ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Návrh bezkartáčového budiče pro dvoupólové synchronní generátory

Bc. Vít Matrka **2013**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: **2012/2013**

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení:	**Vít MATRKA**
Osobní číslo:	**E11N0071P**
Studijní program:	**N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor:	**Průmyslová elektronika a elektromechanika**
Název tématu:	**Návrh bezkartáčového budiče pro dvoupólové synchronní generátory**
Zadávající katedra:	**Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

Zásady pro vypracování:

1. Parametry budiče: 640 kW; 1200 A; 534 V; 3000 ot./min. pro trvalý provoz 1710 kW; 1960 A; /873 V; 3000 ot./min. pro nárazový provoz po dobu 10 sekund. Zkušební otáčky: 120 % jmenovitých po dobu 2 minut.
2. Elektromagnetický návrh.
3. Konstrukční návrh.
4. Mechanická kontrola u vybraných částí budiče.

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

1. **L. Cigánek: Stavba elektrických strojů**
2. **V. List, J. Hak a kol.: Technický průvodce 12, Elektrotechnika 2**

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

Datum zadání diplomové práce: **15. října 2012**
Termín odevzdání diplomové práce: **9. května 2013**

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

L.S.

Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2012

Anotace

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na návrh a konstrukci bezkartáčového budiče pro dvoupólové synchronní generátory.

Klíčová slova

Synchronní stroj s bezkartáčovým budícím systémem, letmo uložený synchronní stroj, diodový usměrňovač, střídavé vinutí, budící vinutí, výpočet a charakteristika naprázdno bezkartáčového budiče, návrh a konstrukce bezkartáčového budiče.

Abstract

Presented diploma thesis is focused on design and construction of the brushless exciter for 2-pole synchronous generators.

Key words

Synchronous machine with brushless excitation system, briefly stored synchronous machine, diode rectifiers, AC winding, field winding, calculation and load characteristics of the brushless exciter, design and construction of brushless exciter.

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 diplomové práce je legální.

…….

V Plzni dne 2.5.2013 Vít Matrka

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Doc. Ing. Josefu Červenému, CSc. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce. Dále děkuji firmě Brush-SEM s.r.o. v Plzni za umožnění pracovat na bezkartáčovém budiči na výpočetní technice a v neposlední řadě velké díky patří mému konzultantovi Ing. Cyrilu Polívkovi za obětovaný čas při konzultacích ohledně návrhu a konstrukce a modelování stroje.

Obsah

OBSAH **8**

ÚVOD **9**

SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ **11**

1 NÁVRH BEZKARTÁČOVÉHO BUDIČE **19**

1.1 NÁVRH USMĚRŇOVAČE 19
1.2 VÝPOČET HLAVNÍCH ROZMĚRŮ STROJE 21
1.3 NÁVRH VINUTÍ 23
1.3.1 Volba základních parametrů vinutí a jeho výpočet *23*
1.3.2 výpočet kroků vinutí, činitelů vinutí a efektivní a celková délka budiče *24*
1.3.3 Návrh drážky stroje, izolačního systému v drážce a návrh vodičů kotvy *28*
1.3.4 Výpočet odporu vinutí jedné fáze, rozptylové reaktance *30*
1.4 NÁVRH MAGNETICKÉHO OBVODU STROJE 33
1.4.1 Výpočet magnetického toku, vzduchové mezery, magnetické napětí reakce kotvy *33*
1.4.2 Dimenzování rozměrů magnetického obvodu *34*
1.5 VÝPOČET MAGNETIZAČNÍ CHARAKTERISTIKY STROJE 35
1.5.1 Charakteristika naprázdno *36*
1.6 NÁVRH BUDÍCÍHO VINUTÍ 36
1.7 ZTRÁTY A ÚČINNOST BUDIČE 38

2 MECHANICKÁ KONTROLA U VYBRANÝCH ČÁSTÍ BUDIČE **41**

2.1 VÝPOČET NAMÁHÁNÍ DRÁŽKOVÝCH KLÍNŮ 41
2.2 VÝPOČET BANDÁŽÍ ČEL VINUTÍ A KONTROLA PROSTORU PRO BANDÁŽ 44
2.3 VÝPOČET NAMÁHÁNÍ ZUBU ROTORU ODSTŘEDIVOU SILOU 48
2.4 VÝPOČET HŘÍDELE BEZKARTÁČOVÉHO BUDIČE 49

3 ZÁVĚR **51**

POUŽITÁ LITERATURA **52**

PŘÍLOHY **1**

Úvod

Návrh a konstrukci bezkartáčového budiče jsem si vybral hlavně proto, že tato problematika doposud nebyla studenty zpracována v takovém množství, jako například synchronní generátory vyšších výkonů, nebo například stejnosměrné či asynchronní motory nebo generátory.

Právě proto jsem si vyjednal spolupráci s firmou Brush-SEM s.r.o. na konkrétním návrhu bezkartáčového budiče – letmo uloženého. Pro zjednodušení a zlevnění výroby prototypového budiče jsem po domluvě s výpočtáři a konstruktéry mechanické konstrukce z výše uvedené firmy zvolil vycházet z již sériově vyráběného bezkartáčového budiče. Prakticky jde o návrh budiče vyššího výkonu pro použití na výkonnějších vzduchem chlazených generátorech.

V diplomové práci jsem se zaměřil na elektromagnetický, konstrukční a mechanický návrh problematiky týkající se letmo uložených bezkartáčových budičů. Návrh spočíval v návrhu trojfázového vinutí zapojeného do hvězdy, výpočtu proudů návrhu průřezů vodičů ve vinutí. Jejich zapojení je shrnuto v Tingleyho schématu uvedeném v příloze [3]. Dále jsem navrhoval izolační systém stroje, zabýval jsem se parametry navrženého vinutí (výpočet odporu jedné fáze, procentní hodnotě odporu a procentní hodnotě reaktance vinutí). Poté jsem určoval magnetické napětí reakce kotvy v podélné a příčné ose. Následovalo dimenzování magnetického obvodu, kde se počítá s magnetickým tokem tekoucím přes různé části stroje, výpočet a volba rozměrů částí stroje a dimenzování velikosti vzduchové mezery. Další bod mé práce jsem věnoval výpočtu charakteristiky naprázdno. Její výpočet byl značně komplikovaný, protože jsem se snažil dosáhnout maximální přesnosti, počítal jsem jednotlivé body charakteristiky soustavou dvou tabulek v tabulkovém procesoru MS Excel. Nakreslil jsem charakteristiku naprázdno a z ní určil magnetické budící napětí stroje pro jeho jmenovité zatížení. Další součástí byl návrh budících cívek synchronního generátoru (jak počet závitů, tak rozměry) a určení jejich orientačního oteplení a dále výpočet jouleových ztrát v budících cívkách. Poté jsem se věnoval celkovému určení ztrát v jednotlivých částech stroje a výpočtu účinnosti bezkartáčového budiče. Jako poslední věc jsem navrhnutý stroj modeloval v počítačovém programu Autocad Inventor 3D. Celé modelování probíhalo ve firmě Brush-SEM, kde mi byla poskytnuta možnost pracovat na 3D modelu. V příloze [15] je uvedeno několik pohledů na stroj namodelovaný již ve zmiňovaném programu. Pro lepší orientaci jsou některé části stroje odlišeny různými barvami. Následovalo několik základních mechanických výpočtů, kde jsem navrhoval a počítal bezpečnost při dimenzování klínů při

působení odstředivých sil způsobených hmotností vinutí kotvy. Dále jsem počítal počet závitů bandáže z bandážové kompozitní pásky Hyperten 2000HP. Mezi další mechanické výpočty provedené v této diplomové práci patří dimenzování zubu působením odstředivé síly způsobené vlastní vahou zubu. Poslední mechanický výpočet se zaměřoval na návrh a výpočet hřídele s osovým vývrtem.

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na návrh budiče, jeho konstrukční uspořádání, a výkresovou dokumentaci včetně 3D modelu v 3D softwaru na PC.

Seznam zkratek a symbolů

U_D .....Napětí na stejnosměrné straně usměrňovače[V]

U_S .....Napětí na střídavé straně usměrňovače[V]

P .....Činný výkon stroje[kW]

S .....Zdánlivý výkon stroje [kVA]

$\cos\varphi$ .....Účiník stroje[-]

n .....Jmenovité otáčky stroje $[ot / \min]$

m .....Počet fází stroje[-]

m' .....Matematický počet fází[-]

U_F .....Fázové napětí kotvy stroje[V]

I_F .....Fázový proud kotvy stroje [A]

D_1 .....Průměr kotvy rotoru[m]

α .....Činitel pólového krytí[-]

p .....Počet pólpárových dvojic[-]

t_p .....Mezipólová rozteč[m]

Q_1 .....Počet drážek induktu stroje[-]

q .....Počet drážek na pól a fázi[-]

Q .....Konečný počet drážek rotoru stroje[-]

Q_p .....Počet drážek na pól[-]

Q_f .....Počet drážek na fázi[-]

N_S .....Počet závitů v sérii jedné fáze[-]

n_d .....Celkový počet vodičů v drážce kotvy stroje[-]

$a_{\approx}$ .....Počet paralelních větví každé fáze střídavého vinutí[-]

A .....Obvodová proudová hustota $\left[\frac{A}{m}\right]$

β .....Činitel zkrácení kroku[-]

y_{1d} .....Zvolený cívkový krok[-]

y_k .....Krok na komutátoru[-]

K .....Počet lamel komutátoru[-]

a_{ss} .....Konstanta pro sériové vinutí[-]

u .....Konstanta rozložení cívkových stran v drážce stroje[-]

y_1 .....Přední cívkový krok[-]

y_2 .....Zadní cívkový krok[-]

k_{vv} .....Činitel vinutí[-]

C.....Essonův činitel elektromagnetického využití stroje $\left[\frac{W}{m^3 \frac{ot}{\min}}\right]$

l_e .....Efektivní délka stroje[m]

$š_k$ .....Šířka radiálního chladícího kanálu[mm]

$š_p$ .....Šířka paketů plechového svazku rotoru[mm]

i .....Počet paketů rotorového svazku[-]

i_k .....Počet chladících kanálů rotoru[-]

L .....Celková délka stroje[mm]

t_{d1} .....Drážková rozteč na obvodu kotvy[mm]

z_1 .....Šířka zubu[mm]

b_d .....Šířka drážky kotvy stroje[mm]

B_δ .....Magnetická indukce ve vzduchové mezeře[T]

$B_{Z1}^{´}$ .....Magnetická indukce v kořeni zubu[T]

k_{Fe} .....Činitel plnění plechového svazku kotvy[-]

$S_{Cus}^{´}$ .....Průřez vodiče kotvy[mm^2]

$\sigma_{Cus}^{´}$ .....Vypočtená proudová hustota vodiče kotvy $\left[\frac{A}{mm^2}\right]$

b_v .....Šířka vodiče vinutí kotvy[mm]

h_{vod} .....Výška vodiče vinutí kotvy[mm]

h_v .....Výška vodiče děleného do větví[mm]

r_{1zaob} .....Poloměr zaoblení vodiče kotvy[mm]

S_{CusMAT}^{3v} .....Matematický průřez vodiče kotvy[mm^2]

S_{Cus} .....Skutečný průřez vodiče kotvy[mm^2]

σ_{Cus} .....Skutečná proudová hustota vodiče kotvy $\left[\frac{A}{mm^2}\right]$

R'_{1f} .....Elektrický odpor jedné fáze vinutí kotvy $[\Omega]$

ξ .....náhradní výška vodiče vinutí kotvy $[-]$

k_{Cu} .....Činitel zvýšení elektrického odporu vinutí kotvy $[-]$

$R_{1f/20}$ .....Elektrický odpor vinutí jedné fáze při 20°C $[\Omega]$

u_R .....Procentní hodnota úbytku napětí na ohmickém odporu fáze $[\%]$

X_σ .....Rozptylová reaktance vinutí kotvy $[\Omega]$

u_σ .....Procentní hodnota rozptylové reaktance jedné fáze $[\%]$

Φ .....Magnetický tok strojem $[Wb]$

δ .....Výška vzduchové mezery $[mm]$

F_A .....Magnetické napětí reakce kotvy $[A]$

F_{ad} .....Magnetické napětí reakce kotvy v podélném směru $[A]$

F_{aq} .....Magnetické napětí reakce kotvy v příčném směru $[A]$

$š_p$ .....Šířka pólu $[mm]$

h_p .....Výška pólu $[mm]$

$š_n$ .....Šířka nástavce $[mm]$

h_n .....Výška nástavce $[mm]$

h_{js} .....Výška jha statoru $[mm]$

B_{js} .....Magnetická indukce ve statoru stroje $[T]$

h_{jr} .....Výška jha rotoru $[mm]$

B_{jr} .....Magnetická indukce v rotoru stroje $[T]$

l_p .....Délka jha pólu $[mm]$

l_s .....Délka jha statoru $[mm]$

l_r .....Délka jha rotoru $[mm]$

k_{ck} .....Carterův činitel $[-]$

F_δ .....Magnetické napětí na vzduchové mezeře $[A]$

F_b .....Magnetické napětí budícího vinutí $[A]$

a .....Prostor pod pólovým nástavcem na budící cívku $[m]$

l_{bs} .....Střední délka závitu budícího vinutí $[m]$

S'_{Cub} .....Průřez budícího vinutí [mm^2]

h_v .....Šířka neizolovaného vodiče budícího vinutí $[mm]$

b_v .....Výška neizolovaného vodiče budícího vinutí $[mm]$

h_{vi} .....Šířka izolovaného vodiče budícího vinutí $[mm]$

b_{vi} .....Výška izolovaného vodiče budícího vinutí $[mm]$

S_{Cub} .....Průřez budícího vinutí [mm^2]

σ_{Cub}.....Proudová hustota v budícím vinutí $\left[\frac{A}{mm^2}\right]$

N_b .....Počet závitů budící cívky $[-]$

I_b .....Budící proud $[A]$

n'_p .....Počet poloh vodičů budící cívky vedle sebe $[-]$

n_p .....Počet poloh vodičů budící cívky vedle sebe $[-]$

b_c .....Tloušťka cívky $[mm]$

N'_{p1} .....Počet závitů v jedné poloze vodiče budící cívky $[-]$

h_c .....Výška budící cívky $[mm]$

h_p .....Výška cívky včetně kostřičky $[mm]$

l_{be} .....Vnější obvod budící cívky $[m]$

O_{2pc} .....Ochlazovací plocha všech budících cívek $[m2]$

$R_{b/100}$ .....Stejnosměrný odpor budících cívek $[\Omega]$

ΔP_{Cub} .....Jouleovy ztráty v budícím vinutí $[W]$

$\Delta \vartheta_{Cub}$ .....Oteplení budících cívek $[°C]$

ΔP_{Cu1} .....Jouleovy ztráty ve vinutí kotvy $[W]$

ΔP_{Dioda} .....Jouleovy ztráty na diodě $[W]$

$\Delta P_{Usč}$ .....Celkové ztráty na usměrňovači $[W]$

m_{Fer} .....hmotnost rotorových plechů $[kg]$

ΔP_{Fer} .....Ztráty v jádře rotoru stroje $[W]$

m_{Fez} .....Hmotnost zubů rotoru stroje $[kg]$

ΔP_{Fez}.....Ztráty v zubech stroje $[W]$

ΔP_p .....Povrchové ztráty $[W]$

$\Delta P_{\mathrm{Pr}id}$ .....Přídavné ztráty ve stroji $[W]$

ΔP .....Celkové ztráty vzniklé ve stroje $[W]$

η .....Celková účinnost stroje $[\%]$

n_{MAX} .....Zkušební otáčky stroje $[ot/\min]$

ρ_{IZ} .....Hustota izolace $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$

ρ_V .....Hustota vodiče kotvy $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$

S_{DR} .....Plocha drážky pod klínem $[mm^2]$

S_{KL} .....Plocha rotorového klínu $[mm^2]$

m_{VDR} .....Hmotnost vinutí v drážce stroje $[kg]$

m_{IZDR} .....Hmotnost izolace v drážce stroje $[kg]$

m_{KL} .....Hmotnost rotorového klínu $[kg]$

V_{VDR} .....Objem vodiče v drážkové části $[m^3]$

V_{IZDR} .....Objem izolace v drážkové části $[m^3]$

V_{KL} .....Objem rotorového klínu v drážkové části $[m^3]$

m_{VDR1cm} .....Hmotnost vodiče v drážkové části vztažená na jednotku délky $\left[\frac{kg}{cm}\right]$

$m_{IZDR1cm}$ .....Hmotnost izolace v drážkové části vztažená na jednotku délky $\left[\frac{kg}{cm}\right]$

m_{KL1cm} .....Hmotnost rotorového klínu vztažená na jednotku délky $\left[\frac{kg}{cm}\right]$

F_O .....Odstředivá síla $[N]$

m .....Hmotnost $[kg]$

r .....Poloměr $[m]$

ω .....Úhlová rychlost $[rad/s]$

r_K .....Těžiště působení odstředivé síly vyvolané klínem $[m]$

r_V .....Těžiště působení odstředivé síly vyvolané hmotností v drážce $[m]$

a_{KL} .....Šířka základny klínu $[mm]$

p_{KL} .....Šířka vrchní strany klínu $[mm]$

v_{KL} .....Výška klínu $[mm]$

F_{OKL} .....Odstředivá síla vyvolaná hmotností klínu $[N]$

F_{OV} .....Odstředivá síla vyvolaná hmotností vinutí a izolace $[N]$

A_Y .....Reakce vyvolaná odstředivou silou působící ve svislé ose $[N]$

A_X .....Reakce vyvolaná odstředivou silou ve vodorovné ose $[N]$

T .....Síla deformující klín $[N]$

α_K .....Úhel zešikmení klínu $[°]$

σ_D .....Namáhání klínu otlakem $[MPa]$

σ_O .....Namáhání klínu ohybem $[MPa]$

σ_{DC} .....Celkové namáhání klínu tlakem $[MPa]$

σ_{TC} .....Celkové namáhání klínu tahem $[MPa]$

σ_{PD} .....Maximální namáhání klínu tahem $[MPa]$

M_O .....Ohybový moment $[Nm]$

W_O .....Modul průřezu v ohybu $[m^3]$

τ_S .....Střihové namáhání $[MPa]$

τ_{MAX} .....Maximální střihové namáhání $[MPa]$

k_{KL} .....Bezpečnost při dimenzování klínů $[-]$

$m_{ZČ1C}$ .....Hmotnost jedné cívky zadního čela $[kg]$

$m_{PČ1C}$ .....Hmotnost jedné cívky předního čela $[kg]$

$m_{ZČ}$ .....Hmotnost vinutí zadního čela $[kg]$

$m_{PČ}$ .....Hmotnost vinutí předního čela $[kg]$

$V_{ZČ}$ .....Objem cívky zadního čela $[m^3]$

$V_{PČ}$ .....Objem cívky předního čela $[m^3]$

$l_{ZČ}$ .....Délka cívky zadního čela $[m]$

$l_{PČ}$ .....Délka cívky předního čela $[m]$

l_{b1} .....Délka bandáže zadního čela vinutí $[m]$

l_{b2} .....Délka bandáže předního čela vinutí $[m]$

d_{b1}, d_{b2} .....Vnější průměr bandáží $[m]$

d_{b01} .....Vnitřní průměr zadní bandáže $[m]$

d_{b02} .....Vnitřní průměr přední bandáže $[m]$

V_{b1} .....Objem prostoru zadního čela $[m^3]$

V_{b2} .....Objem prostoru předního čela $[m^3]$

V_{iz1}, V_{iz2} .....Objemy zadní a přední izolace čelního prostoru $[m^3]$

m_{iz1}, m_{iz2} .....Hmotnosti zadní a přední izolace čel $[kg]$

m_{PC}, m_{ZC} .....Celkové hmotnosti vinutí předního a zadního čela včetně izolace $[kg]$

$F_{OZČ}, F_{OPČ}$ .....Odstředivé síly vyvolané zadním a předním čelem $[N]$

$T_{ZČ}, T_{PČ}$ .....Tangenciální obvodová síla $[N]$

T_B .....Velikost síly při přetržení pásky (stav B) $[N]$

T_C .....Velikost síly při přetržení pásky (stav C) $[N]$

T_N .....Navíjecí předpětí $[N]$

$š_P$ .....Šířka izolační pásky $[mm]$

t_P .....Tloušťka izolační pásky $[mm]$

z .....Počet závitů bandážové pásky $[–]$

d_{PVIN} .....Vnější průměr na povrchu čel vinutí $[mm]$

h_{BAN} .....Prostor pro bandáž $[mm]$

$Z_{ZČ}$ .....Počet závitů bandáže vedle sebe zadního čela $[–]$

$Z_{PČ}$ .....Počet závitů bandáže vedle sebe předního čela $[–]$

$Ř_{ZČ}$ .....Počet řad na výšku bandáže zadního čela $[–]$

$Ř_{PČ}$ .....Počet řad na výšku bandáže předního čela $[–]$

$h_{ZČ}, h_{PČ}$ .....Výška bandáže zadního a předního čela $[mm]$

S_{ZUB} .....Plocha zubu rotoru $[mm^2]$

m_{ZUB} .....Hmotnost zubu délky 1cm $[kg]$

F_{OZUB} .....Odstředivá síla vyvolaná hmotností zubu $[N]$

F_{OC} .....Odstředivá síla vyvolaná od hmotnosti vinutí, klínu, váhou zubu $[N]$

$\sigma_{KOŘ}$ .....Tahové namáhání odstředivou silou na ploše u kořene zubu $[MPa]$

σ_r .....Dovolené tahové namáhání plechů rotoru $[MPa]$

k .....Bezpečnost dimenzování zubu rotoru $[–]$

d_h .....Základní průměr hřídele stroje $[mm]$

k_h .....Součinitel u výpočtu průměru hřídele stroje

w_K .....Modul průřezu v krutu pro mezikruží $[mm^3]$

D .....Vnější průměr hřídele stroje $[mm]$

d .....Vnitřní průměr vrtání hřídele $[mm]$

M_{MAX} .....Moment na hřídeli stroje při nárazovém provozu $[Nm]$

P_{MAX} .....Výkon při nárazovém provozu $[kW]$

τ_K .....Namáhání hřídele v krutu $[MPa]$

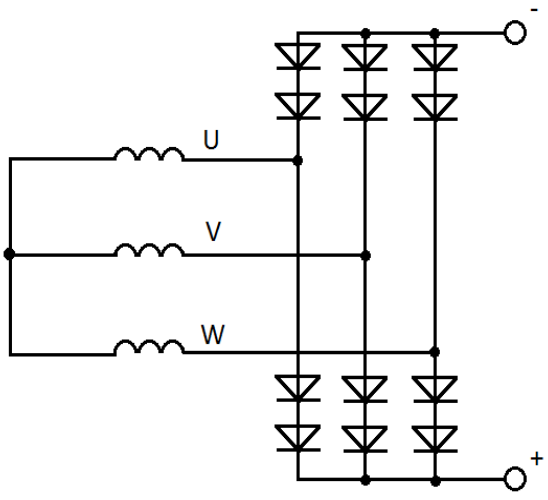
1 Návrh bezkartáčového budiče

1.1 Návrh usměrňovače

Usměrňovač je hlavní a téměř nejdůležitější součást bezkartáčového budiče. Usměrňovač je trojfázový, 6-pulzní. S ohledem na fakt, že při poruše výkonové usměrňovací diody dojde z 99 % k trvalému tvrdému zkratu (propojení anody a katody) na diodě, se kvůli zvýšení bezpečnosti a spolehlivosti používá právě dvou sériově řazených diod. Sériově zařazené diody se sice navenek mohou jevit jako zbytečné zvýšení provozních (Jouleových) ztrát na usměrňovači, které zdaleka nejsou zanedbatelné, ale protože jde v první řadě o snahu maximální spolehlivosti, použijí se právě sériově zařazené diody.

Usměrňovač je tedy rotující, na diody a chladiče sloužící k odvodu ztrát na diodách působí značné odstředivé síly, proto je třeba věnovat zvýšenou pozornost právě chladičům, které jsou určeny k odvodu ztrátového tepla na diodách.

Trojfázový neřízený usměrňovač je složen celkem z 12 diod, schéma zapojení je vidět níže.



Obrázek 1: Schéma zapojení usměrňovače budiče

V příloze [1] je vidět pohled na konstrukční uspořádání rotujícího usměrňovače včetně

chladičů a propojení na budící přívody do turbogenerátoru dutým hřídelem.

Základní dimenzování diod se odvíjí od maximálního závěrného napětí diod a taktéž proudu procházející diodou ve vodivém stavu. Vzhledem k tomu, že u předchozího bezkartáčového budiče je vinutí s nižší hodnotou budícího napětí a současně stejný budící proud, tak jsem zvolil shodné diody od firmy ABB: 5SDA 16F3806 se jmenovitými hodnotami: závěrné napětí V_{RRM}=3800V, propustný proud I_{FAM} =1620A. Další hodnoty lze vyčíst v katalogovém listu diody v příloze [2].
Ze zadání diplomové práce mám požadavek na budící napětí 534V a budící proud 1200A při trvalém provozu a pro nárazový provoz napětí 873V a 1960A působící po dobu 10s.
Nyní se budu věnovat návrhu napětí, které musí být na střídavé straně usměrňovače.

Přepočet mezi sdruženou hodnotou napětí na střídavé a střední hodnotou na straně stejnosměrného napětí pro stav naprázdno:

$$U_d = \frac{\sqrt{2}.3}{\pi} U_S \text{ a proto: } U_S = \frac{\pi.U_d}{\sqrt{2}.3} = \frac{\pi.534}{\sqrt{2}.3} = 395{,}4V \qquad (1.1)$$

Kde: U_d je hodnota napětí na stejnosměrné straně usměrňovače

U_S je hodnota sdruženého napětí usměrňovače

Co se týče proudového dimenzování usměrňovacích diod tak je třeba brát ohled na to, že diody v tomto zapojení vedou pouze po dobu $t= \frac{2.\pi}{3}$, takže skutečný efektivní proud diodami jedné fáze je třetinový. Po dobu nárazového buzení, které je stanoveno na 10s s napětím 873V a budícím proudem 1960A, je třeba dimenzovat chlazení usměrňovače tak, aby bylo schopné vzniklé teplo akumulovat do objemu vlastního chladiče, který odvádí teplo ze dvou diod. Veškerý tepelný výpočet chlazení je na tolik komplikovaný, že ani nejmodernější způsoby 3D modelování nejsou schopny přesně určit teploty diod při jmenovitém a nárazovém provozu. Tak se chladiče postupně dimenzovaly metodou zkusmo- soubory zkoušek, kdy se zkoušely různé profily chladičů, různé velikosti žeber a chladících děr, a přitom se měřily teploty na diodách. Při některých zkouškách se chladiče deformovaly, při některých byl chladící účinek dobrý, ale chladič nebyl schopný po dobu zkušebního nárazového buzení ztrátové teplo

akumulovat.

1.2 Výpočet hlavních rozměrů stroje

Při určování hlavních rozměrů stroje vycházím ze zadaných hodnot. Vzhledem k tomu, že je potřeba, aby budící proud generátoru byl co nejméně zvlněný, je třeba zvýšit frekvenci na budiči na trojnásobek frekvence jmenovité, takže se pro jmenovité otáčky zvolí frekvence 150Hz. Protože budící vinutí turbogenerátoru má konečnou indukčnost, tak pro zvlněný proud z usměrňovače se chová jako „vyhlazovací tlumivka proudu“.

Počet pólů volím tedy 6, z čehož plyne počet pólových dvojic p = 3.
Účiník podobných již vyrobených bezkartáčových budičů se pohybuje přibližně cosφ = 0,97 [-] a proto jej také v dalším výpočtu budu uvažovat stejný.

Nyní shrnu hodnoty, ze kterých bude dále prováděn výpočet budiče.

$P = 640kW$
$\cos\varphi = 0{,}97$
$n = 3000ot/\min$
$m = 3$
$U_S = 396{,}2V$

Zdánlivý výkon lze vypočítat:

$$S = \frac{P}{\cos\varphi} = \frac{640}{0{,}97} = 659{,}8kVA \qquad (1.2)$$

Pro další výpočet uvažuji zdánlivý výkon 660kVA.

Výpočet fázového napětí na střídavé straně je proveden níže.

$$U_F = \frac{U_S}{\sqrt{3}} = \frac{415{,}95}{\sqrt{3}} = 240{,}15V \qquad (1.3)$$

Fázový proud jednoduše vypočítám dosazením hodnot do následující rovnice (1.4).

$$I_F = \frac{S}{U_S\sqrt{3}} = \frac{660000}{415{,}95\sqrt{3}} = 916{,}1A \qquad (1.4)$$

Nyní již vypočtu průměr induktu. [2.]

$$D_1 = 0{,}08.(2p)^{0{,}625} S^{0{,}185} = 0{,}08.(2.3)^{0{,}625}.660000^{0{,}185} = 0{,}815m \qquad (1.5)$$

Volím průměr 0,62m. Právě proto, aby byla výroba prototypu pokud možno co nejlevnější a také aby bylo možné použít většinu přípravků, používaných při výrobě budičů s menším výkonem vyráběnými sériovou výrobou.
Dále kontroluji zvolený průměr stroje [1.] (strana 335 obr. 7.8 b), pro zdánlivý výkon 660kVA je odečtený průměr cca 0,6m, můj zvolený průměr se tedy přibližuje odečtené hodnotě z grafu pro zdánlivý výkon navrhovaného stroje.

Následně volím obvodovou proudovou hustotu na 30000A/m a indukci ve vzduchové mezeře volím 0,55T. Tato hodnota se zdá být velmi malá a též to ukazuje, že stroj je poměrně špatně magneticky využit. To je ale zvoleno záměrně proto, aby při regulaci výkonu turbogenerátoru se pohyboval budič v lineární části charakteristiky a tudíž výkon turbogenerátoru lze měnit téměř lineárně spolu s budícím napětím na budících cívkách bezkartáčového budiče.

Činitel pólového krytí volím nejvyšší možný a to $\alpha = 0{,}7$. Je zvolen proto, že stroj je střídavý, ale s komutací za pomocí diod, takže není nutné mít pomocné póly s vinutím tak jako je to u stejnosměrných strojů.

Mezipólová rozteč poté vychází:

$$t_p = \frac{\pi.D_1}{2.p} = \frac{\pi.0{,}62}{2.3} = 0{,}325m \qquad (1.6)$$

Abych mohl určit efektivní a skutečnou délku stroje, musím nejprve vypočítat činitel vinutí 1. harmonické, proto se nyní budu věnovat návrhu a dimenzování vinutí.

1.3 Návrh vinutí

1.3.1 Volba základních parametrů vinutí a jeho výpočet

Nyní jsem zvolil mezidrážkovou rozteč 26mm a výpočet celkového počtu drážek na induktu stroje je:

$$Q_1 = \frac{\pi.D_1}{t_{d1}} = \frac{\pi.0{,}62}{0{,}026} = 74{,}91 \qquad (1.7)$$

Jenže počet drážek musí být dělitelný počtem fází a počtem paralelních větví. Volím pouze jednu paralelní větev. Z toho plyne, že stroj může mít 60, 63, 66, 69, 72, 75, 78 nebo 81 drážek.

$$q = \frac{Q_1}{2pm} = \frac{74{,}91}{2.3.3} = 4{,}162 \qquad (1.8)$$

Pro další výpočty zvolím q jako celé číslo q = 4.

Z toho plyne počet drážek stroje:

$$Q = 2.p.q.m = 2.3.4.3 = 72 \qquad (1.9)$$

Dále pak počet drážek na fázi musí být celé číslo.

$$Q_f = \frac{Q}{m} = \frac{2.p.m.q}{m} = 2.p.q = 2.3.4 = 24 \qquad (1.10)$$

Nyní stanovím počet závitů vinutí jedné fáze v sérii.

$$Ns = \frac{\pi.D_1.A}{2.m.I_f} = \frac{\pi.0{,}62.30000}{2.3.916{,}1} = 10{,}63 \qquad (1.11)$$

Je třeba stanovit celkový počet vodičů v drážce kotvy stroje.

$$n_d = \frac{a_{\approx}.N_s}{p.q} = \frac{1.10{,}63}{3.4} = 0{,}883 \qquad (1.12)$$

V tomto případě je $a_{\approx}$ počet paralelních větví každé fáze střídavého vinutí.

Jelikož však nemůže být počet vodičů v drážce desetinné číslo, musím počet závitů zaokrouhlit na nejbližší přijatelné celé číslo. V mém případě volím počet paralelních větví $a_{\approx}$ = 2, proto vychází i jiný počet vodičů v drážce stroje, dále se změní i počet závitů v sérii. Počet vodičů v drážce stroje volím $n_d = 2$. Přepočet počtu závitů v sérii se provede poté dosazením hodnot do vztahu:

$$N_s = \frac{n_d.q.p}{a_{\approx}} = \frac{2.4.3}{2} = 12 \qquad (1.13)$$

Pro výsledný počet závitů v sérii jedné fáze vypočtu hodnotu skutečné obvodové proudové hustoty .

$$A = \frac{2.m.I_f}{\pi.D_1}.N_s = \frac{2.3.916{,}1}{\pi.0{,}62}.12 = 33864\left[\frac{A}{m}\right] \qquad (1.14)$$

1.3.2 výpočet kroků vinutí, činitelů vinutí a efektivní a celková délka budiče

Shrneme základní již známé parametry o vinutí:

Počet drážek:	Q = 72
Počet pólů:	2p = 6
Počet fází:	m = 3
Matematický počet fází:	m´ = 6
Počet drážek na pól a fázi:	q = 4

Počet drážek na pól lze určit:

$$Q_p = \frac{Q}{2p} = \frac{72}{6} = 12 \qquad (1.15)$$

Protože se jedná o střídavé vinutí, jde nám o to, aby se pokud možno činitel zkrácení kroku (1.16) pohyboval okolo 0,833. Vhodné zkrácení kroku má za následek potlačení vyšších harmonických.

$$\beta = \frac{y_{1d}}{Q_p} \qquad (1.16)$$

Proto volím $y_{1d} = 10$

Zkontroluji poměrné zkrácení kroku dosazením volené hodnoty y_{1d} a známé hodnoty Q_p

$$\beta = \frac{y_{1d}}{Q_p} = \frac{10}{12} = 0{,}8333$$

Nyní budu počítat s teoretickým krokem na komutátoru, který se ve skutečnosti ve střídavém vinutí nenachází. Potřebuji ho pouze k výpočtu předního a zadního cívkového kroku vinutí. Krok na komutátoru počítám ze vztahu:

$$y_k = \frac{\varepsilon K \pm a_{ss}}{p} = \frac{1.72 - 1}{3} = 23{,}66 \qquad (1.17)$$

Kde K je počet lamel komutátoru (u střídavého vinutí je K = u.Q), kde u je počet cívkových stran v drážce.

A $a_{ss} = 1$ pokud jde o sériové vinutí.

Kroky vinutí:

Přední cívkový krok:

$$y_1 = 2.u.y_{1d} = 2.1.10 + 1 = 21 \qquad (1.18)$$

Zadní cívkový krok:

$$y_2 = 2.y_k - y_1 = 2.23{,}66. - 21 = 26{,}33 \qquad (1.19)$$

Zadní cívkový krok musí být liché číslo, abych se dostal ze zadní cívkové strany do přední. Je tedy třeba zadní cívkový krok upravit na nejbližší liché číslo, konkrétně 27.

Pro střídavé vinutí platí:

Počet skupin vinutí dopočítám následovně:

$$a_{ss}.m' = 1.6 = 6 \qquad (1.20)$$

Počet skupin vinutí v jedné fázi je:

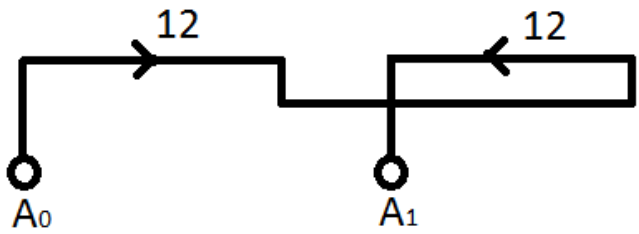
$$\frac{a_{ss}m'}{m} = \frac{1.6}{3} = 2 \qquad (1.21)$$

Počet cívek ve skupině lze napsat dosazením do rovnice:

$$\frac{Q}{a_{ss}m'} = \frac{72}{1.6} = 12 \tag{1.22}$$

V příloze [3] je uvedeno Tingleyho schéma, které znázorňuje zapojení vinutí stroje v tabulce. Jednoduše lze z přílohy [3] vyčíst přední a zadní cívkový krok vinutí, počet cívkových stran v drážce, popřípadě spočítat činitele vinutí. Tingleyho schéma se vytvoří tabulkou, kde počet sloupců je počet fází vynásobený čitatelem ze zlomku čísla *q*, počet řádků je počet pólů a fázor sousední drážky je o jmenovatel čísla *q* dál.

Úsečkové schéma na následujícím obrázku 2 znázorňuje skutečné propojení skupin cívek jedné fáze, která tvoří vinutí stroje.



Obrázek 2: Úsečkové schéma zapojení vinutí jedné fáze stroje

Výpočet činitelů vinutí:

Pro výpočet činitele vinutí pro libovolnou harmonickou obecně platí.

$$kv\upsilon = \sin\left(\upsilon\beta\frac{\pi}{2}\right)\frac{\sin\left(\upsilon\frac{\pi}{m'}\right)}{n.\sin\left(\upsilon\frac{\pi}{m'n}\right)} =$$

$$= \sin\left(1.0{,}833\frac{\pi}{2}\right)\frac{\sin\left(1\frac{\pi}{6}\right)}{4.\sin\left(\upsilon\frac{\pi}{6.4}\right)} = 0{,}925 \tag{1.23}$$

Dosazením hodnot za řád harmonické υ = 1;5;7;11;13 zjistím hodnoty činitelů vinutí příslušných harmonických.

k_{v1} = 0,9250
k_{v5} = 0,0531
k_{v7} = -0,041
k_{v11} = -0,122
k_{v13} = -0,122

Nyní se můžu věnovat návrhu efektivní délky stroje. K tomu musím znát ještě skutečnou hodnotu Essonova činitele elektromagnetického využití stroje.

$$C = \frac{\pi^2}{60\sqrt{2}} AB_\delta k_{v1} = \frac{\pi^2}{60\sqrt{2}}.33{,}863.0{,}55.0{,}925 = 2{,}003 \frac{W}{m^3 \frac{ot}{\min}} \qquad (1.24)$$

Přičemž obvodová proudová hustota je zadána v [kA/m].

Pro určení efektivní délky stroje musím pouze dosadit do následujícího vztahu, který vychází z úpravy výkonové rovnice.

$$l_e = \frac{S}{CD_1^2 n} = \frac{660000}{2{,}003.0{,}62^2.3000} = 286mm \qquad (1.25)$$

Každý stroj je nutné chladit, proto jsem zjistil, že vyráběný budič nižší řady je chlazen radiálními kanály s šířkou kanálu $š_k$ = 8mm. Použiji je také v návrhu, aby se výroba prototypu co nejvíce zlevnila. Volím tedy šířku paketů $š_p$ = 35,5mm. Celkový počet paketů lze vypočíst dosazením do vztahu (1.26) a následně určit počet chladících kanálů a dopočítat celkovou délku stroje.

$$i = \frac{l_e}{š_p} = \frac{0{,}286}{0{,}0355} = 8 \qquad (1.26)$$

$$i_k = i - 1 = 8 - 1 = 7 \qquad (1.27)$$

$$L = l_e + š_k i_k = 286 + 8.7 = 342mm \qquad (1.28)$$

1.3.3 Návrh drážky stroje, izolačního systému v drážce a návrh vodičů kotvy

Drážka stroje určuje místo, ve kterém jsou umístěny vodiče vinutí stroje. Protože je kotva bezkartáčového budiče umístěna na rotoru, je nutné použít drážky otevřené typu N, kde příznivěji vychází dimenzování klínu na rotoru budiče z důvodu větší styčné plochy klínu. Kdybych zvolil drážku typu M tak by vyšel klín širší, mělo by to za následek ještě výraznější zápich do zubu rotoru. Drážku tedy volím obdélníkovou. Zuby musí mít lichoběžníkový tvar. Již výše jsem dimenzoval vinutí, počty závitů, kroky a další parametry vinutí a z vypočítaných hodnot vychází do drážky stroje dvě cívkové strany sériového vinutí. Šířka samotného zubu se určí ze zvolené indukce v hlavě zubu (po obvodu stroje D_1).

Drážková rozteč na obvodu kotvy:

$$t_{d1} = \frac{\pi D_1}{Q} = \frac{\pi.0{,}62}{72} = 0{,}027m = 27mm \qquad (1.29)$$

Šířka zubu:

$$z_1 = \frac{B_\delta t_{d1}}{B_{z1}^{'} k_{fe}} = \frac{0{,}55.27}{1{,}25.0{,}95} = 12{,}9mm \qquad (1.30)$$

Kde $B_{z1}^{'}$ odpovídá zvolené indukci na hlavě zubu (na průměru D_1)

k_{Fe} je činitel plnění železa kotvy

Potom můžu dopočítat šířku drážky rotoru:

$$b_d = t_{d1} - z_1 = 27 - 12{,}9 = 14{,}1mm \qquad (1.31)$$

Jelikož dnes není problém vyrobit téměř jakýkoliv tvar z elektrotechnického plechu, volím šířku drážky 14,4mm a tomu odpovídá skutečná hodnota šířky zubu:

$$z_1 = t_{d1} - b_d = 27 - 14{,}4 = 12{,}6mm \qquad (1.32)$$

Návrh izolačního systému:

Jedná se o stroj se jmenovitým napětím 534V, maximálním napětím 873V v režimu nárazového provozu, je třeba navrhnout izolační systém na napětí vyšší z důvodu dostatečné bezpečnosti. Z toho vyplývá i tloušťka izolace proti železu ti = 0,45mm. Vzhledem ke zvolené šířce drážky jsem zvolil šířku vodiče $b_v = 12mm$ a dále s ní budu počítat.

Průřez vodiče spočítám z proudové hustoty a procházejícího proudu.

$$S_{Cus}^{´} = \frac{I_F}{a_{\approx}\sigma_{Cus}} = \frac{916,1}{2.4,18} = 109,58mm^2 \qquad (1.33)$$

Přičemž proudová hustota je dána například takto:

$$\sigma_{Cus}^{´} = \sqrt{\frac{K}{b_v}} = \sqrt{\frac{210}{12}} = 4,18\frac{A}{mm^2} \qquad (1.34)$$

Kde *K* je konstanta závislá na napětí stroje a b_v je šířka holého vodiče kotvy. Pro napětí 0,4-3kV odpovídá konstanta *K* = 210.

Pokud znám rozměr šířky vodiče, mohu dimenzovat výšku vodiče tak, aby byla zachována nebo snížená proudová hustota ve vodiči kotvy. Výšku vodiče lze tedy navrhnout:

$$h_v = \frac{S_{Cus}^{´}}{b_v} = \frac{109,58}{12} = 9,13mm \qquad (1.35)$$

Pro snížení ztrát vlivem skin-efektu je nutné vodič rozdělit. Rozdělení jsem provedl na výšku za použití 3 stejných paralelních vodičů o výšce 3,2mm. Matematický průřez vodiče kotvy spočtu jako trojnásobek výšky a šířky jednotlivého vodiče.

$$S_{Cus\,MAT}^{3v} = 3h_v b_v = 3.3,2.12 = 115,2mm^2 \qquad (1.36)$$

Ve skutečnosti jsou ale vodiče vyráběny se zaoblením hran. Poloměr zaoblení je dle normy pro daný rozměr vodiče $r_{1zaob} = 1mm$, ve skutečnosti to znamená, že průřez je zmenšen o plochu zaoblení.

$$S_{Cus} = S_{CusMAT}^{3v} - \left[(2r_{1zaob})^2 - \pi r_{1zaob}^{\ 2}\right] = 115,2\left[(2.1)^2 - \pi.1^2\right] = 114,3mm^2 \qquad (1.37)$$

Následně jen orientačně zkontroluji proudovou hustotu skutečným průřezem.

$$\sigma_{Cus} = \frac{I_f}{a_{\approx} S_{Cus}} = \frac{916{,}1}{2.114{,}3} = 4 \frac{A}{mm^2} \qquad (1.38)$$

Izolační systém stroje je shrnutý v tabulce 1.

Tabulka 1: Izolační systém bezkartáčového budiče

Pozice	Název	Šířka[mm]			Hloubka[mm]		
1	Vyložení drážky	2.0,15		0,3	3.0,15		0,45
2	Izolace proti železu	2.ti	2.0,45	0,9	4.ti	4.0,45	1,8
3	Izolace závitů	2.0,37		0,74			0,37
4	Izolace vodičů	0,27		0,27			0,41
5	Mezivrstva						2
6	Σ Izolace			2,21			5,03
7	Vůle na šířku			0,19			
8	Holý vodič			12			19,2
9	Vložka na dno						1
10	Vložka pod klín						1
11	Vůle na hloubku						0,77
12	Rozměr drážky bez klínu			14,4			27
13	Klín a můstek				H0+h1	6+1	7
14	Celkový rozměr drážky			14,4			34

1.3.4 Výpočet odporu vinutí jedné fáze, rozptylové reaktance

Pro určení elektrického odporu jedné fáze je potřeba znát celkovou délku vodičů tvořící jednu cívku vlnového vinutí. Musím určit délky předního a zadního čela, délku vodiče v rovné (drážkové) části induktu, dále odpory spojek cívek (náhrada oka), které spojují horní a spodní pozici vodičů v drážce, dále potřebuji vypočítat odpor nulového prstence (uzel vinutí do hvězdy), odpory vedoucí od konce vinutí (vývodů) k jednotlivým usměrňovacím diodám, odpory propojek mezi jednotlivými součástmi rotujícího usměrňovače a přechodové odpory na šroubovaných spojích mezi chladiči usměrňovačů a propojkami.

Pro výpočty jednotlivých délek částí cívek jsem použil program, který navrhuje vinutí a výsledkem jsou rozvinuté tvary vodičů cívek ve 2D, bohužel pro ochranu jména firmy a

zákazem týkající se hospodářské soutěže a konkurence nemohu název programu zde uvést. Beru výsledky z programu jako výchozí pro určování odporů fáze.

Výsledné výpočty převzaté z programu:

Délka předního čela: 624mm

Délka zadního čela: 534mm

Délka vodiče v aktivní části budiče: 2 x 356mm

Spojka čel: 24mm

Výběh rovné části přes rotorový paket: 10mm

Spojka k usměrňovači: 32mm

Délka středu vinutí (nulový kruh): 500mm

Pro zjednodušení výpočtu budu uvažovat ve všech částech vinutí bezkartáčového budiče stejný průřez vodičů vinutí, propojek a spojek.

Elektrický odpor jedné fáze vinutí kotvy:

$$R'_{1f} = \frac{N_1 l_{z1} \rho_{Cu}}{a_{\approx} S_{Cus}} = \frac{12.1730.1}{2.114,3.56} = 0,0016\Omega \qquad (1.39)$$

Nyní je potřeba uvažovat vliv skin-efektu, protože frekvence je 150Hz, vliv nemůžu zanedbat. Náhradní výška vodiče vypočítám:

$$\xi = 2\pi h_v \sqrt{\frac{j b_v f}{b_d \rho}.10^{-7}} = 2\pi.3,2 \sqrt{\frac{1.12.150}{14,4.\frac{1}{56}}.10^{-7}} = 0,54 \qquad (1.40)$$

Činitel zvýšení elektrického odporu:

$$k_{Cu} = \frac{g^2 - 0,2}{9} \xi^4 = \frac{6^2 - 0,2}{9}.0,54^4 = 0,08 \qquad (1.41)$$

Odpor jedné fáze při 20 °C při střídavém proudu vodičů kotvy se spočítá následovně:

$$R_{1f/20} = (1 + k_{Cu}).R'_{1f} = (1 + 0,08).0,0016 = 0,0017\Omega \qquad (1.42)$$

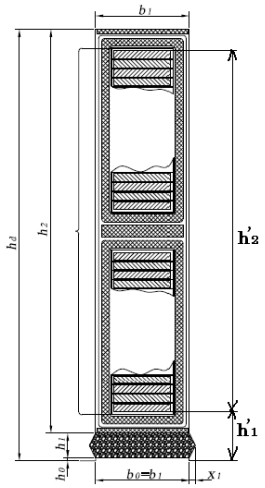
Dále zjistím hodnotu odporu jedné fáze při 100 °C.

$$R_{1f/100} = (1,32).R'_{1f/20} = 1,32.0,0017 = 0,0023\Omega \qquad (1.43)$$

Procentní hodnota úbytku napětí na ohmickém odporu jedné fáze je:

$$u_R = \frac{R_{1f/100} I_F}{U_F}.100 = \frac{0{,}0023.916{,}1}{240{,}15}.100 = 0{,}88\% \qquad (1.44)$$

Rozptylová reaktance vinutí statoru:



Velikost rozptylové reaktance je dána magnetickou vodivostí drážky induktu, vodivostí čel vinutí a vodivostí mezi sousedními zuby přes vzduchovou mezeru. Tyto vodivosti jsou zahrnuty uvnitř hranaté závorky následujícího výrazu.

Co se týče rozptylu drážky, tak h'_d je vzdálenost krajních vláken vodičů v drážce a h'_1 je vzdálenost horního krajního vodiče od kraje drážky (viz obr. vlevo). Hodnota b_d je šířka drážky a je rovna b_1.

$$X_\sigma = \frac{(4\pi)^2 f N_s^2}{pq} l_e \left[\left(\frac{h'_2}{3b_d} + \frac{h'_1}{b_d} \right) + \frac{l_č}{l_e} q \left(0{,}187 + 0{,}166 \frac{t_p}{l_č} \beta \right) + \ln\left(1 + \frac{\pi z_1}{2b_d} \right) \right] 10^{-7} \quad (1.45)$$

$$= \frac{(4\pi)^2 50.12^2}{3.4} 0{,}286 \left[\left(\frac{23{,}56}{3.14{,}4} + \frac{8{,}94}{14{,}4} \right) + \frac{0{,}634}{0{,}286}.4 \left(0{,}187 + 0{,}166 \frac{0{,}325}{0{,}634} \beta \right) + \ln\left(1 + \frac{\pi.0{,}013}{2.14{,}4} \right) \right] 10^{-7} =$$

$$= 0{,}031\Omega$$

Procentní hodnota úbytku napětí na rozptylové reaktanci:

$$u_\sigma = \frac{X_\sigma I_F}{U_F}.100 = \frac{0{,}031.916{,}1}{240{,}15}.100 = 11{,}8\% \qquad (1.46)$$

1.4 Návrh magnetického obvodu stroje

1.4.1 Výpočet magnetického toku, vzduchové mezery, magnetické napětí reakce kotvy

Hlavní a základní určení velikosti magnetického toku určím z rovnice pro indukované napětí.

Magnetický tok:

$$\Phi = \frac{U_f}{4{,}44\, f N_s k_{v1}} = \frac{240{,}15}{4{,}44.150.12.0{,}9250} = 0{,}0325 Wb \qquad (1.47)$$

Magnetický tok překontroluji z rozměrů stroje a velikostí magnetické indukce ve vzduchové mezeře.

Kontrolní výpočet:

$$\Phi = \frac{2}{\pi} t_p l_e B_\delta = \frac{2}{\pi}.0{,}325.0{,}286.0{,}55 = 0{,}03255 Wb \qquad (1.48)$$

V následujícím výpočtu již počítám velikost vzduchové mezery. Při jejím návrhu počítám z procentní hodnoty nesycené synchronní reaktance a procentní hodnoty rozptylové reaktance.

Vzduchová mezera:

$$\delta = k \frac{A t_p}{B_\delta}.\frac{10^{-6}}{x_d - x_\sigma} = 43.\frac{33863.0{,}325}{0{,}55}.\frac{10^{-6}}{150 - 11{,}8} = 0{,}0062 m \rightarrow 6 mm \qquad (1.49)$$

kde k = (43-50), závisí na tvaru pólového nástavce, velikosti Carterova činitele a dalších parametrech a na velikosti procentní hodnoty nesycené synchronní reaktance. Tu volím podle počtu pólů stroje 150 %.

Abych dosáhl pokud možno sinusového průběhu napětí kotvy pod pólovými nástavci, je nutné na okrajích nástavců mít větší vzduchovou mezeru. Obvykle je tato hodnota 1,5 až 2 násobek hodnoty vzduchové mezery v ose pólového nástavce.

Já volím tuto hodnotu 1,5.

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

Magnetické napětí reakce kotvy:

Amplituda základní harmonické reakce kotvy:

$$F_a = 0{,}45.m\frac{N_s k_{v1}}{p} I_F = 0{,}45.3.\frac{12.0{,}925}{3}.916{,}1 = 4576A \qquad (1.50)$$

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

$$\begin{aligned} F_{ad} &= k_{ad} F_a = 0{,}875.4576 = 4004A \\ F_{aq} &= k_{aq} F_a = 0{,}405.4575 = 1853A \end{aligned} \qquad (1.51)$$

Kde: k_{ad}, k_{aq} jsou činitelé, které závisí na poměrech b_n / t_p a δ / t_p. Jejich hodnoty je možné zjistit z literatury [1.] (z obrázku 7.23 strana 384).

1.4.2 Dimenzování rozměrů magnetického obvodu

Při volbě hlavních rozměrů magnetického obvodu stroje jsem vycházel z již vyrobeného budiče s ohledem na to, že se budu snažit použít co nejvíce možných rozměrů tak, aby byla cena výroby prototypového budiče co nejnižší. Výška pólu byla 85mm a nástavce 15mm, šířka pólu 160mm a nástavce 227mm. V mém případě tedy volím tyto hodnoty shodně. $š_p$ = 160mm, h_p = 85mm, $š_n$ = 227mm, h_n = 15mm

Určím výšku jha statoru:

$$h_{js} = \frac{(1+v)\Phi}{2.B_{js}.L_{js}} = \frac{(1+0{,}15)0{,}0325}{2.0{,}68.0{,}44} = 0{,}062m \rightarrow 60mm \quad (1.52)$$

Kde: v je předpokládaná poměrná hodnota rozptylového toku mezi póly.

B_{js} je magnetická indukce ve statoru stroje ($1{,}25.B\delta = 1{,}25.0{,}55 = 0{,}68T$), přičemž ale skutečná magnetická indukce ve statoru stroje je menší, protože jak je vidět z konstrukčního návrhu, tak celá kostra slouží jak k mechanickému připevnění pólů, cívek a nástavců, tak k vedení magnetického toku a jelikož je celá z magnetického materiálu, budící tok tekoucí kostrou se rozptyluje po větší délce, než jsou délky pólů. Přesněji by bylo možné stroj analyzovat ve 3D elektromagnetickém výpočtu. Již při výrobě předcházejícího typu bezkartáčového budiče se použily na jho statoru materiály o tloušťce 60mm, proto i já dále budu uvažovat shodnou tloušťku.

L_{js} je tedy předpokládaná délka, kterou prochází magnetický tok.

Určím výšku jha rotoru:

$$h_{jr} = \frac{\Phi}{2.B_{jr}.k_{fe}.l_e} = \frac{0{,}0325}{2.0{,}72.0{,}95.0{,}286} = 0{,}085m \rightarrow 85mm \qquad (1.53)$$

B_{jr} je magnetická indukce v rotoru stroje ($1{,}25.B\delta = 1{,}3.0{,}55 = 0{,}72T$)

Výpočet středních siločar magnetického obvodu:

Pól:

$$l_p = h_p + h_n = 85 + 15 = 100mm \qquad (1.54)$$

Jho statoru:

$$l_s = \frac{\pi\left[D_1 + 2\left(\delta + h_p + h_n + \frac{h_{js}}{2}\right)\right]}{4p} = \frac{\pi\left[620 + 2\left(6 + 85 + 15 + \frac{60}{2}\right)\right]}{4.3} = 234mm \qquad (1.55)$$

Jho rotoru:

$$l_s = \frac{\pi\left[D_1 - 2(h_d) - h_{jr}\right]}{4p} = \frac{\pi[620 - 2.34 - 85]}{4.3} = 122mm \qquad (1.56)$$

1.5 Výpočet magnetizační charakteristiky stroje

Pro přesný výpočet musím uvažovat vliv radiálních chladících kanálů a také vliv drážkování statoru stroje. To je zohledněno za pomocí Carterova činitele, který má ve výsledku vliv na celkové magnetické pole uvnitř vzduchové mezery.

Carterův činitel (vliv drážkování rotoru stroje):

$$\frac{b_d}{z_1} = \frac{14{,}4}{12{,}6} = 1{,}14$$
$$\frac{b_d}{\delta} = \frac{14{,}4}{6} = 2{,}4 \qquad (1.57)$$

Z grafu pro výpočet Carterova činitele uvedeného v příloze [4] lze odečíst hodnotu $k_{cd} = 1{,}2$.

Carterův činitel (vliv radiálních chladících kanálů):

$$k_{ck} = \frac{1}{1 + \frac{\delta}{2+\delta}.\frac{\check{s}_k.i}{l_e}} = \frac{1}{1 + \frac{6}{2+6}.\frac{8.8}{286}} = 0{,}86 \qquad (1.58)$$

Celkovou hodnotu Carterova činitele spočítám následujícím způsobem.

$$k_c = k_{cd}.k_{ck} = 1{,}2.0{,}86 = 1{,}03 \qquad (1.59)$$

A výsledné magnetické napětí na vzduchové mezeře je :

$$F_\delta = 0{,}8k_c\delta B_\delta.10^6 = 0{,}8.1{,}03.0{,}006.0{,}55.10^6 = 2719A \qquad (1.60)$$

1.5.1 Charakteristika naprázdno

Výpočet charakteristiky naprázdno je proveden v tabulkách v příloze [6] a [7]. Nejprve jsem určil magnetizační charakteristiku zubové vrstvy příloha [6], přičemž jsem použil obrázky z přílohy [5] a [9], ze které vychází počáteční hodnota pro návrh budícího vinutí. Odečtená hodnota magnetického napětí z přílohy [8] je 5800A.

1.6 Návrh budícího vinutí

Jako výchozí hodnoty pro návrh a výpočet budícího vinutí stroje beru hodnotu magnetického napětí, které jsem odečetl z charakteristiky naprázdno viz příloha [8]. Výchozí hodnota magnetického napětí je 5800A. Nejprve potřebuji znát šířku budící cívky, budu uvažovat, že se cívka vejde pod pólový nástavec.

$$a = \frac{b_n - b_p}{2} = \frac{0{,}227 - 0{,}16}{2} = 0{,}0335m \qquad (1.61)$$

Tomu potom odpovídá střední délka závitu cívky:

$$l_{bs} = 2\left(L_p + b_p + 2a\right) = 2\left(0{,}342 + 0{,}16 + 2.0{,}0335\right) = 1{,}137m \qquad (1.62)$$

V následujícím kroku navrhnu průřez vodiče tvořící vinutí budící cívky.

$$S'_{Cub} = \frac{\rho_{Cu} l_{bs} 2pF_b}{0{,}9.U_b} = \frac{\frac{1}{56}1{,}137.2.3.5808}{0{,}9.150} = 5{,}06mm^2 \qquad (1.63)$$

Vyberu vhodné rozměry budící cívky tak, aby efektivní plocha vodiče byla co nejbližší, nebo vyšší než plocha S'_{Cub}. Z tabulky uvedené v příloze [10] jsem vybral vodič o rozměrech neizolovaného vodiče: šířka h_v = 4,5mm a výška b_v = 1,2mm, přičtu-li tloušťku izolace, tak vychází rozměry izolovaného vodiče: šířka h_{vi} = 4,85mm a výška b_{vi} = 1,55mm. Skutečný efektivní průřez tohoto vodiče (ČSN norma bere v úvahu zaoblení vodičů a drsnost a nerovnoměrnost povrchu) je $S_{Cub} = 5{,}18mm^2$.

Pro určení velikosti budícího proudu nyní zvolím proudovou hustotu ve vodiči σ_{Cub} = 2,1 A/mm2 a budící proud určím:

$$I_b = \sigma_{Cub}.S_{Cub} = 2{,}1.5{,}18 = 10{,}9\ A. \qquad (1.64)$$

Počet závitů budící cívky vychází ze vztahu:

$$N_b = \frac{F_b}{I_b} = \frac{5808}{10,9} = 533 \quad (1.65)$$

Počet poloh cívky (počet závitů vedle sebe určím podílem prostoru pro cívku výškou vodiče budící cívky včetně izolace).

$$n'_p = \frac{a - t_k}{h_{vi}} = \frac{33,5 - 5}{4,85} = 5,88 \quad (1.66)$$

Volím $n_p = 6$

Tloušťka cívky:

$$b_c = h_{vi} n_p = 4,85.6 = 29,1\,mm \quad (1.67)$$

Počet závitů v jedné poloze vodiče:

$$N'_{p1} = \frac{N_b}{n_p} = \frac{533}{6} = 88,9 \quad (1.68)$$

Volím n_{p1} = 89 závitů.

Výška budící cívky:

$$h_c = N_{p1} b_{vi} = 89.1,55 = 138mm \quad (1.69)$$

Výška je moc velká (místo pro cívku je 80mm), je tedy nutné změnit počet poloh cívky. Pro následující výpočet volím n_p = 13 a výpočet opakuji.

$$b_c = h_{vi} n_p = 4,85.13 = 63,05mm \quad (1.70)$$

Počet závitů v jedné poloze vodiče:

$$N'_{p1} = \frac{N_b}{n_p} = \frac{533}{13} = 41,7\text{, volím } n_{p1} = 42 \text{ závitů.} \quad (1.71)$$

Výška budící cívky:

$$h_c = N_{p1} b_{vi} = 42.1,55 = 65,1mm \quad (1.72)$$

Dále musím připočítat tloušťku kostřičky budící cívky.

Výška cívky včetně kostřičky je:

$$h_p = h_c + 2t_k = 65,1 + 2.5 = 75,1mm \quad (1.73)$$

Kostřička s cívkou se na pól vejde s rezervou cca 10mm (výška pólu je 85mm).

Nyní stanovím orientačně výpočet oteplení budící cívky budiče.

Vnější obvod budící cívky určím:

$$l_{be} = 2\left[L_p + b_p + 4\left(b_c + t_k\right)\right] = 2\left[0{,}342 + 0{,}16 + 4.\left(0{,}063 + 0{,}005\right)\right] = 1{,}548m \quad (1.74)$$

Střední obvod budící cívky vypočítám:

$$l_{bs} = 2\left[L_p + b_p + 4\left(t_k + \frac{b_c}{2}{}_k\right)\right] = 2\left[0{,}342 + 0{,}16 + 4.\left(0{,}005 + \frac{0{,}063}{2}\right)\right] = 1{,}292m \quad (1.75)$$

Ochlazovací plocha všech budících cívek:

$$O_{2pc} = h_c\, l_{be}\, 2p = 0{,}0651.1{,}548.2.3 = 0{,}605m^2 \quad (1.76)$$

Stejnosměrný odpor sériově spojených cívek budícího vinutí:

$$R_{b/100} = 1{,}32.\rho\frac{l_{bs} N_b\, 2p}{S_{Cub}} = 1{,}32\frac{1}{56}.\frac{1{,}292.533.2.3}{5{,}18} = 18{,}59 \quad (1.77)$$

Jouleovy ztráty v budícím vinutí spočítám následovně:

$$\Delta P_{Cub} = R_{b/100} I_b^2 = 18{,}59.10{,}9^2 = 2209W \quad (1.78)$$

Oteplení budící cívky:

$$\Delta\vartheta_{Cub} = \frac{1{,}18.\Delta P_{Cub}}{\alpha O_{2\,pc}} = \frac{1{,}18.2209}{85.0{,}605} = 50{,}7°C \quad (1.79)$$

1.7 Ztráty a účinnost budiče

Celkové ztráty se počítají součtem všech ztrát vzniklých ve stroji. Celkové ztráty se skládají z Joulových ztrát ve vinutí (kotva, budící vinutí, usměrňovač), ztrát v železe (rotorové plechy, ztráty v zubech plechů rotoru), povrchové ztráty, mechanické ztráty a přídavné ztráty.

Jouleovy ztráty

Ve vinutí kotvy:

$$\Delta P_{Cu1} = mR_{1/100} I_F^2 = 3.0{,}0023.916{,}1^2 = 5790{,}8W \quad (1.80)$$

V budícím vinutí:

$$\Delta P_{Cub} = R_{b/100} I_b^2 = 18{,}59.10{,}9^2 = 2209W \tag{1.81}$$

Ztráty průchodem proudu přes usměrňovací diodu:

$$\Delta P_{Dioda} = U_d I_F . \frac{1}{3} = 1{,}2.916. \frac{1}{3} = 366{,}5W \tag{1.82}$$

Celkové ztráty na usměrňovači:

$$\Delta P_{Usč} = 12.\Delta P_{Dioda} = 12.366{,}5 = 4398W \tag{1.83}$$

V železe:

Ztrátové číslo plechů: Δp_{Fe} = 1,5 W/kg

Hmotnost rotorových plechů:

$$m_{Fer} = \left[\frac{\pi}{4} \left(D_3^2 - D_h^2 \right) - 12. \frac{\pi}{4} \left(D_{Chl}{}^2 \right) \right] l_e k_{Fe} \rho_{Fe} =$$
$$= \left[\frac{\pi}{4} \left(0{,}552^2 - 0{,}281^2 \right) - 12 \frac{\pi}{4} \left(72^2 \right) \right] 0{,}286.0{,}95.7800 = 272{,}2kg \tag{1.84}$$

Ztráty v jádře rotoru stroje:

$$\Delta P_{Fer} = 1{,}8.\Delta p_{Fe} . B_{jr}^2 . \left(\frac{f}{50} \right)^{1{,}3} m_{Fer} = 1{,}8.1{,}5.0{,}7^2 . \left(\frac{150}{50} \right)^{1{,}3} .272{,}2 = 1502W \tag{1.85}$$

Ztráty zubech rotoru stroje:

$$m_{Fez} = Q.z_2.h_d.l_e.k_{Fe} \rho_{Fe} = 72.0{,}0117.0{,}034.0{,}286.0{,}95.7800 = 60{,}7 \text{ kg} \tag{1.86}$$

$$\Delta P_{Fez} = 2.\Delta p_{Fe} . B_{z2}^2 \left(\frac{f}{50} \right)^{1{,}3} m_{Fez} = 2.1{,}5.1{,}56^2 . \left(\frac{150}{50} \right)^{1{,}3} .60{,}7 = 1848{,}5\text{W} \tag{1.87}$$

Povrchové ztráty:

$$\Delta P_p = \frac{\pi}{2} D_1 \alpha L_P k_0 \left(\frac{Q.n}{10000} \right)^{1{,}5} \left(t_{d1} \beta .1000.B_\delta .k_c \right)^2 =$$
$$= \frac{\pi}{2} .0{,}6.0{,}7.0{,}340.8{,}6. \left(\frac{72.3000}{10000} \right)^{1{,}5} . \left(0{,}027.0{,}17.0{,}55.0{,}942 \right)^2 = 1131{,}7W \tag{1.88}$$

Mechanické ztráty zanedbávám, (budič je letmo uložený) jelikož nemá tedy ztráty vlivem mechanického tření v ložiskách stroje, a protože je bezkartáčový tak zde není žádné tření kluzných kontaktů. Stroj je navrhnutý s cizím chlazením, tak ani tyto ztráty nebudu nyní započítávat do celkové účinnosti budiče.

Přídavné ztráty volím empirickým vztahem:

$$\Delta P_{\Pr id} = 0{,}003.S = 0{,}003.659800 = 1979W \tag{1.89}$$

Celkové ztráty stroje:

$$\begin{aligned}\Delta P &= \Delta P_{Cu1} + \Delta P_{Cub} + \Delta P_{Usč} + \Delta P_{Fer} + \Delta P_{Fez} + \Delta P_p = \\ &= 5790{,}8 + 2209 + 4398 + 1502 + 1848{,}5 + 1131{,}7 = 16880W\end{aligned} \tag{1.90}$$

Celková účinnost stroje:

$$\eta = 100\left(\frac{P}{P+\Delta P}\right) = 100\left(\frac{640000}{640000+16880}\right) = 97{,}4\% \tag{1.91}$$

2 Mechanická kontrola u vybraných částí budiče

2.1 Výpočet namáhání drážkových klínů

Drážkový klín je nedílnou a velice důležitou součástí stroje, který zajišťuje vinutí v drážce proti působení odstředivých sil. Drážkový klín je nutné dimenzovat s určitou bezpečností pro různé teploty stroje. Se vzrůstající teplotou klínu klesá maximální dovolené smykové namáhání. V dnešní době je na trhu mnoho materiálů, ze kterých je možné drážkové klíny vyrobit a s největší pravděpodobností se bude jednat o kompozitní tří-složkové materiály, složené z pojiva, plnidla a nosné složky. Pro správné dimenzování je nutné počítat s maximálními otáčkami stroje, které se mohou v praxi objevit. Budu dimenzovat drážkový klín, který je vyroben z materiálu Isoval TM, (jehož katalogové listy jsou uvedeny v příloze [12] a [13]) pro mechanické namáhání způsobené odstředivou silou, kterou vyvolá hmotnost uložená v drážce (vinutí, izolační systém) a pro odstředivou sílu, kterou vyvolá vlastní hmotnost klínu při zkušebních otáčkách. Zkušební otáčky stroje jsou stanoveny na 120 % jmenovitých otáček.

$$n_{MAX} = 1{,}2n = 1{,}2.3000 = 3600\left[\frac{ot}{\min}\right] \tag{2.1}$$

Je nutné dobře znát hmotnosti vinutí, které jsou uloženy v drážkách stroje. Z navrhnutého izolačního systému stroje v kapitole 1.3.3 lze stanovit průřezy vinutí a průřezy izolace, kterou budu pro další zjednodušení považovat za homogenní se stálou hustotou izolace $\rho_{IZ} = 1900\frac{kg}{m^3}$ a hustotou mědi $\rho_V = 8900\frac{kg}{m^3}$. Pro lepší představu je vhodné vztahovat hmotnost vinutí a izolace na konstantní délku, v mém případě vztáhnutou na délku 10mm. Hmotnost vinutí lze stanovit z objemu, který vodič v drážkové části stroje zabírá a podobně lze stanovit i hmotnost izolačního systému.

To spočtu následovně:

$$\begin{aligned} m_{VDR} &= V_{VDR}\rho_V = 2S_{CUS}L\rho_V = 2.114{,}3.10^{-6}.352.10^{-3}.8900 = 0{,}716kg \\ m_{IZDR} &= V_{IZDR}\rho_V = (S_{DR} - 2.S_{CUS})L\rho_{IZ} = \\ &= (14{,}4.27.10^{-6} - 2.114{,}3.10^{-6}).352.10^{-3}.1900 = 0{,}107kg \end{aligned} \tag{2.2}$$

Hmotnost samotného klínu vypočítám:

$$m_{KL} = V_{KL}\rho_{IZ} = S_{KL}L\rho_{IZ} = 114{,}8.10^{-6}.352.10^{-3}.1900 = 0{,}077kg \tag{2.3}$$

Následně můžu dopočítat hmotnosti vztažené na délku 1cm jednotlivých dílčích hmotností částí drážky.

$$m_{VDR1cm} = \frac{10m_{VDR}}{L} = \frac{10.0{,}716}{352} = 0{,}0203\frac{kg}{cm}$$
$$m_{IZDR1cm} = \frac{10m_{IZDR}}{L} = \frac{10.0{,}107}{352} = 0{,}003\frac{kg}{cm} \qquad (2.4)$$
$$m_{KL1cm} = \frac{10m_{KL}}{L} = \frac{10.0{,}077}{352} = 0{,}0022\frac{kg}{cm}$$

Vypočítám odstředivou sílu, která působí při zkušebních otáčkách stroje. Obecně odstředivá síla vyplývá ze vztahu $F_O = mr\omega^2$, kde dosadím jednotlivé hmotnosti vztažené na jednotku délky 1cm. Pro sílu vyvolanou odstředivou silou způsobenou hmotností klínu budu uvažovat rameno $r_K = 0{,}306m$, pro sílu vyvolanou hmotností vinutí a jeho izolace uvažuji rameno $r_V = 0{,}2895m$. Dosazením do vztahu (2.5) můžu určit velikost odstředivých sil na jednotku délky 1cm.

$$F_{OKL} = 1{,}1.10^{-2}.m_{KL1cm}r_K(n_{MAX})^2 =$$
$$= 1{,}1.10^{-2}.0{,}0022.0{,}306.(3600)^2 = 95\frac{N}{cm}$$
$$F_{OV} = 1{,}1.10^{-2}.(m_{VDR1cm} + m_{IZDR1cm}).r_v(n_{MAX})^2 = \qquad (2.5)$$
$$= 1{,}1.10^{-2}.(0{,}0203 + 0{,}003).0{,}289.(3600)^2 = 959\frac{N}{cm}$$

Celková odstředivá síla je potom rovna součtu dílčích odstředivých sil na obou ramenech.

$$F_O = F_{OKL} + F_{OV} = 95 + 959 = 1054\frac{N}{cm} \qquad (2.6)$$

Další výpočet namáhání klínu se provádí obdobně jako namáhání nosníku. Odstředivá síla způsobí reakci A, ta se dále rozloží do vodorovné A_x a svislé složky A_y. Výpočty jednotlivých složek reakce A jsou počítány následovně:

$$A_Y = \frac{F_O}{2} = \frac{1054}{2} = 527\frac{N}{cm}$$
$$A_X = \frac{F_O}{2}\tan\alpha = \frac{1054}{2}\tan 65 = 1130\frac{N}{cm} \qquad (2.7)$$

Drážkový klín kontroluji na otlačení, ohyb a smyk:

$$Otlak: \sigma_D = \frac{A_X}{S} = \frac{F_O}{2.v}\tan\alpha = \frac{1054}{2.6{,}5.10}.\tan 65 = 17{,}39MPa$$

$$Ohyb: \sigma_O = \frac{M_O}{W_O} = \frac{F_O(a+p)}{8\frac{1}{6}v^2.10} = \frac{1054(20{,}9+14{,}4)}{\frac{1}{6}6{,}5^2.10} = 66{,}05MPa \qquad (2.8)$$

$$Smyk: \tau_{MAX} = \frac{3}{2}\tau_S = \frac{3}{2}\frac{T}{S} = \frac{3}{2}\frac{A_Y}{v.10} = \frac{3.527}{2.6{,}5.10} = 12{,}16MPa$$

Dále dimenzování podle Mohra:

$$\sigma_{red} = 2\tau_{MAYX} = 2\frac{3}{2}\tau_S = 2\frac{3}{2}\frac{T}{S} = 2\frac{3}{2}\frac{A_Y}{v.10} = 3\frac{527}{6{,}5.10} = 24{,}32MPa \qquad (2.9)$$

Platí-li $\frac{a+p}{2} \rangle v$, tak se zanedbává smykové namáhání. A celkové namáhání tlakem a tahem je spočteno v rovnici (2.10).

$$\sigma_{DC} = \sigma_D + \sigma_O = 17{,}39 + 66{,}05 = 83{,}44MPa$$
$$\sigma_{TC} = |\sigma_D - \sigma_O| = |17{,}39 - 66{,}05| = 48{,}66MPa \qquad (2.10)$$

Nyní když znám celkové namáhání tlakové a ohybové, určím bezpečnost v dimenzování klínů pro různé teploty rotorového tělesa. Z hodnot, které uvádí výrobce materiálu Isoval TM, jsem vyčetl hodnoty dovoleného ohybového namáhání pro teploty 23 °C, 120 °C, 150 °C, které jsou 400MPa, 280MPa, 200MPa a dopočtení jednotlivých bezpečností jsou shrnuty v následující tabulce.

Tabulka 2: Tabulka vypočtených hodnot bezpečností materiálu klínů pro různé teploty

Teplota [°C]	Dovolené ohybové namáhání [MPa]	Bezpečnost[-]
23	400	4,79
120	280	3,35
150	200	2,39

Bezpečnost se počítá poměrem dovoleného namáhání a skutečného namáhání .

$$\sigma_{DC} \le \frac{1}{k}\sigma_{PD} \Rightarrow k \ge \frac{\sigma_{PD}}{\sigma_{DC}} = \frac{280}{83{,}44} = 3{,}35[-] \qquad (2.11)$$

2.2 Výpočet bandáží čel vinutí a kontrola prostoru pro bandáž

Pro návrh a výpočet bandáží čel vinutí potřebuji znát hmotnosti čel vinutí a hmotnosti izolace mezi čely. Hmotnost cívek tvořících čela stroje mohu například stanovit takto: Známe-li celkovou délku vodiče, profil vodiče, který tvoří čelo, a hustotu materiálu vodiče. Délka vodiče zadního čela (horní cívka + spodní cívka+spojka) je rovná 534mm a podobně délka předního čela je 624mm (délky jsem získal opět z interně používaným 2D programem používaným v Brush-SEM). Potom mohu již snadno určit hmotnost vinutí čel stroje a to pouze vynásobením objemu jedné cívky hustotou mědi a vynásobením počtem cívek.

$$m_{ZČ1C} = V_{ZČ}\rho_{Cu} = l_{ZČ}S_{CUS}\rho_{Cu} = 534.10^{-3}.114{,}3.10^{-6}.8900 = 0{,}54kg \quad (2.12)$$

$$m_{PČ1C} = V_{PČ}\rho_{Cu} = l_{PČ}S_{CUS}\rho_{Cu} = 624.10^{-3}.114{,}3.10^{-6}.8900 = 0{,}63kg$$

Určím hmotnosti předního a zadního čela.

$$\begin{aligned} m_{PČ} &= Q.m_{PČ1C} = 72.0{,}54 = 38{,}9kg \\ m_{ZČ} &= Q.m_{ZČ1C} = 72.0{,}63 = 45{,}36kg \end{aligned} \quad (2.13)$$

Hmotnosti izolací předního a zadního čela opět stanovím podobným způsobem. Je potřeba stanovit objem izolace, ve kterém se izolace bude nacházet a dále od něj odečíst objem čel a propojek vinutí. Opět využiji model budiče, který jsem namodeloval ve 3D softwaru a jako výchozí parametry pro určení objemu zadní (přední) bandáže jsou:

Délka bandáže: $l_{b1} = 130mm\,; l_{b2} = 310mm$,

Vnější průměr bandáže: $d_{b1} = 628mm\,; d_{b2} = 628mm$,

Vnitřní průměr bandáže: $d_{bo1} = 548{,}8mm\,; d_{bo2} = 546mm$.

Objem prostoru zadního čela a objem předního čela v rovnici (2.14) a(2.15). A následně v dalších rovnicích můžu stanovit objem, čistou hmotnost izolace pro přední i zadní čelo.

$$V_{b1} = \frac{\left(d_{b1}^2 - d_{b01}^2\right)\pi}{4} l_{b1} = \frac{\left((628.10^{-3})^2 - (548{,}8.10^{-3})^2\right)\pi}{4} 130.10^{-3} = 0{,}00952m^3 \quad (2.14)$$

$$V_{b2} = \frac{\left(d_{b2}^2 - d_{b02}^2\right)\pi}{4} l_{b2} = \frac{\left((628.10^{-3})^2 - (546.10^{-3})^2\right)\pi}{4} 310.10^{-3} = 0{,}0234m^3 \quad (2.15)$$

zadní :

$$V_{iz1} = V_{b1} - 72V_{ZČ} = V_{b1} - 72l_{ZČ}S_{CUS} = 0{,}00952 - 72.534.10^{-3}.114{,}3.10^{-6} = 5{,}13.10^{-3}m^3 \quad (2.16)$$

přední :

$$V_{iz2} = V_{b2} - 72V_{PČ} = V_{b2} - 72l_{PČ}S_{CUS} = 0{,}0234 - 72.624.10^{-3}.114{,}3.10^{-6} = 18{,}26.10^{-3}m^3$$

zadní :

$$m_{iz1} = V_{iz1}.\rho_{iz} = 5{,}13.10^{-3}.1900 = 9{,}75kg$$

přední : (2.17)

$$m_{iz2} = V_{iz2}.\rho_{iz} = 18{,}26.10^{-3}.1900 = 34{,}7kg$$

Bandáž musí zachytit odstředivé síly, které působí na čela vinutí a na samotnou bandáž. Pro jednoduchost budu uvažovat, že rotující hmota je volná (se zanedbáním vlivu uložení v železe). Pro správný návrh je nutné navrhnout vhodné předpětí bandáže, které při zkušebních otáčkách bude s dostatečnou bezpečností vyvíjet tlak působící proti odstředivé síle. Bandáž se vždy vine s určitým přepětím, které musí zabránit případným posuvům bandáže. Návrh bandáže pokračuje výpočtem odstředivé síly, která je vyvolána hmotností čel vinutí a hmotností izolace mezi čely. Pro výpočet odstředivých sil potřebuji dále znát rameno na kterém je uloženo těžiště hmoty. Potřebuji tedy znát poloměr, na kterém se nachází přibližně střed těžiště izolace a také poloměr, kde se nachází těžiště vinutí. Proto opět použiji hodnoty z 3D modelu. Pro výpočet odstředivých sil při výpočtu namáhání klínů je těžiště vinutí $r_V = 0{,}2895m$, poloměr těžiště izolace vinutí $r_{IZ} = 0{,}295m$. Volím pro další výpočet poloměr $r = 0{,}29m$. Nyní dopočítám celkovou hmotnost vinutí čela včetně izolace jak pro zadní, tak pro přední část stroje.

$$m_{PC} = m_{PČ} + m_{iz2} = 38{,}9 + 34{,}7 = 73{,}6kg$$
$$m_{ZC} = m_{ZČ} + m_{iz1} = 45{,}36 + 9{,}75 = 55{,}11kg \quad (2.18)$$

Nyní můžu přistoupit ke konkrétnímu výpočtu odstředivé síly, způsobené rotací stroje. Odstředivou sílu zadního, případně předního čela stanovím následovně:

$$F_{OZČ} = 1{,}1.10^{-2}.m_{ZC} r(n_{MAX})^2.10 = 1{,}1.10^{-2}.55{,}11.0{,}29.(3600)^2.10 = 2278379N$$
$$F_{OPČ} = 1{,}1.10^{-2}.m_{PC}.r\,(n_{MAX})^2.10 = 1{,}1.10^{-2}.73{,}6.0{,}29.(3600)^2.10 = 3042800N \quad (2.19)$$

Dále pak určím tangenciální sílu, které působí po obvodu stroje.

$$T_{ZČ} = \frac{F_{OZČ}}{2\pi} = \frac{2278379}{2\pi} = 362615N$$
$$T_{PČ} = \frac{F_{OPČ}}{2\pi} = \frac{3042800}{2\pi} = 484276N \quad (2.20)$$

Nyní, když jsem určil obvodovou sílu na povrchu bandáže, je nutné navrhnout bandáž, která zachytí takto působící sílu vyvolanou hmotností čel vinutí a jejich izolačního systému. Pro návrh bandáží jsem zvolil pásku z materiálu HYPERTEN 2000HP (katalogový list je uveden v příloze [14]), kde hodnota pevnosti v tahu pro 20 °C je T_B = 180N/mm . Volím pásku šířky $š_p$=20mm o jmenovité tloušťce t_p=0,3mm. Ve stavu vytvrzeném je síla přetržení pásky T_c= 5280N. To odpovídá síle při přetržení: $\sigma_C = \frac{T_C}{š_P.t_P} = \frac{5280}{20.0,3} = 880MPa$.

Dále musím uvažovat, aby při zkušebních otáčkách se bandáž vlivem odstředivých sil nepovolila. To znamená, že by došlo k vyrovnání odstředivé síly a síly, která je vyvolána předpětím při navíjení pásky. Toho lze docílit navinutím bandážové pásky tak, aby při zkušebních otáčkách stále působila větší síla vyvolána předpětím bandáže než odstředivá síla od hmotnosti vinutí. Toto předpětí se volí cca 50-60 % hodnoty na přetržení pásky ve vytvrzeném stavu. Konkrétně u materiálu HYPERTEN 2000HP je to hodnota přetržení pásky:

$$T_B = \sigma_{BP}.š_P = 180.20 = 3600N \quad (2.21)$$

Z této hodnoty můžu dopočítat hodnotu předpětím, se kterým navinu bandáž.

$$T_N = T_C.0,5 = 3600.0,5 = 1800N \quad (2.22)$$

V následujícím výpočtu předpokládám požadovanou bezpečnost 2 při zkušebních otáčkách. Počet závitů bandážové pásky určím následovně:

$$z = \frac{k_P.T_{ZČ}}{T_C - k_P.0,6.T_N} = \frac{2.362615}{5280 - 2.0,6.1800} = 232z \quad (2.23)$$

Pokud budu mít dodávanou pásku vysoké kvality a k odchylkám od skutečných vlastností pásky nebude docházet, můžu potom určit počet závitů pro různou bezpečnost. V následující tabulce jsou vypočítány počty závitů bandážové pásky pro jednotlivé hodnoty bezpečnosti vypočtené pro přední a zadní bandáž.

Tabulka 3:Tabulka vypočtených závitů bandáže předního a zadního čela, s uvažováním předpětí pásky.

Požadovaná bezpečnost	Přední bandáž-počet z.[-]	Zadní bandáž-počet z.[-]
1,5	198	149
1,75	250	187
2	310	232
2,5	469	351
3	712	533

Nyní je potřeba zkontrolovat prostor, ve kterém se bude bandáž nacházet. Bude navinutá na předním a zadním čele vinutí rotoru stroje. Změřil jsem vnější průměr na povrchu vinutí $d_{PVIN} = 594mm$. Dále je potřeba jen zjistit kolik prostoru mám k dispozici a hodnotu porovnat s prostorem, který potřebuje přední a zadní bandáž. Prostor na výšku, který je k dispozici pro bandáž lze jednoduše spočítat takto:

$$h_{BAN} = \frac{D1 - d_{PVIN}}{2} = \frac{620 - 594}{2} = 13mm \qquad (2.24)$$

Bandáže se budou navíjet s polovičním překrytím pásky. Pro zjednodušení výpočtu budu dále pokračovat, jako by se závity bandáže navinuly vedle sebe bez překrytí. Prakticky je jedno jestli se bude bandáž počítat s překrytím nebo bez překrytí, výsledná výška a výsledný objem bude vždy shodný. Počet závitů pásky vedle sebe je:

$$Z_{ZČ} = \frac{l_{b1} + 10}{š_p} = \frac{140}{20} = 7$$
$$Z_{PČ} = \frac{l_{b2} + 10}{š_P} = \frac{320}{20} = 16 \qquad (2.25)$$

Počet řad na výšku je dán celkovým počtem závitů bandáže ku počtu řad vedle sebe.

$$Ř_{ZČ} = \frac{P_Z}{Z_{ZČ}} = \frac{232}{7} = 33$$
$$Ř_{PČ} = \frac{P_P}{Z_{PČ}} = \frac{310}{16} = 20 \qquad (2.26)$$

Je nutné zkontrolovat výšku navrhnuté bandáže. Toho lze docílit vynásobením počtu řad na výšku přední a zadní bandáže s tloušťkou pásky.

$$h_{ZČ} = Ř_{ZČ}.t_P = 33.0{,}3 = 9{,}9mm$$
$$h_{PČ} = Ř_{PČ}.t_P = 20.0{,}3 = 6mm \qquad (2.27)$$

Jelikož je výška prostoru pro bandáž 13mm a výšky jednotlivých bandáží nepřesahují tuto výšku, bandáže lze navinout.

Nyní provedu kontrolní výpočet tahového namáhání v průřezu bandážové pásky namáhané tangenciální silou předního a zadního čela:

$$\sigma_{ZČ} = \frac{T_{ZČ}}{h_{ZČ}.l_{b1}} = \frac{362615}{9{,}9.130} = 281{,}8MPa$$
$$\sigma_{PČ} = \frac{T_{PČ}}{h_{PČ}.l_{b2}} = \frac{484276}{6.310} = 260{,}4MPa \qquad (2.28)$$

V porovnání s maximální pevností pásky v tahu po vytvrzení (880MPa) skutečně bandáž vydrží namáhání vyvolané odstředivými silami.

2.3 Výpočet namáhání zubu rotoru odstředivou silou

Při výpočtu namáhání zubu odstředivou silou se uvažuje vlastní hmotnost zubu, hmotnost klínu a hmotnost vinutí. Všechny tyto tři hmotnosti vytváří odstředivou sílu, na kterou musí být dimenzováno nejslabší místo v rotorovém paketu. Již v kapitole 2.1 jsem počítal odstředivou sílu vyvolanou klíny a vinutím včetně izolace. Nyní se tedy budu zabývat odstředivou silou, kterou vytvoří vlastní hmotnost zubu rotoru při zvýšených zkušebních otáčkách. Jak jsem již dříve uvedl, je vhodné počítat pro dobrou představu s hodnotami vztaženými na jednotku délky. V mém případě budu opět uvažovat 1cm. Z řezu zubu, který je uvedený v příloze [11], je nutné spočítat jeho plochu. Jedná se prakticky o dva lichoběžníky, tak není složité spočítat plochu takového zubu analyticky.

$$S_{ZUB} = š_k h_{dr} + \frac{š_k - š_{kl}}{2} h_{dr} + š_{kl2} h_{d0} + \frac{š_{hl} - š_{kl2}}{2} h_0 + š_{hl} h_1$$
$$S_{ZUB} = 9{,}7.27 + \frac{12-9{,}7}{2} 27 + 7{,}65.6 + \frac{12{,}65-7{,}65}{2} 6 + 12{,}65.1 = 366{,}5mm^2 \quad (2.29)$$

Pro kontrolu výpočtu jsem plochu zubu kontroloval oproti 3D modelu, kde vychází plocha zubu $S_{ZUB} = 366{,}8mm^2$. Hustotu železa rotoru uvažuji $\rho = 7700\frac{kg}{m^3}$.

Dále pak určím hmotnost zubu.

$$m_{ZUB} = V_{ZUB}.\rho_{Fe} = l_{ZUB} S_{ZUB}.7700 = 10.10^{-3}.366{,}5^{-6}.7700 = 0{,}028\frac{kg}{cm} \quad (2.30)$$

Velikost odstředivé síly působící od vlastní hmotnosti zubu je:

$$F_{OZUB} = 1{,}1.10^{-2}.m_{ZUB} r_{ZUB} (n_{MAX})^2 =$$
$$= 1{,}1.10^{-2}.0{,}028.0{,}293.(3600)^2 = 1169\frac{N}{cm} \quad (2.31)$$

Celková odstředivá síla, pro kterou je nutné kontrolovat namáhání v kořeni zubu, lze vyjádřit dosazením známých hodnot do rovnice (2.31).

$$F_{OC} = F_{OV} + F_{OKL} + F_{OZUB} = 959 + 95 + 1169 = 2223\frac{N}{cm} \quad (2.32)$$

Tato síla působí tahové namáhání v radiálním směru a plocha zubu v kořeni je namáhána právě odstředivou silou F_{OC}. Dále musím vypočítat tahové namáhání vyvolané odstředivou silou a porovnat jej s maximální dovolenou pevností v tahu rotorového tělesa.

$$\sigma_{KOŘ} = \frac{F_{OC}}{S_{KOŘ}} = \frac{2223}{9{,}65.10} = 23MPa$$
$$k = \frac{\sigma_r}{\sigma_{KOŘ}} = \frac{320}{23} = 13{,}9[-] \qquad (2.33)$$

Bezpečnost u kontrolního výpočtu při namáhání na tah v kořeni zubu je velmi velká. Rotorový svazek se tedy neroztrhne.

2.4 Výpočet hřídele bezkartáčového budiče

Hřídel je součást, která přenáší točivý moment z hřídele na elektrotechnické plechy a unáší v drážkách uložené vodiče třífázového vinutí. Tak jako každou strojní součást je třeba i hřídel dostatečně dimenzovat. Obecně se hřídele točivých strojů navrhují na zkratový moment, který může poškodit stroj například střihnutím hřídele nebo šroubů příruby. Základní dimenzování hřídele stroje je určení průměru.

$$d_h = k_h^3\sqrt{\frac{P_{MAX}}{n}} = 0{,}19\ \sqrt[3]{\frac{1710}{3000}} = 0{,}158m = 158mm \qquad (2.34)$$

Kde k_h je součinitel a velikost je v rozmezí intervalu

$k_h\langle 0{,}18 - 0{,}2\rangle$

Jak je vidět v rovnici (2.34) jsem použil výkon maximální, který je uveden v zadání diplomové práce. Jelikož ale navrhuji bezkartáčový budič, kdy dutým hřídelem vedou budící přívody do generátoru, tak je nutné vypočítat namáhání na krut dutého hřídele. Nejprve spočítám modul průřezu v krutu válcového mezikruží.

$$w_k = \frac{\pi}{16}\frac{D^4 - d^4}{D} = \frac{\pi}{16}\frac{281^4 - 100^4}{281} = 4{,}29.10^6\, mm^3 \qquad (2.35)$$

Pro určení namáhání v krutu potřebuji znát moment stroje, který působí na hřídel.

$$M_{MAX} = \frac{P_{MAX}}{\omega} = \frac{P_{MAX}}{2.\pi.50} = \frac{1710.10^3}{100\pi} = 5443{,}1[Nm] \qquad (2.36)$$

A potom namáhání v krutu:

$$\tau_K = \frac{M_{MAX}}{w_k} = \frac{5443{,}1}{4{,}29.10^6} = 1{,}26MPa \qquad (2.37)$$

Hřídel stroje je vyrobena z vysoce legované oceli, která má mez pružnosti cca 300MPa. Bezpečnost dimenzování vychází hodně přes 200. Ve skutečnosti tomu tak přesně není. Namáhání hřídele je nutné počítat z momentu, který je vyvinut při přechodových jevech (zkratech). Tento moment není dán jen při trojfázovém zkratu na svorkách generátoru, ale započítává se do toho celé soustrojí, které svou setrvačností působí kroutící moment.

Nejsem schopen přesně určit tento kroutící moment. Svou komplikovaností by spíše šlo o mechanické výpočty a pokud by bylo nutné spočítat s určitou přesností výsledek, zabralo by to přibližně tolik času, že by to vydalo na další diplomovou práci. Proto tedy dále uvažuji, že hřídel takto použitá, vydrží dané namáhání.

3 Závěr

Bezkartáčové budiče mají obrovské výhody vyplývající z jejich uspořádání. Jedná se o synchronní trojfázový generátor v opačném uspořádání, kde do rotoru se indukuje napětí, je usměrněno rotujícím usměrňovačem a budící přívod vede dutým hřídelem skrz budič do rotoru turbogenerátoru. Na statoru jsou budící cívky a póly podobající se pólům u stejnosměrných strojů. Další velkou výhodou je ta, že budič netrpí na problémy vyplývající z uhlíkového prachu (nezanáší se a uhlík se neusazuje na žádných částech stroje). Tento bezkartáčový budič je letmo uložený a obsahuje také rotující, 6-pulzní trojfázový usměrňovač. Tím že budič je letmo uložený, nemá žádné kroužky a dokonce ani ložiska, v tomto konkrétním řešení je ventilace za pomocí cizího chlazení (ventilátor není na hřídeli budiče), tak v něm prakticky zanedbám ztráty mechanické i ventilační.

Musím říci, že nejsložitější část na celé diplomové práci bylo paradoxně modelování jednotlivých částí vinutí kotvy, které si můžete prohlédnout v příloze [15]. Práce mi přinesla mnoho zkušeností s problematikou modelování ve 3D, prohloubila znalosti v oblasti elektromagnetického návrhu synchronních strojů, a skutečnost že jsem měl tu možnost některé věci řešit přímo s pracovníky firmy Brush-SEM mi přinesla mnoho zkušeností s praktickým řešením určitých částí stroje. Měl jsem možnost zkontrolovat můj elektromagnetický výpočet stroje s výpočtovým programem, zjistil jsem, že mé vypočtené rozměry, hmotnosti, odstředivé síly či návrhy vinutí korespondují s výsledky vypočtených ve výpočtovém programu interně používaným ve firmě. Pokud půjdu do detailů nepodařilo se mi přesně určit hodnoty budícího magnetického napětí pro zubovou vrstvu rotoru stroje, přičemž chyba je pravděpodobně v nepřesném určené skutečné magnetické indukce v jednotlivých částech stroje při jevech, kdy dochází k přesycování částí zubů a magnetický tok se šíří i drážkou stroje. Odchylka byla přibližně 20 procent při velmi přebuzeném stavu stroje, ve kterém se v běžném provozu zdaleka nepohybuje. Porovnám-li hodnoty pro indukci ve vzduchové mezeře při jmenovitém výkonu, odchylky byly cca do 5 %. Stroj považuji za správně navržený.

Použitá literatura

[1.] Kopylov, I.P.: Stavba elektrických strojů, SNTL Praha 1988

[2.] Červený, J.: Přednášky, *Vybrané partie z elektrických strojů (KEV/VPES)* , Plzeň

[3.] Červený, J.: Přednášky, *Stavba elektrických strojů 1,2 (KEV/SES1,SES2)* , Plzeň

[4.] Bartoš, V.: *Měření na elektrických strojích*, Plzeň 2002.

[5.] Cigánek, L.: Stavba elektrických strojů, SNTL Praha 1958

Přílohy

Příloha 1: obrázek

Obrázek 3 Konstrukční uspořádání stroje, pohled na usměrňovač

Příloha 2: obrázky

Obrázek 4: Katalogový list výrobce usměrňovací diody použité v budiči

Obrázek 5: Katalogový list výrobce usměrňovací diody použité v budiči

Příloha 3: obrázek

Obrázek 6: Tingleyho schéma znázorňující zapojení vinutí stroje.

Příloha 4: Obrázek

Obrázek 7: Tabulka pro určení Carterova činitele pro drážkování kotvy stroje

Příloha 5: Obrázek

Obrázek 8: Charakteristika k určení skutečné indukce v zubech kotvy

Příloha 6: Obrázek

Obrázek 9: Charakteristika naprázdno bezkartáčového budiče

Příloha 7: Obrázek

Obrázek 10: Výpočet charakteristiky naprázdno

Příloha 8: Obrázek

Obrázek 11: Charakteristika naprázdno bezkartáčového budiče a grafické určení Fb

Příloha 9: Obrázek

Obrázek 12: Magnetizační charakteristiky materiálů budiče

Příloha 10: Obrázek

Obrázek 13: Výběr z normy ČSN 42 8308-1959, rozměry běžně dostupných pasových vodičů

Příloha 11: Obrázek

Obrázek 14: Náčrt zubu a drážky plechu rotoru

Příloha 12: Obrázek

Obrázek 15: Katalogový list materiálu klínů Isoval TM

Příloha 13: Obrázek

Obrázek 16: Katalogový list materiálu klínů Isoval TM

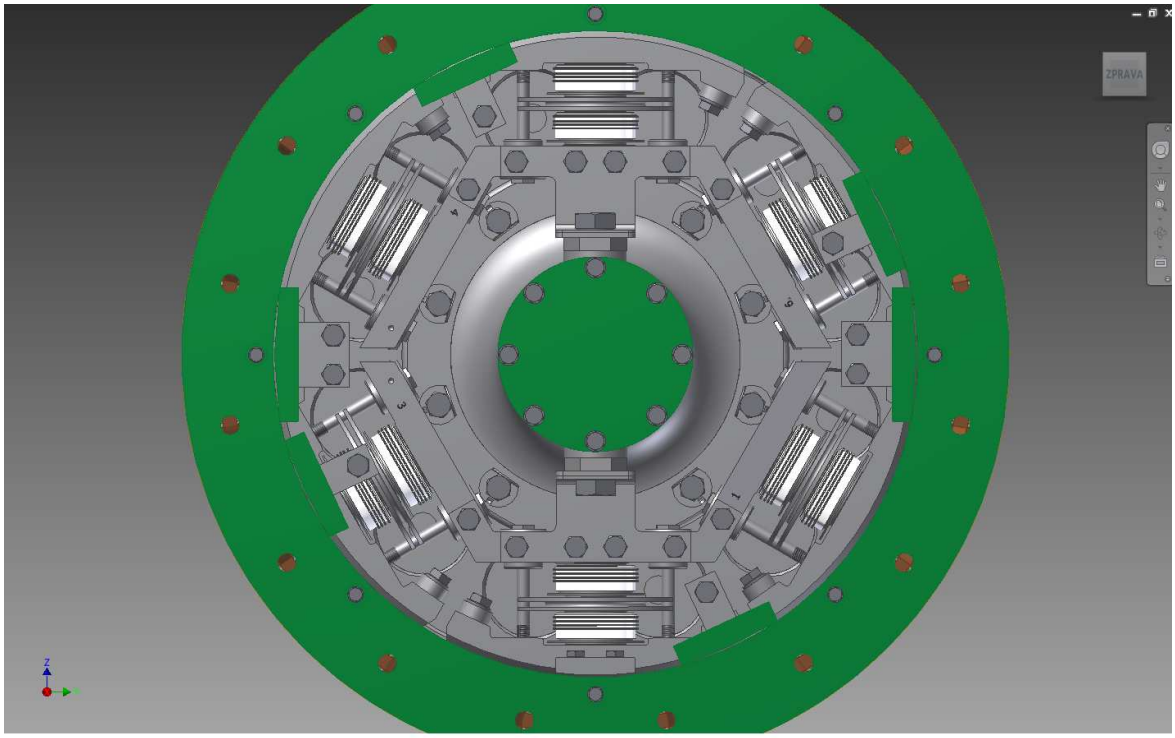
Příloha 14: Obrázek

Obrázek 17: Katalogový list materiálu bandáže Hyperten 2000HP

Příloha 15: Obrázky

Obrázky 19-26: Pohledy na namodelovaný stroj ve 3D CAD programu

Příloha 1:



Obrázek 3: Konstrukční uspořádání rotoru stroje, pohled na usměrňovač

Příloha 2:

5SDA 16F3806

Old part no. DA 808-1620-38

Avalanche Diode

Properties

- low on-state voltage
- avalanche reverse characteristics
- high operational reliability
- suitable for parallel operation

Key Parameters

V_{RRM}	=	3 800	V
I_{FAVm}	=	1 620	A
I_{FSM}	=	20 500	A
V_{TO}	=	1.030	V
r_T	=	0.320	mΩ

Types

	V_{RRM}
5SDA 16F3806	3 800 V
Conditions:	T_j = -40 ÷ 160 °C, half sine waveform, f = 50 Hz

Mechanical Data

F_m	Mounting force	22 ± 2 kN
m	Weight	0.46 kg
D_S	Surface creepage d stance	30 mm
D_a	Air strike distance	20.5 mm

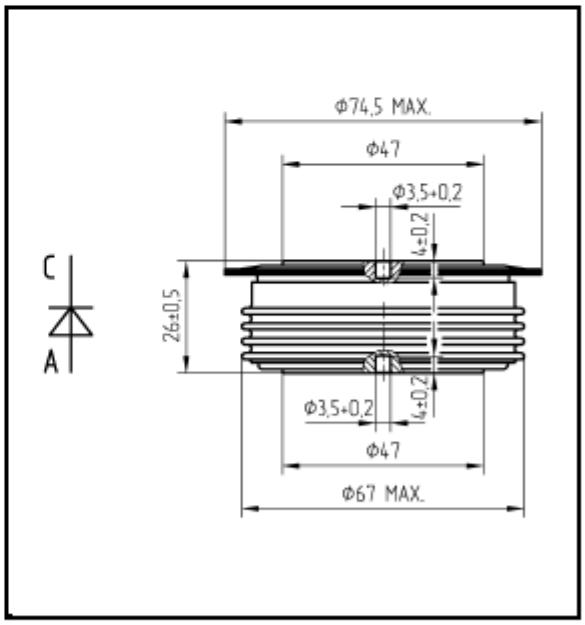


Fig. 1 Case

ABB s.r.o.
Novodvorska 1768/138a, 142 21 Praha 4, Czech Republic
tel.: +420 261 306 250, http://www.abb.com/semiconductors

Obrázek 4: Katalogový list výrobce usměrňovací diody použité v budiči

Maximum Ratings			*Maximum Limits*	*Unit*
V_{RRM}	Repetitive peak reverse voltage T_j = -40 ÷ 160 °C		3 800	V
I_{FAVm}	Average forward current T_c = 85 °C		1 620	A
I_{FRMS}	RMS forward current T_c = 85 °C		2 540	A
I_{RRM}	Repetitive reverse current $V_R = V_{RRM}$		50	mA
I_{FSM}	Non repetitive peak surge current V_R = 0 V, half sine pulse	t_p = 8.3 ms	21 900	A
		t_p = 10 ms	20 500	A
I^2t	Limiting load integral V_R = 0 V, half sine pulse	t_p = 8.3 ms	1 990 000	A^2s
		t_p = 10 ms	2 101 000	A^2s
P_{RSM}	Maximum avalanche power dissipation rectangular pulse 20 µs		50	kW
T_{jmin} -T_{jmax}	Operating temperature range		-40 ÷ 160	°C
T_{STG}	Storage temperature range		-40 ÷ 160	°C

Unless otherwise specified T_j = 160 °C

Characteristics		*Value*			*Unit*
		min	*typ*	*max*	
V_{T0}	Threshold voltage			1.030	V
r_T	Forward slope resistance I_F = 1000 ÷ 3000 A			0.320	mΩ
V_{FM}	Maximum forward voltage I_{FM} = 4 000 A			2.320	V
Q_{rr}	Recovered charge V_R = 100 V, I_{FM} = 2 000 A, di_F/dt = -5 A/µs		3 700		µC

Unless otherwise specified T_j = 160 °C

Thermal Parameters			*Value*	*Unit*
R_{thjc}	Thermal resistance junction to case	*double side cooling*	20	K/kW
		anode side cooling	34	
		cathode side cooling	48	
R_{thch}	Thermal resistance case to heatsink	*double side cooling*	5	K/kW
		single side cooling	10	

Obrázek 5: Katalogový list výrobce usměrňovací diody použité v budiči

Transient Thermal Impedance

Analytical function for transient thermal impedance

$$Z_{thjc} = \sum_{i=1}^{4} R_i (1 - \exp(-t / \tau_i))$$

Conditions:

F_m = 22 ± 2 kN, Double side cooled

i	1	2	3	4
R_i (K/kW)	11.83	4.26	1.63	2.28
τ_i (s)	0.432	0.071	0.01	0.0054

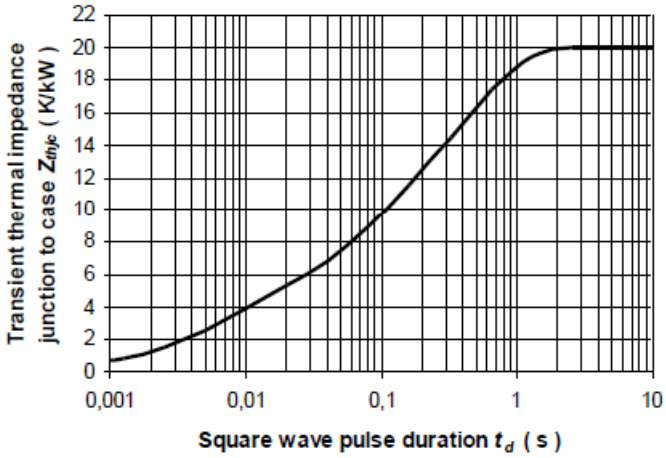


Fig. 2 Transient thermal impedance junction to case

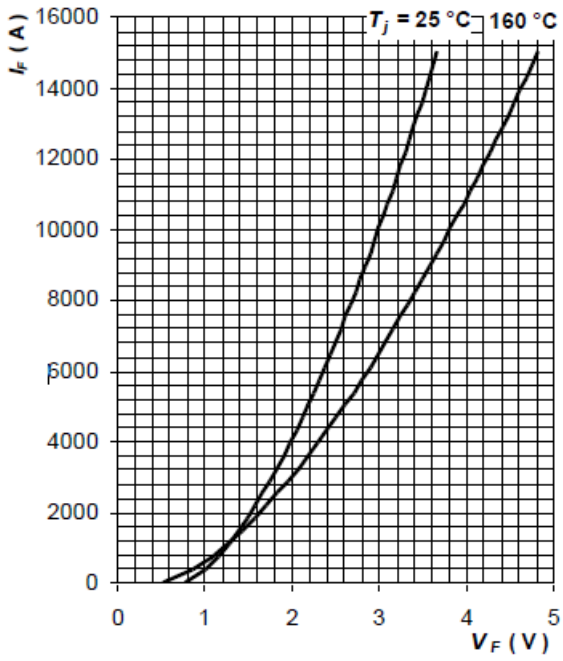


Fig. 3 Maximum forward voltage drop characteristics

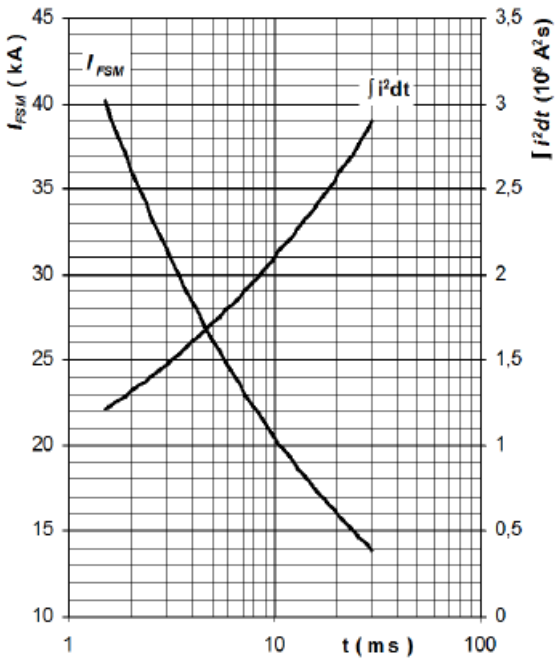
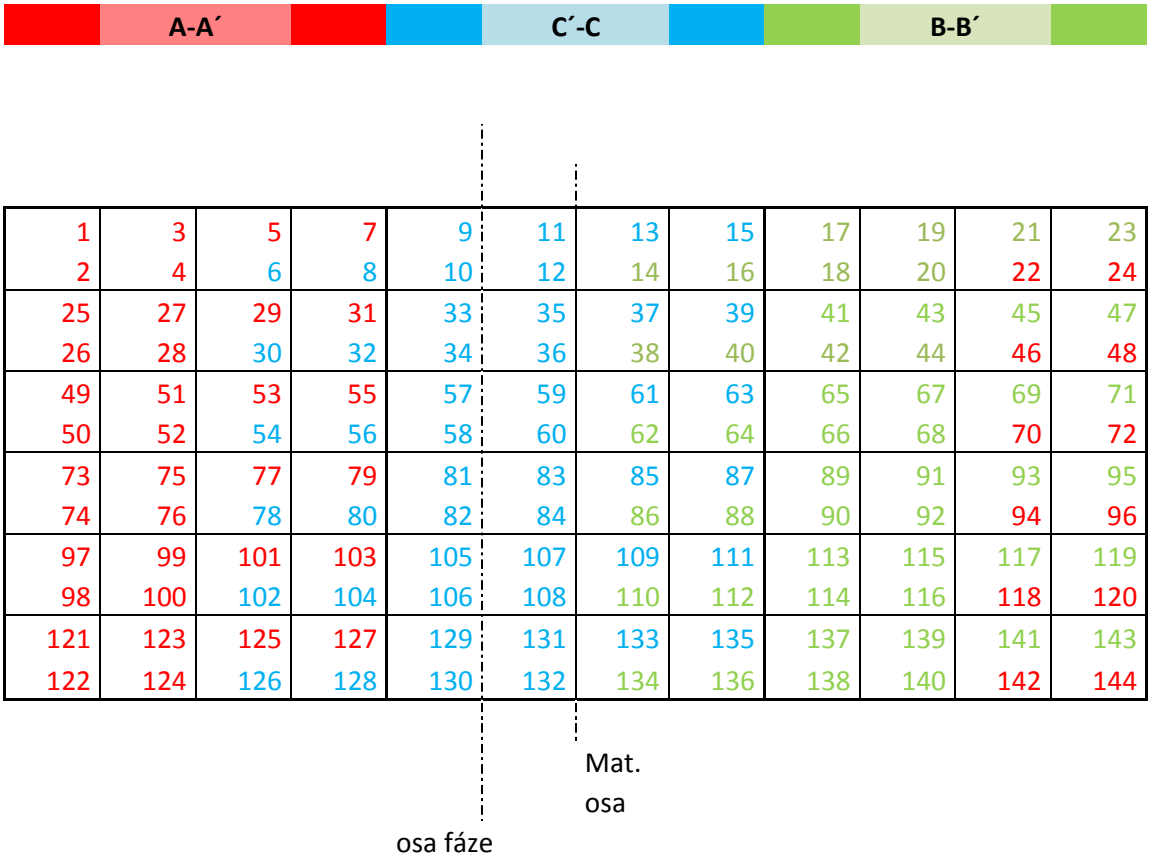


Fig. 4 Surge forward current vs. pulse length, half sine wave, single pulse, V_R = 0 V, T_j = T_{jmax}

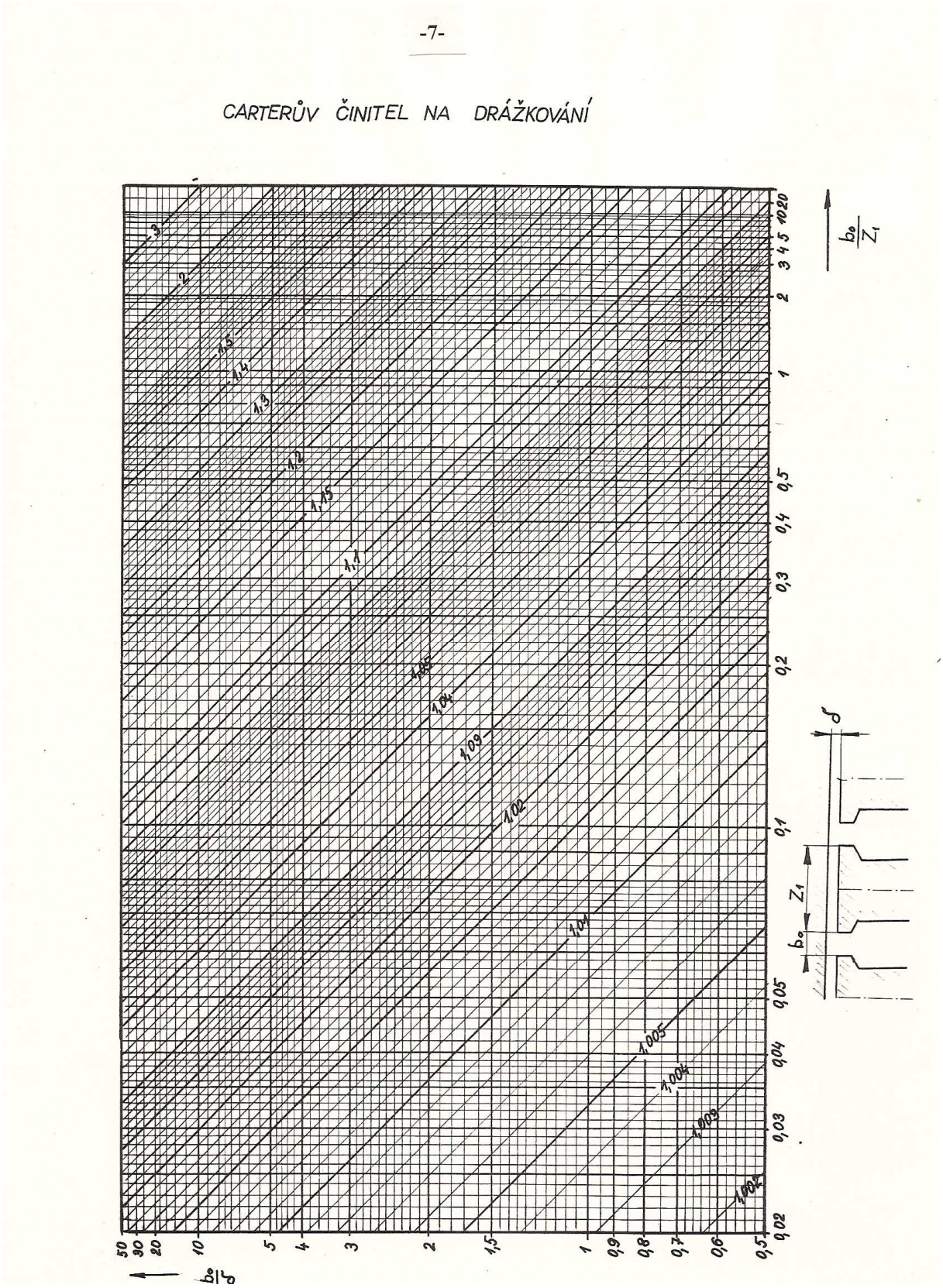
Obrázek 6: Katalogový list výrobce usměrňovací diody použité v budiči

Příloha 3:



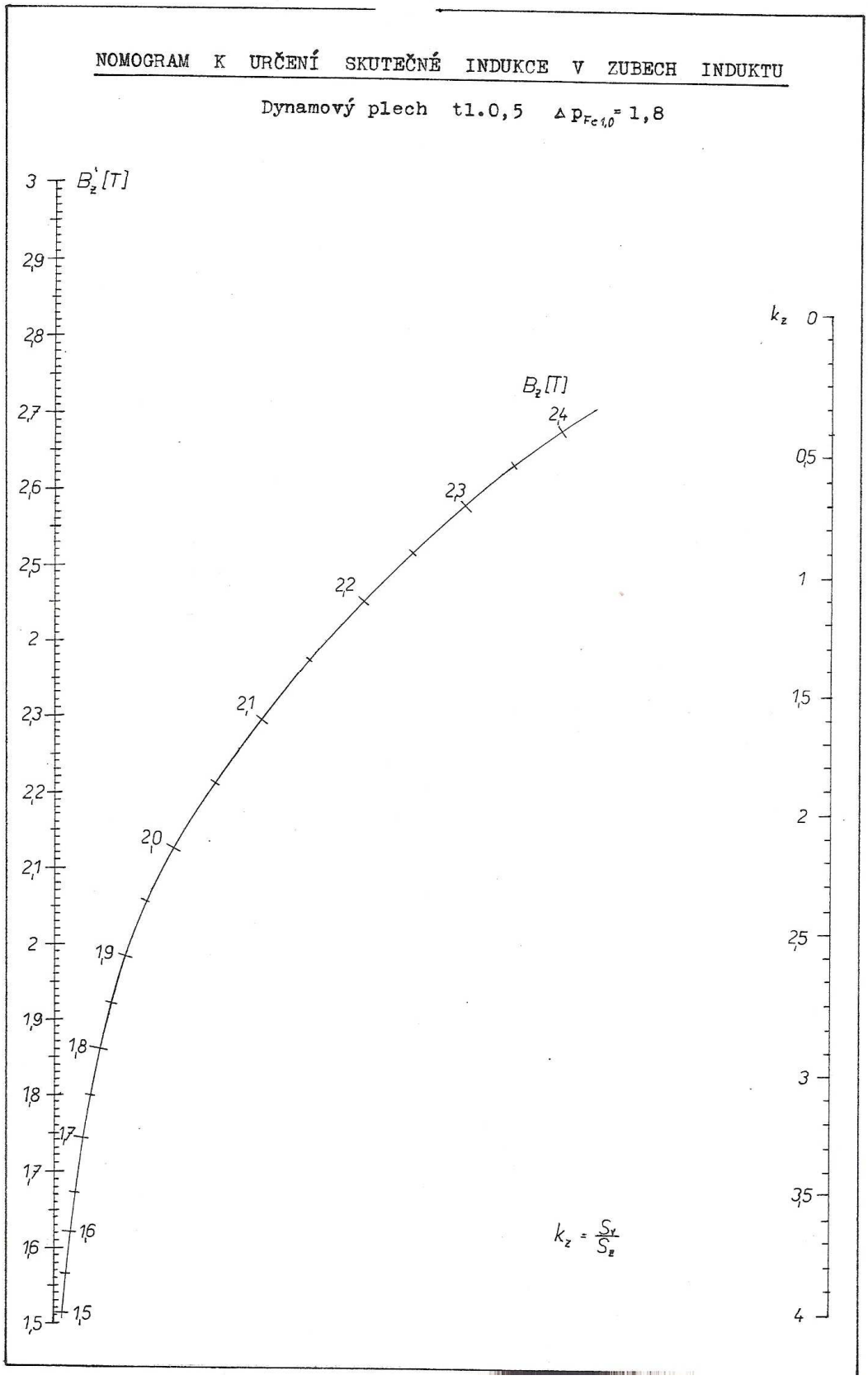
Obrázek 7: Tingleyho schéma znázorňující zapojení vinutí stroje.

Příloha 4:



Obrázek 8: Tabulka pro určení Carterova činitele pro drážkování kotvy stroje

Příloha 5:



Obrázek 9: Charakteristika k určení skutečné indukce v zubech kotvy

Příloha 6:

						Kdx	Zdánlivá Bz [T]	Bz skutečná [T]	H v zubu [A/m]	Hstr-střední intenzita [A/m]	
D1	D1= 620	td1= 27,05	z1= 12,65	kz1= 1,23		1,42	B´z1= 1,47	Bz1= 1,46	Hz1= 702	2249	**76,47**
D2=D1±hd	D2= 586	td2= 25,57	z2= 11,17	kz2= 1,38		1,61	B´z2= 1,57	Bz2= 1,56	Hz2= 1848		
D3=D1±2hd	D3= 552	td3= 24,09	z3= 9,69	kz3= 1,59		1,85	B´z3= 1,7	Bz3= 1,7	Hz3= 5400		
k1 0,4	=1, 2, 3	tdi=πDi/Q		zi=tdi-bd	k1.ϕ	1,42	B´z1= 0,59	Bz1= 0,58	Hz1= 80	84,3333	**2,867**
		kzi=tdi/(zi.kFe)-1		B´zi=Bδ.tdi/(zi.kFe)		1,61	B´z2= 0,63	Bz2= 0,62	Hz2= 84		
						1,85	B´z3= 0,68	Bz3= 0,68	Hz3= 90		
k2 0,5		(Hz1+4Hz2+H		Fz=Hstr.hd	k2.ϕ	1,42	B´z1= 0,73	Bz1= 0,73	Hz1= 95	100,3	**3,41**
						1,61	B´z2= 0,79	Bz2= 0,78	Hz2= 100		
						1,85	B´z3= 0,85	Bz3= 0,85	Hz3= 106,8		
k3 0,6					k3.ϕ	1,42	B´z1= 0,88	Bz1= 0,88	Hz1= 112,2	122,9	**4,179**
						1,61	B´z2= 0,94	Bz2= 0,94	Hz2= 121,4		
						1,85	B´z3= 1,02	Bz3= 1,02	Hz3= 139,6		
k4 0,7					k4.ϕ	1,42	B´z1= 1,03	Bz1= 1,03	Hz1= 142,4	165,633	**5,632**
						1,61	B´z2= 1,1	Bz2= 1,09	Hz2= 161,6		
						1,85	B´z3= 1,19	Bz3= 1,2	Hz3= 205		
k5 0,8					k5.ϕ	1,42	B´z1= 1,17	Bz1= 1,17	Hz1= 195	252,9	**8,599**
						1,61	B´z2= 1,26	Bz2= 1,25	Hz2= 235,6		
						1,85	B´z3= 1,36	Bz3= 1,36	Hz3= 380		
k6 0,9					k6.ϕ	1,42	B´z1= 1,32	Bz1= 1,32	Hz1= 316,8	577,133	**19,62**
						1,61	B´z2= 1,41	Bz2= 1,4	Hz2= 440		
						1,85	B´z3= 1,53	Bz3= 1,53	Hz3= 1386		
k7 1					k7.ϕ	1,42	B´z1= 1,47	Bz1= 1,46	Hz1= 702	2249	**76,47**
						1,61	B´z2= 1,57	Bz2= 1,56	Hz2= 1848		
						1,85	B´z3= 1,7	Bz3= 1,7	Hz3= 5400		
k8 1,1					k8.ϕ	1,42	B´z1= 1,61	Bz1= 1,61	Hz1= 2912	7832	**266,3**
						1,61	B´z2= 1,73	Bz2= 1,73	Hz2= 7040		
						1,85	B´z3= 1,87	Bz3= 1,87	Hz3= 15920		
k9 1,2					k9.ϕ	1,42	B´z1= 1,76	Bz1= 1,76	Hz1= 8460	14265,3	**485**
						1,61	B´z2= 1,88	Bz2= 1,84	Hz2= 13500		
						1,85	B´z3= 2,05	Bz3= 1,94	Hz3= 23132		
k10 1,3					k10.ϕ	1,42	B´z1= 1,91	Bz1= 1,87	Hz1= 15920	27397,1	**931,5**
						1,61	B´z2= 2,04	Bz2= 1,94	Hz2= 23132		
						1,85	B´z3= 2,22	Bz3= 2,1	Hz3= 55935		
k11 1,4					k11.ϕ	1,42	B´z1= 2,05	Bz1= 1,95	Hz1= 23132	49584,5	**1686**
						1,61	B´z2= 2,2	Bz2= 2,07	Hz2= 49816		
						1,85	B´z3= 2,39	Bz3= 2,14	Hz3= 75109		
k12 1,5					k12.ϕ	1,42	B´z1= 2,2	Bz1= 2,06	Hz1= 46757	71813,7	**2442**
						1,61	B´z2= 2,35	Bz2= 2,13	Hz2= 71080		
						1,85	B´z3= 2,56	Bz3= 2,2	Hz3= 99804		
k13 1,6					k13.ϕ	1,42	B´z1= 2,34	Bz1= 2,15	Hz1= 75109	103266	**3511**
						1,61	B´z2= 2,51	Bz2= 2,2	Hz2= 99804		
						1,85	B´z3= 2,73	Bz3= 2,26	Hz3= 145274		
k14 1,7					k14.ϕ	1,42	B´z1= 2,49	Bz1= 2,21	Hz1= 111442	135321	**4601**
						1,61	B´z2= 2,67	Bz2= 2,24	Hz2= 130858		
						1,85	B´z3= 2,9	Bz3= 2,3	Hz3= 177050		
k15 1,8					k15.ϕ	1,42	B´z1= 2,64	Bz1= 2,25	Hz1= 137330	167787	**5705**
						1,61	B´z2= 2,82	Bz2= 2,29	Hz2= 169106		
						1,85	B´z3= 3,07	Bz3= 2,32	Hz3= 192970		
k16 1,9					k16.ϕ	1,42	B´z1= 2,78	Bz1= 2,3	Hz1= 177050	206237	**7012**
						1,61	B´z2= 2,98	Bz2= 2,34	Hz2= 208890		
						1,85	B´z3= 3,24	Bz3= 2,36	Hz3= 224810		

Obrázek 10: Tabulka výpočtu zubové vrstvy kotvy stroje

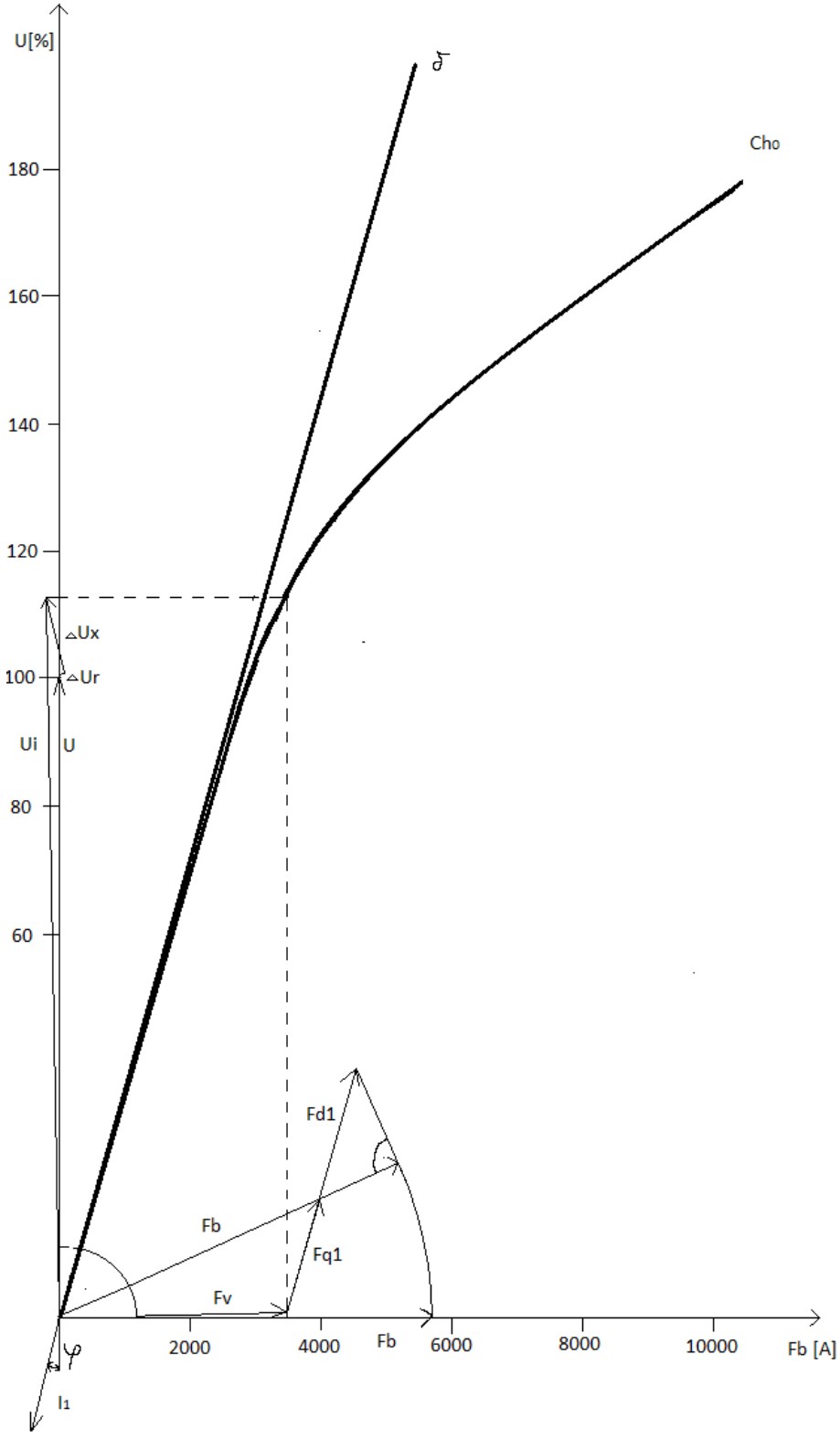
Příloha 7:

					ϕ			k1.ϕ			k2.ϕ			k3.ϕ			k4.ϕ			k5.ϕ			k6.ϕ			k7.ϕ		
					B[T]	H[A/m]	F[A]	B[T]	H[A/m]	F[A]	B[T]	H[A/m]	F[A]	B[T]	H[A/m]	F[A]	B[T]	H[A/m]	F[A]	B[T]	H[A/m]	F[A]	B[T]	H[A/m]	F[A]	B[T]	H[A/m]	F[A]
Vzduch. Mezera			δ [m]=	0,006	0,55		2711,3	0,22		1084,5	0,28		1355,6	0,33		1626,8	0,39		1897,9	0,44		2169	0,50		2440,2	0,55		2711,3
Zuby				Bz´1	1,47			0,59			0,73			0,88			1,10			1,17			1,32			1,47		
	Hlava	kz1=	1,23	Bz1	1,46	702		0,58	80		0,73	95		0,88	112,2		1,03	161,6		1,17	195		1,32	316,8		1,46	702	
				Bz´2	1,57			0,63			0,79			0,94			1,10			1,26			1,41			1,57		
	Střed	kz2=	1,38	Bz2	1,56	1848		0,62	84		0,78	100		0,94	121,4		1,09	161,6		1,25	235,6		1,40	440		1,56	1848	
				Bz´3	1,70			0,68			0,85			1,02			1,19			1,36			1,53			1,70		
	Pata	kz3=	1,59	Bz3	1,70	5400		0,68	90		0,85	106,8		1,02	139,6		1,20	205		1,36	380		1,53	1386		1,70	5400	
	Střední hodnota		hz=	34		2249	76,5		84,333	2,9		100,3	3,4		122,9	4,2		165,63	5,6		252,9	8,6		577,13	19,6		2249	76,5
jho statoru			ls=	0,234	0,68	680	159,1	0,27	280	65,5	0,34	340	79,6	0,41	400	93,6	0,48	470	110,0	0,54	540	126,4	0,61	610	142,7	0,68	680	159,1
Pól			lp=	0,1	0,69	612	61,2	0,27	220	22,0	0,34	290	29,0	0,41	360	36,0	0,48	420	42,0	0,55	486	48,6	0,62	549	54,9	0,69	612	61,2
jho rotoru			lr=	0,122	0,70	91	11,1	0,28	50	6,1	0,35	57	7,0	0,42	64	7,8	0,49	70	8,5	0,56	77	9,4	0,63	85	10,4	0,70	91	11,1
ΣF=Fδ+Fz+Fjs+Fp+Fjr					**3019,2**			**1181,0**			**1474,6**			**1768,4**			**2064,0**			**2362,0**			**2667,8**			**3019,2**		

k8.ϕ			k9.ϕ			k10.ϕ			k11.ϕ			k12.ϕ			k13.ϕ			k14.ϕ			k15.ϕ			k16.ϕ		
B[T]	H[A/m]	F[A]	B[T]	H[A/m]	F[A]	B[T]	H[A/m]	F[A]	B[T]	H[A/m]	F[A]	B[T]	H[A/m]	F[A]	B[T]	H[A/m]	F[A]	B[T]	H[A/m]	F[A]	B[T]	H[A/m]	F[A]	B[T]	H[A/m]	F[A]
0,61		2982,4	0,66		3253,5	0,72		3524,7	0,77		3795,8	0,83		4066,9	0,88		4338	0,94		4609,2	0,99		4880,3	1,05		5151,4
1,61			1,76			1,91			2,05			2,20			2,34			2,49			2,64			2,78		
1,61	2912		1,76	8460		1,87	15920		1,95	23132		2,06	46757		2,15	75109		2,21	111442		2,25	137330		2,30	177050	
1,73			1,88			2,04			2,20			2,35			2,51			2,67			2,82			2,98		
1,73	7040		1,84	13500		1,94	23132		2,07	49816		2,13	71080		2,20	99804		2,24	130858		2,29	169106		2,34	208890	
1,87			2,05			2,22			2,39			2,56			2,73			2,90			3,07			3,24		
1,87	15920		1,94	23132		2,10	55935		2,14	75109		2,20	99804		2,26	145274		2,30	177050		2,30	192970		2,32	224810	
	7832	266,3		14265	485,0		27397	931,5		49584	1685,9		71814	2441,7		103266	3511,1		135321	4600,9		167787	5704,8		206237	7012,0
0,75	740	173,2	0,82	810	189,5	0,88	880	205,9	0,95	950	222,3	1,02	1024	239,6	1,09	1108	259,3	1,16	1250	292,5	1,22	1462	342,1	1,29	1762	412,3
0,75	680	68,0	0,82	768	76,8	0,89	870	87,0	0,96	965	96,5	1,03	1024	102,4	1,10	1124	112,4	1,16	1278	127,8	1,23	1498	149,8	1,30	1810	181,0
0,77	99	12,1	0,84	106,8	13,0	0,91	115	14,0	0,98	127,4	15,5	1,05	1048	127,9	1,12	1162	141,8	1,19	1362	166,2	1,26	1618	197,4	1,33	1930	235,5
3501,9			**4017,9**			**4763,1**			**5816,0**			**6978,5**			**8362,5**			**9796,5**			**11274,4**			**12992,2**		

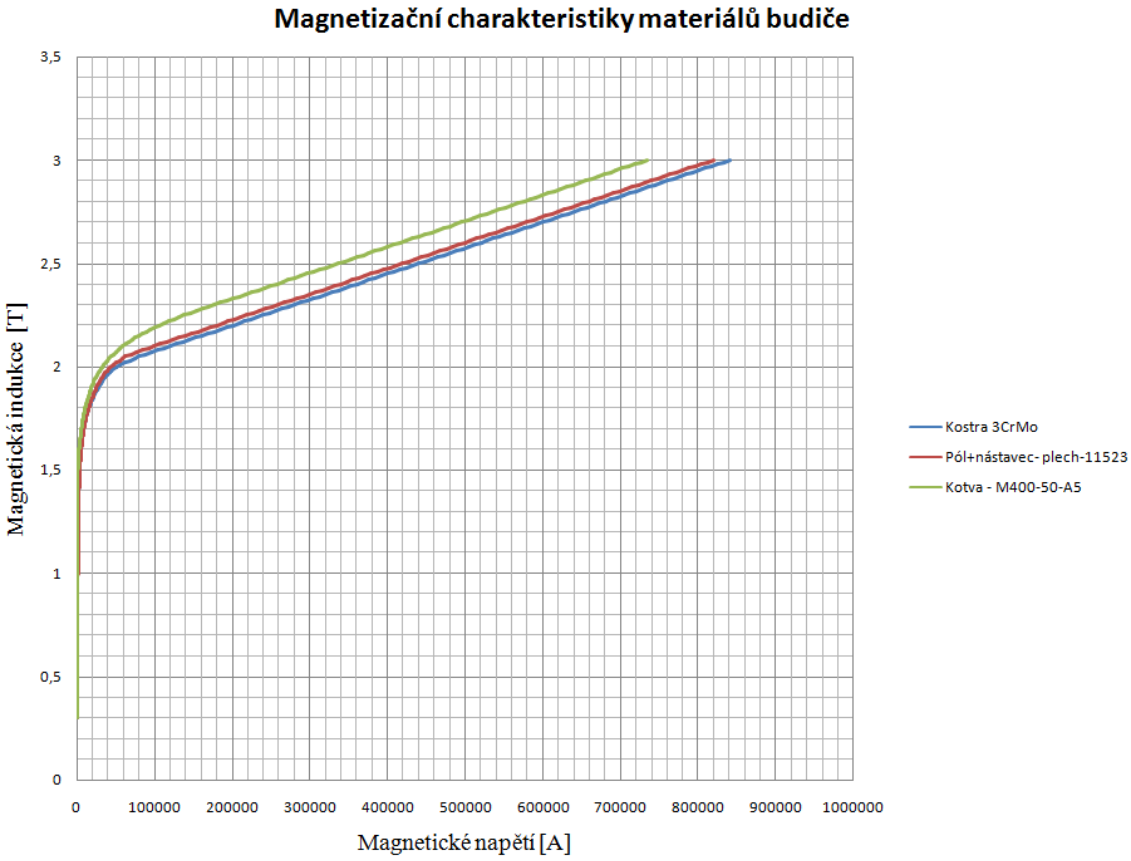
Obrázek 11: Výpočet charakteristiky naprázdno

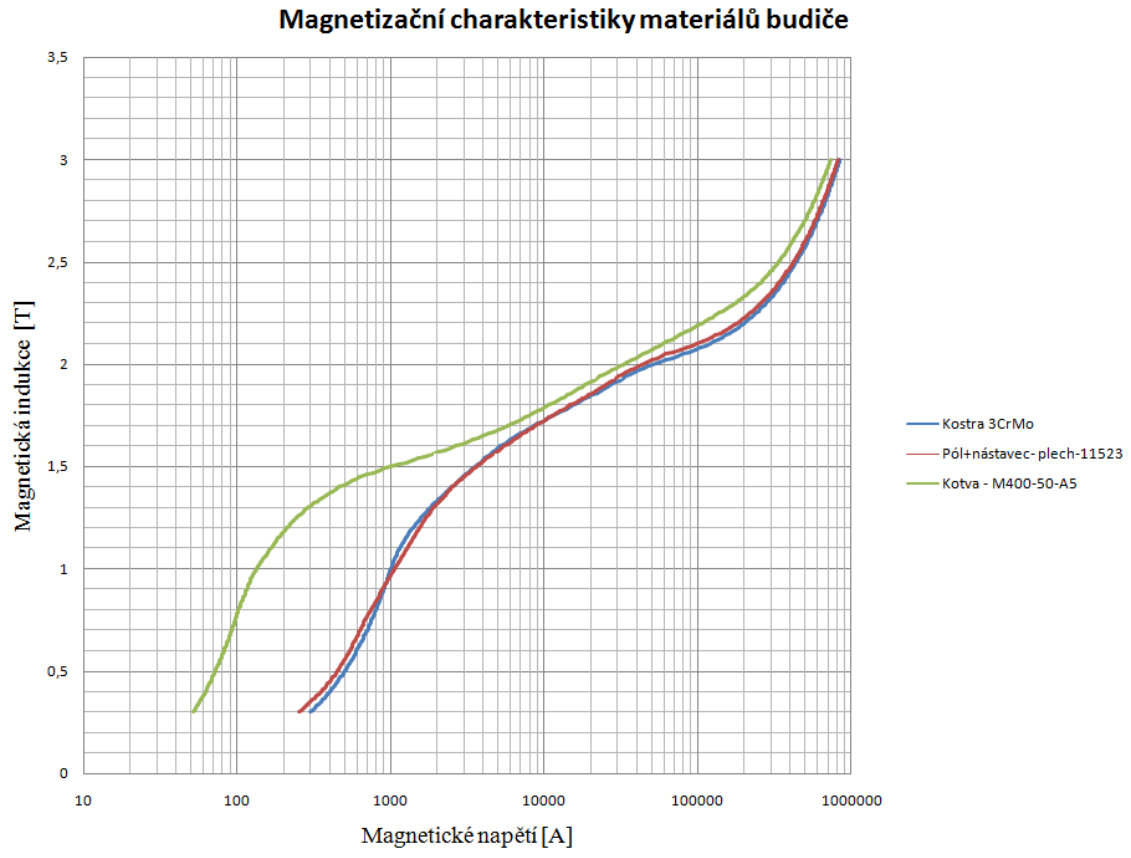
Příloha 8:



Obrázek 12: Charakteristika naprázdno bezkartáčového budiče a grafické určení Fb

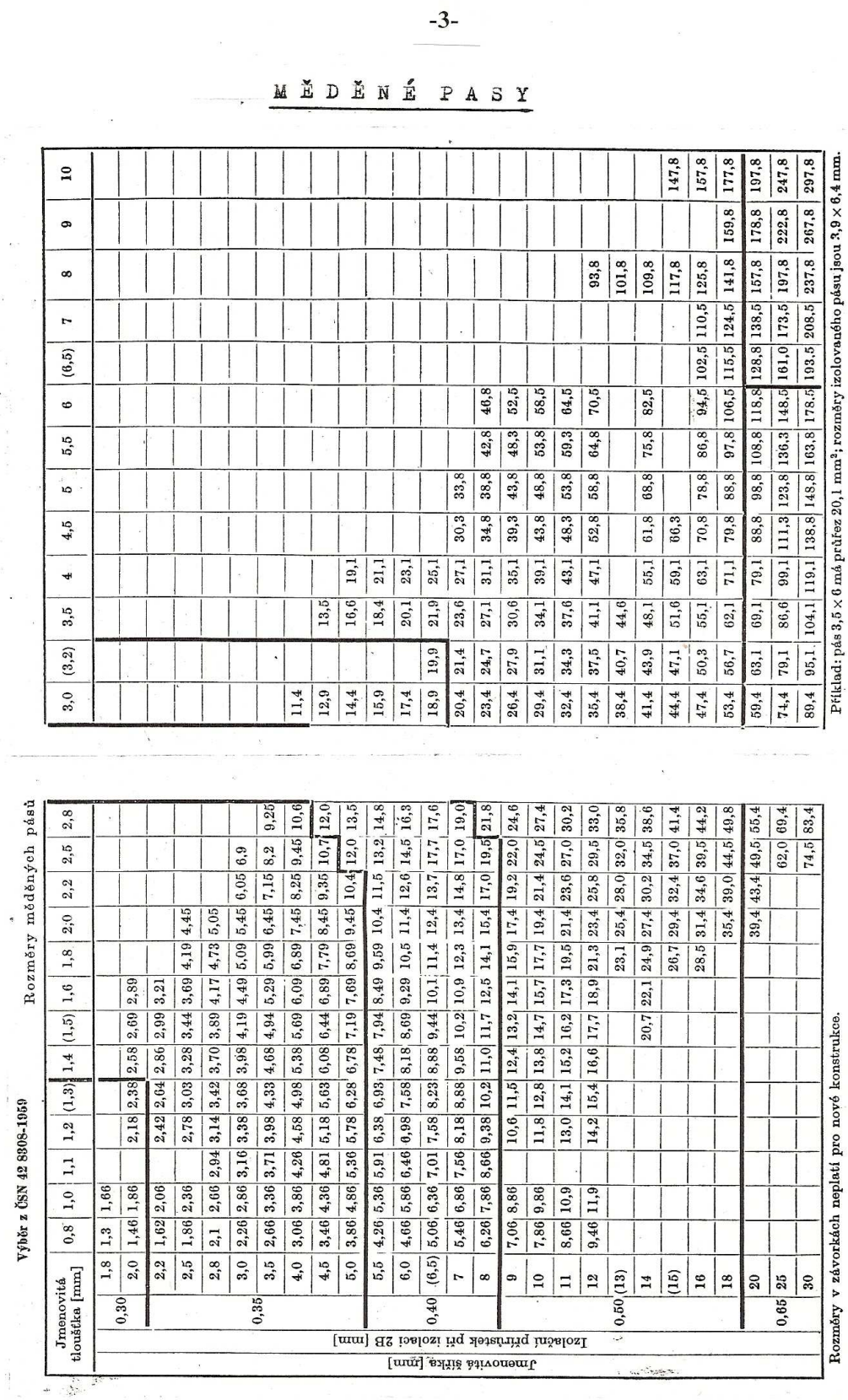
Příloha 9:





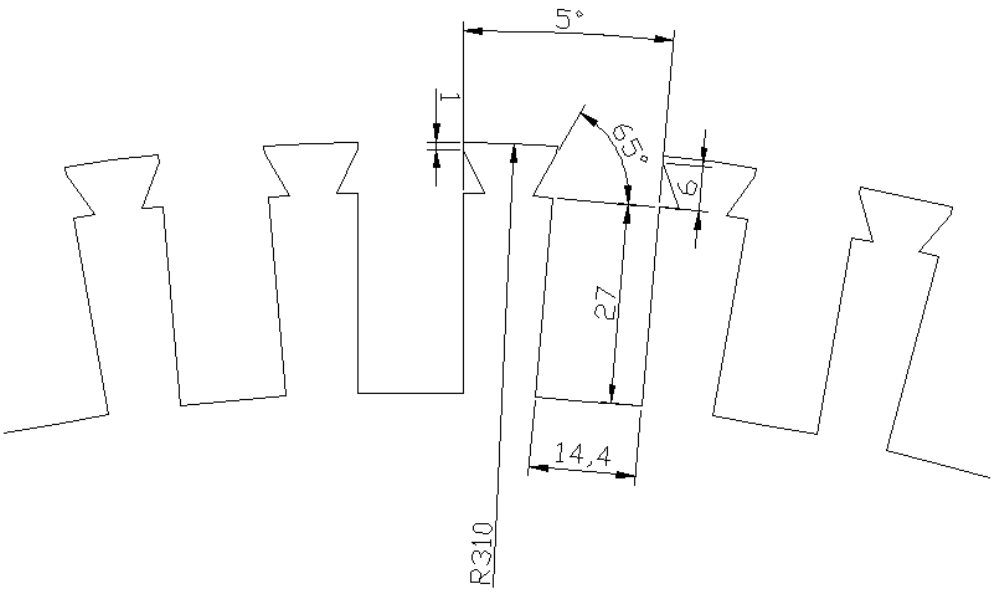
Obrázek 13: Magnetizační charakteristiky materiálů budiče

Příloha 10:



Obrázek 14: Výběr z normy ČSN 42 8308-1959, rozměry běžně dostupných pasových vodičů

Příloha 11:



Obrázek 15: Náčrt zubu a drážky plechu rotoru

Příloha 12:

ISOVAL® TM

ISOVAL® TM is according to the following international standards:

IEC 60893	EP GC 203, EP GC 308
NEMA LI 1	G 11

Composition

ISOVAL® TM is prepared from glass fabric impregnated with the well known ISOVAL® epoxy system. It gives good thermal endurance at elevated temperatures, a very good chemical resistance and a limiting temperature of more than 180°C.

Application

ISOVAL® TM is especially used in those areas where good machinability is required. Due to its fine glass fabric ISOVAL® TM can also be more easily machined than other materials.

Availability

Thickness:	0,2 - 145 mm
Tolerances:	acc. IEC 60893
Sheet size:	1300 +30/-0 mm x 1040 +30/-0 mm
	2140 +30/-0 mm x 1040 +30/-0 mm (up to 100 mm thickness)
	1040 +30/-0 mm x 1040 +30/-0 mm (up to 100 mm thickness)
	2800 +30/-0 mm x 1220 +30/-0 mm (up to 80 mm thickness)
	1400 ±10 mm x 1220 +30/-0 mm (up to 80 mm thickness)
Colour:	slight green

Other sizes on request
Machined parts and cuttings are available on request.

All information given here is based on currently available facts and on the results of experiments performed with all due care in our laboratories. It does not in any way reduce the responsibility of the user for carrying out further tests in order to ensure successful processing and use in specific applications.

ISOVOLTA AG • Prepregs & Laminates • Industrial • A - 2355 Wiener Neudorf • Austria
phone +43/5/9595-9407 • fax +43/5/9595-9403 • prepregs-laminates@isovolta.com • www.isovolta.com
Company No. 80592 v • Commercial register: Wr. Neustadt • VAT: ATU 142 43 102 • DPR 8028

Obrázek 16: Katalogový list materiálu Isoval TM

Příloha 13:

isovolta GROUP

Technical Data

Values in the table are mean values of our production. Values according to the standards are guaranteed.

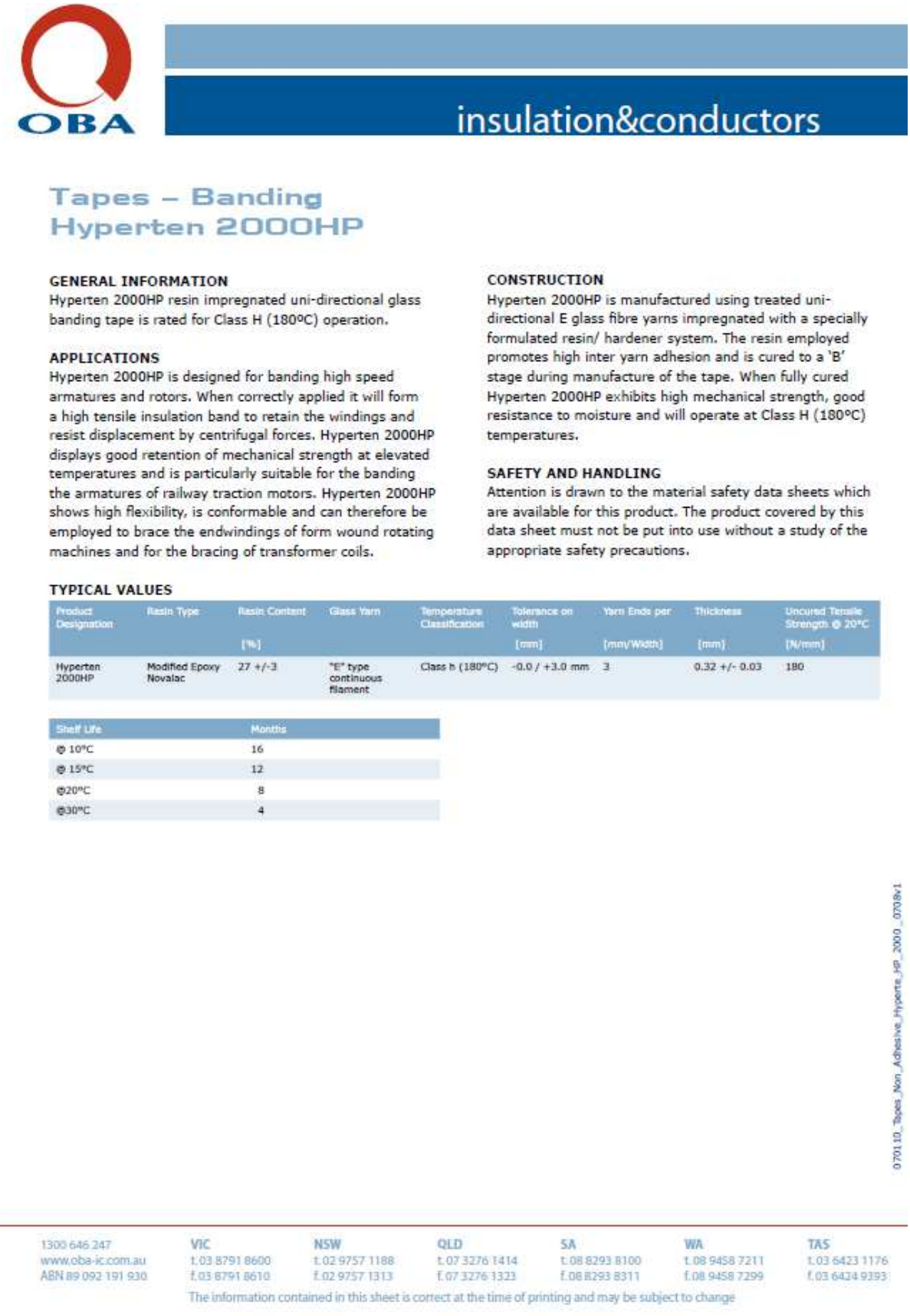
Properties	Test method	Unit	Value
Density	ISO 1183/A	g/cm³	approx. 2,0
Flexural strength at 23°C / 120 °C / 150°C	ISO 178	MPa	400 / 280 / 200
Flexural modulus of elasticity	ISO 178	MPa	approx. 18000
Impact strength (Charpy) parallel to laminations - with notch - without notch	ISO 179/3 C	kJ/m²	 50 100
Tensile strength	ISO 527	MPa	220
Compressive strength perpendicular to laminations	ISO 604	MPa	500
Compressive strength parallel to laminations	ISO 604	MPa	150
Insulation resistance after immersion in water	IEC 167	Ohm	5.10^{10}
Electrical strength at 90°C in oil perpendicular to laminations (thickness 3 mm)	IEC 243	KV/mm	13
Breakdown voltage at 90°C in oil parallel to laminations	IEC 243	kV	40
Permittivity at 50 Hz and 1 MHz	IEC 250	-	5.5
Comparative tracking index	IEC 112	-	CTI 180
Thermal endurance	IEC 216	T.I.	180
Water absorption (thickness 10 mm)	ISO 62/1	mg	30

All information given here is based on currently available facts and on the results of experiments performed with all due care in our laboratories. It does not in any way reduce the responsibility of the user for carrying out further tests in order to ensure successful processing and use in specific applications.

ISOVOLTA AG • Prepregs & Laminates • Industrial • A - 2355 Wiener Neudorf • Austria
phone +43/5/9595-9407 • fax +43/5/9595-9403 • prepregs-laminates@isovolta.com • www.isovolta.com
Company No. 80592 v • Commercial register: Wr. Neustadt • VAT: ATU 142 43 102 • DPR 8028

Obrázek 17: Katalogový list materiálu Isoval TM

Příloha 14:



OBA

insulation&conductors

Tapes – Banding
Hyperten 2000HP

GENERAL INFORMATION
Hyperten 2000HP resin impregnated uni-directional glass banding tape is rated for Class H (180ºC) operation.

APPLICATIONS
Hyperten 2000HP is designed for banding high speed armatures and rotors. When correctly applied it will form a high tensile insulation band to retain the windings and resist displacement by centrifugal forces. Hyperten 2000HP displays good retention of mechanical strength at elevated temperatures and is particularly suitable for the banding the armatures of railway traction motors. Hyperten 2000HP shows high flexibility, is conformable and can therefore be employed to brace the endwindings of form wound rotating machines and for the bracing of transformer coils.

CONSTRUCTION
Hyperten 2000HP is manufactured using treated uni-directional E glass fibre yarns impregnated with a specially formulated resin/ hardener system. The resin employed promotes high inter yarn adhesion and is cured to a 'B' stage during manufacture of the tape. When fully cured Hyperten 2000HP exhibits high mechanical strength, good resistance to moisture and will operate at Class H (180°C) temperatures.

SAFETY AND HANDLING
Attention is drawn to the material safety data sheets which are available for this product. The product covered by this data sheet must not be put into use without a study of the appropriate safety precautions.

TYPICAL VALUES

Product Designation	Resin Type	Resin Content [%]	Glass Yarn	Temperature Classification	Tolerance on width [mm]	Yarn Ends per [mm/Width]	Thickness [mm]	Uncured Tensile Strength @ 20°C [N/mm]
Hyperten 2000HP	Modified Epoxy Novalac	27 +/-3	"E" type continuous filament	Class h (180°C)	-0.0 / +3.0 mm	3	0.32 +/- 0.03	180

Shelf Life	Months
@ 10°C	16
@ 15°C	12
@20°C	8
@30°C	4

0701.10_Tapes_Non_Adhesive_Hyperte_HP_2000_0708v1

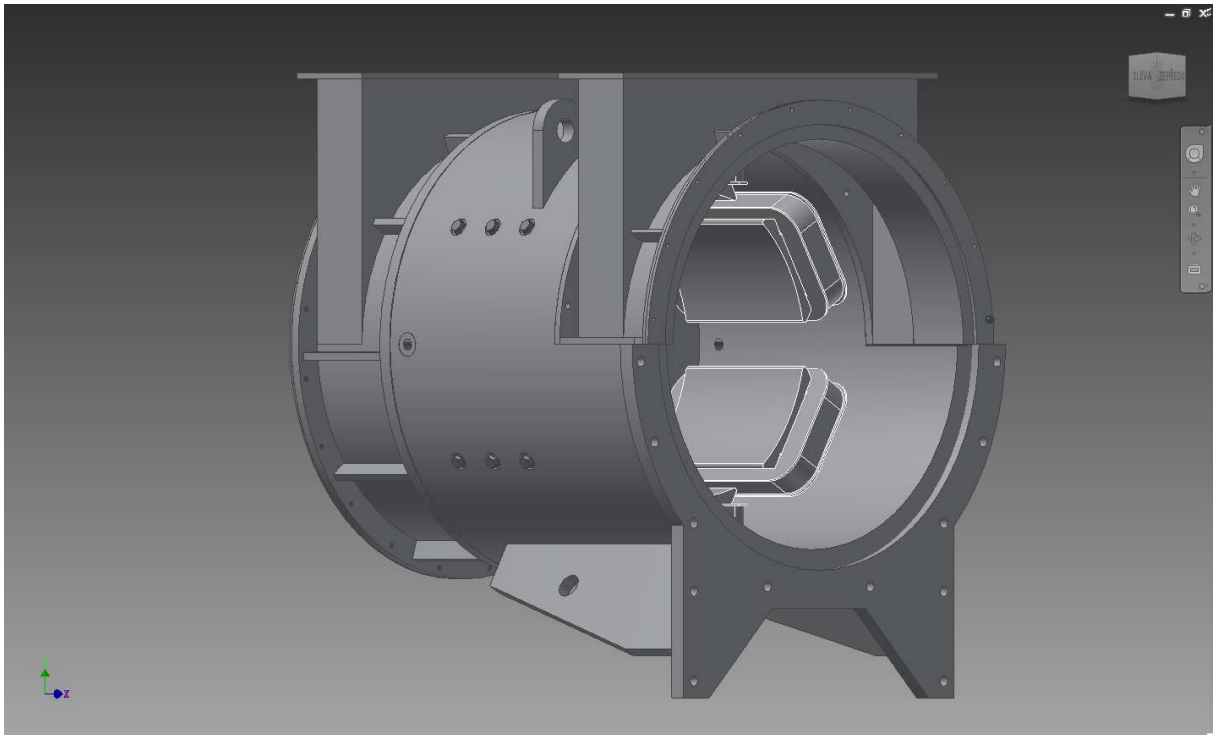
1300 646 247
www.oba-ic.com.au
ABN 89 092 191 930

VIC t. 03 8791 8600 f. 03 8791 8610
NSW t. 02 9757 1188 f. 02 9757 1313
QLD t. 07 3276 1414 f. 07 3276 1323
SA t. 08 8293 8100 f. 08 8293 8311
WA t. 08 9458 7211 f. 08 9458 7299
TAS t. 03 6423 1176 f. 03 6424 9393

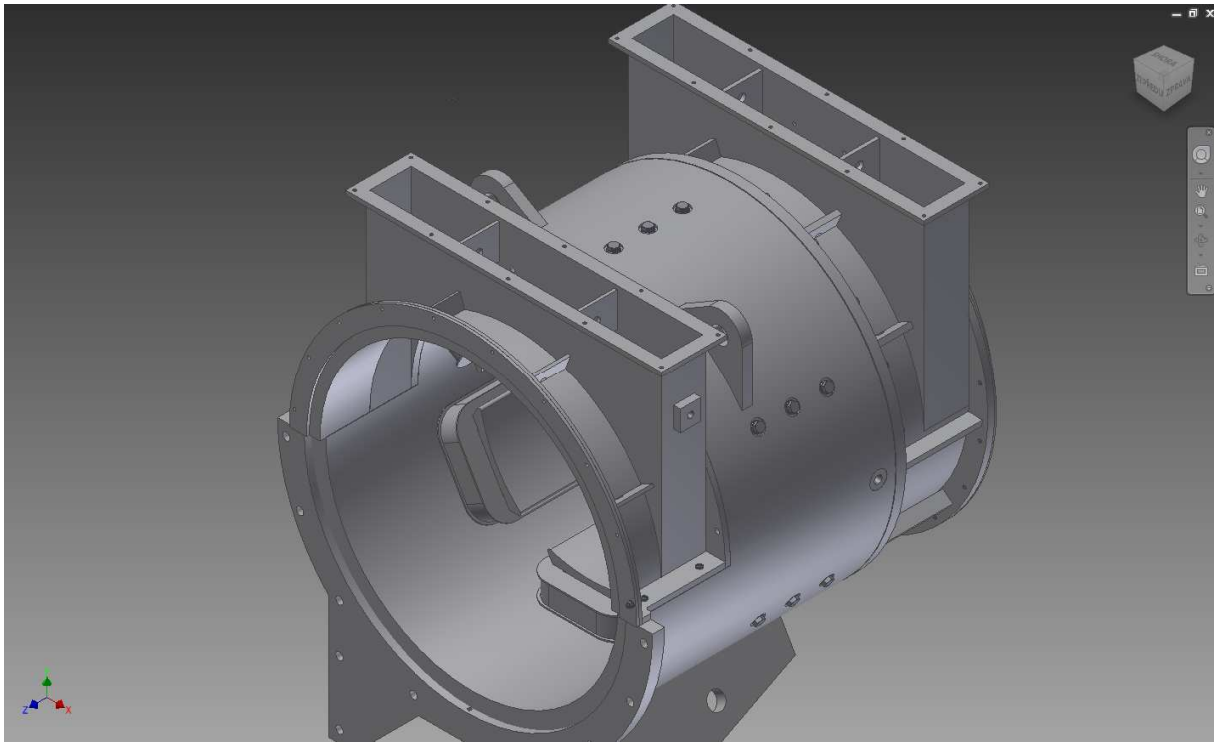
The information contained in this sheet is correct at the time of printing and may be subject to change

Obrázek 18: Katalogový list materiálu bandáže Hyperten 2000HP

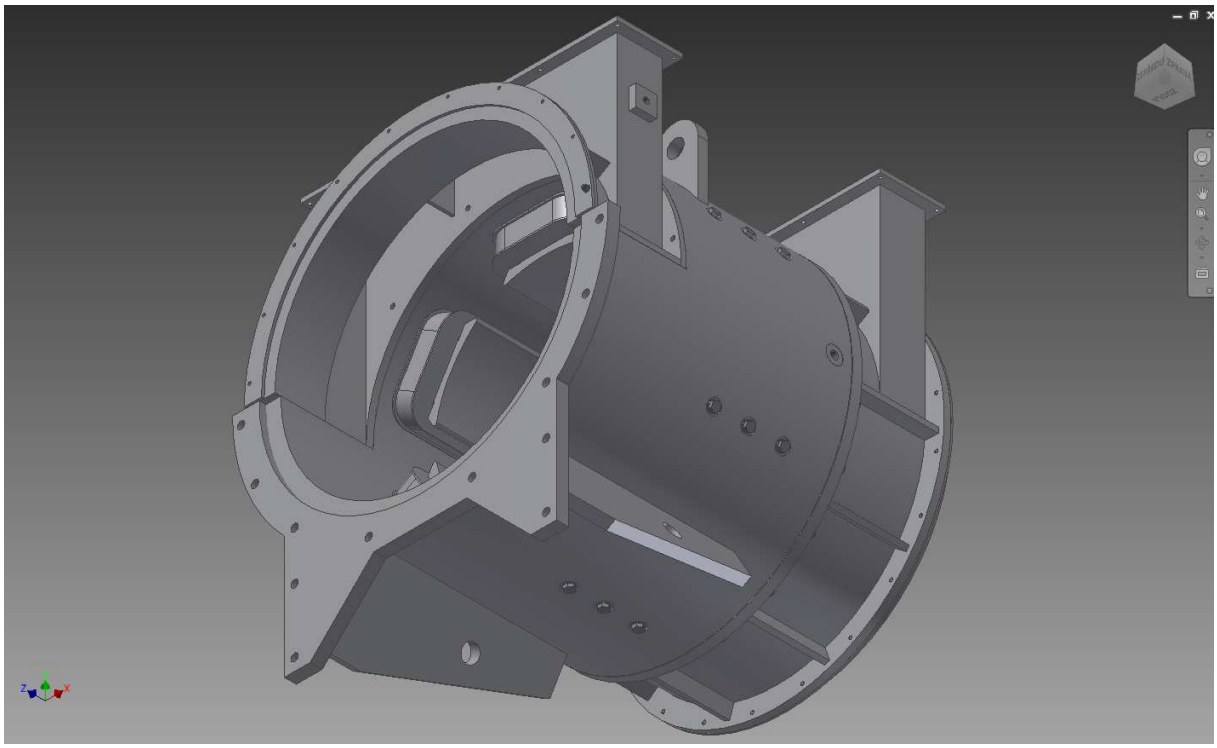
Příloha 15:



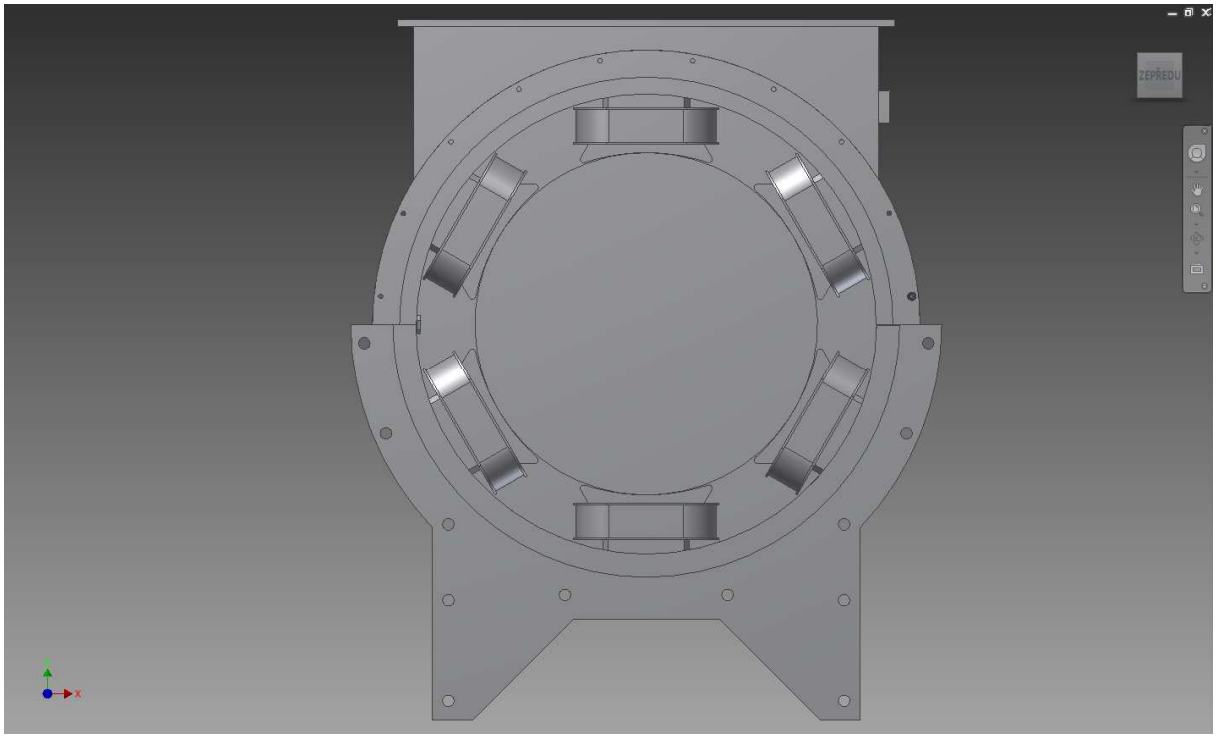
Obrázek 19:Pohled na namodelovaný stator stroje



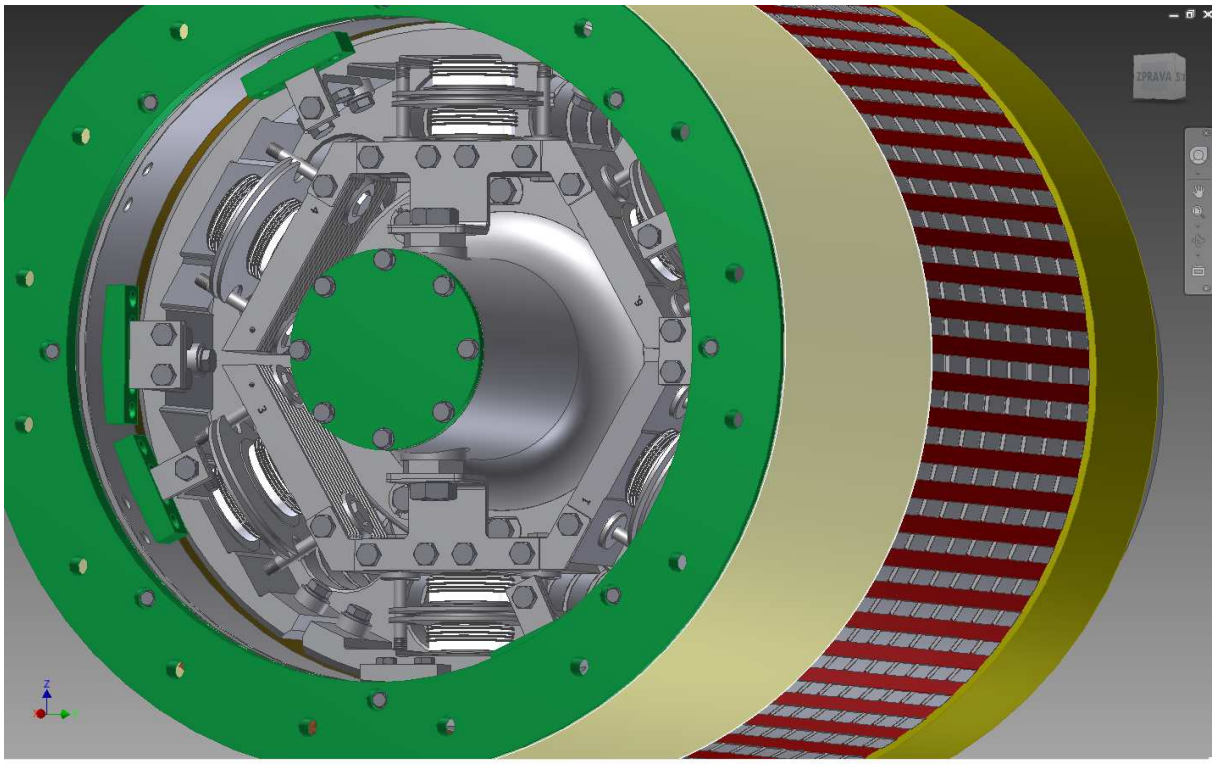
Obrázek 20: Horní pohled na stator stroje s detailem na ventilační příruby



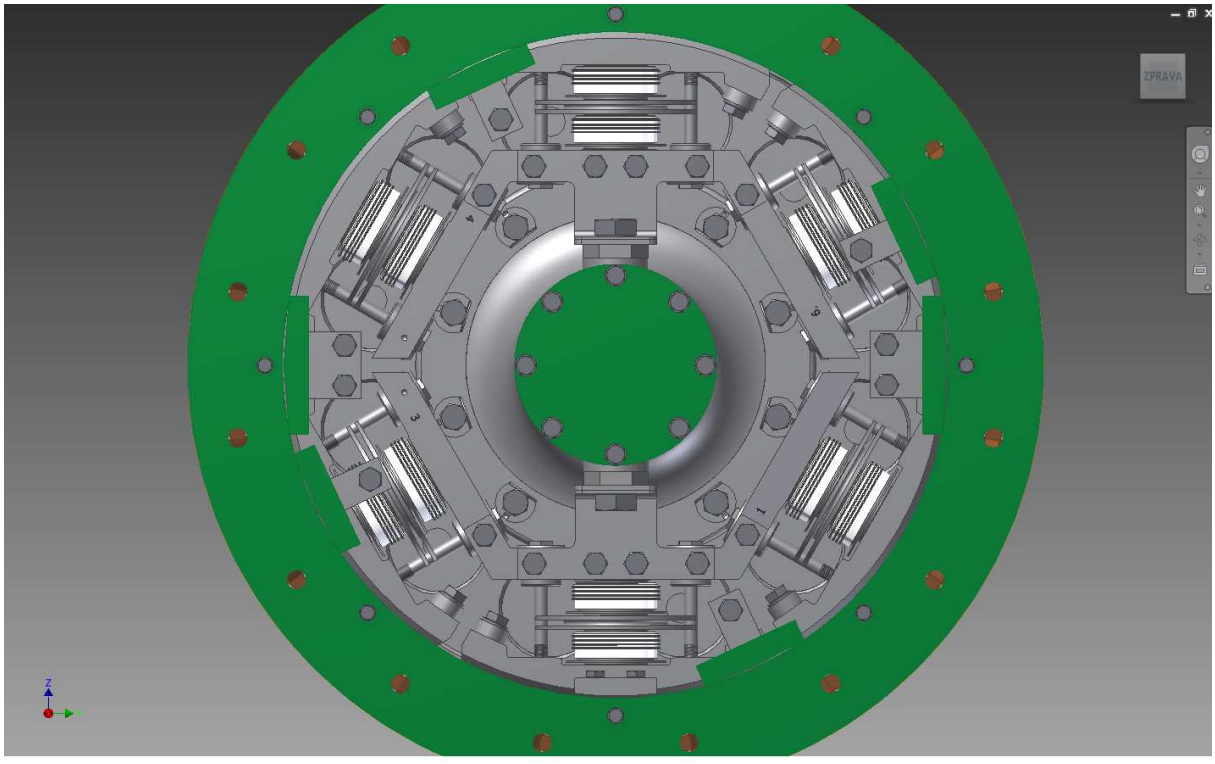
Obrázek 21: Pohled na stator stroje zespodu



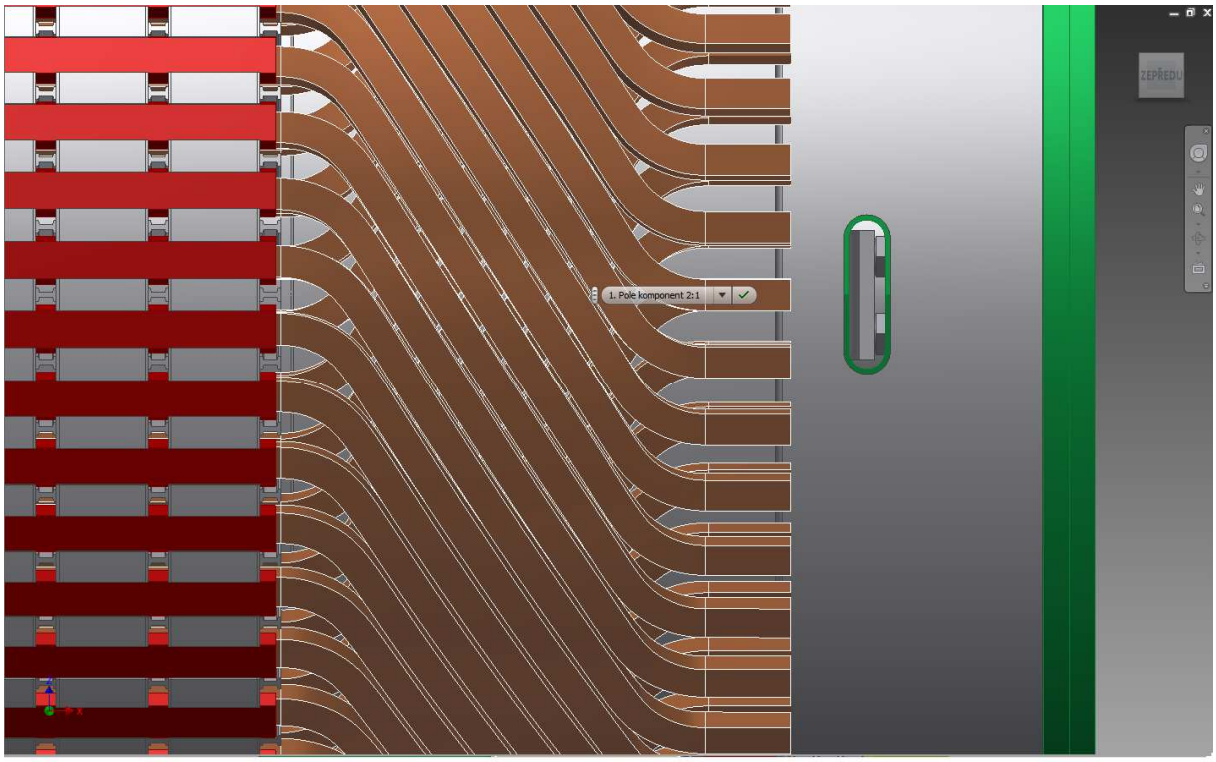
Obrázek 22: Pohled na stator budiče z pohledu od osy rotoru turbogenerátoru



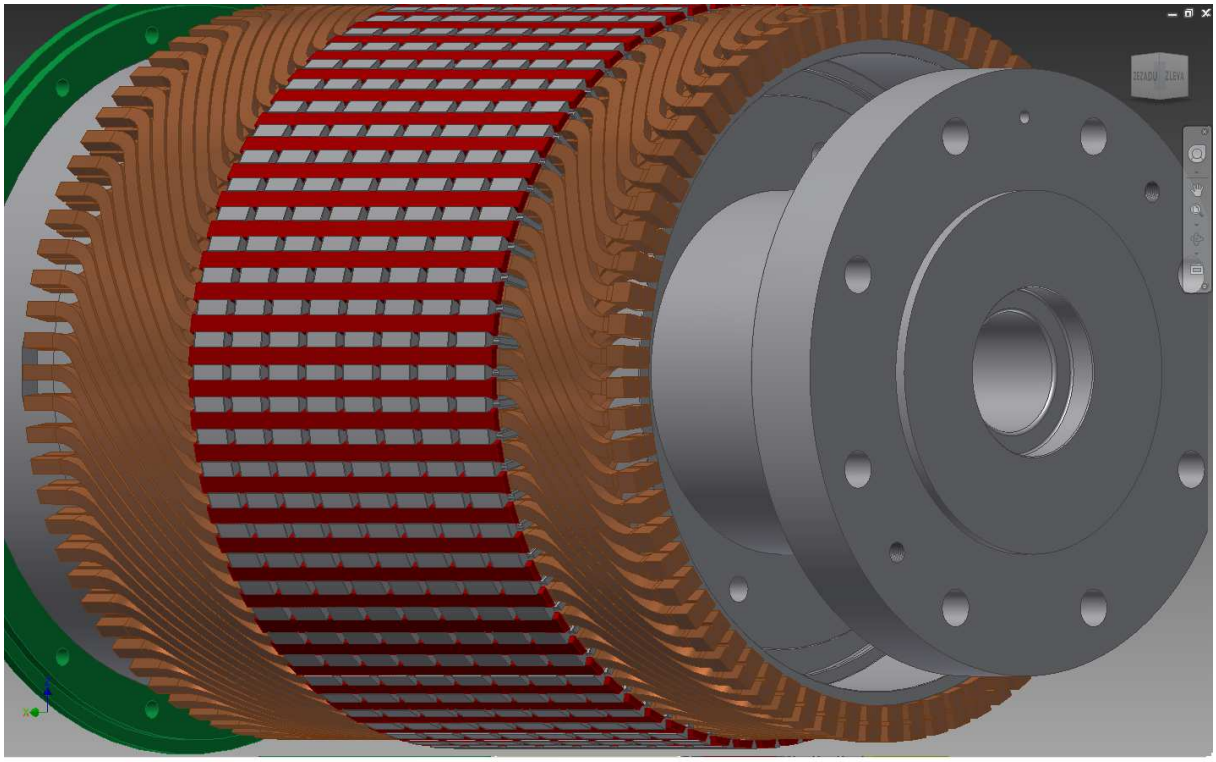
Obrázek 23: Pohled na rotor stroje, detail usměrňovače



Obrázek 24: Pohled na uspořádání diodového usměrňovače stroje



Obrázek 25: Pohled na rotorové vinutí budiče



Obrázek 26: Pohled na rotor budiče-osový vývrt pro budící přívody do turbogenerátoru