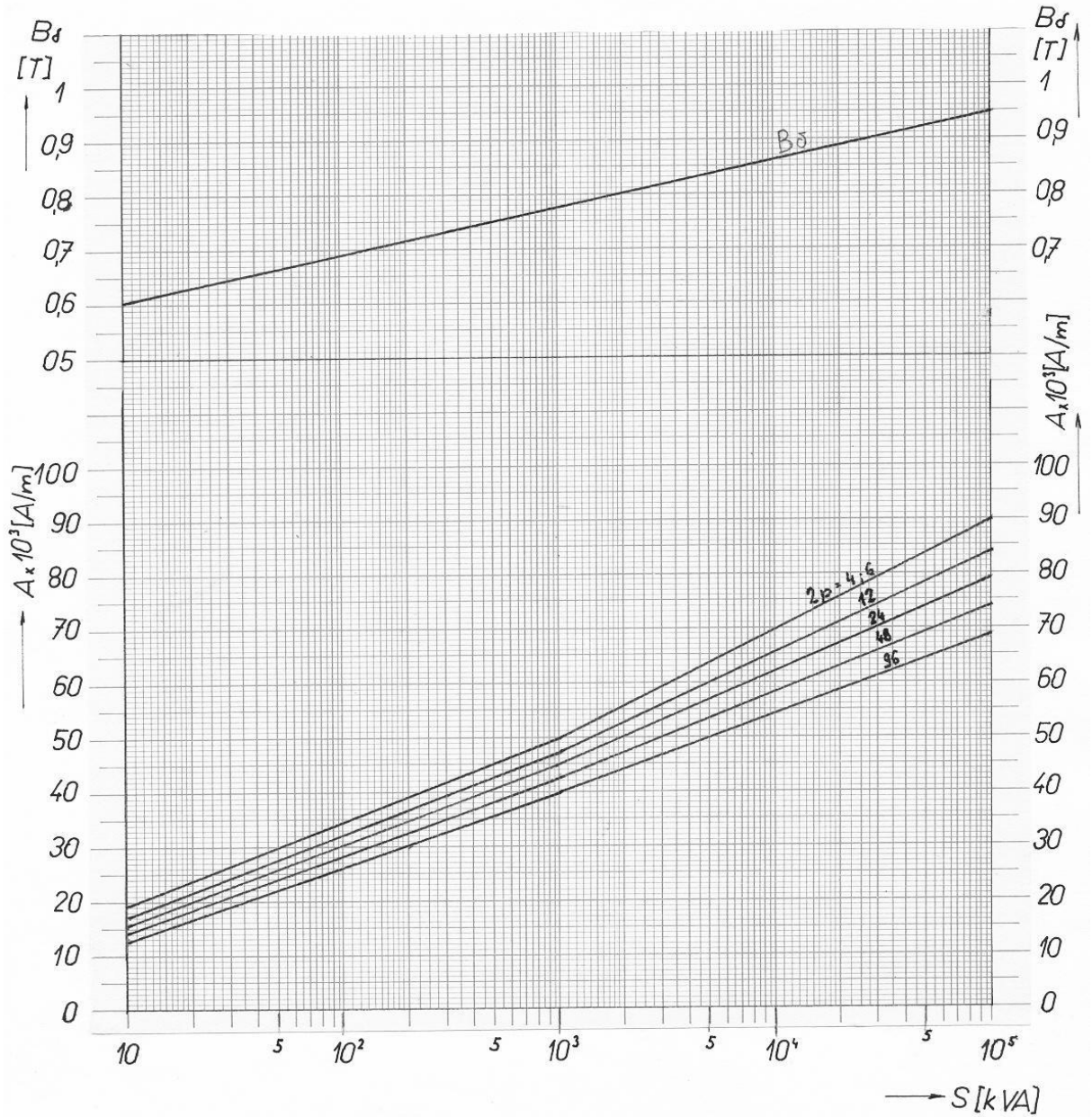
- [1] Graf č.1 určující indukci ve vzduchové mezeře a obvodovou proudovou hustotu
- [2] Graf č.2 pro odečet velikostí statoru stroje
- [3] Graf č.3 pro odečet činitelů
- [4] Graf č.4 pro odečet činitelů
- [5] Graf č.5 pro odečet normalizovaných rozměrů měděných pásů dle ČSN 42 8308
- [6] Graf č.6 pro odečet Carterova činitele na drážkování
- [7] Graf č.7 Magnetizační křivka konstrukční oceli
- [8] Graf č.8 Magnetizační křivka dynamového plechu
- [9] Graf č.9 Nomogram
- [10] Graf č.10 Určení činitelů povrchových ztrát
- [11] Graf č.11 Pro určení chladivosti proudícího vzduchu
- [12] Příčný řez stroje
- [13] Podélný řez stroje
- [14] Řez statorovou drážkou stroje A a B

*Přílohy 1-11 zdroj [6]*

## 6 Přílohy

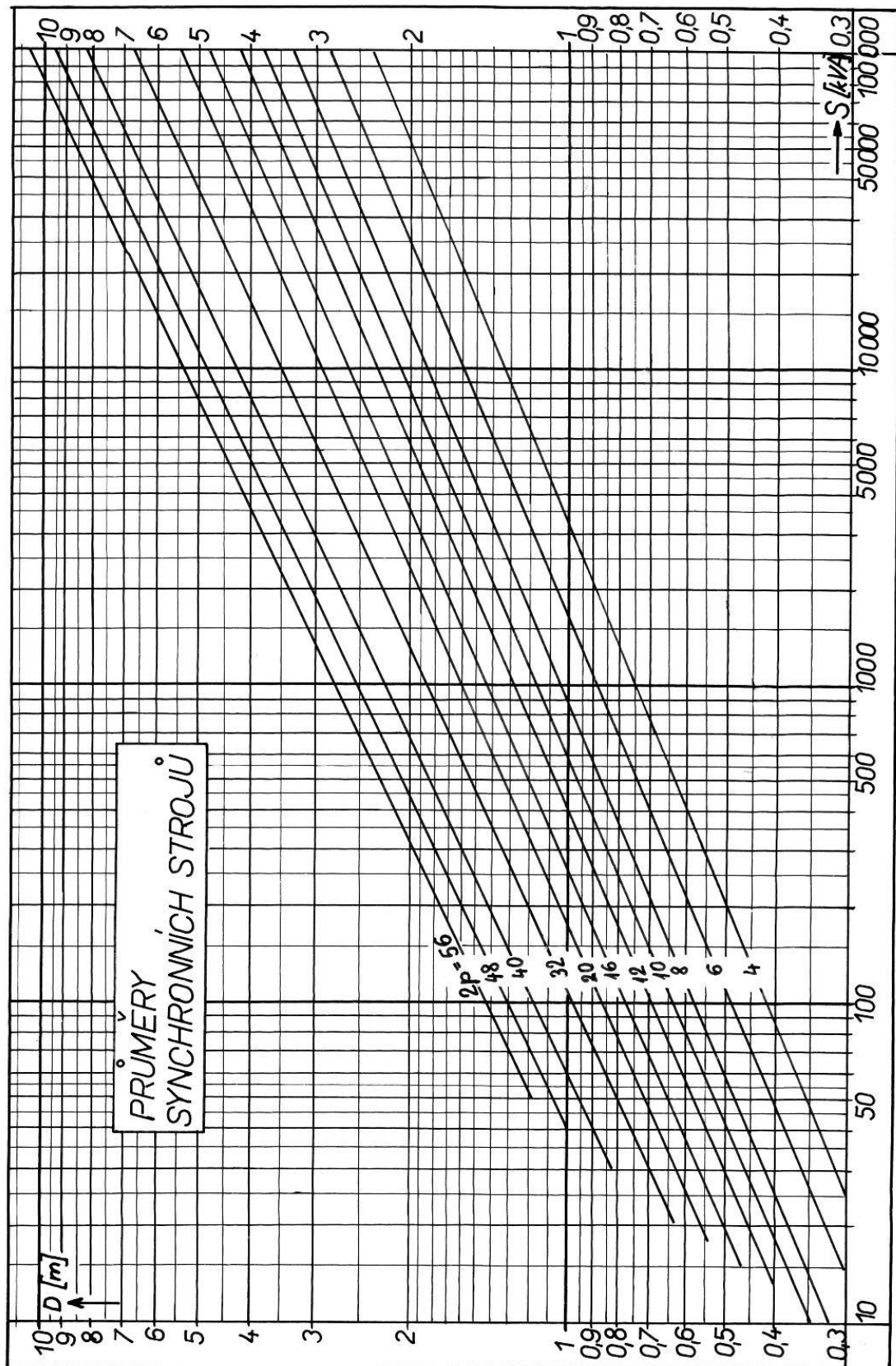
$B_{\delta}$  - indukce ve vzduchové mezeře

$A$  - obvodová proudová hustota



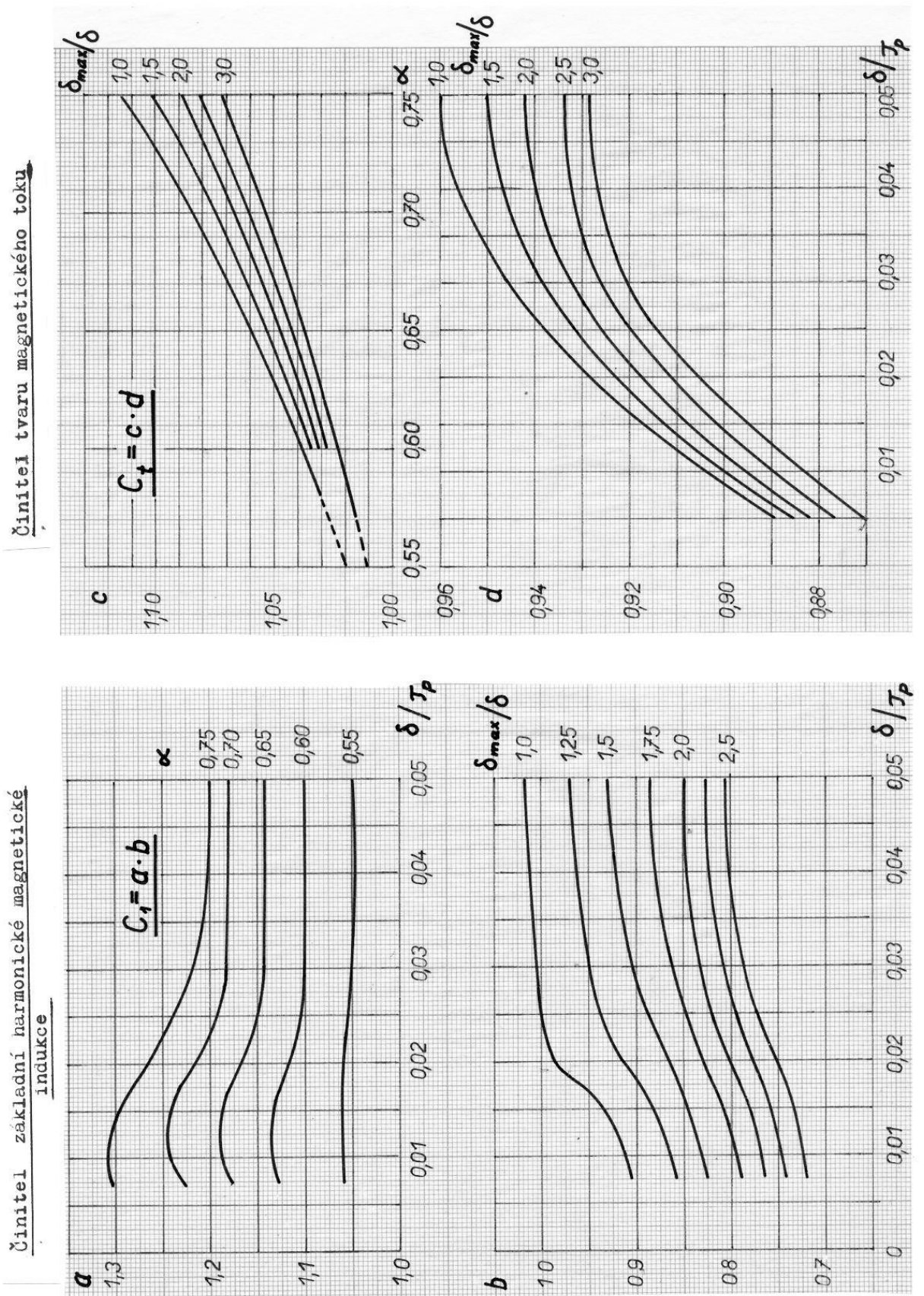
Graf č.1 určující indukci ve vzduchové mezeře a obvodovou proudovou hustotu

- 41 -

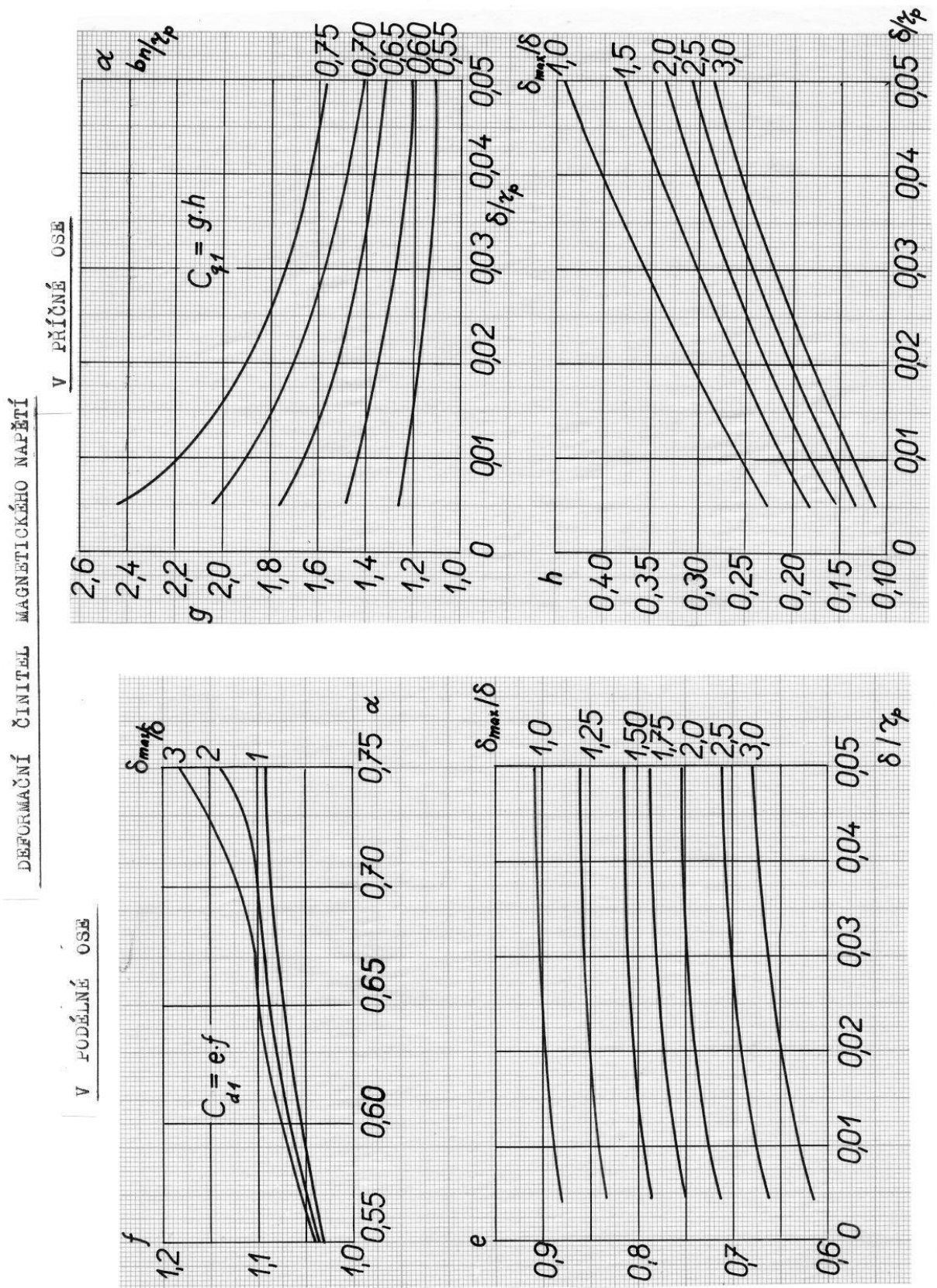


Graf č.2 pro odečet velikostí statoru stroje

-45-



Graf č.3 pro odečet činitelů



Graf č.4 pro odečet činitelů

M Ě D Ě N Ě J P Á S Y

Výběr z ČSN 42 8308-1959 Rozměry měděných pásů

Jmenovitá tloušťka [mm]	0,8	1,0	1,1	1,2	(1,3)	1,4	(1,5)	1,6	1,8	2,0	2,2	2,5	2,8
0,30	1,8	1,3	1,66										
	2,0	1,46	1,86	2,18	2,38	2,58	2,69	2,89					
	2,2	1,62	2,06	2,42	2,64	2,86	2,99	3,21					
	2,5	1,86	2,36	2,78	3,03	3,28	3,44	3,69	4,19	4,45			
	2,8	2,1	2,66	2,94	3,14	3,42	3,70	3,89	4,17	4,73	5,05		
0,35	3,0	2,26	2,86	3,16	3,38	3,68	3,98	4,19	4,49	5,09	5,45	6,05	6,9
	3,5	2,66	3,36	3,71	3,98	4,33	4,68	4,94	5,29	5,99	6,45	7,15	8,2
	4,0	3,06	3,86	4,26	4,58	4,98	5,38	5,69	6,09	6,89	7,45	8,25	9,45
	4,5	3,46	4,36	4,81	5,18	5,63	6,08	6,44	6,89	7,79	8,45	9,35	10,7
	5,0	3,86	4,86	5,36	5,78	6,28	6,78	7,19	7,69	8,69	9,45	10,4	12,0
	5,5	4,26	5,36	5,91	6,38	6,93	7,48	7,94	8,49	9,59	10,4	11,5	13,2
	6,0	4,66	5,86	6,46	6,98	7,58	8,18	8,69	9,29	10,5	11,4	12,6	14,5
0,40	(6,5)	5,06	6,36	7,01	7,58	8,23	8,88	9,44	10,1	11,4	12,4	13,7	17,7
	7	5,46	6,86	7,56	8,18	8,88	9,58	10,2	10,9	12,3	13,4	14,8	17,0
	8	6,26	7,86	8,68	9,38	10,2	11,0	11,7	12,5	14,1	15,4	17,0	19,5
	9	7,06	8,86		10,6	11,5	12,4	13,2	14,1	15,9	17,4	19,2	22,0
	10	7,86	9,86		11,8	12,8	13,8	14,7	15,7	17,7	19,4	21,4	24,5
	11	8,66	10,9		13,0	14,1	15,2	16,2	17,3	19,5	21,4	23,6	27,0
	12	9,46	11,9		14,2	15,4	16,6	17,7	18,9	21,3	23,4	25,8	29,5
0,50	(13)									23,1	25,4	28,0	32,0
	14									20,7	22,1	24,9	27,4
	(15)									26,7	29,4	32,4	37,0
	16									28,5	31,4	34,6	39,5
	18									35,4	39,0	44,5	49,8
	20									39,4	43,4	49,5	55,4
0,65	25											62,0	69,4
	30											74,5	83,4

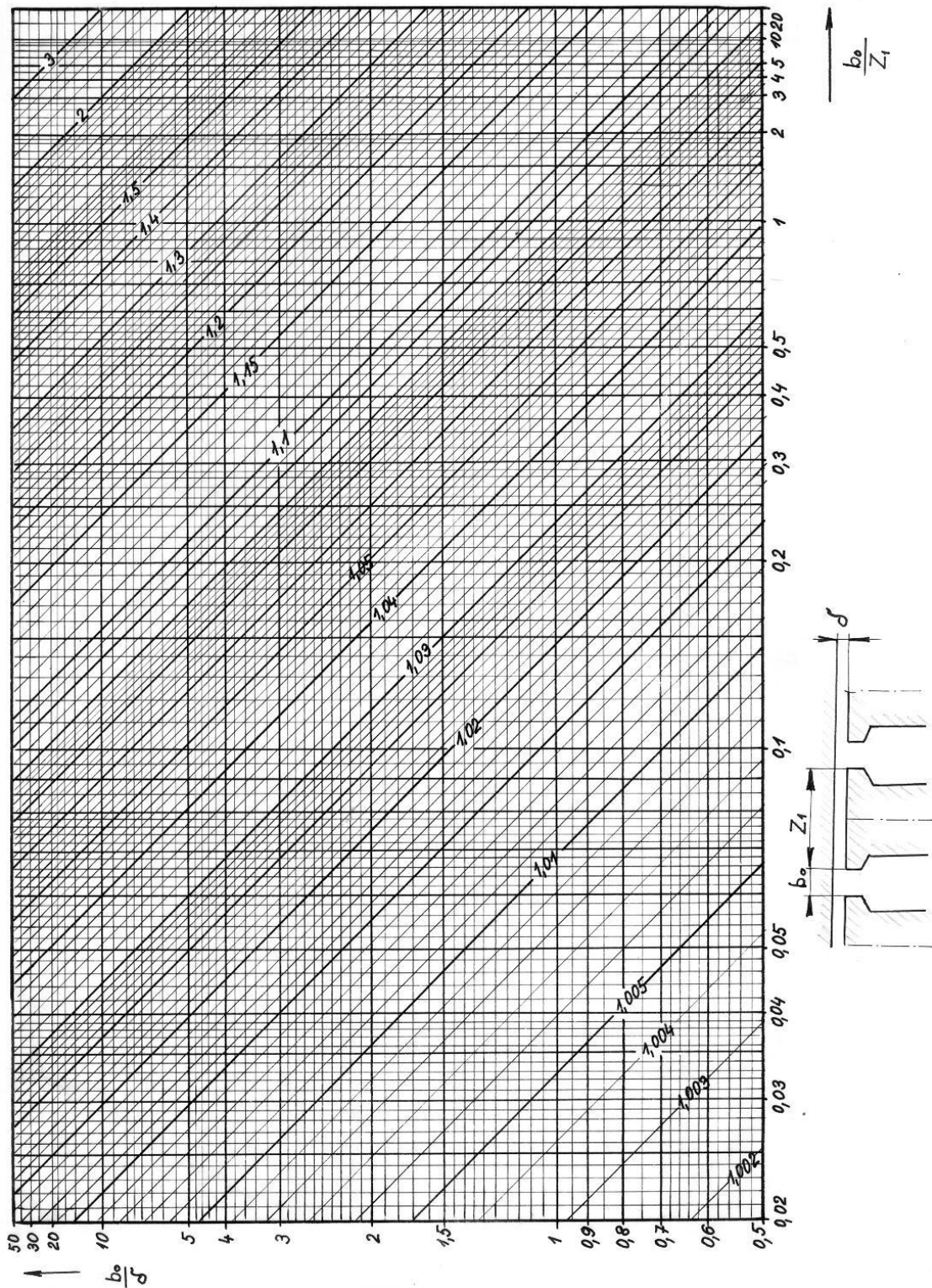
Rozměry v závorkách neplatí pro nové konstrukce.

3,0	(3,2)	3,5	4	4,5	5	5,5	6	(6,5)	7	8	9	10
11,4												
12,9		13,5										
14,4		16,6	19,1									
15,9		18,4	21,1									
17,4		20,1	23,1									
18,9	19,9	21,9	25,1									
20,4	21,4	23,6	27,1	30,3								
23,4	24,7	27,1	31,1	34,8	38,8	42,8	46,8					
26,4	27,9	30,6	35,1	39,3	43,8	48,3	52,5					
29,4	31,1	34,1	39,1	43,8	48,8	53,8	58,5					
32,4	34,3	37,6	43,1	48,3	53,8	59,3	64,5					
35,4	37,5	41,1	47,1	52,8	58,8	64,8	70,5			93,8		
38,4	40,7	44,6								101,8		
41,4	43,9	48,1	55,1	61,8	68,8	75,8	82,5			109,8		
44,4	47,1	51,6	59,1	66,8						117,8		147,8
47,4	50,3	55,1	63,1	70,8	78,8	86,8	94,5	102,5	110,5	125,8		157,8
53,4	56,7	62,1	71,1	79,8	88,8	97,8	106,5	115,5	124,5	141,8	159,8	177,8
59,4	63,1	69,1	79,1	88,8	98,8	108,8	118,8	128,8	138,8	157,8	178,8	197,8
74,4	79,1	86,6	99,1	111,3	123,8	136,3	148,5	161,0	173,5	197,8	222,8	247,8
89,4	95,1	104,1	119,1	138,8	148,8	163,8	178,5	193,5	208,5	237,8	267,8	297,8

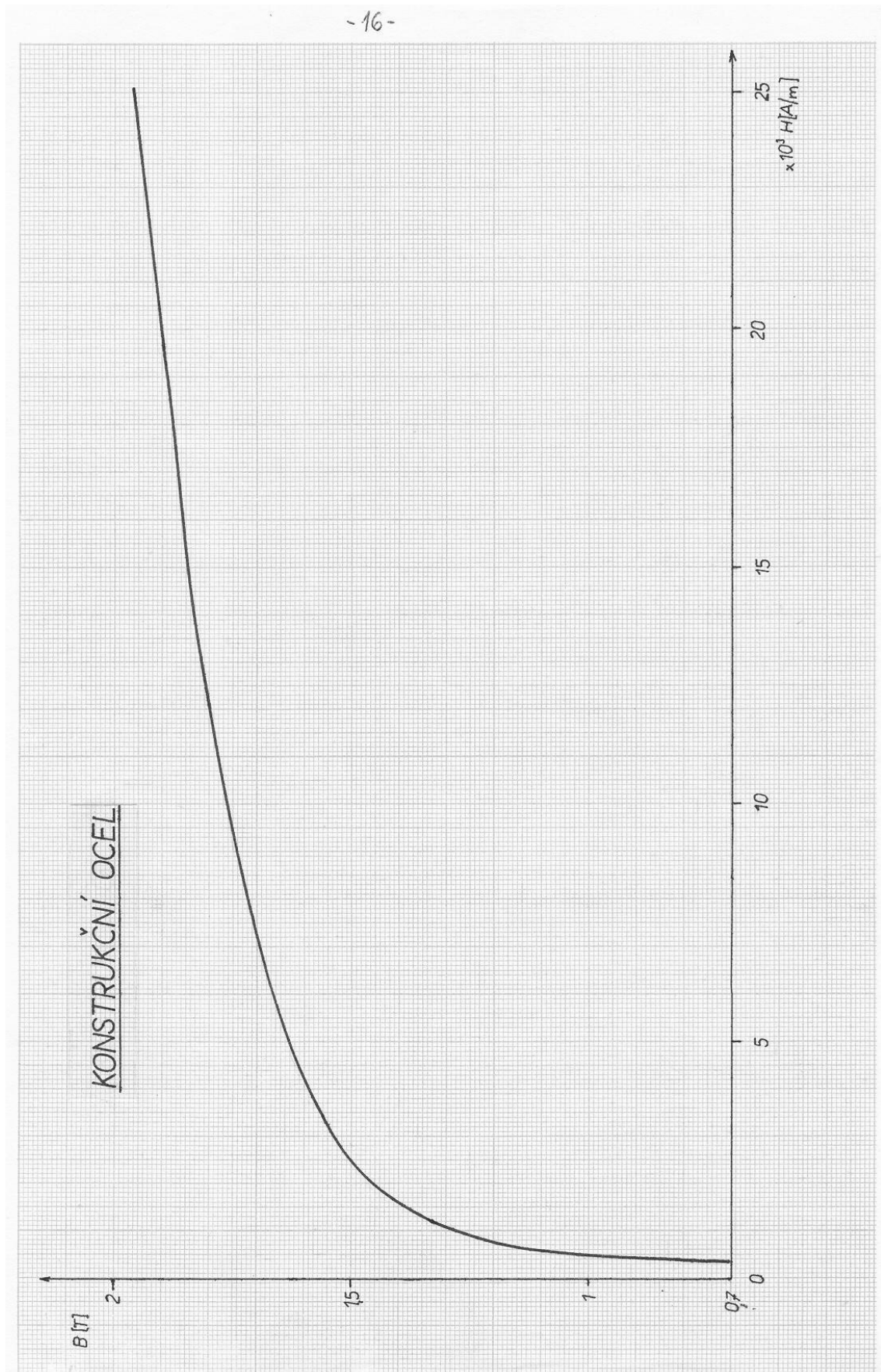
Příklad: pás 3,5 x 6 má průřez 20,1 mm<sup>2</sup>; rozměry izolovaného pásu jsou 3,9 x 6,4 mm.

Graf č.5 pro odečet normalizovaných rozměrů měděných pásů dle ČSN 42 8308

CARTERŮV ČINITEL NA DRÁŽKOVÁNÍ

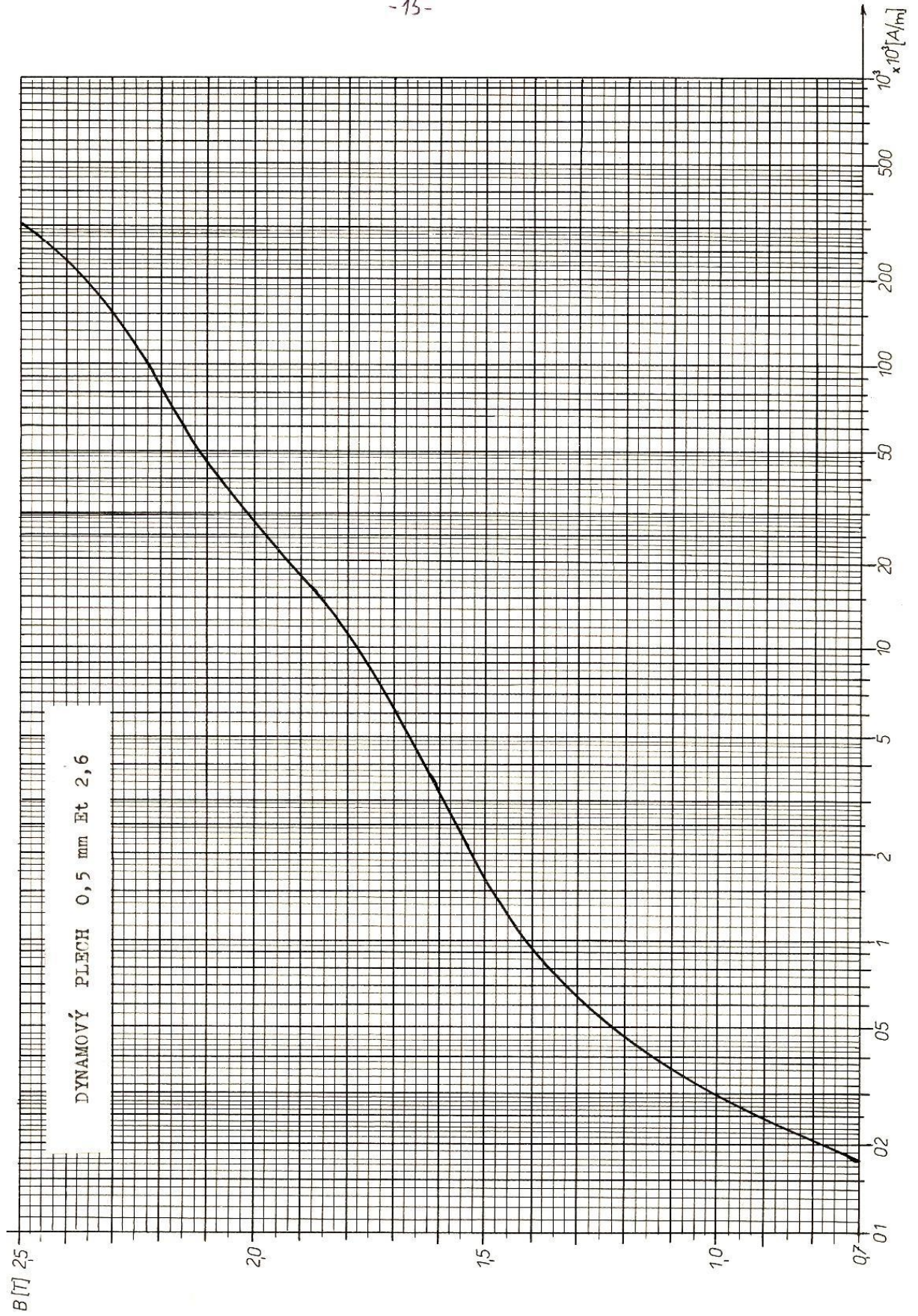


Graf č.6 pro odečet Carterova činitele na drážkování

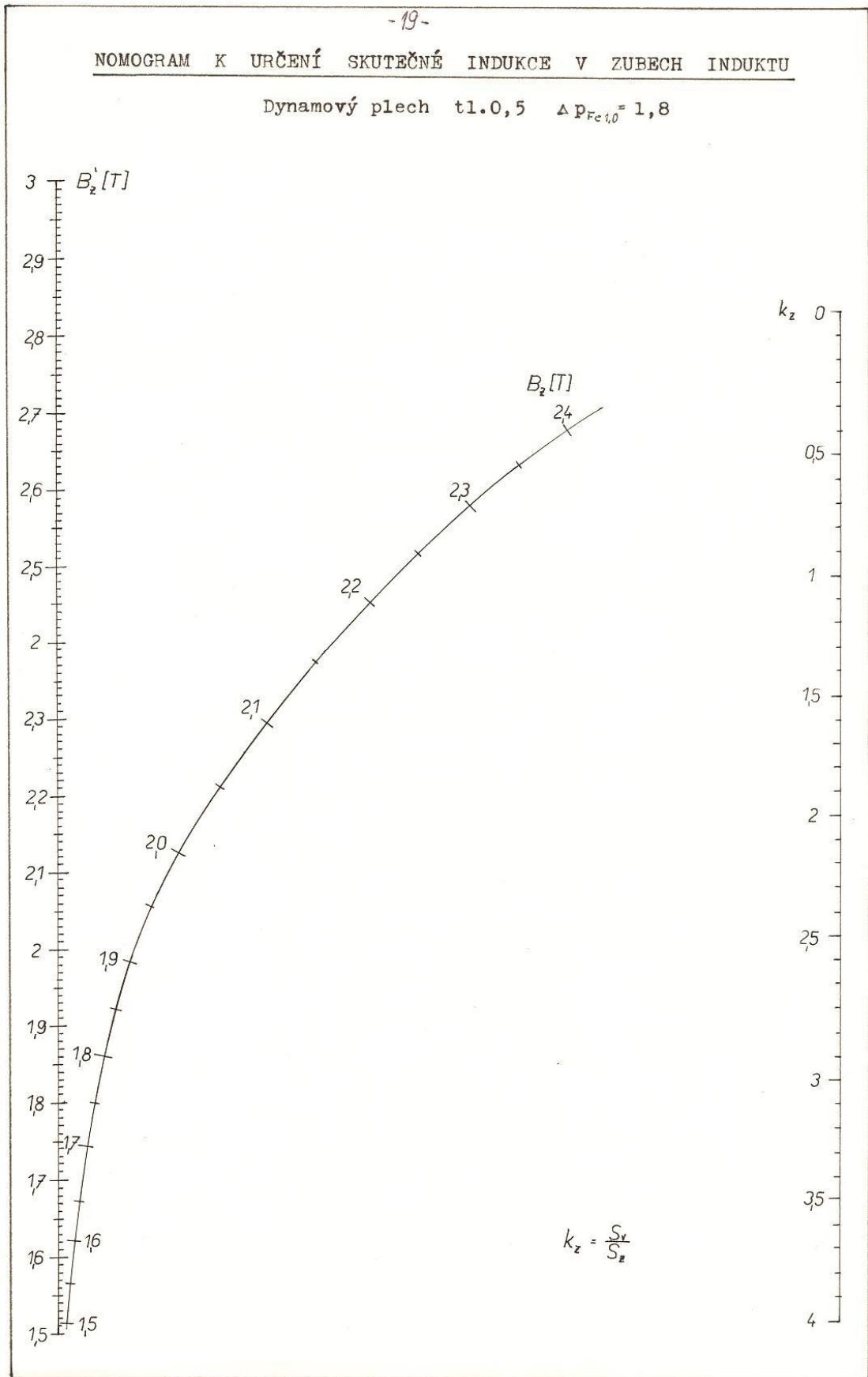


Graf č.7 Magnetizační křivka konstrukční oceli



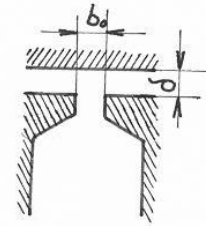
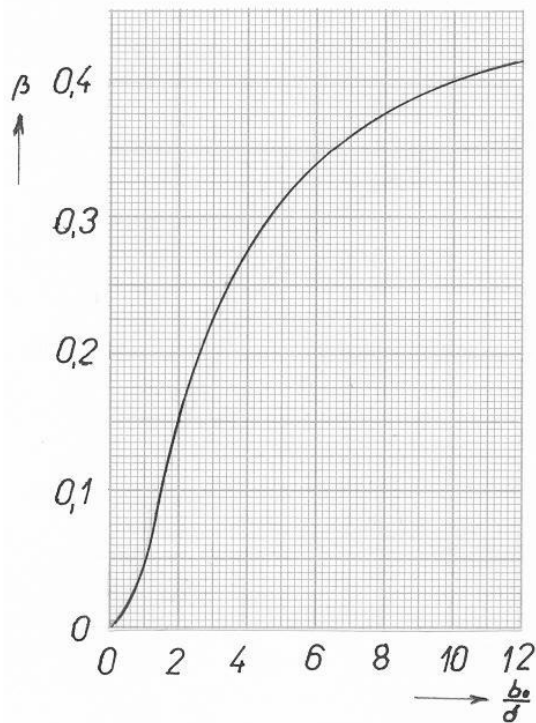


Graf č.8 Magnetizační křivka dynamového plechu



Graf č.9 Nomogram

-49-



$k_p = 23,3$  kovaná ocel  
 17,5 litina  
 8,6 plech 2 mm  
 2,8 plech 0,5 mm

$k_p, \beta$  - činitelé povrchových ztrát v pólovém nástavci

Činitel mechanických ztrát :

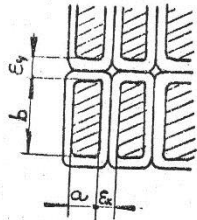
A = 1,1 ÷ 1,5 pomalub. alternátor

0,8 ÷ 1,1 rychloběžné alt.

0,8 ÷ 1 turboalternátor

Graf č. 10 Určení činitelů povrchových ztrát

Výsledná tepelná vodivost izolovaných vodičů

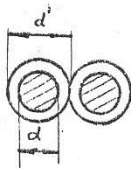


$$\lambda_x = \frac{a + \varepsilon_x}{\frac{a}{\lambda} + \frac{\varepsilon_x}{\lambda_i}} \quad ; \quad \lambda_y = \frac{b + \varepsilon_y}{\frac{b}{\lambda} + \frac{\varepsilon_y}{\lambda_i}}$$

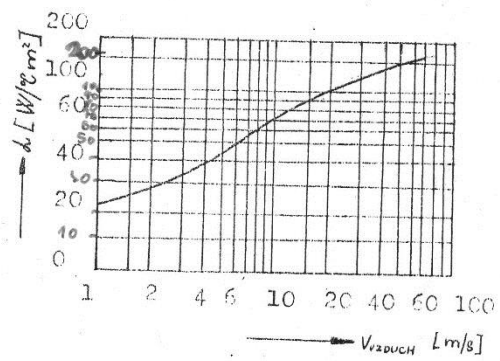
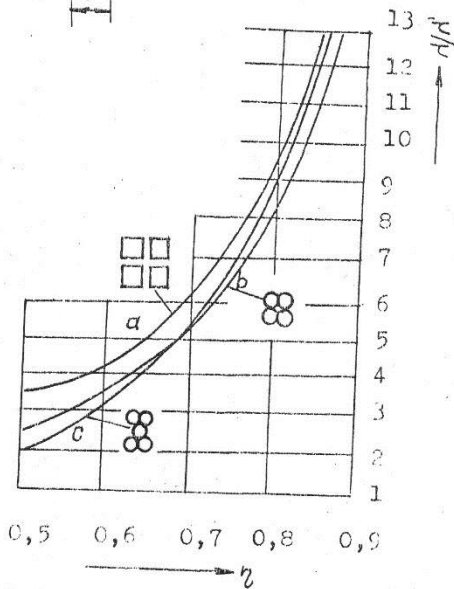
pro  $\lambda \gg \lambda_i$

$$\lambda_x = \lambda_i \left(1 + \frac{a}{\varepsilon_x}\right) \quad ; \quad \lambda_y = \lambda_i \left(1 + \frac{b}{\varepsilon_y}\right)$$

$\lambda$  měrná tepelná vodivost vodiče  
 $\lambda_i$  měrná tepelná vodivost izolace



$$\eta = \frac{d^2}{d_i^2} \quad ; \quad \eta = \frac{a^2}{(a + \varepsilon)^2}$$

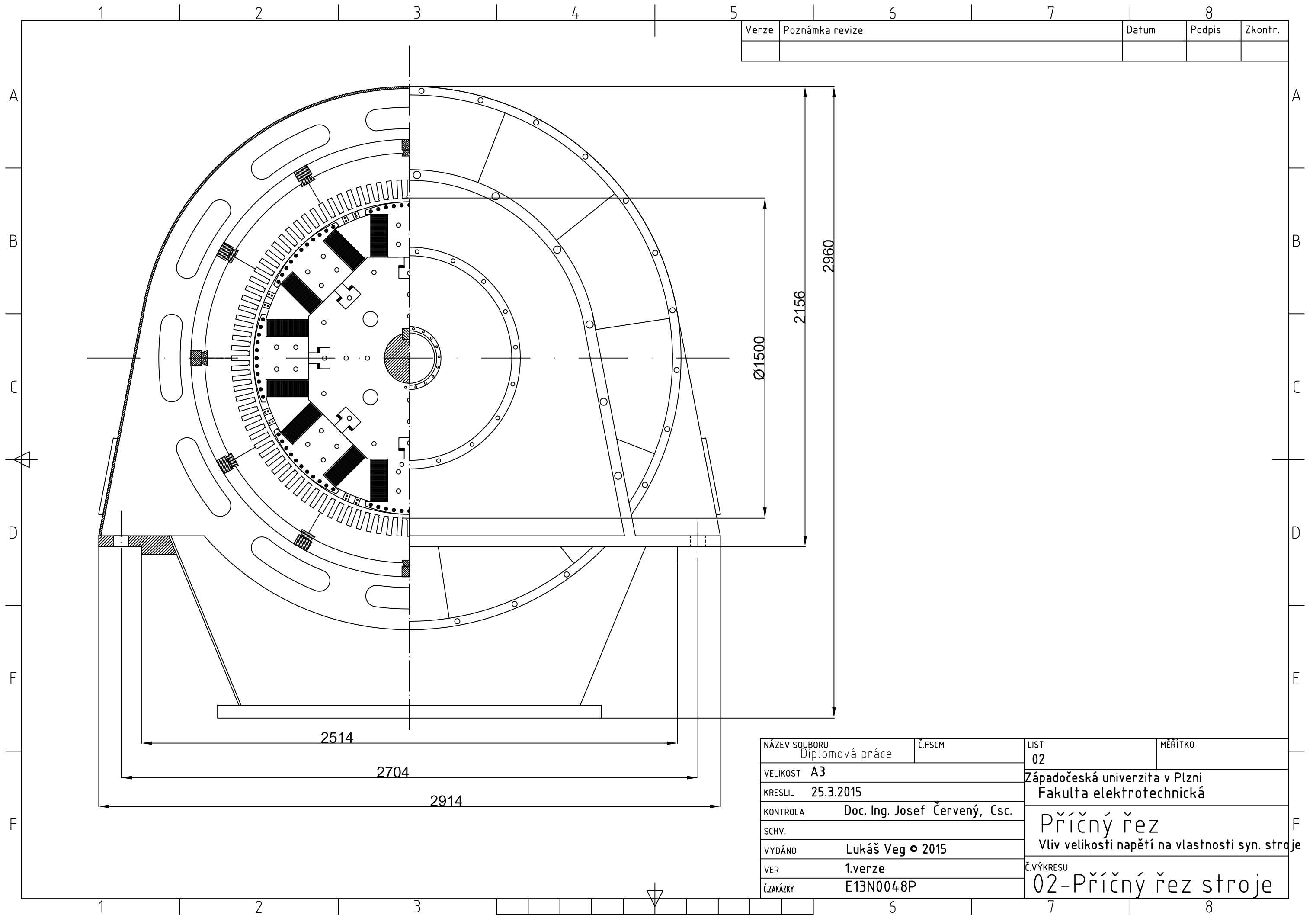


Přibližný vztah mezi plněním a výslednou tepelnou vodivostí.

Chladiivost v proudícím vzduchu

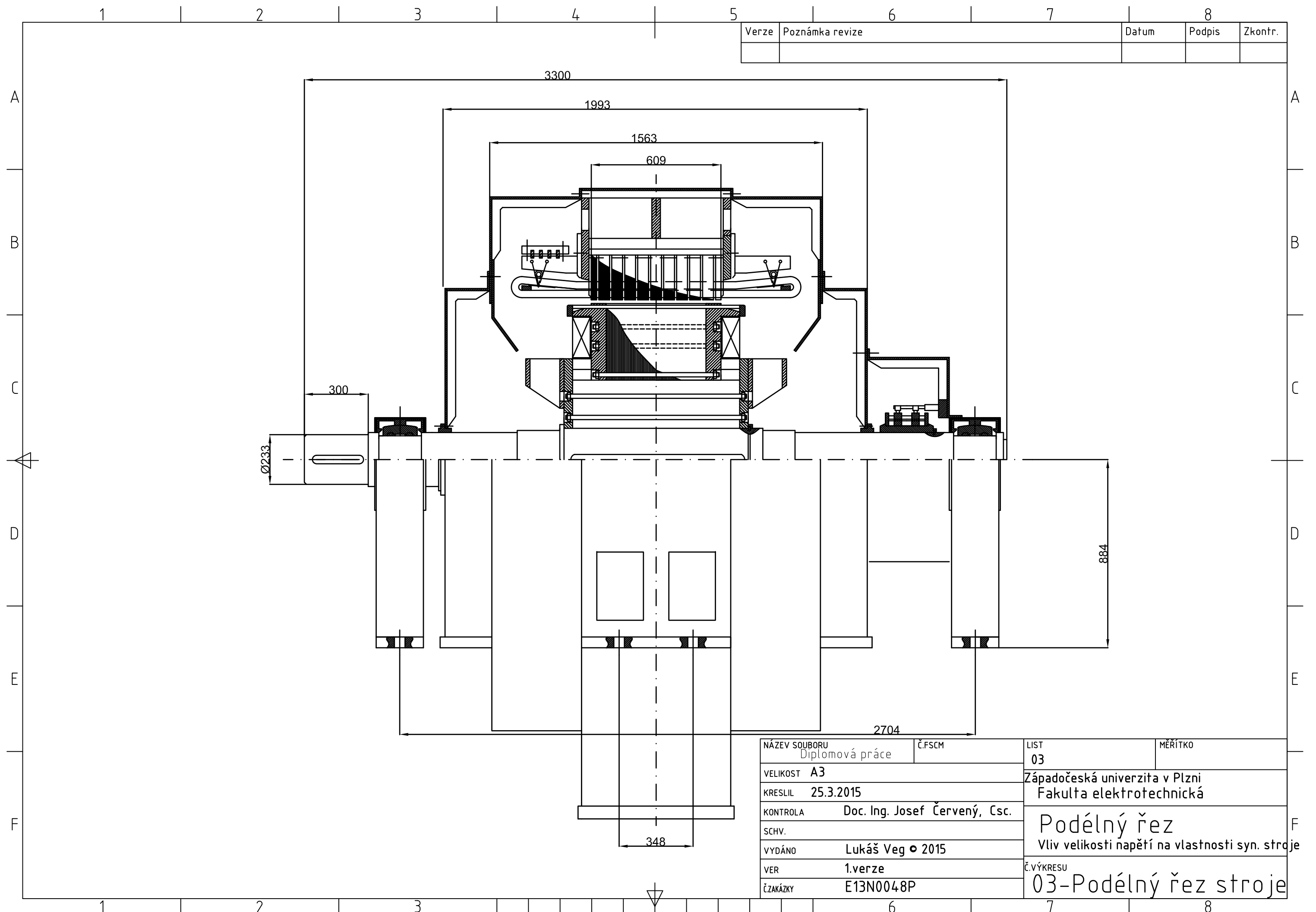
$\lambda$  měrná tepelná vodivost vodiče  
 $\lambda'$  výsledná měrná tep.vod. svazku

Graf č.11 Pro určení chladiivosti proudícího vzduchu



Verze	Poznámka revize	Datum	Podpis	Zkontr.

NÁZEV SOUBORU Diplomová práce	Č.FSCM	LIST 02	MĚŘÍTKO
VELIKOST A3	KRESLIL 25.3.2015	Západočeská univerzita v Plzni Fakulta elektrotechnická	
KONTROLA SCHV.	Doc. Ing. Josef Červený, Csc.	Příčný řez Vliv velikosti napětí na vlastnosti syn. stroje	
VYDÁNO VER	Lukáš Veg • 2015 1.verze	Č.VÝKRESU 02-Příčný řez stroje	
Č.ZAKÁZKY E13N0048P	6	7	8

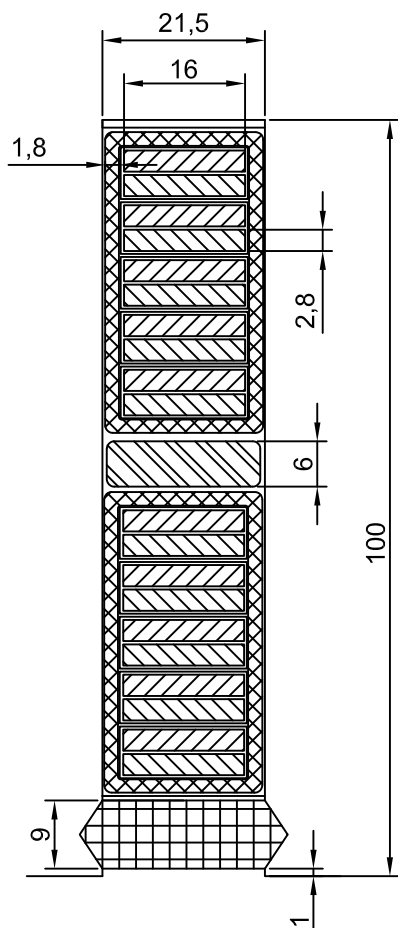


Verze	Poznámka revize	Datum	Podpis	Zkontr.

NÁZEV SOUBORU Diplomová práce	Č.FSCM	LIST 03	MĚŘÍTKO
VELIKOST A3	KRESLIL 25.3.2015	Západočeská univerzita v Plzni Fakulta elektrotechnická	
KONTROLA SCHV.	Doc. Ing. Josef Červený, Csc.	Podélný řez Vliv velikosti napětí na vlastnosti syn. stroje	
VYDÁNO VER	Lukáš Veg • 2015 1.verze	Č.VÝKRESU 03-Podélný řez stroje	
Č.ZAKÁZKY E13N0048P			

1	2	3	4
Verze	Poznámka revize	Datum	Podpis
Zkontr.			

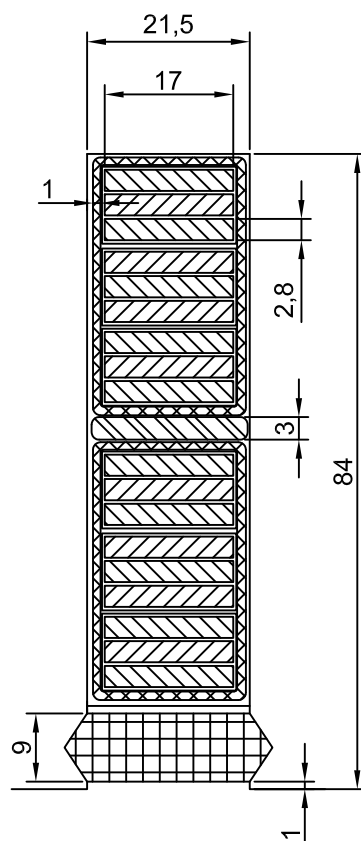
Drážka pro 10,5 kV



$Scu1=88,4\text{mm}^2$

$Scuc=884\text{mm}^2$  a obsah drážky  
2150 $\text{mm}^2$  činitel plnění drážky 0,411

Drážka pro 3 kV



$Scu1=141\text{mm}^2$

$Scuc=846\text{mm}^2$  a obsah drážky  
1806 $\text{mm}^2$  činitel plnění drážky 0,468

NÁZEV SOUBORU Diplomová práce	Č.FSCM	LIST 03	MĚŘÍTKO 1:1
VELIKOST A4	Západočeská univerzita v Plzni Fakulta elektrotechnická		
KRESLIL 14.2.2015	Řezy drážkou statoru		
KONTROLA Doc. Ing. Josef Červený, Csc.	Vliv velikosti napětí na vlastnosti syn. stroje		
SCHV.	Č.VÝKRESU		
VYDÁNO Lukáš Veg © 2015	1-Rezy drážkou A a B		
VER 1.verze			
ČZAKÁZKY E13N0048P			