

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Návrh vysokootáčkového asynchronního motoru v pevném
závěru**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2014/2015

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

Jméno a příjmení: **Bc. Jan BRÁZDA**
Osobní číslo: **E13N0110P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Průmyslová elektronika a elektromechanika**
Název tématu: **Návrh vysokootáčkového asynchronního motoru v pevném závěru**
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

1. Proveďte elektromagnetický výpočet.
2. Vytvořte kruhový diagram motoru a vynesete momentové a proudové charakteristiky.
3. Proveďte kontrolu mechanické pevnosti zubové části rotoru pomocí MKP.
4. Proveďte porovnání výsledků s výstupy z firemního softwaru KING (účinnost, sycení, rozměry aktivních částí, atd.)

Základní údaje motoru: jmenovitý výkon: 6 MW, jmenovité sdružené napětí: 6 kV, počet pólů: 2, napájecí frekvence: 80Hz. Dále viz specifikace firmy.


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

1. Kopylov, I. P., kol.: Stavba elektrických strojů. Praha, STNL/MIR, 1988.
2. Cigánek, L.: Stavba elektrických strojů. Praha, STNL, 1958.
3. Reece, A.B.J.; Preston, T.W.: Finite element methods in electrical power engineering, Oxford University Press, 2000, ISBN 0-19-856504-6.
4. Petrov G.N.: Elektrické stroje 2, Academia Praha, 1982.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Roman Pechánek, Ph.D.
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky
Datum zadání diplomové práce: 15. října 2014
Termín odevzdání diplomové práce: 11. května 2015


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




Prof. Ing. Václav Kús, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2014

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na návrh vysokootáčkového asynchronního stroje v pevném závěru. Konstrukci kruhového diagramu a sestavení momentové a proudové charakteristiky, kontrolu namáhání zubové části rotoru pomocí metody konečných prvků. Dále porovnává výpočet klasickou metodou návrhu s výstupem z firemního softwaru KING.

Klíčová slova

3-f asynchronní motor, pevný závěr, vysokootáčkový motor, vinutí, elektromagnetický výpočet, kruhový diagram, momentová charakteristika, proudová charakteristika MKP, redukované napětí, deformace

Abstract

This Master's thesis deals with project of highspeed asynchronous machine in non-explosive cover, circular diagram, torque and current characteristics. Furthermore, it deals with checking effort of rotor's gear section by using FEM (Finite Element Method). And also it compares a classical method of design with a result from a corporate software KING.

Key words

3 fases asynchronous machine, non-explosive cover, highspeed machine, winding, electromagnetic calculation, circular diagram, torque characteristics, current characteristics MKP, reduced voltage, deformation

Prohlášení

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.

.....
podpis

V Plzni dne 11.5.2015

Jan Brázda

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Romanovi Pechánkovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce a Ing. Jakubovi Švaříkovi za cenné konzultace a podporu.

Obsah

OBSAH	CHYBA! ZÁLOŽKA NENÍ DEFINOVÁNA.
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
ÚVOD	13
1 ELEKTROMAGNETICKÝ VÝPOČET	14
1.1 SPECIFIKACE ZADÁNÍ.....	14
1.2 STANOVENÍ HLAVNÍCH PARAMETRŮ STROJE	15
1.3 NÁVRH STATORU	15
1.3.1 Návrh vinutí statoru	15
1.3.2 Návrh drážky statoru.....	18
1.3.3 Návrh čel vinutí statoru.....	20
1.3.4 Výpočet úbytku napětí statorového vinutí	21
1.3.5 Návrh magnetického obvodu statoru	22
1.4 NÁVRH ROTORU.....	22
1.5 MAGNETICKÝ OBVOD	25
1.5.1 Magnetický výpočet.....	25
1.5.2 Magnetická napětí.....	25
1.6 PARAMETRY NÁHRADNÍHO SCHÉMATU.....	27
1.6.1 Odpor vinutí statoru.....	27
1.6.2 Odpor vinutí rotoru.....	28
1.6.3 Rozptylová reaktance statoru.....	29
1.6.4 Rozptylová reaktance rotoru.....	30
1.6.5 Přepočet rotorových veličin na stator.....	30
1.6.6 Příčná větev	31
1.7 ZTRÁTY	31
<i>Ztráty dělíme na ztráty hlavní, které se počítají pouze pro stator, dodatečné, které vznikají při chodu naprázdno, Jouleovy a mechanické.</i>	
1.7.1 Povrchové ztráty	31
1.7.2 Pulzní ztráty	32
1.7.3 Celkové ztráty v železe	34
1.7.4 Ztráty ve vinutí.....	34
1.7.5 Mechanické a ventilační ztráty.....	34
1.7.6 Účinnost	34
1.8 VÝPOČET PROUDU NAPRÁZDNO A NAKRÁTKO	35
<i>Tyto hodnoty jsou potřebné pro sestavení kruhového diagramu.....</i>	
1.8.1 Proud naprázdno	35
1.8.2 Proud nakrátko	35
1.9 VÝPOČET OTEPLENÍ	36
2 VYTVOŘENÍ KRUHOVÉHO DIAGRAMU A VYNESENÍ PROUDOVÉ A MOMENTOVÉ CHARAKTERISTIKY	39
2.1 KRUHOVÝ DIAGRAM	39
2.2 VYNESENÍ MOMENTOVÉ A PROUDOVÉ CHARAKTERISTIKY	39
2.2.1 Vzorové výpočty pro vynesení proudové a momentové charakteristiky	39

3	KONTROLA MECHANICKÉ PEVNOSTI ZUBOVÉ ČÁSTI.....	43
3.1	POČÁTEČNÍ PODMÍNKY	43
3.2	REDUKOVANÉ NAPĚTÍ.....	45
3.3	VÝSLEDNÁ DEFORMACE	46
4	POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ S VÝSTUPY ZE SOFTWARE KING.....	47
	ZÁVĚR	50
	SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	52
	PŘÍLOHY	1

Seznam symbolů a zkratk

S	Zdánlivý výkon [VA]
P	Činný výkon [W]
$\cos\varphi$	Účinit
U_f	Fázové napětí [V]
I_1	Fázový proud [A]
U_s	Sdružené napětí [V]
t_p	Pólová rozteč [m]
D_1	Vrtání statoru [m]
$2p$	Počet pólů
q	Počet drážek na pól a fázy
Q_1	Počet drážek statoru
t_{d1}	Mezidrážková rozteč statoru
N_s	Počet závitů jedné fáze v sérii
m	Počet fází
A	Obvodová proudová hustota [A/m]
n_d	Počet vodičů v drážce
$a_{stř}$	Počet paralelních větví každé fáze střídavého vinutí
Q_p	Počet drážek na pól
y_{1d}	Cívkový krok
β	Poměrné zkrácení kroku
y_k	Krok na komutátoru
y_1	Přední cívkový krok
y_2	Zadní cívkový krok
k_{v1}	Činitel vinutí
m'	Počet matematických fází
C	Essonův činitel $\left[\frac{kVA}{m^3 \cdot ot/min} \right]$
B_δ	Indukce ve vzduchové mezeře [T]

l_e	Efektivní délka stroje $[m]$
L	Celková délka induktu $[m]$
z_1	Šířka zubu statoru $[m]$
B'_{z1}	Sycení v hlavě zubu statoru $[T]$
b_d	Šířka drážky statoru $[m]$
σ_{cu1}	Proudová hustota $[A/mm^2]$
h_c	Výška čela $[m]$
$R_{1/20}$	Odpor pro stejnosměrný proud $[\Omega]$
ζ	Vliv skinefektu
u_r	Úbytek napětí na odporu $[\%]$
Φ	Magnetický tok $[Wb]$
δ	Velikost vzduchové mezery $[m]$
Q_2	Počet drážek rotoru
t_{d2}	Mezidrážková rozteč rotoru
I_2	Proud tyčí rotoru $[A]$
I_{kr}	Proud kruhem rotoru $[A]$
k_c	Carterův činitel
U_δ	Magnetické napětí ve vzduchové mezeře $[A]$
I_μ	Magnetizační proud $[A]$
l_c	Délka čel vinutí $[m]$
R_1	Odpor jedné fáze $[\Omega]$
λ_{dif1}	Činitel magnetické vodivosti diferenčního rozptylu statoru
λ_{d1}	Činitel magnetické vodivosti drážky statoru
λ_{c1}	Činitel magnetické vodivosti čel statoru statoru
$X_{\sigma 1}$	Rozptylová reaktance statoru $[\Omega]$
R'_2	Přepočtený odpor rotoru $[\Omega]$
$X'_{\sigma 2}$	Přepočtená rozptylová reaktance rotoru $[\Omega]$
ΔP_{Feh}	Hlavní ztráty v železe statoru $[W]$

$\Delta P_{\delta p1}$	Celkové povrchové ztráty statoru [W]
$\Delta P_{\delta p2}$	Celkové povrchové ztráty rotoru [W]
b'_{01}	Náhradní otevření drážky statoru [m]
ΔP_{p1}	Pulzní ztráty v zubu statoru [W]
ΔP_{p2}	Pulzní ztráty v zubu rotoru [W]
ΔP_{Fe}	Celkové ztráty v železe [W]
ΔP_{j1}	Jouleovy ztráty ve vinutí statoru [W]
ΔP_{j2}	Jouleovy ztráty ve vinutí rotoru [W]
ΔP_{mech}	Mechanické a ventilační ztráty [W]
ΔP	Celkové ztráty [W]
η	Účinnost [%]
I_0	Proud naprázdno [A]
I_k	Proud nakrátko [A]
$\cos\varphi_0$	Účinitík naprázdno
$\cos\varphi_k$	Účinitík nakrátko
$\Delta \mathcal{G}_{pov1}$	Oteplení vnitřního povrchu statoru nad teplotu stroje [°C]
$\Delta \mathcal{G}_{id1}$	Teplotní spád v drážkové části statorového vinutí [°C]
$\Delta \mathcal{G}_{ie1}$	Teplotní spád v čelech statorového vinutí [°C]
$\Delta \mathcal{G}_{povč1}$	Oteplení vnějšího povrchu čel vinutí nad teplotu uvnitř stroje [°C]
$\Delta \mathcal{G}'_1$	Sřední oteplení statorového vinutí nad teplotu uvnitř stroje [°C]
$\Delta \mathcal{G}_v$	Oteplení vzduchu uvnitř stroje nad teplotu prostředí [°C]
$\Delta \mathcal{G}_1$	Sřední oteplení statorového vinutí nad teplotu okolního vzduchu [°C]
s_n	Jmenovitý skluz
M_n	Jmenovitý moment [Nm]
s_z	Skluz zvratu
M_{max}	Maximální moment [Nm]
E	Modul pružnosti [MPa]
R_{p02}	Mez kluzu [MPa]

Úvod

Předkládaná práce se zabývá elektromagnetickým návrhem vysokootáčkového asynchronního motoru a vynesení jeho charakteristik, dále pak simulací namáhání zubu a konečně také porovnáním vlastního návrhu s výsledky zadavatele z programu KING.

Vysokootáčkové motory začínají být v posledních letech stále používanější pohon průmyslových zařízení. Je to z části dané jednoduchou konstrukcí, dále pak pokrokem v oblasti polovodičových řídicích struktur, které motor pohání. V tomto případě se jedná o pohon kompresoru výbušných plynů.

Standardní pohon je složen z konvenčního motoru na síťové frekvence, mechanické převodovky a vlastního kompresoru. Tento pohon má však několik nevýhod, jehož hlavním problémem je mechanická převodovka, která je drahá na výrobu a vznikají v ní mechanické ztráty. Moderní koncepce používá vysokootáčkový motor napájený měničem, který přímo pohání kompresor. Tím klesla nejen cena dodávaného systému, ale také klesly jeho ztráty.

Tento návrh se týká motoru o výkonu 6MW pro pohon kompresoru výbušných plynů, proto je motor proveden s pevným závěrem, což se v návrhu projevilo omezením vnějšího průměru statoru. Závěr také klade nároky na konstrukci pláště a jeho utěsnění. Zadavatel, firma Howden s.r.o., získal grant ministerstva průmyslu a obchodu k výrobě prototypu o výkonu 3MW a 4800 ot/min. Z jeho koncepce vychází i můj návrh.

1 Elektromagnetický výpočet

1.1 Specifikace zadání

Typ:	Asynchronní motor s kotvou nakrátko
Jmenovitý výkon:	6 MW
jmenovité sdružené napětí:	6 kV
počet pólů:	2
napájecí frekvence:	80Hz
způsob chlazení:	IC515 (trubkový výměník tepla vzduch-vzduch okolo stroje)
tvar:	IM1001
krytí:	IP55
teplota okolí:	+5 ÷ +40°C
ochrana nevybušnosti:	II 2G Ex d IIA T3
typ statorového vinutí:	smyčkové nekřížené dvouvrstvé
typ vodiče statoru:	pásový Cu
třída izolace:	F (oteplení ve třídě B)
typ izolace:	RESIN-RICH (zesílená pro napájení z FM)
vnější průměr plechů statoru:	1 200 mm
vrtání statoru:	580 mm
tvar statorové drážky:	obdélníková
tvar rotorové drážky:	„J“ dle standardu Howden ČKD Compressors s.r.o.

Pokud z technického řešení vzejde požadavek na trvalou regulaci otáček turbokompresoru do maxima 4800 ot/min pomocí frekvenčního měniče. Je možné při použití vysokootáčkového motoru vyjmout ze soustrojí převodovku a výrazně tak snížit cenu zakázky. Howden ČKD Compressors s.r.o.v minulosti vyvinula a vyrobila prototyp vysokootáčkového asynchronního motoru (3MW / 4800rpm /6kV), který je navíc v pevném závěru a tudíž vhodný pro umístění ve výbušné atmosféře. Účelem tohoto zadání je získat návrh porovnatelný s dalšími nabízenými stroji vycházejícími z koncepce již vyrobeného prototypu.

1.2 Stanovení hlavních parametrů stroje

Zdánlivý výkon při odhadovaném účinníku:

$$S = \frac{P}{\cos\varphi} = \frac{6}{0,9} = 6,67 \text{ MVA} \quad (1)$$

Fázové napětí:

$$U_f = \frac{U}{\sqrt{3}} = \frac{6000}{\sqrt{3}} = 3464 \text{ V} \quad (2)$$

Fázový proud:

$$I_1 = \frac{S}{U_s \sqrt{3}} = \frac{6670 \cdot 10^3}{6000 \cdot \sqrt{3}} = 668 \text{ A} \quad (3)$$

Mezipólová rozteč:

$$t_p = \frac{\pi D_1}{2p} = \frac{\pi \cdot 0,58}{2} = 0,91 \text{ m} \quad (4)$$

1.3 Návrh statoru

Stator je tvořen statorovými plechy, mezi kterými jsou ventilační kanálky, vnější rozměr statorového plechu je omezen zadáním. Do drážek statoru je založeno statorové vinutí.

1.3.1 Návrh vinutí statoru

Počet drážek na pól a fázi (zvoleno):

$$q = 8 \quad (5)$$

Počet drážek statoru:

$$Q_1 = 2pmq = 2 \cdot 3 \cdot 8 = 48 \text{ drážek} \quad (6)$$

Mezidrážková rozteč

$$t_{d1} = \frac{\pi D_1}{Q_1} = \frac{\pi \cdot 0,58}{48} = 0,03796 \text{ m} \quad (7)$$

Předběžný počet závitů jedné fáze v sérii:

$$N_s = \frac{\pi D_1 A}{2mI_1} = \frac{\pi \cdot 0,58 \cdot 60000}{2 \cdot 3 \cdot 668} = 26,27 \text{ závitů} \quad (8)$$

kde obvodová proudová hustota $A = 60\,000 \text{ A/m}$

Počet vodičů v drážce:

$$n_d = \frac{a_{stř} N_s}{pq} = \frac{2 \cdot 26,27}{2 \cdot 8} = 6,82 \doteq 7 \quad (9)$$

Skutečný počet závitů:

$$N_s = \frac{n_d pq}{a_{stř}} = \frac{7 \cdot 1 \cdot 8}{2} = 28 \text{ závitů} \quad (10)$$

Skutečná hodnota obvodové proudové hustoty:

$$A = \frac{2N_s m I_1}{\pi D_1} = \frac{2 \cdot 28 \cdot 3 \cdot 668}{\pi \cdot 0,58} = 61610 \text{ A/m} \quad (11)$$

Parametry vinutí:

Počet drážek na pól:

$$Q_p = \frac{Q}{2p} = \frac{48}{2} = 24 \text{ drážek} \quad (12)$$

Cívkový krok:

$$y_{1d} = Q_p \cdot \beta = 24 \cdot 0,833 = 20 \quad (13)$$

Poměrné zkrácení kroku

$$\beta = \frac{y_{1d}}{Q_p} = \frac{20}{24} = 0,833 \quad (14)$$

Krok na "komutátoru":

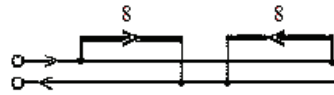
$$y_k = \frac{\varepsilon K + a}{p} = \frac{0 \cdot 96 + 1}{1} = 1 \quad (15)$$

Přední cívkový krok:

$$y_1 = 2uy_{1d} + 1 = 1 \cdot 20 + 1 = 21 \quad (16)$$

Zadní cívkový krok:

$$y_1 = 2y_k - y_1 = 2 \cdot 1 - 21 = -19 \quad (17)$$



Obr.1 Úsečkové schéma vinutí

Činitel vinutí v 1. harmonické:

$$k_{vv} = \sin\left(v\beta\frac{\pi}{2}\right) \frac{\sin v \frac{\pi}{m'}}{n \sin v \frac{\pi}{m'n}} = 0,921 \quad (18)$$

Skutečná hodnota Essonova činitele elektromagnetického využití stroje:

$$C = \frac{\pi^2}{60\sqrt{2}} AB_{\delta} k_{v1} = \frac{\pi^2}{60\sqrt{2}} 61610 \cdot 1,1 \cdot 0,921 = 7,2588 \frac{kVA}{m^3 \text{ ot/min}} \quad (19)$$

kde indukce ve vzduchové mezeře $B_{\delta} = 1,1 \text{ T}$.

Efektivní délka stroje:

$$l_e = \frac{S}{CD_1^2 n} = \frac{6670}{7,259 \cdot 0,58^2 \cdot 4800} = 0,5687 \text{ m} \quad (20)$$

Šířka paketu:

$$\check{s}_p = 0,0405 \text{ m}$$

Šířka kanálku:

$$\check{s}_p = 0,01 \text{ m}$$

Počet paketů:

$$i = \frac{l_e}{\check{s}_p} = \frac{0,5687}{0,0405} = 14 \quad (21)$$

Celková délka induktu včetně větracích kanálů:

$$L = l_e + \check{s}_k i_k = 0,5687 + 0,01 \cdot 14 = 0,70878 \text{ m} \quad (22)$$

1.3.2 Návrh drážky statoru

Na statoru je navržena drážka typu M.

Šířka zubu zvolena s ohledem na poměr zub/drážka=1,1 dle doporučení Howden:

$$z_1 = 20,94 \text{ mm}$$

Hodnota magnetické indukce v hlavě zubu, k_{Fe} je činitel plnění železa:

$$B'_{z1} = \frac{B_\delta t_{d1}}{z_1 k_{Fe}} = \frac{1,1 \cdot 37,96}{20,94 \cdot 0,92} = 2,167 \text{ T} \quad (23)$$

Šířka drážky:

$$b_d = t_{d1} - z_1 = 37,96 - 20,94 = 17,02 \text{ mm} \quad (24)$$

Proudová hustota kde K je napěťová konstanta s hodnotou K=190

$$\sigma_{Cul} = \sqrt{\frac{K}{b_v}} = \sqrt{\frac{190}{11,5}} = 4,065 \text{ A/mm}^2 \quad (25)$$

Průřez vodiče:

$$S'_{Cul} = \frac{I_1}{a_{stř} \sigma_{Cul}} = \frac{668}{2 \cdot 4,065} = 82,2 \text{ mm}^2 \quad (26)$$

Výška vodiče:

$$h_v = \frac{S'_{Cul}}{b_v} = \frac{82,2}{11,5} = 7,15 \text{ mm} \quad (27)$$

Původní vodič bude rozdělen na výšku $i=2$ vodičů o rozměrech **11,5x3 mm** a jeho skutečný průřez $S_1 = 34,5 \text{ mm}^2$. Důvodem je potlačení vlivu skinefektu.

Výsledný průřez vodičů tvořící jeden závit:

$$S_{Cul} = iS_1 = 2 \cdot 34,5 = 65 \text{ mm}^2 \quad (26)$$

Skutečná proudová hustota:

$$\sigma_{Cul} = \frac{I_1}{a_{stř} S_{Cul}} = \frac{668}{2 \cdot 65} = 4,842 \text{ A/mm}^2 \quad (27)$$

Tab. 1 Složení jedné drážky

Název	Šířka		Hloubka	
Polovodiivý nátěr	2·0,01	0,02	2·0,01·2	0,04
Izolace proti železu	2·2,5	5	4·2,5	10
Izolace vodičů	1·2·0,25	0,5	2·0,25·14·2	14
Vložka mezi závit	-	-	6·0,1·2	1,2
Mezivrstva	-	-	4	4
Součet izolace		5,52		29,24
Holý vodič	1·11,5	11,5	2·3·7·2	84
Vložka na dno	-	-	2	2
Vložka pod klín	-	-	1	1
Rozměr drážky bez klínu	bd	17,02	h2	115,24
Zapuštění klínu	-	-	0,5	0,5
Klín	-	-	4	4
Konečný rozměr drážky	bd	17,02	hd	120,74

1.3.3 Návrh čel vinutí statoru

Výška čela

$$h_{\xi} = \frac{1}{2} \cdot (h_2 - m) = \frac{1}{2} \cdot (115,24 - 3) = 56,12 \text{ mm} \quad (28)$$

Úhel sklonu čel válcového vinutí:

$$\sin \alpha_{\xi} = \frac{b_{\xi} (= b_d) + c}{t_{d1}} = \frac{17,02 + 7}{37,96} = 0,63277 \rightarrow \alpha_{\xi} = 39,255^{\circ} \quad (29)$$

kde vzdálenost mezi čely se volí v závislosti na velikosti napětí podle vztahu:

$$c = 4 + \frac{U[\text{kV}]}{2} = 4 + \frac{6}{2} = 7 \text{ mm} \quad (30)$$

Délka šroubovice čela:

$$x = \frac{\beta t_p}{2 \cos \alpha_{\xi}} = \frac{0,833 \cdot 911,06}{2 \cdot \cos 39,225^{\circ}} = 490 \text{ mm} \quad (31)$$

Střední poloměr oka:

$$R = r + \frac{h_{\xi}}{2} = 10 + \frac{56,12}{2} = 38,06 \text{ mm} \quad (32)$$

Délka oka

$$o = \frac{\pi R}{2} = \frac{\pi 38,06}{2} = 59,784 \text{ mm} \quad (33)$$

Délka čela, kde v je výběh cívky pro 6kV = 0,05m:

$$l_{\xi} = 2(v + x + o) = 2(0,05 + 0,49 + 0,06) = 1,2 \text{ m} \quad (34)$$

Délka vodiče:

$$l_v = L + l_{\xi} = 0,7088 + 1,2 = 1,908 \text{ m} \quad (35)$$

Délka oka:

$$e = h_c + r = 56,12 + 10 = 66,12 \text{ mm} \quad (36)$$

Průmět x do osového směru

$$y = \frac{\beta t_p}{2} \operatorname{tg} \alpha_c = \frac{0,833 \cdot 911}{2} \operatorname{tg} 39,255^\circ = 309,46 \text{ mm} \quad (37)$$

Vyložení v podélném směru:

$$E = v + y + b = 0,05 + 0,6612 + 0,309 = 0,425 \text{ m} \quad (38)$$

1.3.4 Výpočet úbytku napětí statorového vinutí

Elektrický odpor pro stejnosměrný proud (bez uvažování skinefektu):

$$R'_{1/20} = \rho_{Cu} \frac{2l_v N_s}{a_{stř} S_{Cu1}} = \frac{1}{56} \frac{2 \cdot 1,908 \cdot 28}{2 \cdot 69} = 0,0135 \Omega \quad (39)$$

kde ρ_{Cu} je měrný odpor měděného vodiče při teplotě 20°C.

Vliv skinefektu:

$$\xi = 2\pi h_v \sqrt{\frac{b_v f}{b_d \rho}} \cdot 10^{-7} = 2\pi \cdot 3 \cdot \sqrt{\frac{11,5 \cdot 80}{17,02 \cdot \frac{1}{56}} \cdot 10^{-7}} = 0,328 \quad (40)$$

Činitel zvýšení elektrického odporu:

$$k_{Cu} = 0,0126$$

Odpor při střídavém proudu při 20°C:

$$R_{1/20} = (1 + k_{Cu}) R'_{1/20} = (1 + 0,0126) \cdot 0,0135 = 0,0133 \Omega \quad (41)$$

Odpor při 90°C:

$$R_{1/90} = 1,28 R_{1/20} = 1,28 \cdot 0,0133 = 0,017 \Omega \quad (42)$$

Procentní hodnota úbytku napětí na ohmickém odporu:

$$u_r = \frac{R_{1/90} I_1}{U_f} = \frac{0,017 \cdot 668}{3464,1} = 0,328 \% \quad (43)$$

1.3.5 Návrh magnetického obvodu statoru

Magnetický tok:

$$\phi = \frac{U_f}{4,44 f N_s k_{v1}} = \frac{3464,1}{4,44 \cdot 80 \cdot 28 \cdot 0,921} = 0,378 \text{ Wb} \quad (44)$$

Velikost vzduchové mezery podle empirického vztahu:

$$\delta = 0,1 + 0,225 \sqrt{P_n} = 0,1 + 0,225 \sqrt{6000} = 4,2 \text{ mm} \quad (45)$$

Výška jha statoru (omezena maximálním rozměrem plechů statoru)

$$h_{j1} = \frac{D - D_1}{2} - h_d = \frac{1,2 - 0,58}{2} - 0,12074 = 0,189 \text{ m} \quad (46)$$

1.4 Návrh rotoru

Zvolen rotor s nenatočenými drážkami, který je složen z plechů do kterých jsou vyraženy rotorové drážky pro vodiče. Rotorové plechy mají otvor pro hřídel o průměru 260 mm.

Počet drážek rotoru (musí být menší než počet drážek statoru):

$$Q_2 = 40 \text{ drážek}$$

Počet fází rotoru:

$$m_2 = Q_2 = 40 \text{ fází}$$

Počet cívek rotoru na fázi:

$$q_2 = \frac{Q_2}{2 p m_2} = \frac{40}{2 \cdot 1 \cdot 40} = 0,5 \text{ závitů} \quad (47)$$

Vnější průměr rotoru:

$$D_2 = D_1 - 2 \cdot \delta = 0,58 - 2 \cdot 0,0042 = 0,5716 \text{ m} \quad (48)$$

Délka rotoru:

$$l_r = L = 0,7088 \text{ m} \quad (49)$$

Drážková rozteč rotoru:

$$t_{d2} = \frac{\pi D_2}{Q_2} = \frac{\pi \cdot 0,5716}{40} = 0,0449 \text{ m} \quad (50)$$

Výška jha rotoru (omezena vrtáním rotorových plechů $D_r = 0,26 \text{ m}$)

$$h_{j2} = \frac{D_2 - D_r}{2} = \frac{0,5716 - 0,26}{2} = 0,1558 \text{ m} \quad (51)$$

Převod:

$$p_i = \frac{2m_1 N_s \cdot k_{v1}}{Q_2} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 28 \cdot 0,921}{40} = 3,8682 \quad (52)$$

Proud tyčí:

$$I_2 = 0,92 \cdot I_1 \cdot p_i = 0,92 \cdot 668 \cdot 3,8682 = 2378 \text{ A} \quad (53)$$

Průřez tyče (odhadovaná proudová hustota v tyči $J_2 = 5\,000\,000 \text{ A/m}^2$):

$$S_t = \frac{I_2}{J_2} = \frac{2378}{5000000} = 0,4774 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \quad (54)$$

Pootočení proudu v tyčích:

$$\alpha = \frac{2 \cdot p \cdot \pi}{Q_2} = \frac{2 \cdot 1 \cdot \pi}{40} = 0,157 \quad (55)$$

Proud kruhem nakrátko:

$$I_{kr} = \frac{I_2}{\Delta} = \frac{2378}{0,1569} = 15156,5 \text{ A} \quad (56)$$

kde

$$\Delta = 2 \cdot \sin \frac{\pi \cdot p}{Q_2} = 2 \cdot \sin \frac{\pi \cdot 1}{40} = 0,1569 \quad (57)$$

Proudová hustota v kruhu:

$$J_{kr} = J_2 \cdot 0,85 = 5000000 \cdot 0,85 = 4250000 \text{ A/m}^2 \quad (58)$$

Průřez kruhu:

$$S_{kr} = \frac{I_{kr}}{J_{kr}} = \frac{15156,5}{4250000} = 3,56 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \quad (59)$$

Šířka zubu (Indukce v zubu rotoru $B_{z2} = 1,8 \text{ T}$)

$$b_{z2} = \frac{B_\delta \cdot t_{d2} \cdot l_e}{B_{z2} \cdot l_e} = \frac{1,1 \cdot 0,0449 \cdot 0,5688}{1,8 \cdot 0,5688} = 0,0274 \text{ m} \quad (60)$$

1.5 Magnetický obvod

Magnetický obvod slouží k vedení magnetického toku strojem, je tvořen železem statoru, rotoru a vzduchovou mezerou. U asynchronních strojů je stator vždy složen ze statorových plechů kvůli omezení vířivých proudů, v mém návrhu je z plechů tvořen i rotor pro zjednodušení výroby.

1.5.1 Magnetický výpočet

Tab. 1. Tabulka indukce a intenzit v mag. obvodu stroje - odečteno z Magnetizační charakteristiky pro plechy E1 31

	Indukce [T]	Intenzita [A/m]
Zub rotoru	1,8	11100
Zub statoru	2	26000
Jho rotoru	1,5	1200
Jho statoru	1,8	800

1.5.2 Magnetická napětí

Koeficienty potřebné k výpočtu Carterova činitele:

$$k_{c1} = \frac{t_{d1}}{t_{d1} - \frac{\left(\frac{b_0}{\delta}\right)^2}{5 + \frac{b_0}{\delta}} \cdot \delta} = \frac{0,038}{t_{d1} - \frac{\left(\frac{0,01702}{0,0042}\right)^2}{5 + \frac{0,01702}{0,0042}} \cdot 0,0042} = 1,03636 \quad (61)$$

$$k_{c2} = \frac{t_{d2}}{t_{d2} - \frac{\left(\frac{b_0}{\delta}\right)^2}{5 + \frac{b_0}{\delta}} \cdot \delta} = \frac{0,0449}{t_{d1} - \frac{\left(\frac{0,006}{0,0042}\right)^2}{5 + \frac{0,006}{0,0042}} \cdot 0,0042} = 1,0306 \quad (62)$$

Carterův činitel:

$$k_c = k_{c1} \cdot k_{c2} = 1,03636 \cdot 1,0306 = 1,068 \quad (63)$$

Magnetické napětí ve vzduchové mezeře:

$$U_{\delta} = \frac{2}{\mu_0} \cdot B_{\delta} \cdot \delta \cdot k_{c1} = \frac{2}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \cdot 1,1 \cdot 0,0042 \cdot 1,03636 = 7620,3 \text{ A} \quad (64)$$

Magnetické napětí v zubu statoru:

$$U_{z1} = 2 \cdot h_{z1} \cdot H_{z1} = 2 \cdot 0,12074 \cdot 26000 = 6278,48 \text{ A} \quad (65)$$

Magnetické napětí v zubu rotoru:

$$U_{z2} = 2 \cdot h_{z1} \cdot H_{z1} = 2 \cdot 0,12074 \cdot 11100 = 910,94 \text{ A} \quad (66)$$

Délka střední indukční čáry statoru:

$$l_{j1} = \frac{\pi \cdot (D - h_{j1})}{2p} + h_{j1} = \frac{\pi \cdot (1,2 - 0,189)}{2} + 0,189 = 1,776 \text{ m} \quad (67)$$

Délka střední indukční čáry rotoru:

$$l_{j2} = \frac{\pi \cdot (D_2 - h_{j2})}{2p} + h_{j2} = \frac{\pi \cdot (0,5716 - 0,1558)}{2} + 0,1558 = 0,767 \text{ m} \quad (68)$$

Magnetické napětí ve jhu statoru:

$$U_{j1} = l_{j1} \cdot H_{j1} = 1,776 \cdot 800 = 1421 \text{ A} \quad (69)$$

Magnetické napětí ve jhu rotoru:

$$U_{j2} = l_{j2} \cdot H_{j2} = 0,767 \cdot 1200 = 920,94 \text{ A} \quad (70)$$

Výsledné magnetické napětí na jednu pólovou dvojici :

$$F_m = U_{\delta} \cdot U_{z1} \cdot U_{j1} \cdot U_{z2} \cdot U_{j2} = 7620,3 \cdot 6278,5 \cdot 910,94 \cdot 1421 \cdot 920,94 = 17150,95 \text{ A} \quad (71)$$

Magnetizační proud:

$$I_{\mu} = \frac{p \cdot F_m}{0,9 \cdot m_1 \cdot N_s \cdot k_{v1}} = \frac{4 \cdot 17150,95}{0,9 \cdot 3 \cdot 28 \cdot 0,921} = 246,3 \text{ A} \quad (72)$$

Poměrný magnetizační proud:

$$i_{\mu} = \frac{I_{\mu}}{I_1} = \frac{246,3}{668} = 0,369 \quad (73)$$

1.6 Parametry náhradního schématu

Parametry náhradního schématu jsou důležité pro sestavení momentové a proudové charakteristiky a stanovení proudu naprázdno a nakrátko.

1.6.1 Odpor vinutí statoru

Koeficienty potřebné k výpočtům:

$$m = \frac{b + S}{t_{d1}} = \frac{0,0115 + 0,007}{0,03796} = 0,487 \quad (74)$$

$$K_{\epsilon} = \frac{1}{\sqrt{1 - m^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 - 0,487^2}} = 1,145 \quad (75)$$

$$K_v = \frac{1}{2} K_{\epsilon} m = \frac{1}{2} \cdot 1,145 \cdot 0,487 = 0,279 \quad (76)$$

Střední šířka cívky:

$$b_c = \frac{\pi(D_1 + h_{d1})}{2p} \cdot \beta = \frac{\pi(0,58 + 0,12074)}{2} \cdot 0,833 = 0,917 \text{ m} \quad (77)$$

Délka čela závitu:

$$l_{\epsilon} = K_{\epsilon} b_c + 2B + h_{d1} = 1,145 \cdot 0,917 + 2 \cdot 0,05 + 0,12074 = 1,27 \text{ m} \quad (78)$$

Délka vyložení čel:

$$l_v = K_v b_c + B - 0,5h_{d1} = 0,279 \cdot 0,917 + 0,05 - 0,5 \cdot 0,12074 = 0,245 \text{ m} \quad (79)$$

Střední délka závitu:

$$l_{av} = 2(L + l_{\epsilon}) = 2 \cdot (0,709 + 1,27) = 3,959 \text{ m} \quad (80)$$

Celková délka vodičů jedné fáze:

$$L_v = l_{av} \cdot N_s = 3,959 \cdot 28 = 110,855 \text{ m} \quad (81)$$

Odpor jedné fáze vinutí:

$$R_1 = \rho_v \frac{L_v}{S_{ef} \cdot a} = \frac{10^{-6}}{41} \frac{110,855}{0,000069 \cdot 2} = 0,01959 \Omega \quad (82)$$

1.6.2 Odpor vinutí rotoru

Střední průměr kruhu nakrátko:

$$D_{kn} \approx D_2 - a_{kn} = 0,5716 - 0,0942 = 0,5216 \text{ m} \quad (83)$$

Odpor části kruhu:

$$R_{kn} = \rho_{kn} \frac{\pi D_{kn}}{Q_2 S_{kn}} = \frac{10^{-6}}{41} \cdot \frac{\pi \cdot 0,5216}{40 \cdot 0,0036} = 2,8 \cdot 10^{-7} \Omega \quad (84)$$

Odpor tyče:

$$R_t = \rho_t \frac{l_t}{S_t} \cdot \beta = \frac{10^{-6}}{41} \frac{0,709}{0,000476} = 3,634 \cdot 10^{-5} \Omega \quad (85)$$

Odpor rotorového vinutí:

$$R_2 = R_t + 2 \frac{R_{kn}}{\Delta^2} = 3,634 \cdot 10^{-5} + 2 \frac{2,8 \cdot 10^{-7}}{0,1569^2} = 5,911 \cdot 10^{-5} \Omega \quad (86)$$

1.6.3 Rozptylová reaktance statoru

Činitelé potřebné k výpočtu:

$$k'_\beta = 0,25(1 + 3\beta) = 0,25(1 + 3 \cdot 0,833) = 0,87475 \quad (87)$$

$$k_\beta = 0,25(1 + 3k'_\beta) = 0,25(1 + 3 \cdot 0,87475) = 0,906 \quad (88)$$

$$\begin{aligned} \xi_1 &= \left(2 \frac{t_{d2}}{t_{d1}} - \frac{t_{d1}}{t_{d2}} \Delta_{z1} \right) k_\beta - k_{v1} \left(\frac{t_{d2}}{t_{d1}} \right)^2 = \\ &= \left(2 \frac{0,0449}{0,038} - \frac{0,038}{0,0449} \cdot 0,23 \right) \cdot 0,906 - 0,921 \left(\frac{0,0449}{0,038} \right)^2 = 0,6787 m \end{aligned} \quad (89)$$

Činitel magnetické vodivosti diferenčního rozptylu statoru:

$$\lambda_{dif1} = \frac{t_{d1}}{12\delta k_c} \cdot \xi_1 = \frac{0,038}{12 \cdot 0,0042 \cdot 1,068} \cdot 0,6787 = 0,4786 \quad (90)$$

Činitel magnetické vodivosti rozptylu čel vinutí statoru:

$$\lambda_{\varepsilon 1} = 0,34 \frac{q}{l'_i} \cdot (l_\varepsilon - 0,64\beta t_p) = 0,34 \frac{8}{0,63} \cdot (1,27 - 0,64 \cdot 0,833 \cdot 0,91) = 4,925 \quad (91)$$

kde

$$l'_i = L - 0,5n_{vk} b_{vk} = 0,709 - 0,5 \cdot 13 \cdot 0,01 = 0,644 m \quad (92)$$

Činitel magnetické vodivosti drážky statoru:

$$\begin{aligned} \lambda_{d1} &= \frac{h_2 - h_m}{3b_d} \cdot k_\beta + \frac{h_1}{b_d} \cdot k'_\beta + \frac{h_m}{4b_d} = \\ &= \frac{0,1082 - 0,009}{3 \cdot 0,01702} \cdot 0,906 + \frac{0,0055}{0,01702} \cdot 0,875 + \frac{0,009}{4 \cdot 0,01702} = 2,175 \end{aligned} \quad (93)$$

Rozptylová reaktance statoru:

$$\begin{aligned} X_{1\sigma} &= 15,8 \frac{f}{100} \cdot \left(\frac{N_s}{100} \right) \cdot \frac{L}{pq} (\lambda_{d1} + \lambda_{\varepsilon 1} + \lambda_{dif1}) = \\ &= 15,8 \frac{80}{100} \cdot \left(\frac{28}{100} \right) \cdot \frac{0,709}{1,8} (2,175 + 4,259 + 0,4786) = 0,662 \Omega \end{aligned} \quad (94)$$

1.6.4 Rozptylová reaktance rotoru

Činitel magnetické vodivosti drážky rotoru:

$$\begin{aligned}\lambda_{d2} &= \frac{2h_1}{b_2 + b_0} + \frac{2h_2}{b_2 + b_1} + \frac{h_k}{b_k} + \left(\frac{3h_2}{b_d + 2b_2} + \frac{h_4}{3b_d} \right) = \\ &= \frac{2 \cdot 0,006}{0,0133 + 0,006} + \frac{2 \cdot 0,001}{0,0133 + 0,01} + \frac{0,008}{0,009} + \left(\frac{3 \cdot 0,001}{0,016 + 2 \cdot 0,0133} + \frac{0,01}{3 \cdot 0,016} \right) = 3,49\end{aligned}\quad (95)$$

Činitel magnetické vodivosti diferenčního rozptylu rotoru:

$$\lambda_{dif1} = \frac{t_{d2}}{12\delta k_c} \cdot \xi_2 = \frac{0,0449}{12 \cdot 0,0042 \cdot 1,068} \cdot 0,941 = 0,002997 \quad (96)$$

kde

$$\xi_2 = 1 + \frac{1}{5} \left(\frac{\pi p}{Q_2} \right)^2 - \frac{\Delta_{z2}}{1 - \left(\frac{p}{Q_2} \right)^2} = 1 + \frac{1}{5} \left(\frac{\pi 1}{40} \right)^2 - \frac{0,06}{1 - \left(\frac{1}{40} \right)^2} = 0,941 \quad (97)$$

Činitel magnetické vodivosti rozptylu čel vinutí rotoru:

$$\lambda_{\varepsilon 2} = \frac{2,3D_{kn}}{Q_2 l_i \Delta^2} \cdot \log \frac{4,7D_{kn}}{2(a_{kn} + b_{kn})} = \frac{2,3 \cdot 0,5216}{40 \cdot 0,644 \cdot 0,1569^2} \cdot \log \frac{4,7 \cdot 0,5216}{2(0,05 + 0,072)} = 0,323 \quad (98)$$

Rozptylová reaktance rotoru:

$$\begin{aligned}X_{2\sigma} &= 7,9 \cdot f \cdot l_i' \cdot (\lambda_{d2} + \lambda_{\varepsilon 2} + \lambda_{dif2}) \cdot 10^6 = \\ &= 7,9 \cdot 80 \cdot 0,644 \cdot (3,49 + 0,002997 + 0,323) \cdot 10^6 = 0,0015546\Omega\end{aligned}\quad (99)$$

1.6.5 Přepoččet rotorových veličin na stator

Přepočtený odpor rotoru:

$$R_2' = R_2 4m_1 \frac{(N_s k_{v1})^2}{Q_2} = 5,911 \cdot 10^{-5} \cdot 4 \cdot 3 \frac{(28 \cdot 0,921)^2}{40} = 0,0118\Omega \quad (100)$$

Přepočtená rozptylová reaktance rotoru:

$$X'_{2\sigma} = X_{2\sigma} 4m_1 \frac{(N_s k_{v1})^2}{Q_2} = 0,662 \cdot 4 \cdot 3 \frac{(28 \cdot 0,921)^2}{40} = 0,31 \Omega \quad (101)$$

1.6.6 Příčná větev

Odpor příčné větve:

$$R_{Fe} = \frac{\Delta P_{Fe}}{m \cdot I_{\mu}^2} = \frac{144847,3}{3 \cdot 246,324^2} = 0,7957 \Omega \quad (102)$$

Vzájemná indukčnost statoru a rotoru:

$$X_{\mu} = \frac{U_N}{I_{\mu}} - X_{1\sigma} = \frac{3464,102}{246,324} - 0,662 = 23,7 \Omega \quad (103)$$

1.7 Ztráty

Ztráty dělíme na ztráty hlavní, které se počítají pouze pro stator, dodatečné, které vznikají při chodu naprázdno, Jouleovy a mechanické.

1.7.1 Povrchové ztráty

Hmotnost železa jha statoru:

$$\begin{aligned} m_{j1} &= \pi \cdot (D - h_{j1}) \cdot h_{j1} \cdot l_{Fe} \cdot k_{Fe} \cdot \rho_{Fe} = \\ &= \pi \cdot (1,2 - 0,189) \cdot 0,189 \cdot 0,56 \cdot 0,99 \cdot 7,8 \cdot 10^3 = 2639,52 \text{ kg} \end{aligned} \quad (104)$$

Hmotnost zubů statoru:

$$\begin{aligned} m_{z1} &= h_{z1} \cdot b_{z1av} \cdot Q_1 \cdot l_{Fe} \cdot k_{Fe} \cdot \rho_{Fe} = \\ &= 0,12074 \cdot 0,028815 \cdot 48 \cdot 0,56 \cdot 0,99 \cdot 7,8 \cdot 10^3 = 733,48 \text{ kg} \end{aligned} \quad (105)$$

Hlavní ztráty v železe statoru:

$$\begin{aligned} \Delta P_{Feh} &= \Delta p_{1,0} \cdot \left(\frac{f_1}{50} \right)^{\beta} \cdot (k_{dj} \cdot B_{j1}^2 \cdot m_{j1} + k_{dz} \cdot B_{z1av}^2 \cdot m_{z1}) = \\ &= 1,25 \cdot \left(\frac{80}{50} \right)^{0,833} \cdot (1,4 \cdot 1,8 \cdot 2639,52 + 1,7 \cdot 2 \cdot 733,48) = 39060 \text{ W} \end{aligned} \quad (106)$$

Amplituda pulzací ve vzduchové mezeře:

$$B_{01} = \beta_{01} k_c B_\delta = 0,27 \cdot 1,068 \cdot 1,1 = 0,317 T \quad (107)$$

$$B_{02} = \beta_{02} k_c B_\delta = 0,075 \cdot 1,068 \cdot 1,1 = 0,088 T \quad (108)$$

Ztráty vztažené na $1m^2$ povrchu hlav zubů statoru a rotoru:

$$\begin{aligned} p_{\delta p1} &= 0,5 \cdot k_{01} \cdot \left(\frac{Q_2 n}{10000} \right)^{1,5} \cdot (B_{01} t_{d2} 10^3)^2 = \\ &= 0,5 \cdot 1,9 \cdot \left(\frac{40 \cdot 4800}{10000} \right)^{1,5} \cdot (0,317 \cdot 0,0449 \cdot 10^3)^2 = 16263 W \end{aligned} \quad (109)$$

$$\begin{aligned} p_{\delta p2} &= 0,5 \cdot k_{02} \cdot \left(\frac{Q_1 n}{10000} \right)^{1,5} \cdot (B_{02} t_{d1} 10^3)^2 = \\ &= 0,5 \cdot 1,9 \cdot \left(\frac{48 \cdot 4800}{10000} \right)^{1,5} \cdot (0,088 \cdot 0,038 \cdot 10^3)^2 = 893,7 W \end{aligned} \quad (110)$$

Celkové povrchové ztráty ve statoru:

$$\Delta p_{\delta p1} = p_{\delta p1} \cdot (t_{d1} - b_{01}) \cdot Q_1 \cdot l_{ef} = 16263 \cdot (0,038 - 0,01702) \cdot 48 \cdot 0,56 = 9297,88 W \quad (111)$$

Celkové povrchové ztráty v rotoru:

$$\Delta p_{\delta p2} = p_{\delta p2} \cdot (t_{d2} - b_{02}) \cdot Q_2 \cdot l_{ef} = 893,7 \cdot (0,0449 - 0,006) \cdot 40 \cdot 0,56 = 790,8 W \quad (112)$$

1.7.2 Pulzní ztráty

Náhradní otevření drážky statoru:

$$b'_{01} = \frac{b_{01}}{3} \cdot \left(1 + \frac{0,5 t_{d1}}{t_{d1} \cdot b_{01} + H_\delta} \right) = \frac{0,01702}{3} \cdot \left(1 + \frac{0,5 \cdot 0,038}{0,038 \cdot 0,01702 + 2,1} \right) = 0,0515 m \quad (113)$$

Vliv drážkování statoru a rotoru:

$$\gamma_1 \approx \frac{\left(\frac{b'_{01}}{\delta}\right)^2}{5 + \frac{b'_{01}}{\delta}} \approx \frac{\left(\frac{0,0515}{0,0042}\right)^2}{5 + \frac{0,0515}{0,0042}} \approx 8,715 \quad (114)$$

$$\gamma_2 \approx \frac{\left(\frac{b_{02}}{\delta}\right)^2}{5 + \frac{b_{02}}{\delta}} \approx \frac{\left(\frac{0,006}{0,0042}\right)^2}{5 + \frac{0,006}{0,0042}} \approx 1,428 \quad (115)$$

Amplituda pulzací ve středním průřezu zubu statoru a rotoru:

$$B_{p1} \approx \frac{\gamma_2 \delta}{2t_{d1}} \cdot B_{1av} \approx \frac{1,428 \cdot 0,0042}{2 \cdot 0,038} \cdot 1,9 \approx 0,15 T \quad (116)$$

$$B_{p2} \approx \frac{\gamma_1 \delta}{2t_{d2}} \cdot B_{2av} \approx \frac{0,715 \cdot 0,0042}{2 \cdot 0,0449} \cdot 1,75 \approx 0,713 T \quad (117)$$

Hmotnost zubů rotoru

$$\begin{aligned} m_{z2} &= h_{z2} \cdot b_{z2av} \cdot Q_2 \cdot l_{Fe} \cdot k_{Fe} \cdot \rho_{Fe} = \\ &= 0,041 \cdot 0,0302 \cdot 40 \cdot 0,56 \cdot 0,99 \cdot 7,8 \cdot 10^3 = 217,5 \text{ kg} \end{aligned} \quad (118)$$

Pulzní ztráty v zubu statoru:

$$\Delta P_{p1} \approx 0,11 \left(\frac{Q_2 n}{1000} \cdot B_{p1} \right)^2 m_{z1} \approx 0,11 \left(\frac{40 \cdot 4800}{1000} \cdot 0,15 \right)^2 \cdot 733,48 = 67059,3 W \quad (119)$$

Pulzní ztráty v zubu rotoru:

$$\Delta P_{p2} \approx 0,11 \left(\frac{Q_1 n}{1000} \cdot B_{p2} \right)^2 m_{z2} \approx 0,11 \left(\frac{48 \cdot 4800}{1000} \cdot 0,713 \right)^2 \cdot 217,5 = 28639,2 W \quad (120)$$

Dodatečné ztráty v železe:

$$\begin{aligned} \Delta P_{Fed} &= \Delta p_{\delta p1} + \Delta p_{\delta p2} + \Delta P_{p1} + \Delta P_{p2} = \\ &= 9297,9 + 790,8 + 67059,3 + 28639,2 = 105787,2 W \end{aligned} \quad (121)$$

1.7.3 Celkové ztráty v železe

Celkové ztráty v železe:

$$\Delta P_{Fe} = \Delta P_{Feh} + \Delta P_{Fed} = 39060 + 105787,2 = 144847,3 \text{ W} \quad (122)$$

1.7.4 Ztráty ve vinutí

Jouleovy ztráty ve vinutí statoru:

$$\Delta P_{j1} = m_1 \cdot R_1 \cdot I_1^2 = 3 \cdot 0,0196 \cdot 668^2 = 26246,14 \text{ W} \quad (123)$$

Jouleovy ztráty ve vinutí rotoru:

$$\Delta P_{j2} = m_2 \cdot R_2 \cdot I_2^2 = 40 \cdot 5,911 \cdot 10^{-5} \cdot 2378^2 = 13371 \text{ W} \quad (124)$$

1.7.5 Mechanické a ventilační ztráty

Tření v ložiskách a ventilační ztráty

$$\Delta P_{mech} = 1,2 \cdot 2 \cdot p t_p^3 \cdot (n_{vk} + 11) \cdot 10^3 = 1,2 \cdot 2 \cdot 0,91^3 \cdot (13 + 11) \cdot 10^3 = 45372,7 \text{ W} \quad (125)$$

1.7.6 Účinnost

Celkové ztráty zvětšeny o Přídavné ztráty

$$\begin{aligned} \Delta P &= (\Delta P_{Fe} + \Delta P_{j1} + \Delta P_{j2} + \Delta P_{mech}) \cdot 1,005 = \\ &= (144847,3 + 26246,1 + 13371 + 45372,7) \cdot 1,005 = 230986,4 \text{ W} \end{aligned} \quad (126)$$

Účinnost

$$\eta = \left(1 - \frac{\Delta P}{P}\right) \cdot 100 = \left(1 - \frac{230986,4}{6000000}\right) \cdot 100 = 96,15 \% \quad (127)$$

1.8 Výpočet proudu naprázdno a nakrátko

Tyto hodnoty jsou potřebné pro sestavení kruhového diagramu.

1.8.1 Proud naprázdno

Ztráty ve statorovém vinutí

$$\Delta P_{j0} = m_1 \cdot R_1 \cdot I_\mu^2 = 3 \cdot 0,0196 \cdot 246,3^2 = 3566,37 \text{ W} \quad (128)$$

Jalová složka proudu naprázdno

$$I_{j0} = I_\mu = 246,3 \text{ A} \quad (129)$$

Činná složka proudu naprázdno

$$I_{\varepsilon 0} = \frac{\Delta P_{Fe} + \Delta P_{mech} + \Delta P_{j0}}{m \cdot U_{1n}} = \frac{144847,3 + 45372,7 + 3566,37}{3 \cdot 3464,1} = 10,766 \text{ A} \quad (130)$$

Proud naprázdno:

$$I_0 = \sqrt{I_{\varepsilon 0}^2 + I_{j0}^2} = \sqrt{10,766^2 + 246,3^2} = 246,56 \text{ A} \quad (131)$$

Účinník při chodu naprázdno:

$$\cos \varphi_0 = \frac{I_{0\varepsilon}}{I_0} = \frac{10,766}{246,56} = 0,044 \quad (132)$$

1.8.2 Proud nakrátko

Odpor nakrátko:

$$R_k = R_1 + R'_2 = 0,0196 + 0,0118 = 0,0314 \Omega \quad (133)$$

Reaktance nakrátko:

$$X_k = X_{1\sigma} + X'_{2\sigma} = 0,662 + 0,31 = 0,972 \Omega \quad (134)$$

Impedance nakrátko:

$$Z_k = \sqrt{R_k^2 + X_k^2} = \sqrt{0,0314^2 + 0,972^2} = 0,972 \Omega \quad (135)$$

Proud nakrátko:

$$I_k = \frac{U_{1n}}{Z_k} = \frac{3464,1}{0,972} = 3562,4 \text{ A} \quad (136)$$

Účinník při chodu nakrátko:

$$\cos\varphi_k = \frac{R_k}{Z_k} = \frac{0,0314}{0,972} = 0,0322 \quad (137)$$

1.9 Výpočet oteplení

Důležitý výpočet, který zkoumá zda oteplení stroje dovoluje použít zvolenou izolaci. V případě, že by oteplení překročilo mezní teplotu izolace (pro třídu F 115 °C), muselo by se přikročit ke změně třídy izolace.

Jouleovi ztráty v drážkách vinutí statoru, kde činitel zvýšení ztrát pro třídu F $k_p = 1,07$:

$$\Delta P'_{jd1} = k_p \Delta P_{j1} \frac{2L}{l_{av}} = 1,07 \cdot 26246,1 \cdot \frac{2 \cdot 0,709}{3,96} = 10055,3 \text{ W} \quad (138)$$

Jouleovi ztráty v čelech vinutí statoru:

$$\Delta P'_{j\epsilon1} = k_p \Delta P_{j1} \frac{2l_{\epsilon1}}{l_{av}} = 1,15 \cdot 26246,1 \cdot \frac{2 \cdot 1,27}{3,96} = 18028 \text{ W} \quad (139)$$

Oteplení vnitřního povrchu statoru nad teplotu stroje:

$$\Delta \vartheta_{pov1} = K \frac{\Delta P'_{jd1} + \Delta P'_{Feh}}{\pi DL \alpha_1} = 0,22 \frac{10055,3 + 18028}{\pi \cdot 0,58 \cdot 0,709 \cdot 493} = 53,5 \text{ °C} \quad (140)$$

Obvod drážky statoru:

$$O_{d1} = 2 \cdot (h_d + b_d) = 2 \cdot (0,12074 + 0,01702) = 0,275 \text{ m} \quad (141)$$

Jednostranná tloušťka izolace:

$$b_{i1} = 0,5 \cdot (b_d + b_v) = 0,5 \cdot (0,01702 + 0,0115) = 0,00276 \text{ m} \quad (142)$$

Teplotní spád v drážkové části statorového vinutí, kde $\lambda_{ekv} = 0,3 \text{ W.m.K}$:

$$\Delta \vartheta_{id1} = \frac{\Delta P'_{jd1}}{Q_1 O_{d1} L} \cdot \left(\frac{b_{i1}}{\lambda_{ekv}} \right) = \frac{10055,3}{48 \cdot 0,275 \cdot 0,709} \cdot \left(\frac{0,00276}{0,3} \right) = 9,87^\circ \text{C} \quad (143)$$

Teplotní spád v čelech statorového vinutí:

$$\Delta \vartheta_{ic1} = \frac{\Delta P'_{jc1}}{2 Q_1 O_{d1} l_{\varepsilon}} \cdot \left(\frac{b_{i1}}{\lambda_{ekv}} \right) = \frac{180,28}{2 \cdot 48 \cdot 0,275 \cdot 1,27} \cdot \left(\frac{0,00276}{0,3} \right) = 4,49^\circ \text{C} \quad (144)$$

Oteplení vnějšího povrchu čel vinutí nad teplotu vzduchu uvnitř stroje:

$$\Delta \vartheta_{pov\check{c}1} = \frac{K \Delta P'_{jc1}}{2 \pi D_1 l_{\varepsilon} \alpha_v} = \frac{0,22 \cdot 18028}{2 \pi \cdot 0,58 \cdot 1,27 \cdot 150} = 5,71^\circ \text{C} \quad (145)$$

Střední oteplení statorového vinutí nad teplotu uvnitř stroje:

$$\begin{aligned} \Delta \vartheta'_1 &= \frac{(\Delta \vartheta_{pov1} + \Delta \vartheta_{id1}) 2L + (\Delta \vartheta_{pov\check{c}1} + \Delta \vartheta_{ic1}) 2l_{\varepsilon 1}}{l_{av}} = \\ &= \frac{(53,5 + 9,87) \cdot 2 \cdot 0,709 + (5,71 + 4,49) \cdot 2 \cdot 1,27}{3,96} = 29,53^\circ \text{C} \end{aligned} \quad (146)$$

Součet ztrát motoru při jmenovitém chodu a pracovní teplotě:

$$\sum \Delta P = \Delta P_{Fe} + \Delta P_{mech} + \Delta P_p = 144867,3 + 45,372,7 + 2268,6 = 201769,34 \text{ W} \quad (147)$$

$$\begin{aligned} \sum \Delta P' &= \sum \Delta P + (k_p - 1)(\Delta P_{j1} + \Delta P_{j2}) = \\ &= 201769,34 + (1,07 - 1) \cdot (26246,1 + 13371) = 204542,55 \text{ W} \end{aligned} \quad (148)$$

$$\begin{aligned} \sum \Delta P'_v &= \sum \Delta P' - (1 - K)(\Delta P_{jc1} + \Delta P_{Feh}) = \\ &= 204542,55 + (1 - 0,22) \cdot (18028 + 39060) = 1600138 \text{ W} \end{aligned} \quad (149)$$

Oteplení vzduchu uvnitř stroje nad teplotu prostředí:

$$\Delta \vartheta_v = \frac{\sum \Delta P'_v}{S_T \alpha_1} = \frac{1600138}{5,4 \cdot 493} = 60,1^\circ \text{C} \quad (150)$$

Střední oteplení statorového vinutí nad teplotu okolního vzduchu:

$$\Delta \vartheta_1 = \Delta \vartheta'_1 + \Delta \vartheta_v = 60,1 + 29,53 = 89,63 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (151)$$

Činitel uvažující změnu chladících podmínek:

$$k_m = m \sqrt{\frac{n}{100}} \cdot D = 3,3 \cdot \sqrt{\frac{4800}{100}} \cdot 1,2 = 25 \quad (152)$$

Požadovaný průtok vzduchu:

$$Q_v = \frac{\sum \Delta P'_v}{1100 \cdot \Delta \vartheta_v} = \frac{1600138}{1100 \cdot 89,6} = 1,62 \text{ m}^3 / \text{s} \quad (153)$$

[1], [2], [3], [4]

2 Vytvoření kruhového diagramu a vynesení proudové a momentové charakteristiky

2.1 Kruhový diagram

Kruhový diagram je geometrické místo proudových vektorů za předpokladu, že jsou všechny odpory a reaktance motoru stálé. U velkých a málo sycených strojů s vinutou kotvou je kruhový diagram přesný. Pro stroje s kotvou nakrátko je přibližný a pro stroj, jako je tento, nemá velkou vypovídací hodnotu, zejména díky faktu, že fázory proudu nakrátko a naprázdno jsou téměř ve fázi.

Kružnicový diagram je zařazen v přílohách, jelikož byl vytvářen v programu AutoCAD, který dovoluje kreslit ve skutečných hodnotách bez použití měřítka je kruhový diagram také kreslen v měřítku $m_i = 1 \text{ A/mm}$. Pro přehlednost byl do výkresu vložen detail používané části kružnice k.

2.2 Vynesení momentové a proudové charakteristiky

Momentová a proudová charakteristika jsou závislosti, které popisují chování motoru v závislosti na skluzu. V tomto případě ovšem nemají takový význam, protože motor bude napájen měničem a nikdy se nebude rozbíhat přímo s jmenovitou frekvencí

2.2.1 Vzorové výpočty pro vynesení proudové a momentové charakteristiky

Jmenovitý skluz:

$$s_n = R_2' \cdot \frac{I_1}{U_{f1}} = 0,0118 \cdot \frac{668}{3464} = 0,00227 \quad (154)$$

Jmenovitý moment:

$$M_n = \frac{P_2}{\frac{\omega_1}{p} \cdot (1 - s_n)} = \frac{6000000}{\frac{502,65}{1} \cdot (1 - 0,00227)} = 119638 \text{ Nm} \quad (155)$$

Skluz zvratu:

$$s_z = \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + (X_{1\sigma} + X'_{2\sigma})^2}} = \frac{0,0118}{\sqrt{0,0196^2 + (0,662 + 0,31)^2}} = 0,0121 \quad (156)$$

Hopkinsonův činitel rozptylu:

$$c_1 = 1 - \frac{X_{1\sigma}}{X_\mu} = 1 - \frac{0,662}{23,7} = 1,028 \quad (157)$$

Maximální moment:

$$\begin{aligned} M_{\max} &= \frac{p \cdot m_1}{2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f} \cdot \frac{U_f^2}{R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_{1\sigma} + c_1 \cdot X'_{2\sigma})^2}} = \\ &= \frac{1 \cdot 3}{2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 80} \cdot \frac{3464,1^2}{0,0196 + \sqrt{0,0196^2 + (0,662 + 1,028 \cdot 0,31)^2}} = 35797,12 \text{ Nm} \end{aligned} \quad (158)$$

Následující vztahy jsou řešeny pro skluz $s = 1$

Klossův vztah:

$$M_{(s)} = \frac{2 \cdot M_{\max}}{\frac{s}{s_z} + \frac{s_z}{s}} = \frac{2 \cdot 35797,12}{\frac{1}{0,0121} + \frac{0,0121}{1}} = 868,4 \text{ Nm} \quad (159)$$

Poměrný moment:

$$m_{(s)} = \frac{M_{(s)}}{M_{\max}} = \frac{868,4}{35797,12} = 0,02426 \quad (160)$$

Proudová charakteristika byla vynesena pomocí tabulkových výpočtů uvedených ve zdroji [2]. Ke stejnému výsledku lze dojít i dosazením do následujících vztahů:

Skluzová úhlová rychlost:

$$\omega_{(s)} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot s$$

Impedance náhradního obvodu:

$$Z = R_1 + j \cdot \left(X_{1\sigma} + X'_{2\sigma} + \frac{X_\mu}{1 + j \cdot \frac{X_\mu}{\omega \cdot R_{Fe}} \cdot \omega_s} \right)$$

Absolutní hodnota impedance

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2}$$

Proud obvodem v závislosti na skluzu

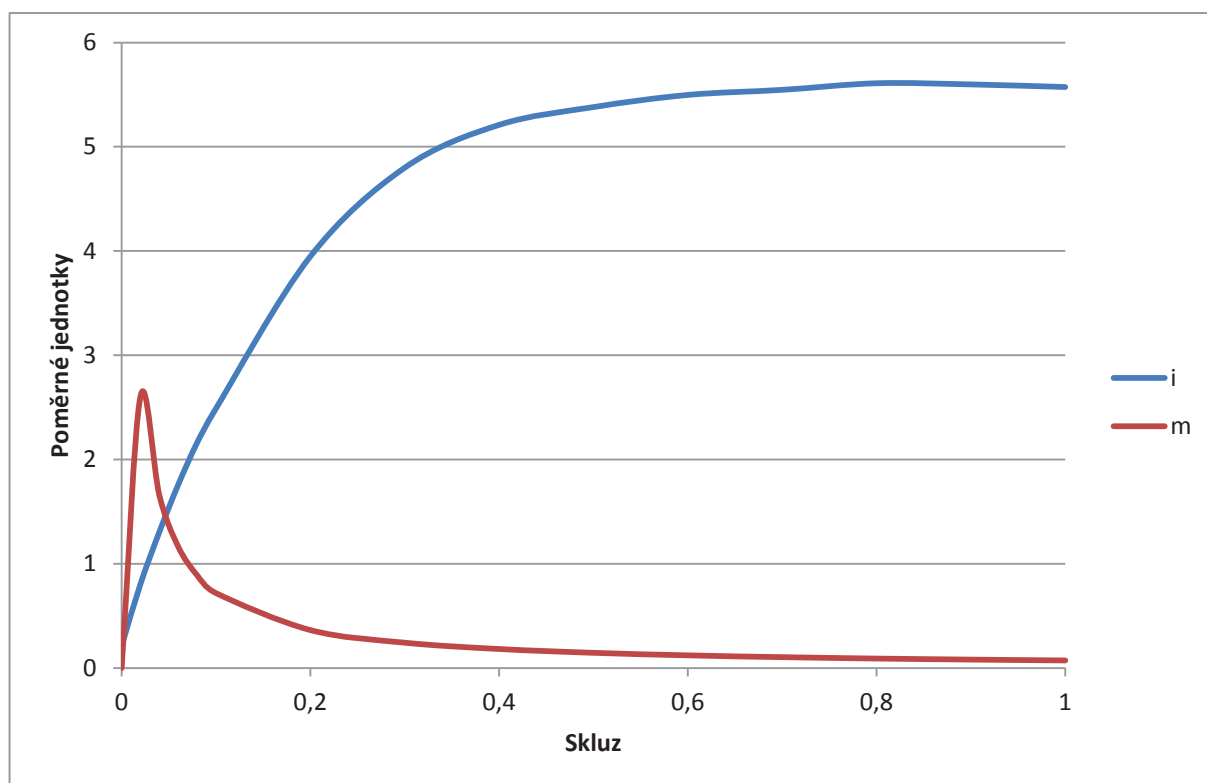
$$I_{1(s)} = \frac{U_f}{Z}$$

Poměrný proud

$$i_{1(s)} = \frac{I_{1(s)}}{I_{1N}}$$

Tab. 2. Tabulka výpočtu momentové a proudové charakteristiky

Skluz [-]	Moment [Nm]		Proud [A]	
	Absolutní hodnota	Poměrná hodnota	Absolutní hodnota	Poměrná hodnota
0,00	0	0	112,3839891	0,168181729
0,02	31746,33554	2,653524649	152,7143746	0,228535824
0,04	19884,24941	1,662029492	235,0338701	0,351726282
0,06	13906,94897	1,162415481	328,6341555	0,491798351
0,08	10612,56197	0,887053396	425,4590073	0,636695957
0,10	8559,312215	0,715432051	522,9897578	0,782649935
0,20	4326,719836	0,361649858	995,6468435	1,489977434
0,30	2890,366112	0,241591906	1419,447658	2,12419192
0,40	2169,323977	0,181323436	1782,800323	2,667946238
0,50	1736,033499	0,145106753	2085,481641	3,120906379
0,60	1446,954695	0,120944036	2333,35184	3,491842123
0,70	1240,381354	0,103677557	2534,930607	3,793503115
0,80	1085,410066	0,090724246	2698,701511	4,038584945
0,90	964,855502	0,080647666	2831,313706	4,237038021
1,00	868,3999241	0,072585404	2940,013354	4,399706163



Obr.2 Momentová a proudová charakteristika

3 Kontrola mechanické pevnosti zubové části

Metoda konečných prvků je univerzální numerická metoda k řešení složitých pevnostních a deformačních problémů na principu diskretizace spojitého kontinua. Vznikla v roce 1947, kdy ji matematik Courant publikoval jako matematický postup k řešení problému krutu válce. Další vývoj šel velmi pomalu, až do nástupu výpočetní techniky.

Velkou výhodou metody konečných prvků je její univerzálnost, nejčastěji se používá právě pro řešení problémů mechaniky deformovatelných těles. [6]

3.1 Počáteční podmínky

Před řešením dané simulace bylo potřeba stanovit si počáteční podmínky:

- Rotace rychlostí 5760 ot/min.
- Zahřátí vodičů na provozní teplotu 200 °C
- Tlak od klínů stanoven na 1000 N

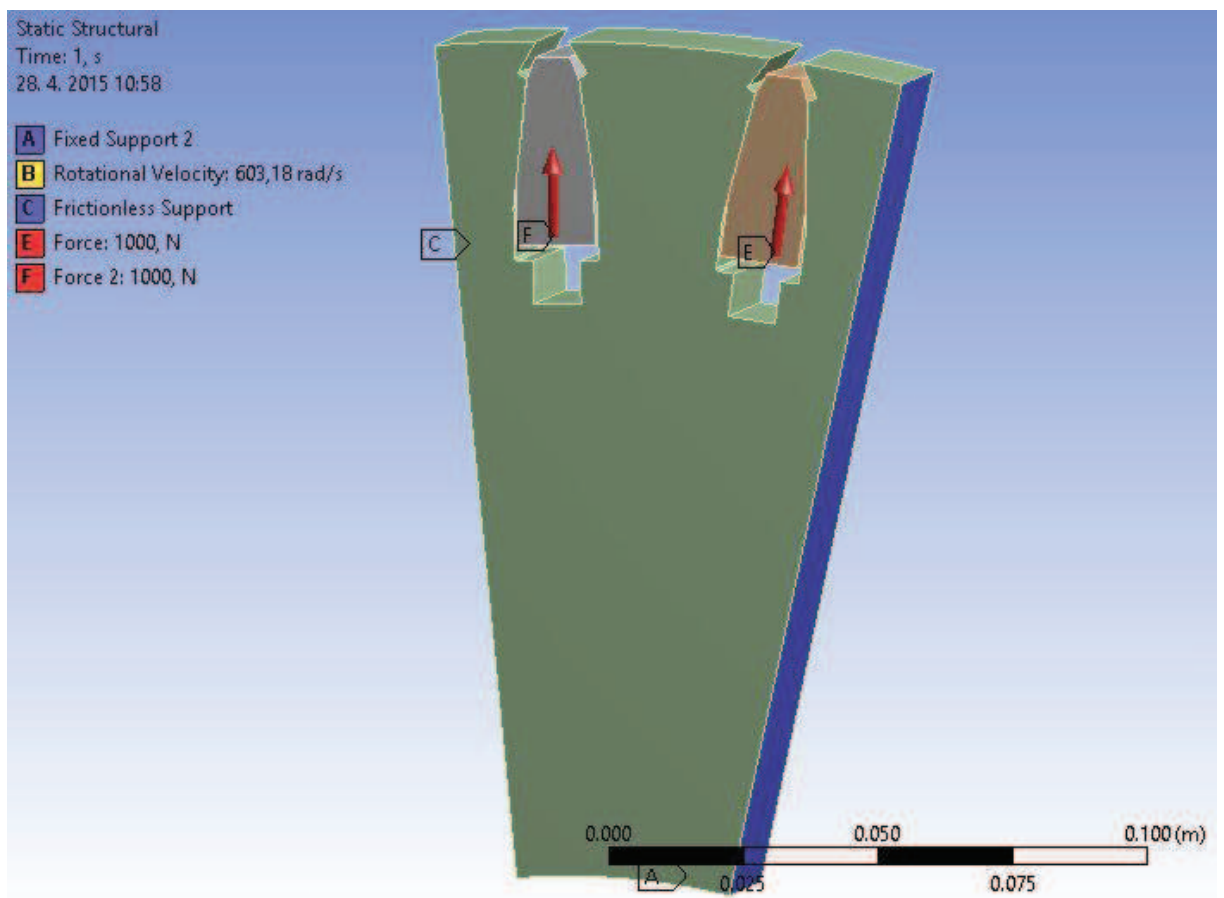
Rychlost rotace byla oproti synchronním otáčkám 4800 ot/min navýšena na 120% kvůli bezpečnosti provozu. Pro potřeby simulace je do modelu zahrnuta i osa rotace jako nedeformovatelný objekt.

Teplota vodičů je také navýšena o bezpečnost, kromě toho měnič bude rozbíhat motor systémem Soft Start.

Tlak od drážkových klínů bylo potřeba stanovit odhadem, neboť pracovní postup zakládání klínů a jejich utažení je založen čistě na zkušenostech zaměstnanců a záleží mimo jiné na přesnosti složení rotorového svazku, která se však může lišit. Protože klíny slouží pouze k vymezení vůlí při sestavování, byla stanovena síla, kterou působí klín na vodič na 1000 N, což by mělo pokrývat jak skutečnou sílu tak i přírůstek v rámci provozní bezpečnosti.

Pro simulaci je použita pouze výseč rotoru, neboť situace se periodicky opakuje na každém zubu rotoru. Proto byly zavedeny okrajové podmínky. Byla použita posuvná vazba po stranách výseče, která dovoluje pohyb podél vazby, ale nedovoluje pohyb skrz vazbu tak jako je tomu v reálných podmínkách. A pevná vazba na kontaktní ploše s hřídelí, na kterou bude svazek nalisován.

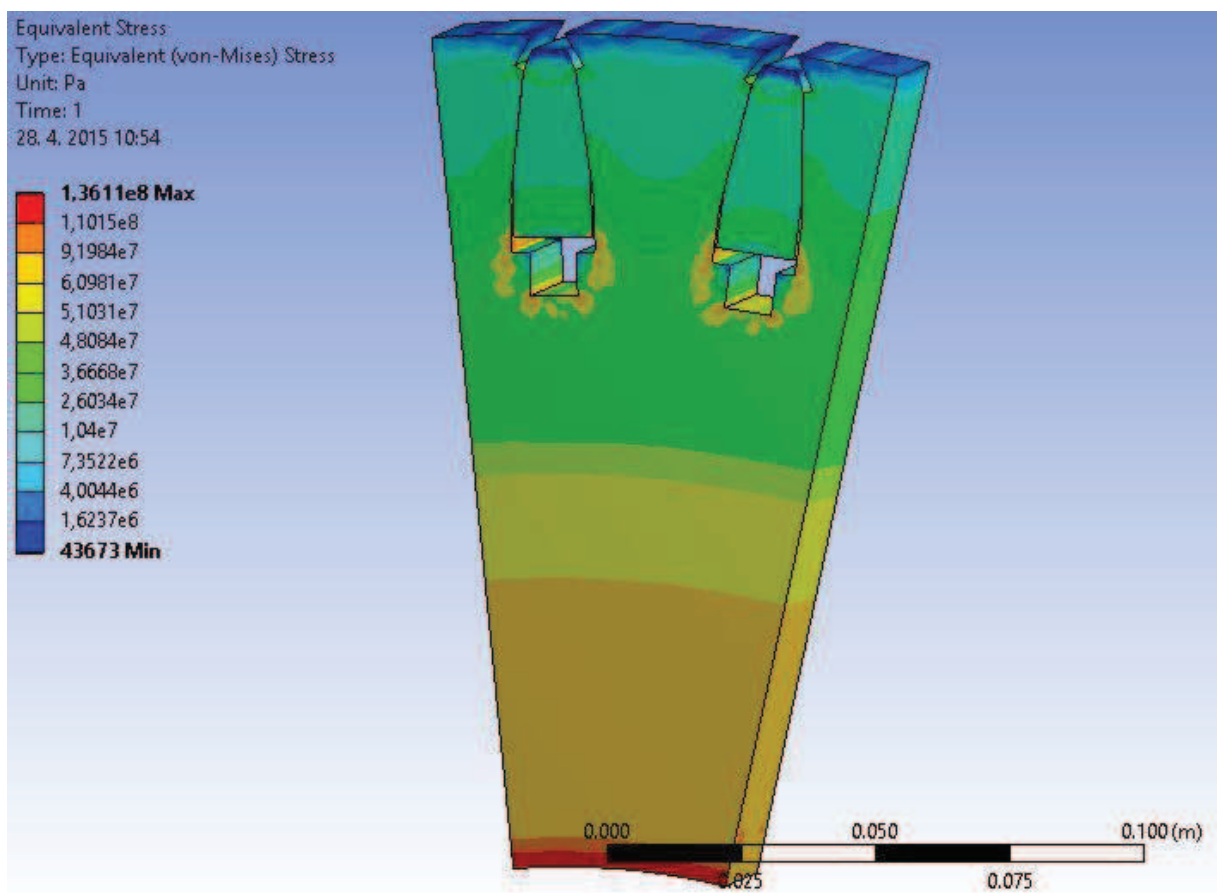
V simulaci je pouze vzorek z celé délky svazku, což ovšem nevadí, jelikož se simulace zabývá pouze situací ve směru kolmém na osu rotoru. Svazek je také pro zjednodušení reprezentován masivním kusem oceli, ten však také dostačuje podmínkám simulace ze stejného důvodu.



Obr. 3. Počáteční podmínky

3.2 Redukované napětí

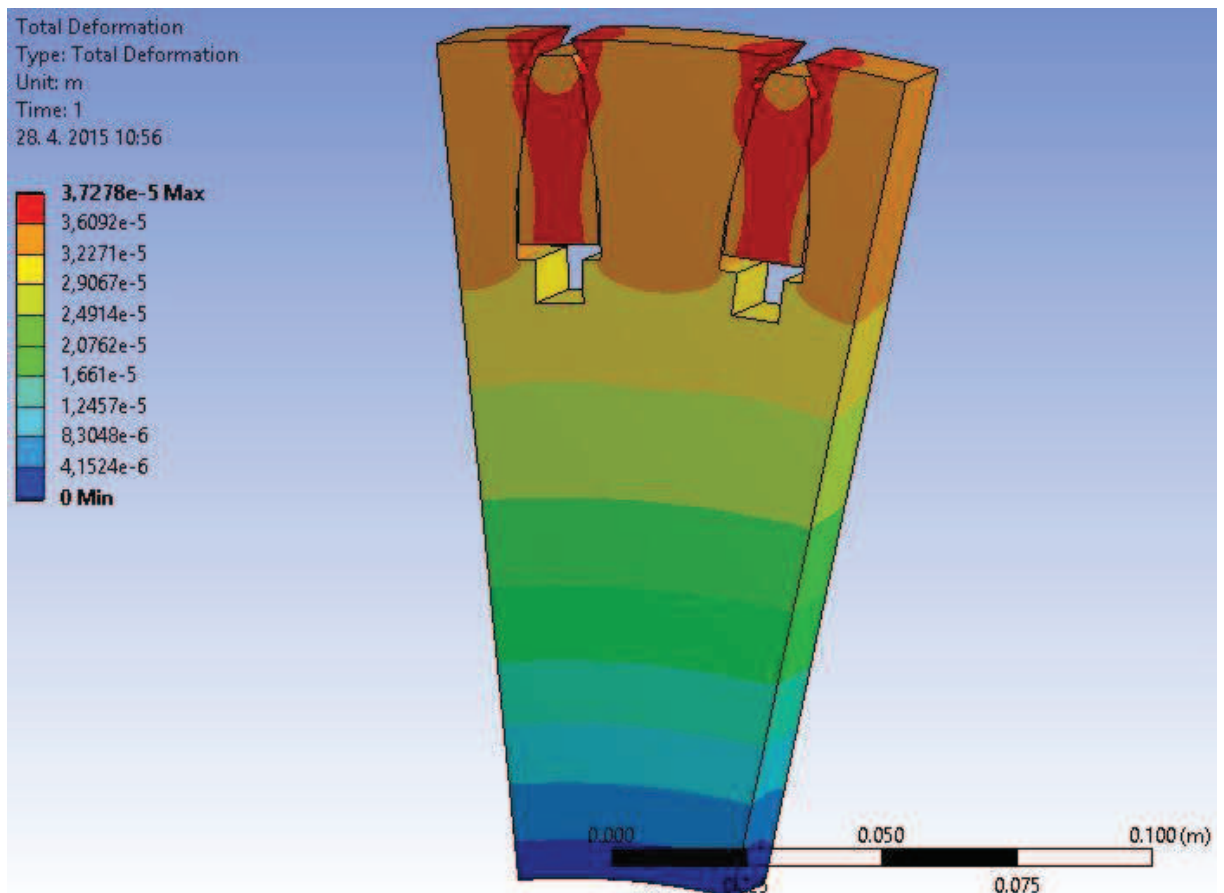
Z výsledku simulace je patrné namáhání u hřídele, což je způsobeno pevnou vazbou. Avšak ve skutečnosti je rotor rotačně souměrný, takže toto namáhání ignorujeme. Dále je patrné namáhání v místě drážkových klínů. Toto napětí je již skutečné a je způsobeno složitým tvarem drážky pro klín. Zub rotoru je v tomto místě nejužší, navíc jsou všude v drážce pro klín ostré rohy, kde vznikají singularity. Ve skutečnosti však přechod není ostrý, proto napětí bude menší než v simulaci.



Obr. 4. Redukované napětí

3.3 Výsledná deformace

Výsledná deformace zobrazuje jak situaci v rotorovém plechu, tak i ve vodiči přesně tak, jak se očekávalo. Díky větší tvárnosti mědi se deformuje vodič daleko více než samotný tvar drážky. Tato deformace je přenášena na šikmou část drážky, která navazuje na vršek drážky. Zmíněná část je nejvíce deformována, ovšem deformace je těžko postřehnutelná a dá se považovat za nulovou.



Obr. 5. Deformace rotorového svazku

Tab. 3. Tabulka použitých materiálů

Díl motoru	Modul pružnosti E [MPa]	Mez kluzu R _{P02} [MPa]
Plech M310-50A	190000	390
Vodič pro drážku J10x34 - 7/6	48000	60

4 Porovnání výsledků s výstupy ze softwaru KING

Tab. 4. Tabulka porovnání návrhů

Veličina	Howden ČKD	Můj výpočet
Aktivní délka včetně radiálních kanálů	650 mm	708,8 mm
Rozměry radiálních kanálů	10 x 10 mm	13x10 mm
Počet drážek statoru	60	48
Počet drážek rotoru	52	40
Rozměr drážky statoru	14 x 93 mm	17x121 mm
Rozměr holého vodiče	2,8 x 8,5 mm	3x11,5 mm
Počet paralelních drátů	4	2
Počet závitů v serii	30	28
Krok vinutí v počtu drážek	25	20
Počet vodičů v drážce	6	14
Hmotnost statorového svazku plechů	3218 kg	3373 kg
Hmotnost rotorového svazku plechů	816 kg	936 kg
Hmotnost Cu statoru	614 kg	205 kg
Hmotnost Cu rotoru	228 kg	342 kg
Činný odpor jedné fáze statorového vinutí při 20 °C	0,01166 Ω	0,0196 Ω
Sycení zubů na vrcholu	2,15 T	2,17 T
Sycení jha	1,59	1,8 T
Sycení ve vzduchové mezeře	1,1	1,1 T
Obvodová proudová hustota	65 000 A/m	61610,83 A/m
Essonův činitel	7,702	7,2588
Proud naprázdno	170 A	247 A
Jmenovitý proud	658,2 A	668,2 A
Proud nakrátko	3898 A (592 %)	3562 A (533%)
Celkové ztráty	186 380 W	230 986 W
Účinnost	0,904	0,866
Maximální moment	30 747 Nm (257 %)	35 797,1 Nm (299 %)
Jmenovitý moment	11 964 N*m	
Celková účinnost	97,0%	96,15%

Z přehledu sledovaných parametrů návrhu je jasně patrná zkušenost se stavbou tohoto typu motorů a znalost limitů materiálu, které společnost používá pro stavbu svých motorů.

Hned v prvním kroku návrhu, volby počtu drážek statoru, Howden zvolil jemnější drážkování, a tím pádem i menší počet vodičů v drážkách. Dále je vidět, že firma zvolila větší šířku paketů a menší počet větracích kanálků, což se projevuje kratším strojem, avšak zvyšuje nároky na odvod tepla ze stroje.

Vyšší počet drážek se také projevil mělčí a užší drážkou, a tím i menším počtem vodičů v drážce. Zvoleným počtem drážek a drážkovým krokem se však prodlužují čela vinutí, a dochází tak k vyšším ztrátám v čelech

Dalším sledovaným parametrem je hmotnost stroje, což určuje jeho cenu. Zde se opět projevuje menší délka statorového svazku, stejně jako odpor vinutí .

Sycení strojů je srovnatelné, avšak můj návrh vlivem užší a hlubší drážky pracuje s vyšším sycením statorového zubu.

Proudová hustota obou návrhů je srovnatelná, avšak Essonův činitel elektromagnetického využití stroje má návrh softwaru KING vyšší. Je to způsobeno mírně zvýšenou hodnotou obvodové proudové hustoty.

Proud naprázdno má můj návrh zdatelně vyšší zásluhou výše zmíněných skutečností. Jmenovitý proud mají oba návrhy srovnatelný, avšak můj návrh má citelně nižší proud nakrátko, který reprezentuje ztráty ve vinutí.

Celkové ztráty má návrh v softwaru KING menší o cca 45 kW, což však může být způsobeno jiným výpočtem celkových ztrát.

Dalším podstatným rozdílem je o 50% větší maximální moment. Jelikož se motor bude rozbíhat s měničem, existuje vysoká pravděpodobnost, že měnič bude držet motor v pásmu blízkému maximálnímu momentu. Díky tomuto faktu bude motor dříve v provozním stavu. Hodnota jmenovitého momentu je pro oba stroje stejná, a to 11 964 Nm.

Bohužel díky vyšším ztrátám má můj návrh i menší účinnost. Vycházíme-li však z faktu, že můj návrh byl proveden 50 let starým postupem, není ještě rozdíl 0,8 % nijak dramatický.

Můj návrh stroje nevyhází ze zpětných měření a zkušeností společnosti, jedná se o univerzální návrh dnes již klasickým způsobem. Z výše uvedených parametrů plyne, že můj návrh má měkčí momentovou charakteristiku. Jedná se však o stroj určený pro napájení z měniče, vynesení momentové charakteristiky tak ztrácí vypovídací hodnotu.

Závěr

Cílem této práce bylo vytvořit návrh vysokootáčkového asynchronního motoru s kotvou nakrátko, vynést proudovou a momentovou charakteristiku a sestavit kružnicový diagram. Dále provést kontrolu pevnosti zubové části rotoru metodou konečných prvků a porovnat výsledky s výstupy výpočetního softwaru KING.

Při tvorbě návrhu jsem byl omezen venkovním rozměrem statorových plechů a vrtáním statoru. Můj návrh klasickou metodou výpočtu obsahuje počty drážek rotoru a statoru, složení statorové drážky, stanovení rozměrů magnetického obvodu, výpočet parametrů náhradního schématu, stanovení ztrát a zjednodušený výpočet oteplení. Výsledkem je stroj s účinností 96,15 %.

Kruhový diagram, který je zařazen v přílohách, nemá vysokou vypovídací hodnotu, protože fázory proudů nakrátko a naprázdno jsou ve fázi, a značně tak deformují celý diagram. Dále platí, že kruhový diagram postihuje přesně motory s vinutou kotvou a nízkým sycením. Pro motory s kotvou nakrátko a s vysokým sycením použitým v návrhu je diagram velice nepřesný.

Stejně špatnou vypovídací hodnotu mají momentové a proudové charakteristiky. Motor bude napájen z měniče a nebude se rozbíhat přímým připojením na síť.

V simulaci namáhání zubové části rotoru jsem se potýkal s několika problémy. Howden používá pro svou drážku drážkové klíny, které jsou proti sobě založeny do drážky pro klín pod vodič. Pro sílu, kterou jsou proti sobě klíny zaraženy, však firma nemá žádné předpisy a spoléhá se výhradně na zkušenosti svých zaměstnanců. Protože však klíny slouží jen k vymezení vůle, můžeme jejich příspěvek stanovit asi na 1 000 N, což je asi 1% síly působící na šikmé stěny drážky pro vodič. Tato hodnota zahrnuje též provozní bezpečnost.

Po srovnání výsledků mého návrhu a návrhu generovaného softwarem KING, který společnost Howden používá, lze pozorovat trend posouvání možností materiálů. Návrh používá vyšší obvodovou proudovou hustotu, a dává tak možnost provést drážky menší a mělké než můj návrh. Pro stanovení ztrát zřejmě používá společnost také jiný postup. Tento fakt se projevuje též do stanovené účinnosti, kterou má návrh firmy Howden vyšší o 0,8%. Můj návrh má však nižší proud na krátko a vyšší maximální moment. Celkově má můj návrh měkčí momentovou charakteristiku.

Štítkové hodnoty mého návrhu:

Typ:	Asynchronní motor s kotvou nakrátko
Výkon:	6 000 kW
Napětí:	6 kV
Proud :	668 A
Frekvence:	80 Hz
Krytí:	IP 55
Účinnost:	0,866
Otáčky:	4800 ot/min
Třída izolace:	F
Konstrukční uspořádání:	IM 1001
Druh chlazení:	IC 515
Ochrana nevybušnosti:	II 2G Ex d IIA T3

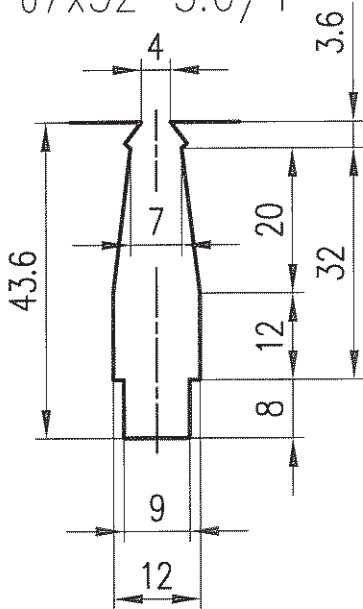
Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] CIGÁNEK, Ladislav. *Stavba elektrických strojů*. Praha: SNTL, 1958. 716 s.
- [2] KOPYLOV, Igor Petrovič. *Stavba elektrických strojů*. Praha: SNTL, 1988. 688 s.
- [3] ČERVENÝ, Josef. *Stavba elektrických strojů*. Učební materiály k předmětům KEV/SES1,2. Plzeň, 2010. 148 s.
- [4] ČKD, Informační zdroje ČKD
- [5] PYRHONEN, JOKINEN, HRABOVCOVA. *Design of Rotating Electrical Machines*. 2nd Edition, Wiley, 2013. 612 s.
- [6] ZEMEK, Pavel. *Využití metody konečných prvků pro návrh otočného sloupového jeřábu*, Diplomová práce. UTB ve Zlíně, 2011, 91 s.

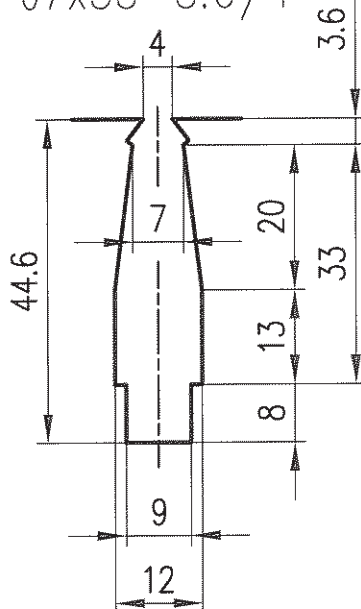
Přílohy

DRAZKY TVARU J
POUZIVANE V CKD NE

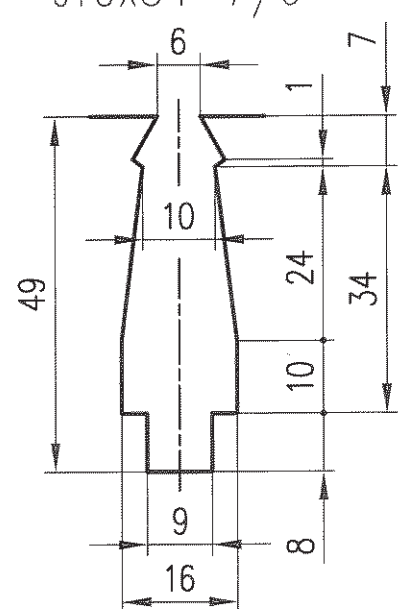
J7x32-3.6/4



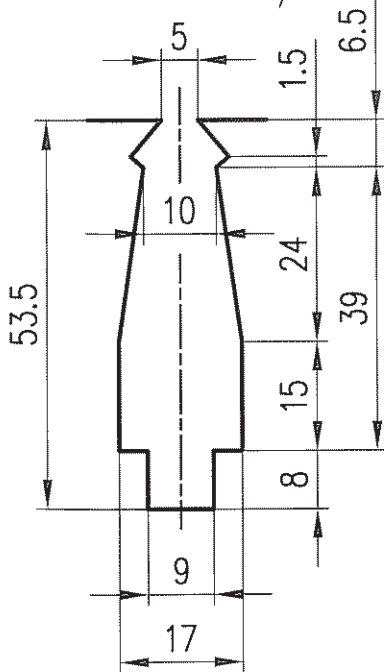
J7x33-3.6/4



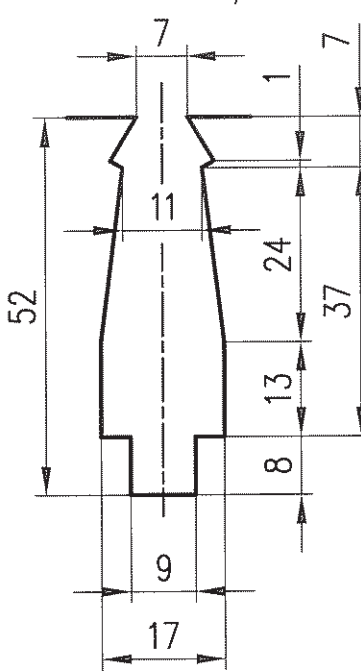
J10x34-7/6



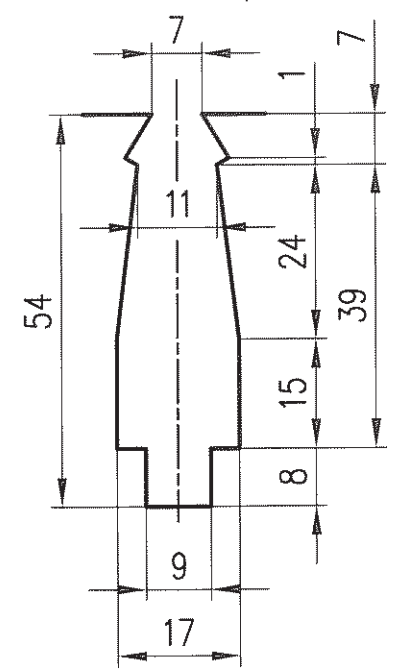
J10x39-6.5/5



J11x37-7/7

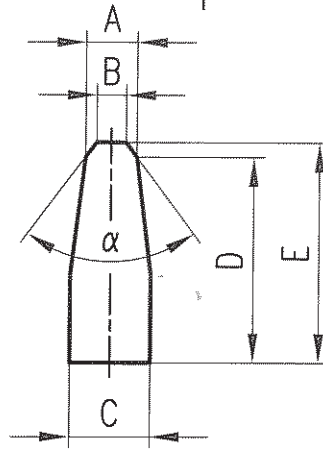


J11x39-7/7



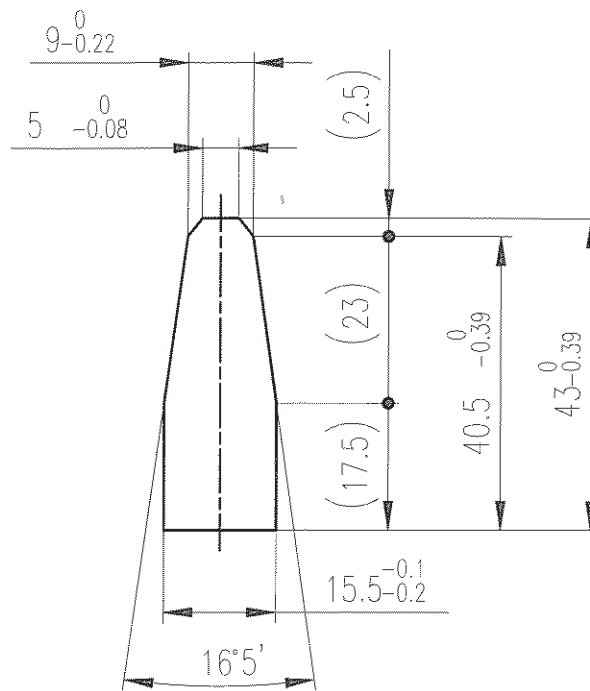
TOLERANCE h11 U ROZMERU C
JE OZNACENA *.
JINAK PLATI TOLERANCE h13.

MATERIAL CSN 42 3001.21
DIN 40500



POZ.	A,h11	B,h11	C,h13	D,h13	E,h13	α	Hmotnost, kg/m	Tvar drážky
01	11 ^{0.0} _{-0.11}	11 ^{0.0} _{-0.11}	16 ^{0.0} _{-0.27}	17.5 ^{0.0} _{-0.27}	17.5 ^{0.0} _{-0.27}	34°42'±8'	2.33	P 16x23
02	8 ^{0.0} _{-0.09}	8 ^{0.0} _{-0.09}	13 ^{0.0} _{-0.27}	29 ^{0.0} _{-0.33}	29 ^{0.0} _{-0.33}	34°42'±8'	3.08	P 13x33
03	7 ^{0.0} _{-0.09}	4 ^{0.0} _{-0.075}	11 ^{0.0} _{-0.27}	28 ^{0.0} _{-0.33}	30 ^{0.0} _{-0.33}	14°15'±5'	2.56	J 7x32 - 3.6/4
04	11 ^{0.0} _{-0.11}	7 ^{0.0} _{-0.08}	16 ^{0.0} _{-0.27}	34 ^{0.0} _{-0.39}	38 ^{0.0} _{-0.39}	14°15'±5'	4.73	J 11x37 - 7/7
05	10 ^{0.0} _{-0.09}	6.5 ^{0.0} _{-0.08}	15 ^{0.0*} _{-0.11}	31 ^{0.0} _{-0.39}	35 ^{0.0} _{-0.39}	14°15'±5'	4.0	J 10x34 - 7/6
06	7 ^{0.0} _{-0.09}	4 ^{0.0} _{-0.075}	11 ^{0.0} _{-0.27}	31 ^{0.0} _{-0.39}	33 ^{0.0} _{-0.39}	14°15'±5'	2.86	J 7x33 - 3.6/4
07	10 ^{0.0} _{-0.09}	5 ^{0.0} _{-0.075}	16 ^{0.0} _{-0.27}	36 ^{0.0} _{-0.39}	40 ^{0.0} _{-0.39}	16°39'±5'	4.86	J 10x39 - 6.5/5
08	11 ^{0.0} _{-0.11}	7 ^{0.0} _{-0.08}	16 ^{0.0} _{-0.27}	36 ^{0.0} _{-0.39}	40 ^{0.0} _{-0.39}	14°15'±5'	5.02	J 11x39 - 7/7
09								
10								
11								
12								
13								
14								
15								
17								
18								
19								
20								

VSECHNA PRAVA VYHRAZENA. PORUSENI SE TRESTA PODLE ZAKONA ALL RIGHTS ARE BEING RESERVED. VIOLATIONS WILL BE PROSECUTED.				TYP TYPE
MERITKO SCALE	KRESLIL DRAWN	DENYSJUK	15.11.2007	NAZEV NAME
-	NORMALIZ. STANDARD.	VONDRACEK	DATUM/DATE	PROFIL J, P
	SCHVALIL APPROVED			
		CISLO VYKRESU DRAWING No		LIST SHEET
NOVÉ ENERGO a.s.		4-35-00422		1
				LISTU OF
				1



✓(✓)

1	PROFIL J	L = 1102			42 3201	1	5.53	TVAR	
POZ. No.	NAZEV NAME	ROZMERY SIZE	NORMA STANDARD	VYKRES DRAWING	MATERIAL	KUSU QTY	HMOT. MASS	POZNAMKA NOTE	REV.
VSECHNA PRAVA VYRAZENA. PORUSENI SE TRESTA PODLE ZAKONA ALL RIGHTS ARE BEING RESERVED. VIOLATIONS WILL BE PROSECUTED.	POLE/FIELD	ZMENA/MODIF.		PODPIS/SIGN.	DATUM/DATE	SCHVAL/APPROV	DATUM/DATE	INDEX/REV.	x
									x
									x
									x
									x
					ISO-E	STARY VYKRES OLD DRW.		4-35-00422	
ROZMER DIMENSION	NORMA NORM	MAT. KOHECNY MAT. FINAL	HMOTNOST MASS	TOLERANCE: ISO 8015	PRESNOST/PRECISION: ISO 2768 - mK	TYP TYPE		5V 256-04HW	
MERITKO SCALE	KRESLIL DRAWN DENYSJUK	KONTR. CHECKED KAHOUN	SCHVALIL APPROVED PROCHAZKA	DATUM/DATE 15.5.2013	NAZEV NAME	PROFIL J			
1:1			DATUM/DATE 15.5.2013						
			DATUM/DATE 15.5.2013						
ČKD KOMPRESORY ČLEN ČKD GROUP					CISLO VYKRESU DRAWING No	4-34-64017			LIST SHEET 1/1
									REVIZE

