

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

**KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Návrh synchronního stroje s vyniklými póly**

**ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**  
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Lukáš VEG**  
Osobní číslo: **E10B0266P**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**  
Název tématu: **Návrh synchronního stroje s vyniklými póly**  
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. Proveďte elektromagnetický návrh horizontálního synchronního generátoru s následujícími parametry:  $S=11000$  kVA;  $U_s=10500$  V;  $2p=10$ ;  $m=3$ ;  $f=50$ Hz;  $\cos \varphi=0,8$ ;  $\alpha=0,7$ .
2. Popište vinutí statoru včetně zjištění možného počtu paralelních větví a nakreslení řezu drážky.
3. Nakreslete schématicky příčný a podélný řez strojem.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**  
Rozsah pracovní zprávy: **20 - 30 stran**  
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**  
Seznam odborné literatury:


1. **Kopylov, I. P.: Stavba elektrických strojů, SNTL, 1983**
2. **Červený, J.: Postup při návrhu synchronního stroje.**

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

Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2012**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **7. června 2013**

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



  
Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2012

## **Anotace**

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na orientační elektromagnetický návrh a konstrukční uspořádání synchronního stroje s vyniklými póly o zdánlivém jmenovitém výkonu 11 MVA.

## **Klíčová slova**

Návrh synchronního generátoru, synchronní stroje s vyniklými póly, elektromagnetický návrh, problematika návrhu točivých strojů, budící vinutí, vlnové vinutí, zlomkové vinutí.

## **Abstract**

This bachelor thesis deals with the approximate electromagnetic design and the design of the synchronous machine with salient poles of the apparent nominal power 11 MVA.

## **Key words**

Design of synchronous generator, synchronous machines with salient poles, electromagnetic design, design issues for rotating machinery, field winding, wave winding, fractional winding.

## Prohlášení

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

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

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

V Plzni dne 1.6.2013

Jméno a příjmení

.....

## **Poděkování**

Tímto bych velice rád poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce doc. Ing. Josefovi Červenému, CSc. za cenné profesionální rady, připomínky, metodické vedení práce a zejména za velice obsáhlý a podrobný úvod do problematiky stavby strojů, díky kterému jsem získal všeobecný nadhled nad danou problematikou.

## 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>14</b>
<b>1 ÚVOD .....</b>	<b>15</b>
1.1 SYNCHRONNÍ STROJ OBECNĚ .....	15
1.2 PRINCIP FUNKCE SYNCHRONNÍHO STROJE .....	16
1.3 PROBLEMATIKA NÁVRHU SYNCHRONNÍHO STROJE S VYNIKLÝMI PÓLY .....	16
<b>2 ELEKTROMAGNETICKÝ NÁVRH SYNCHRONNÍHO STROJE .....</b>	<b>17</b>
2.1 ZADÁNÍ STROJE .....	17
2.2 VÝPOČET .....	18
2.2.1 Základní hodnoty .....	18
2.2.2 Návrh vinutí induktu (statoru) .....	18
2.2.3 Parametry vinutí .....	20
2.2.4 Popis vinutí statoru, včetně zjištění možného počtu paralelních větví .....	21
2.2.5 Výpočet činitelů vinutí .....	23
2.2.6 Návrh statorové drážky .....	24
2.2.7 Odpor a rozptylová reaktance statorového vinutí .....	29
2.2.8 Návrh magnetického obvodu .....	32
2.2.9 Velikost vzduchové mezery .....	32
2.2.10 Magnetické napětí reakce kotvy .....	33
2.2.11 Dimenzování magnetického obvodu .....	34
2.2.12 Charakteristika naprázdno .....	35
2.2.13 Návrh budícího vinutí .....	38
2.2.14 Orientační výpočet oteplení budící cívky .....	39
2.2.15 Kroužky a kartáče .....	40
2.3 ZTRÁTY A ÚČINNOST .....	41
2.3.1 Ztráty .....	41
2.3.2 Účinnost .....	43



2.4	ZHODNOCENÍ A POROVNÁNÍ RŮZNÝCH POSTUPŮ VÝPOČTU .....	43
<b>ZÁVĚR</b> .....		<b>44</b>
<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ</b> .....		<b>45</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH</b> .....		<b>45</b>
<b>3 PŘÍLOHY</b> .....		<b>46</b>

## Seznam použitých symbolů a zkratek (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]
$C$ .....	Essoňův 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]
$D_{je}$ .....	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 pólu	[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 přepočít mag. indukce zubu (hlava)	[-]
$k_{z2}$ .....	Činitel pro přepočít 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> ]
$S_k$ .....	Celkový průřez kartáčů jedné polarity	[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]
$t_p$ .....	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	[ $\Omega$ ]
$x_\sigma$ .....	Procentní hodnota rozptylové reaktance	[%]
$y_1$ .....	Přední cívkový krok	[-]
$y_{1d}$ .....	Cívkový krok	[-]
$y_2$ .....	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 zkratek (řecké písmo)

$\alpha$ .....	Činitel pólového krytí	[-]
$\alpha_x$ .....	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	[%]
$\mu$ .....	Součinitel tření kartáčů	[-]
$\nu$ .....	Poměrná hodnota mezipólového rozptylového toku	[m]
$\xi$ .....	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]

## 1 Úvod

Tématem mé bakalářské práce je navrhnout synchronní stroj s vyniklými póly podle parametrů zadání katedry. Jedná se o orientační návrh stroje určeného například pro menší elektrárnu. Práce se skládá z výpočtu hlavních rozměrů stroje a návrh elektromagnetického obvodu, dále z výpočtu ztrát a účinnosti. V rámci elektromagnetického výpočtu jsem se podrobněji věnoval a řešil problematiku statorového vinutí a možnosti volby počtu paralelních větví. Na závěr práce jsem připojil i schematický příčný a podélný řez strojem a nákres řezu drážky statoru stroje.

V mé práci byla potřeba jistého odhadu správnosti volby rozměrů různých částí stroje, při kterém jsem využil poznatky z technické praxe a též ze studia stavby elektrických strojů.

### 1.1 Synchronní stroj obecně

Synchronní stroj je nejčastěji využíván k přeměně mechanické energie na elektrickou. Tyto stroje jsou nazývány alternátory (případně generátory) a jsou využívány zejména v elektrárnách s různou škálou výkonů a rychlostí otáčení rotoru. Obecně lze dělit na dva základní typy. Prvním typem jsou stroje s hladkým rotorem. Jsou typické svými otáčkami 3000ot.min<sup>-1</sup> resp. 3600ot.min<sup>-1</sup>, jsou to stroje dvoupólové a vyrábí se v řadách od jednotek Wattů až do 1000 a více MVA. Nazývají se turboalternátory a používají se především v tepelných a spalovacích elektrárnách. Druhým typem synchronních generátorů jsou stroje s vyniklými póly, těmito stroji a jejich návrhem se ve své práci zabývám. Dle počtu pólů se určuje jejich synchronní rychlost. Stroje s nízkými otáčkami jsou nazývány pomaloběžné a jejich uplatnění je ve vodních elektrárnách (hydroalternátory) nebo větrných elektrárnách.[1]

Jen ve výjimečných případech je přeměna energie v opačném směru a to z elektrické energie na mechanickou. Při využívání synchronního stroje jako pohonu se jedná většinou o pohon takového zařízení, který nepotřebuje řízení otáček, ale může běžet pokud možno trvale s určitými otáčkami. Jedná se především o pohony kompresorů, čerpadel, mlýnů a např. i přečerpávacích vodních elektráren. Ty pracují jako zdroje výkonu (generátory) jen při pokrývání špiček okamžité spotřeby el. energie. V době přebytku energie v síti, pracují jako zátěž (čerpadlo) a přečerpávají vodu z nižší nádrže zpět do vyšší nádrže.

U synchronních motorů je hlavní problém jejich rozběh. Ten lze realizovat třemi základními způsoby. Velmi rozšířený je asynchronní rozběh pomocí tlumiče, ten je umístěn

v pólech pro tlumení kývání stroje kolem rovnovážné polohy. Pokud je správně a dostatečně dimenzován, lze jej použít pro rozběh motoru. Tento způsob se uplatňuje jen do určitých velikostí a výkonů stroje, kvůli značným ztrátám a zahřívání stroje. Dalším způsobem je rozběh pomocí měniče. Měnič lze nastavit, aby zvyšoval výstupní frekvenci plynule, aby byl rotor stále v závěsu za otáčejícím se mag. polem statoru a nevypadl ze synchronismu. Tento způsob se díky vývoji měničů stále více rozšiřuje. Posledním způsobem je rozběh pomocí menšího asynchronního motoru zpravidla o řádově nižším výkonu, protože většinou roztáčí pouze rotor bez zátěžného momentu.

## 1.2 Princip funkce synchronního stroje

Princip funkce stroje je popsán na synchronním motoru. 3f statorové vinutí vytvoří magnetické pole. Do tohoto točivého pole je vložen rotor, na kterém je navinuto rotorové vinutí. Tímto vinutím prochází stejnosměrný rotorový proud, který svým působením vyvolává magnetické účinky pole. Na pólech rotoru vznikne orientace sever a jih. Opačné polarity se přitahují a tak je pohyb rotoru vytvářen sledováním točivého pole statoru. Tento fyzikální fakt lze popsat nejlépe na synchronním stroji pracujícím jako motor. Ve statorovém vinutí rotuje magnetické pole synchronní rychlostí, rotor, který je buzen stejnosměrně, při synchronních otáčkách sleduje pohyb statorového pole, je tzv. táhnut za statorovým polem. Hlavní rozdíl oproti asynchronnímu stroji spočívá v tom, že pracovní režim stroje probíhá při stejné rychlosti statorového a rotorového pole, tedy při rychlosti synchronní.[2] Naproti tomu asynchronní stroj pracuje, neboli dává moment v jakékoliv jiné rychlosti než je rychlost synchronní. Při zatížení synchronního stroje momentem se definuje zátěžný úhel beta. Tento úhel vyjadřuje pootočení polohy rotoru oproti poloze statorového pole v čase. Tento úhel nelze překročit, protože by stroj mohl vypadnout ze synchronismu a zastavit se (v případě motoru) resp. otáčky by neustále rostly (generátor).

## 1.3 Problematika návrhu synchronního stroje s vyniklými póly

Problematika návrhu spočívá ve skutečnosti, že každá konstrukční kancelář má svůj definovaný postup při výpočtu a návrhu stroje. To znamená, že je v praxi zavedeno a vyráběno mnoho výkonových řad strojů. Snaha je tyto řady sjednotit a používat jednotné hodnoty jmenovitých výkonů, napětí a otáček synchronních motorů vyráběných v České republice i v zahraničí. Touto problematikou se zabývá norma ČSN 35 0220 –



Hydroalternátory; základní parametry a technické požadavky z roku 1985. Ve svém návrhu stroje jsem využíval postupů dle doc. Josefa Červeného a dle Igora Kopylova. Problémem mého orientačního výpočtu je, že jsem používal postupy, které jsou již přes 30 let staré a v dnešní době jsou již výrazně modifikovány. To ovšem neznamená, že by byly neplatné, či dokonce chybné. Díky změně výrobních technologií a především díky vývoji v oblasti konstrukčních materiálů, je zde posun co do oblasti velikosti stroje a jeho výkonu, ale především co do teplotní třídy používaných izolací a s tím i související proudová přetížitelnost, která zpětně ovlivňuje množství použitého materiálu, hmotnost a cenu stroje. Návrh stroje ve vždy kompromisem a je nutné znát předem místo a způsob jak bude stroj pracovat. Dále se návrh přizpůsobuje požadavkům zákazníka a transportním podmínkám (to se týká především strojů s mezními výkony). Většina synchronních strojů pro použití v průmyslu je navržena v horizontálním provedení s uložením hřídele tvar IM 1001. Základní druhy krytí a chlazení strojů jsou IP 23, IC 01 – stroje otevřené a IP 44 , IC 01-41 – stroje zavřené s povrchovým chlazením.[1]

Mnou předkládaný návrh je orientační, nejsou tedy uváděny všechny části výpočtu, ale pouze hlavní části. Pro přesný návrh a následnou výrobu stroje by bylo ještě potřeba zpřesnit některé hodnoty a některé výpočty opakovat (provést zpřesňující výpočty s opakováním). Bylo by též nutné připojit i tepelný výpočet stroje, který svým rozsahem a náročností převyšuje rozsah bakalářské práce. Můj návrh tedy je jakousi hrubou kostrou, která velmi přesně definuje a vyčísluje základní a nejdůležitější veličiny a rozměry stroje.

## 2 Elektromagnetický návrh synchronního stroje

### 2.1 Zadání stroje

Při výpočtu je postupováno dle předchozích výpočtů strojů ověřených v praxi

Zdánlivý výkon	$S = 11\,000$ kVA
Sdružené napětí	$U = 10\,500$ V
Jmenovité otáčky	$n = 600$ ot./min.
Počet fází	$m = 3$
Frekvence	$f = 50$ Hz
Účinník	$\cos\varphi = 0,8$
Počet pólů	$2p=10$
Činitel pólového krytí	$\alpha=0,7$

## 2.2 Výpočet

### 2.2.1 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:

$$P = S \cdot \cos \varphi = 11000 \cdot 0,8 = 8800 \text{ kW} \quad (2.1)$$

Fázové napětí:

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

Počet pólpárů:

$$p = \frac{60 f}{n} = \frac{60 \cdot 50}{600} = 5 \quad (2.3)$$

Počet pólů:

$$2p = 10 \quad (2.4)$$

Fázový proud:

$$I_1 = \frac{S}{U_s \sqrt{3}} = \frac{11000}{10500 \sqrt{3}} \cong 605 \text{ A} \quad (2.5)$$

Průměr induktu (statoru) ve vzduchové mezeře (vrtání statoru) se odečítá z grafu č.2 zařazeného v příloze sestrojeného na základě předchozích návrhů.

Pro tento výpočet je voleno  $D_1 = 2,1 \text{ m}$

Dále odečteno z grafu č.1, viz. příloha:

Obvodová proudová hustota:  $A = 60\,000 \text{ A/m}$

Indukce ve vzduchové mezeře:  $B_\delta = 0,87 \text{ T}$

Mezipólová rozteč:

$$t_p = \frac{\pi D_1}{2 p} = \frac{\pi \cdot 2,1}{10} = 0,659 \text{ m} \quad (2.6)$$

### 2.2.2 Návrh vinutí induktu (statoru)

Vzhledem k průměru statoru a napětí stroje, volím mezidrážkovou rozteč  $t_{d1} = 50 \text{ mm}$ . Při určování počtu drážek induktu se vychází z mezidrážkové rozteče, tato hodnota je ovšem pouze pro prvotní výpočet a následně se upřesňuje. Z toho tedy plyne, že platí vztah:

$$Q = \frac{\pi D_1}{t_{d1}} = \frac{\pi \cdot 2,1}{0,05} \approx 132 \quad (2.7)$$

Při rozkladu tohoto čísla na prvočísla  $132=2.2.3.11$  jsem zvolil výhodnější počet drážek a to 144. Tento počet drážek je vhodnější na rozklad na prvočinitele, viz. vztah 2.9.

Následně se odvozuje počet drážek na pól a fázi, pakliže vyjde počet drážek na pól a fázi menší než cca 7 až 8, mělo by se kvůli vhodnějšímu průběhu napětí volit pro konstrukci zlomkové vinutí.

$$q = \frac{Q}{2pm} = \frac{132}{10 \cdot 3} = 4,4 \quad (2.8)$$

→ dále volím zlomkové vinutí  $\frac{24}{5}$  a jiný počet drážek (144)

Zlomkové vinutí se volí, pokud je malý počet drážek na pól a fázi, protože kladně ovlivňuje průběh napětí pod póly. Čím vyšší je počet drážek na pól a fázi, tím hladší průběh dostáváme. U zlomkových vinutí např.  $\frac{24}{5}$  je efekt stejný, jako by bylo ve stroji 24 drážek na

pól a fázi. Tyto kroky opět omezují možný počet paralelních větví. Dále je  $q = \frac{n}{c}$ . Aby byl

počet drážek v každé fázi statoru stroje stejný, tedy  $Q_f = \frac{Q}{m} = \frac{2pmq}{m} = 2pq = 2p \frac{n}{c} = \text{č.celé}$ ,

může být jmenovatel zlomku  $c = 2$  nebo  $5$ . Tyto možnosti vychází z principu zadání a nelze je jakkoliv měnit. Je zde ještě varianta, že by jmenovatel byl roven 10, ale to by již byla moc vysoká hodnota. Před dalším výpočtem je potřeba se zamyslet a vhodně zvolit počet drážek na pól a fázi tak, aby bylo možné skládání plechů a měli jsme pro výrobu navržen jen jeden druh – důležité pro cenu a jednoduchost stroje. Je potřeba spočítat několik variant. Já jsem ve svém návrhu zvolil zlomkové vinutí  $q=4\frac{4}{5}$ , protože při rozkladu na prvočinitele je zde nejvýhodnější možnost volby překladového čísla, počtu segmentů a počet drážek na překlad.

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  $k=2$

$$q = 4\frac{4}{5} = \frac{24}{5}$$

$$Q = 2pmq = 10 \cdot 3 \cdot \frac{24}{5} = 144 = 2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 3 \quad (2.9)$$

Následně po volbě překladového čísla obdržíme:

počet segmentů  $n_s = 9$

počet drážek na překlad  $Q_{př} = 8$

Počet závitů jedné fáze v sérii:

$$N_s = \frac{\pi D_1 A}{2mI_1} = \frac{\pi 2,1.60\,000}{2.3.605} \cong 109 \text{ závitů} \quad (2.10a)$$

Počet vodičů v drážce:

$$n_d = \frac{a_{\approx} N_s}{p q} = \frac{2.109}{5 \frac{24}{5}} \cong 8 \text{ vodičů} \quad (2.11)$$

kde  $a_{\approx}$  (voleno  $a_{st} = 2$ ) je počet paralelních větví každé fáze střídavého vinutí.

V této fázi výpočtu je potřeba při volbě vyššího počtu než  $a_{\approx} > 1$  provést rozbor, jestli je tento počet paralelních větví vůbec možný a realizovatelný. K tomu využíváme například pilového či úsečkového schématu, viz. kapitola 2.2.4. Po volbě počtu paralelních větví přichází na řadu výpočet skutečného počtu závitů a z toho vycházející obvodová proudová hustota.

Přepočet počtu závitů v sérii jedné fáze:

$$N_s = \frac{n_d p q}{a_{st}} = \frac{8 \cdot 5 \cdot \frac{24}{5}}{2} = 96 \text{ závitů} \quad (2.10b)$$

Skutečná hodnota obvodové proudové hustoty:

$$A = \frac{2mI_1}{\pi D_1} N_s = \frac{2.3.605}{\pi \cdot 2,1} \cdot 96 \cong 52821 \text{ A/m} \quad (2.12)$$

### 2.2.3 Parametry vinutí

Počet drážek  $Q = 144$

Počet pólů  $2p = 10$

Počet fází  $m = 3$

Matematický počet fází  $m' = 6$

Počet drážek na pól a fázi  $q = 4 \frac{4}{5} = \frac{24}{5}$

Typ vinutí: vlnové

*(smyčkové vinutí se obvykle používá u strojů s řádově menšími výkony)*

Počet drážek na pól:

$$Q_p = \frac{Q}{2p} = \frac{144}{10} = 14,4 \quad (2.13)$$

Zvolen cívkový krok:  $y_{1d} = 12$

Pro výpočet stroje jsem zvolil cívkový krok takový, aby poměrné zkrácení vedlo k potlačení 5té a 7mé harmonické. Z tohoto pohledu je nejnvýhodnější poměr 0,8333.

Poměrné zkrácení kroku:

$$\beta = \frac{y_{1d}}{Q_p} = \frac{12}{14,4} = 0,8333 \quad (2.14)$$

Krok na komutátoru:

$$y_k = \frac{\varepsilon K \pm a_{ss}}{p} = \frac{1.144 - 4}{5} = 28 \quad (2.15)$$

Základní stejnosměrné vinutí je vlnové ( $\varepsilon = 1$ ), sérioparalelní ( $a_{ss} = 4$ ) a nekřížené (v čitateli je znaménko „-“) které je jednodušší.

Kroky v počtu cívkových stran:

Zadní cívkový krok:

$$y_1 = 2uy_{1d} + 1 = 2.1.12 + 1 = 25 \quad (2.16)$$

Přední cívkový krok

$$y_2 = 2y_k - y_1 = 2.28 - 25 = 32 \quad (2.17)$$

Vinutí střídavé:

$$\text{Počet skupin vinutí:} \quad a_{ss} m' = 4.6 = 24 \quad (2.18)$$

$$\text{Počet skupin v jedné fázi:} \quad \frac{a_{ss} m'}{m} = \frac{4.6}{3} = 8 \quad (2.19)$$

$$\text{Počet cívek ve skupině:} \quad \frac{Q}{a_{ss} m'} = \frac{144}{4.6} = 6 \quad (2.20)$$

Protože je každá fáze tvořena dvěma skupinami cívek po 24 cívkách, je možné tyto dvě skupiny spojit paralelně, takže lze volit  $a_{\approx} = 2$ . Bylo by samozřejmě možné též volit i počet paralelních větví např. 1, 4, 8. Toto číslo musí být celé. Při dvouvrstvém vinutí dokonce číslo sudé. Ale mělo by to určité dopady na volbu a provedení dalších částí stroje.

#### 2.2.4 Popis vinutí statoru, včetně zjištění možného počtu paralelních větví

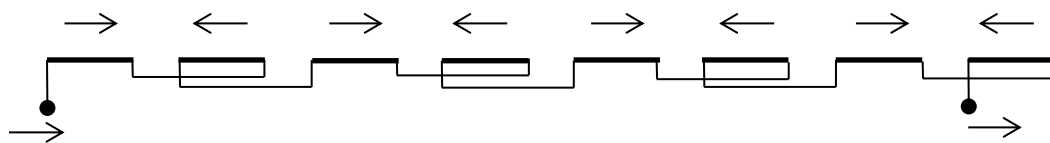
Návrh vinutí statoru je vždy kompromisem při stavbě nového stroje. Nejprve je volen typ vinutí, tato skutečnost záleží na počtu pólů. Smyčková vinutí se většinou používají pro méněpólové stroje, protože by byl vícepólový stroj konstrukčně takřka neproveditelný, z důvodu velmi obtížného zapojování čel vinutí. Proto se při návrhu vícepólových strojů

přikládáme k vinutí vlnovému. To je z pohledu výroby značně jednodušší. Další postup je ovlivněn volbou počtu drážek statoru stroje<sup>1</sup>. Pro správnou volbu  $a_{\approx}$  je nutné určit počet skupin vinutí, počet skupin v jedné fázi a počet cívek ve skupině. Pokud máme tyto základní informace, můžeme si dovolit nakreslit pilové, resp. úsečkové schéma vinutí. Následně z toho lze určovat možnost počtu paralelních větví. Každé vinutí lze navrhnout zapojené do série ( $a_{\approx}=1$ ), tedy jedna paralelní větev; tento návrh je možné udělat pro každý stroj, v praxi se ale snažíme volit paralelní vinutí, například z toho důvodu, že nám to dává prostor pro dvouvrstvé vinutí v drážce namísto jednovrstvého vinutí. Pro názornost přikládám úsečkové jednofázové schéma vinutí.

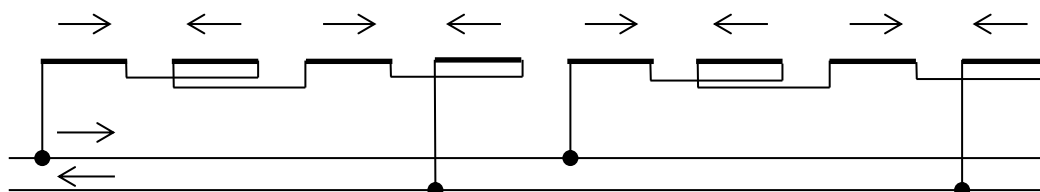
Legenda:

- skupina cívek v jedné fázi (v mém návrhu viz. rov. 2.20 je **v jedné skupině 6 cívek**)
- směr proudu cívkou
- ← směr proudu cívkou

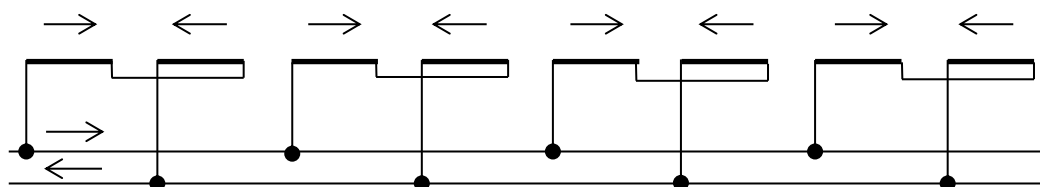
a) pro  $a_{\approx}=1$ :



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

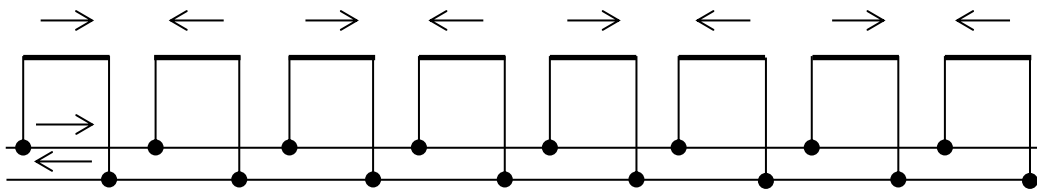


c) pro  $a_{\approx}=4$ :



<sup>1</sup> Počet drážek stroje je opět ovlivněn při návrhu statorových plechů, kdy je velice důležité pro výrobu stroje jednotnost rozměrů. Je možné navrhnut stroj s rozdílnými plechy, který bude mít výborné parametry, ale takový stroj nebude vyrobiteľný.

d) pro  $a_{\approx}=8$ :



Ve své práci jsem si zvolil  $a_{\approx}=2$  (varianta b). Při počtu paralelních větví 4 a 8 již narůstá počet potřebných spojek a s tím i spojená hmotnost (měď), cena a ztráty stroje (následkem zvýšení délky neaktivní části vinutí, která se nepodílí na tvorbě magnetického toku). Možnost volby počtu paralelních větví je však limitovaná tím, že musíme mít skupiny se stejným počtem cívek. To nelze zajistit u každého návrhu a vždy je tedy nutné udělat rozbor možností a vybrat tu nejvhodnější z nich. Při dvou paralelních větvích je redukován počet spojek. Je též zajištěno, že protékající proud bude vyvolávat lepší rozložení magnetického pole než by tomu bylo v případě jedné paralelní větve (tedy spojení v sérii). Toto zlepšení je dáno tím, že jsou skupiny a cívky rozloženy přes více pólů.

### 2.2.5 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 ( $q = \frac{n}{c}$ ))

$$k_{vv} = \sin\left(v\beta \frac{\pi}{2}\right) \frac{\sin v \frac{\pi}{m'}}{n \cdot \sin v \frac{\pi}{m' n}} \quad (2.21)$$

Činitel základní harmonické ( $v = 1$ ):

$$k_{v1} = \sin\left(1.0,8333 \frac{\pi}{2}\right) \frac{\sin 1 \frac{\pi}{6}}{24 \cdot \sin 1 \frac{\pi}{6.24}} = 0,9224 \quad (2.22)$$

Činitel 5-té harmonické:

$$k_{v5} = \sin\left(5.0,8333 \frac{\pi}{2}\right) \frac{\sin 5 \frac{\pi}{6}}{24 \cdot \sin 5 \frac{\pi}{6.24}} = 0,0495 \quad (2.23)$$

Činitel 7-té harmonické:

$$k_{v7} = \sin\left(7.0,8333 \frac{\pi}{2}\right) \frac{\sin 7 \frac{\pi}{6}}{24 \cdot \sin 7 \frac{\pi}{6.24}} = -0,0354 \quad (2.24)$$

Činitel 11-té harmonické:

$$k_{v11} = \sin\left(11.0,8333 \frac{\pi}{2}\right) \frac{\sin 11 \frac{\pi}{6}}{24 \cdot \sin 11 \frac{\pi}{6.24}} = -0,0846 \quad (2.25)$$

Činitel 13-té harmonické:

$$k_{v13} = \sin\left(13.0,8333 \frac{\pi}{2}\right) \frac{\sin 13 \frac{\pi}{6}}{24 \cdot \sin 13 \frac{\pi}{6.24}} = -0,0719 \quad (2.26)$$

Nyní můžeme určit skutečnou hodnotu Essonova činitele<sup>2</sup> elektromagnetického využití stroje:

$$C = \frac{\pi^2}{60\sqrt{2}} AB_{\delta} k_{v1} = \frac{\pi^2}{60\sqrt{2}} \cdot 52841.0,87.0,9224 = 4,932 \frac{\text{kVA}}{\text{m}^3 \text{ ot/min}} \quad (2.27)$$

Dle Essonova činitele lze následně dopočítat efektivní délku stroje:

$$l_e = \frac{S}{CD_1^2 n} = \frac{11000}{4,932 \cdot 2,1^2 \cdot 600} = 0,843 \text{ m} \quad (2.28)$$

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:

$$i = \frac{l_e}{\check{s}_p} = \frac{0,843}{0,05} \cong 17 \quad (2.29)$$

Počet kanálů:

$$i_k = i - 1 = 17 - 1 = 16 \quad (2.30)$$

Celková délka induktu (včetně radiálních kanálů):

$$L = l_e + \check{s}_k i_k = 0,843 + 0,01 \cdot 16 \cong 1,003 \text{ m} \quad (2.31)$$

### 2.2.6 Návrh statorové drážky

U statorového vinutí je nutné v první fázi rozlišovat vinutí jednovrstvé, tzn. že v každé drážce je uložena pouze jedna strana cívk, nebo vinutí dvouvrstvé, u kterých jsou v každé

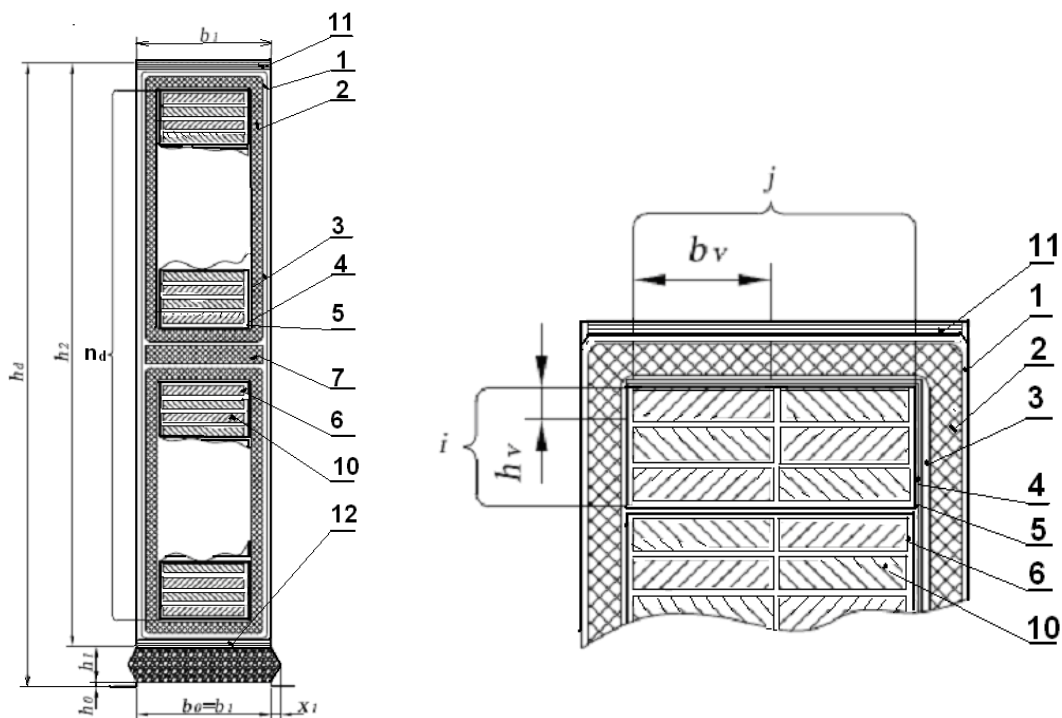
<sup>2</sup> Essonův činitel, vyjadřuje vztah mezi velikostí stroje a jeho elektromagnetickým využitím. Tento činitel je uplatňován o obecných výkonových rovnicích při stavbě strojů. Je to tedy výkon stroje vztažený na jednotku objemu a otáčku za minutu.



drážce dvě cívkové strany. Dále podle rozměrů jednotlivých vodičů může být provedeno pro jednovrstvé resp. dvouvrstvé vinutí jako vinutí cívkové nebo tyčové. Další dělení cívkového vinutí je možné dle způsobu vkládání cívky do drážky stroje a to na vinutí vsypávaná, prošíváná a zasouvaná do polozavřených, resp. vkládaná do otevřených drážek. [3]

Pro statorovou drážku je možno volit ze dvou způsobů provedení tyče. První možností je tzv. permutovaná (Roeblova tyč) ta se použije v případě, když jsou dva vodiče v drážce ( $n_d = 2$ ). Pro vyšší počet vodičů v drážce ( $n_d > 2$ ) se prostor pro šířku vodiče a hloubku drážky určí dle následujících vztahů.

Na induktu použijeme otevřenou obdélníkovou drážku tvaru M, tzn., že zuby budou lichoběžníkového tvaru. Schematický tvar drážky je naznačen na obr. 1. Jednotlivé rozměry jsou očíslovány a uvedeny v tab. 2.



Obrázek 1 – Příklad schematického řezu drážkou statoru [4]

Velikost drážkové rozteče na průměru  $D_1$  :

$$t_{d1} = \frac{\pi D_1}{Q} = \frac{\pi \cdot 2100}{144} = 45,8 \text{ mm} \quad (2.32)$$

Šířka zubu:

$$z_1 = \frac{B_\delta t_{d1}}{B'_{z1} k_{Fe}} = \frac{0,87 \cdot 45,78}{1,7 \cdot 0,92} = 25,5 \text{ mm}, \quad (2.33)$$

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

Tomu odpovídá šířka drážky:

$$b_d = t_{d1} - z_1 = 45,8 - 25,5 = 20,3 \text{ mm} \quad (2.34a)$$

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

$$b_d = 20,5 \text{ mm} \quad (2.34b)$$

a skutečná šířka zubu:

$$z_1 = t_{d1} - b_d = 45,8 - 20,5 = 25,3 \text{ mm.} \quad (2.35)$$

Jedná se o závitové vinutí ( $n_d = 8$ ), tomu odpovídá pro napětí 10,5 kV následující uspořádání vodičů a izolace v drážce rozepsané v tab. 1.

Hloubku drážky bez klínu ( $h_2$ ) volíme dle doporučení ČSN, aby její velikost byla zakončena číslicí 0 nebo 2 nebo 5 a nebo 8. Např.  $h_2 = 100$  (nebo 98, 100, 102, 105). Ze součtu celkové výšky všech vodičů v drážce a izolací a nejbližší vyšší velikosti  $h_2$  obdržíme vůli na hloubku. Ta se vyplní vložkou pod drážkovým klínem.[5]

U strojů s pracovním napětím nad 10kV se tyče opatřují v celé délce vodivým povlakem. Tento nátěr přesahuje na obou stranách aktivní železo minimálně o 20 mm a působí jako ochrana před vytvářením korony. Při vyšších napětích je možno u výběhu cívek z drážek dosáhnout pozvolnějšího a příznivějšího rozložení potenciálu (bez velkého gradientu) pomocí odstupňování povlaků provedeným odstupňovanou vodivostí jednotlivých nátěrů.

Průřez vodiče:

$$S'_{Cu1} = \frac{I_1}{a_{st} \sigma_{Cu1}} = \frac{605}{2 \cdot 3,6} \cong 84 \text{ mm}^2 \quad (2.36)$$

když jsme proudovou hustotu ve vodiči určili z empirického vztahu:

$$\sigma_{Cu1} = \sqrt{\frac{K}{b_v}} = \sqrt{\frac{155}{12}} = 3,6 \text{ A/mm}^2 \quad (2.37)$$

kde  $b_v$  šířka holého vodiče v drážce a  $K$  je konstanta závislá na napětí (viz. tab. 3):

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)

Výška vodiče  $h_v$ , při jeho šířce 12 mm, jak vychází z bilance drážky na šířku:

$$h_v = \frac{S_{Cu1}}{b_v} = \frac{84}{12} = 7 \text{ mm} \quad (2.38)$$

Vzhledem k takto vysokému vodiči (vztah 2.38) by byly neúměrně vysoké ztráty vlivem skinefektu. Tento problém lze odstranit rozdělením vodiče na více paralelních vodičů menších rozměrů. Vzdáleně podobný princip jako skládání plechů u transformátorů. Vodiče jsou voleny dle normalizovaných rozměrů, viz příloha Graf 5 a jim odpovídajícím skutečným průřezům, které respektují nerovnost povrchu a především zaoblení hran.

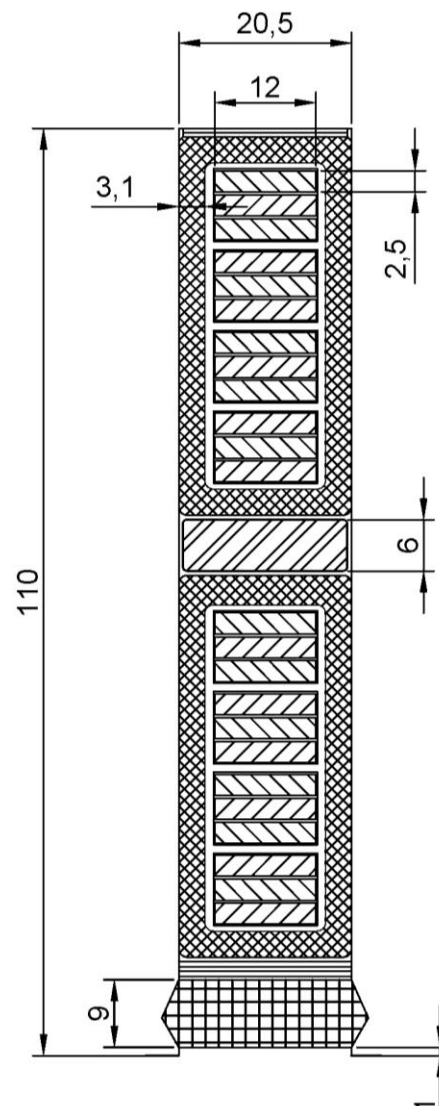
Výše navržený původní vodič je tedy rozdělen na výšku na tři vodiče ( $i=3$ ) a na šířku dělen není (*tedy*  $j=1$ ). Skutečný průřez jednoho vodiče je dle ČSN (příloha graf 5):

Poz.	Položka	Šířka		Hloubka	
1	Vyložení drážky 1)	----	-	----	-
2	Izolace proti železu	2 . $t_i \rightarrow 2.3,1$	6,2	4 . $t_i \rightarrow 4.3,1$	12,40
3	Tmelení	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 . 0,48	0,96	2 . $n_d \cdot 0,48 \rightarrow 2.8.0,48$	7,68
6	Izolace vodičů 2)	1 . $j \cdot 0,37 \rightarrow 1.1.0,37$	0,37	$n_d \cdot i \cdot 0,37 \rightarrow 8.3.0,37$	8,88
7	Mezivrstva	-	-	1 . $m_v \rightarrow 1.6$	6,00
8	Σizolace		8,03		34,04
9	Vůle na šířku	0,2 až 0,6	0,47	-	-
10	Holý vodič 3)	$j \cdot b \rightarrow 1.12$	12,00	$n_d \cdot i \cdot h_v \rightarrow 8.3.2,5$	67,20
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	2,04
14	Rozměr drážky bez klínu	$b_d$	19	$h_2$	100,00
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>20,5</b>	<b><math>h_d</math></b>	<b>110,00</b>

Tabulka 2 - Rozpis jednotlivých rozměrů drážky

Napětí / kV /	Izolace proti železu – t : / mm /				Mezivrstva m <sub>v</sub> : /mm/
	obyčejná	Lepší	typ [izolace B] samicatherm	typ: Relanex	
0,4 až 1,5	0,45	-	-	-	3
3,0	1,8	1,6	1,4	1,4	3
6,3	3,0	2,7	2,4	1,8	4
<b>10,5</b>	3,5	3,3	<b>3,1</b>	2,8	<b>6</b>
13,8	4,5	4,2	4,0	3,8	6
15,7		4,6	4,4	4,0	7
18,0		5,5	5,0	5,0	7
24,0				6,5	

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



Obrázek 2 - Reálný náčrt drážky statoru v řezu (spolu s výslednými rozměry)

$$S_1 = 29,5 \text{ mm}^2. \quad (2.40)$$

Výsledný průřez vodičů tvořícího jeden závit je:

$$S_{Cu1} = j.i.S_1 = 1.3.29,5 = 88,5 \text{ mm}^2 \quad (2.41)$$

a skutečná proudová hustota:

$$\sigma_{Cu1} = \frac{I_1}{a_{st} S_{Cu1}} = \frac{605}{2.88,5} = 3,41 \text{ A/mm}^2 \quad (2.42)$$

### 2.2.7 Odpor a rozptylová reaktance statorového vinutí

Délka čela:

Úhel sklonu čel válcového vinutí:

$$\sin \alpha_\varepsilon = \frac{b_\varepsilon + c}{t_{d1}} = \frac{20,5 + 9}{45,78} = 0,644 \quad (2.43)$$

$$\alpha_\varepsilon = \arcsin 0,644 \cong 40^\circ$$

pokud šířku čela  $b_\varepsilon$  volíme stejnou jako šířku drážky  $b_d$  a vzdálenost mezi čely se volí v závislosti na velikosti napětí podle vztahu 2.44, dostáváme následující rozměry:

$$c = 4 + \frac{U[kV]}{2} = 4 + \frac{10,5}{2} = 9 \text{ mm} \quad (2.44)$$

$$x = \frac{\beta.t_p}{2 \cos \alpha_\varepsilon} = \frac{0,833.659}{2 \cdot \cos 40^\circ} \cong 360 \text{ mm} \quad (2.45)$$

$$B = \frac{h_2}{2} + r = \frac{100}{2} + 10 = 60 \text{ mm} \quad (2.46)$$

$$y = \frac{\beta.t_p}{2} \operatorname{tg} \alpha_\varepsilon = \frac{0,833.659}{2} \operatorname{tg} 40^\circ = 231 \text{ mm} \quad (2.47)$$

Délka oka:

$$o = \frac{\pi.R}{2} = \frac{\pi.50}{2} = 78,5 \text{ mm} \quad (2.48)$$

Vyložení čel:

$$E = v + y + b = 70 + 231 + 60 = 361 \text{ mm} \quad (2.49)$$

Délka čela:

$$l_\varepsilon = 2(v + x + o) = 2.(70 + 360 + 78,5) = 2.508 = 1016 \text{ mm} \quad (2.50)$$

Délka vodiče:

$$l_v = L + l_\varepsilon = 1003 + 1016 = 2019 \text{ mm} \cong 2,00 \text{ m} \quad (2.51)$$

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)

#### Odpor jedné fáze:

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

$$R'_{1/20} = \rho_{Cu} \frac{2 \cdot l_v \cdot N_s}{a_{st} \cdot S_{Cu1}} = \frac{1}{56} \frac{2 \cdot 2,2 \cdot 0,96}{2,88,5} = 0,039 \, \Omega \quad (2.52)$$

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

#### Vliv skin efektu:

Náhradní výška vodiče:

$$\xi = 2\pi h_v \sqrt{\frac{j b_v f}{b_d \rho}} \cdot 10^{-7} = 2 \cdot \pi \cdot 2,5 \sqrt{\frac{1 \cdot 12 \cdot 50}{20,5 \cdot \frac{1}{56}} \cdot 10^{-7}} = 0,20 \quad (2.53)$$

Činitel zvýšení elektrického odporu:

$$k_{Cu} = \frac{g^2 - 0,2}{9} \xi^4 = \frac{(8,3)^2 - 0,2}{9} 0,20^4 = 0,102 \quad (2.54)$$

=> 10,2% (v pořádku, hodnota by měla vycházet nižší než 20%). V rovnici je g celkový počet vodičů v drážce nad sebou:  $g = i \cdot n_d = 3 \cdot 8 = 24$  (i je počet vodičů, na kolik se rozdělí původní vodič na výšku, zatímco j je počet vodičů, na kolik se rozdělí vodič na šířku, v mém případě vodič na šířku nebyl rozdělen a tak je  $j=1$ ). [5]

Odpor při střídavém proudu při 20 °C:

$$R_{1/20} = (1 + k_{Cu}) R'_{1/20} = (1 + 0,102) \cdot 0,039 = 0,0429 \, \Omega \quad (2.55)$$

Odpor při 75 °C:

$$R_{1/75} = 1,22 \cdot R_{1/20} = 1,22 \cdot 0,0429 = 0,052 \, \Omega \quad (2.56)$$

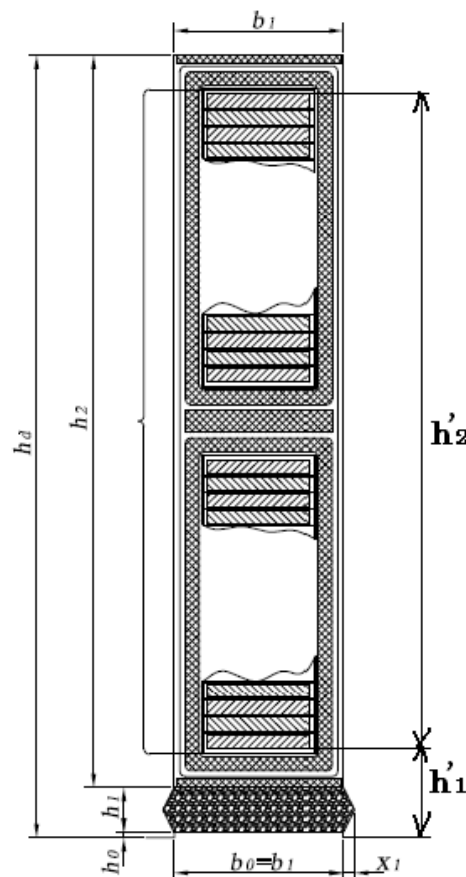
Procentní hodnota úbytku napětí na ohmickém odporu:

$$u_r = \frac{R_{1/75} I_1}{U_f} \cdot 100 = \frac{0,052 \cdot 605}{6062} \cdot 100 = 0,52 \, \% \quad (2.57)$$

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

#### Rozptylová reaktance statorového vinutí:

Velikost rozptylové reaktance je dána magnetickou vodivostí drážky induktu, vodivostí čel vinutí a vodivostí mezi sousedními zuby přes vzduchovou mezeru.[5] Na obr.3 jsou vyznačeny rozměry  $h'_1$  a  $h'_2$  uplatněné dále v rovnici 2.58.



Obrázek 3 - Schematický náčrtek drážky statoru spolu s označením rozměrů [5]

$$X_{\sigma} = \frac{(4\pi)^2 f N_s^2}{p q} l_e \left[ \left( \frac{h'_2}{3b_d} + \frac{h'_1}{b_d} \right) + \frac{l_{\xi}}{l_e} q \left( 0,187 + 0,166 \frac{t_p}{l_{\xi}} \beta \right) + \ln \left( 1 + \frac{\pi Z_1}{2b_d} \right) \right] 10^{-7}$$

$$\begin{aligned} X_{\sigma} &= \frac{(4\pi)^2 50 \cdot 96^2}{5,4,8} 0,843 \left[ \left( \frac{89}{3,20,5} + \frac{17}{20,5} \right) \right. \\ &\quad \left. + \frac{1,016}{0,843} 4,8 \left( 0,187 + 0,166 \frac{0,659}{1,016} 0,833 \right) + \ln \left( 1 + \frac{\pi \cdot 25,3}{2 \cdot 20,5} \right) \right] 10^{-7} = \\ &= 3735521,8 \cdot [(2,22764) + 6,51108 \cdot (0,27669) \\ &\quad + \ln(2,93859)] \cdot 10^{-7} = 0,37355 \cdot (5,10712) = \mathbf{1,27\Omega} \end{aligned} \quad (2.58)$$

Výpočet hodnoty  $h_2' = 2x$  izolace proti železu + 2x tmelení + 2x stažení vodičů + izolace závitů + izolace vodičů + mezivrstva + holý vodič = 2.3,1 + 2.0,1 + 2.0,15 + 7,68 + 8,88 + 6 + 60  $\cong$  89 mm

Procentní hodnota úbytku napětí na rozptylové reaktanci:

$$u_\sigma = \frac{X_\sigma I_1}{U_f} 100 = \frac{1,27.605}{6062} 100 \cong 12,7 \% \quad (2.59)$$

Procentní hodnota rozptylové reaktance:

$$x_\sigma = u_\sigma = 12,7 \% \quad (2.60)$$

## 2.2.8 Návrh magnetického obvodu

**Určení magnetického toku:**

Velikost magnetického toku určíme z rovnice pro indukované napětí a následně provedeme kontrolu podle rozměrů stroje a velikosti magnetické indukce ve vzduchové mezeře (předpokládáme její přibližně sinusový průběh). Tato část výpočtu je velmi důležitá, protože se zde počítá magnetický tok z různých parametrů stroje, které se vzájemně moc neovlivňují. Z toho důvodu je případná shoda hodnot dostatečně průkazná k tvrzení, že provedený výpočet je správný.

Magnetický tok:

$$\Phi = \frac{U_f}{4,44 f N_s k_{v1}} = \frac{6062}{4,44 \cdot 50 \cdot 96,0,92} = 0,309 \text{ Vs} \quad (2.61)$$

Kontrola:

$$\Phi = \frac{2}{\pi} t_p l_e B_\delta = \frac{2}{\pi} \cdot 0,659 \cdot 0,843 \cdot 0,87 = 0,308 \text{ Vs} \quad (2.62)$$

Hodnoty přibližně souhlasí, počítáme nadále s hodnotou:  $\Phi = 0,309 \text{ Vs}$ .

## 2.2.9 Velikost vzduchové mezery

Při její volbě se vychází z požadované procentní hodnoty nesyčené synchronní reaktance a procentní hodnoty rozptylové reaktance. 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.“ Na velikosti vzduchové mezery také závisí krátkodobá výkonová a momentová přetížitelnost. Maximální hodnota momentu, která ovlivňuje vnitřní výkon, je závislá na velikosti podélné synchronní reaktance, čím větší je vzduchová mezera, tím je hodnota synchronní reaktance nižší a tudíž bude větší výkonová a momentová přetížitelnost.

[1]

Velikost vzduchové mezery:

$$\delta = k \frac{At_p}{B_\delta} \cdot \frac{10^{-6}}{x_d - x_\sigma} = 47 \cdot \frac{52821 \cdot 0,659}{0,87} \cdot \frac{10^{-6}}{130 - 12,7} = 0,0160 \text{ m} \quad (2.63)$$

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

Tabulka 5 - Volba synchronní reaktance dle počtu pólů (zvýrazněná volená hodnota)[5]

Volíme:

$$\delta = 16 \text{ mm} \quad (2.64)$$

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.

Volíme:

$$\frac{\delta_{\max}}{\delta} = 1,5 \quad (2.65)$$

### 2.2.10 Magnetické napětí reakce kotvy

Amplituda základní harmonické reakce kotvy:

$$F'_a = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{1}{C_1} A t_p k_{v1} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{1}{1,025} 52821 \cdot 0,659 \cdot 0,9224 = 14101 \text{ A} \quad (2.66)$$

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.

$$\frac{\delta}{t_p} = \frac{0,016}{0,659} = 0,024 ; \alpha = 0,7 ; C_1 = a \cdot b = 1,195 \cdot 0,858 = 1,025 \quad (2.67)$$

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

$$F_{d1} = C_{d1} F_a = 0,88 \cdot 14101 = 12409 \text{ A} \quad (2.68)$$

$$F_{q1} = C_{q1} F_a = 0,45 \cdot 14101 = 6345 \text{ A} \quad (2.69)$$

kde:  $C_{d1} = e \cdot f = 0,81 \cdot 1,09 = 0,88 \quad (2.70)$

$$C_{q1} = g \cdot h = 1,64 \cdot 0,275 = 0,45 \quad (2.71)$$

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

### 2.2.11 Dimenzování magnetického obvodu

výška pólu:

$$h_p = 0,3 \cdot t_p = 0,3 \cdot 0,659 = 0,198 \text{ m} \quad (2.72)$$

výška nástavce:

$$h_n = 0,1 \cdot t_p = 0,1 \cdot 0,659 = 0,07 \text{ m} \quad (2.73)$$

šířka pólu:

$$b_p = \frac{(1 + \nu) \cdot \Phi}{B_p L_p} = \frac{(1 + 0,15) \cdot 0,309}{1,5 \cdot 1,003} = 0,240 \text{ m} \quad (2.74)$$

šířka pólového nástavce:

$$b_n = \alpha \cdot t_p = 0,70 \cdot 0,659 = 0,461 \text{ m}, \quad (2.75)$$

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

výška jhu rotoru:

$$h_{jr} = \frac{(1 + \nu) \cdot \Phi}{2 B_{jr} L_r} = \frac{(1 + 0,15) \cdot 0,309}{2 \cdot 1,1 \cdot 1,1} = 0,147 \text{ m} \quad (2.76)$$

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

výška jádra induktu:

$$h_{js} = \frac{\Phi}{2 B_{js} k_{Fe} l_e} = \frac{0,309}{2 \cdot 1,3 \cdot 0,92 \cdot 0,843} = 0,153 \text{ m} \quad (2.77)$$

Délky středních siločar částí magnetického obvodu:

pól:

$$l_p = h_p + h_n = 0,198 + 0,07 = 0,268 \text{ m} \quad (2.78)$$

jho rotoru:

$$l_r = \frac{\pi[D_1 - 2(\delta + h_p + h_n)]}{4p} = \frac{\pi[2,1 - 2(0,016 + 0,198 + 0,07)]}{4.5} = 0,24 \text{ m} \quad (2.79)$$

jádro induktu:

$$l_s = \frac{\pi[D_1 + 2(h_d + h_{js})]}{4p} = \frac{\pi[2,1 + 2(0,11 + 0,153)]}{4.5} = 0,41 \text{ m} \quad (2.80)$$

### 2.2.12 Charakteristika naprázdno

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

$$\frac{b_0}{z_1} = \frac{20,5}{25,3} = 0,81 ; \frac{b_0}{\delta} = \frac{20,5}{16} = 1,28 \quad (2.81a, 2.81b)$$

$b_0 = b_d$  platí pro otevřenou drážku

Z nomogramu byla odečtena hodnota:

$$k_{cd} = 1,09 \quad (2.82)$$

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

$$k_{ck} = \frac{1}{1 + \frac{\delta}{2 + \delta} \cdot \frac{\check{s}_k \cdot i}{l_e}} = \frac{1}{1 + \frac{16}{2 + 16} \cdot \frac{10.16}{843}} = 0,86 \quad (2.83)$$

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

Výsledná hodnota Cartérova činitele:

$$k_c = k_{cd} \cdot k_{ck} = 1,09 \cdot 0,86 = 0,94 \quad (2.84)$$

Magnetické napětí na vzduchové mezeře:

$$F_\delta = 0,8 k_c \delta B_\delta \cdot 10^6 = 0,8 \cdot 0,94 \cdot 0,016 \cdot 0,87 \cdot 10^6 = 10468 \text{ A} \quad (2.85)$$

Výpočet charakteristiky naprázdno je proveden z hodnot v následujících tabulkách.

Tabulka 6 uvádí jednotlivé rozměry částí stroje (v mm)<sup>3</sup>.

$D_1$	$D_1 = 2100$	$t_{d1} = 45,8$	$z_1 = 25,3$	$k_{z1} = 0,96$
$D_2 = D_1 \pm h_d$	$D_2 = 2210$	$t_{d2} = 48,2$	$z_2 = 27,7$	$k_{z2} = 0,89$
$D_3 = D_1 \pm 2h_d$	$D_3 = 2320$	$t_{d3} = 50,6$	$z_3 = 30,1$	$k_{z3} = 0,82$

Tabulka 6 - Hodnoty pro charakteristiku naprázdno - 1.část

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

$$t_{di} = \frac{\pi D_i}{Q} \quad (2.86)$$

$$k_{zi} = \frac{t_{di}}{z_i k_{Fe}} - 1 \quad (2.87)$$

$$B'_{zi} = \frac{B_\delta \cdot t_{d1}}{z_i \cdot k_{Fe}} \quad (2.88)$$

$$z_i = t_{di} - b_d \quad (2.89)$$

$$H_{zstr} = \frac{H_{z1} + 4H_{z2} + H_{z3}}{6} \quad (2.90)$$

$$F_z = H_{zstr} \cdot h_d \quad (2.91)$$

Jednotky:	$[T]^4$	$[T]$	$[A/m]$	$[A/m]$	$[A]$
1,00. $\Phi$	$B'_{z1} = 1,71$	$B_{z1} = 1,69$	$H_{z1} = 6800$	$H_{zstř} = 5466$	$F_z = 601$
	$B'_{z2} = 1,65$	$B_{z2} = 1,64$	$H_{z2} = 5500$		
	$B'_{z3} = 1,59$	$B_{z3} = 1,58$	$H_{z3} = 4000$		
1,15. $\Phi$	$B'_{z1} = 1,96$	$B_{z1} = 1,92$	$H_{z1} = 20800$	$H_{zstř} = 15800$	$F_z = 1738$
	$B'_{z2} = 1,89$	$B_{z2} = 1,86$	$H_{z2} = 15500$		
	$B'_{z3} = 1,82$	$B_{z3} = 1,80$	$H_{z3} = 12000$		
1,30. $\Phi$	$B'_{z1} = 2,22$	$B_{z1} = 2,10$	$H_{z1} = 38000$	$H_{zstř} = 33333$	$F_z = 3666$
	$B'_{z2} = 2,13$	$B_{z2} = 2,05$	$H_{z2} = 33000$		
	$B'_{z3} = 2,06$	$B_{z3} = 2,00$	$H_{z3} = 30000$		

Tabulka 7 - Hodnoty pro charakteristiku naprázdno - 2.část

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

<sup>4</sup>  $B'_{z1,2,3}$  jsou hodnoty zdánlivé indukce,  $B_{z1,2,3}$  jsou hodnoty skutečné indukce



Pro konstrukci charakteristiky naprázdno bylo použito magnetizačních křivek dle grafů 7 a 8 a činitel odlehčení podle grafu 9, viz příloha práce. Grafickou konstrukcí jsem zjistil velikost budícího magnetického napětí pro jmenovité zatížení a účinník.

### 2.2.13 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:

$$a = \frac{b_n - b_p}{2} = \frac{0,461 - 0,240}{2} = 0,110 \text{ m} \quad (2.92)$$

Nemá-li cívka přesahovat přes pólový nástavec, tak při tloušťce kostříčky budící cívky  $t_k = 5 \text{ mm}$  zbývá pro šířku cívky 105 mm. Střední délka závitu cívky pak bude:

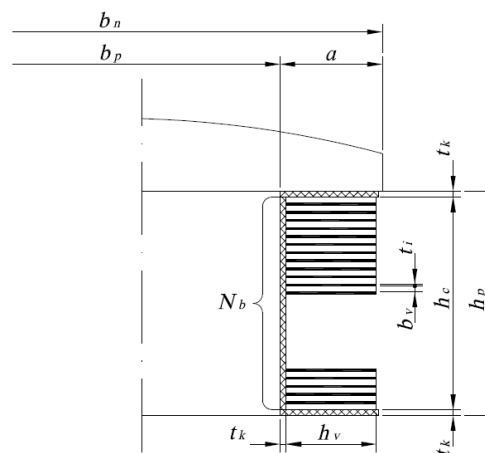
$$l_{bs} = 2(L_p + b_p + 2a) = 2(1,003 + 0,240 + 2 \cdot 0,105) = 2,906 \text{ m} \quad (2.93)$$

Průřez vodiče budící cívky:

$$S'_{Cub} = \frac{\rho_{Cu} l_{bs} 2p F_b}{0,9 U_b} = \frac{1}{56} \cdot \frac{2,906 \cdot 10 \cdot 24600}{0,9 \cdot 65} = 218,2 \text{ mm}^2 \quad (2.94)$$

Ve výpočtu jsem zvolil rozměr vodiče: 75 x 3, kterému odpovídá čistý průřez (při respektování zaoblení hran a nerovnosti povrchu):  $S_{Cub} = 220 \text{ mm}^2$ .

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. Bylo tedy zvoleno budící napětí  $U_b = 65 \text{ V}$ . Bude použito holých vodičů a mezi závity bude vložena izolace tloušťky  $t_i = 0,4 \text{ mm}$ .



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

Předběžně volíme proudovou hustotu ve vodiči:

$$\sigma_{\text{Cub}} = 2 \text{ A/mm}^2 \quad (2.95)$$

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

Budící proud:

$$I_b = \sigma_{\text{Cub}} \cdot S_{\text{Cub}} = 2 \cdot 220 = 440 \text{ A} \quad (2.96)$$

Počet závitů budící cívky:

$$N_b = \frac{F_b}{I_b} = \frac{24600}{440} = 56 \quad (2.97)$$

Výška cívky:

$$h_c = N_b (b_v + t_i) = 56 \cdot (3 + 0,4) = 190 \text{ mm} \quad (2.98)$$

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

Výška těla pólu:

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

Skutečná výška pólu vychází větší, než jsme předpokládali (předpoklad:  $h_p = 198 \text{ mm}$ ).

Tato skutečnost ovlivní velikost magnetického napětí na pól, které bude jen o velmi málo vyšší, ale v prvním návrhu toto zanedbáme a bereme to jako malý nedostatek v buzení stroje. Pokud by se prováděl upřesňující výpočet, musela by se uvažovat i tato změna hodnot.

#### 2.2.14 Orientační výpočet oteplení budící cívky

Vnější obvod budící cívky:

$$l_{be} = 2(L_p + b_p + 4a) = 2(1,003 + 0,240 + 4 \cdot 0,110) = 3,366 \text{ m} \quad (2.100)$$

Ochlazovací povrch všech cívek:

$$O_{2pc} = h_c l_{be} 2p = 0,190 \cdot 3,366 \cdot 10 = 6,39 \text{ m}^2 \quad (2.101)$$

Odpor všech cívek budícího vinutí:

$$R_{b/75} = 1,22 \cdot \rho \frac{l_{bs} N_b 2p}{S_{\text{Cub}}} = 1,22 \cdot \frac{1}{56} \cdot \frac{3,366 \cdot 56 \cdot 10}{220} = 0,186 \ \Omega \quad (2.102)$$

Ztráty v budícím vinutí:

$$\Delta P_{\text{Cub}} = R_{b/75} I_b^2 = 0,186 \cdot 440^2 = 36137 \text{ W} \quad (2.103)$$

Oteplení cívky

$$\Delta g_{Cub} = \frac{1,18 \cdot \Delta P_{Cub}}{\alpha O_{2pc}} = \frac{1,18 \cdot 36137}{80 \cdot 6,14} = 77,2 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (2.104)$$

Volen součinitel přestupu tepla  $\alpha = 90 \text{ W}/^\circ\text{C}\cdot\text{m}^2$ . Rychlost proudícího vzduchu kolem cívky lze uvažovat jako třetinu obvodové rychlosti rotoru:

$$v = \frac{1}{3} \frac{\pi D_1 n}{60} = \frac{1}{3} \frac{\pi \cdot 2,1 \cdot 600}{60} \cong 22 \text{ m/s} \quad (2.105)$$

Oteplení cívky 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 cívky vyšlo v toleranci pro danou třídu izolace.

### 2.2.15 Kroužky a kartáče

Pro přenos budícího proudu na rotor použijeme elektrografitové kartáče, pro které platí následující údaje:

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

Celkový průřez kartáčů jedné polarity

$$S_k = \frac{I_b}{\sigma_k} = \frac{440}{10} = 44 \text{ cm}^2 \quad (2.106)$$

Podle doporučených rozměrů kartáčů volíme rozměr  $b_k \times l_k = 32 \times 20$ , tomu odpovídá průřez:

$S_{k1} = 6,4 \text{ cm}^2$  kde  $b_k$  je rozměr v osovém směru stroje a určuje šířku kroužku a  $l_k$  je rozměr v obvodovém směru.

Počet kartáčů jedné polarity na obvodu kroužku

$$i_k = \frac{S_k}{S_{k1}} = \frac{44}{6,4} = 6,875 \quad (2.107)$$

Volíme počet kartáčů pro jednu polaritu  $i_k = 7$  a tedy počet kartáčů obou polarit (celkový počet kartáčů) je  $2i_k = 14$ . Ještě je potřeba zkontrolovat obvodovou rychlost kroužků, a také zda se tento počet kartáčů (včetně pouzdra kartáčových držáků) na obvod kroužků vtěsna.



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

$$d_H = 0,1353 \sqrt{\frac{P_{kW}}{n}} = 0,1353 \sqrt{\frac{8800}{600}} = 0,33 \text{ m} \quad (2.108)$$

Vnější průměr kroužků budeme předpokládat:

$$D_k = 1,3d_H = 1,3 \cdot 0,33 = 0,429 \text{ m.} \quad (2.109)$$

Obvodová rychlost kroužků:

$$v_k = \frac{\pi D_k n_{\max}}{60} = \frac{\pi 0,429 \cdot 900}{60} = 20,21 \text{ m/s} \quad (2.110)$$

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

Rozteč kartáčů:

$$t_k = \frac{\pi D_k}{2i_k} = \frac{\pi \cdot 0,429}{14} = 0,096 \text{ m.} \quad (2.111)$$

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

## 2.3 Ztráty a účinnost

### 2.3.1 Ztráty

Jouleovy:

ve vinutí statoru:

$$\Delta P_{Cu1} = m \cdot R_{1/75} \cdot I_1^2 = 3,0,052 \cdot 605^2 = 57100 \text{ W} \quad (2.112)$$

v budícím vinutí:

$$\Delta P_{Cub} = R_{b/75} I_b^2 = 0,186 \cdot 440^2 = 36137 \text{ W} \quad (2.113)$$

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:

$$m_{Fej} = \frac{\pi}{4} (D_{je}^2 - D_3^2) l_e k_{Fe} \rho_{Fe} = \frac{\pi}{4} (2,626^2 - 2,320^2) 0,843 \cdot 0,92 \cdot 7800 = 7191 \text{ kg} \quad (2.114)$$

$$\text{kde } D_{je} = D_1 + 2(h_d + h_{js}) = 2,10 + 2 \cdot (0,110 + 0,153) = 2,626 \text{ m} \quad (2.115)$$

je vnější průměr statoru

ztráty v jádře induktu (statoru):

$$\Delta P_{Fej} = 1,8 \cdot \Delta p_{Fe} \cdot B_{js}^2 \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} m_{Fej} = 1,8 \cdot 1,8 \cdot 1,3^2 \left(\frac{50}{50}\right)^{1,3} \cdot 7191 = 39375 W \quad (2.116)$$

hmotnost zubů statoru:

$$m_{Fez} = Q \cdot z_2 \cdot h_d \cdot l_e \cdot k_{Fe} \rho_{Fe} = 144 \cdot 0,028 \cdot 0,110 \cdot 0,843 \cdot 0,92 \cdot 7800 = 2683 \text{ kg} \quad (2.117)$$

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

ztráty v zubech statoru:

$$\Delta P_{Fez} = 2 \cdot \Delta p_{Fe} \cdot B_{z2}^2 \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} \cdot m_{Fez} = 2 \cdot 1,8 \cdot 1,65^2 \cdot \left(\frac{50}{50}\right)^{1,3} \cdot 2683 = 26296 W \quad (2.118)$$

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

Povrchové:

$$\begin{aligned} \Delta P_p &= \frac{\pi}{2} \cdot D_1 \alpha L_p k_0 \left(\frac{Q \cdot n}{10000}\right)^{1,5} (t_{d1} \cdot \beta \cdot 1000 \cdot B_\delta \cdot k_c) \\ &= \frac{\pi}{2} \cdot 2,1 \cdot 0,7 \cdot 1,003 \cdot 4,6 \left(\frac{144 \cdot 600}{10000}\right)^{1,5} (0,0458 \cdot 0,075 \cdot 1000 \cdot 0,87 \cdot 0,94) \\ &= 2300 W \end{aligned} \quad (2.119)$$

Při chodu naprázdno vznikají ve stroji ještě tzv. ztráty povrchové. 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 navrhují, bude pólový nástavec proveden ze složených plechů o tloušťce 1mm (činitel  $k_0$  tedy bude 0,46). Pro úplnost je vhodné uvést, že pro plech 2mm je  $k_0 = 8,6$  a pokud je pólový nástavec zhotoven z masivního železa, je  $k_0 = 23,3$ .  $\beta$  jsou činitele povrchových ztrát a  $k_c$  je Cartéřův činitel, oba tyto parametry se odečítají pomocí křivek, viz graf 10, resp. 3 a 4 v příloze práce.

Mechanické:

$$\Delta P_m = v^{2,5} \cdot D_1 \sqrt{l_e} = 65,94^{2,5} \cdot 2,1 \sqrt{1,003} = 74258 \text{ W} \quad (2.120)$$

kde  $v$  je obvodová rychlost rotoru:

$$v = \frac{\pi D_1 n}{60} = \frac{\pi \cdot 2,1 \cdot 1.600}{60} = 65,94 \text{ m/s} \quad (2.121)$$

Přídavné:

$$\Delta P_{přid} = 0,003 \cdot S = 0,003 \cdot 11000 \cdot 10^3 = 33000 \text{ W} \quad (2.122)$$

Celkové:

$$\begin{aligned} \Delta P = \Delta P_{Cu1} + \Delta P_{Cub} + \Delta P_{Fej} + \Delta P_{Fez} + \Delta P_p + \Delta P_m + \Delta P_{přid} = & (57100 + 36137 + 39375 + 29296 + \\ + 2300 + 74258 + 33000) \cdot 10^3 = & 260,712 \cdot 10^3 \text{ W} = 260,712 \text{ kW} \end{aligned} \quad (2.123)$$

**2.3.2 Účinnost**

$$\eta = 100 \left( \frac{P}{P + \Delta P} \right) = 100 \left( \frac{8800}{8800 + 260,712} \right) = 97,12 \% \quad (2.124)$$

**2.4 Zhodnocení a porovnání různých postupů výpočtu**

Ve své bakalářské práci jsem měl možnost výběru z různých druhů a postupů výpočtu. Mezi hlavní patří postup dle knihy Stavba elektrických strojů od Igora Kopylova SNTL 1989 a Postup při výpočtu synchronního stroje od doc. Ing. Josefa Červeného, Csc. V první fázi jsem zkoušel počítat dle Kopylova, ale tento přístup se mi zdál ve výsledku nevýhodný, protože se nejprve určují rozměry a následně se dopočítává intenzita magnetického pole a např. indukce ve vzduchové mezeře. Pro praxi a stavbu se více hodí postup opačný a to takový, že se nejprve zvolí hodnoty magnetických veličin a následně se dopočítávají velikosti stroje.

## Závěr

Provedl jsem elektromagnetický návrh horizontálního synchronního generátoru s vyniklými póly. V první fázi výpočtu jsem zvolil průměr vrtání statoru. Při větším vnějším průměru plechového svazku než 1 metr je třeba magnetický obvod skládat ze segmentů. Proto jsem navrhl počet drážek statoru takový, aby byl počet drážek na překlad segmentů celé číslo a stroj byl proveditelný (viz kapitoly 2.2.2 a 2.2.3). Další fází je návrh vinutí stroje. Zvolil jsem dvouvrstvé statorové vinutí, šestifázově rozstříhané, vlnové<sup>5</sup>, se dvěma paralelními větvemi. V kapitole 2.2.4 a 2.2.6 popisuji vinutí statoru a ověřoval jsem proveditelnosti zvoleného počtu paralelních větví. Následně jsem pro názornost uspořádání izolace a vodičů připojil i řez statorovou drážkou. Dále jsem navrhoval magnetický obvod. Jehož účelem je určení rozměrů a následné sestrojení charakteristiky naprázdno. Sestrojením fázorových diagramů elektrických a magnetických napětí jsem určil velikost výsledného magnetického napětí a navrhl buzení stroje. V mém provedení jsem se přiklonil k nižšímu budícímu napětí, abych mohl zvolit pásové měděné vodiče, protože taková cívka se lépe chladí a je odolnější vůči mechanickému namáhání odstředivých sil. Celý stroj se mi nakonec povedlo navrhnout s velice dobrými parametry, co se týče velikostí procentních úbytků napětí na rozptylových reaktancích a odporech vinutí, ale i s vysokou účinností 97,12%. Na závěr práce připojuji i příčný a podélný řez stroje, pro názornost uspořádání a předběžnou představu velikosti stroje. Díky této práci jsem si prohloubil znalosti ohledně elektrických strojů a spojil si teoretické poznatky získané během studia s těmi praktickými.

---

<sup>5</sup> Vlnové vinutí je oproti smyčkovému pro stroj  $2p=10$  vhodnější, kvůli zjednodušení při výrobě, podrobněji viz kapitola 2.2.4

## 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] RYBÁŘ, J., ČERVENÝ, J., *Konstrukční tabulky k elektrickým strojům*, VŠSE Plzeň 1989

## Seznam příloh

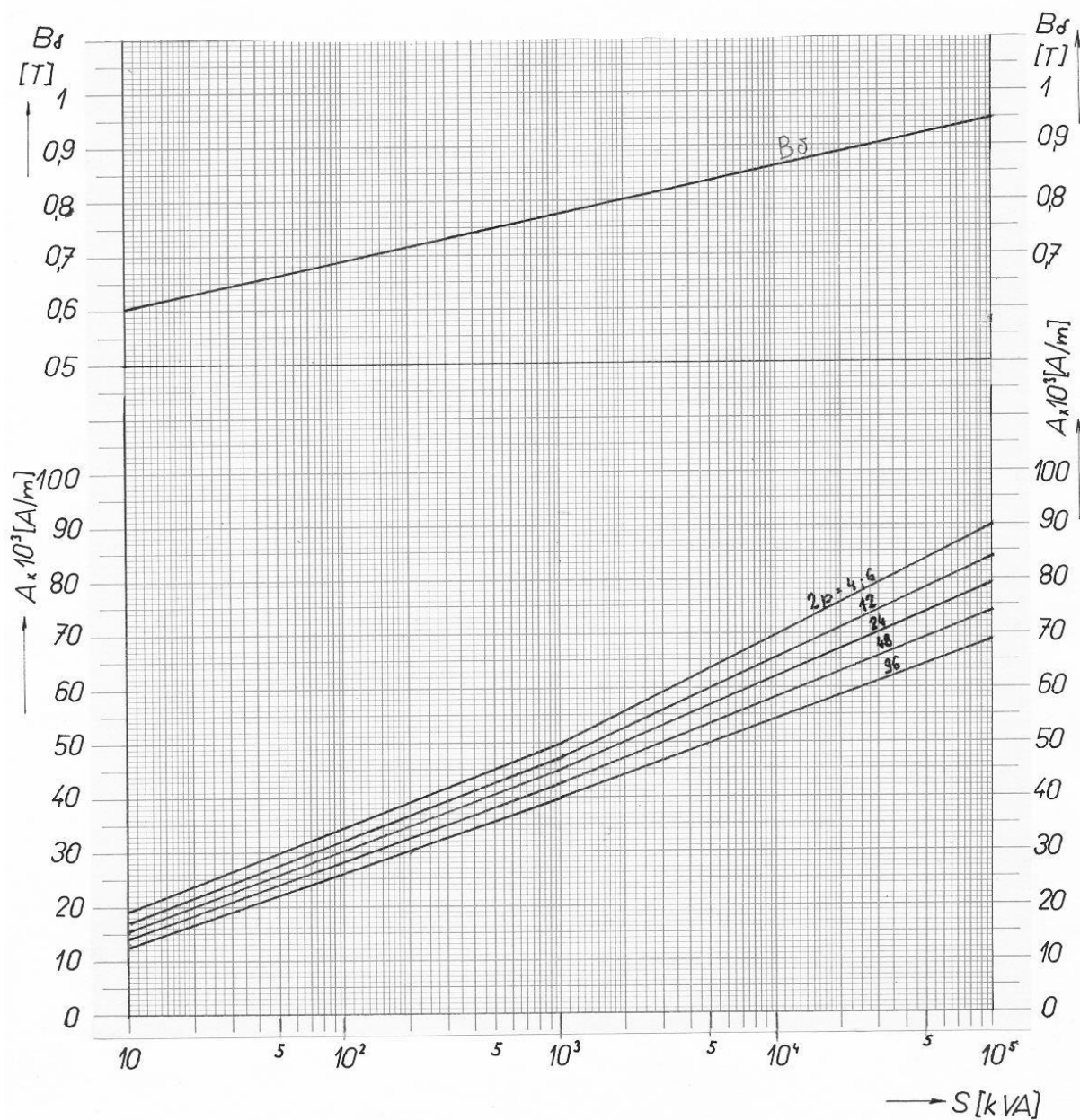
- [1] Graf č.1 určující indukci ve vzduchové mezeře a obvodovou proudovou hustotu
- [2] Graf č.2 pro odečet velikostí statoru stroje
- [3] Graf č.3 pro odečet činitelů
- [4] Graf č.4 pro odečet činitelů
- [5] Graf č.5 pro odečet normalizovaných rozměrů měděných pásů dle ČSN 42 8308
- [6] Graf č.6 pro 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] Příčný řez stroje
- [12] Podélný řez stroje
- [13] Řez statorovou drážkou

*Přílohy 1-10 zdroj [6]*

### 3 Přílohy

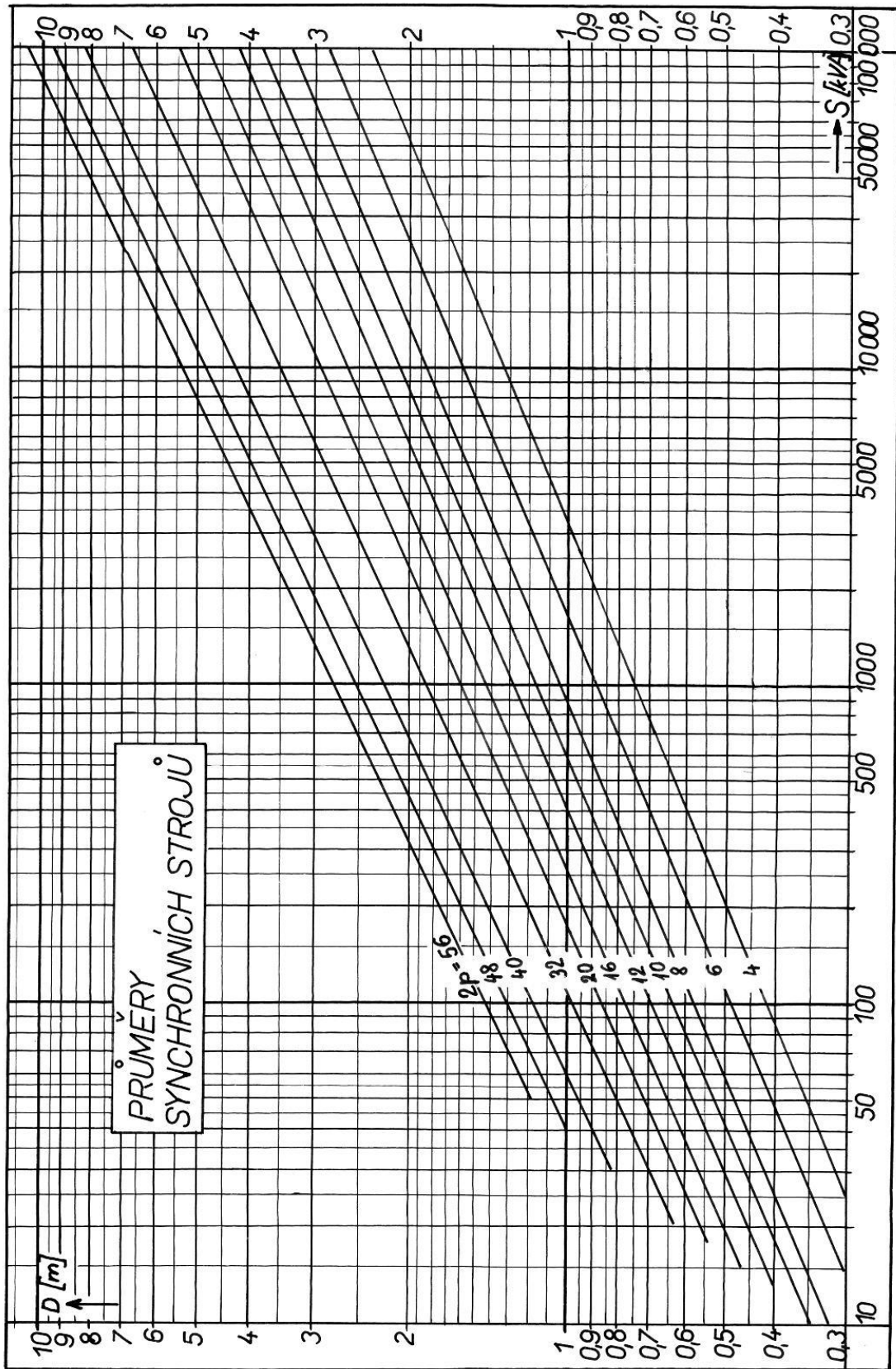
$B_{\delta}$  - indukce ve vzduchové mezeře

A - obvodová proudová hustota



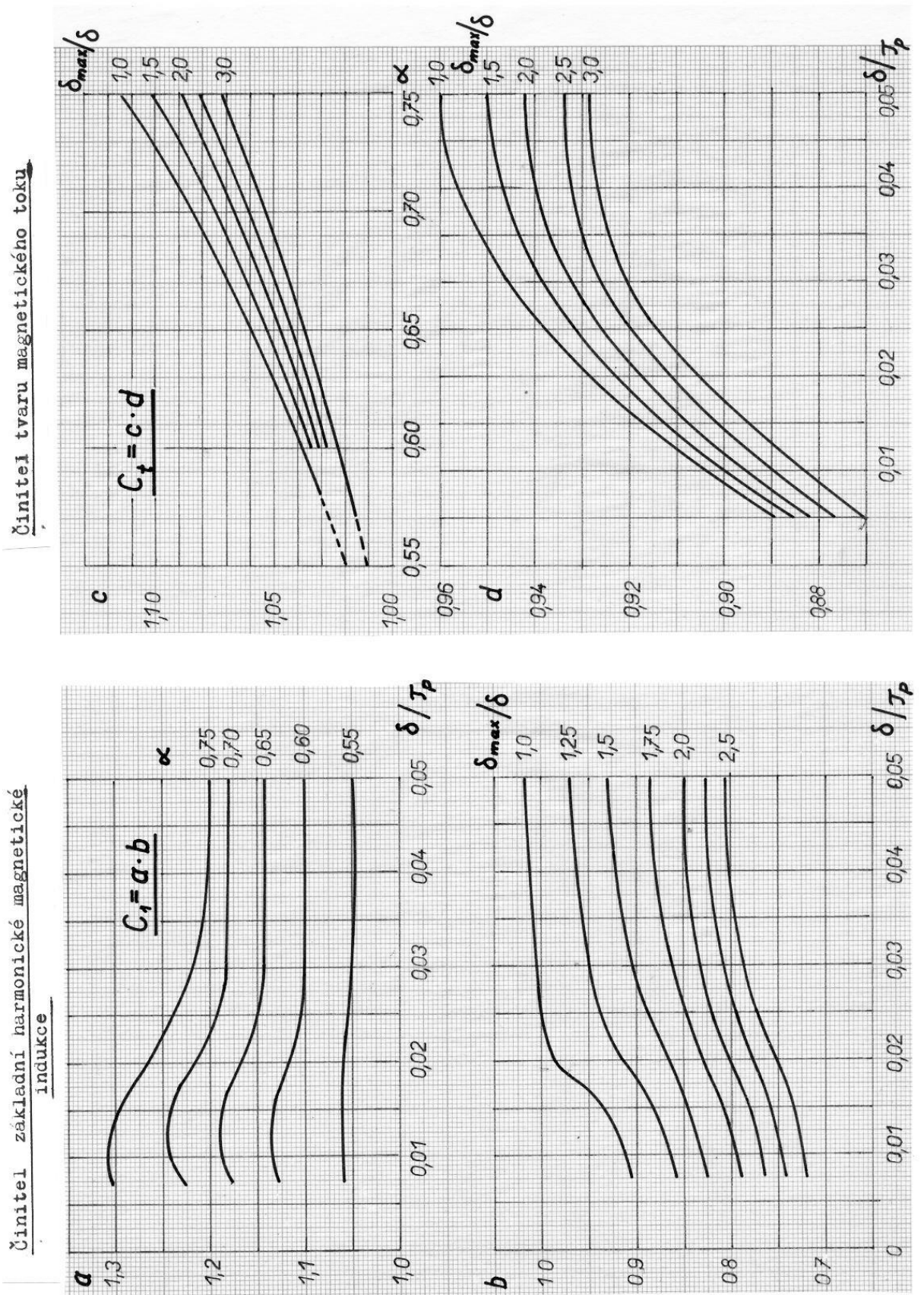
Graf č.1 určující indukci ve vzduchové mezeře a obvodovou proudovou hustotu

- 41 -



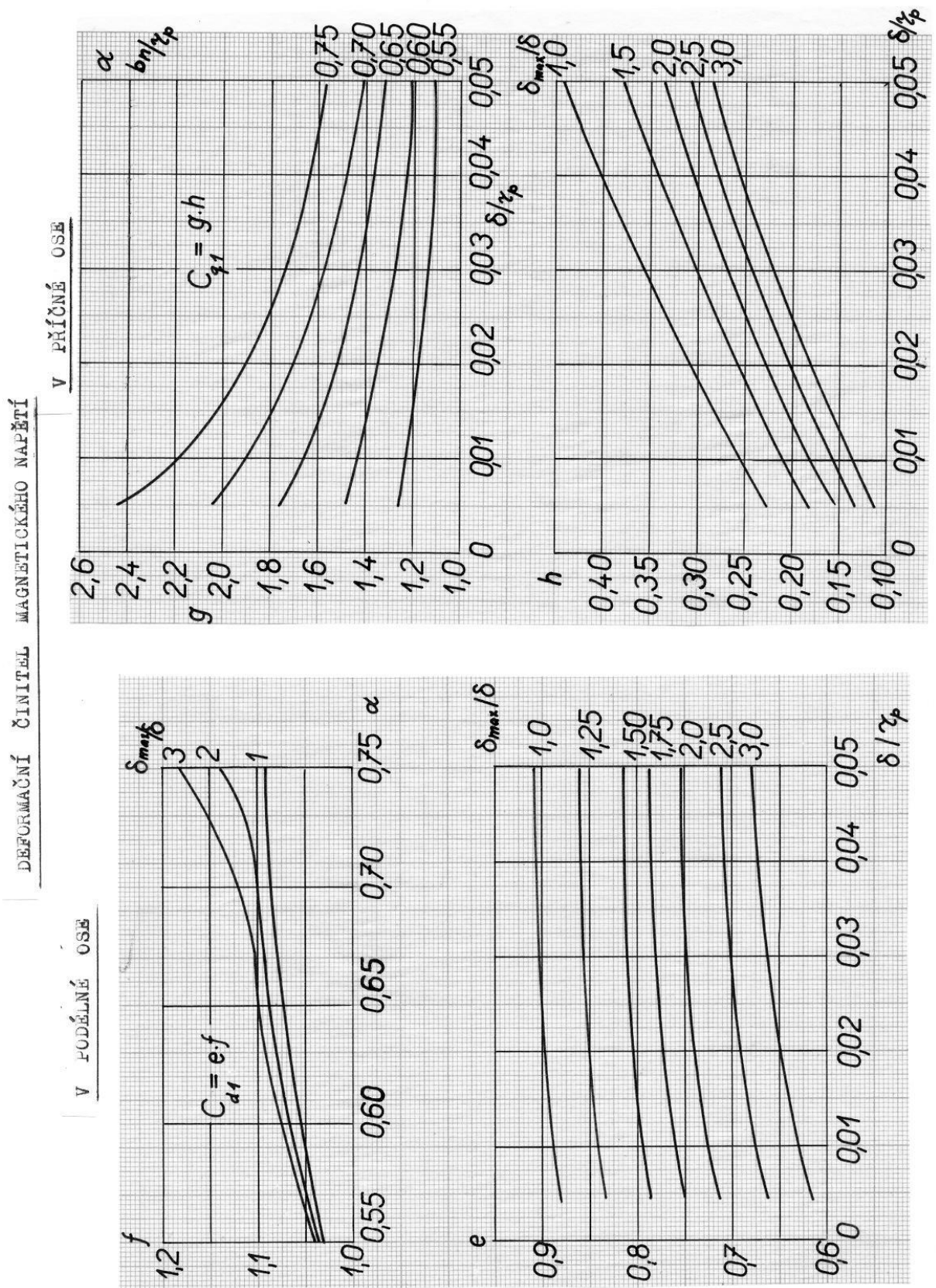
Graf č.2 pro odečet velikostí statoru stroje

-45-



Graf č.3 pro odečet činitelů

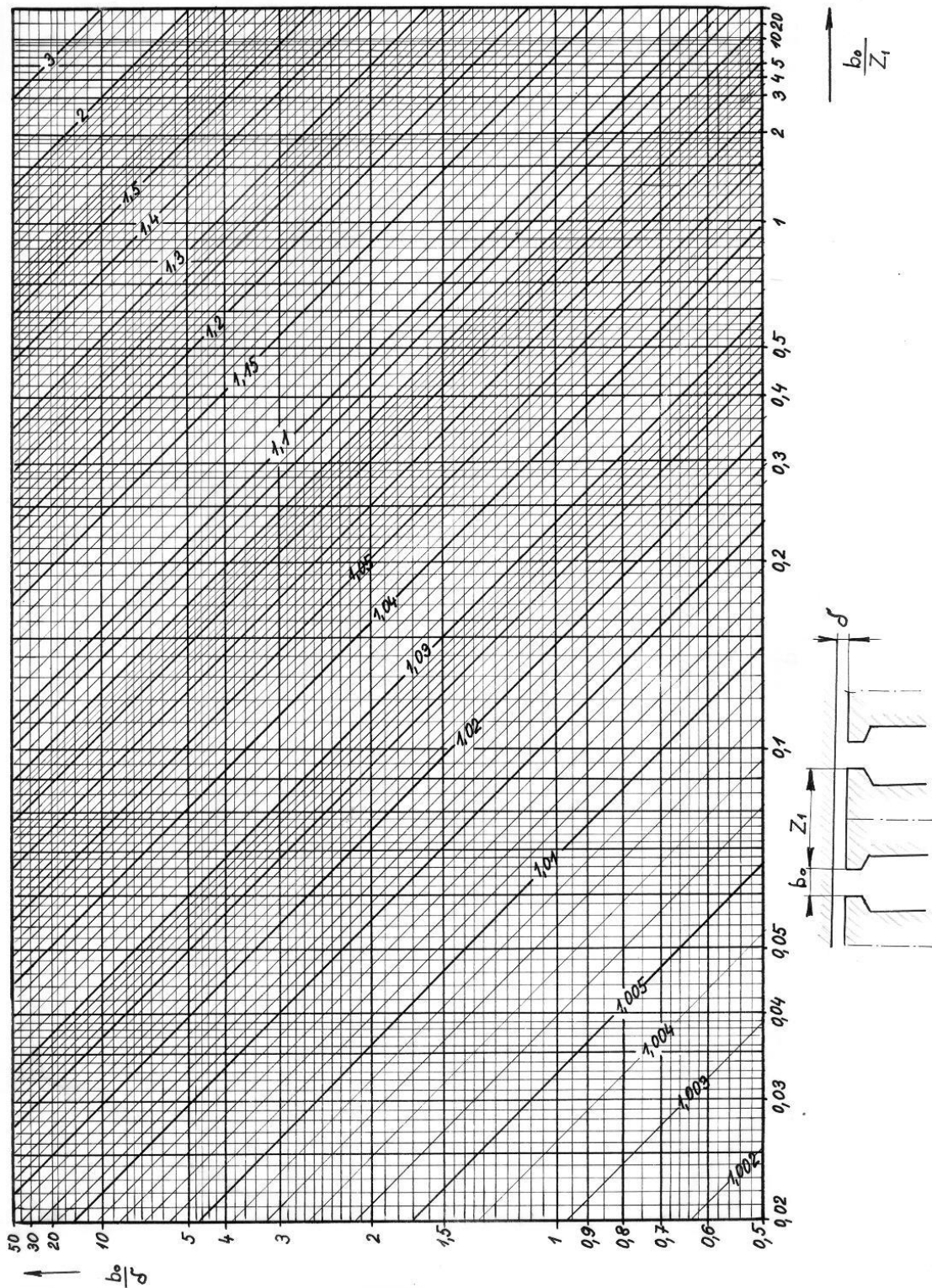




Graf č.4 pro odečet činitelů

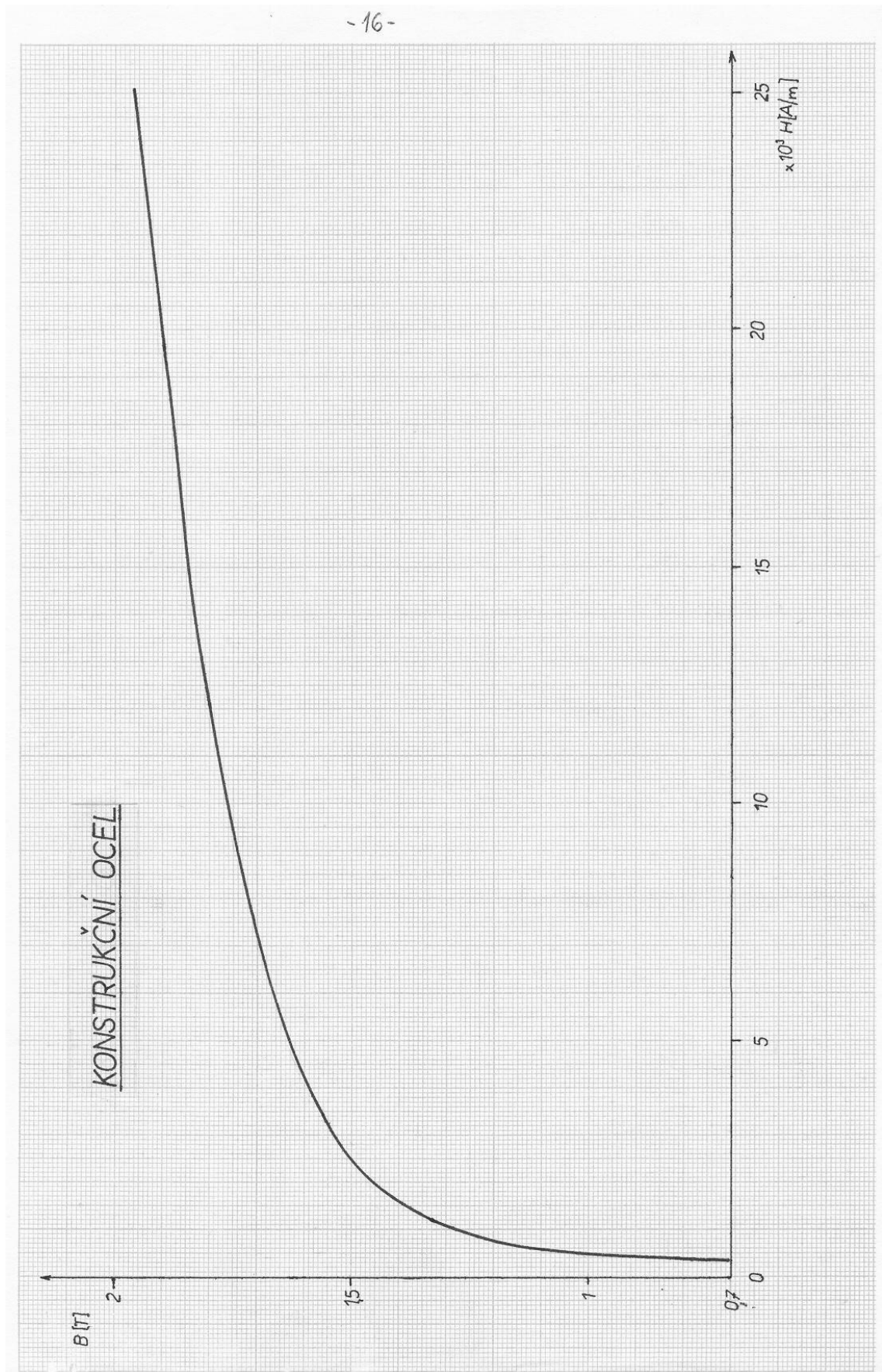


CARTERŮV ČINITEL NA DRÁŽKOVÁNÍ



Graf č.6 pro odečet Carterova činitele na drážkování

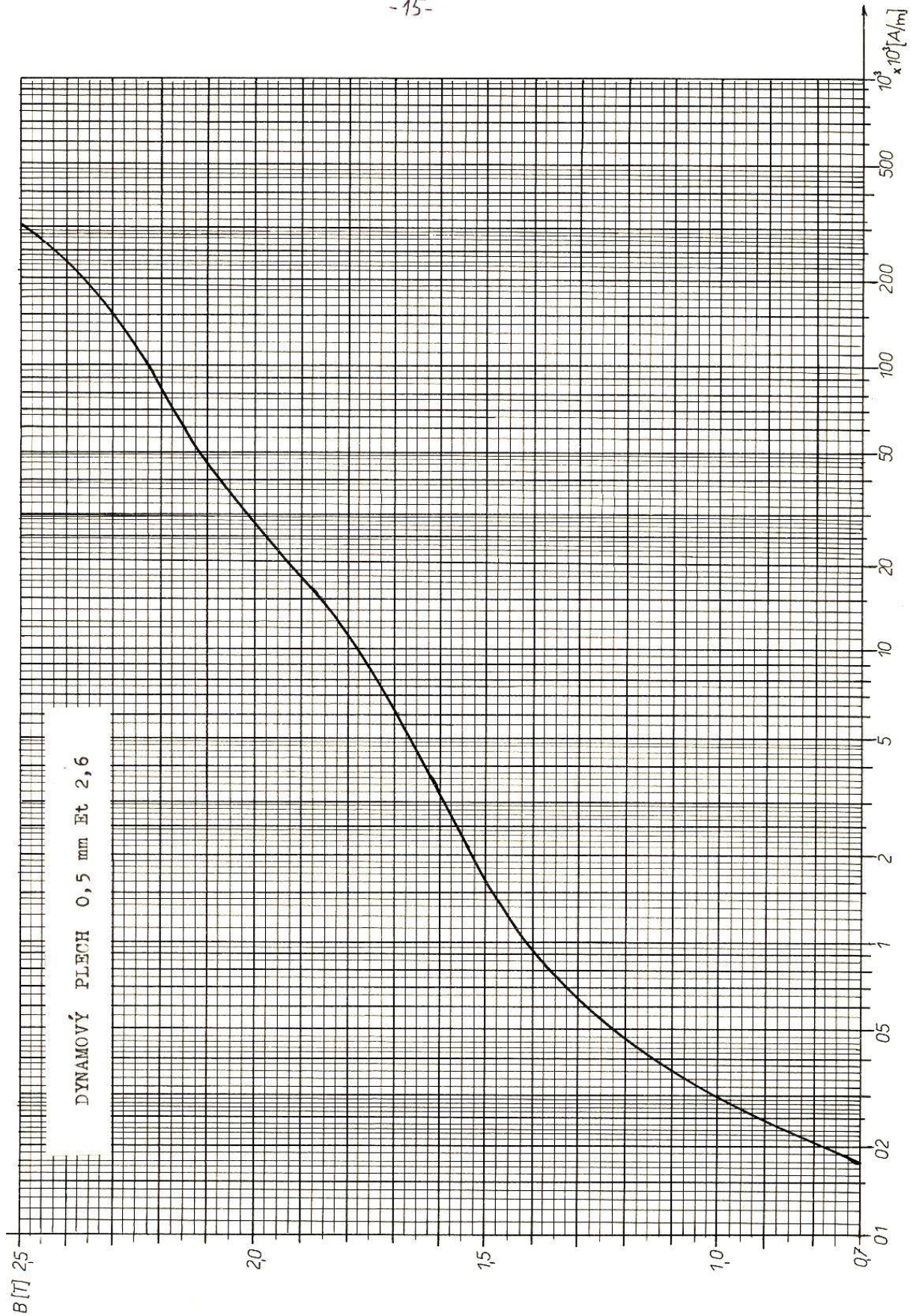




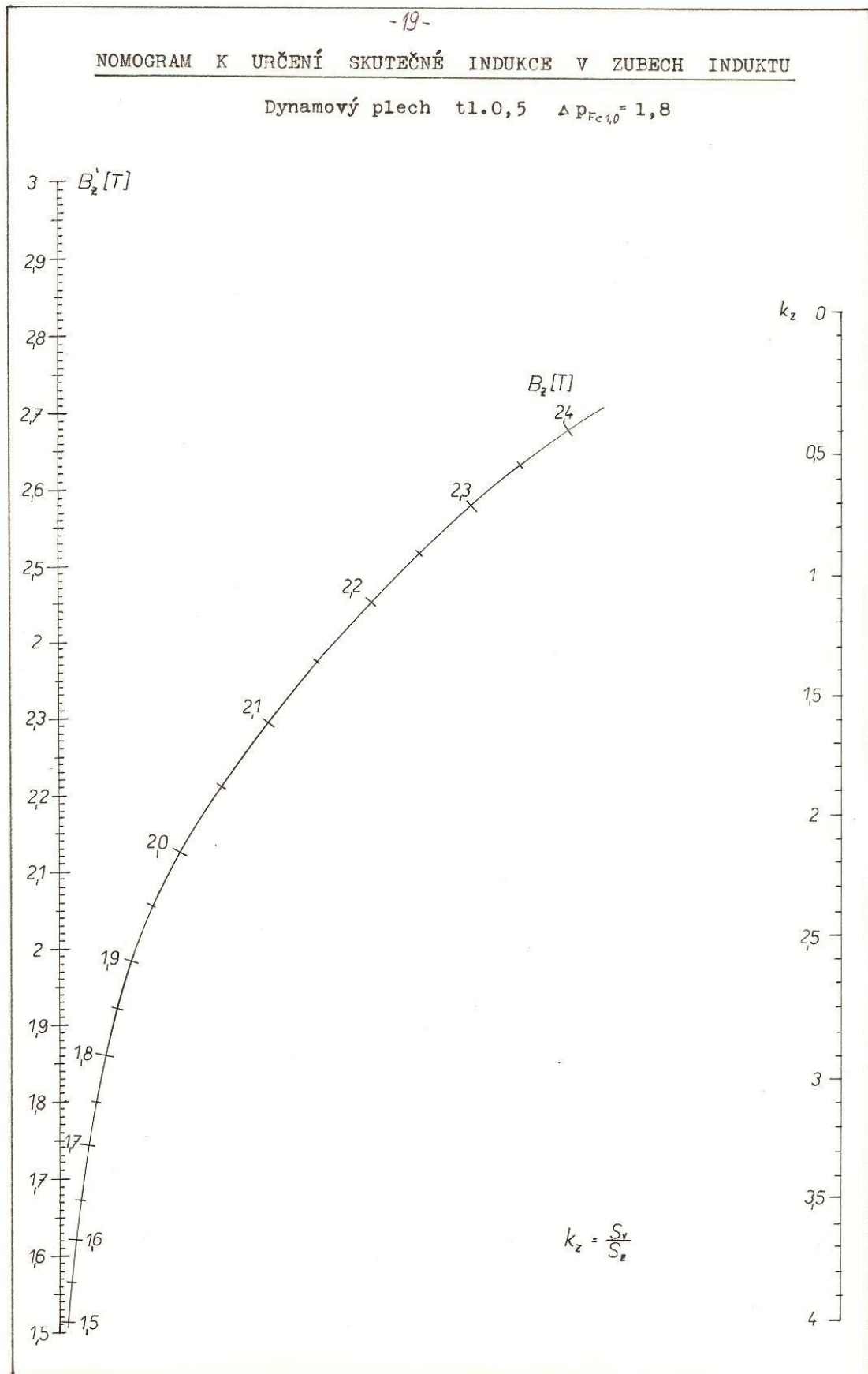
Graf č.7 Magnetizační křivka konstrukční oceli



-15-

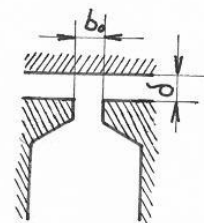
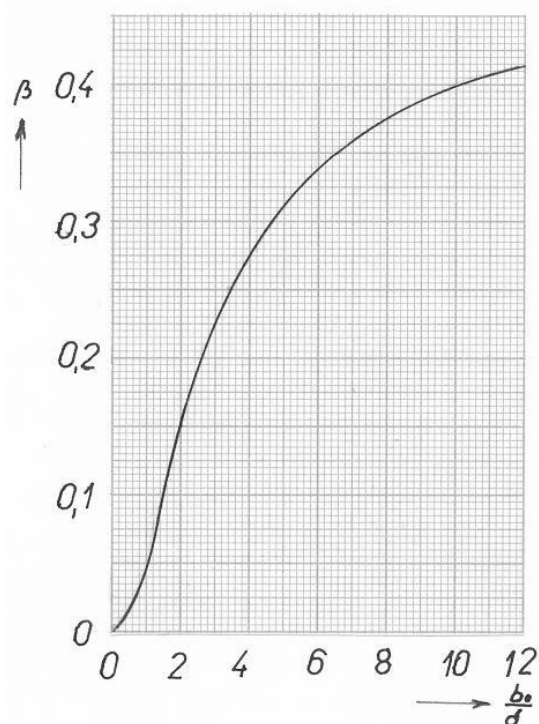


Graf č.8 Magnetizační křivka dynamového plechu



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

$k_{\sigma, \beta}$  - činitelé povrchových ztrát v pólovém nastavci

Činitel mechanických ztrát :

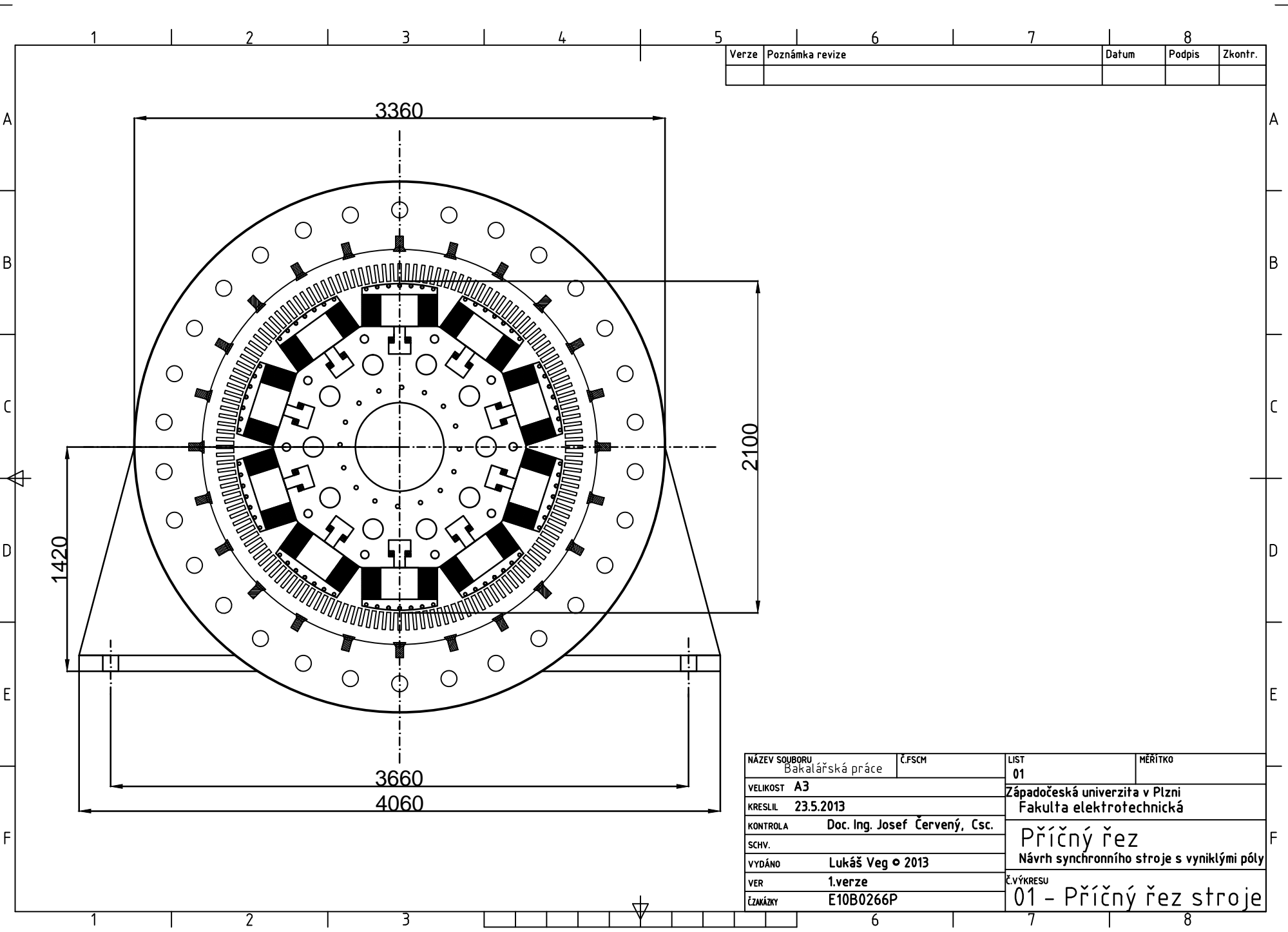
A = 1,1 ÷ 1,5 pomalub. alternátor

0,8 ÷ 1,1 rychloběžné alt.

0,8 ÷ 1 turboalternátor

Graf č. 10 Určení činitelů povrchových ztrát



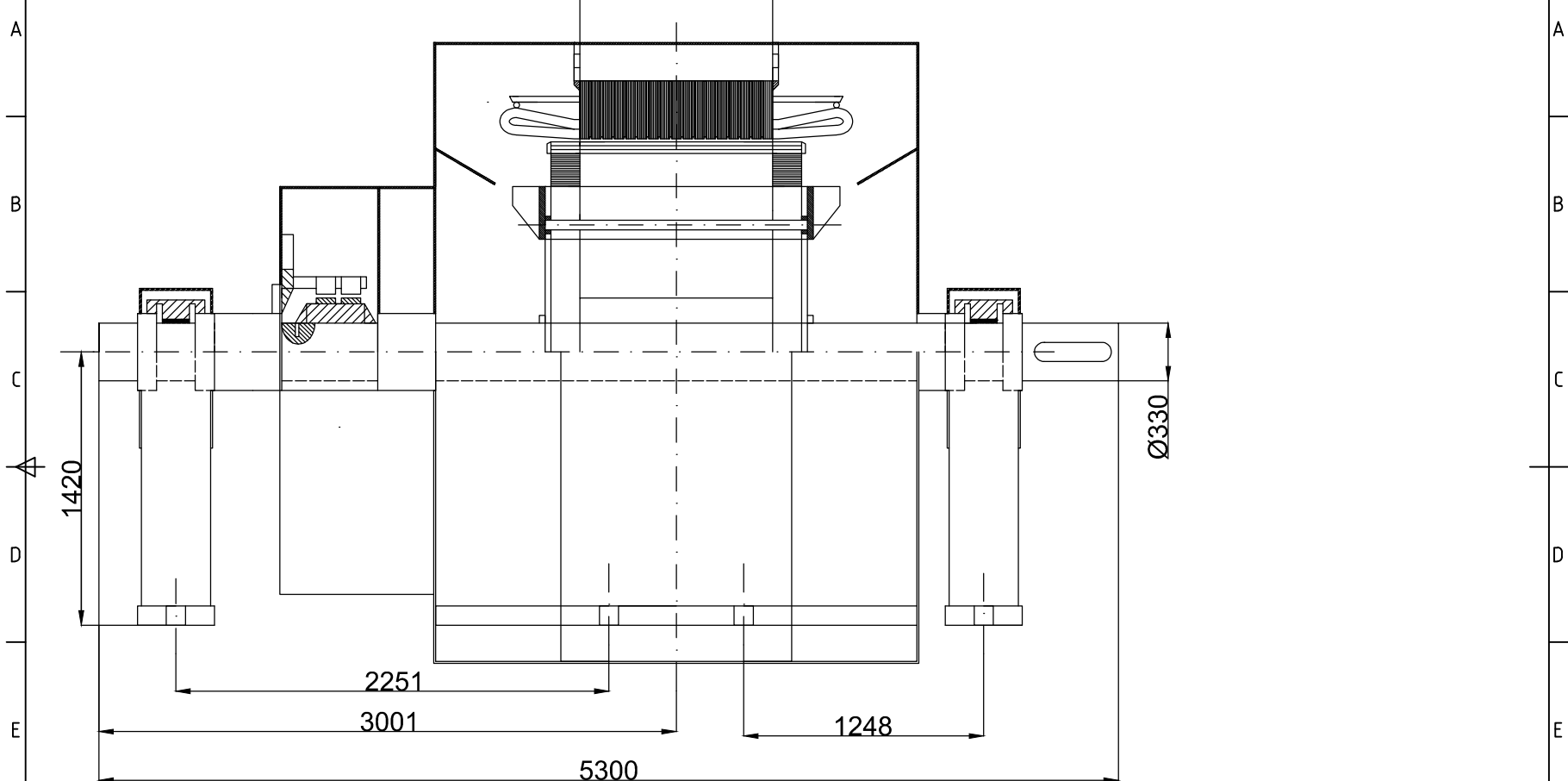


Verze	Poznámka revize	Datum	Podpis	Zkontr.

NÁZEV SOUBORU Bakalářská práce	Č.FSCM	LIST 01	MÉRÍTKO
VELIKOST A3	Západočeská univerzita v Plzni Fakulta elektrotechnická		
KRESLIL 23.5.2013	Příčný řez Návrh synchronního stroje s vyniklými póly		
KONTROLA Doc. Ing. Josef Červený, Csc.	Č.VÝKRESU 01 - Příčný řez stroje		
SCHV.			
VYDÁNO Lukáš Veg © 2013			
VER 1.verze			
ČZAKÁZKY E10B0266P			

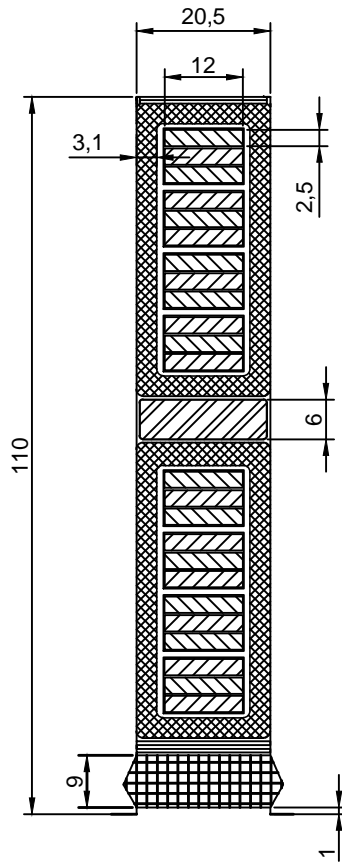


Verze	Poznámka revize	Datum	Podpis	Zkontr.



NÁZEV SOUBORU Bakalářská práce	Č.FSCH	LIST 02	MĚŘÍTKO
VELIKOST A3	Západočeská univerzita v Plzni Fakulta elektrotechnická		
KRESLIL 23.5.2013	Podélný řez Návrh synchronního stroje s vyniklými póly		
KONTROLA Doc. Ing. Josef Červený, Csc.	Č.VÝKRESU		
SCHV.	02-Podélný řez stroje		
VYDÁNO Lukáš Veg © 2013			
VER 1.verze			
ČÍSLO E10B0266P			

Verze	Poznámka revize	Datum	Podpis	Zkontr.



NÁZEV SOUBORU Bakalářská práce	Č.FSCM	LIST 03	MĚŘÍTKO 1:1
VELIKOST A4	Západočeská univerzita v Plzni Fakulta elektrotechnická		
KRESLIL 23.5.2013	Řez drážkou statoru Návrh synchronního stroje s vyniklými póly		
KONTROLA Doc. Ing. Josef Červený, Csc.	F		
SCHV.			
VYDÁNO Lukáš Veg © 2013	Č.VÝKRESU		
VER 1.verze	03 - Řez drážkou		
ČZAKÁZKY E10B0266P			