

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ
ELEKTRONIKY**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Sdružený výpočtový model přestupu tepla ve vzduchové
mezeře asynchronního motoru**

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

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

Jméno a příjmení: **Bc. Vít VELEBA**
Osobní číslo: **E13N0049P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Průmyslová elektronika a elektromechanika**
Název tématu: **Sdružený výpočtový model přestupu tepla ve vzduchové mezeře asynchronního motoru**
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. Vytvořte 3D model asynchronního motoru.
2. Proveďte výpočet vzniku proudění ve vzduchové mezeře motoru.
3. Vyhodnoťte vliv rychlosti otáčení rotoru na proudění ve vzduchové mezeře.
4. Proveďte teplotní analýzu rotorové klece v závislosti na otáčkách rotoru.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. Blejchař, T.: Návody do cvičení, Modelování proudění, CFX: VŠB TU Ostrava 2009.
2. Hak, J., Ošlejšek, O.: Výpočet chlazení elektrických strojů 1.Díl: Fyzikální podklady výpočtu chlazení a ventilační výpočet. Vydání VUES Brno, 1973, 628s.
3. Veřejně dostupné informační zdroje, databáze www.ieee.org.


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

Tato diplomová práce se zabývá modelováním proudění chladícího vzduchu ve vzduchové mezeře asynchronního motoru v závislosti na otáčkách rotoru. Dále pak tepelnou analýzou rotorové klece v závislosti na otáčkách rotoru. V úvodu práce jsou rozebrány základní vlastnosti proudění tekutin a ztráty v asynchronních strojích. Také je zde kapitola věnovaná řešeným rovnicím v programu Ansys CFX. Poté je zde namodelován asynchronní motor a proudění ve vzduchové mezeře v programu Ansys CFX. Nakonec je provedena statická tepelná analýza rotorové klece též pomocí programu Ansys.

Klíčová slova

Asynchronní motor, Ansys Workbench, Ansys CFX, modelování, proudění, tepelná analýza

Abstract

This master thesis focuses on the flow modeling of cooling air in the air-gap induction motor, depending on the rotor speed. Following is the thermal analysis of the rotor cage depending on the rotor speed. In the introduction of this thesis are discussed the basic properties of fluid flow and losses in the induction machines. Also there is a chapter devoted to the equations which are solved in the Ansys CFX. Then there is modeled an asynchronous motor and air flow in the air-gap in Ansys CFX. Finally, there is a static thermal analysis of rotor cage also by using Ansys.

Key words

Induction motor, Ansys Workbench, Ansys CFX, modeling, convection, thermal analysis

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 6.5.2015

Vít Veleba

Poděkování

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

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
1 ÚVOD	12
2 CÍL PRÁCE	13
3 MODELOVANÝ ASYNCHRONNÍ MOTOR	14
3.1 ZÁKLADNÍ PARAMETRY MODELOVANÉHO ASYNCHRONNÍHO MOTORU.....	14
3.2 ZTRÁTY ASYNCHRONNÍHO MOTORU.....	14
4 PROUDĚNÍ PLYNŮ A KAPALIN	16
4.1 PLYNY A KAPALINY.....	16
4.2 TYPY PROUDĚNÍ TEKUTIN.....	17
4.2.1 Proudění ideální tekutiny.....	17
4.2.2 Proudění vazkých tekutin.....	17
5 OTEPLENÍ A CHLAZENÍ ASYNCHRONNÍHO MOTORU	18
5.1 OTEPLENÍ.....	18
5.2 ZPŮSOBY ŠÍŘENÍ TEPLA.....	19
5.2.1 Šíření tepla vedením.....	19
5.2.2 Šíření tepla sáláním.....	20
5.2.3 Šíření tepla prouděním.....	20
5.2.4 Součinitel přestupu tepla při samovolné konvekci.....	21
5.2.5 Součinitel přestupu tepla při nuceném proudění povrchově chlazeného stroje.....	22
5.2.6 Součinitel přestupu tepla ve vzduchové mezeře.....	22
6 ANSYS CFX	23
6.1 COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS (CFD).....	23
6.2 ROVNICE ŘEŠENÉ V CFX.....	24
6.2.1 Navier-Stokesova rovnice.....	24
6.2.2 Rovnice kontinuity.....	24
6.2.3 Rovnice vedení tepla.....	24
6.3 MATEMATICKÉ MODELOVÁNÍ PROUDĚNÍ.....	25
6.3.1 Přímá numerická simulace (DNS).....	25
6.3.2 Reynoldsovo zprůměrování Navier-Stokesových rovnic (RANS).....	25
6.4 MODEL TURBULENCE.....	26
6.4.1 Model <i>k-epsilon</i>	26
7 3D MODEL ASYNCHRONNÍHO MOTORU	27
7.1 VYTVOŘENÍ 3D MODELU ASYNCHRONNÍHO MOTORU V PROGRAMU SOLIDWORKS.....	27
7.2 VYTVOŘENÍ 3D MODELU ASYNCHRONNÍHO MOTORU V PROGRAMU ANSYS.....	29
8 VÝPOČET VZNIKU PROUDĚNÍ VE VZDUCHOVÉ MEZEŘE	30
8.1 VYTVOŘENÍ VÝPOČETNÍ SÍTĚ.....	30
8.2 NASTAVENÍ MODELU VZDUCHOVÉ MEZERY V CFX-PRE.....	31
8.3 VÝPOČET MODELU VZDUCHOVÉ MEZERY V CFX-SOLVER.....	34
8.4 VYHODNOCENÍ PROUDĚNÍ VE VZDUCHOVÉ MEZEŘE.....	35
8.5 VYHODNOCENÍ VLIVU RYCHLOSTI OTÁČENÍ ROTORU NA PROUDĚNÍ VE VZDUCHOVÉ MEZEŘE.....	38
9 TEPELNÁ ANALÝZA ROTOROVÉ KLECE	40
9.1 NASTAVENÍ MODELU PRO TEPELNOU ANALÝZU ROTOROVÉ KLECE.....	42

9.2	VYHODNOCENÍ TEPELNÉ ANALÝZY ROTOROVÉ KLECE	44
9.2.1	<i>Vyhodnocení tepelné analýzy rotorové klece v závislosti na otáčkách</i>	45
ZÁVĚR		47
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ		49
PŘÍLOHY		1
PŘÍLOHA 1 – ROZLOŽENÝ MODEL ASYNCHRONNÍHO MOTORU		1
PŘÍLOHA 2 – PROUDNICE RYCHLOSTI VZDUCHU VE VZDUCHOVÉ MEZEŘE		3
PŘÍLOHA 3 – GRAFY RYCHLOSTÍ PROUDĚNÍ V ZÁVISLOSTI NA DÉLCE VZDUCHOVÉ MEZERY		9
PŘÍLOHA 4 – VÝSLEDKY TEPELNÉ ANALÝZY		15

Seznam symbolů a zkratk

B_{Fe}	Magnetická indukce	[T]
CFD	Computational fluid dynamics	
CFX	Komerční označení CFD	
CFX-Pre	Preprocesor programu CFX	
CFX-Post	Postprocesor programu CFX	
c_p	Měrné teplo	[J·kg ⁻¹ ·°C ⁻¹]
$C_{\varepsilon 1}$	Empirická konstanta	1,44
$C_{\varepsilon 2}$	Empirická konstanta	1,92
C_{μ}	Empirická konstanta	0,09
D	Vrtání statoru	[m]
D_e	Vnější průměr statoru	[m]
f	Frekvence	[Hz]
g	Tíhové zrychlení	[m·s ⁻²]
G	Hmotnost vinutí, izolace a zubů	[kg]
Gr	Grashofovo číslo	
h_{tot}	Celková entalpie	[m ² ·s ⁻²]
I	Efektivní hodnota proudu	[A]
I_N	Jmenovitý proud	[A]
k	Turbulentní kinetická energie	[m ² ·s ⁻²]
k_p	Činitel zvětšení ztrát	
l_{Fe}	Efektivní délka	[m]
L	Charakteristický rozměr	[m]
m	Počet fází	
m_{Fe}	Hmotnost železa	[kg]
Nu	Nusseltovo číslo	
n_s	Synchronní otáčky	[ot·min ⁻¹]
p	Tlak	[Pa]
P_k	Vliv viskózních sil	[kg·m ⁻¹ ·s ⁻³]
P_{kb}	Vliv vztlakových sil	[kg·m ⁻¹ ·s ⁻³]
$P_{\varepsilon b}$	Vliv vztlakových sil	[kg·m ⁻¹ ·s ⁻³]
P_N	Jmenovitý výkon	[W]
Pr	Prandtlovo číslo	
$\Delta P_{j1,2}$	Jouleovy ztráty statorové, rotorové	[W]
$\Delta P_{Fe1,2}$	Ztráty v železe statoru, rotoru	[W]
ΔP_m	Mechanické ztráty	[W]
ΔP_d	Přídavné ztráty	[W]
Δp_{Fe}	Ztrátové číslo	[W·kg ⁻¹]
q	Hustota tepelného toku	[W·m ⁻²]
Q	Přenesené teplo	[W]
$Q_{1,2}$	Počet drážek statoru, rotoru	
S	Plocha	[m ²]
S_E	Vnější zdroj energie	[W·m ⁻³]
S_M	Vnější zdroje síly	[kg·m ⁻² ·s ⁻²]
R	Činný odpor	[Ω]
Re	Reynoldsovo číslo	
R_r	Poloměr rotoru	[m]
t	Čas	[s]

T_{θ}	Časová konstanta oteplení	[s]
\mathbf{U}	Vektor rychlosti	[m·s ⁻¹]
U_N	Jmenovité napětí	[V]
v	Rychlost	[m·s ⁻¹]
$\cos \varphi$	Účinník	
α	Součinitel přestupu tepla	[W·m ⁻² ·K ⁻¹]
β	Koeficient objemové roztažnosti	[°C ⁻¹]
δ	Šířka vzduchové mezery	[mm]
	Jednotková matice	
ε	Emisivita	
	Rychlost rozpadu vírů	[m ² ·s ⁻³]
η	Účinnost	[%]
θ	Střední ustálené oteplení	[°C]
$\Delta\theta$	Oteplení	[°C]
λ	Součinitel tepelné vodivosti	[W·m ⁻¹ ·°C ⁻¹]
μ	Dynamická viskozita	[kg·s ⁻¹ ·m ⁻¹]
μ_t	Turbulentní viskozita	[kg·s ⁻¹ ·m ⁻¹]
ν	Kinematická viskozita	[m ² ·s ⁻¹]
ρ	Hustota	[kg·m ⁻³]
σ	Stefan-Boltzmannova konstanta	[W·m ⁻² ·K ⁻⁴]
σ_k	Empirická konstanta	1
σ_ε	Empirická konstanta	1,3
τ	Tenzor napětí	[kg·m ⁻¹ ·s ⁻²]

1 Úvod

Jednou z důležitých částí návrhu elektrického stroje je návrh chlazení a výpočet oteplení jednotlivých částí stroje. Tato problematika stále nabírá na důležitosti s narůstajícím výkonem strojů při současné snaze o dosažení co nejmenších rozměrů. Spolehlivost a životnost stroje omezuje právě teplota jednotlivých částí stroje [1]. Například pokud teplota izolace vzroste o 10 K, klesá její životnost na polovinu [2]. Jako další dopady zvýšené teploty ve stroji může být odtrhnutí rotorových tyčí od kruhu vlivem teplotní roztažnosti případně zvýšení namáhání ložisek zapříčiněné teplotní roztažností hřídele, zhoršení mazacího účinku maziva ložisek nebo také zvýšení činného odporu vodičů vinutí [3].

Aby bylo možné zjistit teploty jednotlivých částí stroje, je nutné provést ventilační a tepelný výpočet. To lze provést například metodou hydraulické a náhradní tepelné sítě. Metoda hydraulické sítě spočívá v tom, že řešený objekt se nahradí výpočetní sítí pro výpočet množství a rozložení chladiva v objektu. Její větve představují jednotlivé toky chladiva a místa jejich rozdělení nebo spojení jsou uzly. Větve jsou složeny z hydraulických odporů představujících ventilační kanály a zdrojů tlaku, které charakterizují ventilátory nebo části vytvářející ventilační účinek. Metoda tepelné sítě opět nahrazuje řešený objekt sítí, jejíž uzly představují jednotlivé části objektu, větve představují cesty kudy se šíří teplo a jsou charakterizovány tepelným odporem. Dále se skládá ze zdrojů tepla (ztrát) a míst kudy je teplo odvedeno do chladiva nebo vnějšího okolí [4]. Tepelný a ventilační výpočet je také možné provést za použití programů využívajících metodu konečných prvků, metodu konečných objemů nebo metodu konečných diferencí jako jsou například ANSYS nebo FEMM. Ventilační výpočet podává informaci o průtoku chladiva strojem což je důležité pro následující tepelný výpočet, který již udává oteplení jednotlivých částí stroje.

Vzhledem k tomu že rozložení teploty v jednotlivých částech stroje a proudění chladicího média ve stroji je velmi komplikované je třeba pro výpočet tento problém velmi zjednodušit. Toto zjednodušení sice umožní vyřešit daný problém ovšem na úkor přesnosti řešení. Nejlepším způsobem pro získání představy o stavu ve stroji je použití sdružených

modelů. Tyto modely nám dají dobré výsledky tepelně ventilačních dějů ve stroji, které se blíží skutečnosti.

Tímto se zabývají například články [5] a [6]. V článku [5] je proveden model ventilace a chlazení rotoru s vyniklými póly za použití CFD. Autor zde provedl výpočet součinitele přestupu tepla na několika místech rotoru pomocí programu CFD a následně tyto vypočtené hodnoty porovnával s provedeným měřením. Z výsledků je patrné že vypočtené a naměřené hodnoty sledovaly stejný trend v reakci na změnu parametrů. Dále je také pojednáno o predikci rychlostních profilů chladiva na výstupu z radiálních ventilačních kanálů. Z toho vyplývá, že CFD může být s výhodou použito pro vytvoření představy o chování chladiva ve stroji. Článek [6] se zabývá teplotní analýzou statoru a rotoru. Autor použil nastavení ochlazovacích podmínek na několik míst ve stroji (čela statorového vinutí, kruh klece, bandáž klece, plechový svazek ve vzduchové mezeře, plechový svazek v čelním prostoru, atd.). Tímto rozdělením ochlazovacích podmínek se více přiblížil skutečnosti. Také pojednává o zjednodušení statorového vinutí, které je provedeno z permutovaných vodičů. Nakonec jsou zde zobrazeny výsledky tepelné analýzy, z kterých je patrná složitost teplotního pole ve stroji.

2 Cíl práce

Cílem této diplomové práce je provést výpočet a vyhodnocení proudění ve vzduchové mezeře asynchronního motoru a následná teplotní analýza rotorové klece. Všechny tyto výpočty byly provedeny v závislosti na rychlosti otáčení rotoru. Výpočet proudění i teplotní analýza byly provedeny v programu Ansys Workbench. Dalším úkolem je vytvoření 3D modelu asynchronního motoru, který je vytvořen v programu SolidWorks. Modelovaný motor byl vytvořen na základě vypočtených parametrů v méj bakalářské práci „Návrh asynchronního motoru s kotvou nakrátko“ z roku 2013.

Hlavními body diplomové práce jsou:

- Vtvoření 3D modelu asynchronního motoru
- Výpočet vzniku proudění ve vzduchové mezeře motoru
- Vyhodnocení vlivu rychlosti otáčení rotoru na proudění ve vzduchové mezeře
- Teplotní analýza rotorové klece v závislosti na otáčkách rotoru

3 Modelovaný asynchronní motor

Pro model stroje byl použit asynchronní motor, který jsem navrhnul v rámci mé bakalářské práce „Návrh asynchronního motoru s kotvou nakrátko“ z roku 2013. Jednalo se o třífázový šestipólový asynchronní motor se zadanými parametry: jmenovité napětí Δ 400 V, jmenovitý výkon 28 kW, krytí IP 44, konstrukční uspořádání IM 1001 (IM B3) a chlazení IC 411.

3.1 Základní parametry modelovaného asynchronního motoru

Zde jsou uvedeny základní parametry vypočteného asynchronního motoru použitého pro následující model.

Tabulka 3.1 - Štítkové údaje motoru

Jmenovitý výkon	P_N	28 kW
napětí	U_N	Δ 400 V
proud	I_N	50 A
Synchronní otáčky	n_s	1000 ot·min ⁻¹
kmitočet	f	50 Hz
účiník	$\cos \varphi_N$	0,85
účinnost	η	90 %
krytí		IP 44
konstrukční provedení		IM 1001
chlazení		IC 411

Tabulka 3.2 - Doplnující parametry motoru

Vrtání statoru	D	0,247 m
Vnější průměr statoru	D_e	0,349 m
efektivní délka	l_{Fe}	0,19 m
šířka vzduchové mezery	δ	0,5 mm
počet drážek - statoru	Q_1	72
- rotoru	Q_2	62

3.2 Ztráty asynchronního motoru

V každém asynchronním stroji vznikají při provozu ztráty, které se mění v teplo. Vzniklé ztráty je třeba ze stroje odvést aby nedošlo k jeho přehřátí. Základní ztráty vznikající v asynchronním stroji jsou:

Jouleovy ztráty ve vinutí statoru a rotoru – jsou závislé na kvadrátu proudu I , činném odporu vinutí R , kterým tento proud prochází a počtu fází m . Tyto ztráty tvoří největší část z celkových ztrát a můžeme je vypočítat jako [7]:

$$\Delta P_j = mRI^2 \text{ [W; -, } \Omega, \text{ A]} \quad (1)$$

Ztráty v železe statoru a rotoru – se rozdělují na ztráty hysterezní ΔP_H a ztráty vířivými proudy ΔP_V . Hysterezní ztráty jsou závislé na ploše hysterezní smyčky použitého materiálu a na první mocnině frekvence magnetického toku a ztráty vířivými proudy jsou závislé na druhé mocnině frekvence magnetického toku. Celkové ztráty v železe jsou dány jejich součtem. Obvykle se počítají oboje ztráty společně s exponentem u frekvence 1,3. [8]

$$\Delta P_{Fe} = k_p \Delta p_{Fe} m_{Fe} B_{Fe}^2 \left(\frac{f}{50} \right)^{1,3} \text{ [W; -, W} \cdot \text{kg}^{-1}, \text{ kg, T, Hz]} \quad (2)$$

kde k_p je činitel zvětšení ztrát vlivem změn struktury materiálu v blízkosti stříhu, Δp_{Fe} je ztrátové číslo plechů, m_{Fe} je hmotnost počítané části magnetického obvodu, B_{Fe} je indukce v počítané části magnetického obvodu a f je frekvence.

Vzhledem k tomu že v rotoru je obvykle velmi nízká frekvence tak se obvykle uvažují pouze ztráty v železe statoru. [7][8]

Ztráty mechanické – jsou složeny ztrátami v ložiskách a ventilačními. Ztráty v ložiskách jsou závislé na druhu ložisek (valivá, kluzná), typu valivých elementů (kuličková, válečková, jehlová, atd.), způsobu mazání a na rozměru ložiska. Ventilační ztráty jsou závislé na způsobu ventilace, chladícím médiu (vzduch, vodík), na tlaku a rychlosti proudícího média. Vzhledem k počtu parametrů, na kterých mechanické ztráty závisí, je jasné že je nelze určit přesně. Ovšem existuje mnoho empirických vztahů podle druhu stroje. [7][8] Například dle [7] jsou mechanické ztráty pro asynchronní motor s povrchovým chlazením:

$$\Delta P_m = 1,3(1 - D_e) \left(\frac{n}{10} \right)^2 D_e^4 \text{ [W; m, ot} \cdot \text{min}^{-1}] \quad (3)$$

kde D_e je vnější průměr statoru a n jsou otáčky.

Přídavné ztráty – jsou způsobeny např.: drážkováním, rozptylovým polem v čelech nebo i v konstrukčních částech v okolí čel. Tyto ztráty se určují velice obtížně, a proto se odhadují jako 0,5% z příkonu stroje. [7][8]

Tabulka 3.3 - Ztráty motoru

Statorové vinutí (Cu)	ΔP_{j1}	1417 W
Rotorová klec (Al)	ΔP_{j2}	637 W
Statorový svazek (Fe)	ΔP_{Fe1}	545 W
Rotorový svazek (Fe)	ΔP_{Fe2}	230 W
Mechanické	ΔP_m	125 W
Přídavné	ΔP_d	153 W

4 Proudění plynů a kapalin

Proudění plynů a kapalin je důležitá a rozsáhlá část technické fyziky. Proudění je pohyb částice tekutiny, která se pohybuje svým neuspořádaným způsobem a zároveň se pohybuje ve směru proudění.

4.1 Plyny a kapaliny

Jejich základní společnou vlastností je tekutost, proto se také často nazývají tekutiny. V tekutinách se částice snadno vzájemně pohybují, a proto nejsou tekutiny schopné udržet svůj stálý tvar. Díky tekutosti dokonale vyplňují nádobu, ve které se nacházejí. Plyny jsou rozpínavé, což znamená, že vyplňují celý prostor a jsou dobře stlačitelné. Kapaliny jsou stlačitelné jen nepatrně a zachovávají si objem, což znamená, že za klidu vytvářejí hladinu.

Odpor tekutiny na změnu tvaru se nazývá viskozita (též vazkost). Je to veličina, která charakterizuje vnitřní tření v tekutině a závisí na přitažlivých silách mezi částicemi tekutiny. Větší viskozita znamená větší vnitřní tření, což způsobuje zpomalení pohybu tekutiny. V ideální tekutině nepůsobí žádné vnitřní tření, z čehož vyplývá, že její viskozita je nulová. [1][9]

4.2 Typy proudění tekutin

4.2.1 Proudění ideální tekutiny

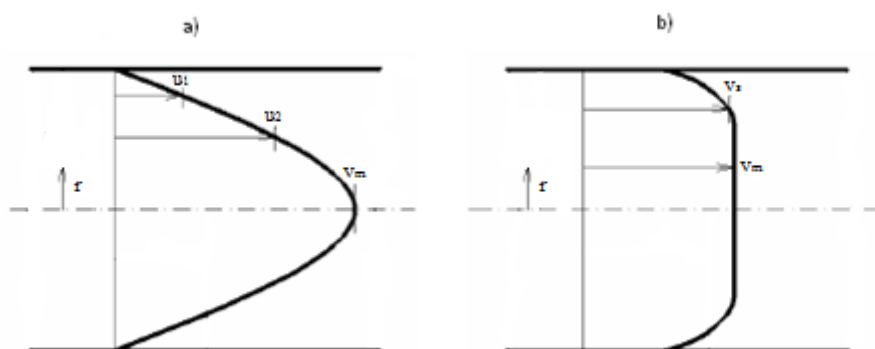
Potenciální proudění (nevířivé) – je takové proudění kdy částice tekutiny se pohybují přímočaře nebo křivočaře po dráze ale neotáčejí se kolem své osy. Pohyb po křivé dráze je kompenzován natočením částice kolem své osy v opačném smyslu. Také sem patří tzv. potenciální vír, kdy částice krouží kolem středového vlákna potenciálně. [9][10]

Vířivé proudění – Částice kromě posuvného pohybu vykonávají ještě pohyb kolem své osy za vzniku vírů. [9][10]

4.2.2 Proudění vazkých tekutin

U vazkých kapalin rozlišujeme dva druhy proudění – laminární a turbulentní. Jaký typ proudění se bude vyskytovat v daném kanálu, závisí na mnoho faktorech, jako je rychlost, viskozita a hustota tekutiny, dále také na velikosti, tvaru a drsnosti kanálu. Experimentálně bylo nalezeno bezrozměrné číslo udávající charakter proudění – Reynoldsovo číslo. [1]

Tekutina proudící kruhovým kanálem v ustáleném stavu má u stěn kanálu nulovou rychlost a uprostřed kanálu maximální. U laminárního proudění tvoří průběh rychlosti jednotlivými vrstvami parabolu druhého stupně (Obr. 4.1a), stejně tomu je i u turbulentního proudění ovšem parabola je vyššího řádu (Obr. 4.1b).



Obr. 4.1 – Rychlost proudění v kruhovém kanálu: a) laminární, b) turbulentní [1]

Laboratorními experimenty prokázaly, že přechod mezi laminárním a turbulentním prouděním je přibližně kolem $Re = 2000$. [1]

Laminární proudění – je proudění, které nastává pro malé rychlosti tekutiny. Jednotlivé vrstvy tekutiny se pohybují ve směru proudění, aniž by se pohybovaly po průřezu. V elektrických strojích se používá proudění pro odvod tepla, a proto se zde laminárnímu proudění vyhýbáme, protože je zde podstatně nižší přestup tepla než u proudění turbulentního. [1][9]

Turbulentní proudění – nastává pro vyšší rychlosti proudící tekutiny. Molekuly tekutiny se již nepohybují klidně ve směru proudění, ale také neuspořádaně vybočují ze směru proudění. Vzhledem k tomu, že jednotlivé proudnice se přemísťují po průřezu tak dochází k velmi dobrému přestupu tepla, a proto je turbulentní proudění žádoucí tam kde se jedná o odvod tepla. [1][9]

Přechodné proudění – je stav mezi laminárním a turbulentním prouděním, kdy může v části kanálu být laminární a v další části už turbulentní proudění. Vzhledem k tomu že hranice mezi laminárním a turbulentním prouděním ($Re = 2000$) byla určena experimentálně na hladkých kruhových kanálech, používá se spíše přechodové pásmo $Re = 1800 - 4000$. Přechod mezi druhy proudění závisí na mnoha vlivech (chvění, drsnost stěn, excentricita, charakter proudění na vstupu, atd.), které mohou turbulenci podporovat nebo zmírňovat. [1][9]

5 Oteplení a chlazení asynchronního motoru

5.1 Oteplení

Teplo se v asynchronním stroji vytváří všude, kde vznikají nějaké ztráty. Šíří se strojem a do okolí pomocí vedení, sálání a konvekce. Pokud je stroj konstantně zatížen tak po určitém čase dosáhne rovnovážného tepelného stavu, kdy se teplo vnikající a teplo odvedené sobě rovnají. Tím se ve stroji vytvoří ustálené tepelné pole, které udržuje konstantní oteplení částí stroje. Dle [7] je průběh oteplení statorového a rotorového vinutí:

$$\Delta\theta = \theta_0 + (\theta - \theta_0)(1 - e^{-t/T_g}) \quad [^\circ\text{C}; \text{ }^\circ\text{C}, \text{ s, s}] \quad (4)$$

kde θ_0 , θ je střední ustálené oteplení vinutí na začátku/na konci oteplování, t je čas, $\Delta\theta$ je střední oteplení vinutí v čase t . Časová konstanta T_g se určí jako:

$$T_g = \frac{(\sum c_p G)\theta}{\sum \Delta P} \text{ [s; J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}, \text{ kg, °C, W]} \quad (5)$$

kde c_p je měrné teplo, G je hmotnost vodičů vinutí, izolace a zubů, θ je ustálené oteplení vinutí a $\sum \Delta P$ je součet ztrát ve vinutí a v zubech.

Určení oteplení stroje je velmi důležité. Izolační materiály mají velkou závislost parametrů na teplotě a navíc s rostoucí teplotou velmi rychle klesá jejich životnost a tím i spolehlivost stroje. Ovšem teplotní pole v asynchronním motoru je velmi složité, závislé na prostorovém rozložení ztrát, na směru, rychlosti a průtočném množství chladícího média. Také je třeba přihlížet k tomu, že mnoho asynchronních motorů pracuje v podmínkách s častými rozběhy, kdy hodnoty proudů ve vinutí dosahují několikanásobků jmenovité hodnoty. Případně mohou pracovat s proměnným zatížením. [7]

5.2 Způsoby šíření tepla

5.2.1 Šíření tepla vedením

Vedení tepla se uskutečňuje v důsledku vibrací molekul v pevné látce. Vyskytuje se i v plynech a kapalinách, ale zde převládá přestup tepla prouděním. Teplo se přenáší z části s vyšší teplotou do části s nižší teplotou a je úměrné teplotnímu spádu [11].

$$q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \text{ [W}\cdot\text{m}^{-2}; \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}, \text{ °C, m]} \quad (6)$$

kde q je hustota tepelného toku, λ je součinitel tepelné vodivosti a $\frac{\partial T}{\partial x}$ je teplotní spád ve směru x .

Vzhledem k tomu že teplo se může šířit všemi směry v materiálu a ne pouze ve směru x lze tuto rovnici zapsat jako [9]:

$$q = -\lambda \cdot \text{grad}(T) \text{ [W}\cdot\text{m}^{-2}; \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}, \text{ °C]} \quad (7)$$

Což je označováno jako Fourierův zákon. Součinitel tepelné vodivosti může být jak velmi nízký (např. $0,1 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$ pro izolační materiály), tak i velmi vysoký (např. $400 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$ pro měď). Vzduch má tepelnou vodivost $0,026 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$ při pokojové teplotě. [11]

5.2.2 Šíření tepla sáláním

Tento způsob šíření tepla se v elektrických strojích příliš neuplatňuje. Přenos tepla sáláním je způsoben elektromagnetickými vlnami, které jsou vyzařovány do prostoru z povrchu tělesa. Jako jediný způsob šíření tepla může probíhat i ve vakuu. Pro tepelný tok platí Stefan-Boltzmannův zákon [9]:

$$q = \sigma \varepsilon T^4 \text{ [W}\cdot\text{m}^{-2}; \text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}, -, \text{K}] \quad (8)$$

kde σ je Stefan-Boltzmannova konstanta ($5,67\cdot 10^{-8} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$) a ε je emisivita (nebo také stupeň černosti).

5.2.3 Šíření tepla prouděním

Přenos tepla prouděním je uskutečněn pohybem tekutiny. Pohyb tekutiny může být způsoben vztlakovou silou, což se nazývá přirozené proudění. Jako druhý způsob pohybu tekutiny je nucené (umělé) proudění, které je vyvolané vnějším zdrojem (ventilátor, kompresor, čerpadlo). Teplo přenesené z povrchu do tekutiny může být vyjádřeno pomocí Newtonova zákona: [11]

$$Q = \alpha S (T_t - T_p) \text{ [W}; \text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}, \text{m}^2, \text{K}] \quad (9)$$

kde α je součinitel přestupu tepla, S je plocha povrchu, T_t je teplota tekutiny a T_p je teplota povrchu. Určení součinitele přestupu tepla je velmi obtížné vzhledem k počtu parametrů, na kterých závisí, jako je například rychlost proudění, charakter proudění, druh tekutiny, teplota, atd. Pro zjednodušení určení součinitele přestupu tepla se používají bezrozměrná čísla jako Nusseltovo číslo (Nu), Reynoldsovo číslo (Re), Prandtlovo číslo (Pr) nebo Grashofovo číslo (Gr). Pro přirozené proudění je obvykle vztah udáván jako: [12]

$$Nu = a(Gr Pr)^b \quad (10)$$

a pro umělé proudění je obvykle používán vztah:

$$Nu = a(Re)^b (Pr)^c \quad (11)$$

kde koeficienty a , b a c jsou empiricky určené konstanty závislé na situaci. Také platí:

$$Re = \frac{vL}{\nu} [-; m \cdot s^{-1}, m, m^2 \cdot s^{-1}] \quad (12)$$

$$Gr = \frac{\beta \Delta T g L^3}{\nu^2} [-; ^\circ C^{-1}, ^\circ C, m \cdot s^{-2}, m, m^2 \cdot s^{-1}] \quad (13)$$

$$Pr = \frac{\mu c_p}{\lambda} [-; kg \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}, kJ \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}, W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}] \quad (14)$$

$$Nu = \frac{\alpha L}{\lambda} [-; W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C, m, W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}] \quad (15)$$

kde v je rychlost proudění, L je charakteristický rozměr, ν je kinematická viskozita, β je koeficient objemové roztažnosti ($1/(273+T_1)$), ΔT je rozdíl teplot stěny a tekutiny, g je tíhové zrychlení, μ je dynamická viskozita, c_p je měrná tepelná kapacita a λ je tepelná vodivost.

5.2.4 Součinitel přestupu tepla při samovolné konvekci

Při přirozeném proudění se Nusseltovo číslo určí pomocí Grashofova a Prandtlova čísla pomocí vztahu (10) kde koeficienty a a b jsou dány následující tabulkou. [13]

Tabulka 5.1 - koeficienty pro samovolné proudění

Gr·Pr	a	b
$< 1 \cdot 10^{-3}$	0,45	0
$1 \cdot 10^{-3} \div 5 \cdot 10^2$	1,18	0,125
$5 \cdot 10^2 \div 2 \cdot 10^7$	0,54	0,25
$2 \cdot 10^7 \div 1 \cdot 10^{13}$	0,195	0,333

5.2.5 Součinitel přestupu tepla při nuceném proudění povrchově chlazeného stroje

Tyto stroje mají obvykle ventilátor připevněný na hřídeli a ten ofukuje povrch stroje, kde jsou zhotoveny žebra pro zvětšení ochlazovací plochy. Pokud je povrch hladký lze použít pro výpočet Nusseltova čísla: [12]

Laminární proudění ($Re < 5 \cdot 10^5$ a $0,5 < Pr < 50$):

$$Nu = 0,664 (Re)^{0,5} (Pr)^{0,33} \quad (16)$$

Turbulentní proudění ($Re > 5 \cdot 10^5$):

$$Nu = (0,037 (Re)^{0,8} - 871) (Pr)^{0,33} \quad (17)$$

5.2.6 Součinitel přestupu tepla ve vzduchové mezeře

Pro určení přestupu tepla přes vzduchovou mezeru byly naleznuty empirické vztahy na základě mnoha pokusů za použití soustředných válců. Pro určení charakteru proudění se používá Taylorovo číslo (Ta), které lze určit takto: [12]

$$Ta = Re \left(\frac{\delta}{R_r} \right)^{0,5} \quad [-; -, m, m] \quad (18)$$

kde δ je šířka vzduchové mezery, R_r je poloměr rotoru a Re je Reynoldsovo číslo kde je jako charakteristický rozměr použita šířka vzduchové mezery.

Pokud je $Ta < 41$ je proudění laminární a $Nu = 2$ a k přenosu tepla dochází pouze vedením. Pokud je $41 < Ta < 100$ je proudění vířivé a Nusseltovo číslo se určí jako:

$$Nu = 0,202(Ta)^{0,63} (Pr)^{0,27} \quad (19)$$

A pokud je $Ta > 100$ stává se proudění zcela turbulentní a Nusseltovo číslo je:

$$Nu = 0,386(Ta)^{0,5} (Pr)^{0,27} \quad (20)$$

6 Ansys CFX

Tato kapitola je zaměřena na popis rovnic a způsob jejich řešení v programu Ansys CFX. Informace v této kapitole jsou čerpány z [14].

6.1 Computational fluid dynamics (CFD)

CFD je počítačový nástroj pro simulaci chování proudění tekutin, přestupu tepla a dalších souvisejících fyzikálních procesů. Pracuje na principu řešení rovnic o proudění tekutin v nadefinované oblasti. S rostoucím výpočetním výkonem počítačů začal být proces analýza vytvořených modelů mnohem méně náročná na čas a tím i na náklady. Díky tomu je nyní CFD nedílnou součástí vývoje nových zařízení a pomáhá vývojářům zlepšovat jejich návrhy.

Rovnice popisující procesy hybnosti, tepla a přenosu hmoty se nazývají Navier-Stokesovy rovnice. Jsou to parciální diferenciální rovnice, které jsou analyticky neřešitelné, ovšem dají se zdiskretizovat a řešit numericky. Ansys CFX využívá pro řešení metody konečných objemů. Tato metoda spočívá v tom, že řešená oblast se rozdělí na malé oblasti (kontrolní oblasti) a zdiskretizované rovnice jsou opakovaně řešeny pro každou kontrolní oblast.

6.2 Rovnice řešené v CFX

6.2.1 Navier-Stokesova rovnice

$$\frac{\partial(\rho\mathbf{U})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\mathbf{U} \otimes \mathbf{U}) = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \mathbf{S}_M \quad (21)$$

kde ρ je hustota, \mathbf{U} je vektor rychlosti, p je tlak, \mathbf{S}_M je vnější zdroj síly a $\boldsymbol{\tau}$ je tenzor napětí vztahující se k rychlosti deformace kapaliny.

$$\boldsymbol{\tau} = \mu \left(\nabla \mathbf{U} + (\nabla \mathbf{U})^T - \frac{2}{3} \delta \nabla \cdot \mathbf{U} \right) \quad (22)$$

kde μ je dynamická viskozita, T je teplota a δ je jednotková matice.

V rovnici (21) představuje první člen zrychlení tekutiny, druhý člen představuje nelineární (proudivé) zrychlení, které pro vyšší Reynoldsova čísla způsobuje nestabilitu rovnice a tím náhodnost. První člen na pravé straně rovnice je gradient tlaku. Další člen představuje smyková napětí způsobené viskozitou tekutiny, které dále vyvolávají její deformaci.

6.2.2 Rovnice kontinuity

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U}) = 0 \quad (23)$$

Tato rovnice pouze udává konvektivní změnu toku tekutiny.

6.2.3 Rovnice vedení tepla

$$\frac{\partial(\rho h_{tot})}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} h_{tot}) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \nabla \cdot (\mathbf{U} \cdot \boldsymbol{\tau}) + \mathbf{U} \cdot \mathbf{S}_M + \mathbf{S}_E \quad (24)$$

kde h_{tot} je celková entalpie, λ je tepelná vodivost a \mathbf{S}_E je vnější zdroj energie.

První dva členy rovnice představují akumulaci tepla v tekutině. Druhý člen představuje přestup tepla v důsledku proudění tekutiny. První člen na pravé straně rovnice

představuje vedení tepla v tekutině. Další člen představuje teplo vyvolané deformací tekutiny a třetí člen je teplo způsobené pohybem.

6.3 Matematické modelování proudění

Modelování turbulentního proudění ještě není zcela vyřešené a neexistuje univerzálně platný model turbulence. Existuje ale mnoho turbulentních modelů založených na empirických poznatcích. Pro numerické modelování proudění existuje několik odlišných přístupů.

6.3.1 Přímá numerická simulace (DNS)

Metoda řeší základní rovnice bez jakéhokoliv zjednodušení. Tím narůstá potřeba výpočetního výkonu na hodnoty, které nejsou reálné v dohledné budoucnosti. Proto nelze touto metodou řešit praktické úlohy.

6.3.2 Reynoldsovo zprůměrování Navier-Stokesových rovnic (RANS)

Metoda je založena na použití statistických metod na modelované proudění. To znamená, že se z různě dlouhých časových okamžiků se vytvoří jejich střední hodnota a hodnota rozkmitu jakékoliv veličiny (rychlost, tlak, teplota, atd.).

Průměrovaná Navier-Stokesova rovnice

$$\frac{\partial \rho \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla \cdot \{ \rho \mathbf{U} \otimes \mathbf{U} \} = -\nabla p + \nabla \cdot \{ \tau - \overline{\rho \mathbf{u} \otimes \mathbf{u}} \} + \mathbf{S}_M \quad (25)$$

kde $\overline{\rho \mathbf{u} \otimes \mathbf{u}}$ představuje tenzor Reynoldsova napětí, které způsobuje další deformace tekutiny. Průměrovaná rovnice vedení tepla

$$\frac{\partial \rho h_{tot}}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} h_{tot}) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T - \overline{\rho \mathbf{u} h}) + \nabla \cdot (\mathbf{U} \cdot (\tau - \overline{\rho \mathbf{u} \otimes \mathbf{u}})) + \mathbf{S}_E \quad (26)$$

kde je přidán další člen ($\overline{\rho \mathbf{u} h}$) představující turbulentní tok.

Toto zjednodušení velmi sníží potřebu výpočetního výkonu počítače oproti přímé numerické simulace. Ovšem zvýší se počet proměnných, které je třeba určit pomocí vhodného modelu turbulence.

6.4 Modely turbulence

Problémem v průměrovaných Navier-Stokesových rovnicích je tenzor Reynoldsova napětí, který do výpočtu zanáší další neznámé. Tyto neznámé napomáhají řešit modely turbulence, což jsou přidavné a empirické rovnice, které pomáhají rovnice vyřešit.

Existuje mnoho modelů turbulence jako například Zero equation, Eddy viscosity transport, k- ω , a další. Detailnější popis bude proveden pro model turbulence k-Epsilon, který je použit v následně provedeném modelu.

6.4.1 Model k-epsilon

Jedná se o dvourovnicový model turbulence. První rovnice je pro turbulentní kinetickou energii k a představuje rozptyl kolísání rychlosti. Druhá rovnice představuje rychlost rozpadu turbulentních vírů ε .

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} k) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k + P_{kb} - \rho \varepsilon \quad (27)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \varepsilon) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} (P_k + P_{cb}) - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon) \quad (28)$$

kde $C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$, σ_k a σ_ε jsou empirické konstanty, P_{kb} a P_{cb} představují vliv vztlkových sil, μ_t je turbulentní viskozita a je definována vztahem, který zahrnuje jak turbulentní kinetickou energii, tak rychlost rozpadu vírů a P_k je turbulence vzniklá působením viskózních sil a jsou dány vztahy:

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (29)$$

$$P_k = \mu_t \nabla \mathbf{U} \cdot (\nabla \mathbf{U} + \nabla \mathbf{U}^T) - \frac{3}{2} \nabla \cdot \mathbf{U} (3\mu_t \nabla \cdot \mathbf{U} + \rho k) \quad (30)$$

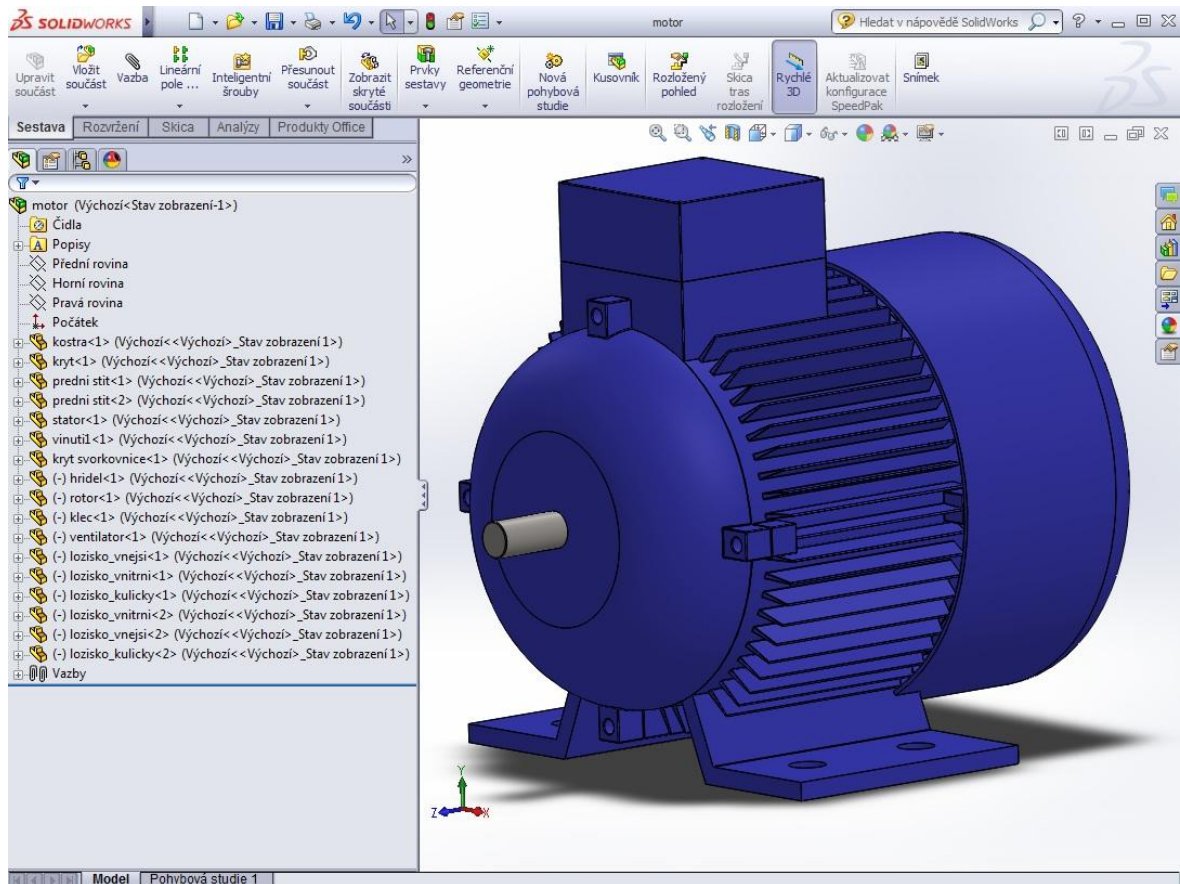
kde C_μ je empirická konstanta.

7 3D model asynchronního motoru

Pro vytvoření 3D modelu asynchronního motoru byl použit program SolidWorks, který je jednoduchý na použití a kompatibilní s následně používaným programem Ansys Workbench.

7.1 Vytvoření 3D modelu asynchronního motoru v programu SolidWorks

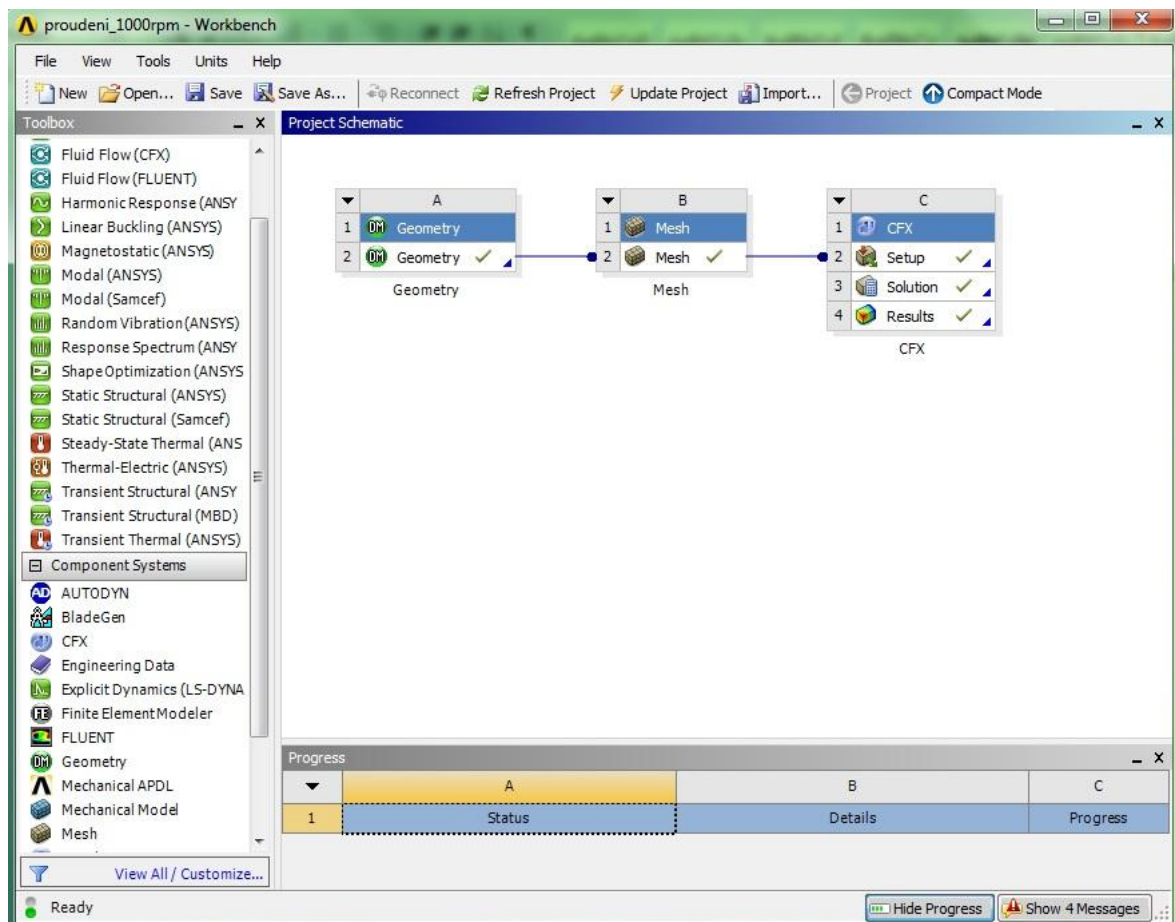
Program SolidWorks umožňuje provést 3D model asynchronního motoru tak že se vytvoří jednotlivé části motoru (statorový a rotorový plechový svazek, hřídel, kostra, ložiskové štíty, atd.) pomocí dostupných prvků jako samostatné díly, ze kterých se poté pomocí vazeb složí celý motor jako sestava. V levé části okna je vždy strom s provedenými činnostmi na modelu a v horní liště jsou dostupné nástroje pro práci s modelem. V pravé části je zobrazen vytvořený model. Na Obr. 7.1 je již hotový model asynchronního motoru v programu SolidWorks. Další ukázka vytvořeného 3D modelu asynchronního motoru je v příloze 1.



Obr. 7.1 - Model asynchronního motoru v programu SolidWorks

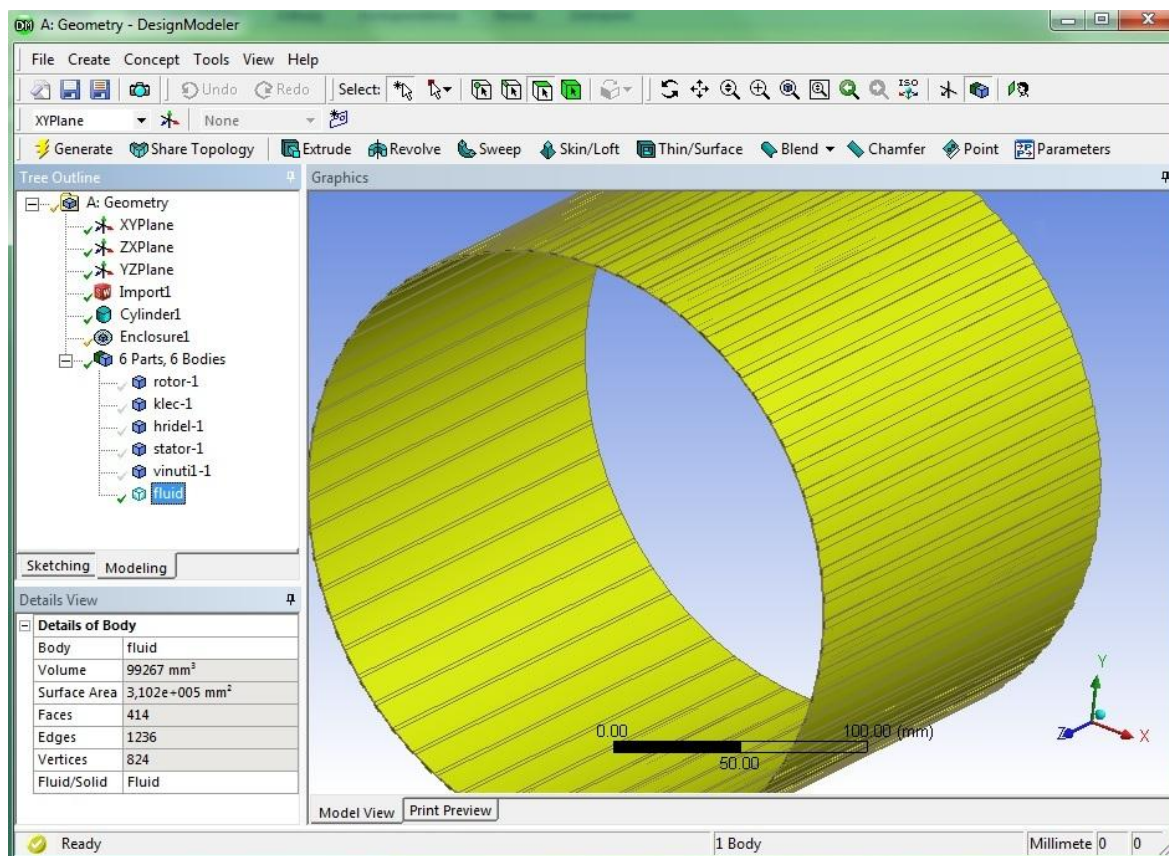
7.2 Vytvoření 3D modelu asynchronního motoru v programu Ansys

Po spuštění programu Ansys Workbench lze v levé nabídce vybrat různé komponenty a systémy analýz. Pro vytvoření geometrie byl použit komponent *Geometry*, do kterého byl importován již vytvořený model motoru v programu SolidWorks. Na Obr. 7.2 je ukázáno prostředí programu Ansys Workbench.



Obr. 7.2 - Prostředí programu Ansys Workbench

Po importování modelu z programu SolidWorks byl model ještě upraven pomocí programu DesignModeler, ve kterém byl dodělán prvek představující vzduch ve vzduchové mezeře motoru. Tento prvek byl vytvořen pomocí funkce *Enclosure*, která uzavře vybrané části. Vytvořený model vzduchové mezery je na Obr. 7.3.



Obr. 7.3 - Model vzduchové mezery v programu DesignModeler

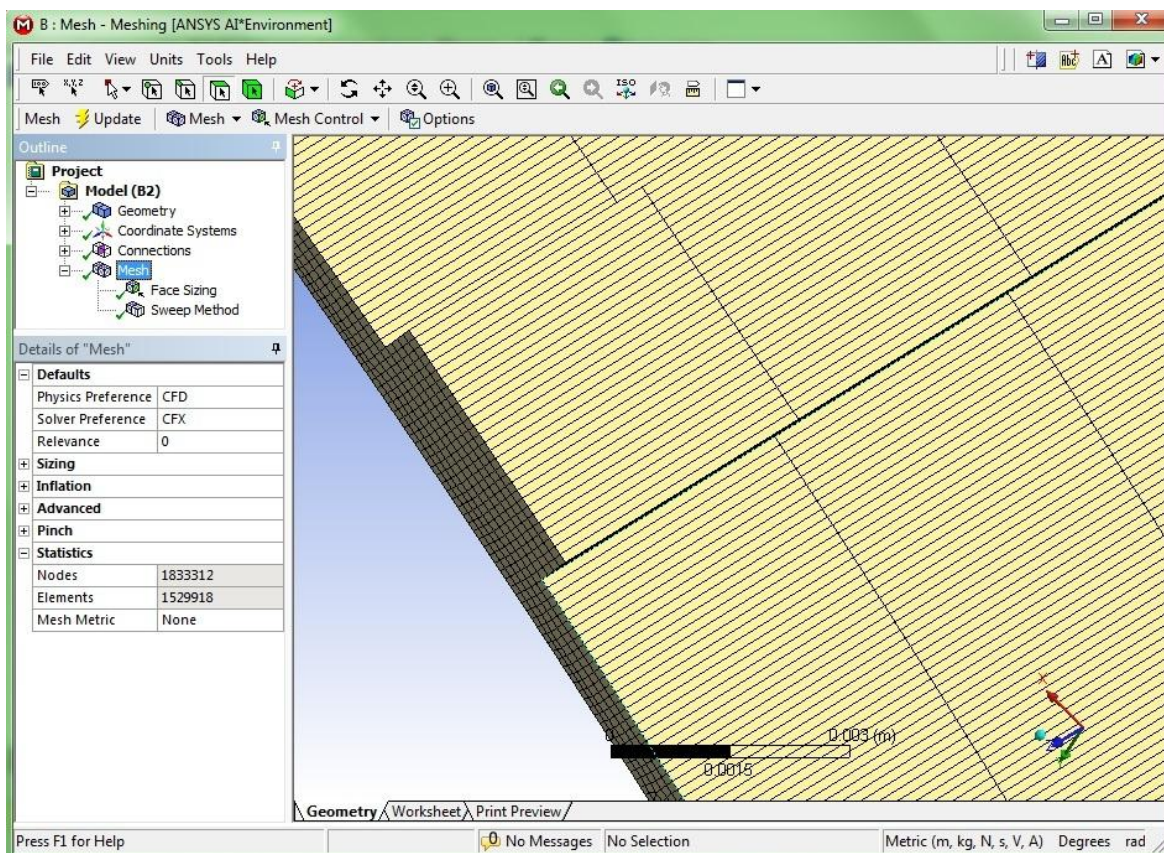
8 Výpočet vzniku proudění ve vzduchové mezeře

Pro vytvořený model je nejprve nutno vytvořit výpočetní síť, která bude použita pro výpočet proudění pomocí programu CFX, který je součástí Ansys Workbench.

8.1 Vytvoření výpočetní sítě

Pro vytvoření výpočetní sítě byl použit komponent *Mesh*, do kterého byl importován vytvořený model vzduchové mezery, jak je možné vidět z Obr. 7.2. Nejprve je třeba nastavit fyzikální podstatu sítě - *Physics Preference* na CFD a následně ještě topologii řešiče - *Solver Preference* na CFX. Po správném nastavení podstaty sítě lze přistoupit k samotnému nastavení parametrů sítě. Vzhledem k tomu že vzduchová mezera je po celé efektivní délce stroje stejná byla pro síť použita metoda *Sweep*, což je vysunutí sítě ve více vrstvách. Velikost elementu v příčném směru byla zvolena na 0,1 mm, aby v užší části vzduchové mezery bylo 5 elementů, což zajistí dostatečnou přesnost výpočtu proudění. Podélná velikost elementu byla zvolena 5 mm, což je také dostačující z hlediska přesnosti

výpočtu vzhledem k nutnému snížení celkového počtu elementů a tím zkrácení výpočetní doby. Na Obr. 8.1 je zobrazena část výpočetní sítě vytvořené v programu *Meshing*.

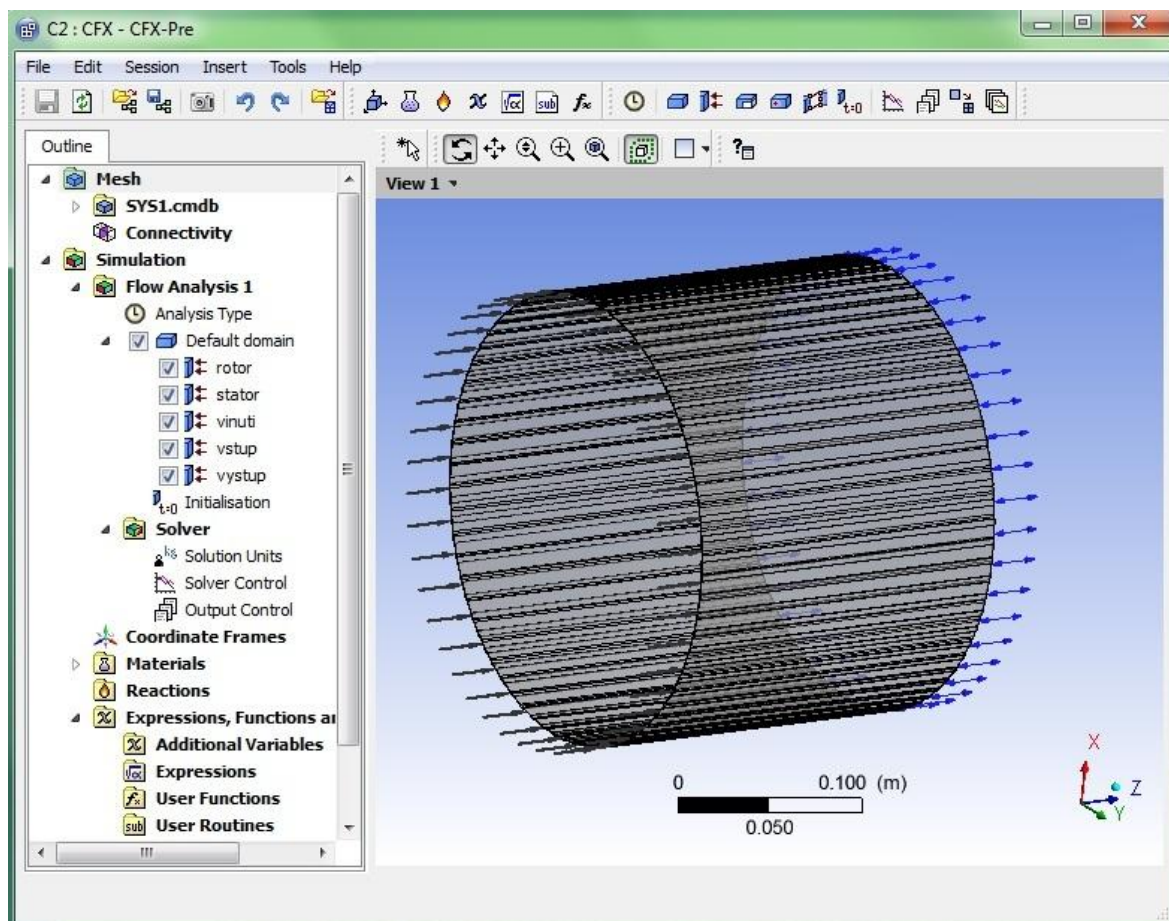


Obr. 8.1 - Výpočetní síť ve vzduchové mezeře v programu *Meshing*

Vytvořená výpočetní síť byla importována do programu CFX jak je možné opět vidět z Obr. 7.2.

8.2 Nastavení modelu vzduchové mezery v CFX-Pre

Po importování výpočetní sítě do programu CFX lze spustit nastavení výpočetního modelu CFX-Pre. Prostředí nastavení výpočetního modelu je na následujícím obrázku.

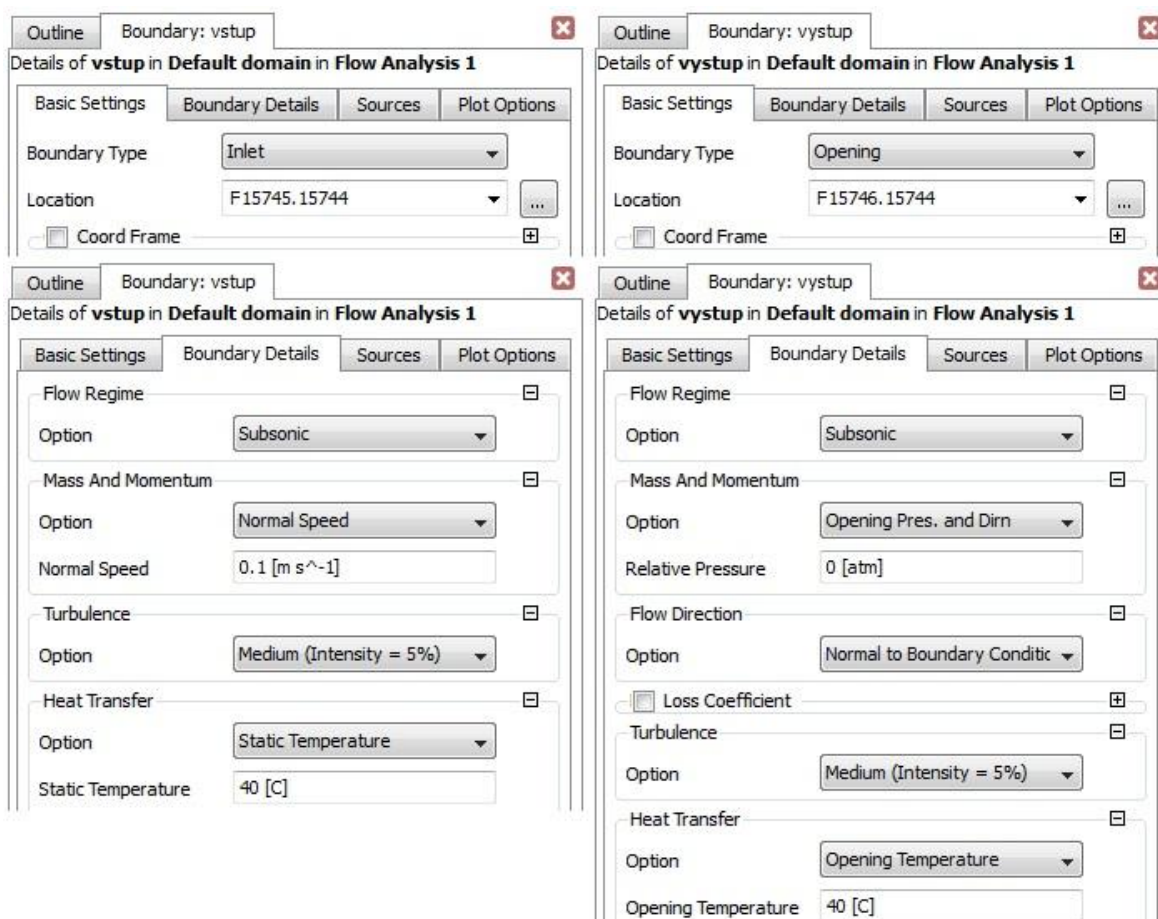


Obr. 8.2 - Vzduchová mezeře v CFX-Pre

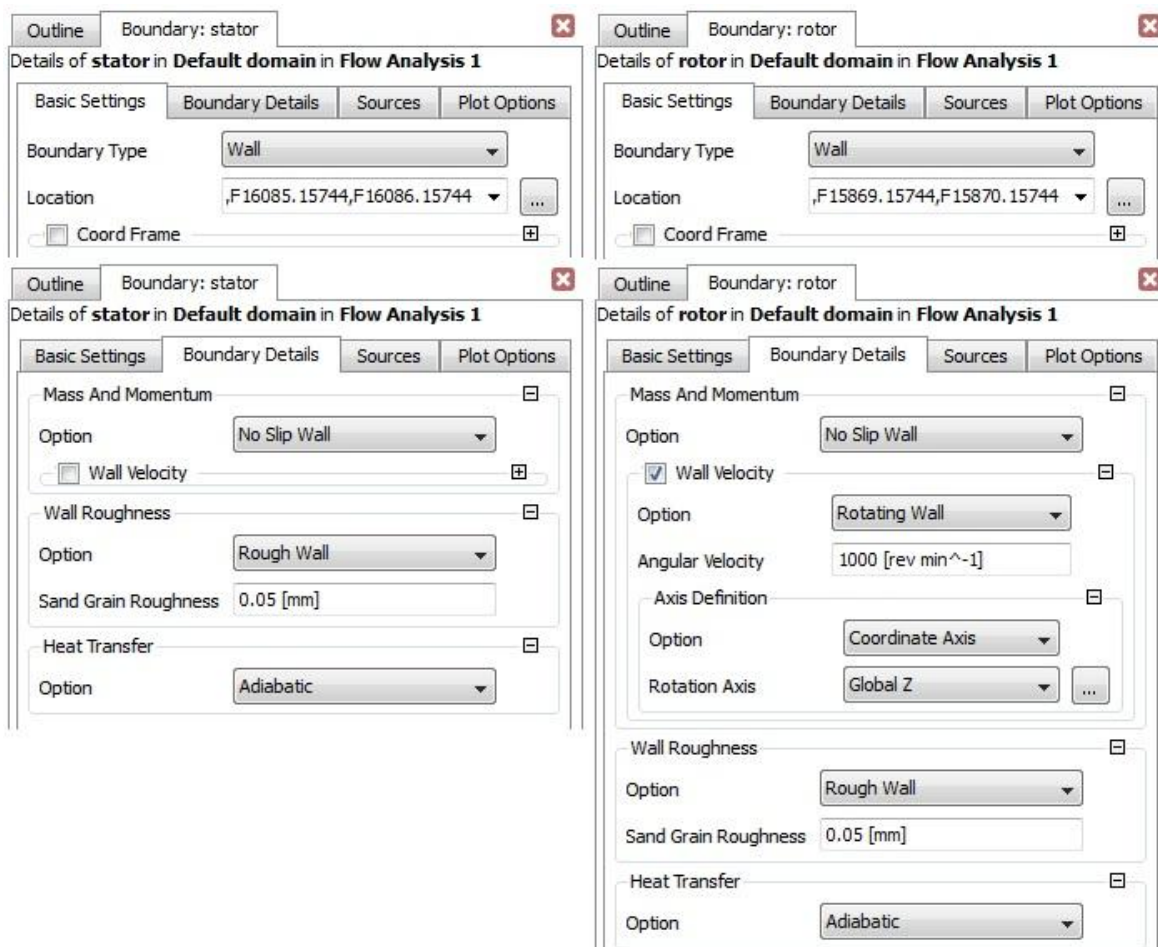
Jako první je třeba určit typ analýzy, byl zvolen ustálený stav – *Steady State*. Dále je třeba definovat hlavní doménu – *Default Domain*, což je právě vytvořený model vzduchové mezery. Jako typ domény byla zvolena proudící tekutina – *Fluid Domain*, dále jako materiál byl zvolen z knihovny vzduch při 25 °C a při atmosférickém tlaku 1 atm. Dále byl nastaven model turbulence *k-Epsilon* a problém byl nastaven s přestupem tepla – *Thermal energy*. Lze zde definovat mnoho dalších problémů z oblasti proudění, které jsou podrobněji uvedeny v [15].

Dále byly nastaveny jednotlivé části modelu - stator, rotor, vstup, výstup a vinutí. Pro vstup byla použita podmínka *Inlet*, ve které byl nastaven typ proudění jako podzvukové – *Subsonic* a dále byla nastavena normálová rychlost vstupu vzduchu do mezery na $0,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a také teplota vstupujícího vzduchu na 40 °C. Na výstupu byla použita podmínka *Opening* u které byl nastaven relativní tlak na 0 atm. a také teplota na 40 °C. Pro stator, rotor a vinutí byla použita podmínka *Wall*, kde byla nastavena jejich drsnost na 0,05 mm. Podmínky stator a vinutí mají stejné nastavení, ale pro přehlednost jsou nastaveny

odděleně. U podmínky rotor byla ještě nastavena osa a rychlost rotace. Vzhledem k tomu že tato práce se zabývá prouděním v závislosti na rychlosti otáčení rotoru, byl model propočítán pro několik rychlostí otáčení a to od 0 do 3000 $\text{ot}\cdot\text{min}^{-1}$ s krokem 500 $\text{ot}\cdot\text{min}^{-1}$. Nakonec je možné ještě nastavit přesnost a maximální počet kroků řešiče v položce *Solver Control*. Na následujících obrázcích je zobrazeno nastavení vstupu, výstupu, statoru a rotoru.



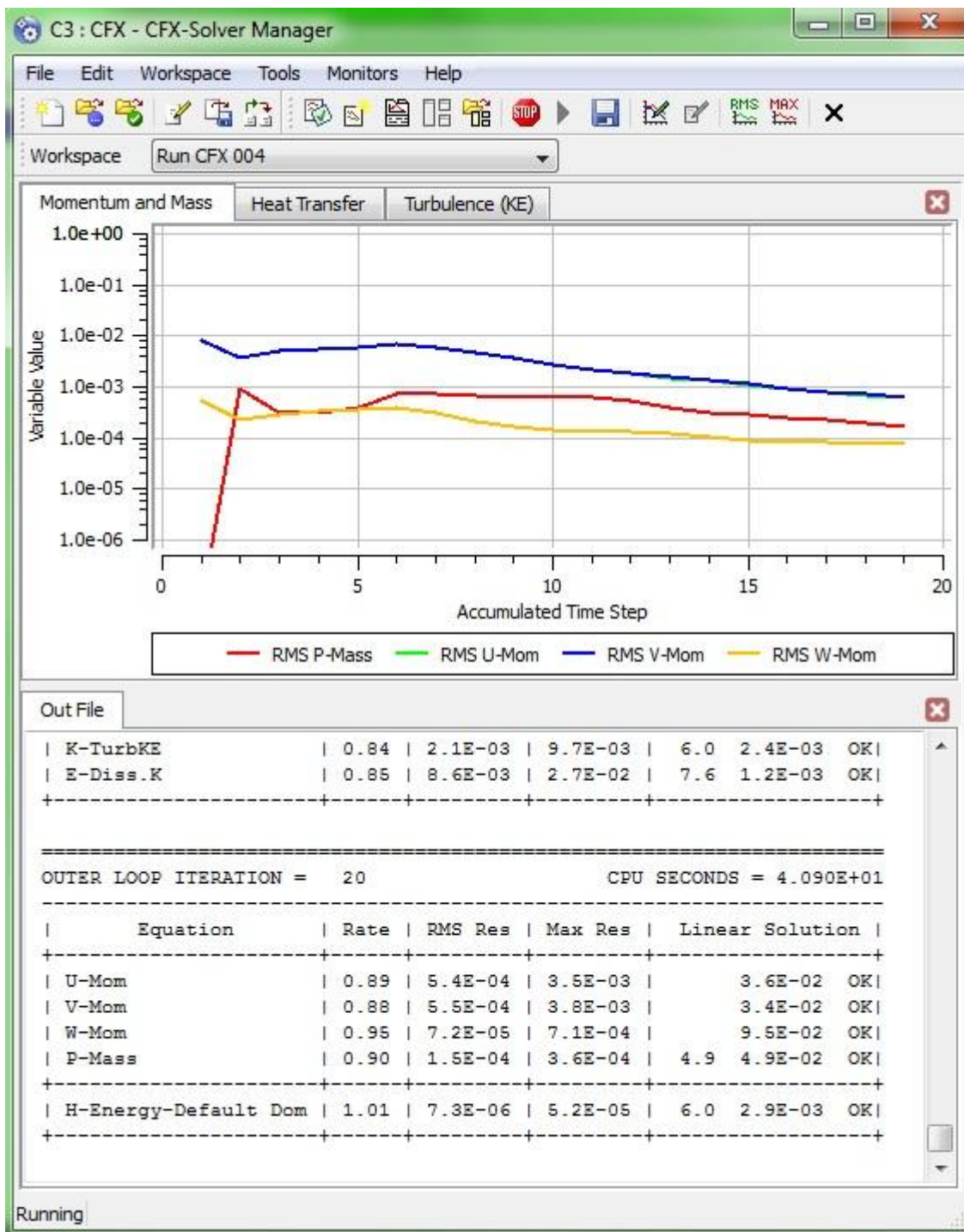
Obr. 8.3 - Nastavení vstupu a výstupu



Obr. 8.4 - Nastavení statoru a rotoru

8.3 Výpočet modelu vzduchové mezery v CFX-Solver

Po nastavení výpočetního modelu je možné přejít k výpočtu modelu v CFX-Solver, který spustíme z prostředí Ansys Workbench pomocí položky *Solution*. Prostředí programu CFX-Solver při probíhajícím výpočtu je zobrazeno na následujícím obrázku.

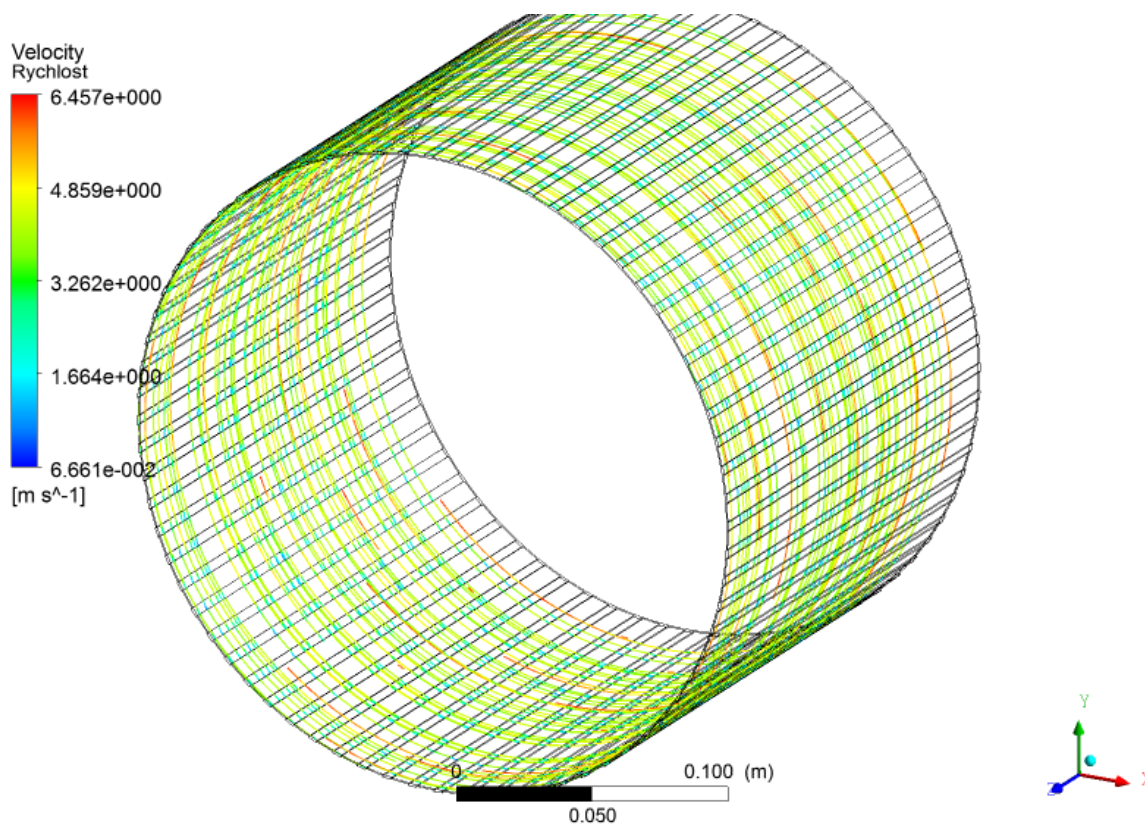


Obr. 8.5 - Prostředí řešiče CFX-Solver

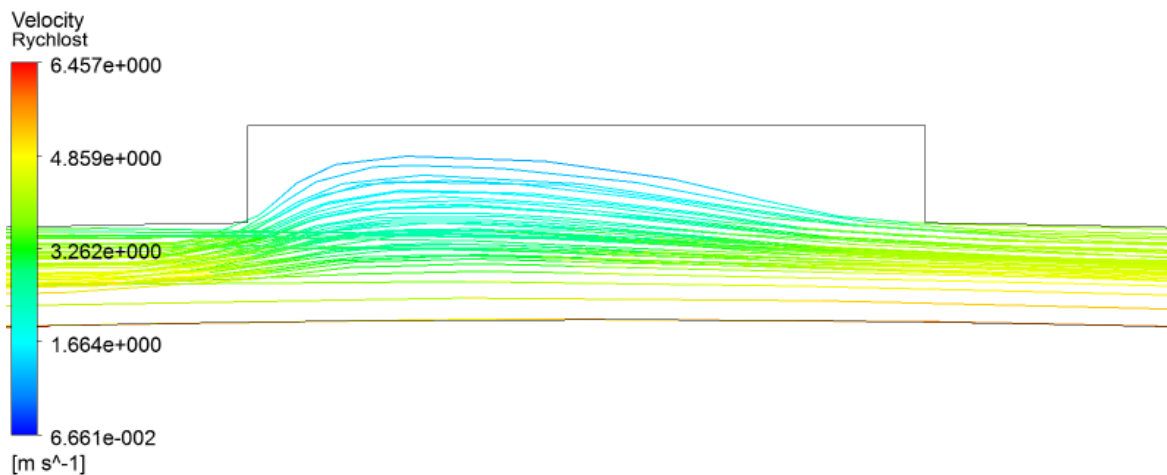
8.4 Vyhodnocení proudění ve vzduchové mezeře

Vypočtené výsledky z programu CFX-Solver lze otevřít v programu CFX-Post, který je udělán přímo na vyhodnocování proudění. Na Obr. 8.6 a Obr. 8.7 jsou zobrazeny proudnice rychlosti vzduchu ve vzduchové mezeře pro rychlost otáčení $1000 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$, pro ostatní počítané rychlosti jsou výsledky zobrazeny v příloze 2. Můžeme zde vidět, jak je

vzduch strháván otáčejícím se rotorem a také jak vzduch zabíhá do krčků drážek statoru. Také je patrné že rychlost vzduchu se snižuje s narůstající vzdáleností od rotoru.

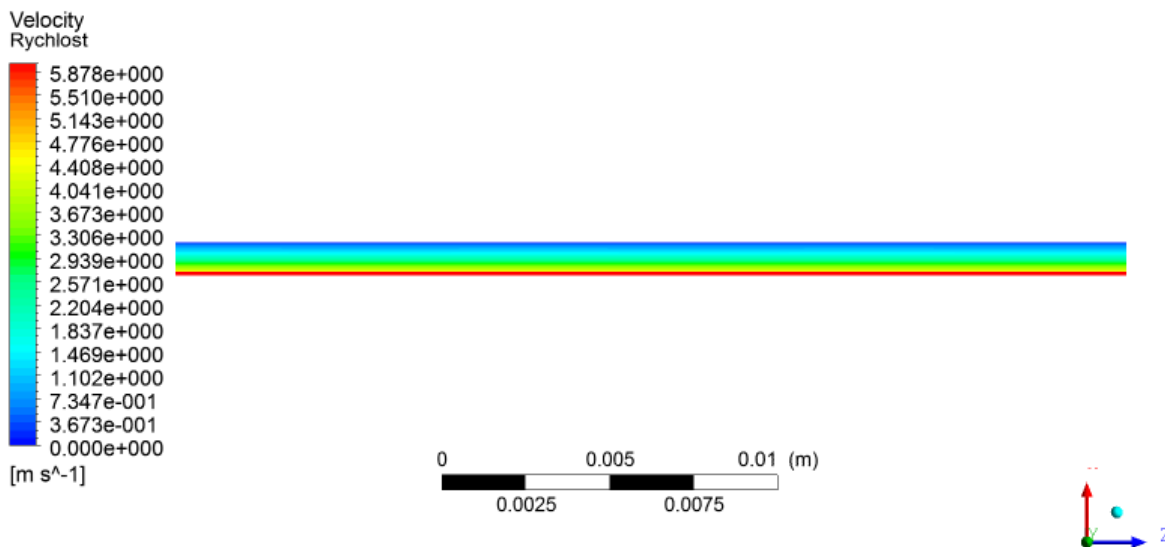


Obr. 8.6 - Rychlost proudícího vzduchu ve vzduchové mezeře, 1000 ot·min⁻¹



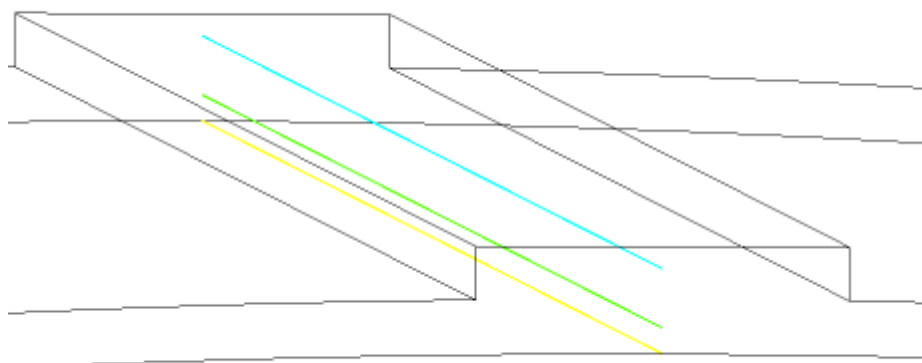
Obr. 8.7 - Detail na rychlost vzduchu ve vzduchové mezeře, 1000 ot·min⁻¹

Dále si lze zobrazit rychlost proudění vzduchu ve vzduchové mezeře v závislosti na délce vzduchové mezery. Na podélně vytvořenou plochu lze zobrazit kontury rychlosti vzduchu (viz. Obr. 8.8), kde můžeme lépe vidět, jak rychlost proudícího vzduchu klesá s rostoucí vzdáleností od rotoru.

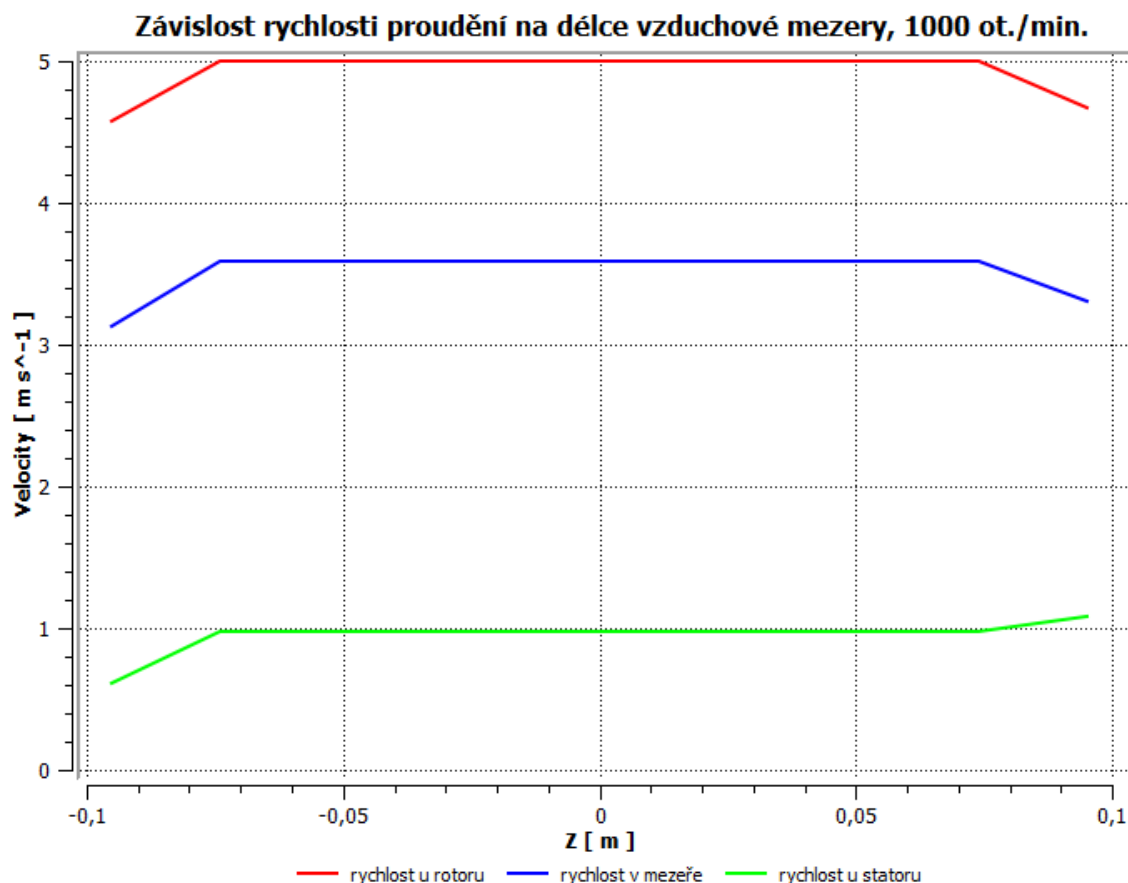


Obr. 8.8 - Rychlost vzduchu v podélném řezu části vzduchové mezery, 1000 ot·min⁻¹

Pro přesnější zobrazení vypočtených hodnot je možné vytvořit graf, který zobrazuje rychlost vzduchu u rotoru, statoru a ve vzduchové mezeře. Aby bylo možné tento graf vytvořit, musí se nejprve nadefinovat úsečky, z kterých se budou hodnoty rychlosti vzduchu odečítat (viz. Obr. 8.9). Graf 8.1 zobrazuje závislost rychlosti proudění vzduchu na délce vzduchové mezery pro 1000 ot·min⁻¹, grafy pro ostatní počítané rychlosti jsou v příloze 3. Z grafu je patrné, že v střední části je rychlost konstantní a závislá na vzdálenosti od pohybujícího se rotoru. V krajních částech vzduchové mezery dochází k poklesu rychlosti vlivem výstupu vzduchu do čelních prostor stroje.



Obr. 8.9 - Úsečky pro vykreslení grafu

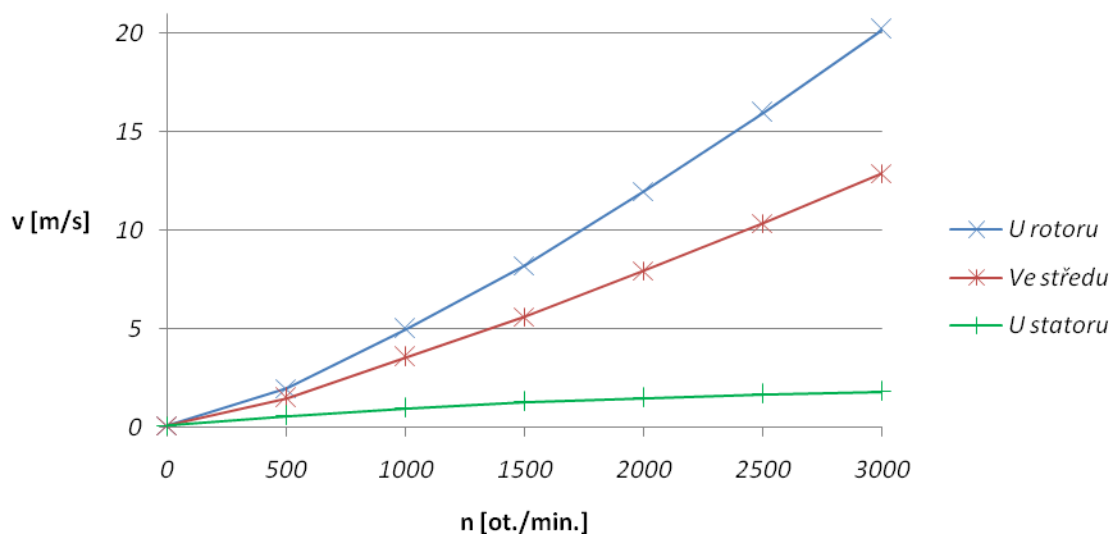


Graf 8.1 - Závislost rychlosti proudění na délce vzduchové mezeře, 1000 ot·min⁻¹

8.5 Vyhodnocení vlivu rychlosti otáčení rotoru na proudění ve vzduchové mezeře

Jak již bylo zmíněno, model byl spočítán pro několik rychlostí otáčení rotoru a to od 0 do 3000 ot·min⁻¹ s krokem 500 ot·min⁻¹. V Graf 8.2 jsou vyneseny rychlosti proudění vzduchu ve vzduchové mezeře v závislosti na rychlosti otáčení rotoru. Z grafu je patrné že rychlost proudění se zvyšuje nejvíce v blízkosti rotoru a naopak u statoru se rychlost proudění mění jen málo.

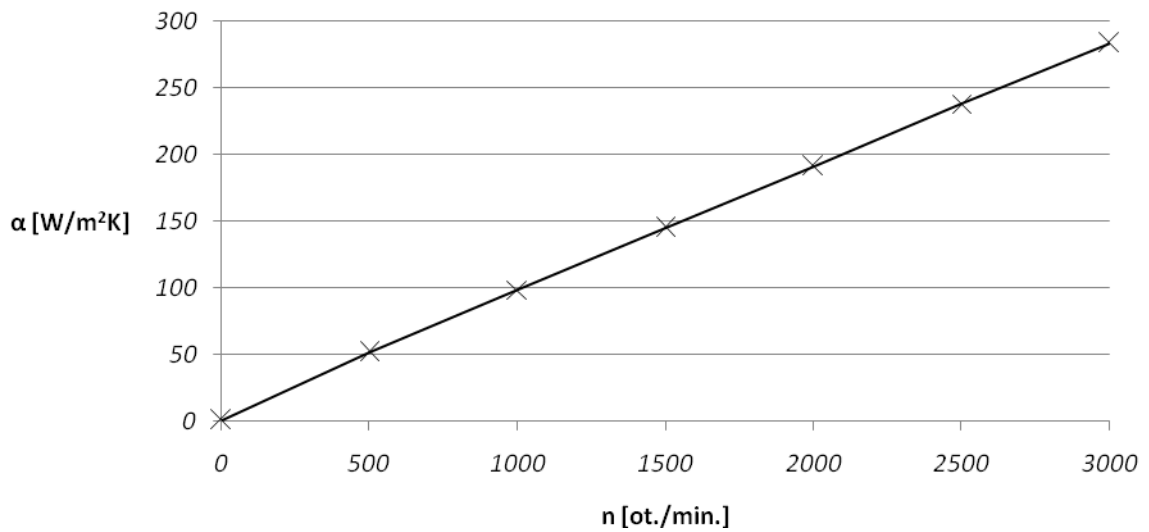
Závislost rychlosti proudění na otáčkách rotoru



Graf 8.2 - Závislost rychlosti proudění na otáčkách rotoru v různých pozicích ve vzduchové mezeře

S rychlostí proudění vzduchu úzce souvisí součinitel přestupu tepla α [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$]. Z následujícího grafu je patrné že s narůstajícími otáčkami a tím i narůstající rychlostí proudění se zvyšuje i součinitel přestupu tepla. Pro účel vytvoření grafu byla použita průměrná hodnota součinitele přestupu tepla u stěny rotoru z následujícího výpočtu proudění, kde byly uvažovány i ztráty vstupující do chladicího média.

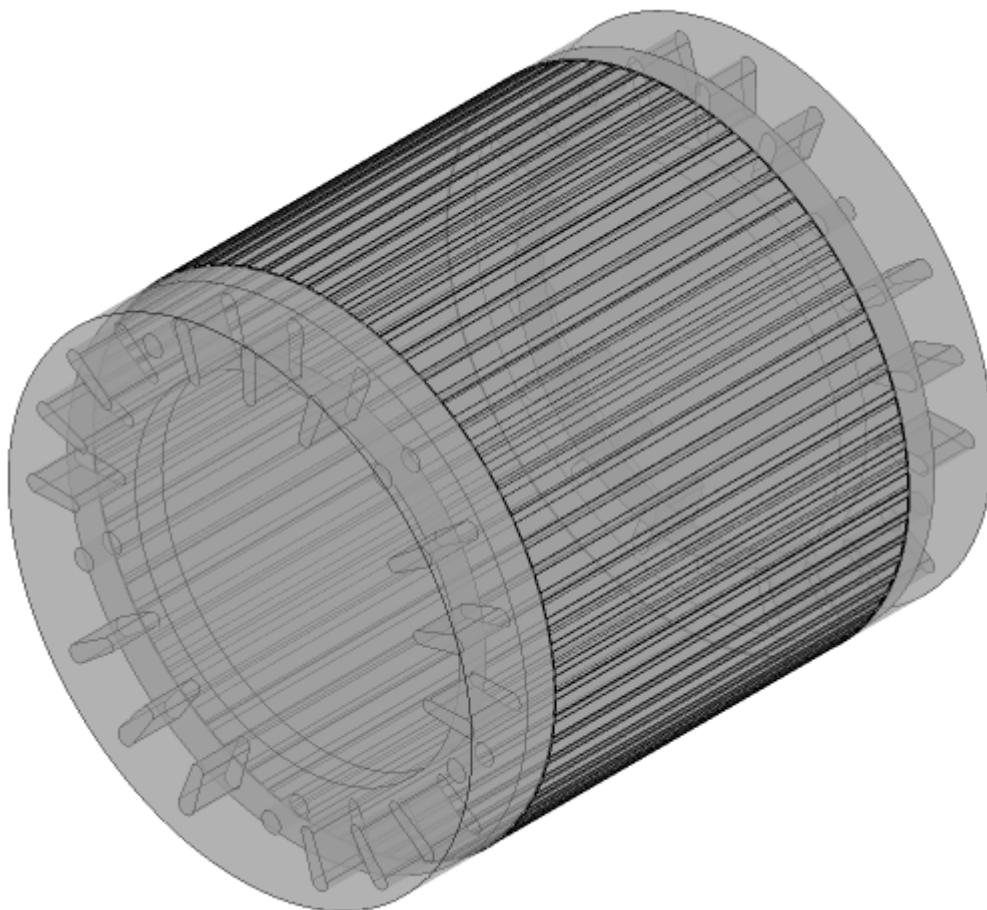
Závislost součinitele přestupu tepla na otáčkách rotoru



Graf 8.3 - Závislost součinitele přestupu tepla na otáčkách rotoru

9 Tepelná analýza rotorové klece

Pro tepelnou analýzu rotorové klece byla použita statická analýza – *Steady-State Thermal*, která je rovněž součástí programu Ansys Workbench. Byl použit stejný model motoru jako při výpočtu proudění a tepelná analýza byla také provedena pro několik rychlostí otáčení rotoru.



Obr. 9.1 - Model vzduchu okolo rotoru

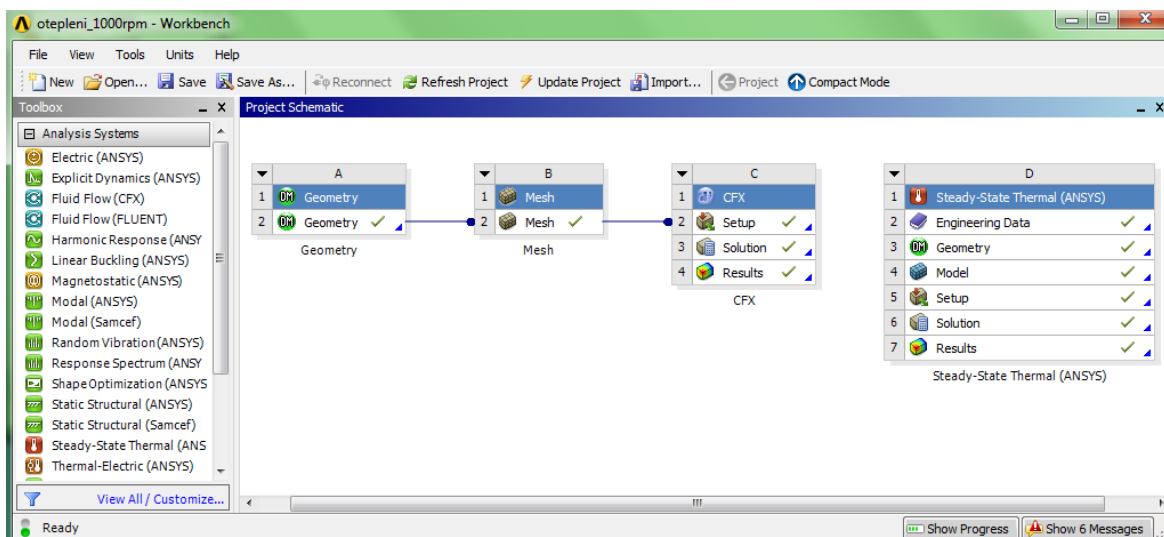
Pro účel tepelné analýzy byl vytvořen model vzduchu kolem rotoru, což je vzduchová mezera a čelní prostor rotoru kde se nachází kruhy rotorové klece (viz. Obr. 9.1). Opět bylo vypočteno proudění v těchto částech a to hlavně z důvodu získání součinitele přestupu tepla a teploty vzduchu v těchto částech. V následujících tabulkách jsou průměrné hodnoty součinitele přestupu tepla a teploty vzduchu u stěny rotoru ve vzduchové mezeře, u stěn kruhů rotorové klece a u čel plechového svazku. Tyto hodnoty jsou dále použity v teplotní analýze.

Tabulka 9.1 - Průměrné hodnoty součinitele přestupu tepla [$W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$]

rychlost [$ot \cdot min^{-1}$]	500	1000	1500	2000	2500	3000
ve vzduchové mezeře	52,28	98,45	145,05	191,46	237,65	283,62
kruhy klece	43,75	78,12	107,16	137,42	166,68	195,63
čela paketu	27,27	60,3	75,88	95,53	114,2	131,99

Tabulka 9.2 - Průměrná teplota vzduchu [$^\circ C$]

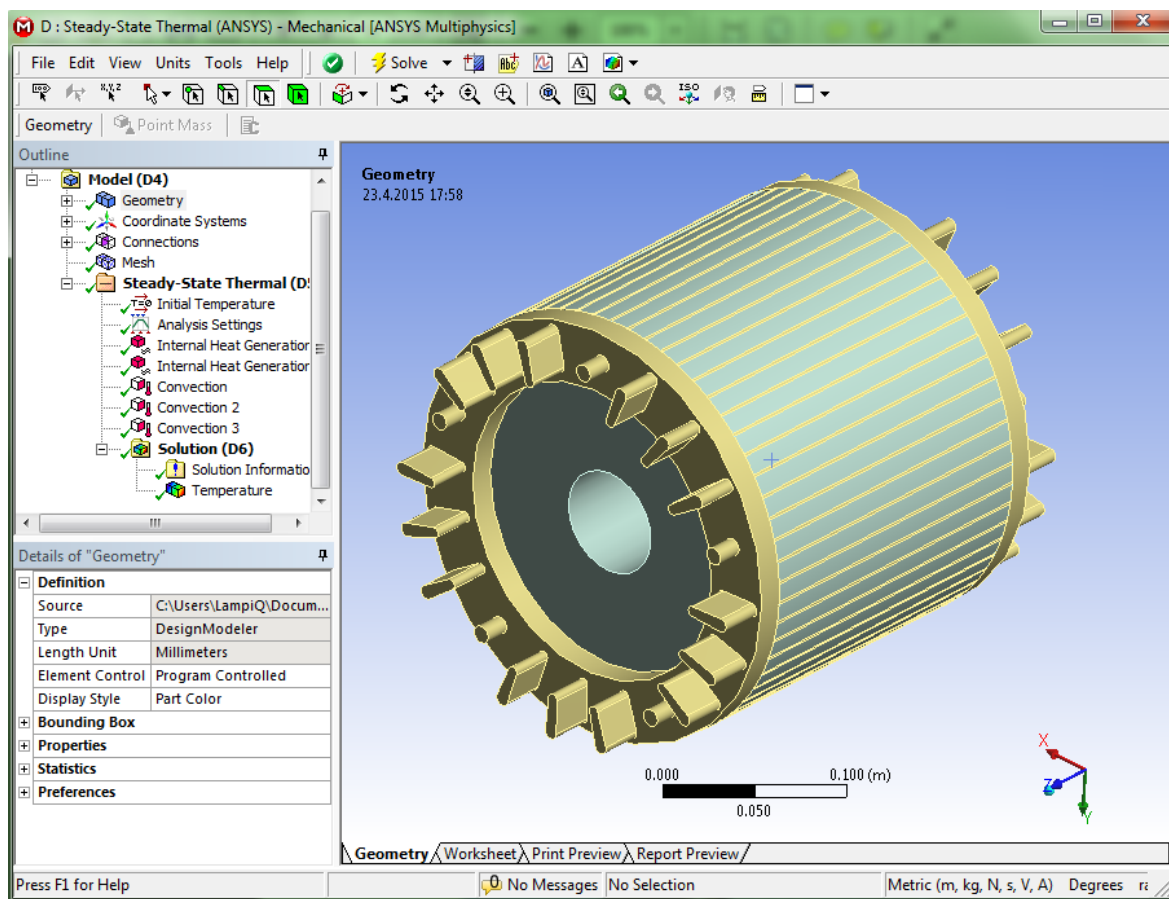
rychlost [$ot \cdot min^{-1}$]	500	1000	1500	2000	2500	3000
ve vzduchové mezeře	78	75	73	70	66	64
kruhy klece	67,3	66,8	64,9	63,6	59,9	57,9
čela paketu	64,4	45,9	45,5	45,1	44,8	44,4



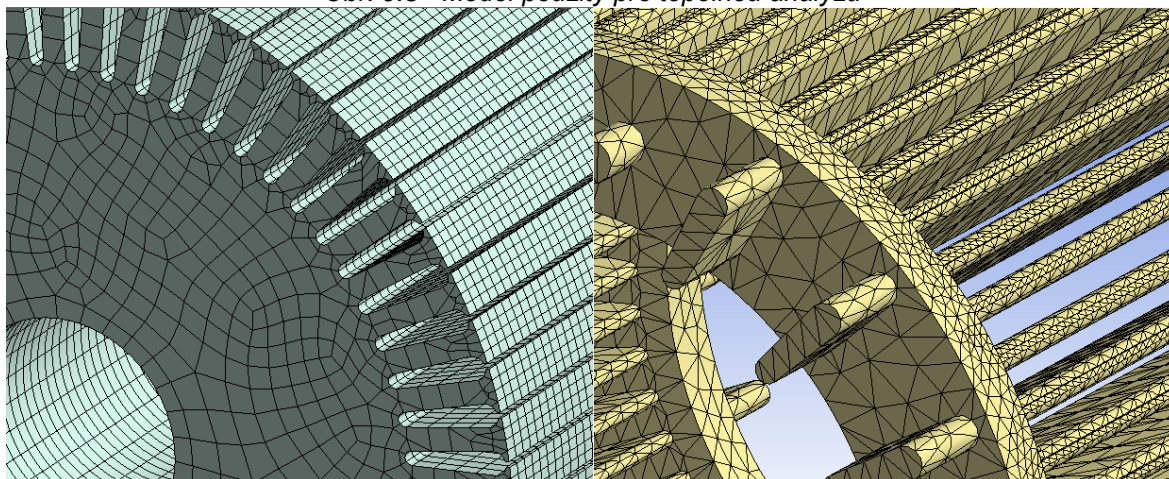
Obr. 9.2 - Projekt v programu Ansys Workbench pro tepelnou analýzu

9.1 Nastavení modelu pro tepelnou analýzu rotorové klece

Vzhledem k tomu že předmětem tepelné analýzy je rotorová klec tak postačí použít z celého modelu motoru pouze rotorový plechový svazek a klec (viz Obr. 9.3). Po importování příslušné geometrie je třeba nastavit materiál pro jednotlivé součásti. Plechový svazek – ocel a rotorová klec – hliník. Dále je třeba opět vytvořit výpočetní síť, která v tomto případě nemusí být tak jemná jako při výpočtu proudění.



Obr. 9.3 - Model použitý pro tepelnou analýzu



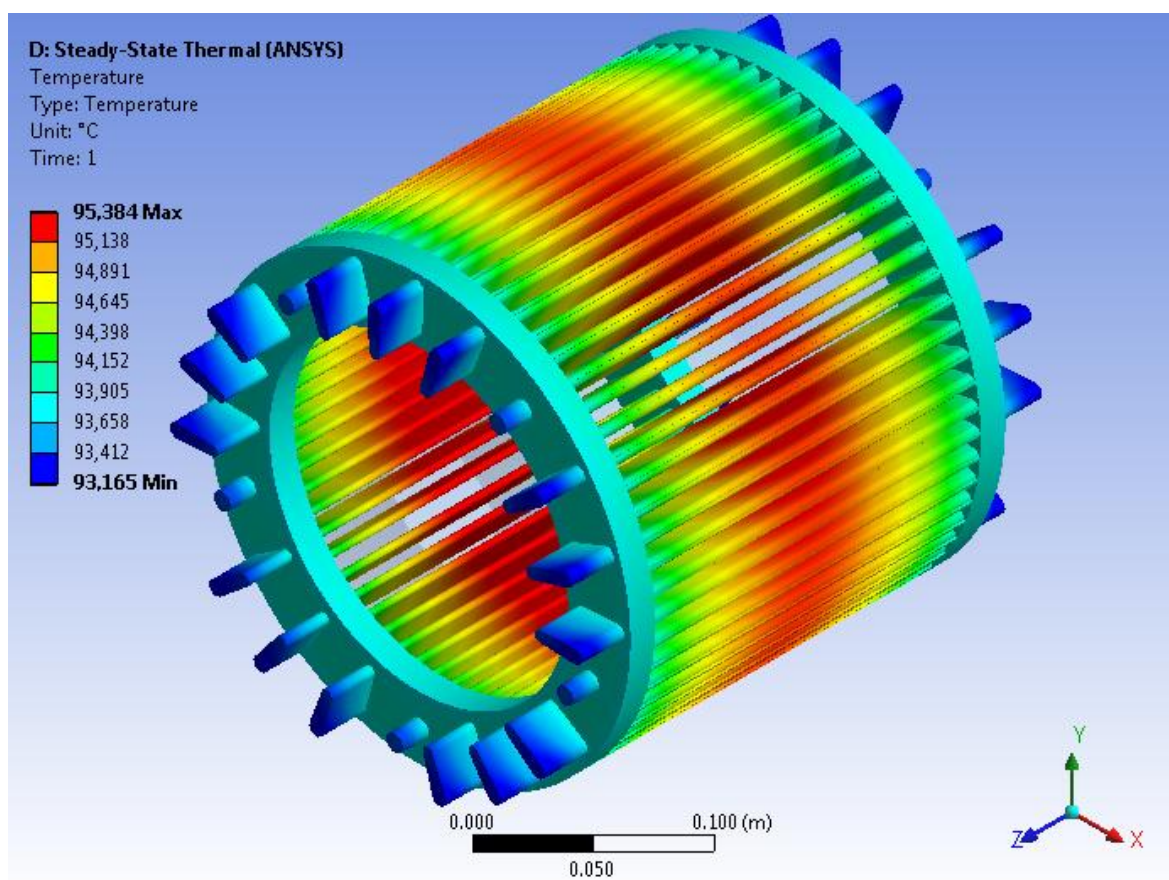
Obr. 9.4 - Výpočetní síť rotorového plechového svazku a klece pro tepelnou analýzu

Když je vytvořena výpočetní síť může se přestoupit k samotnému nastavení modelu. Nejprve byly nastaveny zdroje tepla v modelu – *Internal Heat Generation*, což jsou ztráty v rotorové kleci a plechovém svazku vztahované na objem jednotlivé části. Pro rotorovou klec jsou tyto ztráty $260700 \text{ W} \cdot \text{m}^{-3}$ a pro plechový svazek $14360 \text{ W} \cdot \text{m}^{-3}$.

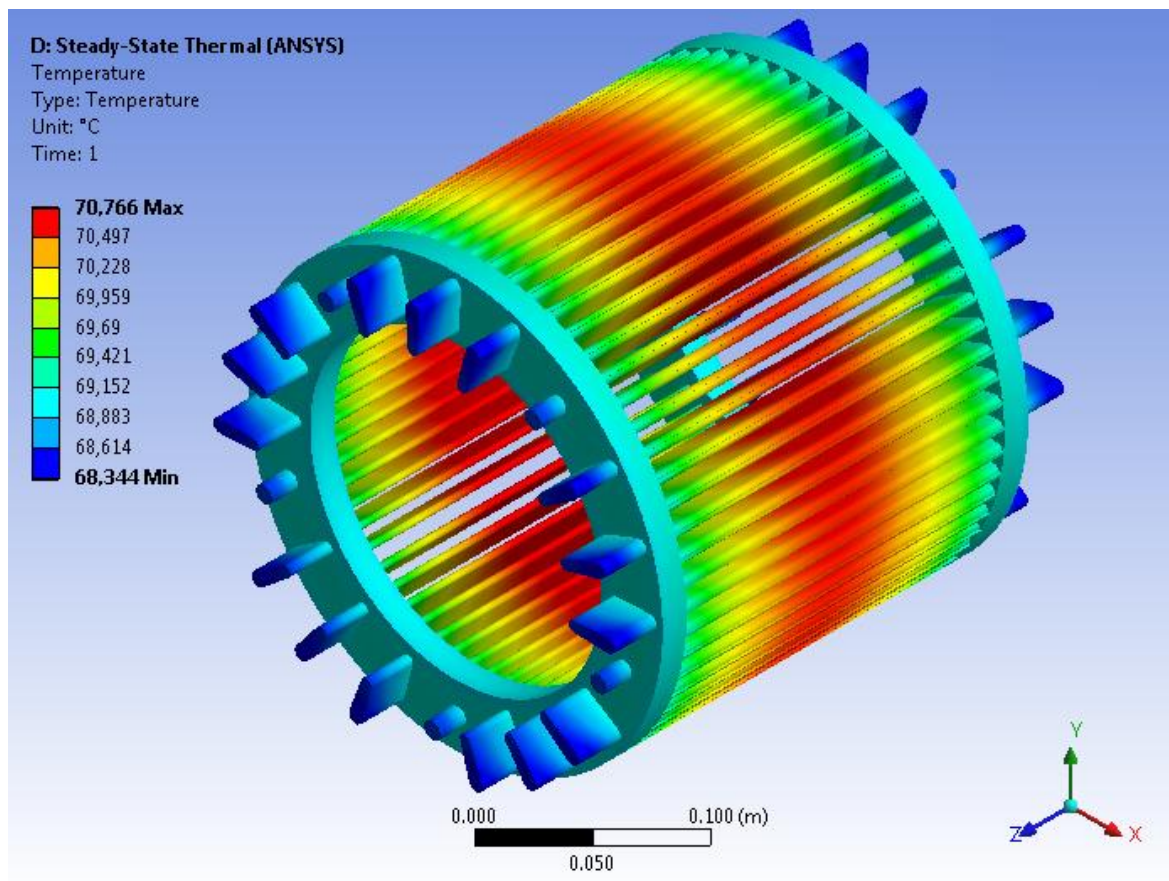
Dále je třeba nastavit proudění - *Convection*, které rotor ochlazuje. V tomto nastavení je třeba na vybrané části rotoru zadat součinitel přestupu tepla a teplotu vzduchu, které byly vypočteny v proudění a jsou zobrazeny v tabulce 9.1 a 9.2. Po dokončení nastavení už stačí pouze spustit výpočet.

9.2 Vyhodnocení tepelné analýzy rotorové klece

Po vypočtení tepelné analýzy je možné si zobrazit výsledky. Na Obr. 9.5 a Obr. 9.6 jsou zobrazeny výsledky tepelné analýzy rotorové klece pro rychlosti otáčení rotoru 1000 a 3000 $\text{ot}\cdot\text{min}^{-1}$. Výsledky pro ostatní počítané rychlosti jsou v příloze 4, kromě nulové rychlosti otáčení kdy dochází k minimálnímu ochlazování, a proto nemá význam pro tuto rychlost počítat statickou tepelnou analýzu. Z obrázků je patrné, že nejteplejší místo rotorové klece je uprostřed stroje a naopak nejchladnější jsou vyvažovací a ventilační výstupky na kružících. Rozdíl mezi nejteplejším a nejstudenějším místem rotorové klece jsou přibližně 2 °C. Také je patrné celkové snížení teploty pro vyšší otáčky rotoru vlivem větší hodnoty součinitele přestupu tepla.



Obr. 9.5 - Výsledek tepelné analýzy rotorové klece, 1000 $\text{ot}\cdot\text{min}^{-1}$

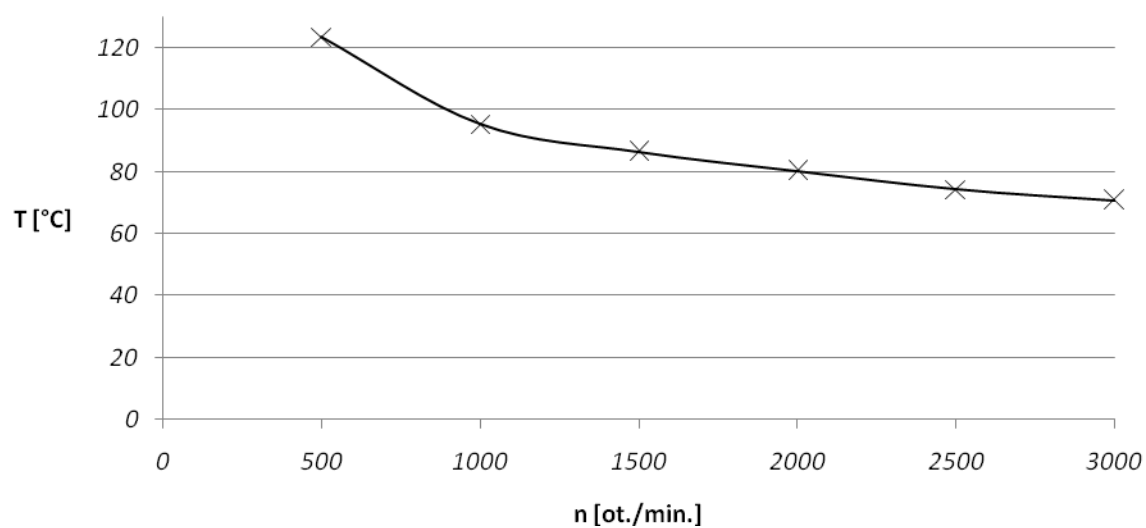


Obr. 9.6 - Výsledek tepelné analýzy rotorové klece, 3000 ot·min⁻¹

9.2.1 Vyhodnocení tepelné analýzy rotorové klece v závislosti na otáčkách

Vytvořený Graf 9.1 byl sestrojen z maximálních teplot rotorové klece pro jednotlivé otáčky rotoru. Z grafu je patrné, že s rostoucí rychlostí rotoru teplota klece exponenciálně klesá. Přičemž největší rozdíl teploty, přibližně 25 °C, můžeme pozorovat mezi rychlostí 500 a 1000 ot·min⁻¹. S dále se zvyšující rychlostí už teplota klesá velmi pozvolně.

Závislost maximální teploty rotorové klece na otáčkách



Graf 9.1 - Závislost maximální teploty rotorové klece na otáčkách rotoru

Závěr

Předmětem diplomové práce bylo vytvořit 3D model asynchronního motoru a ten následně použít pro namodelování proudění vzduchu ve vzduchové mezeře a poté toto proudění využít v teplotní analýze rotorové klece. Model asynchronního motoru byl vytvořen podle vypočtených parametrů v mé bakalářské práci „*Návrh asynchronního motoru s kotvou nakrátko*“ z roku 2013.

Úvod práce je věnován modelovanému stroji a ztrátám v asynchronních strojích. Jsou zde uvedeny štítkové parametry stroje doplněné ještě o některé další parametry jako průměr vrtání statoru, počet drážek atd. Následně jsou popsány jednotlivé druhy základních ztrát v asynchronních strojích a nakonec je uvedeno rozložení ztrát v modelovaném stroji.

Kapitoly 4 a 5 se zabývají základními vlastnostmi proudění tekutin a s tím souvisejícím oteplením a chlazením asynchronních strojů. Kapitola zabývající se prouděním tekutin shrnuje elementární poznatky z této oblasti. Kapitola o oteplení a chlazení se zaměřuje na způsoby šíření tepla v prostoru. Je zde uvedeno také několik možných výpočtů součinitele přestupu tepla pro různé situace.

V kapitole 6 je proveden popis rovnic a způsob jejich řešení používaných v programu Ansys CFX. Nejprve jsou uvedeny a rozebrány základní Navier-Stokesovy rovnice. Poté je věnována pozornost jejich úpravám pro matematické modelování a následně jejich doplnění o modely turbulence. Tato kapitola je provedena na základě skutečností uvedených v nápovědě programu Ansys CFX.

Dále je vytvořen 3D model asynchronního motoru pomocí programu SolidWorks, který je dále použit jako výchozí geometrie pro výpočet proudění ve vzduchové mezeře. Tato geometrie byla následně doplněna o prvek představující vzduch ve vzduchové mezeře v programu DesignModeler. Poté byla vytvořena dostatečně jemná výpočetní síť pomocí programu Meshing, která byla importována do výpočetního programu pro proudění. Výpočet a vyhodnocení proudění byl proveden v programu CFX, který je součástí programu Ansys Workbench. V tomto programu byl nastaven model vzduchové mezery a následně proveden výpočet proudění. Proudění bylo vypočteno pro několik rychlostí otáčení rotoru a to od nulových otáček až po $3000 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ s krokem $500 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$. Výstupem těchto výpočtů jsou grafy, které zobrazují rychlost proudění vzduchu ve vzduchové mezeře (Graf

8.2) v různých částech vzduchové mezery a součinitel přestupu tepla u stěny rotoru (Graf 8.3) v závislosti na otáčkách rotoru. Vypočtené hodnoty součinitele přestupu tepla byly použity jako jeden ze vstupů pro teplotní analýzu rotorové klece. Nakonec je provedena statická tepelná analýza rotorové klece také v programu Ansys Workbench. Pro model byla opět vytvořena výpočetní síť tentokrát pro rotorovou klec a plechový rotorový svazek. Model byl nastaven pomocí výsledků z výpočtu proudění a vypočtených ztrát z návrhu stroje. Opět byl model propočten pro několik rychlostí otáčení rotoru a sestrojen graf, který zobrazuje závislost nejvyšší teploty rotorové klece na otáčkách rotoru (Graf 9.1).

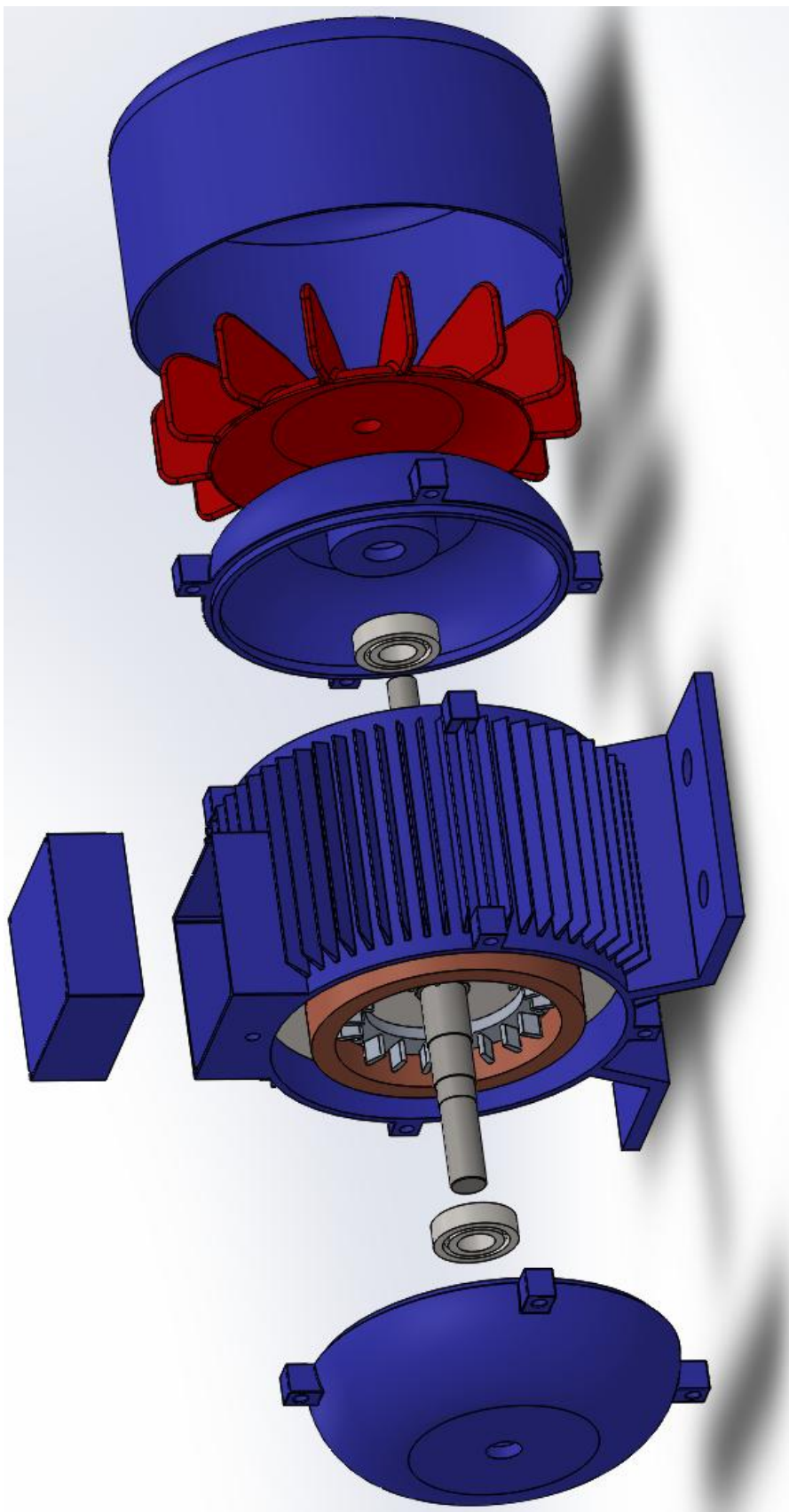
Jak již bylo zmíněno výpočet chlazení a oteplení je velmi důležitý z hlediska spolehlivosti a životnosti elektrického stroje. Výpočetní programy pro chlazení a oteplení jsou velmi nápomocné při návrhu stroje a určitě je vhodné před výrobou stroje provést jeho model a tím odhalit některé nedostatky v návrhu, které je možné posléze opravit a tím dosáhnout dokonalejšího návrhu stroje.

Seznam literatury a informačních zdrojů

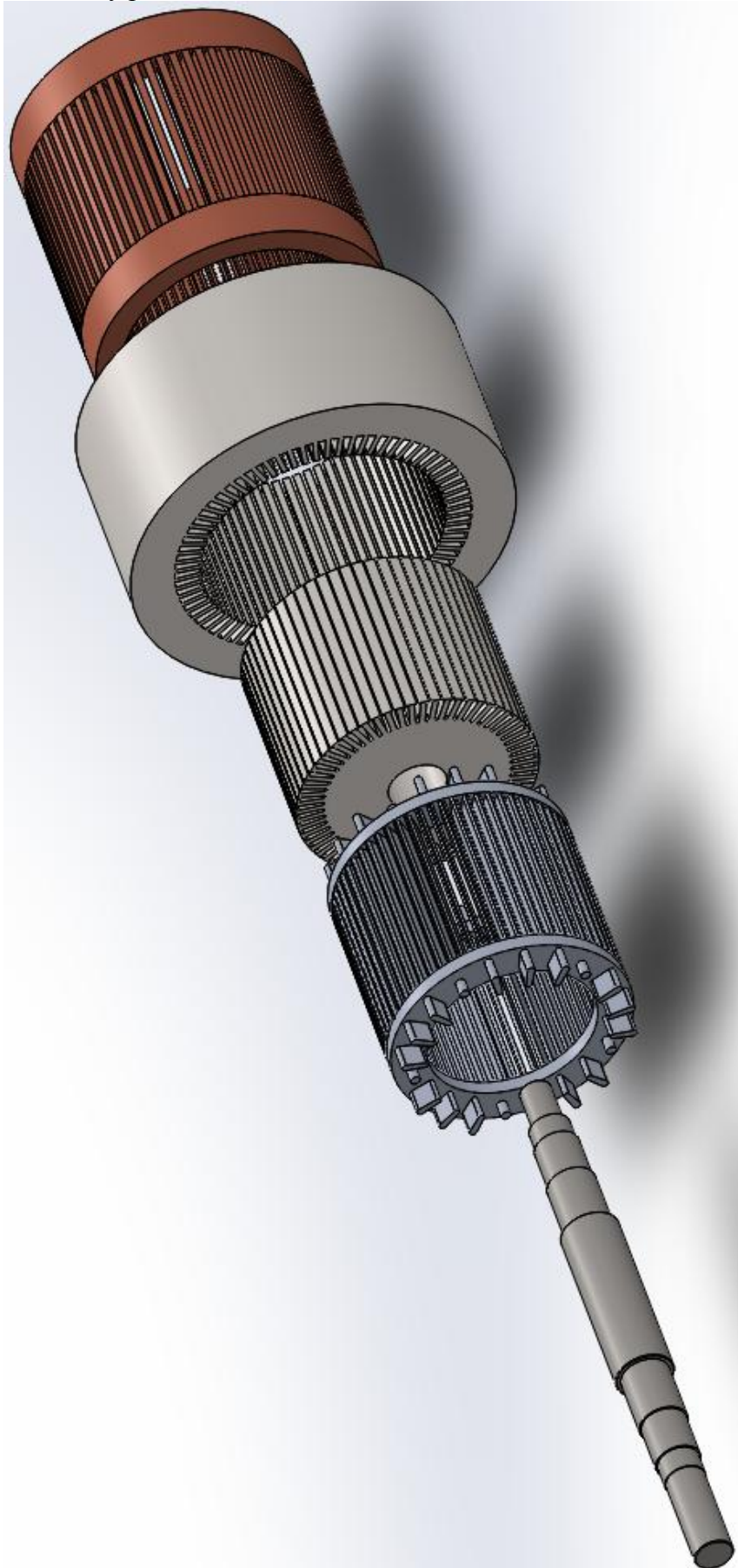
- [1] HAK, Josef a Oldřich OŠLEJŠEK. *Výpočet chlazení elektrických strojů*. 1. Díl. Brno: Výzkumný a vývojový ústav elektrických strojů točivých, 1973, 626 s.
- [2] HARTRIDGE, Steve. Electric machine simulation technology, Star Japanese conference 2013 [online]. [Citace Květen 2015] Dostupné na WWW: http://www.cd-adapco.com/sites/default/files/Presentation/20131203C-1600-Electric_Machine_Simulation_Technology.pdf
- [3] PECHÁNEK, Roman. Ventilační a tepelná analýza trakčního asynchronního motoru, Fakulta elektrotechnická, ZČU v Plzni, Plzeň 2011
- [4] VLACH, Radek. Tepelné procesy v mechatronických soustavách, FSI VUT Brno [online]. [Citace Květen 2015] Dostupné na WWW: <http://www.umt.fme.vutbr.cz/~rvlach/>
- [5] PIKERING, S. J., LAMPARD, D., SHANEL, M. *Modelling Ventilation and Cooling of the Rotors of Salient Pole*, Machines and Drives Conference 2001 IEMDC 2001 IEEE Int. pp 806-808.
- [6] LIU, H-p., LELOS, V., HEARN, C.S. *Transient 3-D Thermal Analysis for an Air-Cooled Induction Motor*, Electric Machines and Drives, 2005 IEEE International Conference, 2005, pp. 417-420.
- [7] PETROV, Georgij Nikolajevič. *Elektrické stroje 2*. Praha: Academia, 1982, 728 s.
- [8] ČERVENÝ, Josef. Stavba elektrických strojů [Přednášky KEV/SES2]. Plzeň: ZČU v Plzni, 2012, 148 s.
- [9] Wikipedia [Online]. [Citace Květen 2015] Dostupné na WWW: <http://cs.wikipedia.org>
- [10] KOZUBKOVÁ, Milada. Modelování proudění tekutin, FLUENT, CFX: Ostrava VŠB, katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení, Ostrava 2008, 153s
- [11] CHIN, Y.K., STATON, D.A. *Transient Thermal Analysis using both Lumped-Circuit Approach and Finite Element Method of a Permanent Magnet Traction Motor*, IEEE Africon, pp. 1027 - 1035, Gaborone, Botswana, September 2004
- [12] STATON, D.A., CAVAGNINO, A. *Convection Heat Transfer and Flow Calculations Suitable for Analytical Modelling of Electric Machines*, CD Conf. Rec. IECON07, 6-10 November 2006, Paris, France, pp. 4841-4846.
- [13] Určování součinitele přestupu tepla při samovolné konvekci. PowerWiki [online]. [Citace Květen 2015]. Dostupné z WWW: www.powerwiki.cz/attach/ET1/konvekce2.doc
- [14] Návod na program Ansys CFX
- [15] BLEJCHAR, Tomáš. Návod do cvičení "Modelování proudění" – CFX: Ostrava VŠB, Ediční středisko VŠB – TU Ostrava 2009, 133s

Přílohy

Příloha 1 – Rozložený model asynchronního motoru

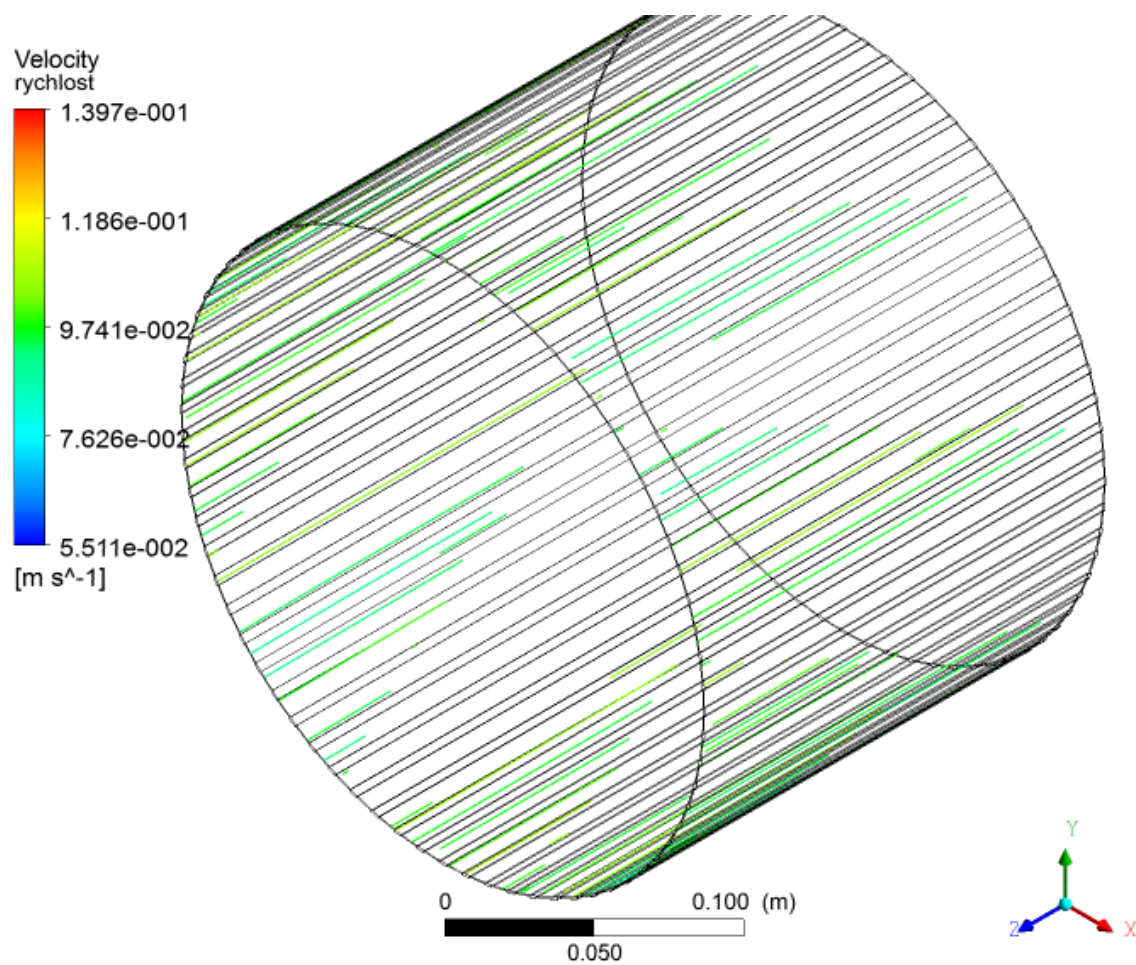


Rozložený pohled vnitřních částí

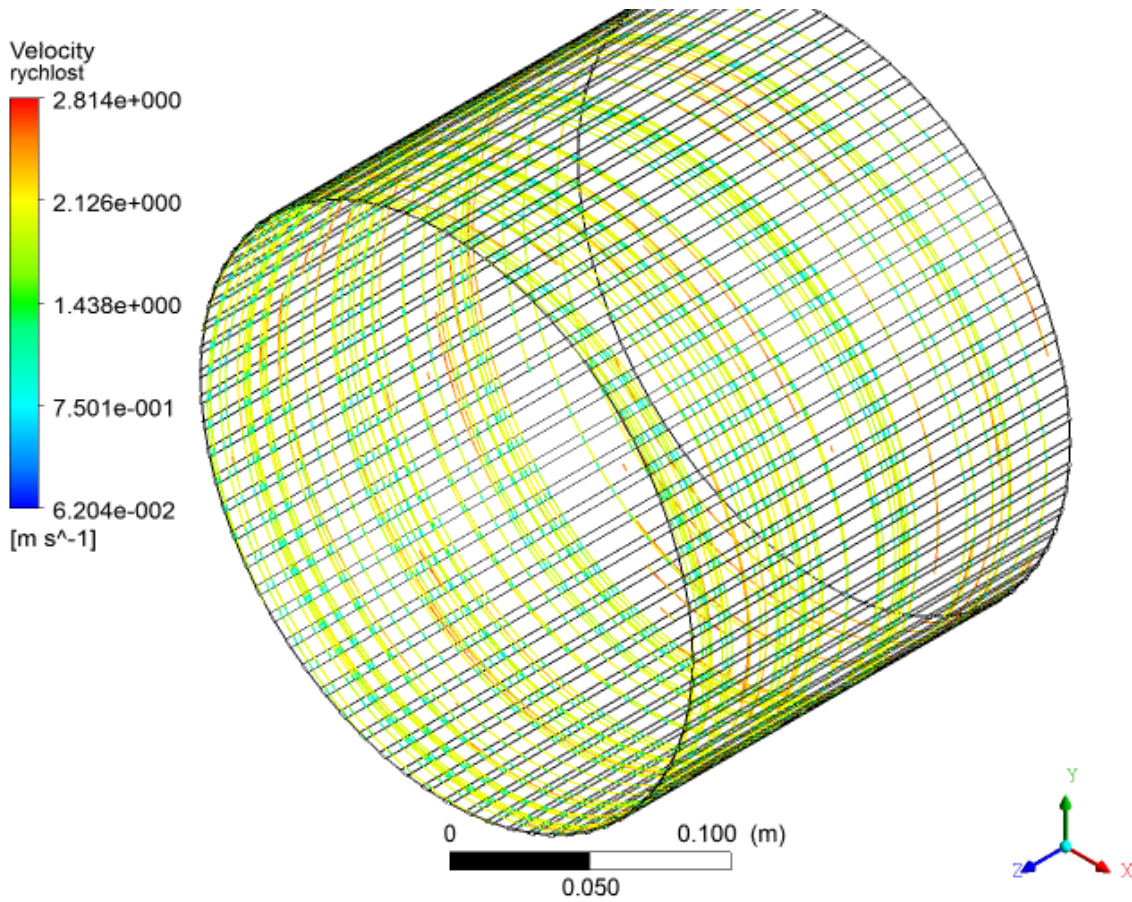


Příloha 2 – Proudnice rychlosti vzduchu ve vzduchové mezeře

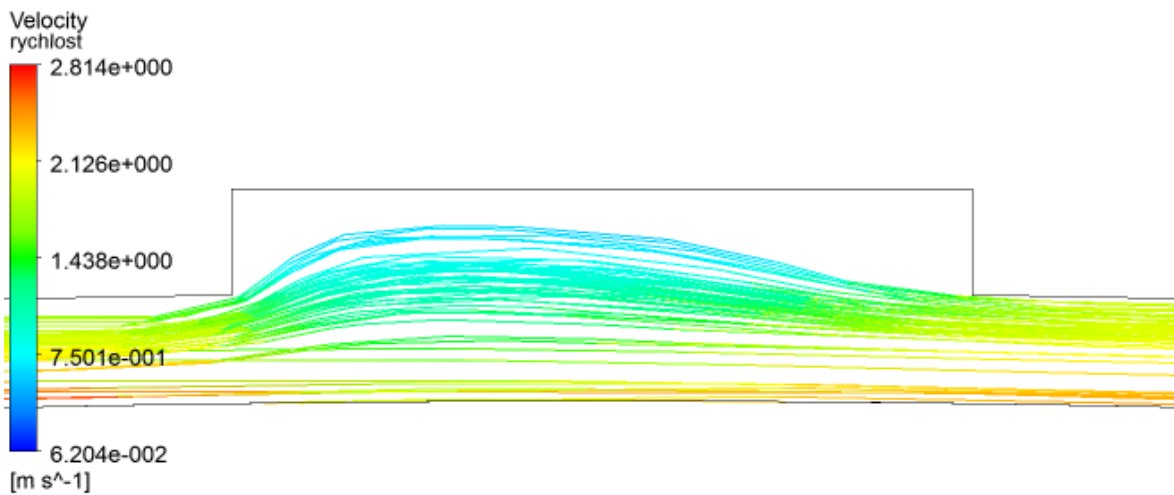
Pro nulové otáčky



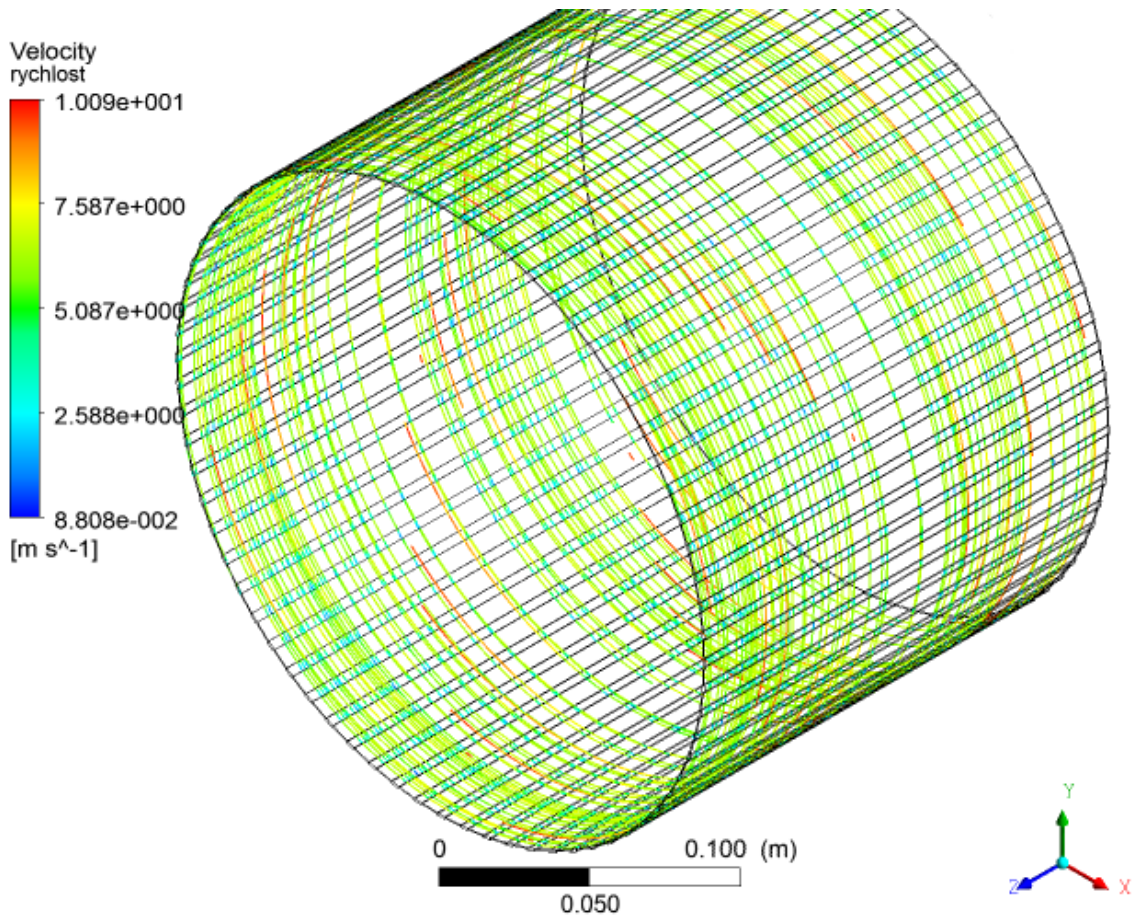
Pro $500 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$



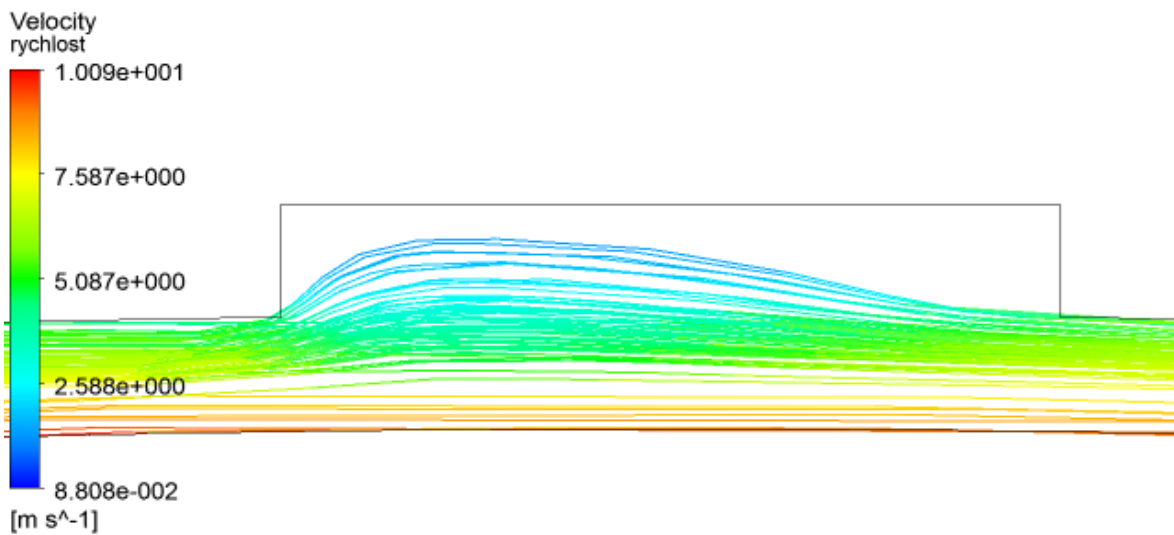
detail u drážky



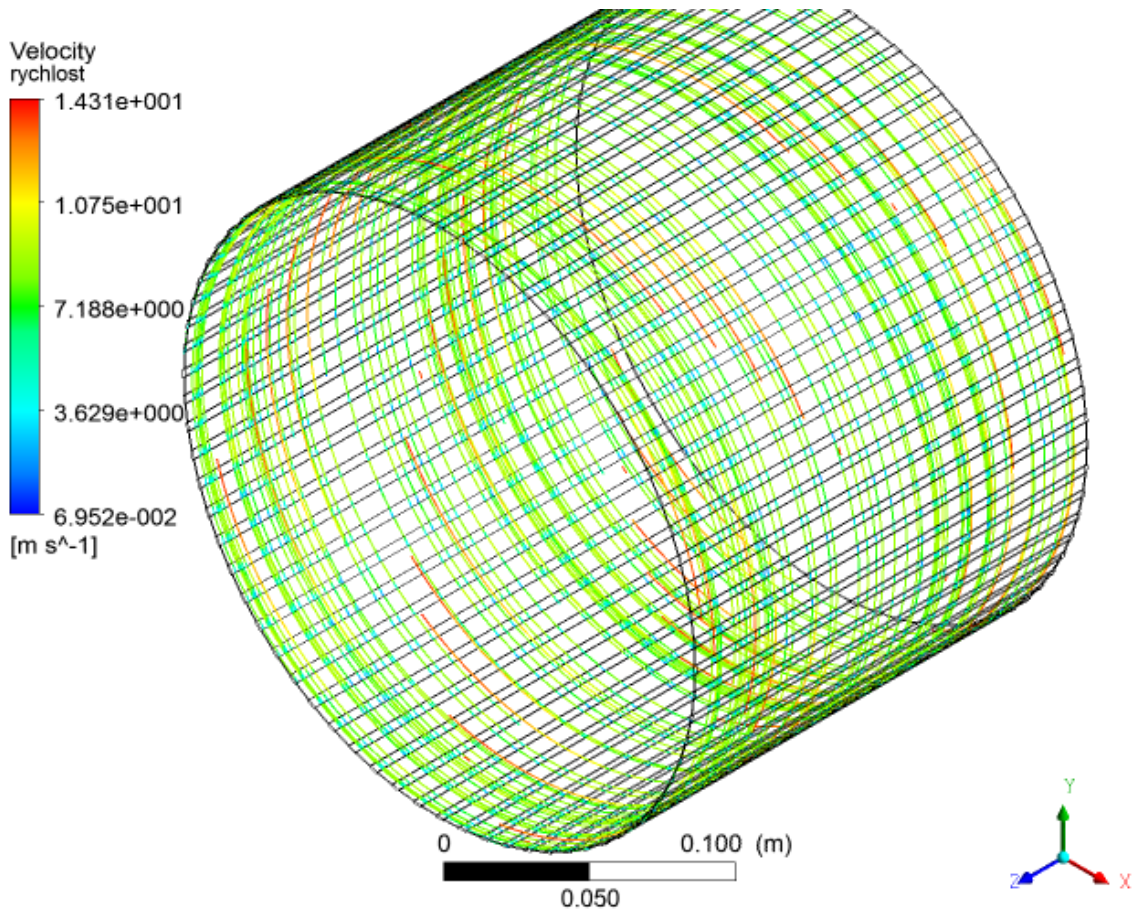
Pro 1500 ot·min⁻¹



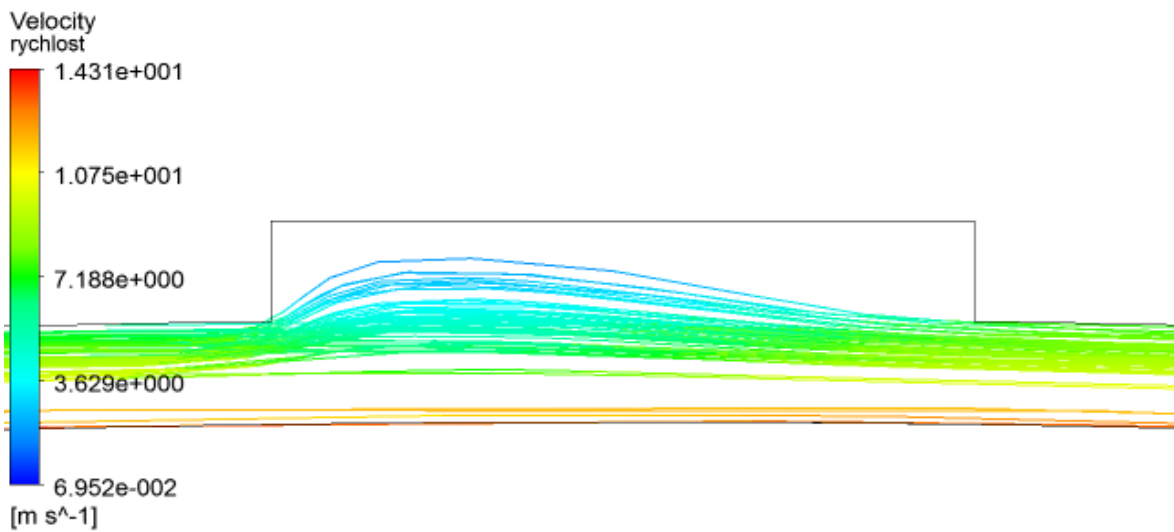
detail u drážky



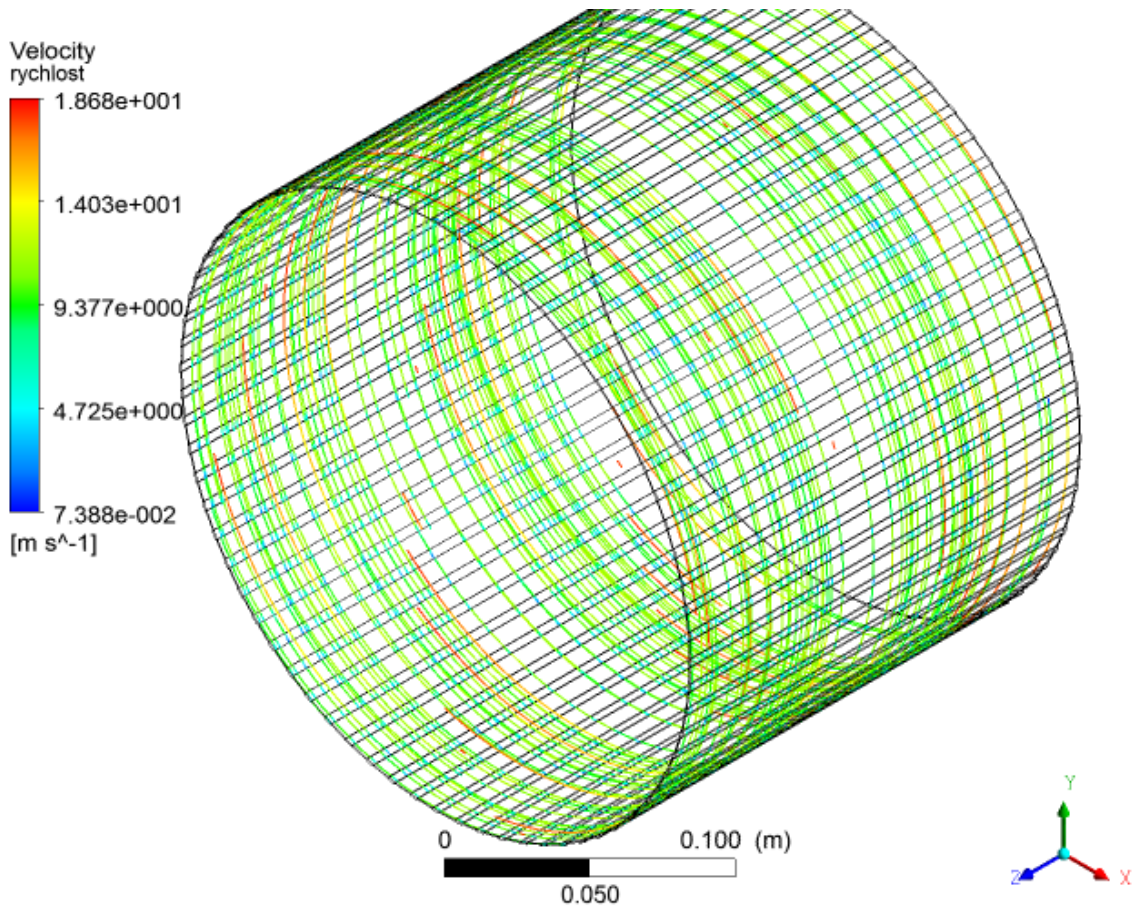
Pro 2000 ot·min⁻¹



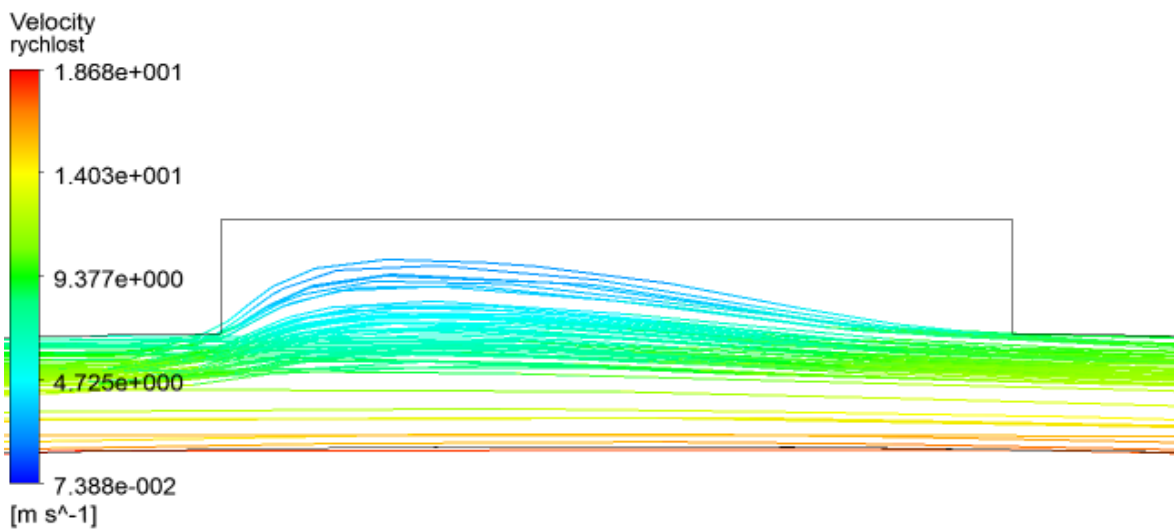
detail u drážky



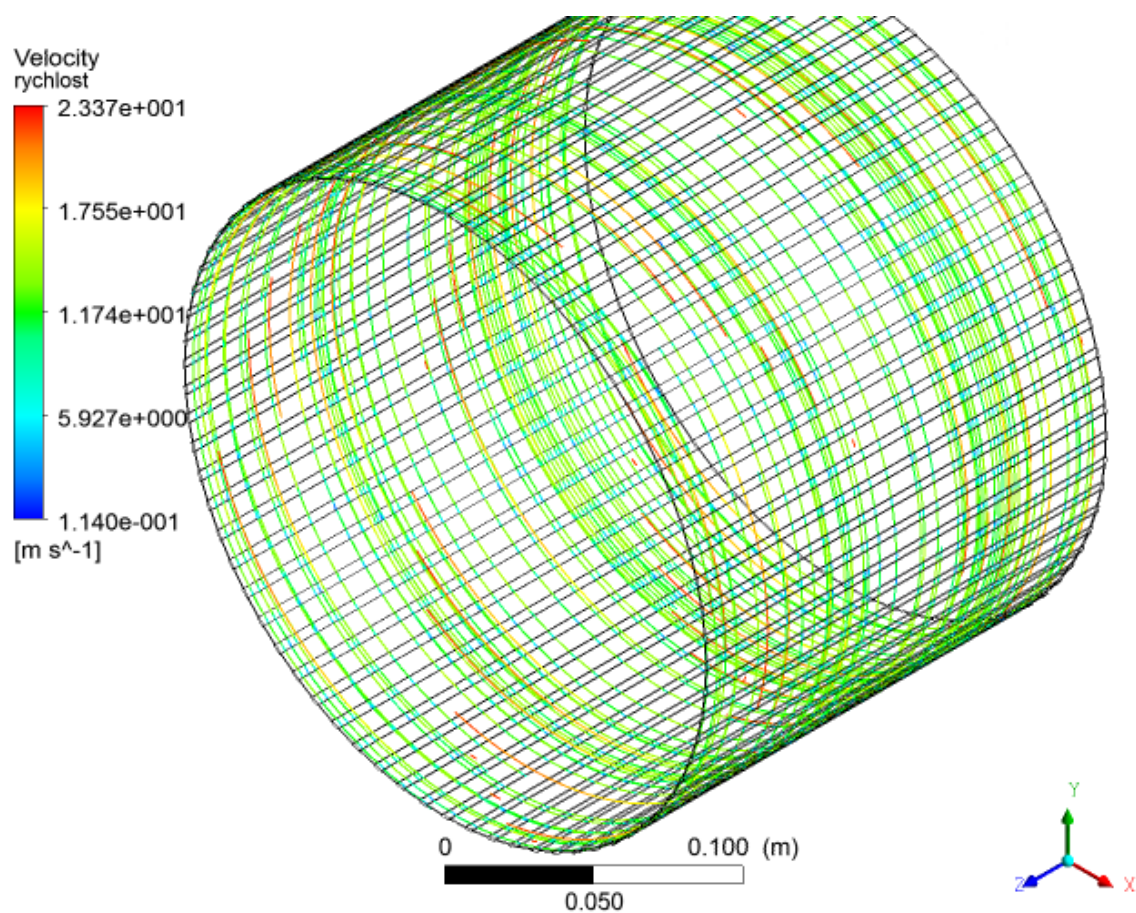
Pro 2500 ot·min⁻¹



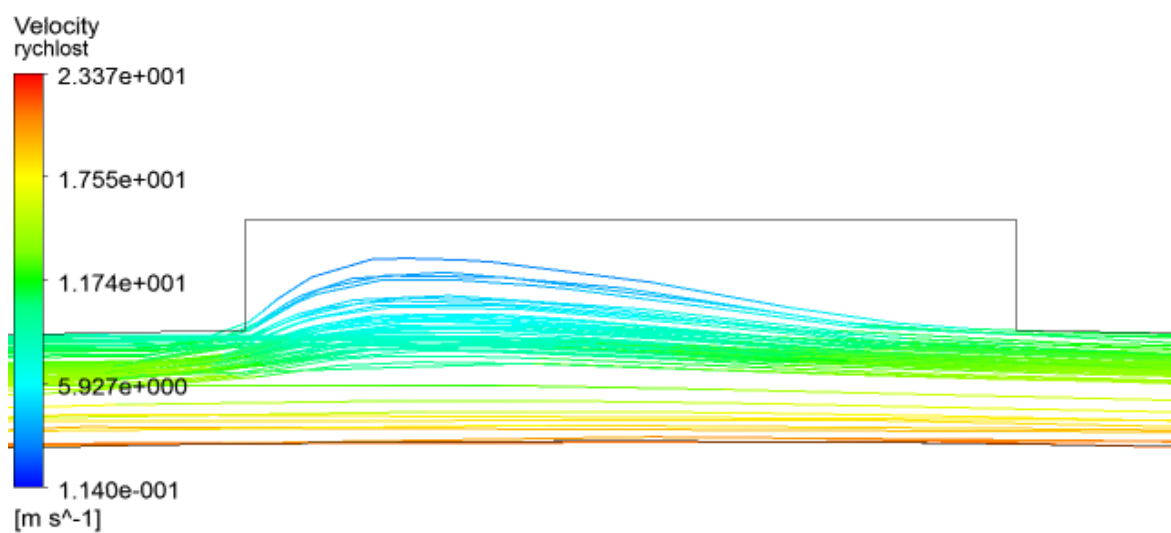
detail u drážky



Pro 3000 ot·min⁻¹



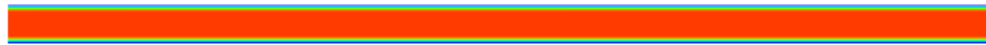
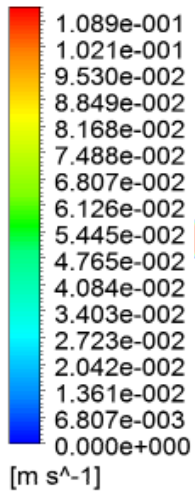
detail u drážky



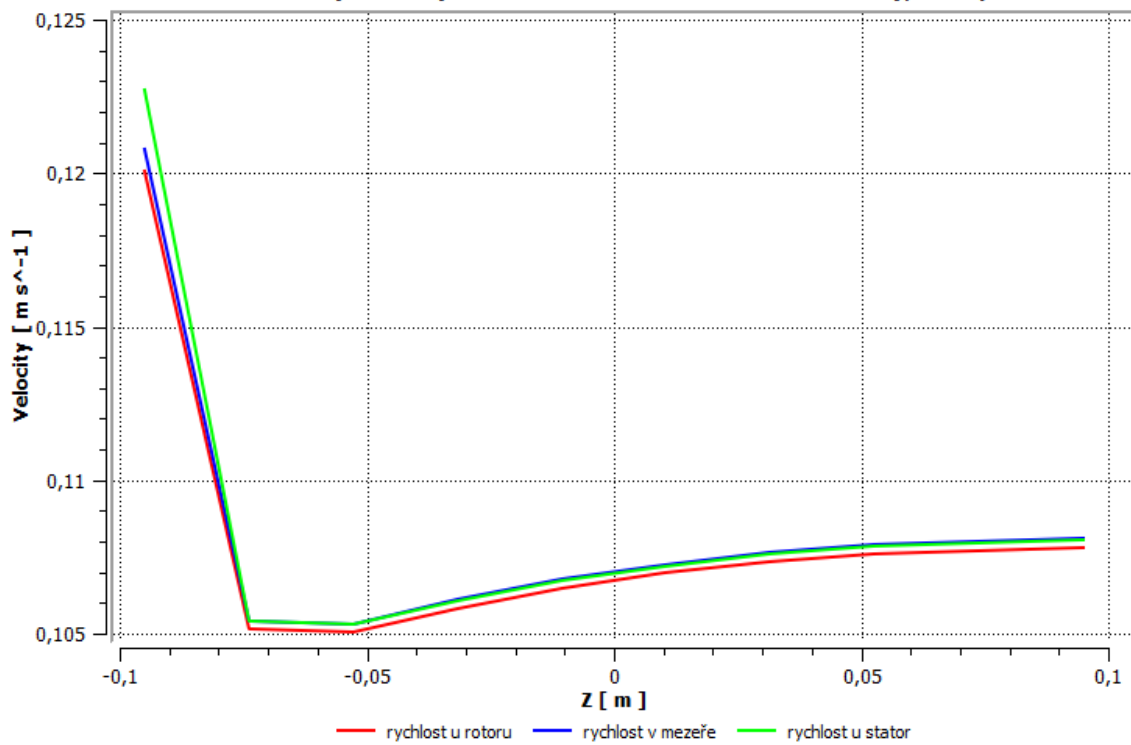
Příloha 3 – Grafy rychlostí proudění v závislosti na délce vzduchové mezery

Rychlost vzduchu v podélném řezu pro nulovou rychlost

Velocity

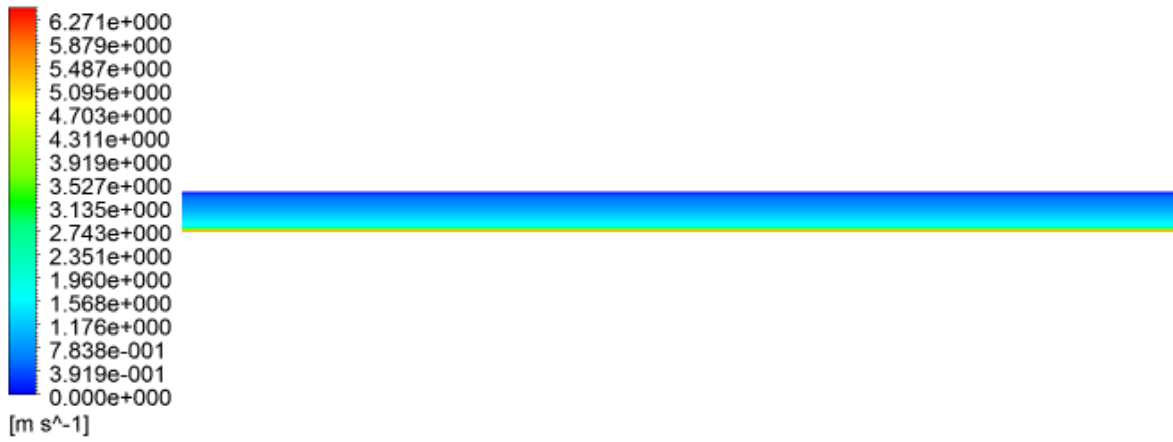


Závislost rychlosti proudění na délce vzduchové mezery, 0 ot./min.

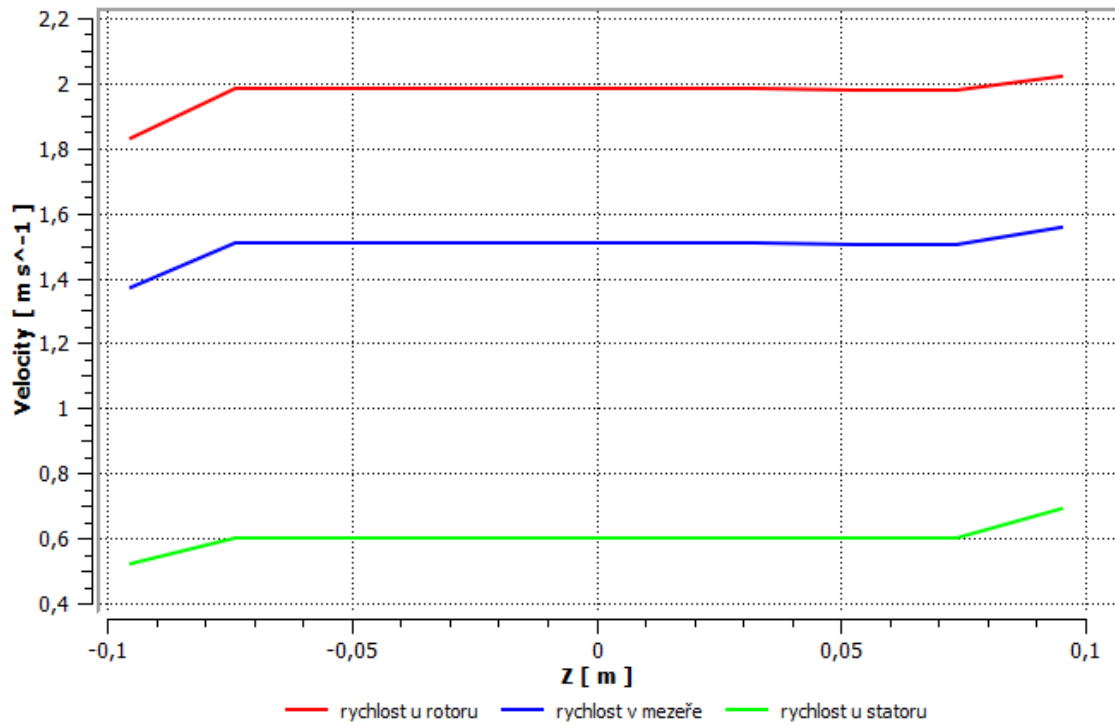


Rychlost vzduchu v podélném řezu pro 500 ot·min⁻¹

Velocity

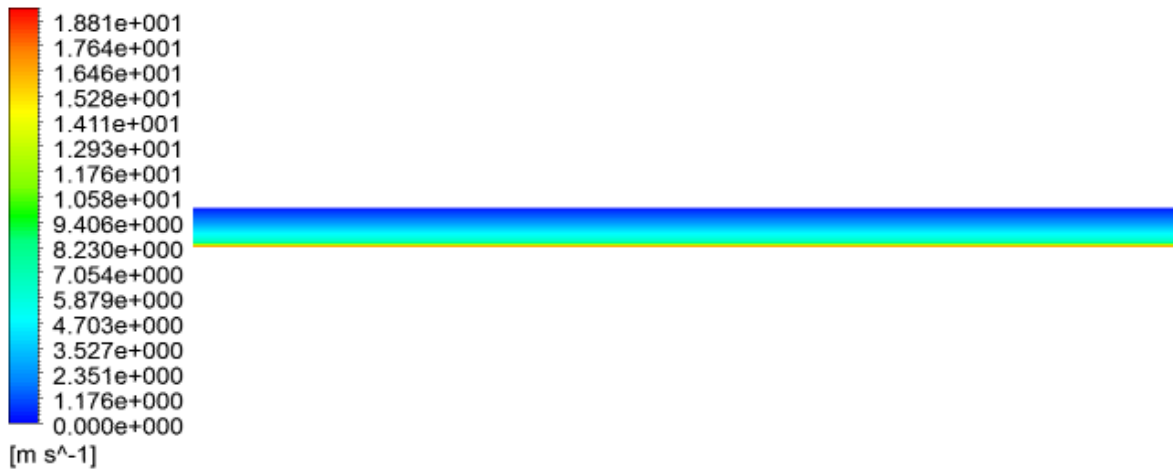


Závislost rychlosti proudění na délce vzduchové mezeře, 500 ot./min.

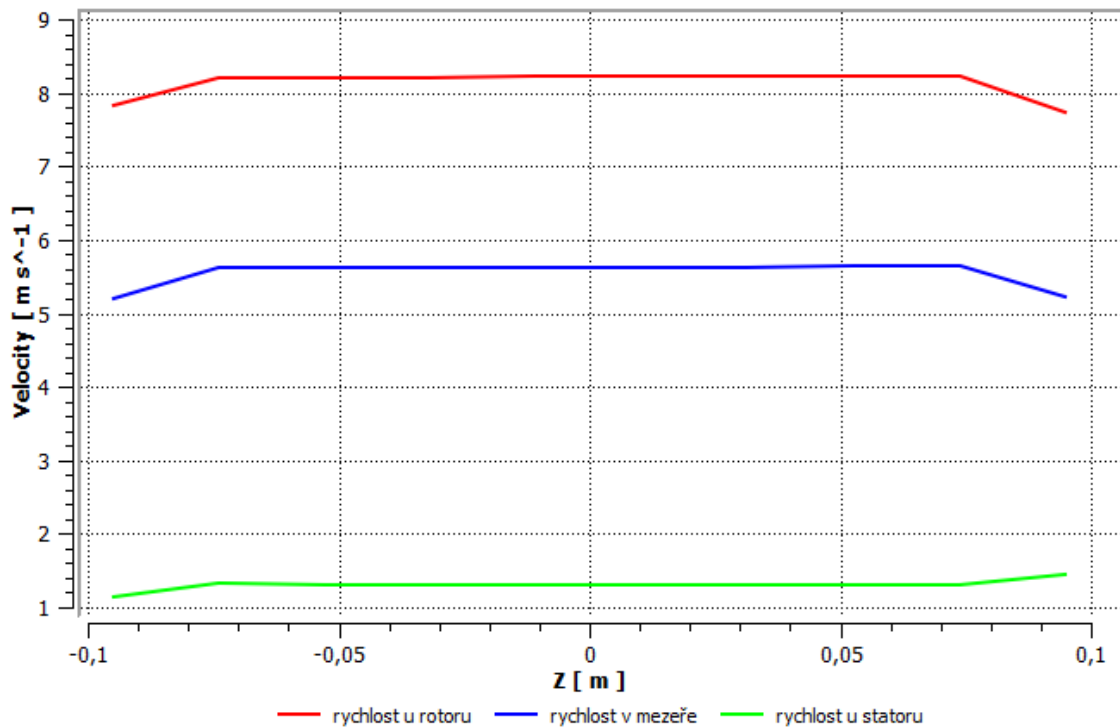


Rychlost vzduchu v podélném řezu pro 1500 ot·min⁻¹

Velocity

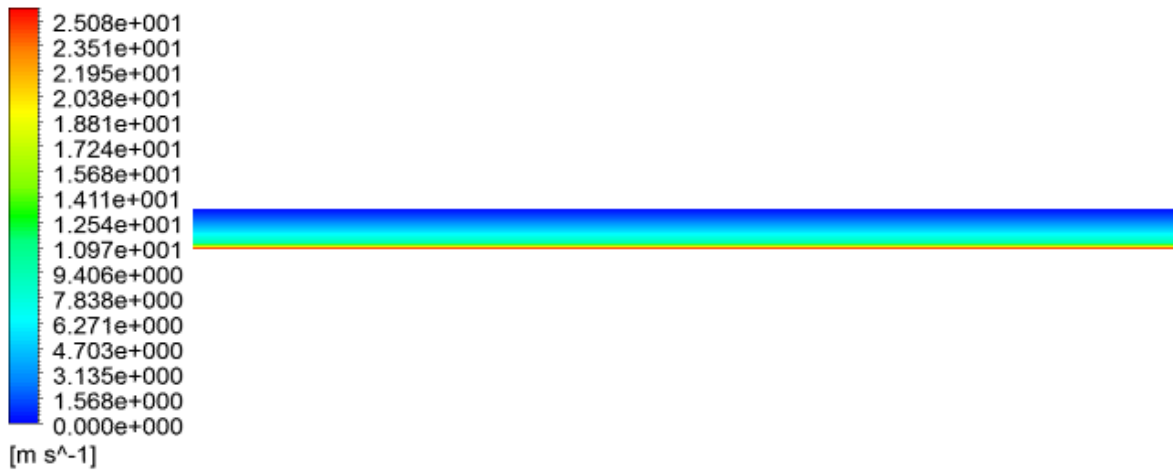


Závislost rychlosti proudění na délce vzduchové mezeře, 1500 ot./min.

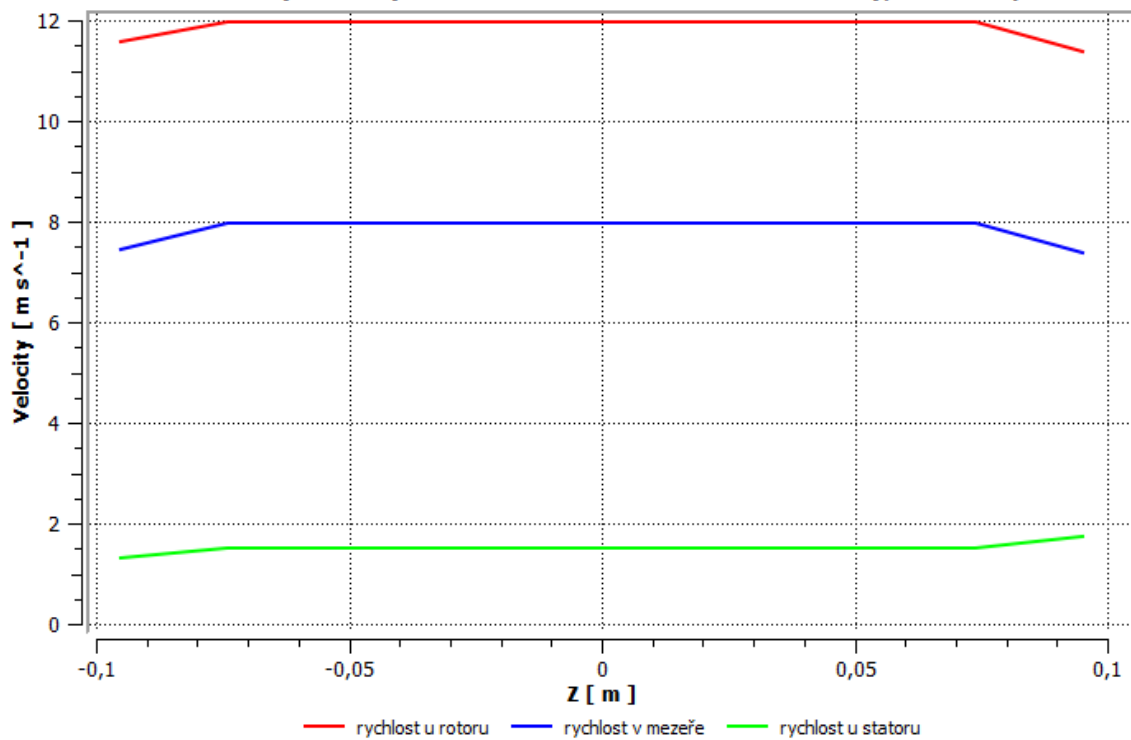


Rychlost vzduchu v podélném řezu pro 2000 ot·min⁻¹

Velocity

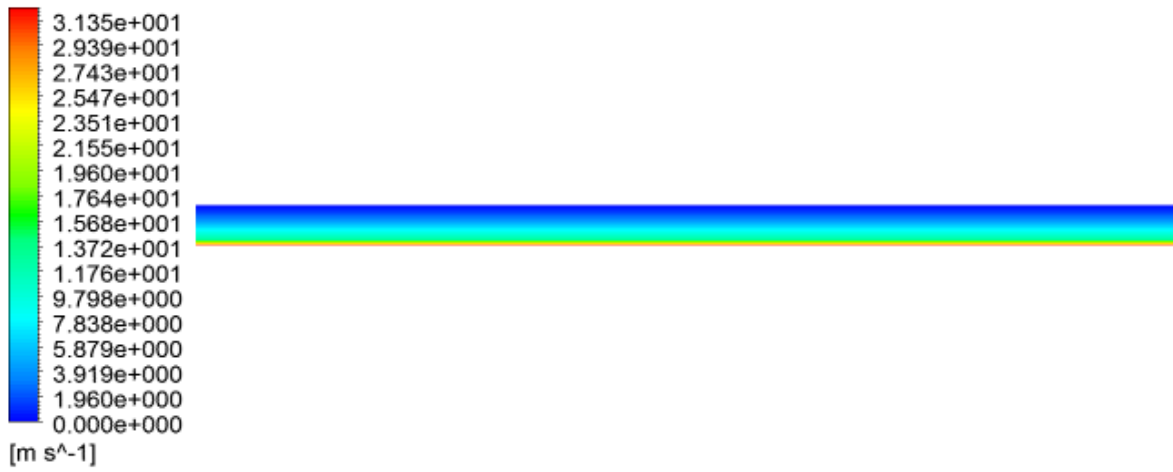


Závislost rychlosti proudění na délce vzduchové mezeře, 2000 ot./min.

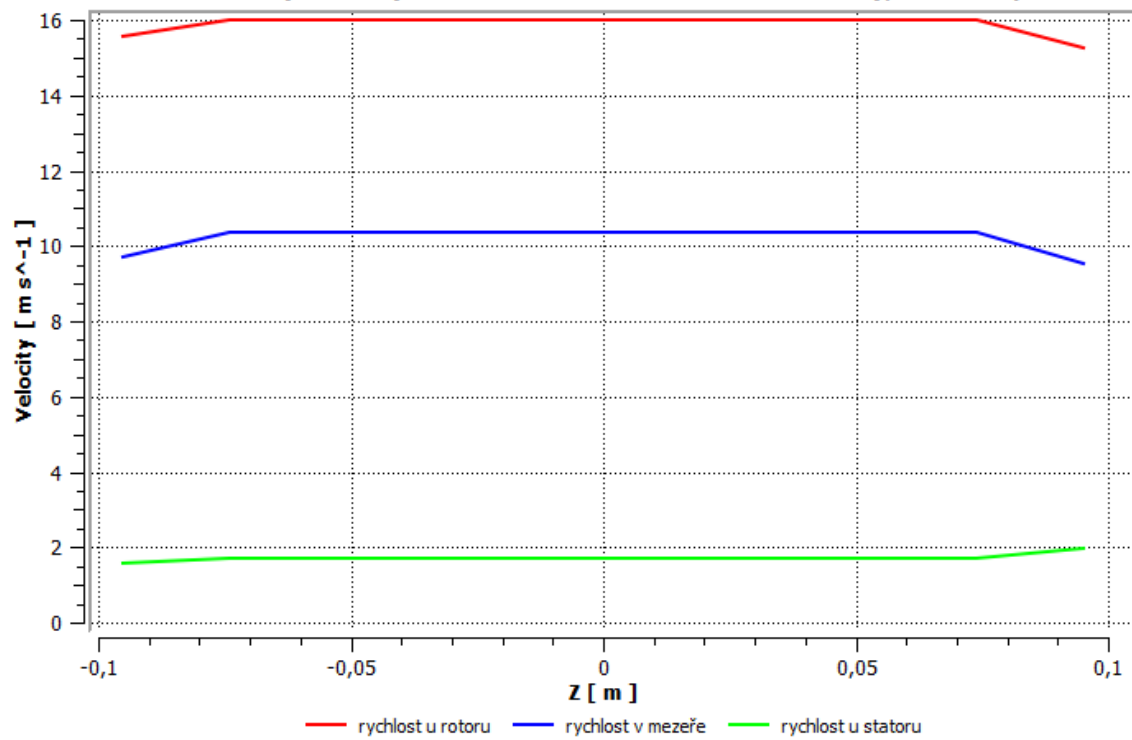


Rychlost vzduchu v podélném řezu pro 2500 ot·min⁻¹

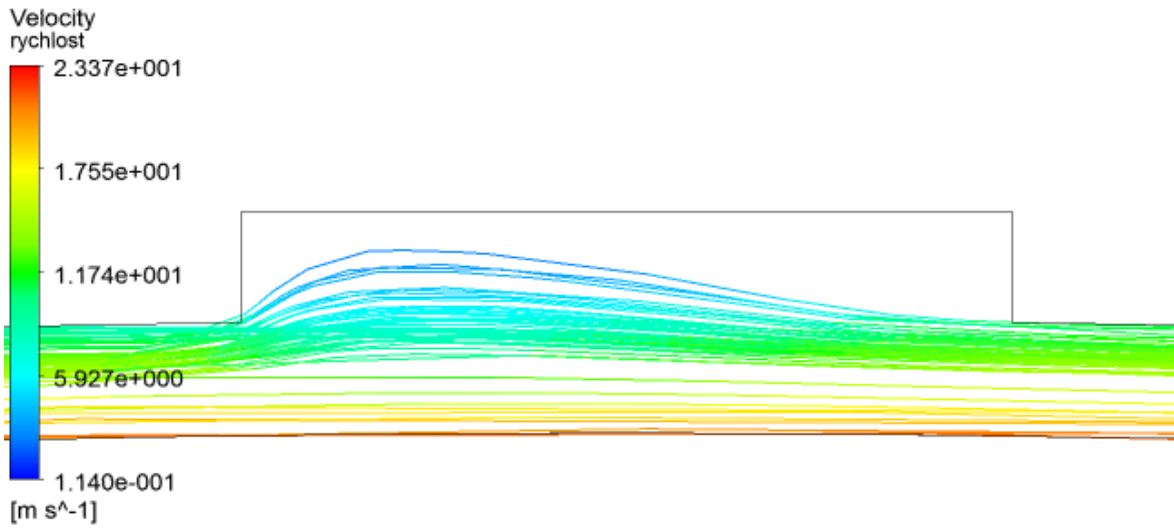
Velocity



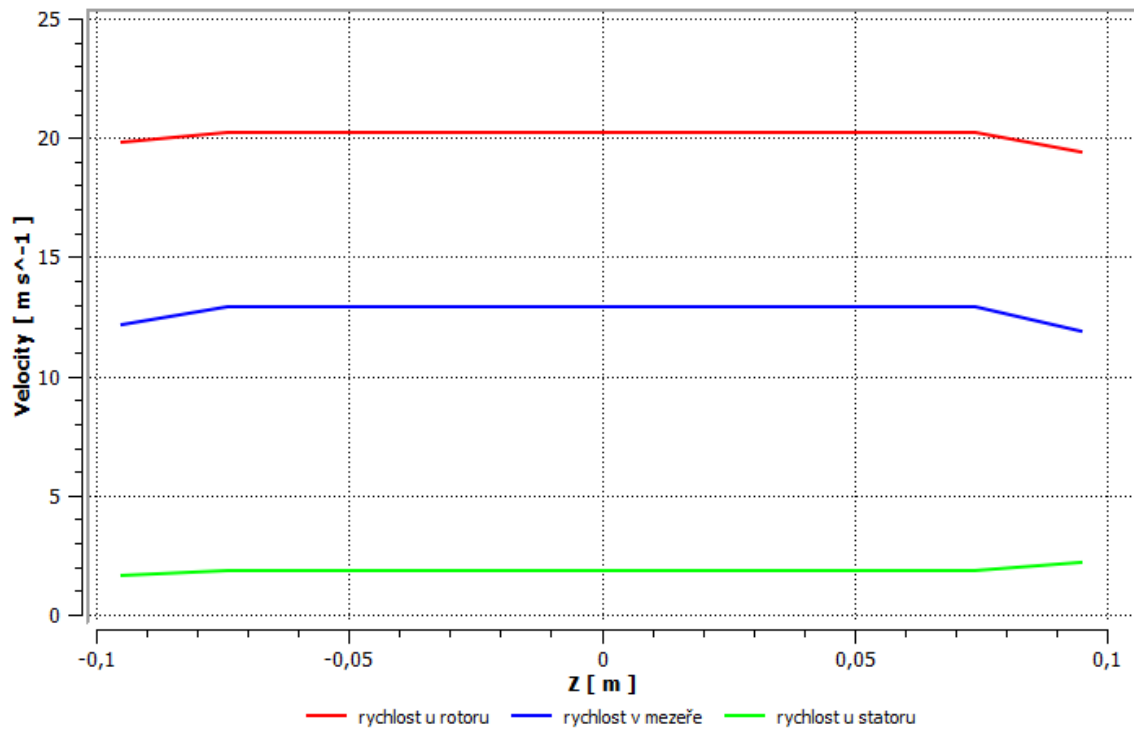
Závislost rychlosti proudění na délce vzduchové mezeře, 2500 ot./min.



Rychlost vzduchu v podélném řezu pro 3000 ot·min⁻¹

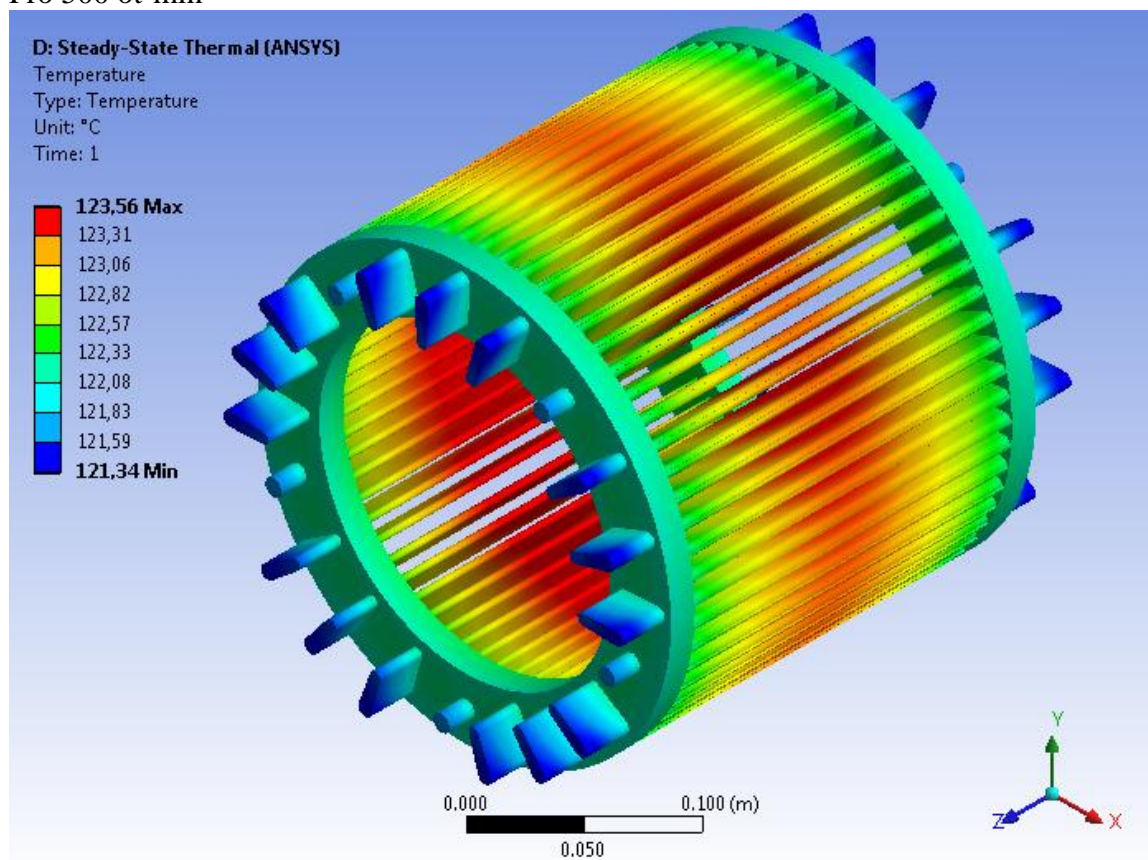


Závislost rychlosti proudění na délce vzduchové mezeře, 3000 ot./min.

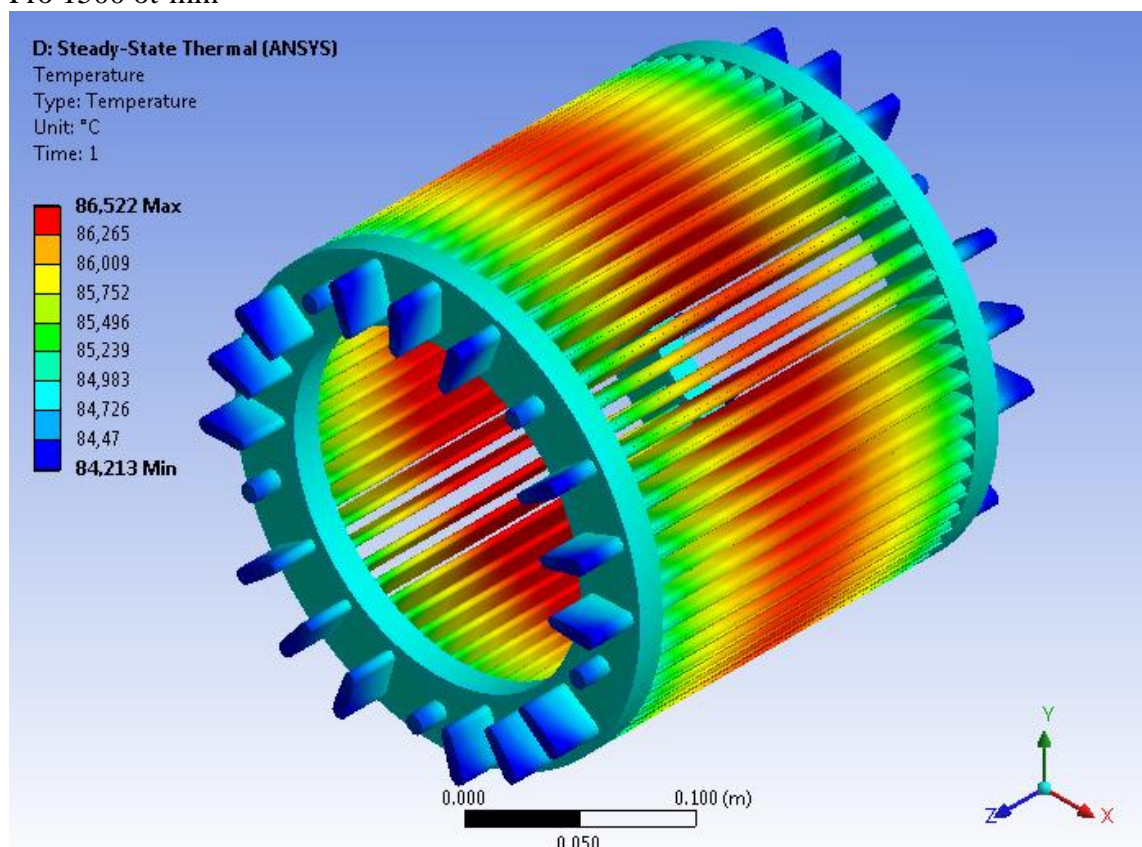


Příloha 4 – Výsledky tepelné analýzy

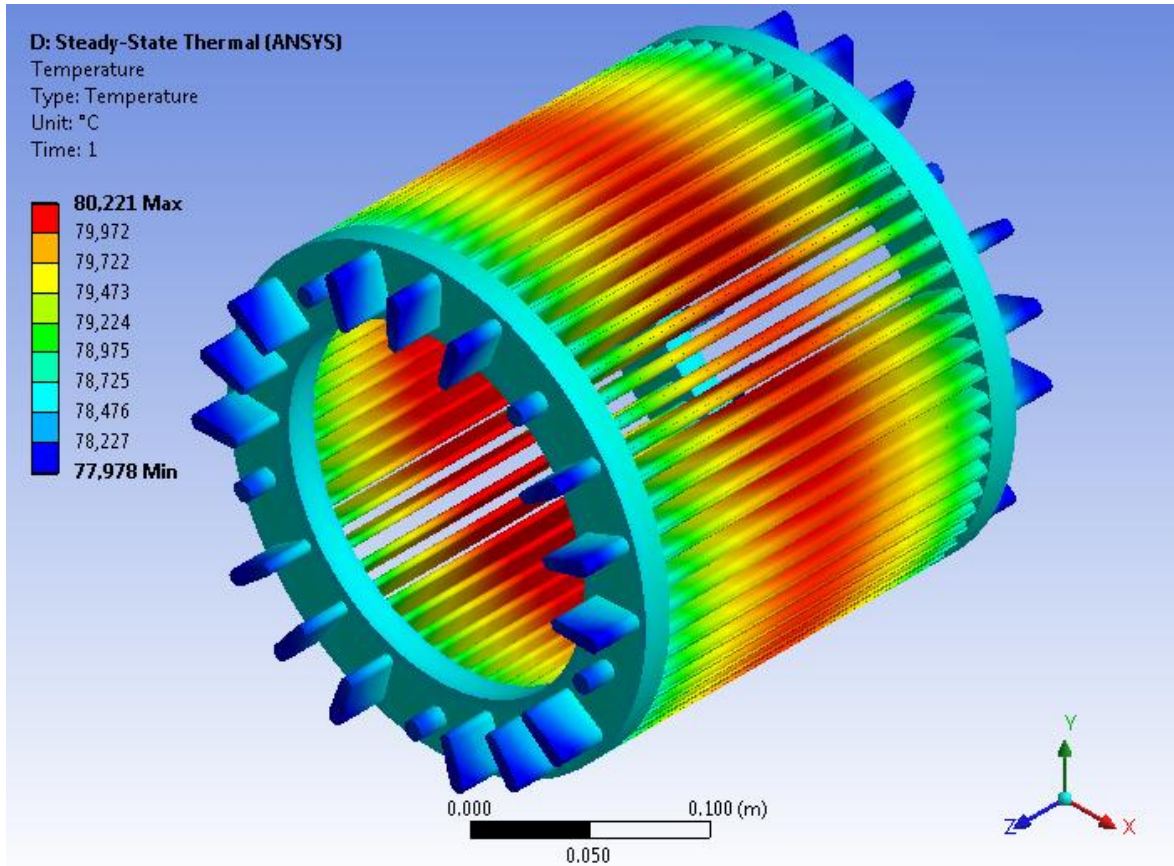
Pro 500 ot·min⁻¹



Pro 1500 ot·min⁻¹



Pro 2000 ot·min⁻¹



Pro 2500 ot·min⁻¹

