

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Porovnání radiální a axiální ventilace asynchronního
stroje**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2016/2017

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

Jméno a příjmení: **Bc. Ondřej DOŠEK**
Osobní číslo: **E15N0052P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Průmyslová elektronika a elektromechanika**
Název tématu: **Porovnání radiální a axiální ventilace asynchronního stroje**
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

1. Proveďte elektromagnetický návrh asynchronního motoru pro oba druhy ventilace s respektováním teplotní třídy izolace.
 2. Sestavte ventilační a tepelný model pro obě varianty ventilace.
 3. Sestavte 3D modely a proveďte ověření obou navržených variant v software ANSYS.
 4. Zhodnoťte vliv axiální a radiální ventilace v závislosti na provozních a návrhových parametrech stroje.
 5. Parametry stroje: $P = 1\ 000\ \text{kW}$, $U = 690\ \text{V}$, $f=50\ \text{Hz}$, $2p = 6$, IP10, IC06, IM1001.
-

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce se asynchronním strojem z pohledu dvou způsobů ventilace a porovnává je. Práce zahrnuje elektromagnetické výpočty, ventilační výpočty metodou náhradní hydraulické sítě a tepelné výpočty metodou náhradní tepelné sítě. Dále je práce doplněna CAD modely obou variant stroje v programu Solidworks a ověřením elektromagnetického výpočtu pomocí programu Ansys RMXprt.

Klíčová slova

Axiální ventilace, Radiální ventilace, Asynchronní motor, ANSYS, Tepelná síť

Abstract

The master thesis deals with asynchronous machine in point of view of two cooling system and makes their comparison. Thesis includes electromagnetic design, ventilation and thermal analysis. A ventilation analysis is calculated by alternative hydraulic network and the thermal analysis is calculated by the alternative thermal network. The thesis is supported by 3D model of the both types of machines in software Solidworks and the electromagnetic design is checked by software Ansys RMXprt.

Key words

Axial cooling, Radial cooling, Asynchronous machine, Ansys, Alternative thermal network

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 17.5.2017

Bc. Ondřej Došek

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Romanu Pechánkovi Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH	7
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
1 ÚVOD	11
2 ELEKTROMAGNETICKÝ NÁVRH STROJE S AXIÁLNÍ VENTILACÍ.....	12
2.1 POČÁTEČNÍ HODNOTY	12
2.2 URČENÍ HLAVNÍCH ROZMĚRŮ	12
2.3 URČENÍ POČTU DRÁŽEK, ČINITELE VINUTÍ A INDUKCE VE VZDUCHOVÉ MEZEŘE	14
2.4 VINUTÍ STATORU	18
2.5 ROTOROVÁ KLEC	21
2.6 ROZMĚRY ZUBŮ STATORU	22
2.7 CARTÉRŮV ČINITEL	22
2.8 VÝPOČTY MAGNETICKÝCH INDUKČÍ A MAGNETICKÝCH NAPĚTÍ	23
2.9 ZTRÁTY STROJE	26
3 OVĚŘENÍ NÁVRHU STROJE S AXIÁLNÍ VENTILACÍ.....	29
4 ELEKTROMAGNETICKÝ NÁVRH STROJE S RADIÁLNÍ VENTILACÍ.....	31
4.1 ZTRÁTY	38
5 OVĚŘENÍ NÁVRHU STROJE S RADIÁLNÍ VENTILACÍ.....	40
6 VENTILAČNÍ VÝPOČET STROJE S AXIÁLNÍ VENTILACÍ.....	41
6.1 ZVOLENÝ VENTILÁTOR.....	41
6.2 HYDRAULICKÁ SÍŤ AXIÁLNÍ VENTILACE	42
6.3 VÝPOČET HYDRAULICKÝCH ODPORŮ.....	43
6.3.1 <i>Hydraulický odpor třením.....</i>	<i>43</i>
6.3.2 <i>Hydraulický odpor ohybem.....</i>	<i>43</i>
6.3.3 <i>Hydraulický odpor rozšířením.....</i>	<i>43</i>

6.3.4	Hydraulický odpor zúžením	44
6.3.5	Hydraulický odpor vstupem do rotujících ploch.....	44
6.3.6	Hydraulický odpor výstupem z rotujících ploch	44
6.4	PROGRAM PRO VENTILAČNÍ VÝPOČET.....	44
6.5	VÝSLEDKY VENTILAČNÍHO VÝPOČTU AXIÁLNÍ VENTILACE.....	45
7	VENTILAČNÍ VÝPOČET STROJE S RADIÁLNÍ VENTILACÍ.....	47
7.1	UKÁZKA SESTAVENÍ ROVNICE PRO VENTILAČNÍ VÝPOČET	47
7.2	VÝPOČET VENTILAČNÍCH VLASTNOSTÍ ROZPĚREK ROTORU	48
7.3	VÝSLEDEK VÝPOČTU RADIÁLNÍ VENTILACE	49
8	TEPELNÝ VÝPOČET STROJE S AXIÁLNÍ VENTILACÍ.....	50
8.1	METODA TEPELNÉ SÍTĚ	51
8.2	POPIS PROGRAMU PRO TEPELNÝ VÝPOČET STROJE S AXIÁLNÍ VENTILACÍ.....	52
8.3	VÝSLEDKY TEPELNÉHO VÝPOČTU STROJE S AXIÁLNÍ VENTILACÍ	54
9	TEPELNÝ VÝPOČET STROJE S RADIÁLNÍ VENTILACÍ.....	57
9.1	VÝSLEDKY TEPELNÉHO VÝPOČTU STROJE S RADIÁLNÍ VENTILACÍ	58
10	ZÁVĚR.....	62
	SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	64
	PŘÍLOHY.....	1
	PŘÍLOHA I - VÝPOČET TEPELNÝCH ODPORŮ STROJE S AXIÁLNÍ VENTILACÍ	1
	PŘÍLOHA II – VÝKRESY STROJE S AXIÁLNÍ VENTILACÍ.....	7
	PŘÍLOHA III – VÝKRESY STROJE S RADIÁLNÍ VENTILACÍ	9

Seznam symbolů a zkratk

a	počet paralelních větví	[-]
A	lineární proudová hustota	[A/m]
b	šířka	[m]
B	magnetická indukce	[T]
c	tepelná kapacita	[J/m ³ ·K]
C	konstanta stroje	[-]
D	průměr	[m]
f	frekvence	[Hz]
G	matice tepelných vodivostí	
	tepelná vodivost	[W/K]
h	výška	[m]
H	magnetická intenzita	[A/m]
	tlak	[Pa]
I	proud	[A]
J	proudová hustota	[A/mm ²]
k	činitel	[-]
K	hydraulický odpor	[N·s/m ⁸]
l	délka	[m]
m	počet fází	[-]
	hmotnost	[kg]
n	otáčky	[1/min]
N	počet závitů	[-]
p	počet pólových dvojic	[-]
P	výkon	[W]
q	počet drážek na pól a fázi	[-]

Q	počet drážek	[-]
	průtočné množství	[m ³ /s]
R	elektrický odpor	[Ω]
	tepelný odpor	[K/W]
Re	Reynoldsovo číslo	[-]
S	průřez	[m ²]
t	tloušťka	[m]
T	moment	[N·m]
U	napětí	[V]
W	cívkový krok	[-]
z	počet lopatek	[-]
α	součinitel přestupu tepla	[W/m ² ·K]
β	poměrné zkrácení kroku vinutí	[-]
δ	velikost vzduchové mezery	[mm]
ξ	průměrový parametr	[-]
	činitel hydraulického odporu	[-]
η	účinnost	[-]
ϑ	teplota	[°C]
χ	štíhlostní poměr	[-]
λ	měrná tepelná vodivost	[W/m·K]
μ	kontrakční činitel	[-]
γ	šířkový parametr	[-]
ρ	rezistivita	[Ω·mm ² /m]
	hustota	[kg/m ³]
τ	rozteč	[m]
ω	úhlová rychlost	[rad/s]

1 Úvod

Ventilační a tepelný výpočet stroje je důležitá část návrhu elektrického stroje. Je to dáno snahou dosahovat co největších výkonů strojů v určitém objemu, nebo zmenšení objemu stroje určitého výkonu. Pro dosažení těchto požadavků je nutné co nejlépe využít aktivní části stroje. Způsob odvodu ztrátového tepla ze stroje významně limituje maximální možné využití aktivních materiálů. Přínosem zahrnutí tepelné a ventilační problematiky do procesu návrhu stroje, snižuje množství použitých materiálů, čímž snižuje rozměry a cenu stroje. Pokud by se aktivní části stroje více využily bez řešení odvodu ztrátového tepla, došlo by k navýšení teploty ve stroji a tím k urychlení degradačních procesů izolačního systému což zkracuje životnost stroje.[6]

Pro provedení ventilačního výpočtu je potřeba znát rozměry stroje včetně rozměrů kostry. Dále je nutné znát velikost a rozložení ztrát ve stroji. Tuto informaci nám dává elektromagnetický návrh stroje. Ventilační výpočet nám dává informaci o rozdělení chladiva ve stroji a rychlostech proudění. Z rychlosti proudění lze určit součinitel přestupu tepla z ochlazované plochy. Ten je jednou ze vstupních informací pro tepelný výpočet.

Tepelný výpočet metodou náhradní tepelné sítě se skládá z výpočetních bodů, tepelných odporů a zdrojů ztrát. Výsledkem tepelného výpočtu jsou teploty v uvažovaných bodech.

Práce si klade za cíl porovnat dva způsoby ventilace asynchronního stroje. Nejprve je proveden elektromagnetický návrh, který je ověřen pomocí programu Ansys RMXprt. Podle vypočtených rozměrů je nakreslen model stroje v programu Solidworks. Následně je provedena ventilační a tepelná analýza obou variant stroje. Výsledky výpočtů jsou v závěru práce vyhodnoceny.

2 Elektromagnetický návrh stroje s axiální ventilací

Postup a vzorce pro elektromagnetický návrh stroje jsou převzaty z [1].

2.1 Počáteční hodnoty

Zde jsou uvedeny zadané hodnoty, ze kterých návrh vychází:

Tab. 2.2.1 Zadané hodnoty

Jmenovitý výkon	P_N	1000kW
Napětí	U_N	Y 690V
Frekvence	f	50Hz
Počet pólů	2p	6
Krytí		IP10
Způsob chlazení		IC06
Konstrukční provedení		IM1001
Počet fází	m	3

2.2 Určení hlavních rozměrů

Synchronní otáčky stroje:

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p} = \frac{60 \cdot 50}{3} = 1000 \text{ min}^{-1}$$

Výkon stroje na pól:

$$P_{mec} = \frac{P}{2p} = \frac{1000}{6} = 166,67 \text{ kW}$$

Dle [1] Konstanta stroje pro $\frac{P}{2p} = 166,67 \text{ kW} \rightarrow C_{mec} = 214,1 \frac{\text{kW}}{\text{m}^{3,1} \cdot \text{s}}$

Doporučený štíhlostní poměr stroje:

$$\chi = \frac{l}{D} = 1,429$$

Vnitřní průměr statoru:

$$D = \sqrt[3]{\frac{P}{\chi \cdot C_{mec} \cdot n_s}} = \sqrt[3]{\frac{1000}{1,429 \cdot 214,1 \cdot \frac{50}{3}}} = 581 \text{ mm}$$

Efektivní délka statoru:

$$l' = \chi \cdot D = 1,429 \cdot 581 = 830 \text{ mm}$$

Velikost vzduchové mezery:

$$\delta = k_s \cdot \frac{0,18 + 0,006 \cdot P^{0,4}}{1000} \cdot 10^{-3} = 1,6 \cdot \frac{0,18 + 0,006 \cdot 1000^{0,4}}{1000} \cdot 10^{-3} = 1,8 \text{ mm}$$

k_s - činitel zvětšující vzduchovou mezeru z důvodu snížení povrchových ztrát vlivem otevřených drážek, doporučené rozmezí (1,6÷2,0)[1]

Skutečná délka statoru:

$$l_s = l' - 2 \cdot \delta = 830 - 2 \cdot 1,8 = 826 \text{ mm}$$

Průměr rotoru:

$$D_R = D_S - 2 \cdot \delta = 581 - 2 \cdot 1,8 = 577,4 \text{ mm}$$

Stanovené jmenovité otáčky:

$$n = 985 \text{ min}^{-1}$$

Stanoveno podle jmenovitých otáček podobných strojů.

Jmenovitý skluz:

$$s_n = \frac{(n_s - n)}{n_s} = \frac{1000 - 985}{1000} = 1,5\%$$

2.3 Určení počtu drážek, činitele vinutí a indukce ve vzduchové mezeře

Doporučená drážková rozteč:

$$\tau_{us} = 7 \div 45\text{mm}$$

Počet drážek musí být rozložitelný na počet fází a pólů, z toho důvodu je vytvořena tabulka pro možné počty drážek na pól a fázi.

Tab. 2.2 Varianty počtu drážek statoru

q	3	4	5
$Q_s = 2p \cdot m \cdot q$	54	72	90
$\tau_{us} = \frac{\pi \cdot D}{Q_s}$ [mm]	33,8	25,35	20,2

S ohledem na realizovatelnost vinutí je zvolena varianta ($q = 4$). Vinutí je zvoleno dvouvrstvé, nekřížené, uložené do otevřených drážek.

Pólová rozteč:

$$\tau_p = \frac{Q_s}{2p} = \frac{72}{6} = 12 \text{ (drážek)}$$

Z důvodu omezení vlivu vyšších harmonických, jakožto i jejich momentů je cívkový krok zkrácen na $\frac{5}{6} \tau_p$ [1].

Cívkový krok v počtu drážek:

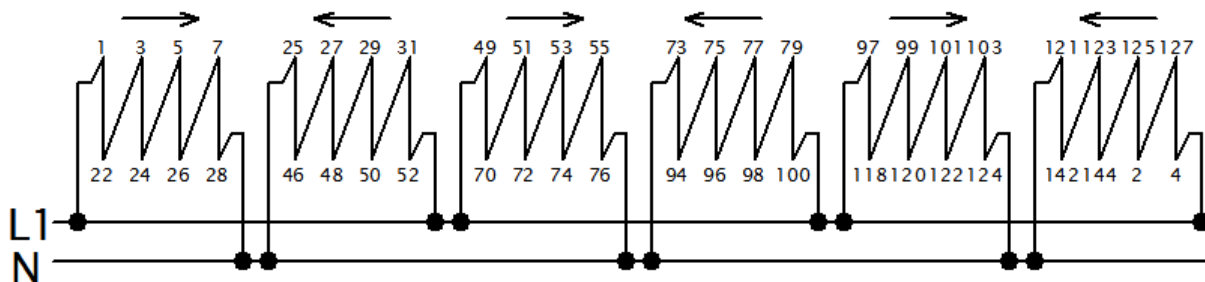
$$W = \frac{5}{6} \tau_p = \frac{5}{6} 12 = 10 \text{ (drážek)}$$

Cívkový krok v počtu cívkových stran:

$$y_1 = 2 \cdot W + 1 = 2 \cdot 10 + 1 = 21 \text{ (cívkových stran)}$$

Činitel vinutí statoru pro 1. harmonickou (50Hz):

$$\begin{aligned} k_{WS1} &= k_{PS1} \cdot k_{DS1} = \sin\left(\frac{W}{\tau_p} \cdot \frac{\pi}{2}\right) \cdot \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2m}\right)}{q \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2mq}\right)} = \sin\left(\frac{12}{10} \cdot \frac{\pi}{2}\right) \cdot \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2 \cdot 3}\right)}{4 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2 \cdot 3 \cdot 4}\right)} \\ &= 0,925 \end{aligned}$$



Obr. č. 2.1 Pilové schéma fáze L1, vlastní tvorba

Výběru počtu drážek rotoru se musí věnovat zvýšená pozornost, aby vzájemně s počtem drážek statoru nevznikali ve stroji škodlivé:

1. Synchronní momenty v pracovní oblasti
2. Mechanické vibrace
3. Momentová sedla pozitivní
4. Momentová sedla negativní
5. Momenty při protiproudém brždění

p	Q_s	Q_r
1	24	28, 16, 22
	36	24, 28, 48, 16
	48	40, 52
	60	48
2	36	24, 40, 42, 60, 30, 44
	48	60, 84, 56, 44
	60	72, 48, 84, 44
3	36	42, 48, 54, 30
	54	72, 88, 48
	72	96, 90, 84, 54
4	36	48
	48	72, 60
	72	96, 84

Source: Adapted from Richter (1954).

Obr. č. 2.2 Vhodné dvojice počtů drážek, převzato z [1]

Zvolený počet drážek rotoru:

$$Q_R = 54$$

Drážková rozteč rotoru:

$$\tau_{ur} = \frac{(\pi \cdot D_R)}{Q_R} = \frac{\pi \cdot 577,4}{54} = 33,59 \text{ mm}$$

Moment stroje:

$$T = \frac{P}{2 \cdot \pi \cdot n} = \frac{10^6}{2 \cdot \pi \cdot \frac{985}{60}} = 9694,7 \text{ Nm}$$

Obvodový tah stroje:

$$\sigma_{Ftan} = \frac{2 \cdot T}{\pi \cdot D^2 \cdot l} = \frac{2 \cdot 9694,7}{\pi \cdot 0,581^2 \cdot 0,83} = 22,03 \text{ kPa}$$

Lineární obvodová proudová hustota:

$$A_s = \frac{\sqrt{2} \cdot \sigma_{Ftan}}{B_\delta \cdot \cos\zeta} = \frac{\sqrt{2} \cdot 22030}{0,93 \cdot 0,8} = 41875 \frac{A}{m}$$

Kde $\cos\zeta$ je kosinus úhlu mezi lineární proudovou hustotou a magnetickou indukcí ve vzduchové mezeře, předpoklad 0,8. B_δ dle [1] pro asynchronní stroje 0,7÷0,9T po konzultaci zvoleno 0,93T.

Počet závitů v sérii:

$$N_s = \frac{\sqrt{2} \cdot 0,95 \cdot U_s}{\sqrt{3} \cdot \omega \cdot k_{w1} \cdot \dot{I} \cdot \tau_p \cdot \alpha_i \cdot B_\delta} = \frac{\sqrt{2} \cdot 0,95 \cdot 690}{\sqrt{3} \cdot 314,15 \cdot 0,925 \cdot 830 \cdot 0,3042 \cdot 0,65 \cdot 0,93} = 12 \text{ (závitů)}$$

α_i =koeficient aritmetického průměru magnetické indukce (předpokládaná hodnota, která je zpětně ověřena)

Pólová rozteč:

$$\tau_p = \frac{\pi \cdot D_s}{2 \cdot p} = \frac{\pi \cdot 0,581}{2 \cdot 3} = 0,3042m$$

Úhlová rychlost:

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f = 2 \cdot \pi \cdot 50 = 314,15 \frac{rad}{s}$$

Počet vodičů v drážce:

$$z_{Qs} = \frac{2 \cdot a \cdot m \cdot N_s}{Q_s} = \frac{2 \cdot 6 \cdot 3 \cdot 12}{72} = 6$$

Šířka zubu statoru:

$$b_{ds} = \frac{\dot{I} \cdot \tau_{us}}{k_{Fe} \cdot (l_s - n_v \cdot b_v)} \cdot \frac{B_\delta}{B_{ds}} + 0,01 \cdot 10^{-3} = \frac{0,83 \cdot 0,02535}{0,97 \cdot (0,826 - 0 \cdot 0)} \cdot \frac{0,93}{1,7} + 0,01 \cdot 10^{-3} = 14,47mm$$

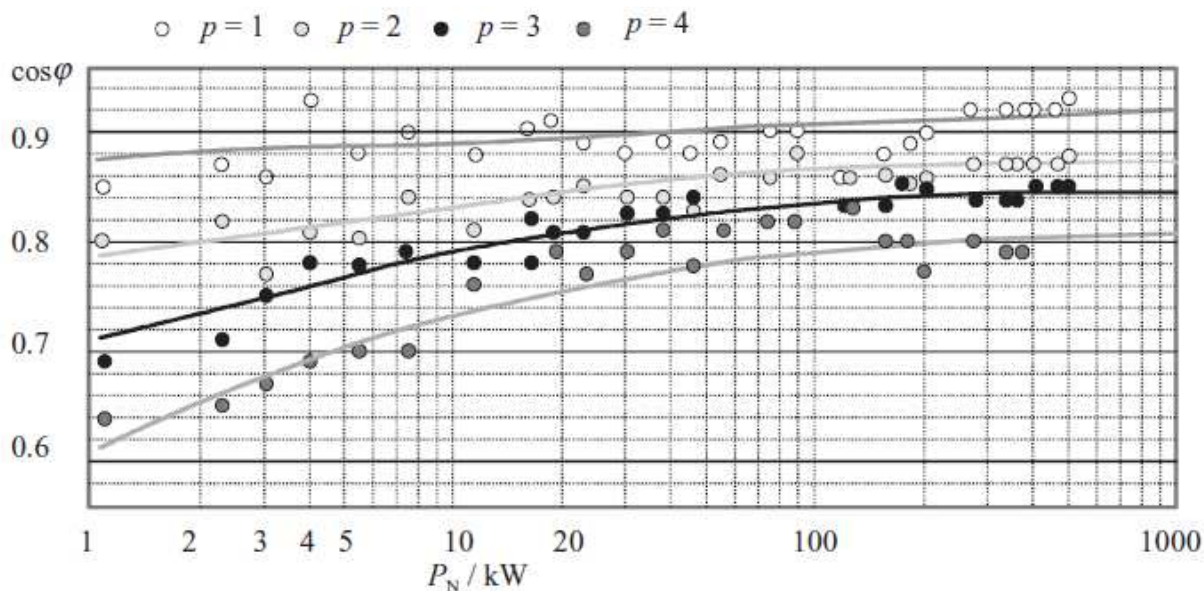
Šířka zubu rotoru:

$$b_{dr} = \frac{\dot{I} \cdot \tau_{ur}}{k_{Fe} \cdot (l_s - n_v \cdot b_v)} \cdot \frac{B_\delta}{B_{ds}} + 0,01 \cdot 10^{-3} = \frac{0,83 \cdot 0,02535}{0,97 \cdot (0,826 - 0 \cdot 0)} \cdot \frac{0,93}{1,52} + 0,01 \cdot 10^{-3} = 21,37mm$$

Předpokládaný účinník:

$$\cos\varphi = 0,84$$

Zvoleno dle Obr. č. 2.3



Obr. č. 2.3 Účinník asynchronních strojů, převzato z [1]

Předpokládaná účinnost:

$$\eta = 95\%$$

Dle [1]

Statorový proud:

$$I_S = \frac{P}{m \cdot \eta \cdot U_f \cdot \cos\varphi} = \frac{10^6}{3 \cdot 0,95 \cdot \frac{690}{\sqrt{3}} \cdot 0,84} = 1048,55A$$

Rotorový proud:

$$I_R = \frac{Z_{QS}}{a} \cdot \frac{Q_S}{Q_R} \cdot I_S \cdot \cos\varphi = \frac{6}{6} \cdot \frac{72}{54} \cdot 1048,55 \cdot 0,84 = 1174,38A$$

Proud v rotorovém kruhu:

$$I_{Ring} = \frac{I_R}{2 \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot p}{Q_R}\right)} = \frac{1174,38}{2 \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot 3}{54}\right)} = 3381,49A$$

Průřez satorových vodičů (předběžný):

$$S_{CS} = \frac{I_S}{a \cdot J_S} = \frac{1048,55}{6 \cdot 5} = 34,95 \text{ mm}^2$$

Průřez rotorových tyčí (předběžný):

$$S_{CR} = \frac{I_R}{J_R} = \frac{1174,38}{5} = 234,88 \text{ mm}^2$$

Průřez rotorového kruhu (předběžný):

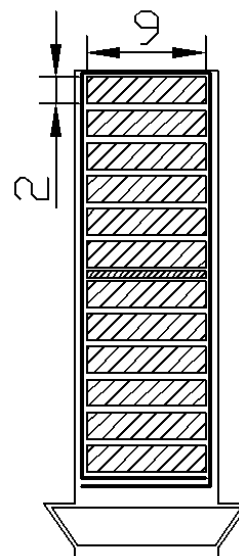
$$S_{Cring} = \frac{I_{Ring}}{J_{Ring}} = \frac{3381,49}{5,3} = 638,02 \text{ mm}^2$$

2.4 Vinutí satoru

Z tabulky průřezů jsem zvolil drát o rozměrech 2 x 9 mm, který spojením dvou paralelních drátů tvoří vodič satoru. Vinutí jsem volil dvouvrstvé a závity v sérii jsou rozloženy do čtyř cívek po třech závitech. Vinutí každé fáze je tvořeno šesti paralelními větvemi.

Šířka drážky satoru:

$$b_{us} = \tau_{us} - b_{as} = 25,35 - 14,47 = 10,88 \text{ mm}$$



Obr. č. 2.4 Drážka satoru, vlastní tvorba

Tab. 2.3 Návrh drážky satoru

Položka	Šířka b_{us}			Hloubka h_{us}		
	Velikost [mm]	Počet [-]	Součin [mm]	Velikost [mm]	Počet [-]	Součin [mm]
Holý vodič	9	1	9	2	12	24
Izolační lak	0,25	2	0,5	0,25	24	6
Vyložení drážky	0,5	2	1	0,5	3	1,5
Izolace mezi vrstvami	0,5	0	0	0,5	1	0,5
Klín + můstek	3,3+0,7	0	0	3,3+0,7	1	4
Vůle	0,38	1	0,38	1	1	1
Celkem [mm]	10,88			37		

Výběh cívky z drážky:

$$v = 20\text{mm}$$

Určeno podle napětí [2]

Výška čela cívky:

$$h_w = \frac{h_s}{2} = \frac{32,5}{2} = 16,25\text{mm}$$

Střední poloměr oka cívky:

$$R = r + \frac{h_w}{2} = 10 + \frac{16,25}{2} = 18,13\text{mm}$$

Délka oka cívky:

$$o = \frac{\pi \cdot R}{2} = \frac{\pi \cdot 18,13}{2} = 28,5\text{mm}$$

Vzdálenost mezi čely „c“:

$$c = 4 + \frac{U [\text{kV}]}{2} = 4 + \frac{0,69}{2} = 4,3\text{mm}$$

Sinus úhlu čel:

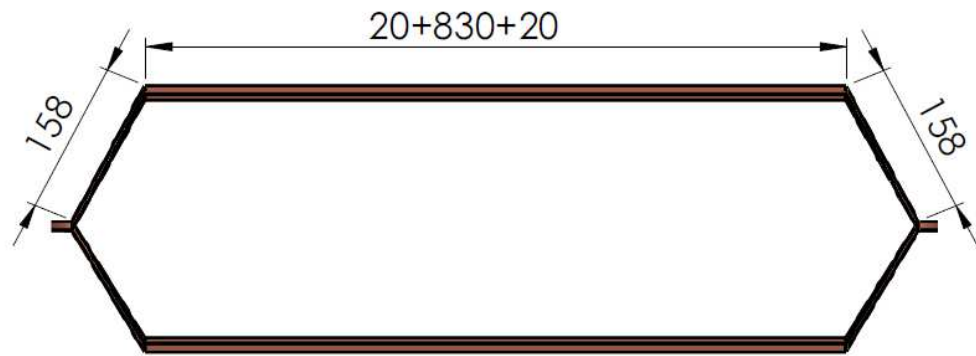
$$\sin\alpha_w = \frac{b_w + c}{\tau_{us}} = \frac{10,88 + 4,3}{25,35} = 0,59 \Rightarrow \sin\alpha_w = 36,8^\circ$$

Délka čela:

$$x = \frac{\beta \cdot \tau_p}{2 \cdot \cos\alpha_w} = \frac{\frac{5}{6} \cdot 304}{2 \cdot \cos 36,8} = 158\text{mm}$$

Délka závitu:

$$l_t = 2(l_s + 2v + 2l_w + o) = 2 \cdot (830 + 2 \cdot 20 + 2 \cdot 158 + 28,5) = 2429\text{mm}$$



Obr. č. 2.5 Cívka statoru, vlastní tvorba

Odpor jedné fáze, 20°C (bez skinefektu):

$$R_{1f20^{\circ}\text{C}} = \frac{\rho_{\text{Cu}} \cdot l_t \cdot N_s}{a \cdot S_{\text{CuS}}} = \frac{0,0178 \cdot 2,429 \cdot 12}{6 \cdot 34,95} = 2,47\text{m}\Omega$$

Náhradní výška vodiče:

$$\xi = 2 \cdot \pi \cdot h_v \sqrt{\frac{j \cdot b_v \cdot f \cdot 10^{-7}}{b_{\text{us}} \cdot \rho_{\text{Cu}}}} = 2 \cdot \pi \cdot 2 \sqrt{\frac{1 \cdot 9 \cdot 50 \cdot 10^{-7}}{10,88 \cdot 0,0178}} = 0,1912$$

j ...počet vodičů v drážce na šířku

Činitel zvýšení elektrického odporu:

$$k_{\text{Cu}} = \frac{g^2 - 0,2}{9} \cdot \xi^4 = \frac{12^2 - 0,2}{9} \cdot 0,1912^4 = 0,0214$$

Odpor jedné fáze statorového vinutí:

$$R_{1f20^{\circ}\text{C}} = R_{1f20^{\circ}\text{C}} \cdot (1 + k_{\text{Cu}}) = 2,47 \cdot (1 + 0,0214) = 2,52\text{m}\Omega$$

Odpor jedné fáze statorového vinutí při referenční teplotě:

$$R_{1f75^{\circ}\text{C}} = R_{1f20^{\circ}\text{C}} \cdot 1,22 = 2,52 \cdot 1,22 = 3,08\text{m}\Omega$$

Poměrná hodnota úbytku na odporu statoru:

$$u_{R\%} = \frac{R_{1f75^{\circ}\text{C}} \cdot I_1}{U_f} = \frac{2,63 \cdot 10^{-3} \cdot 1048,55}{398,37} = 0,81\%$$

2.5 Rotorová klec

Rozměry rotorové tyče jsou znázorněny na Obr. č. 2.6.

Díky takto zvolenému tvaru rotorové tyče je zub rotoru pořád stejně široký.

Střední průměr rotorové klece:

$$D_k = D_R - h_{DR} = 577,4 - 24,5 = 522,9 \text{ mm}$$

Délka rotorové tyče:

$$l_t = l_s = 830 \text{ mm}$$

Průřez rotorového kruhu (zvolený):

$$S_{Cring} = 750 \text{ mm}^2 \text{ viz Obr. 3.6}$$

Proudová hustota rotorového kruhu:

$$J_{Ring} = \frac{I_{Ring}}{S_{Cring}} = \frac{3381,49}{750} = 4,51 \frac{\text{A}}{\text{mm}^2}$$

Průřez rotorové tyče:

$$\begin{aligned} S_{CR} &= h_{DR} \cdot b_2 + 0,5 \cdot (b_1 - b_2) \cdot h_{DR} \\ &= 9 \cdot 22,5 + 0,5 \cdot (12 - 9,5) \cdot 22,5 \\ &= 241,88 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Proudová hustota rotorové tyče:

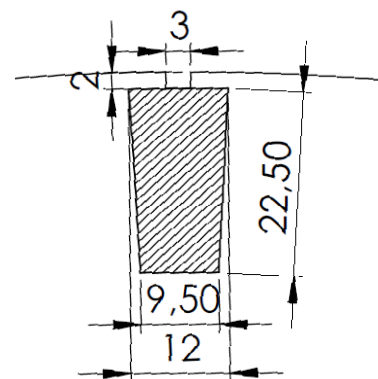
$$J_R = \frac{I_R}{S_{CR}} = \frac{1174,38}{241,88} = 4,86 \frac{\text{A}}{\text{mm}^2}$$

Odpor rotorové tyče (75°C):

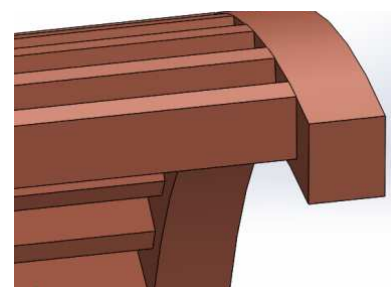
$$R_{Rb75} = 1,22 \rho_{Cu} \cdot \frac{l_t}{S_{CR}} = 1,22 \cdot \frac{1}{56} \cdot \frac{0,83}{241,88} = 0,0748 \text{ m}\Omega$$

Odpor rotorového kruhu (75°C)

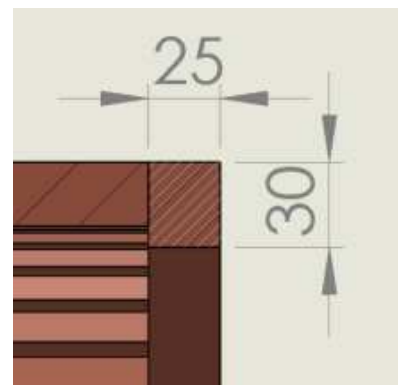
$$R_{Rring75} = 1,22 \rho_{Cu} \cdot \frac{\pi \cdot D_k}{S_{Cring}} = 1,22 \cdot \frac{1}{56} \cdot \frac{\pi \cdot 0,5229}{750} = 0,0505 \text{ m}\Omega$$



Obr. č. 2.6 Drážka rotoru, vlastní tvorba



Obr. č. 2.7 Klec rotoru, vlastní tvorba



Obr. č. 2.8 Rotorový kruh, vlastní tvorba

2.6 Rozměry zubů statoru

Šířka zubu statoru (nejužší):

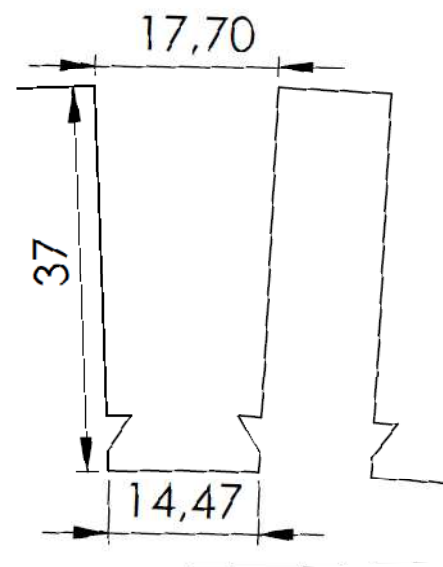
$$b_{ds} = 14,47 \text{ mm}$$

Šířka zubu statoru (střed):

$$b_{ds2} = \frac{\pi(D_s + h_s)}{Q_s} = \frac{\pi(581 + 37)}{72} = 16,09 \text{ mm}$$

Šířka zubu statoru (nejširší):

$$b_{ds3} = \frac{\pi(D_s + 2h_s)}{Q_s} = \frac{\pi(581 + 2 \cdot 37)}{72} = 17,70 \text{ mm}$$



Obr. č. 2.9 Zub statoru,
vlastní tvorba

2.7 Cartérův činitel

Faktor respektující otevření statorové drážky:

$$K_s = \frac{2}{\pi} \cdot \left(\arctan \frac{b_{1s}}{2\delta} - \frac{2\delta}{b_1} \cdot \ln \sqrt{1 + \left(\frac{b_{1s}}{2\delta} \right)^2} \right)$$

$$= \frac{2}{\pi} \cdot \left(\arctan \frac{10,88}{2 \cdot 1,8} - \frac{2 \cdot 1,8}{10,88} \cdot \ln \sqrt{1 + \left(\frac{10,88}{2 \cdot 1,8} \right)^2} \right) = 0,55$$

Cartérův činitel statoru:

$$K_{CS} = \frac{\tau_{us}}{\tau_{us} - K_s \cdot b_{1s}} = \frac{25,35}{25,35 \cdot 0,55 \cdot 10,88} = 1,31$$

Ekvivalentní vzduchová mezera (vlivem statoru):

$$\delta_{ES} = K_{CS} \cdot \delta = 1,31 \cdot 1,8 = 2,34 \text{ mm}$$

Faktor respektující otevření rotorové drážky:

$$K_r = \frac{2}{\pi} \cdot \left(\arctan \frac{b_{1r}}{2\delta_{ES}} - \frac{2\delta_{ES}}{b_1} \cdot \ln \sqrt{1 + \left(\frac{b_{1r}}{2\delta_{ES}} \right)^2} \right)$$

$$= \frac{2}{\pi} \cdot \left(\arctan \frac{3}{2 \cdot 2,34} - \frac{2 \cdot 2,34}{3} \cdot \ln \sqrt{1 + \left(\frac{3}{2 \cdot 2,34} \right)^2} \right) = 0,192$$

Cartéřův činitel rotoru:

$$K_{CR} = \frac{\tau_{ur}}{\tau_{ur} - K_r \cdot b_{1r}} = \frac{33,59}{33,59 - 0,192 \cdot 3} = 1,017$$

Ekvivalentní vzduchová mezera (vlivem rotoru):

$$\delta_E = K_{CR} \cdot \delta_{ES} = 1,017 \cdot 2,34 = 2,38 \text{ mm}$$

2.8 Výpočty magnetických indukcí a magnetických napětí

Magnetické napětí ve vzduchové mezeře:

$$\bar{U}_{m\delta E} = \frac{\bar{B}_\delta}{\mu_0} \cdot \delta_E = \frac{0,93}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \cdot 2,38 \cdot 10^{-3} = 1761,37 \text{ A}$$

Zdánlivá magnetická indukce v zubu statoru (nejušší, střed, nejširší):

$$B'_{ds1} = \frac{l' \cdot \tau_{us} \cdot B_\delta}{k_{Fe} \cdot l \cdot (b_{ds1} - 0,01)} = \frac{830 \cdot 25,35 \cdot 0,93}{0,97 \cdot 826,4 \cdot (14,47 - 0,01)} = 1,699 \text{ T}$$

$$B'_{ds2} = \frac{l' \cdot \tau_{us} \cdot B_\delta}{k_{Fe} \cdot l \cdot (b_{ds2} - 0,01)} = \frac{830 \cdot 25,35 \cdot 0,93}{0,97 \cdot 826,4 \cdot (16,09 - 0,01)} = 1,527 \text{ T}$$

$$B'_{ds3} = \frac{l' \cdot \tau_{us} \cdot B_\delta}{k_{Fe} \cdot l \cdot (b_{ds3} - 0,01)} = \frac{830 \cdot 25,35 \cdot 0,93}{0,97 \cdot 826,4 \cdot (17,70 - 0,01)} = 1,387 \text{ T}$$

Koeficient k_Z pro určení skutečné indukce v zubu statoru (nejušší, střed, nejširší):

$$k_{Z1} = \frac{\tau_{us1}}{b_{d1} \cdot k_{Fe}} - 1 = \frac{25,35}{14,47 \cdot 0,97} - 1 = 0,806$$

$$k_{Z2} = \frac{\tau_{us2}}{b_{d2} \cdot k_{Fe}} - 1 = \frac{26,97}{16,09 \cdot 0,97} - 1 = 0,728$$

$$k_{Z3} = \frac{\tau_{us3}}{b_{d2} \cdot k_{Fe}} - 1 = \frac{28,58}{17,70 \cdot 0,97} - 1 = 0,665$$

Skutečná magnetická indukce v zubu statoru (nejušší, střed, nejširší):

Použit monogram pro určování skutečné indukce v zubu. [2]

$$B_{ds1} = 1,68 \text{ T}$$

$$B_{ds2} = 1,52 \text{ T}$$

$$B_{ds3} = 1,39 \text{ T}$$

Magnetická intenzita v zubu statoru (nejušší, střed, nejširší):

Odečteno z B-H charakteristiky zvoleného materiálu M350 50A.

$$H_{ds1} = 5484 \frac{A}{m}$$

$$H_{ds2} = 1759,7 \frac{A}{m}$$

$$H_{ds3} = 428,0 \frac{A}{m}$$

Grade EN	Thickness (mm)	Peak magnetic field strength A/m at 50Hz and peak magnetic polarization J/T of:																	
		0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	1.50	1.60	1.70	1.80
M350-50A	0.50	34.8	46.0	53.7	60.6	67.4	74.6	82.6	91.8	103	119	141	178	250	455	1180	3020	6100	10700

Obr. č. 2.10 B-H charakteristika materiálu M350 50A, převzato z [1]

Střední magnetická intenzita zubu statoru:

$$H_{ds} = \frac{H_{ds1} + 4H_{ds2} + H_{ds3}}{6} = \frac{5484 + 4 \cdot 1759,7 + 428}{6} = 2158,5 \frac{A}{m}$$

Magnetické napětí zubu statoru:

$$\bar{U}_{Mds} = h_{ds} \cdot H_{ds} = 0,037 \cdot 2158,5 = 79,9A$$

Zdánlivá magnetická indukce v zubu rotoru:

$$B'_{dr} = \frac{l' \cdot \tau_{ur} \cdot B_{\delta}}{k_{Fe} \cdot l \cdot (b_{dr} - 0,01)} = \frac{830 \cdot 33,36 \cdot 0,93}{0,97 \cdot 826,4 \cdot (21,31 - 0,01)} = 1,51T$$

Koeficient k_Z pro určení skutečné indukce v zubu rotoru:

$$k_{Z1} = \frac{\tau_{ur}}{b_{dr} \cdot k_{Fe}} - 1 = \frac{33,36}{21,31 \cdot 0,97} - 1 = 0,609$$

Skutečná magnetická indukce v zubu rotoru:

Použit monogram pro určování skutečné indukce v zubu. [2]

$$B_{dr} = 1,5T$$

Magnetické napětí v zubu rotoru:

Odečteno z B-H charakteristiky zvoleného materiálu M350 50A. [1], Obr č. 2.10.

$$H_{dr} = 1180 \frac{A}{m}$$

Magnetické napětí zubu rotoru:

$$\bar{U}_{Mdr} = h_{dr} \cdot H_{dr} = 0,0245 \cdot 1180 = 28,9A$$

Saturační faktor:

$$k_{SAT} = \frac{\bar{U}_{Mds} + \bar{U}_{Mdr}}{\bar{U}_{M\delta}} = \frac{79,9 + 28,9}{1761,37} = 0,0618$$

Koeficient aritmetického průměru magnetické indukce (jeho zpětné ověření):

$$\alpha_i = \frac{1,24 \cdot k_{SAT} + 1}{1,42 \cdot k_{SAT} + 1,57} = \frac{1,24 \cdot 0,0618 + 1}{1,42 \cdot 0,0618 + 1,57} = 0,65$$

Výška statorového jha:

$$h_{ys} = \frac{\alpha_i \cdot B_{\delta} \cdot \tau_p \cdot l'}{2 \cdot k_{Fe} \cdot l \cdot B_{ys}} = \frac{0,65 \cdot 0,93 \cdot 0,3042 \cdot 830}{2 \cdot 0,97 \cdot 826,4 \cdot 1,4} = 68mm$$

Bys... zvoleno dle doporučených hodnot [1]

Vnější statorový průměr:

$$D_{se} = D_s + 2(h_{ds} + h_{ys}) = 581 + 2(37 + 68) = 791mm$$

Výška rotorového jha:

$$h_{yr} = \frac{\alpha_i \cdot B_{\delta} \cdot \tau_p \cdot l'}{2 \cdot k_{Fe} \cdot l \cdot B_{yr}} = \frac{0,65 \cdot 0,93 \cdot 0,3042 \cdot 830}{2 \cdot 0,97 \cdot 826,4 \cdot 1,4} = 68mm$$

Byr... zvoleno dle doporučených hodnot [1]

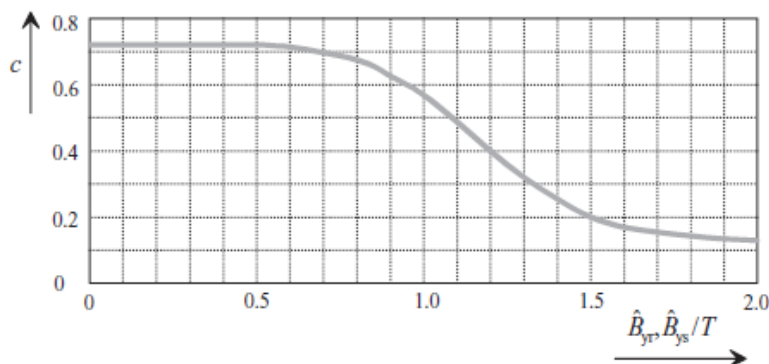
Vnitřní rotorový průměr:

$$D_{ri} = D_r - 2(h_{dr} + h_{yr}) = 577,4 - 2(24,5 + 68) = 392mm$$

Magnetické napětí statorového jha:

$$\begin{aligned} U_{Mys} &= c \cdot H_{ys} \cdot \tau_{ys} = c \cdot H_{ys} \cdot \frac{\pi \cdot (D_s + 2 \cdot h_{ds} + h_{ys})}{2p} \\ &= 0,27 \cdot 455 \cdot \frac{\pi \cdot (0,581 + 2 \cdot 0,037 + 0,068)}{6} = 46,51A \end{aligned}$$

Kde c je koeficient respektující nelineární rozložení magnetické intenzity ve jhu.



Obr. č. 2.11 Vliv nelineárního rozložení magnetické intenzity ve jhu, převzato [1].

Magnetické napětí rotorového jha:

$$\begin{aligned}
 U_{Myr} &= c \cdot H_{yr} \cdot \tau_{yr} = c \cdot H_{yr} \cdot \frac{\pi \cdot (D_R - 2 \cdot h_{dr} - h_{yr})}{2p} \\
 &= 0,27 \cdot 455 \cdot \frac{\pi \cdot (0,5774 - 2 \cdot 0,0245 - 0,068)}{6} = 28,33A
 \end{aligned}$$

Magnetizační proud statoru:

$$I_{Smag} = \frac{\sum U_m \cdot \pi \cdot p}{m \cdot k_w \cdot N_s \cdot \sqrt{2}} = \frac{(1761,37 + 79,9 + 28,9 + 46,51 + 28,33) \cdot \pi \cdot 3}{3 \cdot 0,925 \cdot 12 \cdot \sqrt{2}} = 389A$$

2.9 Ztráty stroje

Ztráty v mědi statoru:

$$\Delta P_{Cus} = m \cdot I_s^2 \cdot R_{1f75} = 3 \cdot 1048,55^2 \cdot 3,08 \cdot 10^{-3} = 10\,159W$$

Hmotnost zubů statoru:

$$\begin{aligned}
 m_{Feds} &= Q_s \cdot b_{ds2} \cdot h_{ds} \cdot l \cdot k_{Fe} \cdot \rho_{Fe} = 72 \cdot 0,01609 \cdot 0,037 \cdot 0,830 \cdot 0,97 \cdot 7800 \\
 &= 269,2kg
 \end{aligned}$$

Ztráty v železe statorových zubů:

$$\Delta P_{Feds} = \Delta p_{11T} \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^{1,4} \cdot k_{dz} \cdot B_{ds2}^2 \cdot m_{Feds} = 1,39 \cdot \left(\frac{50}{50}\right)^{1,4} \cdot 1,8 \cdot 1,52^2 \cdot 269,2 = 1556W$$

Hmotnost statorového jha:

$$m_{Feys} = \rho_{Fe} \cdot k_{Fe} \cdot l \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (D_{se}^2 - D_{si}^2) = 7800 \cdot 0,97 \cdot 0,83 \cdot (0,791^2 - 0,655^2) = 1005kg$$

Ztráty v železe statorového jha:

$$\Delta P_{Feys} = \Delta p_{11T} \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^{1,4} \cdot k_{dy} \cdot B_{ys}^2 \cdot m_{Feys} = 1,39 \cdot \left(\frac{50}{50}\right)^{1,4} \cdot 1,6 \cdot 1,4^2 \cdot 1005 = 4381W$$

Ztráty v mědi rotoru - tyče:

$$\Delta P_{CuRB75} = Q_R \cdot R_{RB75} \cdot I_R^2 = 54 \cdot 74,8 \cdot 10^{-6} \cdot 1174,38^2 = 5571W$$

Ztráty v mědi rotoru - kruhy:

$$\Delta P_{CuRR75} = 2 \cdot R_{RR75} \cdot I_{Ring}^2 = 2 \cdot 50,5 \cdot 10^{-6} \cdot 3381,49^2 = 1155W$$

Mechanické ztráty:

$$\Delta P_M = 1,3(1 - D_e) \cdot \left(\frac{n}{10}\right)^2 \cdot D_{se}^4 = 1,3(1 - 0,791) \cdot \left(\frac{985}{10}\right)^2 \cdot 0,791^4 = 1042,5W$$

Dodatečné ztráty:

$$\Delta P_d = 0,005 \cdot P_N = 0,005 \cdot 10^6 = 5\,000W$$

Amplituda pulsace indukce v zubu statoru:

$$B_{ps} = B_{ds2} \cdot \gamma_r \cdot \frac{\delta}{2 \cdot \tau_{us}} = 1,52 \cdot 1 \cdot \frac{1,8}{2 \cdot 25,35} = 0,054T$$

γ_r ...koeficient respektující otevření rotorové drážky vzhledem k velikosti vzduchové mezery[4]

Pulsní ztráty v zubech statoru:

$$\begin{aligned} \Delta P_{vfds} &= 0,14 \cdot 10^{-6} \cdot (n \cdot Q_R \cdot B_{ps})^2 \cdot m_{Feds} \\ &= 0,14 \cdot 10^{-6} (985 \cdot 54 \cdot 0,054)^2 \cdot 269,2 = 311W \end{aligned}$$

Hmotnost zubů rotoru:

$$m_{Fedr} = Q_R \cdot b_{dr} \cdot h_{dr} \cdot l \cdot k_{Fe} \cdot \rho_{Fe} = 54 \cdot 0,02137 \cdot 0,0245 \cdot 0,83 \cdot 0,79 \cdot 7800 = 177,5kg$$

Amplituda pulsace indukce v zubu rotoru:

$$B_{pr} = B_{dr} \cdot \gamma_s \cdot \frac{\delta}{2 \cdot \tau_{ur}} = 1,5 \cdot 3,3 \cdot \frac{1,8}{2 \cdot 32,05} = 0,139T$$

γ_s ...koeficient respektující otevření statorové drážky vzhledem k velikosti vzduchové mezery[4]

Pulsní ztráty v zubech rotoru:

$$\begin{aligned}\Delta P_{vfd_r} &= 0,14 \cdot 10^{-6} \cdot (n \cdot Q_S \cdot B_{pr})^2 \cdot m_{Fedr} \\ &= 0,14 \cdot 10^{-6} (985 \cdot 72 \cdot 0,139)^2 \cdot 177,5 = 2415W\end{aligned}$$

Ztráty ve vinutí statoru – drážka:

$$\Delta P_{Cusd} = \frac{2 \cdot l}{l_t} \cdot \Delta P_{Cus} = 2 \cdot \frac{830}{2429} \cdot 10159 = 6943W$$

Ztráty ve vinutí statoru – čela:

$$\Delta P_{Cusw} = \frac{4 \cdot v + 4 \cdot l_w + 2 \cdot o}{l_t} \cdot \Delta P_{Cus} = 2 \cdot \frac{4 \cdot 20 + 4 \cdot 158 + 2 \cdot 28,5}{2429} \cdot 10159 = 3216W$$

Tyto ztráty jsou rozloženy v obou čelech.

Suma ztrát:

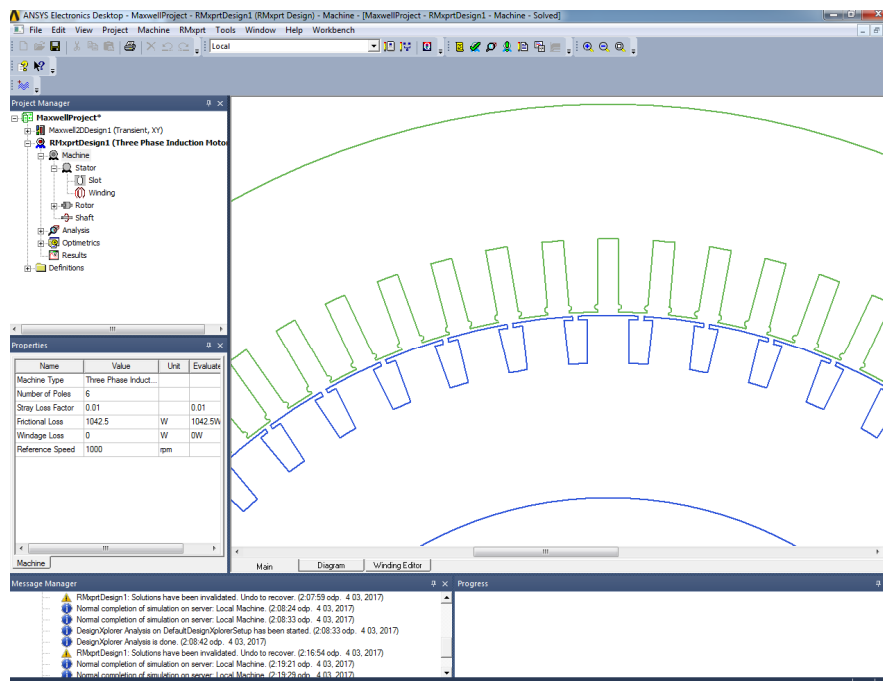
$$\begin{aligned}\sum \Delta P &= \Delta P_{Cus} + \Delta P_{Feds} + \Delta P_{Feys} + \Delta P_{CuRB75} + \Delta P_{CuR75} + \Delta P_M + \Delta P_d + \Delta P_{vfds} + \Delta P_{vfd_r} \\ &= 10159 + 1556 + 4381 + 5571 + 1155 + 1042,5 + 5000 + 311 + 2415 \\ &= 31\,590,5W\end{aligned}$$

Účinnost stroje:

$$\eta = \frac{P}{P + \sum \Delta P} \cdot 100 = \frac{10^6}{10^6 + 31590} \cdot 100 = 96,9\%$$

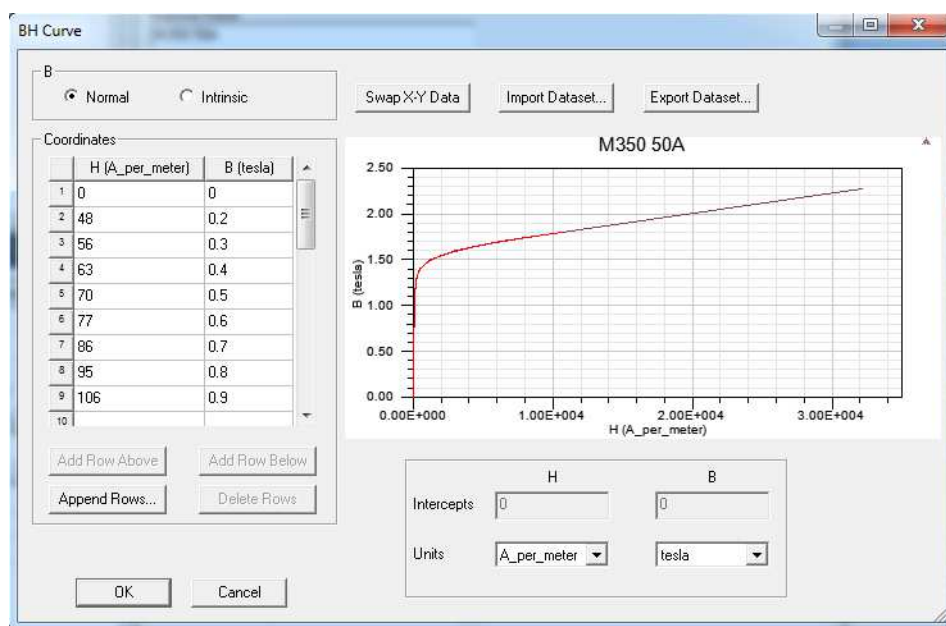
3 Ověření návrhu stroje s axiální ventilací

Ověření návrhu jsem provedl pomocí programu RMXprt. Nejprve jsem vytvořil model stroje zadáním rozměrů vypočtených v rámci elektromagnetického návrhu.



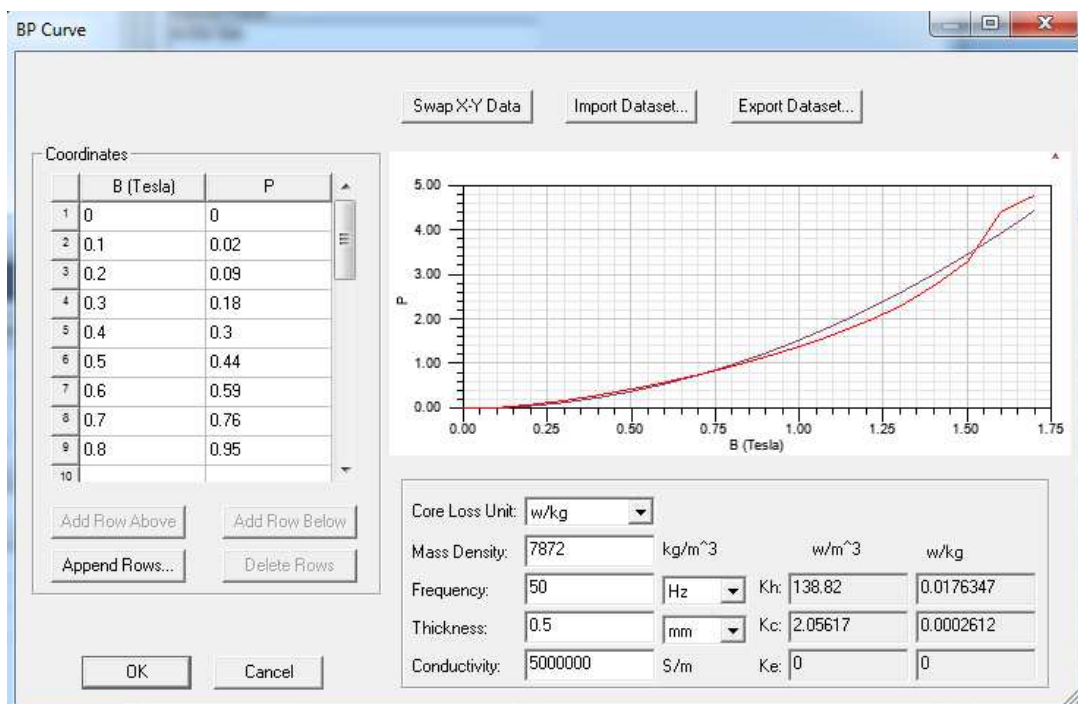
Obr. č. 3.1 Vytvoření modelu v programu RMXprt, vlastní tvorba

Dalším krokem je nastavení B-H charakteristiky použitých plechů. To se provede pomocí vyplnění tabulky, program si zadané body proloží vhodnou křivkou. Hodnoty pro použité plechy M350-50A jsou převzaty z [3].



Obr. č. 3.2 Nastavení B-H charakteristiky, vlastní tvorba

Aby program mohl vypočítat ztráty v železe, je nutné nastavit ztrátový model použitých plechů.



Obr. č. 3.3 Nastavení ztrátového modelu, vlastní tvorba

Po vypočtení program vystaví protokol o výsledcích. Z něho jsou vybrány důležité údaje a to zejména ztráty a celková účinnost stroje. Výsledky výpočtu jsou pro porovnání uvedeny v pravém sloupci.

Tab. 3.1 Ověření návrhu

Parametr	Jednotka	RMxpřt	Vypočteno
$R_{1f/75^{\circ}\text{C}}$	mΩ	2,816	3,08
I_s	A	1004,9	1048,6
ΔP_{CUS}	W	8532,3	10159
ΔP_{CUR}	W	4404,4	6726
ΔP_{Fe}	W	8974	8663
$\Sigma \Delta P$	W	32 949	31590,5
η	%	96,81	96,9
$\cos\varphi$	-	0,852	0,84

4 Elektromagnetický návrh stroje s radiální ventilací

Tento elektromagnetický návrh je neúplný, jelikož obsahuje pouze ty veličiny, které bylo nutné přepočítat. Cílem je navrhnout stroj o stejných vnějších rozměrech, se stejným počtem statorových i rotorových drážek a identickým zadáním jako u prvního stroje. Rozdíl je v rozdělení statorového a rotorového paketu na dílčí pakety, čímž vzniknou radiální ventilační kanály.

Efektivní délka stroje:

$$\hat{l} = l - (n_k \cdot t_k) = 830 - (11 \cdot 10) = 720 \text{ mm}$$

Kde: n_k zvolený počet radiálních kanálů

t_k zvolená šířka radiálních kanálů

Počet závitů v sérii:

$$N_s = \frac{\sqrt{2} \cdot 0,95 \cdot U_s}{\sqrt{3} \cdot k_{w1} \cdot l' \cdot \tau_p \cdot \alpha_i \cdot B_\delta} = \frac{\sqrt{2} \cdot 0,95 \cdot 690}{\sqrt{3} \cdot 0,925 \cdot 0,72 \cdot 0,3042 \cdot 0,65 \cdot 0,8} = 16z$$

Zkrácení efektivní délky stroje je kompenzováno navýšením počtu závitů o jeden závit na každé cívce, tudíž o čtyři závity celkem. Aby výsledek počtu závitů v sérii bylo číslo celé, magnetická indukce ve vzduchové mezeře byla upravena na hodnotu 0,8T.

Počet vodičů v drážce:

$$Z_{QS} = \frac{2 \cdot a \cdot m}{Q_S} \cdot N_s = \frac{2 \cdot 6 \cdot 3}{72} \cdot 16 = 8 \text{ (vodičů)}$$

Údaje o vinutí statoru:

$$a = 6; 2u = 2; N_C = 4; q_s = 4; Q_S = 72; m = 3; y_{1d} = 12; y_1 = 25; k_w = 0,925; Y$$

Šířka zubu statoru:

$$\begin{aligned} b_{ds1} &= \frac{l' \cdot \tau_{us}}{k_{Fe} \cdot (l_s - n_v \cdot b_v)} \cdot \frac{B_\delta}{B'_{ds}} + 0,1 \cdot 10^{-3} \\ &= \frac{0,72 \cdot 0,02535}{0,97 \cdot (830 - 11 \cdot 10)} \cdot \frac{0,8}{1,7} + 0,1 \cdot 10^{-3} = 12,35 \text{ mm} \end{aligned}$$

Proud v rotorové tyči:

$$I_R = \frac{z_{QS}}{a} \cdot \frac{Q_S}{Q_R} \cdot I_S \cdot \cos\varphi = \frac{8}{6} \cdot \frac{72}{54} \cdot 1048,55 \cdot 0,84 = 1565,8A$$

Proud v rotorovém kruhu:

$$I_{ring} = \frac{I_R}{2 \cdot \frac{\sin(\pi \cdot p)}{Q_R}} = \frac{1565,8}{2 \cdot \frac{\sin(\pi \cdot 3)}{54}} = 4508A$$

Předpokládaná šířka vodiče statoru:

$$b_S = \tau_{us} - b_{ds} - 2 \cdot t_i - 2 \cdot t_v = 25,35 - 12,35 - 2 \cdot 0,25 - 2 \cdot 0,5 = 11,5mm$$

Předpokládaný průřez vodiče statoru:

$$S_{CuS} = \frac{I_S}{a \cdot J_S} = \frac{1048,55}{6 \cdot 5} = 34,95mm^2$$

Zvolený vodič statoru:

$$b_v = 11mm$$

$$h_v = 1,6mm$$

$$S_v = 17,3mm^2$$

Tento drát bude tvořit vodič statoru ve dvou paralelních drátech o celkovém průřezu: $S_{CuS} = 34,6mm^2$

Tab. 4.1 Návrh drážky statoru

Položka	Šířka b_{us}			Hloubka h_s		
	Velikost [mm]	Počet [-]	Součin [mm]	Velikost [mm]	Počet [-]	Součin [mm]
Holý vodič	11	1	11	1,6	16	25,6
Izolační lak	0,25	2	0,5	0,25	32	8
Vyložení drážky	0,5	2	1	0,5	3	1,5
Izolace mezi vrstvami	0,5	0	0	0,5	1	0,5
Klín + můstek	3,3+0,7	0	0	3,3+0,7	1	4
Vůle	0,5	1	0,5	0,4	1	0,4
Celkem [mm]	13			40		

Proudová hustota ve statorovém vodiči:

$$J_S = \frac{I_S}{a \cdot S_{CuS}} = \frac{1048,55}{6 \cdot 34,6} = 5,05 \frac{A}{mm^2}$$

Proudová hustota ve vodiči rotoru:

$$J_R = \frac{I_R}{S_R} = \frac{1565,8}{241,88} = 6,47 \frac{A}{mm^2}$$

Proudová hustota v rotorovém kruhu:

$$J_{ring} = \frac{I_{ring}}{S_{ring}} = \frac{4508}{750} = 6,01 \frac{A}{mm^2}$$

Odpor vinutí fáze statoru ,20°C (bez skin efektu):

$$R'_{1f20} = \frac{\rho_{Cu} \cdot l_t \cdot N_s}{a \cdot S_{CuS}} = \frac{0,0178 \cdot 2,429 \cdot 16}{6 \cdot 34,6} = 3,33 m\Omega$$

Náhradní výška vodiče:

$$\xi = 2 \cdot \pi \cdot h_v \sqrt{\frac{j \cdot b_v \cdot f \cdot 10^{-7}}{b_{us} \cdot \rho_{Cu}}} = 2 \cdot \pi \cdot 1,6 \sqrt{\frac{1 \cdot 11 \cdot 50 \cdot 10^{-7}}{11,45 \cdot 0,0178}} = 0,165$$

j...počet vodičů v drážce na šířku

Činitel zvýšení elektrického odporu:

$$k_{Cu} = \frac{g^2 - 0,2}{9} \cdot \xi^4 = \frac{16^2 - 0,2}{9} \cdot 0,165^4 = 0,0211$$

Odpor jedné fáze statorového vinutí:

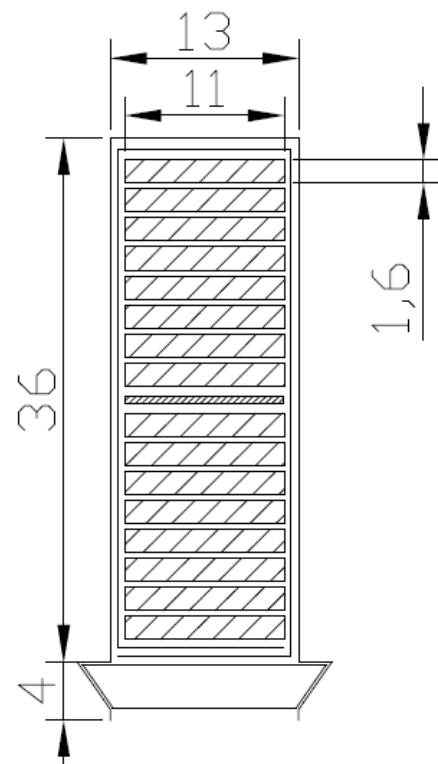
$$R_{1f20^\circ C} = R'_{1f20^\circ C} \cdot (1 + k_{Cu}) = 3,33 \cdot (1 + 0,0211) = 3,4 m\Omega$$

Odpor jedné fáze statorového vinutí při referenční teplotě:

$$R_{1f75^\circ C} = R_{1f20^\circ C} \cdot 1,22 = 3,4 \cdot 1,22 = 4,15 m\Omega$$

Poměrná hodnota úbytku na odporu statoru:

$$u_{R\%} = \frac{R_{1f75^\circ C} \cdot I_1}{U_f} \cdot 100 = \frac{4,15 \cdot 10^{-3} \cdot 1048,55}{398,37} \cdot 100 = 1,09\%$$



Obr. č. 4.1 Drážka statoru, vlastní tvorba

Šířka zubu statoru (nejúžší, střed, nejširší):

$$b_{ds} = \tau_{us} - b_{us} = \frac{\pi \cdot D_S}{Q_S} - b_{us} = \frac{\pi \cdot 0,581}{72} - 0,013 = 12,35 \text{ mm}$$

$$b_{ds2} = \tau_{us2} - b_{us} = \frac{\pi \cdot (D_S + h_d)}{Q_S} - b_{us} = \frac{\pi \cdot (0,581 + 0,04)}{72} - 0,013 = 14,10 \text{ mm}$$

$$b_{ds3} = \tau_{us3} - b_{us} = \frac{\pi \cdot (D_S + 2 \cdot h_d)}{Q_S} - b_{us} = \frac{\pi \cdot (0,581 + 2 \cdot 0,04)}{72} - 0,013 = 15,80 \text{ mm}$$

Faktor respektující otevření statorové drážky:

$$K_s = \frac{2}{\pi} \cdot \left(\arctan \frac{b_{1s}}{2\delta} - \frac{2\delta}{b_1} \cdot \ln \sqrt{1 + \left(\frac{b_{1s}}{2\delta} \right)^2} \right)$$

$$= \frac{2}{\pi} \cdot \left(\arctan \frac{13}{2 \cdot 1,8} - \frac{2 \cdot 1,8}{13} \cdot \ln \sqrt{1 + \left(\frac{13}{2 \cdot 1,8} \right)^2} \right) = 0,595$$

Cartérův faktor statoru:

$$K_{CS} = \frac{\tau_{us}}{\tau_{us} - K_s \cdot b_{1s}} = \frac{25,35}{25,35 - 0,595 \cdot 13} = 1,33$$

Ekvivalentní vzduchová mezera (vlivem statoru):

$$\delta_{ES} = K_{CS} \cdot \delta = 1,33 \cdot 1,8 = 2,39 \text{ mm}$$

Faktor respektující otevření rotorové drážky:

$$K_r = \frac{2}{\pi} \cdot \left(\arctan \frac{b_{1r}}{2\delta_{ES}} - \frac{2\delta_{ES}}{b_1} \cdot \ln \sqrt{1 + \left(\frac{b_{1r}}{2\delta_{ES}} \right)^2} \right)$$

$$= \frac{2}{\pi} \cdot \left(\arctan \frac{3}{2 \cdot 2,39} - \frac{2 \cdot 2,39}{3} \cdot \ln \sqrt{1 + \left(\frac{3}{2 \cdot 2,39} \right)^2} \right) = 0,117$$

Cartérův faktor rotoru:

$$K_{CR} = \frac{\tau_{ur}}{\tau_{ur} - K_r \cdot b_{1r}} = \frac{33,59}{33,59 - 0,117 \cdot 3} = 1,011$$

Ekvivalentní vzduchová mezera (vlivem statoru):

$$\delta_E = K_{CR} \cdot \delta_{ES} = 1,011 \cdot 2,39 = 2,42 \text{ mm}$$

Magnetické napětí ve vzduchové mezeře:

$$\bar{U}_{m\delta E} = \frac{\bar{B}_\delta}{\mu_0} \cdot \delta_E = \frac{0,8}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \cdot 2,42 \cdot 10^{-3} = 1540,62A$$

Zdánlivá magnetická indukce v zubu statoru (nejužší, střed, nejširší):

$$B'_{ds1} = \frac{l' \cdot \tau_{us} \cdot B_\delta}{k_{Fe} \cdot l \cdot (b_{ds1} - 0,01)} = \frac{720 \cdot 25,35 \cdot 0,8}{0,97 \cdot 716,4 \cdot (12,35 - 0,1)} = 1,70T$$

$$B'_{ds2} = \frac{l' \cdot \tau_{us} \cdot B_\delta}{k_{Fe} \cdot l \cdot (b_{ds2} - 0,01)} = \frac{720 \cdot 25,35 \cdot 0,8}{0,97 \cdot 716,4 \cdot (14,10 - 0,1)} = 1,50T$$

$$B'_{ds3} = \frac{l' \cdot \tau_{us} \cdot B_\delta}{k_{Fe} \cdot l \cdot (b_{ds3} - 0,01)} = \frac{720 \cdot 25,35 \cdot 0,8}{0,97 \cdot 716,4 \cdot (15,80 - 0,1)} = 1,25T$$

Koeficient k_Z pro určení skutečné indukce v zubu statoru (nejužší, střed, nejširší):

$$k_{Z1} = \frac{\tau_{us1}}{b_{d1} \cdot k_{Fe}} - 1 = \frac{25,35}{12,35 \cdot 0,97} - 1 = 1,11$$

$$k_{Z2} = \frac{\tau_{us2}}{b_{d2} \cdot k_{Fe}} - 1 = \frac{27,10}{14,1 \cdot 0,97} - 1 = 0,98$$

$$k_{Z3} = \frac{\tau_{us3}}{b_{d2} \cdot k_{Fe}} - 1 = \frac{28,84}{15,8 \cdot 0,97} - 1 = 0,88$$

Skutečná magnetická indukce v zubu statoru (nejužší, střed, nejširší):

Použit monogram pro určování skutečné indukce v zubu. [2]

$$B_{ds1} = 1,68T$$

$$B_{ds2} = 1,50T$$

$$B_{ds3} = 1,25T$$

Magnetická intenzita v zubu statoru (nejužší, střed, nejširší):

Odečteno z B-H charakteristiky zvoleného materiálu M350 50A. [1] Appendix A

$$H_{ds1} = 5484 \frac{A}{m}$$

$$H_{ds2} = 1180 \frac{A}{m}$$

$$H_{ds3} = 214 \frac{A}{m}$$

Střední magnetická intenzita zuby statoru:

$$H_{ds} = \frac{H_{ds1} + 4H_{ds2} + H_{ds3}}{6} = \frac{5484 + 4 \cdot 1180 + 214}{6} = 1736,3 \frac{A}{m}$$

Magnetické napětí zuby statoru:

$$\bar{U}_{Mds} = h_{ds} \cdot H_{ds} = 0,04 \cdot 1736,3 = 69,5A$$

Zdánlivá magnetická indukce v zubu rotoru:

$$B'_{dr} = \frac{l' \cdot \tau_{ur} \cdot B_{\delta}}{k_{Fe} \cdot l \cdot (b_{dr} - 0,01)} = \frac{720 \cdot 33,59 \cdot 0,8}{0,97 \cdot 716,4 \cdot (21,31 - 0,1)} = 1,31T$$

Koeficient k_Z pro určení skutečné indukce v zubu rotoru:

$$k_{Z1} = \frac{\tau_{ur}}{b_{dr} \cdot k_{Fe}} - 1 = \frac{33,59}{21,31 \cdot 0,97} - 1 = 0,625$$

Skutečná magnetická indukce v zubu rotoru:

Použit monogram pro určování skutečné indukce v zubu. [2]

$$B_{dr} = 1,31T$$

Magnetické napětí v zubu rotoru:

Odečteno z B-H charakteristiky zvoleného materiálu M350 50A. [1] Appendix A

$$H_{dr} = 270,5 \frac{A}{m}$$

Magnetické napětí zuby rotoru:

$$\bar{U}_{Mdr} = h_{dr} \cdot H_{dr} = 0,0245 \cdot 270,5 = 6,63A$$

Saturační faktor:

$$k_{SAT} = \frac{\bar{U}_{Mds} + \bar{U}_{Mdr}}{\bar{U}_{M\delta}} = \frac{69,5 + 6,63}{1540,62} = 0,04935$$

Koeficient aritmetického průměru magnetické indukce (jeho zpětné ověření):

$$\alpha_i = \frac{1,24 \cdot k_{SAT} + 1}{1,42 \cdot k_{SAT} + 1,57} = \frac{1,24 \cdot 0,04935 + 1}{1,42 \cdot 0,04935 + 1,57} = 0,65$$

Výška statorového jha:

$$h_{ys} = \frac{(D_{se} - D_s - 2 \cdot h_{ds})}{2} = \frac{791 - 581 - 2 \cdot 40}{2} = 65 \text{ mm}$$

Dopočteno tak, aby vnější průměr zůstal zachován.

Magnetická indukce statorového jha:

$$B_{ys} = \frac{\alpha_i \cdot B_\delta \cdot \tau_p \cdot l'}{2 \cdot k_{Fe} \cdot l \cdot h_{ys}} = \frac{0,65 \cdot 0,8 \cdot 0,3042 \cdot 720}{2 \cdot 0,97 \cdot 716,4 \cdot 0,065} = 1,26 \text{ T}$$

Magnetická intenzita statorového jha:

$$H_{ys} = 221,2 \frac{\text{A}}{\text{m}}$$

Magnetické napětí statorového jha:

$$\begin{aligned} U_{Mys} &= c \cdot H_{ys} \cdot \tau_{ys} = c \cdot H_{ys} \cdot \frac{\pi \cdot (D_s + 2 \cdot h_{ds} + h_{ys})}{2p} \\ &= 0,35 \cdot 221,2 \cdot \frac{\pi \cdot (0,581 + 2 \cdot 0,04 + 0,065)}{6} = 29,43 \text{ A} \end{aligned}$$

Magnetická indukce rotorového jha:

$$B_{yr} = \frac{\alpha_i \cdot B_\delta \cdot \tau_p \cdot l'}{2 \cdot k_{Fe} \cdot l \cdot h_{ys}} = \frac{0,65 \cdot 0,8 \cdot 0,3042 \cdot 720}{2 \cdot 0,97 \cdot 716,4 \cdot 0,068} = 1,20 \text{ T}$$

Magnetická intenzita rotorového jha:

$$H_{ys} = 178 \frac{\text{A}}{\text{m}}$$

Magnetické napětí rotorového jha:

$$\begin{aligned} U_{Mys} &= c \cdot H_{ys} \cdot \tau_{ys} = c \cdot H_{ys} \cdot \frac{\pi \cdot (D_s + 2 \cdot h_{ds} + h_{ys})}{2p} \\ &= 0,4 \cdot 178 \cdot \frac{\pi \cdot (0,581 + 2 \cdot 0,04 + 0,068)}{6} = 27,18 \text{ A} \end{aligned}$$

Magnetizační proud statoru:

$$I_{smag} = \frac{\sum U_m \cdot \pi \cdot p}{m \cdot k_w \cdot N_s \cdot \sqrt{2}} = \frac{(1540,62 + 69,50 + 6,63 + 29,43 + 27,18) \cdot \pi \cdot 3}{3 \cdot 0,925 \cdot 16 \cdot \sqrt{2}} = 251,17 \text{ A}$$

4.1 Ztráty

Ztráty v mědi statoru:

$$\Delta P_{Cus} = m \cdot I_s^2 \cdot R_{1f75} = 3 \cdot 1048,55^2 \cdot 4,15 \cdot 10^{-3} = 13610W$$

Hmotnost zubů statoru:

$$\begin{aligned} m_{Feds} &= Q_s \cdot b_{ds2} \cdot h_{ds} \cdot l \cdot k_{Fe} \cdot \rho_{Fe} = 72 \cdot 0,0141 \cdot 0,04 \cdot 0,7164 \cdot 0,97 \cdot 7800 \\ &= 220kg \end{aligned}$$

Ztráty v železe statorových zubů:

$$\Delta P_{Feds} = \Delta p_{11T} \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^{1,4} \cdot k_{dz} \cdot B_{ds2}^2 \cdot m_{Feds} = 1,39 \cdot \left(\frac{50}{50}\right)^{1,4} \cdot 1,8 \cdot 1,5^2 \cdot 220,1 = 1239W$$

Hmotnost statorového jha:

$$\begin{aligned} m_{Feys} &= \rho_{Fe} \cdot k_{Fe} \cdot l \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (D_{se}^2 - D_{si}^2) = 7800 \cdot 0,97 \cdot 0,7164 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (0,791^2 - 0,661^2) \\ &= 804kg \end{aligned}$$

Ztráty v železe statorového jha:

$$\Delta P_{Feys} = \Delta p_{11T} \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^{1,4} \cdot k_{dy} \cdot B_{ys}^2 \cdot m_{Feys} = 1,39 \cdot \left(\frac{50}{50}\right)^{1,4} \cdot 1,6 \cdot 1,46^2 \cdot 804 = 3809W$$

Ztráty v mědi rotoru - tyče:

$$\Delta P_{CuRB75} = Q_R \cdot R_{RB75} \cdot I_R^2 = 54 \cdot 74,8 \cdot 10^{-6} \cdot 1565,8^2 = 9903W$$

Ztráty v mědi rotoru - kruhy:

$$\Delta P_{CuRR75} = 2 \cdot R_{RR75} \cdot I_{Ring}^2 = 2 \cdot 50,5 \cdot 10^{-6} \cdot 4508^2 = 2053W$$

Mechanické ztráty:

$$\Delta P_M = 1,3(1 - D_e) \cdot \left(\frac{n}{10}\right)^2 \cdot D_{se}^4 = 1,3(1 - 0,791) \cdot \left(\frac{985}{10}\right)^2 \cdot 0,791^4 = 1042,5W$$

Dodatečné ztráty:

$$\Delta P_d = 0,005 \cdot P_N = 0,005 \cdot 10^6 = 5000W$$

Amplituda pulsace indukce v zubu statoru:

$$B_{ps} = B_{ds2} \cdot \gamma_r \cdot \frac{\delta}{2 \cdot \tau_{us}} = 1,5 \cdot 1 \cdot \frac{1,8}{2 \cdot 25,35} = 0,0533T$$

γ_r ...koeficient respektující otevření rotorové drážky vzhledem k velikosti vzduchové mezery[4]

Pulsní ztráty v zubech statoru:

$$\begin{aligned} \Delta P_{vfd_s} &= 0,14 \cdot 10^{-6} \cdot (n \cdot Q_R \cdot B_{ps})^2 \cdot m_{Feds} \\ &= 0,14 \cdot 10^{-6} (985 \cdot 54 \cdot 0,0533)^2 \cdot 220 = 248W \end{aligned}$$

Hmotnost zubů rotoru:

$$\begin{aligned} m_{Fedr} &= Q_R \cdot b_{dr} \cdot h_{dr} \cdot l \cdot k_{Fe} \cdot \rho_{Fe} = 54 \cdot 0,02131 \cdot 0,0244 \cdot 0,7164 \cdot 0,97 \cdot 7800 \\ &= 140kg \end{aligned}$$

Amplituda pulsace indukce v zubu rotoru:

$$B_{pr} = B_{dr} \cdot \gamma_s \cdot \frac{\delta}{2 \cdot \tau_{ur}} = 1,31 \cdot 3,3 \cdot \frac{1,8}{2 \cdot 32,05} = 0,1056T$$

γ_s ...koeficient respektující otevření statorové drážky vzhledem k velikosti vzduchové mezery[4]

Pulsní ztráty v zubech rotoru:

$$\begin{aligned} \Delta P_{vfd_r} &= 0,14 \cdot 10^{-6} \cdot (n \cdot Q_S \cdot B_{pr})^2 \cdot m_{Fedr} \\ &= 0,14 \cdot 10^{-6} (985 \cdot 72 \cdot 0,1056)^2 \cdot 140 = 1099W \end{aligned}$$

Ztráty ve vinutí statoru – drážka:

$$\Delta P_{cusd} = \frac{2 \cdot l}{l_t} \cdot \Delta P_{cus} = 2 \cdot \frac{830}{2429} \cdot 13610 = 9301W$$

Ztráty ve vinutí statoru – čela:

$$\Delta P_{cusw} = \frac{4 \cdot v + 4 \cdot l_w + 2 \cdot o}{l_t} \cdot \Delta P_{cus} = 2 \cdot \frac{4 \cdot 20 + 4 \cdot 158 + 2 \cdot 28,5}{2429} \cdot 10159 = 4309W$$

Tyto ztráty jsou rozloženy v obou čelech.

Suma ztrát:

$$\begin{aligned}\sum \Delta P &= \Delta P_{Cus} + \Delta P_{Feds} + \Delta P_{Feys} + \Delta P_{CuRB75} + \Delta P_{CuR75} + \Delta P_M + \Delta P_d + \Delta P_{vfds} + \Delta P_{vfdr} \\ &= 13610 + 1239 + 3809 + 9903 + 2053 + 1042,5 + 5000 + 248 + 1099 \\ &= 38\,000\text{W}\end{aligned}$$

Účinnost stroje:

$$\eta = \frac{P}{P + \sum \Delta P} \cdot 100 = \frac{10^6}{10^6 + 38\,347} \cdot 100 = 96,3\%$$

5 Ověření návrhu stroje s radiální ventilací

Výsledkem výpočtu programu RMxprt jsou následující hodnoty. Pro porovnání uvádím i mnou vypočtené hodnoty.

Tab. 5.1 Ověření návrhu

Parametr	Jednotka	RMxprt	Mé výsledky
$R_{1f/75^\circ\text{C}}$	mΩ	3,594	4,150
I_s	A	955,3	1048,6
ΔP_{Cus}	W	9842	13610
ΔP_{CUR}	W	7982	11956
ΔP_{Fe}	W	6199	6395
$\Sigma \Delta P$	W	35 057	38000
η	%	96,61	96,30
$\cos\varphi$	-	0,898	0,852

6 Ventilální výpočet stroje s axiální ventilací

Stroj má být podle zadání chlazen vzduchem a to cizím zdrojem tlaku. Pro tento účel jsem zvolil průmyslový radiální ventilátor, který jednostranně ventiluje stroj. Jedná se o tlačnou ventilaci. Pro výpočet ventilace je potřeba zvolit typ ventilátoru a znát jeho parametry, dále sestavit hydraulickou síť a tu řešit iteračně pomocí výpočetního programu. Výsledkem je soubor průtoků, rychlostí a součinitelů přestupu tepla v jednotlivých úsecích. Pro tento výpočet je zhotoven program v prostředí Matlab a pro odečet ploch se využívá 3D modelu stroje v programu Solidworks.

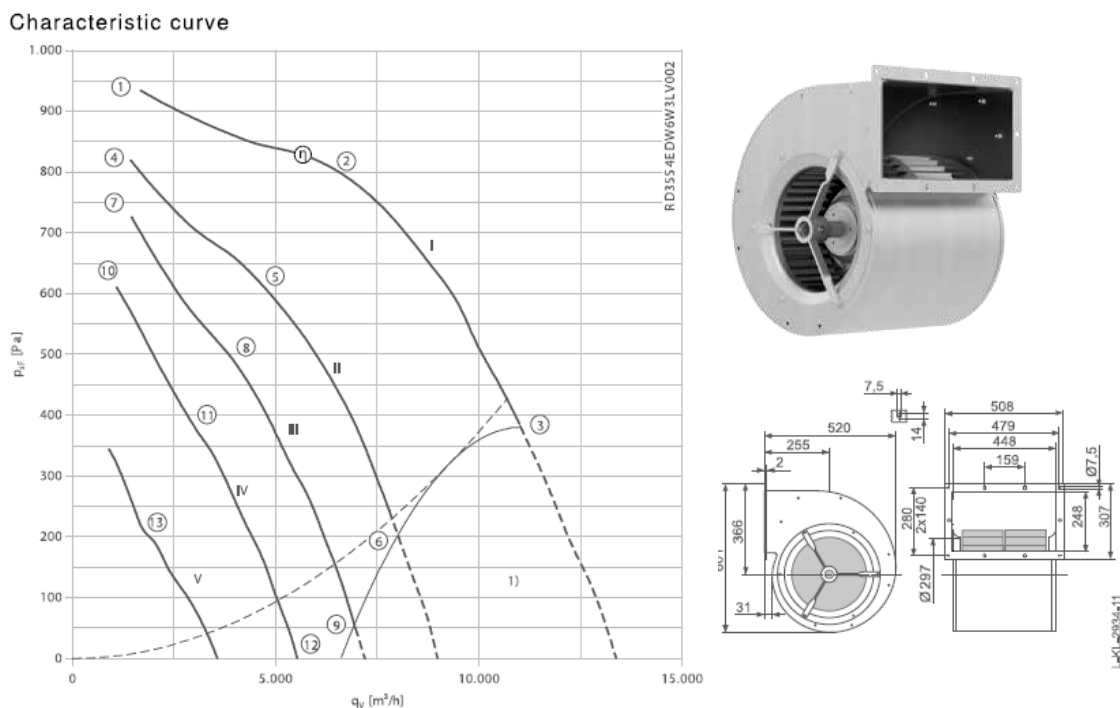
Minimální potřebné množství chladiva na odvod ztrát:

$$Q = \frac{\sum \Delta P}{c_v \cdot \Delta \vartheta} = \frac{31\,590,5}{1100 \cdot 20} = 1,44 \frac{m^3}{s}$$

Kde $\Delta \vartheta$ je zvolený rozdíl vstupní a výstupní teploty chladiva

6.1 Zvolený ventilátor

Ventilátor je od firmy ZIEHL-ABEGG typ RD35S-4D. Jeho katalogové údaje a charakteristiky jsou znázorněny na Obr. č. 6.1. Jedná se o ventilátor obsahující asynchronní motor o výkonu 5.5kW.



Obr. č. 6.1 Zvolený ventilátor, převzato z [7]

Tlaková charakteristika ventilátoru je aproximována následující funkcí:

$$H = H_0 - K \cdot Q^2$$

$$= 950 - 253 \cdot Q^2$$

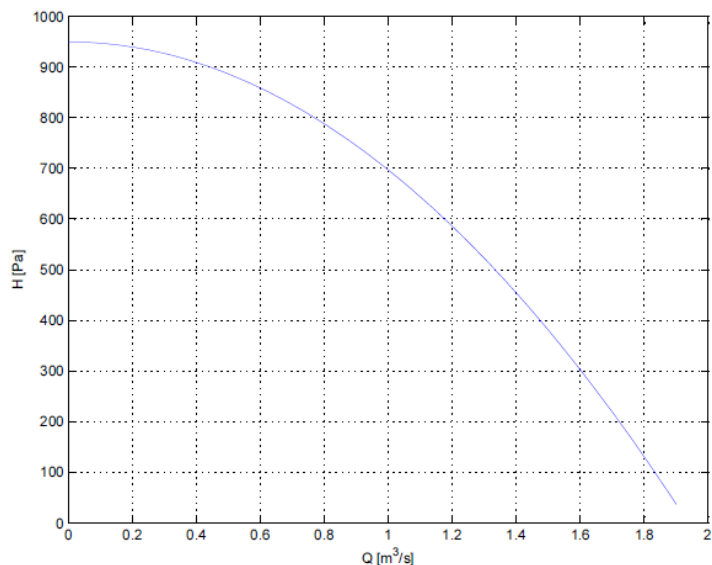
Vyplyvající údaje:

Tlak naprázdno:

$$H_0 = 950 Pa$$

Vnitřní hydraulický odpor:

$$K = 253 \frac{N \cdot s^2}{m^8}$$

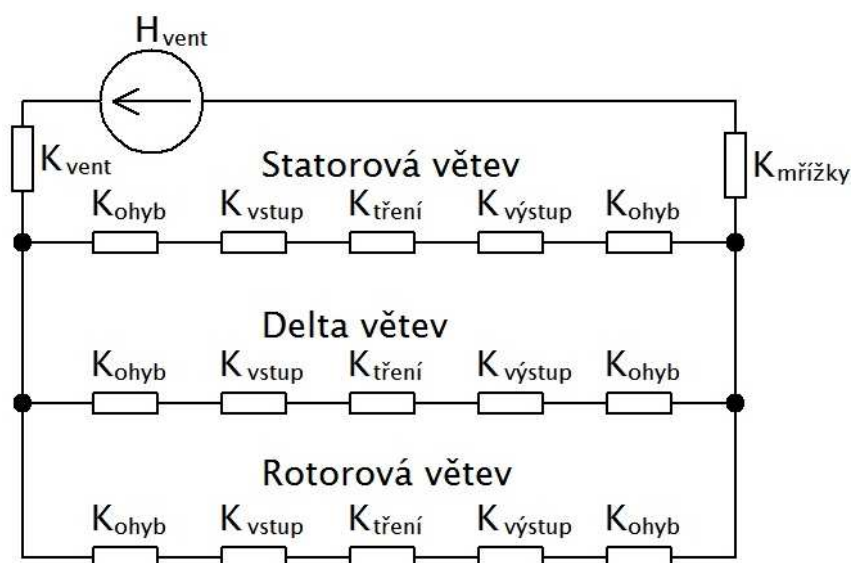


Obr. č. 6.2 Tlaková charakteristika, vlastní tvorba

6.2 Hydraulická síť axiální ventilace

Hydraulické odpory tvořící hydraulickou síť zanášejí tlakové úbytky respektující proudění chladiva strojem. Jedná se o dva druhy:

- Odpory třením
- Odpory místní



Obr. č. 6.3 Schéma axiální ventilace, vlastní tvorba

6.3 Výpočet hydraulických odporů

Zde jsou uvedeny vzorce a postupy, kterých je užito pro výpočet hydraulických odporů.

6.3.1 Hydraulický odpor třením

Hydraulický průměr kanálu:

$$D_H = \frac{4S}{O}$$

Kde „ S “ je plocha kanálu a „ O “ obvod kanálu

Reynoldsovo číslo:

$$R_e = \frac{v \cdot D_H}{\nu}$$

Kde „ v “ je střední rychlost proudění a „ ν “ viskozita vzduchu při 60°C ($1,79 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$)

Součinitel tření:

$$\lambda = \frac{0,3164}{R_e^{0,25}}$$

Hydraulický odpor třením:

$$K_{\text{tření}} = \frac{\lambda \cdot l \cdot \rho}{2 \cdot D_H \cdot A^2}$$

Kde „ ρ “ je hustota vzduchu při 60°C ($1,06 \text{ kg/m}^3$)

6.3.2 Hydraulický odpor ohybem

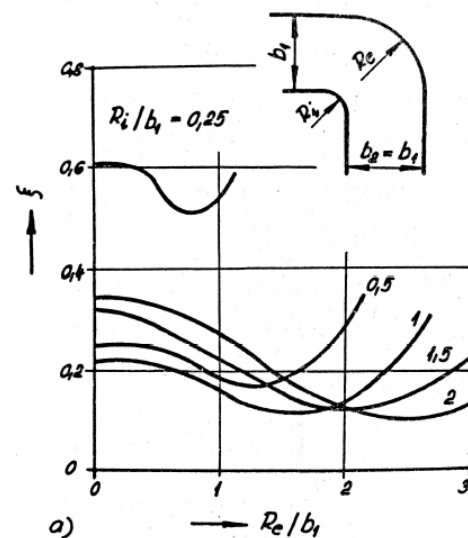
Odporový činitel ohybu ξ se vypočte podle Obr.č. 6.4.

Hydraulický odpor ohybem:

$$K_{\text{ohyb}} = \left(\frac{\rho}{2}\right) \cdot \frac{\xi}{S^2}$$

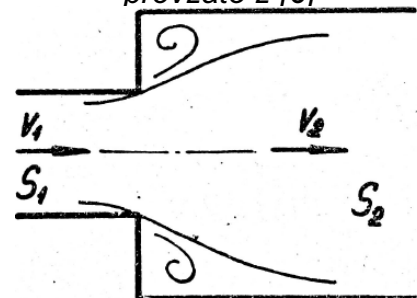
6.3.3 Hydraulický odpor rozšířením

$$K_{\text{rozšíření}} = \left(\frac{\rho}{2}\right) \cdot \left(\frac{1}{S_1} - \frac{1}{S_2}\right)^2$$



Obr. č. 6.4 Odporu ohybem,

převzato z [6]



Obr. č. 6.5 Odpor

rozšířením, převzato z [6]

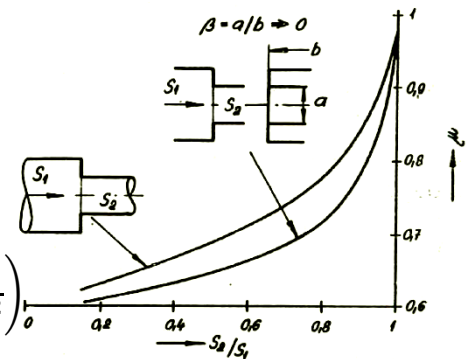
6.3.4 Hydraulický odpor zúžením

Kontrakční součinitel ξ_μ :

$$\xi_\mu = \left(\frac{1}{\mu} - 1\right)^2$$

Hydraulický odpor zúžením:

$$K_{\text{zúžení}} = \left(\frac{\rho}{2}\right) \cdot \frac{\xi_\mu}{S_2^2} + \left(\frac{\rho}{2}\right) \cdot \left(\frac{1}{S_2^2} - \frac{1}{S_1^2}\right)$$



6.3.5 Hydraulický odpor vstupem do rotujících ploch

Obr. č. 6.6 Odpor zúžením, převzato z [6]

$$K_{rot} = \left(\frac{\rho}{2}\right) \cdot \frac{\xi}{S^2}$$

Odporový činitel ξ je zde odhadnut na hodnotu 1,7.[4]

6.3.6 Hydraulický odpor výstupem z rotujících ploch

$$K_{rot2} = \left(\frac{\rho}{2}\right) \cdot \frac{\xi}{S^2}$$

Odporový činitel ξ je zde odhadnut na hodnotu 0,45.[4]

6.4 Program pro ventilační výpočet

Pro výpočet celkového množství chladiva je potřeba síť zjednodušit do jediného odporu. Toho lze dosáhnout užitím vzorců pro sériové a paralelní řazení.

Sériové řazení:

$$K = \sum_{i=1}^n K_i$$

Paralelní řazení:

$$\sqrt{\frac{1}{K}} = \sum_{i=1}^n \sqrt{\frac{1}{K_i}}$$



Obr. č. 6.7 Vývojový diagram programu pro ventilační výpočet, vlastní tvorba

Ventilační výpočet se provádí iteračně, jelikož na začátku výpočtu je potřeba určit hydraulické odpory, a některé z nich jsou závislé na rychlosti proudění. Rychlost proudění však získáváme až po vyřešení hydraulické sítě. Program tedy začíná výpočet s počáteční hodnotou a zpětným dosazováním výpočet zpřesňuje. Výsledek je považován za správný, jakmile následující iterace se od sebe liší o méně než 0,01m/s. Poté program vypočte součinitele přestupu tepla, dle následujících vzorců: [8]

- Pro oblast jha:

$$\alpha = 33\sqrt{v} - 22$$

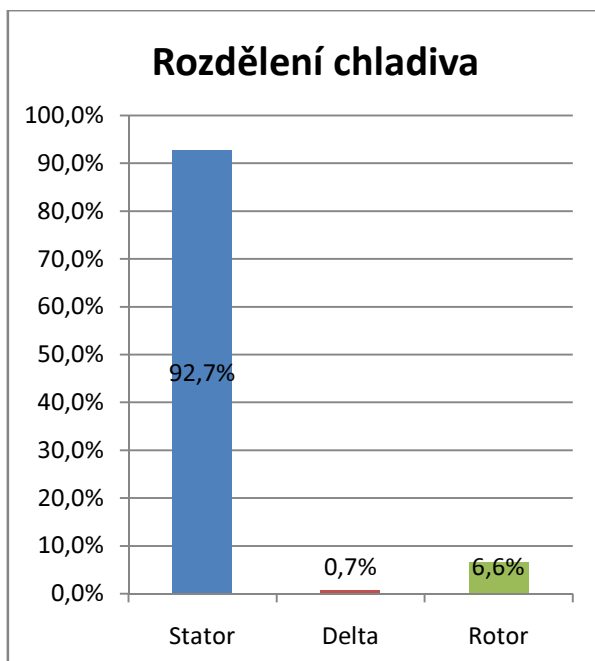
- Pro vzduchovou mezeru:

$$\alpha = 30\sqrt{w} - 20$$

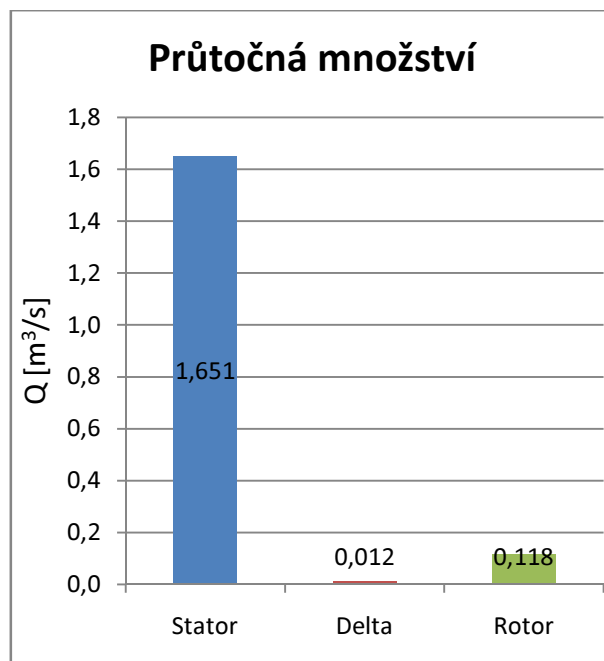
Kde „w“ je geometrický součet rychlosti chladiva v axiálním a tangenciálním směru. Rychlost v tangenciálním směru odhaduji na 75% obvodové rychlosti rotoru.

6.5 Výsledky ventilačního výpočtu axiální ventilace

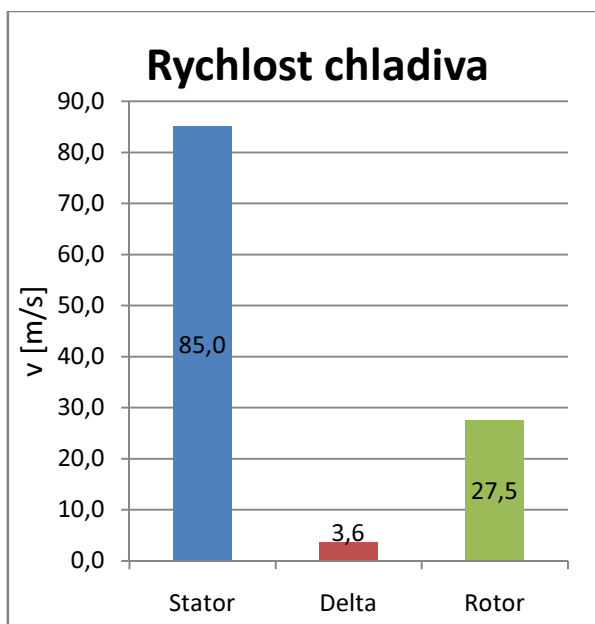
Na Obr. č. 6.8 je vidět výsledné rozdělení chladiva. Je zde vidět, že většina chladiva proudí statorovým kanálem. Podstatně menší část rotorovým kanálem a minimální část proudí vzduchovou mezerou. Celkové množství chladiva dodávaného ventilátorem je 1,78m³/s. Vydělením průtočných množství protékanou plochou dostáváme místní rychlost proudění.



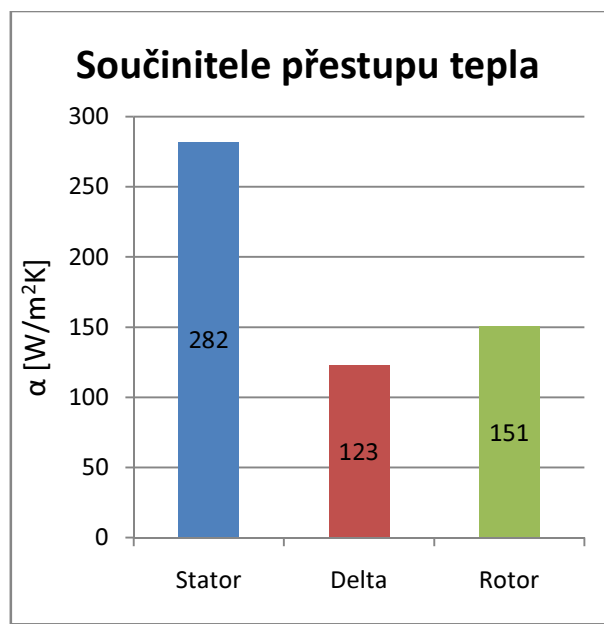
Obr. č. 6.8 Rozdělení chladiva, vlastní tvorba



Obr. č. 6.10 Průtočná množství, vlastní tvorba



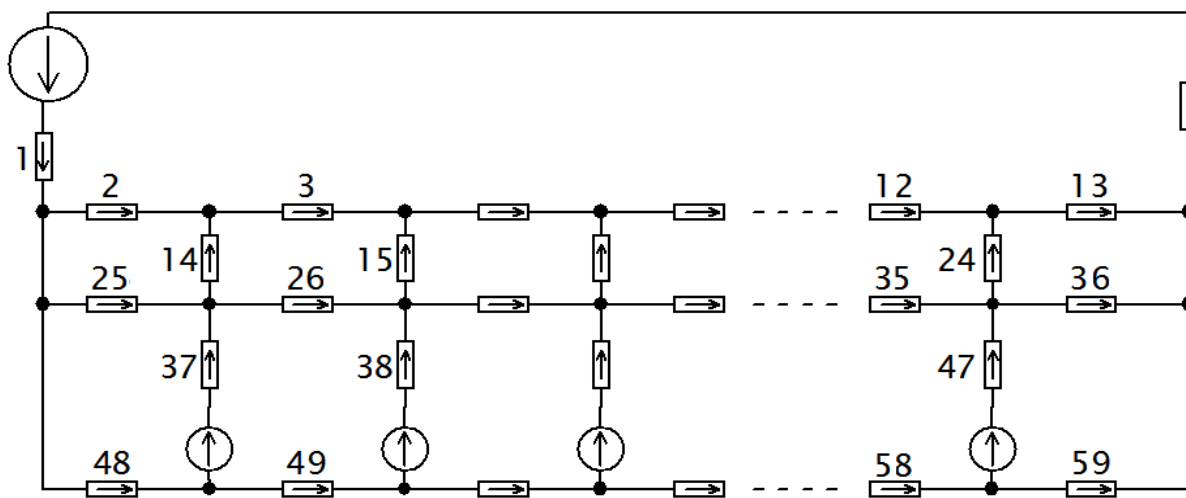
Obr. č. 6.9 Rychlost chladiva, vlastní tvorba



Obr. č. 6.11 Součinitele přestupu tepla, vlastní tvorba

7 Ventilální výpočet stroje s radiální ventilací

Pro ventilační výpočet stroje s radiální ventilací jsem použil metodu smyčkových proudů modifikovanou Atkinsonovu kvadratickému zákonu. Pro účel výpočtu jsem vytvořil program v prostředí Matlab. Nejprve bylo nutné znát ventilační vlastnosti rotorových rozpěrek, které jsou v radiálních kanálech uloženy a při běhu stroje působí jako radiální ventilátor. Schéma radiální ventilace je znázorněno na Obr. č. 7.1, šipky uvnitř odporů vyznačují směr označený za kladný.



Obr. č. 7.1 Schéma radiální ventilace, vlastní tvorba

7.1 Ukázka sestavení rovnice pro ventilační výpočet

Nejprve je nutno označit průtoky chladiva v každém okruhu. Ty jsou v mém případě značeny velkými písmeny. Poté následuje sestavení rovnic podle ukázky.

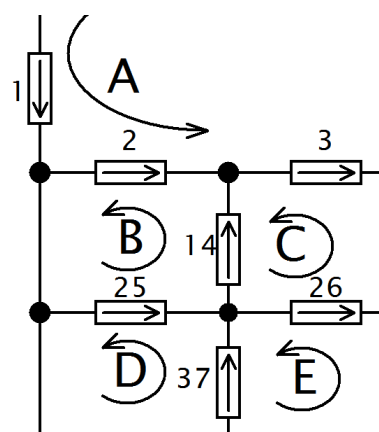
Rovnice průtoku v okruhu B: (viz Obr. č. 7.2)

$$K_{25} \cdot (Q_B^2 - Q_D^2) + K_{14} \cdot (Q_B^2 - Q_C^2) + K_2 \cdot (Q_B^2 - Q_A^2) = 0$$

Ze vzniklých rovnic úpravou vyplyne matice hydraulických odporů a pravá strana, která obsahuje zdroje tlaku. Vyřešením matice dostáváme kvadrát okruhových průtoků. Z těch lze po odmocnění vypočítat průtoky jednotlivými větvemi.

Výpočet průtoku Q_2 :

$$Q_2 = Q_A - Q_B$$



Obr. č. 7.2 Schéma pro okruh B, vlastní tvorba

7.2 Výpočet ventilačních vlastností rozpěrek rotoru

Počet lopatek ventilátoru:

$$z = Q_r = 54$$

Vnitřní průměr:

$$D_i = D_{ri} + 2 \cdot t_o = 392 + 2 \cdot 28 = 448 \text{ mm}$$

Vnější průměr:

$$D_e = D_R = 577,4 \text{ mm}$$

Šířka lopatky:

$$b = b_k = 10 \text{ mm}$$

Obvodová rychlost:

$$v = \frac{\pi \cdot n \cdot D_e}{60} = \frac{\pi \cdot 985 \cdot 0,5774}{60} = 29,8 \text{ m/s}$$

Průměrový parametr:

$$\xi = 1 - \left(\frac{D_i}{D_e}\right)^2 = 1 - \left(\frac{0,448}{0,5774}\right)^2 = 0,398$$

Šířkový parametr:

$$\gamma = \frac{b}{D_e} = \frac{0,01}{0,5774} = 0,01732$$

Tlakové číslo:

$$\begin{aligned} \Psi &= (1,042 + 0,343 \cdot \gamma - (3 + 44 \cdot \gamma) \cdot z \cdot 10^{-3}) \cdot \xi - (22,7 - 85 \cdot \gamma - 0,74 \cdot z) \cdot 10^{-2} \\ &= (1,042 + 0,343 \cdot 0,01732 - (3 + 44 \cdot 0,01732) \cdot 54 \cdot 10^{-3}) \cdot 0,398 \\ &\quad - (22,7 - 85 \cdot 0,01732 - 0,74 \cdot 54) \cdot 10^{-2} = 0,52354 \end{aligned}$$

Objemové číslo:

$$\begin{aligned} \varphi &= ((1,2 - \xi) \cdot \xi - 1,26 \cdot (0,6 - \xi) \cdot z \cdot 10^{-2} - 0,11) \cdot (3,42 \cdot \gamma + 0,13) - (1 - 0,06 \cdot z) \\ &\quad \cdot 10^{-2} \\ &= ((1,2 - 0,52324) \cdot 0,52324 - 1,26 \cdot (0,6 - 0,52324) \cdot 54 \cdot 10^{-2} - 0,11) \\ &\quad \cdot (3,42 \cdot 0,01732 + 0,13) - (1 - 0,06 \cdot 54) \cdot 10^{-2} = 0,03598 \end{aligned}$$

Tlak naprázdno:

$$H_0 = \Psi \cdot \left(\frac{1,127}{2}\right) \cdot v^2 = 0,52354 \cdot \left(\frac{1,127}{2}\right) \cdot 29,8^2 = 262 \text{ Pa}$$

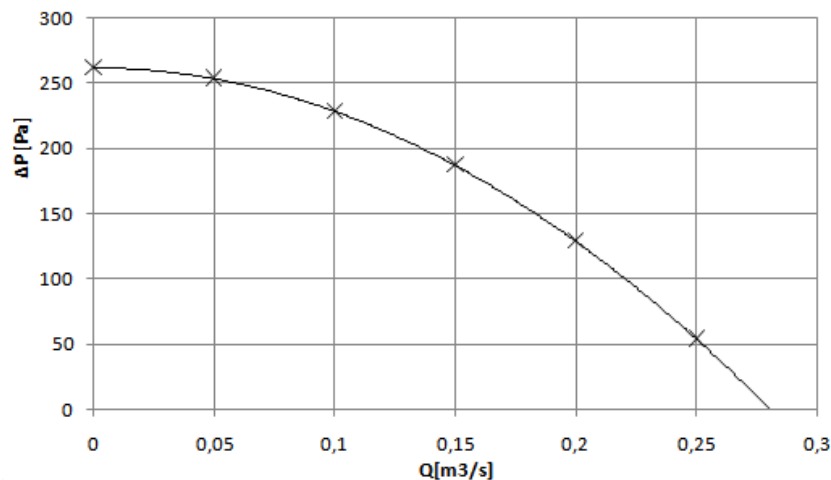
Maximální průtočné množství:

$$Q_{max} = \varphi \cdot \left(\frac{\pi}{4}\right) \cdot D_e^2 \cdot v = 0,03598 \cdot \left(\frac{\pi}{4}\right) \cdot 0,5774^2 \cdot 29,8 = 0,28 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Vnitřní hydraulický odpor ventilátoru:

$$K = \frac{H_0}{Q_{\max}^2} = \frac{262}{0,28^2} = 3324,4 \frac{Ns^2}{m^8}$$

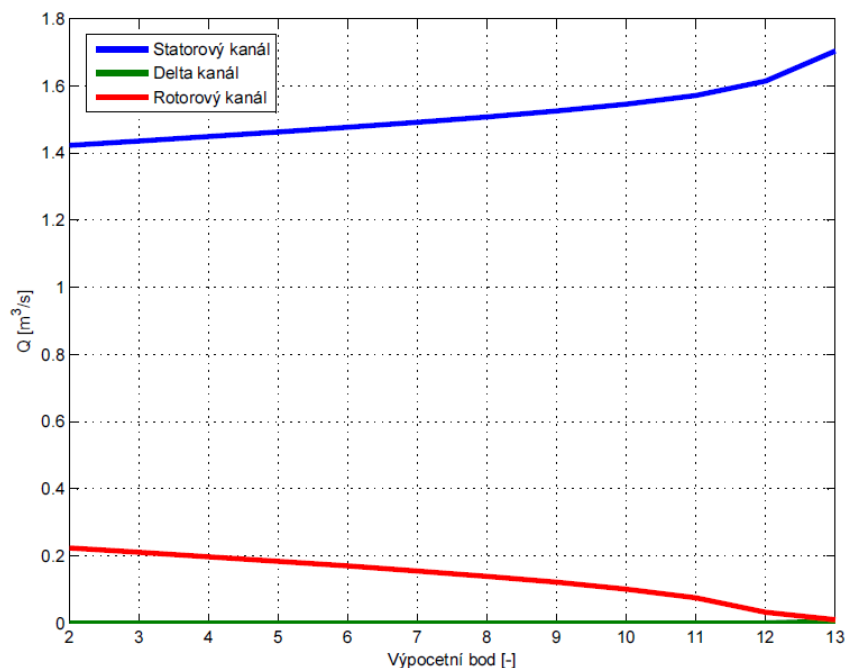
Tlaková charakteristika ventilátoru



Obr. č. 7.3 Tlaková charakteristika rotorových rozpěrek, vlastní tvorba

7.3 Výsledek výpočtu radiální ventilace

Výsledkem radiální ventilace je soubor 59 průtoků, rychlostí a součinitelů přestupu tepla z ochlazovaných ploch. Ty jsou využity pro tepelný výpočet. Z Obr. č. 7.4 je patrné, že průtok vstupující do rotorové větve se na délce stroje postupně přepouští radiálními kanály do statorové větve. Celkový průtok strojem je $1,70 \text{ m}^3/\text{s}$.

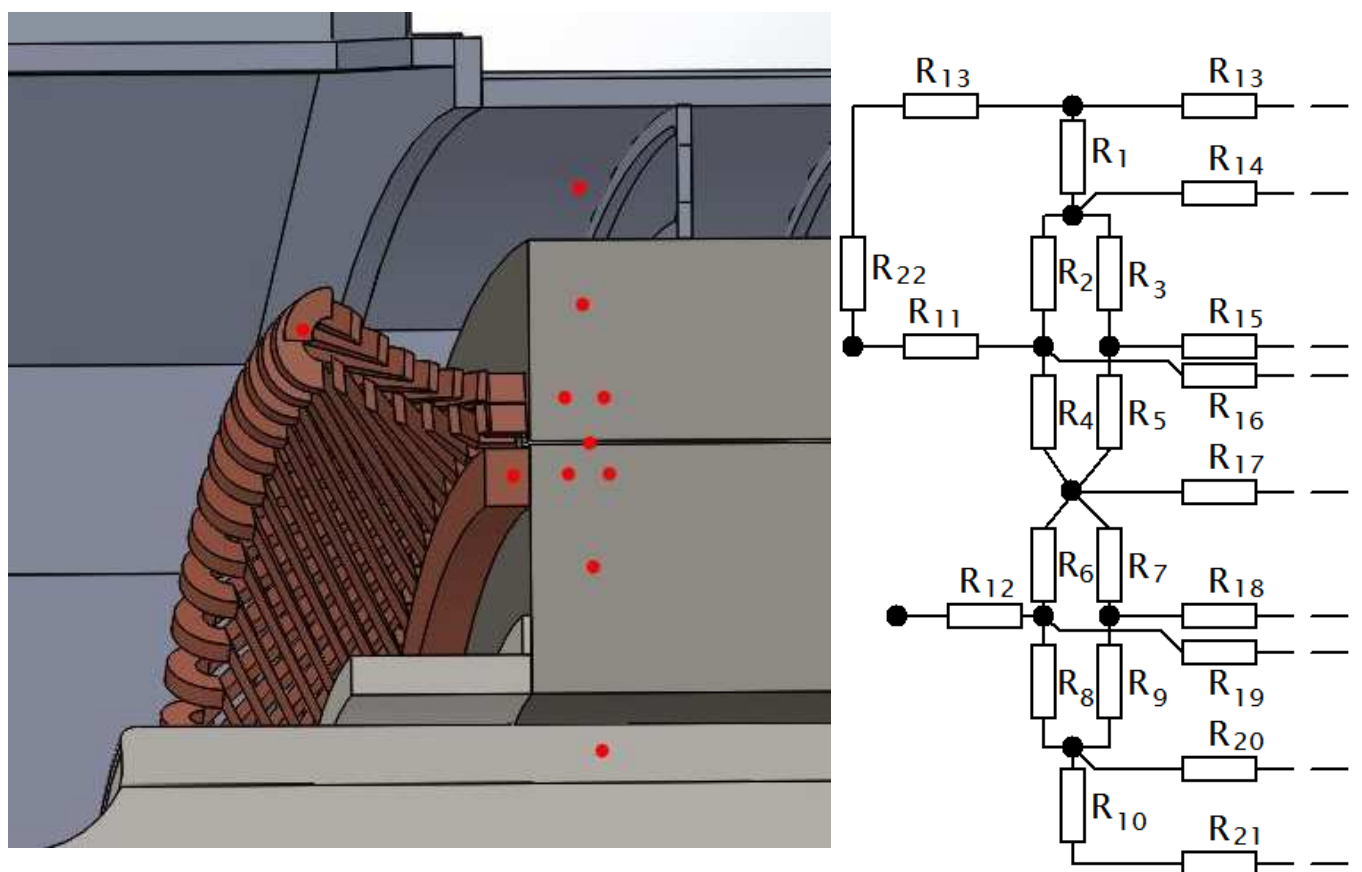


7.4 Průtočná množství, vlastní tvorba

8 Tepelný výpočet stroje s axiální ventilací

Tepelný výpočet je proveden metodou tepelné sítě při teplotě vstupního vzduchu 40°C . Výpočetní body jsou umístěny do drážky, zubu a jha statoru i rotoru, dále pak do každé chladicí větve a do čel statorového a rotorového vinutí. Pro názornost je rozložení zakresleno do Obr. č. 8.1, kde je znázorněna část stroje v osovém řezu s výpočetními body a tepelnými odpory. Toto seskupení výpočetních bodů se na délce stroje 23 krát opakuje a tvoří tak výpočetní síť stroje. Výpočetní body umístěné v chladiivu respektují jeho oteplování při proudění strojem.

Výpočetní body jsou však umístěné jen v jedné axiální rovině stroje. Teploty po obvodu stroje předpokládám stejné na celé délce stroje.



Obr. č. 8.1 Rozložení výpočetních bodů, schéma tepelné sítě, vlastní tvorba

Mezi výpočetními body jsou tepelné odpory. Tepelné odpory kondukcí závisí na rozměrech a tepelné vodivosti materiálů. Tepelné odpory konvekce pak na rozměrech a součiniteli přestupu tepla z ochlazované plochy. Výpočet tepelných odporů spolu s popisem je uveden v příloze č. I.

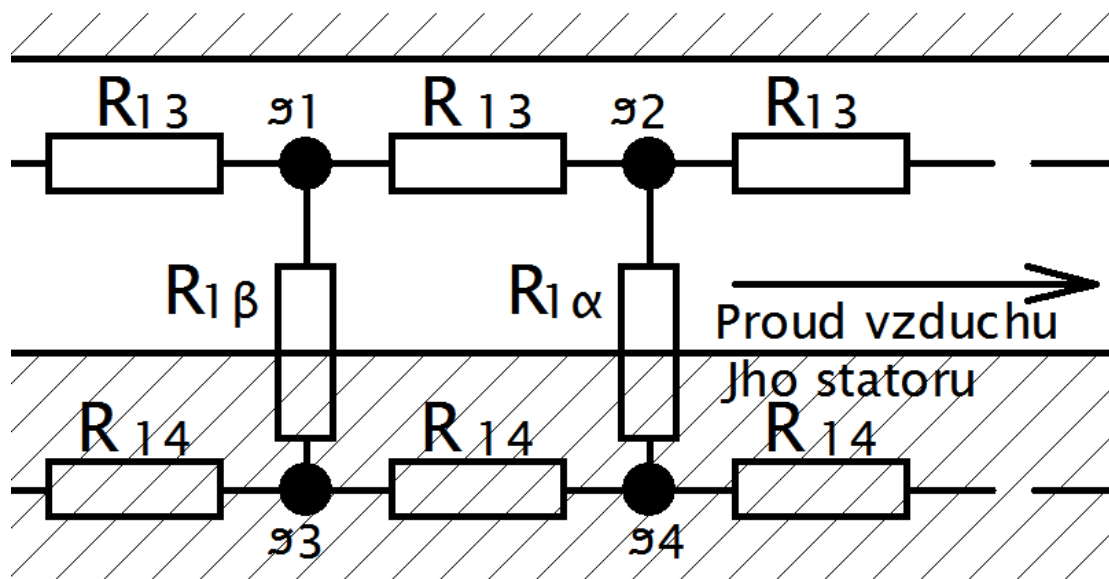
8.1 Metoda tepelné sítě

$$\mathbf{G} = \left[\begin{array}{cccc|cccc}
 & & & & & \dots & & -\frac{1}{R_{1,i}} \\
 & & & & & \dots & & -\frac{1}{R_{2,j}} \\
 & & & & & \dots & & \dots \\
 & & & & & \dots & & \dots \\
 & & & & & & & \\
 \hline
 & & & & & \sum_{j=1}^n \left[\frac{1}{R_Q} + \frac{1}{R_{i,j}} \right] & & \dots \\
 -\frac{1}{R_{i,1}} & & \dots & \dots & \dots & & & \\
 -\frac{1}{R_{i-1,1}} & & -\frac{1}{R_{i,2}} & \dots & \dots & -\sum_{j=1}^n \left[\frac{1}{R_Q} - \frac{1}{R_{i-1,j}} \right] & \sum_{j=1}^n \left[\frac{1}{R_Q} + \frac{1}{R_{i,j}} \right] & \\
 & & & & & & &
 \end{array} \right]$$

Obr. č. 8.2 Matice tepelných vodivostí, převzato z [5]

Metoda tepelné sítě je založena na sestavení matice tepelných vodivostí, dále pak vytvoření pravé strany a následné vyřešení. Pravá strana obsahuje ztráty stroje působící v dané části dělené na výpočetní element. Ty jsou již známy z elektromagnetického návrhu stroje. Matice tepelných vodivostí obsahuje čtyři submatice. Základní část matice respektuje přestup tepla mezi jednotlivými komponenty. Její rozšíření pak respektuje přestup tepla do chladiwa a jeho postupné ohřívání. Matice je zobrazena na Obr. č. 8.2.

Pro každý výpočetní bod je nutné sestavit rovnici tepelných toků. Zde je znázorněna ukázka rovnice pro výpočetní bod 2 (ϑ_2), spolu s Obr. č. 8.3 pro snadnější pochopení.



Obr. č. 8.3 Schéma pro výpočetní bod 2, vlastní tvorba

Rovnice tepelných toků pro výpočetní bod 2:

$$\frac{1}{R_{1\alpha}} \cdot (\vartheta_2 - \vartheta_4) - \frac{1}{R_{13}} \cdot (\vartheta_2 - \vartheta_1) - \frac{1}{R_{1\beta}} \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_3) = 0$$

Rovnice tepelných toků pro výpočetní bod 2 ve tvaru pro zápis do matice:

$$\left(\frac{1}{R_{13}} + \frac{1}{R_{1\alpha}}\right) \cdot \vartheta_2 - \left(\frac{1}{R_{13}} - \frac{1}{R_{1\beta}}\right) \cdot \vartheta_1 - \frac{1}{R_{1\beta}} \cdot \vartheta_3 - \frac{1}{R_{1\alpha}} \cdot \vartheta_4 = 0$$

8.2 Popis programu pro tepelný výpočet stroje s axiální ventilací

Úkolem programu je především naplnění matice tepelných vodivostí, jelikož při její velikosti ji není možné vyplnit ručně. Program je strukturou stejný pro výpočet obou variant chlazení stroje.

Vypočtené tepelné odpory se zapisují do matice tepelných odporů. Zde je nutné doplnit reciproké členy. Například tepelný odpor mezi body 1 a 2 je v matici pro tepelné odpory zapsán jak na pozici [1,2] tak na pozici [2,1]. Záporně vzatá matice tepelných odporů s převrácením každého prvku tvoří základ matice tepelných vodivostí. Výpočet vodivosti chladiwa je dán následujícím vztahem:

$$G_{ch} = 2 \cdot c \cdot Q \left[\frac{W}{K}; \frac{J}{m^3 \cdot K}; \frac{m^3}{s} \right]$$

c...měrná tepelná kapacita vzduchu $1100 \frac{J}{m^3 \cdot K}$

Tam, kde se stékají různá množství proudícího vzduchu o různých teplotách, a vzniká nový proud o nové teplotě, je využita následující rovnice. Pro smíšení dvou proudů chladiva platí:

$$G_{ch1} \cdot \vartheta_1 + G_{ch2} \cdot \vartheta_2 - (G_{ch1} + G_{ch2})\vartheta_3 = 0$$

Kde ϑ_3 je teplota po smíšení

Doplnění diagonály a poddiagonály (úhlopříčka těsně pod diagonálou) vychází z rovnice tepelných toků.

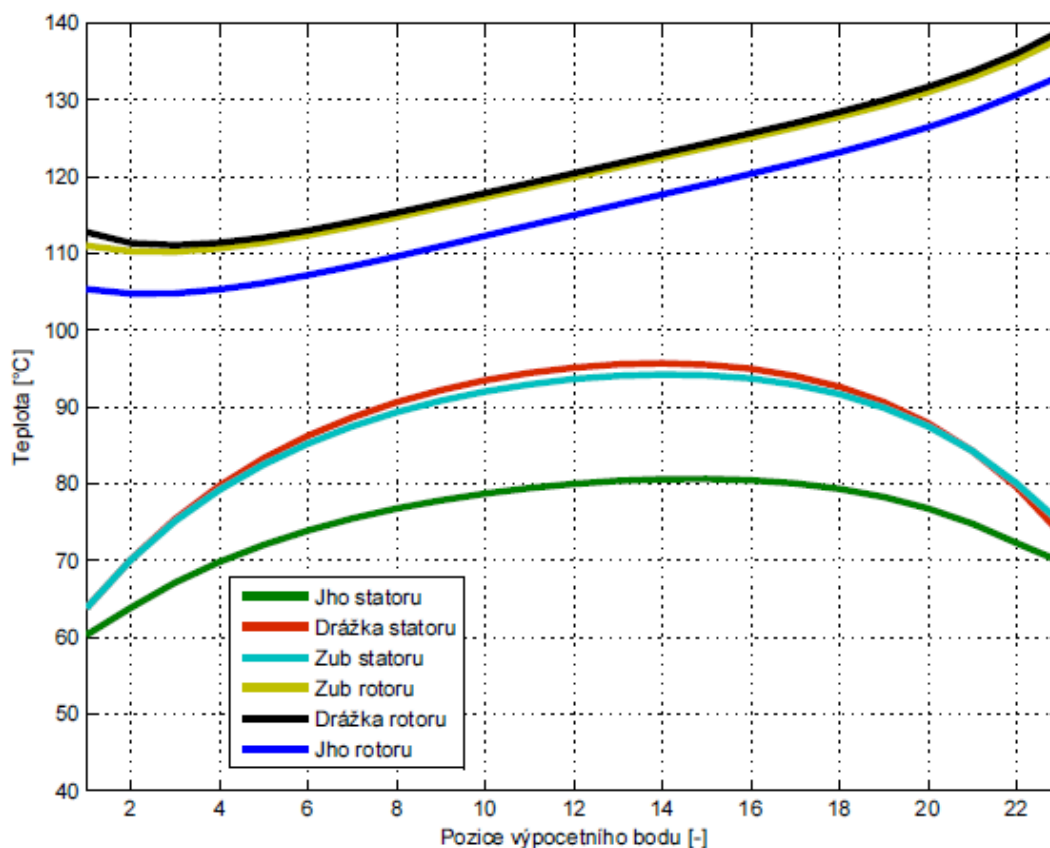
Poté, co je matice připravena, sestaví se pravá strana a provede výpočet. Poslední část programu se zabývá zpracováním získaných dat do grafů.



Obr. č. 8.4 Diagram programu pro tepelný výpočet, vlastní tvorba

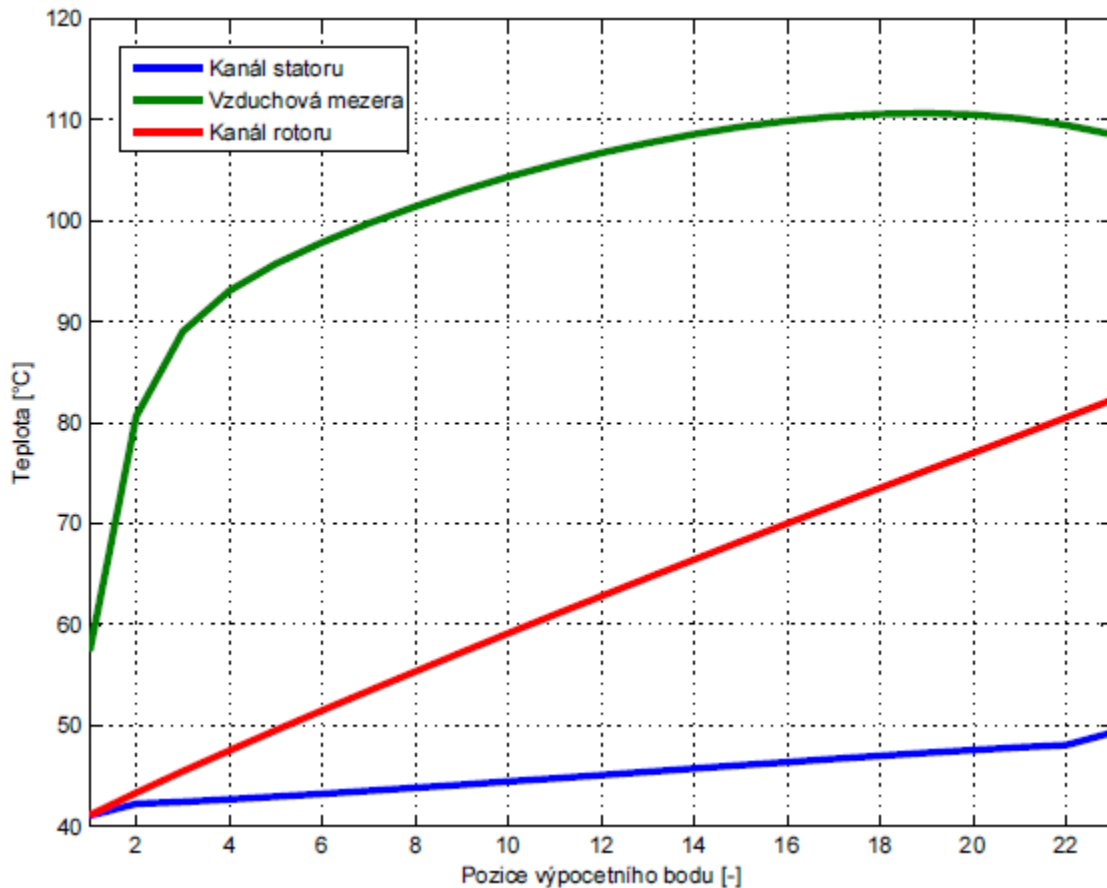
8.3 Výsledky tepelného výpočtu stroje s axiální ventilací

Výsledkem výpočtu je soubor 212 teplot. Níže na Obr. č. 8.5 jsou znázorněny teploty uvnitř stroje a na Obr. č. 8.6 pak teploty proudícího chladiva. Směr proudění chladiva je vždy zleva doprava.



Obr. č. 8.5 Výsledné teploty uvnitř stroje s axiální ventilací, vlastní tvorba

Maximální teploty ve stroji dosahuje rotorová klec a to 139,0°C v rotorové drážce na straně výstupu chladiva a 140,9°C v rotorovém kruhu taktéž na straně výstupu chladiva. Vinutí statoru dosahuje maximální teploty 95,7°C. Teplota čel statorového vinutí je 61,5°C na straně vstupu chladiva a 70,8°C na straně výstupu chladiva.

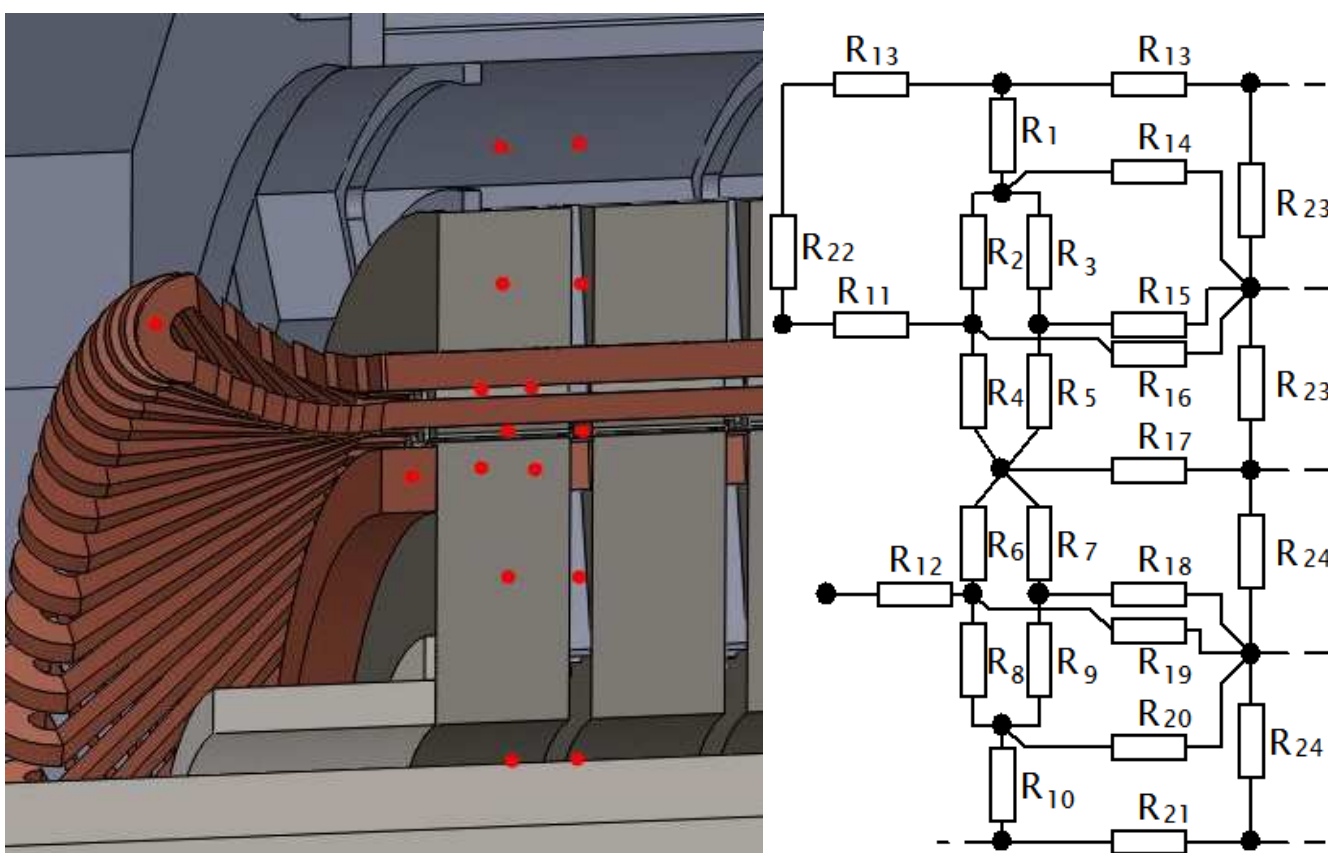


Obr. č. 8.6 Teploty proudícího chladiva při axiální ventilaci, vlastní tvorba

Zde je možno pozorovat vliv ohřevu chladiva na jeho množství. Například chladiva ve vzduchové mezeře je natolik málo, že jeho teplota dosahuje podobných teplot jako mají ochlazované plochy v této oblasti, čímž chladivo ztrácí schopnost chladit, či je dokonce samo ochlazováno.

9 Tepelný výpočet stroje s radiální ventilací

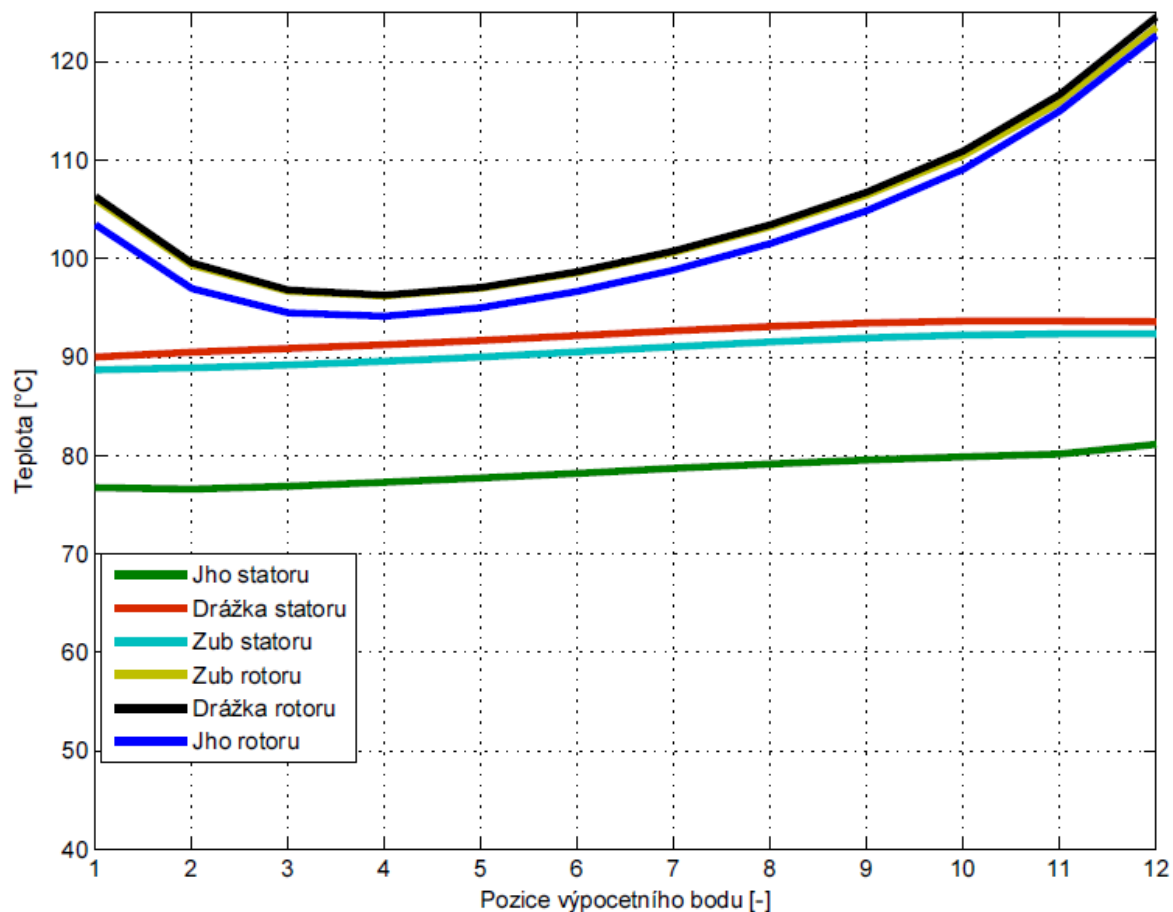
Pro výpočet je užito stejného postupu, jako u předchozího tepelného výpočtu. Rozdíl je ale v rozmístění výpočetních bodů. Svazek statorových i rotorových plechů je rozdělen na 12 paketů a proto původních 23 výpočetních bodů na délce stroje se nyní rozděluje mezi 12 výpočetních bodů ve stroji a 11 výpočetních bodů v radiálních chladicích kanálech. Tato skutečnost ovlivňuje výpočetní body v axiálních kanálech, kde každý druhý výpočetní bod se stává bodem směšovacím. Rozložení výpočetních bodů je na Obr. č. 9.1.



Obr. č. 9.1 Rozložení výpočetních bodů, schéma tepelné sítě radiální ventilace, vlastní tvorba

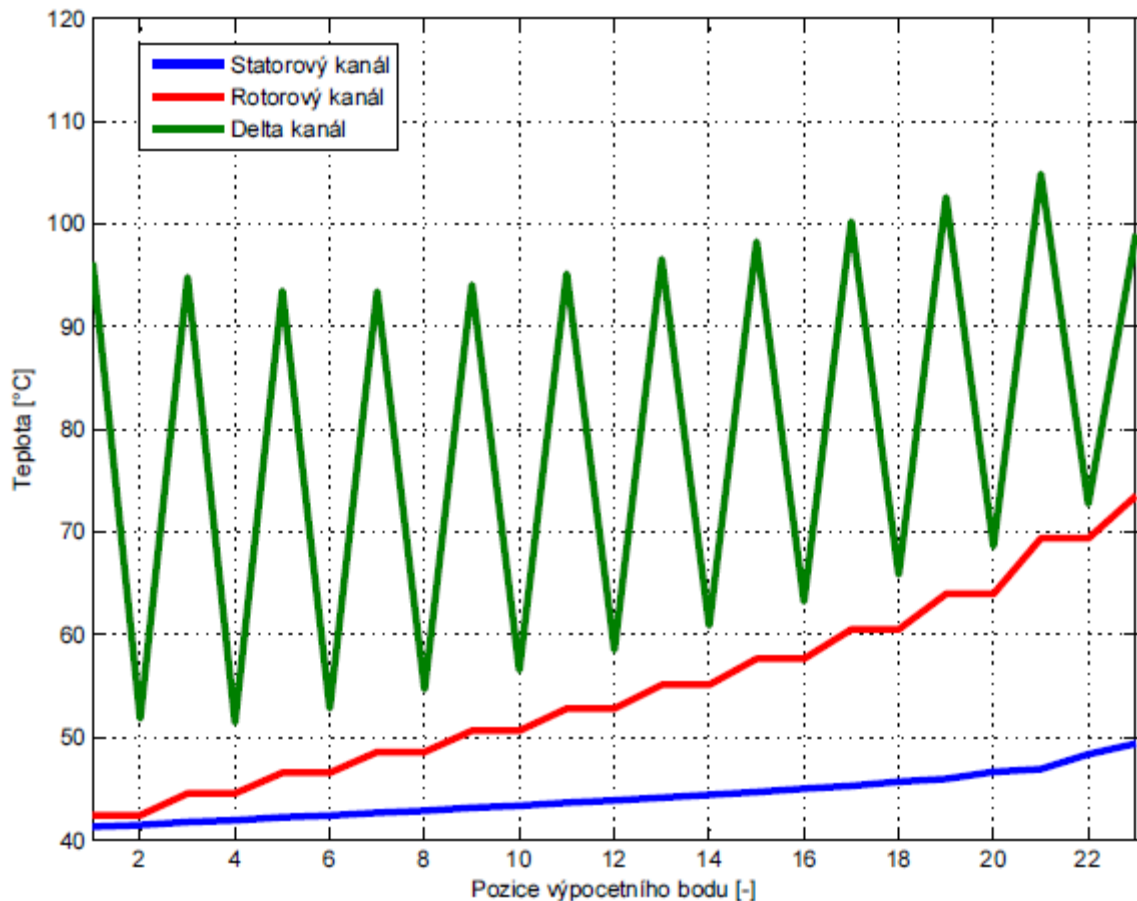
9.1 Výsledky tepelného výpočtu stroje s radiální ventilací

Výsledkem tepelného výpočtu je zde soubor 169 teplot. Teploty komponent podél stroje jsou znázorněny na Obr. č. 9.2 přičemž chladivo proudí zleva doprava.



Obr. č. 9.2 Výsledné teploty uvnitř stroje s radiální ventilací, vlastní tvorba

Nejvyšší vypočtená teplota ve stroji je zde také v rotorovém kruhu na straně výstupu chladiva a to 126,3°C. Teplota statorového vinutí dosahuje nejvyšší teploty 93,5°C. Podrobně rozepsané teploty jsou na Obr. č. 9.3.

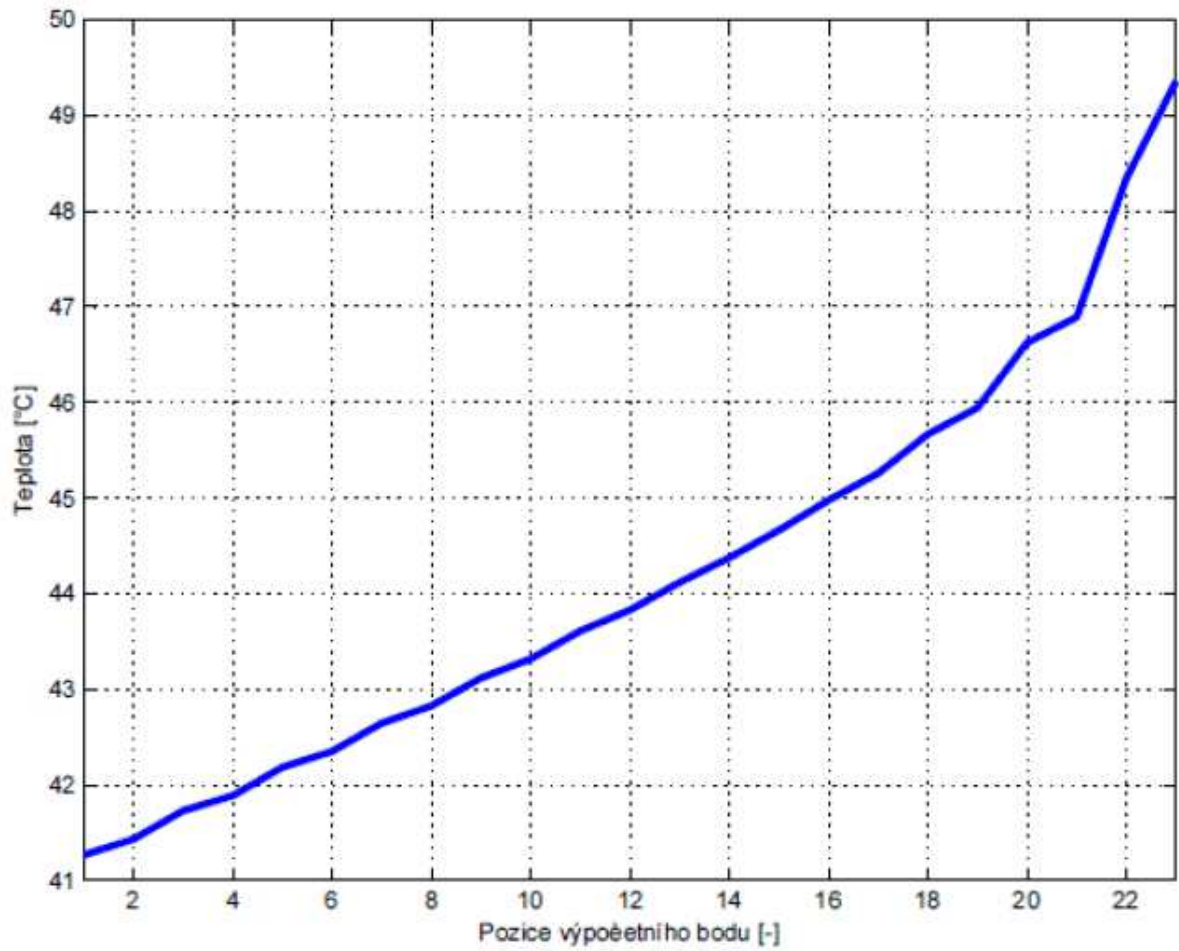


Obr. č. 9.4 Teploty proudícího chladiva při radiální ventilaci

Na Obr 9.4 lze pozorovat skokovitý průběh teplot chladiva. Tento jev vzniká díky radiálním chladicím kanálům, avšak na každou chladicí větev má jiný dopad. Každý druhý výpočetní bod je bodem směšovacím a dochází zde v rotorové větvi k předávání údaje o teplotě z předešlého výpočetního bodu do směšovacího bodu. Ten má jen jeden vstupní proud, výstupní proudy chladiva zákonitě přebírají jeho teplotu.

Teplota ve vzduchové mezeře se na délce stroje mění velmi skokovitě. Malé množství vzduchu ohřátého ve vzduchové mezeře se mísí s chladnějším vzduchem křížujícím vzduchovou mezeru v radiálním směru.

Na přibližném průběhu teploty chladiva v statorovém kanálu je patrný tepelný vliv příspěvků od radiálních kanálů.



Obr. č. 9.5 Přibližný průběh teploty v statorovém kanálu, vlastní tvorba

10 Závěr

Při porovnávání vlivu způsobu ventilace na elektromagnetický návrh vidíme, že účinnost stroje s radiální ventilací se oproti stroji s axiální ventilací zhoršila o 0,3%. Původním záměrem elektromagnetického návrhu stroje s radiální ventilací bylo ponechat co nejvíce rozměry a většinu veličin na stejných hodnotách pro vypovídající porovnání. Nicméně zkrácení efektivní délky stroje bylo nutné dorovnat navýšením indukce ve vzduchové mezeře a to natolik, že by přesáhla doporučenou mez. Rozhodnutím bylo navýšení počtu závitů na každé cívice o jeden závit, tedy o čtyři závity na vinutí jedné sériové větve, což naopak způsobilo celkové podbuzení stroje.

Výsledky získané pomocí programu RMXprt se v porovnání s mými výsledky vcelku shodují. Výjimkou je odpor vinutí, který se u obou strojů liší, čímž se liší i ztráty ve vinutí. Viz následující tabulka.

Tab. 10.1 Odchylka výpočtů

Ventilace	Axiální	Radiální
Parametr	Odchylka [%]	Odchylka [%]
$R_{1f/75^{\circ}\text{C}}$	8,57	13,40
I_s	4,17	8,90
ΔP_{CUS}	16,01	27,69
ΔP_{CUR}	34,52	33,24
ΔP_{Fe}	3,59	3,06
$\Sigma \Delta P$	4,30	7,74
η	0,09	0,32
$\cos\varphi$	1,43	5,40

Výsledky ventilačních výpočtů ukazují, že se změnou způsobu ventilace se celkový průtok strojem téměř nemění. Avšak oproti axiální ventilaci, při které se proud vzduchu na začátku rozdělí a v tomto rozdělení prochází délku stroje, u radiální ventilace vidíme nárůst průtoku na vstupu radiálního kanálu a na délce stroje postupně přelítí tohoto průtoku radiálními kanály do statorové větve. Rozdělení průtoků je zde závislé na otáčkách stroje, tedy na tlaku radiálních rozpěrek rotoru.

Tab. 10.2 Průtočná množství

Ventilace	Axiální	Radiální
$Q \text{ [m}^3\text{/s]}$	1,78	1,70

Na základě tepelných výpočtů obou strojů lze konstatovat, že by bylo možné použít teplotní třídu izolace A s menší teplotní rezervou, nebo použít vyšší teplotní třídu izolace a stroj více proudově využít. Zde je potřeba zmínit, že tepelný výpočet byl proveden pro trvalý chod.

Tab. 10.3 Teplotní rezervy uvažovaných tříd izolace

Teplotní třída izolace	A	E	B	F
Maximální teplota vinutí	105	120	130	155
Rezerva pro axiální ventilaci [%]	8,9	20,3	26,4	38,3
Rezerva pro radiální ventilaci [%]	11,0	22,1	28,1	39,7

U axiální ventilace vzniká na vinutí statoru tzv. horký bod, tedy místo s výrazně vyšší teplotou, což považuji za hlavní nevýhodu tohoto způsobu ventilace. Tento jev vzniká při absenci radiálních kanálů. Význam radiálních kanálů spočívá v odvádění tepla zevnitř stroje. Horký bod bude výraznější při větší délce stroje, která je tedy rozhodující při volbě způsobu ventilace. Teplota statorového vinutí stroje s radiální ventilací je rovnoměrná a po směru chladiwa pozvolna rostoucí. Maximální teplota vinutí je zde menší než u axiální ventilace, a to i přes větší ztráty.

Tab. 10.4 Maximální teploty vinutí

Ventilace	Axiální	Radiální	Rozdíl [%]
Maximální teplota vinutí [°C]	95,7	93,5	2,30

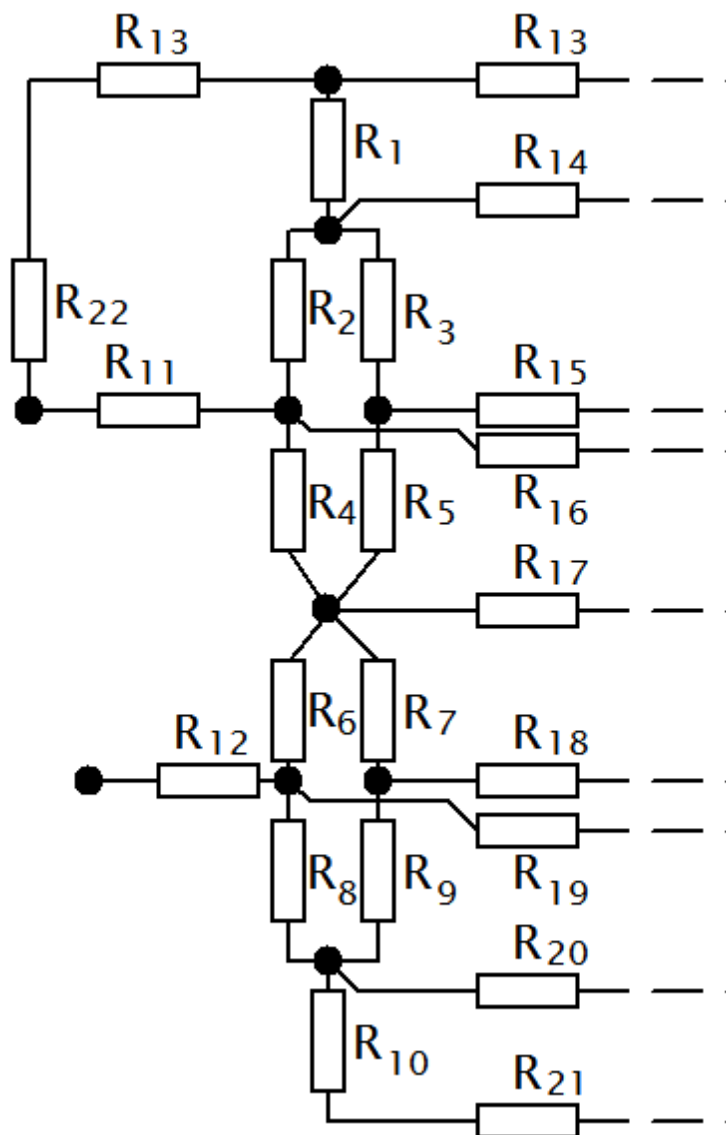
Velkým přínosem pro mou práci by bylo porovnání vypočtených výsledků s měřením na skutečném stroji, jelikož kromě výsledků z elektromagnetického návrhu práce není jinak ověřena. Výsledky jsou tedy značně nejisté, a to na základě zjednodušení u tepelných a ventilačních výpočtů, bez kterých bych tyto výpočty nebylo možné provést.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] PYRHONEN, JUHA, TAPANI JOKINEN, AND VALERIA HRABOVCOVA. *Design of rotating electrical machines*. JOHN WILEY & SONS, 2011. 584 s.
- [2] ČERVENÝ, Josef. *Stavba elektrických strojů* [Přednášky KEV/SES2]. Plzeň: ZČU v Plzni, 2016, 148 s.
- [3] <https://cogent-power.com/CMS-DATA/DOWNLOADS/M350-50A.PDF>
[cit. 11. května 2017]
- [4] LIST, V.; HAK, J.: . *Technický průvodce 12 Elektrotechnika II, Elektrické stroje – část 1*. Praha, SNTL 1969, 639 s.
- [5] PECHÁNEK, Roman. *Ventilační a tepelná analýza trakčního asynchronního motoru*, Fakulta elektrotechnická, ZČU v Plzni, Plzeň 2011
- [6] HAK, Josef a Oldřich OŠLEJŠEK. *Výpočet chlazení elektrických strojů*. 1. Díl. Brno: Výzkumný a vývojový ústav elektrických strojů točivých, 1973, 626 s.
- [7] <http://www.ziehl-abegg.com/cz/cs/svety-produktu/vzduchotechnika/radialni-ventilatory/rada-r/> , [cit. 11. května 2017]
- [8] ONDRUŠKA, E.; MALOUŠEK, A.: *Chlazení elektrických strojů*. SNTL 1985,439 s.

Přílohy

Příloha I - Výpočet tepelných odporů stroje s axiální ventilací



Obrázek 1

U tepelného výpočtu stroje s radiální ventilací jsou tepelné odpory počítány uvnitř programu.

Tepelný odpor z půli jha statoru do statorového kanálu:

$$\begin{aligned}
 R_1 &= \frac{\frac{h_{ys}}{2}}{\lambda_{Fep} \cdot l_{el} \cdot \frac{D_e - h_{ys} + D_e}{2} \cdot \pi} + \frac{1}{\alpha_{-s} \cdot \pi \cdot D_e \cdot l_{el}} \\
 &= \frac{\frac{0,068}{2}}{20 \cdot 0,0361 \cdot \frac{0,791 - 0,068 + 0,791}{2} \cdot \pi} + \frac{1}{282 \cdot \pi \cdot 0,791 \cdot 0,0361} \\
 &= 59,33 \cdot 10^{-3} \frac{K}{W}
 \end{aligned}$$

Tepelný odpor z půli jha statoru do statorové drážky:

$$\begin{aligned}
 R_2 &= \frac{\frac{h_{us}}{2}}{\lambda_{cu} \cdot l_{el} \cdot Q_s \cdot b_{us}} + \frac{t_i}{\lambda_i \cdot Q_s \cdot b_{us} \cdot l_{el}} + \frac{\frac{h_{ys}}{2}}{\lambda_{fep} \cdot \frac{\pi \cdot (D_{se} - h_{ys}) + (Q_s \cdot b_{us} \cdot l_{el})}{2}} \\
 &= \frac{\frac{0,032}{2}}{385 \cdot 0,0361 \cdot 72 \cdot 9,88} + \frac{0,005}{0,3 \cdot 72 \cdot 0,01088 \cdot 0,0361} \\
 &\quad + \frac{\frac{0,068}{2}}{20 \cdot \frac{\pi \cdot (0,791 - 0,068) + (72 \cdot 0,01088 \cdot 0,0361)}{2}} = 122 \cdot 10^{-3} \frac{K}{W}
 \end{aligned}$$

Tepelný odpor z půli jha statoru do zubu statoru:

$$\begin{aligned}
 R_3 &= \frac{\frac{h_{ds}}{2}}{\lambda_{fep} \cdot l_{el} \cdot Q_s \cdot b_{ds}} + \frac{\frac{h_{ys}}{2}}{\lambda_{fep} \cdot l_{el} \cdot \frac{b_{ds} \cdot Q_s + \pi \cdot (D_{se} - h_{ys})}{2}} = \\
 &= \frac{\frac{0,037}{2}}{20 \cdot 0,01609 \cdot 72 \cdot 0,0361} \\
 &\quad + \frac{\frac{0,068}{2}}{20 \cdot 0,0361 \cdot \frac{0,01609 \cdot 72 + \pi \cdot (0,791 - 0,068)}{2}} = 49,578 \cdot 10^{-3} \frac{K}{W}
 \end{aligned}$$

Teplený odpor z drážky statoru do vzduchové mezery:

$$\begin{aligned}
 R_4 &= \frac{\frac{h_{us}}{2}}{\lambda_{cu} \cdot b_{us} \cdot l_{el} \cdot Q_s} + \frac{t_i}{\lambda_i \cdot b_{us} \cdot l_{el} \cdot Q_s} + \frac{1}{a_\delta \cdot b_{us} \cdot l_{el} \cdot Q_s} = \\
 &= \frac{\frac{0,032}{2}}{385 \cdot 0,00988 \cdot 0,0361 \cdot 72} + \frac{0,005}{0,3 \cdot 0,01088 \cdot 0,0361 \cdot 72} \\
 &+ \frac{1}{123 \cdot 0,01088 \cdot 0,0361 \cdot 72} = 348,046 \cdot 10^{-3} \frac{K}{W}
 \end{aligned}$$

Teplený odpor ze zuby statoru do vzduchové mezery:

$$\begin{aligned}
 R_5 &= \frac{\frac{h_{ds}}{2}}{\lambda_{fep} \cdot b_{ds} \cdot l_{el} \cdot Q_s} + \frac{1}{a_\delta \cdot b_{ds} \cdot l_{el} \cdot Q_s} \\
 &= \frac{\frac{0,037}{2}}{20 \cdot 0,01609 \cdot 0,0361 \cdot 72} + \frac{1}{123 \cdot 0,01447 \cdot 0,0361 \cdot 72} \\
 &= 238,284 \cdot 10^{-3} \frac{K}{W}
 \end{aligned}$$

Teplený odpor z drážky rotoru do vzduchové mezery:

$$\begin{aligned}
 R_6 &= \frac{\frac{h_{dr}}{2}}{\lambda_{cu} \cdot b_{ur} \cdot l_{el} \cdot Q_r} + \frac{1}{a_\delta \cdot b_{ur} \cdot l_{el} \cdot Q_r} \\
 &= \frac{\frac{0,0245}{2}}{385 \cdot 0,0105 \cdot 0,0361 \cdot 54} + \frac{1}{132 \cdot 0,012 \cdot 0,0361 \cdot 54} = 349,1 \cdot 10^{-3} \frac{K}{W}
 \end{aligned}$$

Teplený odpor ze zuby rotoru do vzduchové mezery:

$$\begin{aligned}
 R_7 &= \frac{\frac{h_{dr}}{2}}{\lambda_{fep} \cdot b_{dr} \cdot l_{el} \cdot Q_r} + \frac{1}{a_\delta \cdot b_{dr} \cdot l_{el} \cdot Q_r} \\
 &= \frac{\frac{0,0245}{2}}{20 \cdot 0,02137 \cdot 0,0361 \cdot 54} + \frac{1}{132 \cdot 0,02137 \cdot 0,0361 \cdot 54} \\
 &= 195,2 \cdot 10^{-3} \frac{K}{W}
 \end{aligned}$$

Teplený odpor z půli jha rotoru do rotorové drážky:

$$R_8 = \frac{\frac{h_{dr}}{2}}{\lambda_{Cu} \cdot l_{el} \cdot Q_r \cdot b_{ur}} + \frac{\frac{h_{yr}}{2}}{\lambda_{fep} \cdot \frac{(\pi \cdot (D_r + h_{yr}) + (Q_r \cdot b_{ur}))}{2}} \cdot l_{el} =$$

$$= \frac{\frac{0,0245}{2}}{385 \cdot 0,0361 \cdot 54 \cdot 0,02137} + \frac{\frac{0,068}{2}}{20 \cdot \frac{(\pi \cdot (0,392 + 0,068) + (54 \cdot 0,009))}{2}} \cdot 0,0361 = 50,3 \cdot 10^{-3} \frac{K}{W}$$

Teplený odpor z půli jha rotoru do rotorového zubu:

$$R_9 = \frac{\frac{h_{dr}}{2}}{\lambda_{fep} \cdot l_{el} \cdot Q_r \cdot b_{dr}} + \frac{\frac{h_{yr}}{2}}{\lambda_{fep} \cdot l_{el} \cdot \frac{(b_{dr} \cdot Q_r + \pi \cdot (D_{ri} + h_{yr}))}{2}} =$$

$$= \frac{\frac{0,0245}{2}}{20 \cdot 0,0361 \cdot 54 \cdot 0,02137} + \frac{\frac{0,068}{2}}{20 \cdot 0,0361 \cdot \frac{(0,02137 \cdot 54 + \pi \cdot (0,392 + 0,068))}{2}} = 38,0 \cdot 10^{-3} \frac{K}{W}$$

Teplený odpor z půli jha rotoru do axiálního kanálu rotoru:

$$R_{10} = \frac{\frac{h_{yr}}{2}}{\lambda_{fep} \cdot l_{el} \cdot \pi \cdot (D_{ri} + 0,5 \cdot h_{yr})} + \frac{1}{\alpha_r \cdot l_{el} \cdot \pi \cdot D_{se}}$$

$$= \frac{\frac{0,068}{2}}{20 \cdot 0,0361 \cdot \pi \cdot (0,392 + 0,5 \cdot 0,068)} + \frac{1}{151 \cdot 0,0361 \cdot \pi \cdot 0,392}$$

$$= 219,3 \cdot 10^{-3} \frac{K}{W}$$

Teplený odpor z drážky statoru do čela statoru:

$$R_{11} = \frac{l_c + \frac{l_{el}}{2}}{\lambda_{cu} \cdot b_{us} \cdot Q_s \cdot h_{us} \cdot 2} = \frac{0,193 + \frac{0,0361}{2}}{385 \cdot 0,00988 \cdot 72 \cdot 0,032 \cdot 2} = 1,12 \cdot 10^{-3} \frac{K}{W}$$

Tepelný odpor z drážky rotoru do čela rotoru:

$$R_{12} = \frac{\frac{b_{ring}}{2}}{\lambda_{cu} \cdot h_{ring} \cdot \pi \cdot D_k} + \frac{\frac{l_{el}}{2}}{\lambda_{cu} \cdot b_{ur} \cdot h_{dr} \cdot Q_R}$$

$$= \frac{0,025}{385 \cdot 0,03 \cdot \pi \cdot 0,5229} + \frac{\frac{0,0361}{2}}{385 \cdot 0,0105 \cdot 0,0245 \cdot 72} = 3,19 \cdot 10^{-3} \frac{K}{W}$$

Tepelný odpor proudu chladiva statorem:

$$R_{13} = \frac{1}{2 \cdot c_{ch} \cdot Q_{chs}} = \frac{1}{2 \cdot 1100 \cdot 1,6551} = 27,46 \cdot 10^{-3} \frac{K}{W}$$

Tepelný odpor jha statoru v podélném směru:

$$R_{14} = \frac{l_{el}}{\lambda_{fen} \cdot \frac{\pi}{4} (D_e^2 - (D_e - 2 \cdot h_{ys})^2)} = \frac{0,036}{2,2 \cdot \frac{\pi}{4} (0,791^2 - (0,791 - 2 \cdot 0,068)^2)}$$

$$= 105,9 \cdot 10^{-3} \frac{K}{W}$$

Tepelný odpor zubu statoru v podélném (axiálním) směru:

$$R_{15} = \frac{l_{el}}{\lambda_{fen} \cdot b_{as2} \cdot h_{as} \cdot Q_s} = \frac{0,0361}{2,2 \cdot 0,0169 \cdot 0,037 \cdot 72} = 364,5 \cdot 10^{-3} \frac{K}{W}$$

Tepelný odpor drážky statoru v podélném (axiálním) směru:

$$R_{16} = \frac{l_{el}}{\lambda_{cu} \cdot b_{us} \cdot h_{ds} \cdot Q_s} = \frac{0,0361}{385 \cdot 9,88 \cdot 0,032 \cdot 72} = 3,7 \cdot 10^{-3} \frac{K}{W}$$

Tepelný odpor proudu chladiva vzduchovou mezerou:

$$R_{17} = \frac{1}{2 \cdot c_{ch} \cdot Q_{chd}} = \frac{1}{2 \cdot 1100 \cdot 0,012} = 37,9 \cdot 10^{-3} \frac{K}{W}$$

Tepelný odpor zubu rotoru v podélném (axiálním) směru:

$$R_{18} = \frac{l_{el}}{\lambda_{fen} \cdot b_{dr} \cdot h_{dr} \cdot Q_R} = \frac{0,0361}{2,2 \cdot 0,02137 \cdot 0,0245 \cdot 54} = 580,4 \cdot 10^{-3} \frac{K}{W}$$

Tepelný odpor drážky rotoru v podélném (axiálním) směru:

$$R_{19} = \frac{l_{el}}{\lambda_{cu} \cdot b_{ur} \cdot h_{dr} \cdot Q_R} = \frac{0,0361}{385 \cdot 0,0105 \cdot 0,0245 \cdot 54} = 6,75 \cdot 10^{-3} \frac{K}{W}$$

Tepelný odpor jha rotoru v podélném (axiálním) směru:

$$R_{20} = \frac{l_{el}}{\lambda_{fen} \cdot \frac{\pi}{4} \left((D_{Ri} + 2 \cdot h_{yr})^2 - D_{Ri}^2 \right)} = \frac{0,0361}{2,2 \cdot \frac{\pi}{4} \left((0,392 + 2 \cdot 0,068)^2 - 0,392^2 \right)}$$

$$= 166,98 \cdot 10^{-3} \frac{K}{W}$$

Tepelný odpor proudu chladiva rotorovou částí:

$$R_{21} = \frac{1}{2 \cdot c_{ch} \cdot Q_{chR}} = \frac{1}{2 \cdot 1100 \cdot 0,118} = 3,85 \cdot 10^{-3} \frac{K}{W}$$

Tepelný odpor ze statorového čela do statorového kanálu:

$$R_{22} = \frac{\left(\frac{h_{us}}{2} \right)}{\lambda_{cu} \cdot l_c \cdot Q_s \cdot b_{us}} + \frac{t_i}{\lambda_i \cdot l_c \cdot Q_s \cdot b_{us} \cdot 2} + \frac{1}{(\alpha_s \cdot l_c \cdot (b_{us} + h_{us}) \cdot 2 \cdot Q_s)}$$

$$= \frac{\left(\frac{0,032}{2} \right)}{385 \cdot 0,14 \cdot 72 \cdot 0,0988} + \frac{0,005}{0,3 \cdot 0,14 \cdot 72 \cdot 0,0988 \cdot 2}$$

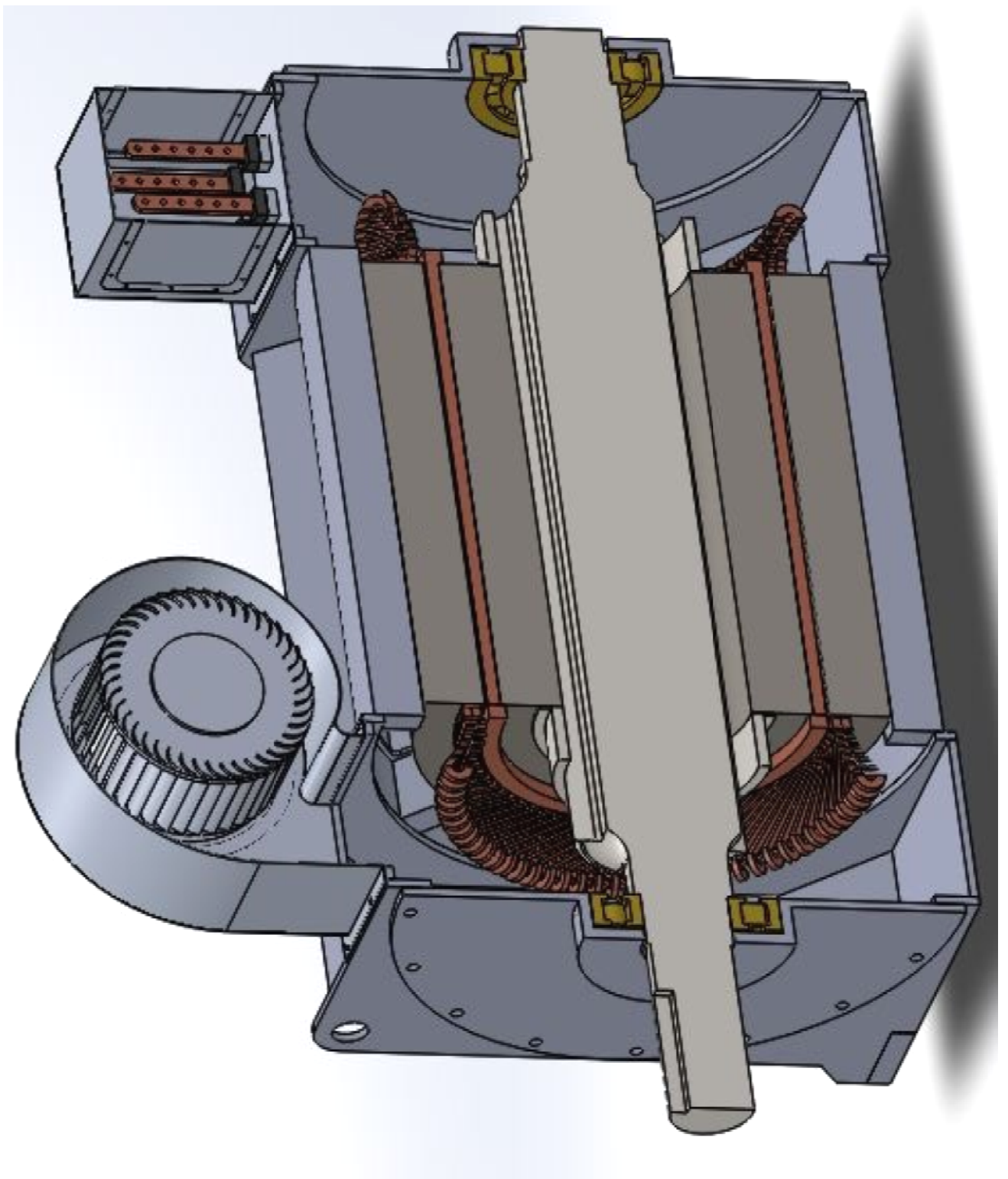
$$+ \frac{1}{(151 \cdot 0,14 \cdot (10,88 + 0,037) \cdot 2 \cdot 72)} = 21,11 \cdot 10^{-3} \frac{K}{W}$$

Příloha II – Výkresy stroje s axiální ventilací

Pohled zvenčí



Podélný řez strojem s axiální ventilací



Příloha III – Výkresy stroje s radiální ventilací

Podélný řez strojem s radiální ventilací

