

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

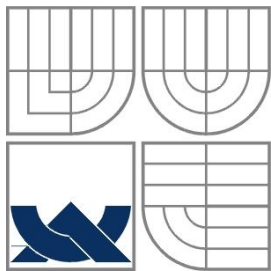
VÝPOČET PRŮBĚHU CHLADICÍHO MÉDIA V ASYNCHRONNÍM MOTORU

SEMESTRÁLNÍ PRÁCE
SEMESTRAL THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

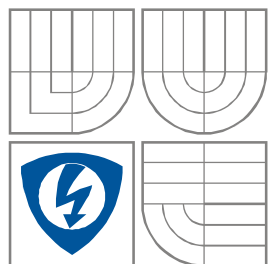
Bc. Zbyněk Trnka

BRNO 2011



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**

**ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY
A ELEKTRONIKY**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC
ENGINEERING

VÝPOČET PRŮBĚHU CHLADICÍHO MÉDIA V ASYNCHRONNÍM MOTORU

CALCULATION OF THE COOLING MEDIUM IN ASYNCHRONOUS MACHINE

SEMESTRÁLNÍ PRÁCE

SEMESTRAL THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Zbyněk Trnka

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Marcel Janda, Ph.D.

BRNO 2011



**VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ**

**Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Silnoprúdová elektrotechnika a výkonová elektronika

Student: Bc. Trnka Zbyněk

Ročník: 2

ID: 98686

Akademický rok: 2010/11

NÁZEV TÉMATU:

Výpočet průběhu chladicího média v asynchronním motoru

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Vytvořte model ventilátoru asynchronního stroje.
2. Proveďte výpočet vzniku proudění u ventilátoru ASM.
3. Vyhodnoťte vliv rychlosti otáčení ventilátoru na proudění ve vzduchové mezeře.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Dle doporučení vedoucího

Termín zadání: 23.9.2010

Termín odevzdání: 19.5.2011

Vedoucí projektu: Ing. Marcel Janda, Ph.D.

doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc.

předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor semestrální práce nesmí při vytváření semestrální práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

Abstrakt

Cílem této diplomové práce bylo namodelovat ventilátor pro asynchronní motor, tento ventilátor vyřešit z hlediska proudění v programu Ansys CFX, a poté zhodnotit průběh tohoto proudění ve vzduchové mezeře daného asynchronního motoru, při různé rychlosti otáčení rotoru. Úvod práce je věnován základním pojmům a definicím z oblasti proudění tekutin. Poté se práce zabývá chlazením elektrických strojů, zejména tedy chlazením asynchronního stroje. Také je zde věnována pozornost ztrátám v tomto stroji. Nakonec je zde namodelován radiální ventilátor a vzduchová mezera zadaného stroje a pomocí Ansys CFX je vyhodnoceno proudění, které prochází z ventilátoru do mezery.

Abstract

The aim of this master's thesis was to model the fan for the induction motor, and then to solve this model using Ansys CFX in the terms of flow, when considering the different speeds of rotation of the rotor. The introduction of this work is dedicated to basic terms and definitions from spheres of fluid flow, cooling of the electrical machines, especially to the cooling of the asynchronous machine. There is also attention paid to losses in this machine. Finally, there is modeled radial fan and an air gap of specified induction machine. By using Ansys CFX the flow, which passes from the fan into the air gap, is analyzed.

Klíčová slova

Asynchronní stroj; radiální ventilátor; chlazení; proudění; Ansys Workbench; Ansys CFX

Keywords

Asynchronous machine; radial fan; cooling; circulation; Ansys Workbench; Ansys CFX

Bibliografická citace

Bc. TRNKA, Z. Výpočet průběhu chladicího média v asynchronním motoru. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. 2011. 59s. Vedoucí semestrální práce Ing. Marcel Janda Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Výpočet průběhu chladicího média v asynchronním motoru jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne

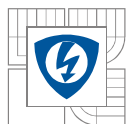
Podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Marcelu Jandovi Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

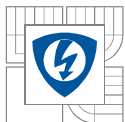
V Brně dne

Podpis autora

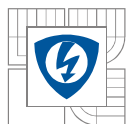


OBSAH

1 ÚVOD	12
2 PROUDĚNÍ - ZÁKLADNÍ POJMY, VZTAHY A DEFINICE	13
2.1 PROUDĚNÍ TEKUTIN	13
2.1.1 TEKUTINA	13
2.1.2 ROZDĚLENÍ PROUDĚNÍ	13
2.1.3 BERNOULLIOVA VĚTA	14
2.1.4 TYPY PROUDĚNÍ V KANÁLE	15
3 CHLAZENÍ	17
3.1 NEJČASTĚJŠÍ TYPY CHLAZENÍ	18
3.1.1 VZDUCHOVÉ CHLAZENÍ	18
3.1.2 KAPALINOVÉ CHLAZENÍ	18
3.2 NÁROKY NA CHLADICÍ MÉDIA	18
3.3 CHLADICÍ MÉDIA	19
3.4 VENTILÁTORY	19
3.5 KVADRATICKÝ ATKINSONŮV ZÁKON	20
4 ZTRÁTY, ASYNCHRONNÍHO STROJ	21
4.1 ZTRÁTY V ELEKTRICKÝCH STROJÍCH	21
4.2 ROZDĚLENÍ ZTRÁT V ASYNCHRONNÍM STROJI	21
4.2.1 OTEPLENÍ ASYNCHRONNÍCH STROJŮ	23
4.3 ODVOD TEPLA Z ASYNCHRONNÍCH STROJŮ	23
4.3.1 KANÁLY V ASYNCHRONNÍCH STROJÍCH	23
4.3.2 VNĚJŠÍ CHLADICÍ OKRUH UZAVŘENÝCH ASYNCHRONNÍCH STROJŮ	25
4.3.3 ŠTÍTÝ ASYNCHRONNÍCH STROJŮ	26
5 VYTVOŘENÍ MODELU VENTILÁTORU	27
5.1 VYTVOŘENÍ MODELU VENTILÁTORU V PROGRAMU BLADEGEN	27
5.2 VYTVOŘENÍ PLOŠNÉ A OBJEMOVÉ MŘÍŽKY	28
6 VÝPOČET VZNIKU PROUDĚNÍ U VENTILÁTORU	30
6.1 NASTAVENÍ A VÝPOČTENÍ MODELU V CFX-PRE A CFX-SOLVER	30
6.2 VYHODNOCENÍ MODELU PRO OTÁČKY 3000OT.MIN ⁻¹	33
6.3 VYHODNOCENÍ MODELU PRO OTÁČKY 5000OT.MIN ⁻¹	37
7 VYHODNOCENÍ VLIVU RYCHLOSTI OTÁČENÍ VENTILÁTORU NA PROUDĚNÍ VE VZDUCHOVÉ MEZEŘE	39
7.1 MODEL VZDUCHOVÉ MEZERY ASYNCHRONNÍHO MOTORU	39
7.2 VYTVOŘENÍ SÍTĚ PRO DANÝ MODEL	40
7.3 NASTAVENÍ MODELU V CFX	42
7.4 VYHODNOCENÍ PROUDĚNÍ VE VZDUCHOVÉ MEZEŘE PRO OTÁČKY MOTORU 3000OT.MIN ⁻¹	44
7.5 VYHODNOCENÍ PROUDĚNÍ VE VZDUCHOVÉ MEZEŘE PRO OTÁČKY MOTORU 5000OT.MIN ⁻¹	47
7.6 POROVNÁNÍ VÝPOČTŮ	49

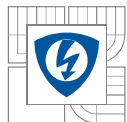


8	STATICKÁ TEPELNÁ ANALÝZA MOTORU	51
8.1	VYTVOŘENÍ MODELU MOTORU PRO TEPELNOU ANALÝZU	51
8.2	VYHODNOCENÍ STATICKÉ TEPELNÉ ANALÝZY MOTORU	54
9	ZÁVĚR	57
	LITERATURA.....	58

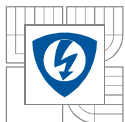


SEZNAM OBRÁZKŮ

OBRÁZEK Č. 2.1: ROZLOŽENÍ RYCHLOSTI V CHLADÍCÍM KANÁLKU MOTORU	15
OBRÁZEK Č. 2.2: PROUDĚNÍ V AXIÁLNÍM VENTILÁTORU (CFX).....	16
OBRÁZEK Č. 3.1: TYPY CHLAZENÍ	17
OBRÁZEK Č. 3.2: VENTILÁTORY	20
OBRÁZEK Č. 4.1: TOK VÝKONU ASYNCHRONNÍHO MOTORU	22
OBRÁZEK Č. 4.2: TOK VZDUCHOVOU MEZEROU	24
OBRÁZEK Č. 4.3: RADIÁLNÍ VENTILAČNÍ KANÁLY V ROTORU	24
OBRÁZEK Č. 4.4: PŘECHOD TOKU	25
OBRÁZEK Č. 4.5: VNĚJŠÍ CHLADÍCÍ OKRUH ZAVŘENÝCH STROJŮ.....	25
OBRÁZEK Č. 4.6: VSTUPNÍ A VÝSTUPNÍ VÍKA	26
OBRÁZEK Č. 5.1: SCHÉMA MODELOVÁNÍ VENTILÁTORU	27
OBRÁZEK Č. 5.2: PROGRAMOVÉ PROSTŘEDÍ BLADEGEN	28
OBRÁZEK Č. 5.3: MŘÍŽKA RADIÁLNÍHO VENTILÁTORU.....	28
OBRÁZEK Č. 5.4: ÚPRAVA MŘÍŽKY RADIÁLNÍHO VENTILÁTORU	29
OBRÁZEK Č. 6.1: VENTILÁTOR V CFX-PRE	30
OBRÁZEK Č. 6.2: CFX A) NASTAVENÍ VSTUPU B) NASTAVENÍ VÝSTUPU	31
OBRÁZEK Č. 6.3: CFX A) NASTAVENÍ LOPATKY B) NASTAVENÍ KRYTU VENTILÁTORU	31
OBRÁZEK Č. 6.4: ŘEŠIČ – CFX SOLVER	32
OBRÁZEK Č. 6.5: PRŮCHOD MÉDIA VENTILÁTOREM	33
OBRÁZEK Č. 6.6: RYCHLOST VZDUCHU PROUDÍCÍ VENTILÁTOREM, OTÁČKY 3000OT.MIN ⁻¹	34
OBRÁZEK Č. 6.7: TLAK VZDUCHU PROUDÍCÍ VENTILÁTOREM, OTÁČKY 3000OT.MIN ⁻¹	34
OBRÁZEK Č. 6.8: PROFIL VÝSTUPU - TLAK VZDUCHU NA VÝSTUPU OTÁČKY 3000OT.MIN ⁻¹	35
OBRÁZEK Č. 6.9: MERIDIONÁLNÍ ŘEZ VENTILÁTOREM, OTÁČKY 3000OT.MIN ⁻¹	35
OBRÁZEK Č. 6.10: 3D PROUDNICE RYCHLOSTI, OTÁČKY 3000OT.MIN ⁻¹	36
OBRÁZEK Č. 6.11: RYCHLOST VZDUCHU PROUDÍCÍHO VENTILÁTOREM, OTÁČKY 5000OT.MIN ⁻¹	37
OBRÁZEK Č. 6.12: TLAK VZDUCHU PROUDÍCÍHO VENTILÁTOREM, OTÁČKY 5000OT.MIN ⁻¹	38
OBRÁZEK Č. 6.13: PROFIL VÝSTUPU - TLAK VZDUCHU NA VÝSTUPU OTÁČKY 5000OT.MIN ⁻¹	38
OBRÁZEK Č. 7.1: VENTILÁTOR A VZDUCHOVÁ MEZERA MOTORU	39
OBRÁZEK Č. 7.2: ZJEDNODUŠENÝ MODEL ASYNCHRONNÍHO MOTORU	40
OBRÁZEK Č. 7.3: MODEL VZDUCHOVÉ MEZERY	40
OBRÁZEK Č. 7.4: PLOŠNÁ SÍŤ	41



OBRÁZEK Č. 7.5: OBJEMOVÁ SÍŤ	41
OBRÁZEK Č. 7.6: PROSTŘEDÍ CFX S NAČTENÝM MODELEM	42
OBRÁZEK Č. 7.7: NASTAVENÍ ROZHRANÍ – VSTUP A VÝSTUP	43
OBRÁZEK Č. 7.8: NASTAVENÍ ROZHRANÍ – ROTOR A STATOR	43
OBRÁZEK Č. 7.9: RYCHLOST VZDUCHU VZDUCHOVOU MEZEROU, OTÁČKY 3000OT.MIN ⁻¹	44
OBRÁZEK Č. 7.10: TLAK VZDUCHU VZDUCHOVOU MEZEROU, OTÁČKY 3000OT.MIN ⁻¹	44
OBRÁZEK Č. 7.11: PŘÍMKY PRO ZHOTOVENÍ GRAFŮ	45
OBRÁZEK Č. 7.12: RYCHLOST VZDUCHU VZDUCHOVOU MEZEROU, OTÁČKY 5000OT.MIN ⁻¹	47
OBRÁZEK Č. 7.13: TLAK VZDUCHU VZDUCHOVOU MEZEROU, OTÁČKY 5000OT.MIN ⁻¹	47
OBRÁZEK Č. 8.1: VÝPOČET OTEPLENÍ (USTÁLENÝ STAV)	51
OBRÁZEK Č. 8.2: NAIMPORTOVANÝ MODEL	52
OBRÁZEK Č. 8.3: MŘÍŽKA MODELU: A) CELKOVÝ POHLED, B) DETAIL	52
OBRÁZEK Č. 8.4: NAIMPORTOVANÝ PRŮBĚH CHLADICÍHO MÉDIA NA STATOR	53
OBRÁZEK Č. 8.5: ZDROJ TEPLA – VINUTÍ A ČELA	53
OBRÁZEK Č. 8.6: TEPELNÁ ANALÝZA MOTORU - CELEK	54
OBRÁZEK Č. 8.7: TEPELNÁ ANALÝZA MOTORU- VINUTÍ A ČELA	55
OBRÁZEK Č. 8.8: PŘÍMKA NA HRANĚ STATORU	55



SEZNAM GRAFŮ

GRAF Č. 1: ZÁVISLOST RYCHLOSTÍ PROUDĚNÍ NA DÉLCE ROTORU PRO 3000OT.MIN ⁻¹	45
GRAF Č. 2: ZÁVISLOST TLAKŮ PROUDĚNÍ NA DÉLCE ROTORU PRO 3000OT.MIN ⁻¹	46
GRAF Č. 3: ZÁVISLOST RYCHLOSTÍ PROUDĚNÍ NA DÉLCE ROTORU PRO 5000OT.MIN ⁻¹	48
GRAF Č. 4: ZÁVISLOST TLAKŮ PROUDĚNÍ NA DÉLCE ROTORU PRO 5000OT.MIN ⁻¹	48
GRAF Č. 5: POROVNÁNÍ DOSAŽENÝCH RYCHLOSTÍ VE VZDUCHOVÉ MEZEŘE PRO OTÁČKY 3000 A 5000OT.MIN ⁻¹	49
GRAF Č. 6: POROVNÁNÍ DOSAŽENÝCH TLAKŮ VE VZDUCHOVÉ MEZEŘE PRO OTÁČKY 3000 A 5000OT.MIN ⁻¹	50
GRAF Č. 7: TEPLOTA NA HRANĚ STATORU V ZÁVISLOSTI NA DÉLCE STATORU	56

1 ÚVOD

Při navrhování elektrického stroje je zapotřebí znalostí z mnoha inženýrských disciplín, což v dnešní době platí čím dál tím víc. Uvažujeme-li počátky elektrických strojů, zjistíme, že byla zohledňována hlavně elektrotechnická a mechanická složka a na ventilační složku už poté nezbývalo mnoho kvalitních řešení.

S rostoucími výkony elektrických strojů, tak rostly i ztráty. Tím byla otázce ventilace věnována patřičná pozornost, aby taky ne, když praxe ukázala, že kvalitně navrhnutý ventilační systém zvyšuje spolehlivost a životnost stroje. Taktéž nám snižuje hmotnost stroje a tím i náklady, což je jistě zajímavé pro každou firmu. To vše mělo a má za následek, že problému odvodu ztrátového tepla ze stroje se věnují všechny státy s vyspělým elektrotechnickým průmyslem, jako důkaz může posloužit četná dokumentace různých firem.

Průchodem proudu vinutím stroje vznikají ztráty Jouleovy, dále pak ztráty v železe hysterezní a vířivé a na to navozují ztráty mechanické. Toto přebytečné ztrátové teplo je nutno ze stroje odvádět, aby nedošlo k poškození stroje. V dnešní době se téměř výhradně vyskytují chladicí systémy, kdy chladicí médium je tlačeno tlakovým zdrojem do chladicího okruhu. Uvedená problematika je značně složitá, ale s rostoucími hardwarovými schopnostmi výpočetní techniky na sebe kvalitní softwary nenechaly dlouho čekat. V oblasti ventilace se nejvíce používá CFD programů, které umožňují řešit proudění a všechny jevy s tím spojené. Můžeme tedy snadno upravovat a řešit konstrukční uspořádání chladicího systému, dokud nedojdeme ke kýženým výsledkům. To vše má za následek omezení nákladů při konstrukci prototypů, či zrychlení řešení problémů u již vyrobených strojů.

V dané diplomové práci se zabýváme všeobecně prouděním, a dále chlazením třífázového asynchronního stroje. Byl namodelován radiální ventilátor a vzduchová mezera asynchronního stroje. Tato sestava byla propočtena z hlediska proudění, které vzniká ve ventilátoru díky otáčení rotoru a následně prochází vzduchovou mezerou. Na závěr se práce zabývá ochlazováním motoru.

2 PROUDĚNÍ - ZÁKLADNÍ POJMY, VZTAHY A DEFINICE

2.1 Proudění tekutin

Proudění tekutin je všeobecně rozsáhlá a důležitá část v technické fyzice. Proto jsou v následujícím textu uvedeny jen nejzákladnější poznatky a vztahy o dané problematice. Pro hlubší studium nutno vyhledat odbornější literaturu.

2.1.1 Tekutina

Tekutina je vlastně prostředí, o němž pojednává nauka o proudění. Dá se říci, že se vyznačuje snadným posunem vlastních částic, čili že se vlastně pohybují nebo tedy tečou. Touto vlastností se vyznačují jak kapaliny, tak plyny. Pojem tekutina tedy vlastně zahrnuje kapaliny a plyny.

Tekutina je buďto stlačitelná – plynná, či nestlačitelná - kapalná. Je-li stlačitelná, znamená to, že příčinou tlaku mění svůj objem. Naopak nestlačitelná tekutina svůj objem příčinou tlaku nemění. Snadné pohyblivosti jejich nejmenších částic je docíleno malým vzájemným působením těchto částic, čili malou kohezní silou. Dále je nutno říci, že plyny jsou rozpínavé, což znamená, že se snaží vyplnit veškerý dostupný prostor, v němž se nachází, zatímco kapaliny mají samostatný objem, a tedy utvářejí hladinu.

U tekutiny je nutno uvažovat její vnitřní tření, čili to, jestli je nevazká (ideální) nebo vazká.

Viskozita

Vazkost je vlastně vnitřní tření tekutiny. Tato vlastnost udává poměr mezi změnou rychlosti a tečným napětím mezi sousedními vrstvami při proudění kapaliny [9]. Značí se ν . Větší viskozita kapaliny znamená tedy větší odpor při proudění. Je zřejmé, že viskozita ideální kapaliny je rovna nule.

Ideální tekutiny

Ideální kapalina je dokonale nestlačitelná a má nulovou viskozitu. Ideální plyn má také nulovou viskozitu, ale je dokonale stlačitelný.

2.1.2 Rozdělení proudění

Jelikož je pohyb částic tekutiny velmi složitý, je nutno poměry zjednodušovat. Tak se můžeme dle [1] setkat s analýzou proudění dokonale nestlačitelné tekutiny, nestlačitelné vazké tekutiny, dokonale stlačitelné tekutiny a stlačitelné vazké tekutiny. Poslední zmíněné analýzy se blíží nejvíce skutečnosti, zato jsou ovšem nejsložitější.

2.1.3 Bernoulliova věta

Teče-li plynový nebo kapalinový proud jedním směrem se stálou rychlostí, rozeznáváme u něj dva tlaky: statický a dynamický. Což je vlastně obdoba potenciální a kinetické energie v objemové hustotě proudící kapaliny.

Tlak statický by byl naměřen přístrojem, jenž by se pohyboval v proudu. Vztahuje se k atmosférickému tlaku a je rozeznáván jako přetlak nebo podtlak. Dynamický tlak je ekvivalentem kinetické energie hmoty. Toto nám dává nejzákladnější Bernoulliovu větu [9]

$$p_s + p_d = konst, \quad \left[\frac{kp}{m^2} \right] \quad (2.1)$$

kde p_s je tlak statický a
 p_d je dynamický tlak.

Přitom objemový tok proudící látky je dle [9] stálý

$$Q = vS = konst. \quad \left[\frac{m^3}{s}; \frac{m}{s}, m^2 \right] \quad (2.2)$$

Kde Q je objemový tok,
 v je rychlost toku,
 S je průřez, jenž je kolmý na vektor rychlosti.

Poněvadž se rychlost mění s průřezem kanálu, můžeme nejjednodušeji aplikovat danou větu takto: Máme-li kanál určitého průřezu, a v něm proudění o jisté rychlosti, tak rozšířením tohoto kanálu nám sice klesne rychlost, ale tlak v tomto rozšířeném kanálu stoupne.

Je zřejmé, že při proudění vznikají ztráty. Tyto ztráty energie jsou zapříčiněny třením na stěnách, utvářením vírů v proudění, každou náhlou změnou průřezu a změnou toku, turbulencí, drsností stěn atd. Aby se ztrátami proudění nezastavilo, je nutno tyto ztráty krýt tlakovým zdrojem. Pro shrnutí tedy, tlakové poklesy, spády a úbytky jsou vlastně ztráty energie proudění a to jak kinetické tak potenciální a značí se Δp . Bernoulliova věta se tedy doplňuje vztahem pro ztráty a tím se přizpůsobuje lépe skutečnosti [9].

$$p_{s1} + p_{d1} = p_{s2} + p_{d2} + H, \quad \left[\frac{kp}{m^2} \right] \quad (2.3)$$

$$H = \sum \Delta p. \quad \left[\frac{kp}{m^2} \right] \quad (2.4)$$

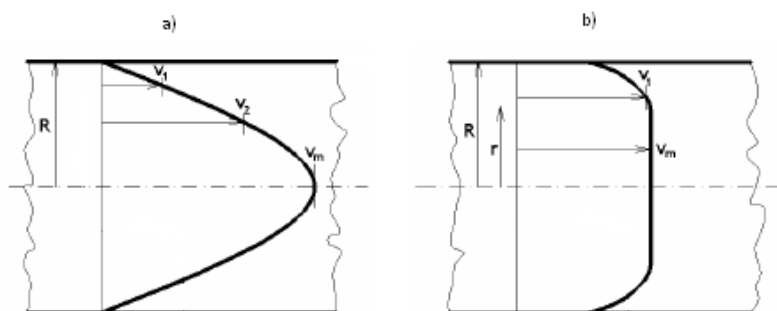
Kde H je vyvolaný tlak zdrojem a
 Δp ztráty vznikající při proudění.

Tlakový zdroj mění mechanickou energii na energii toku a jednotlivé druhy tlakového zdroje budou probrány posléze.

2.1.4 Typy proudění v kanále

Rozeznáváme dva základní typy proudění: laminární a turbulentní. To zda se v kanále bude vyskytovat proudění turbulentní, nebo laminární závisí na mnoha faktorech, jako je rychlost, viskozita a hustota tekutiny. Dále také na tvaru a drsnosti daného kanálu. Většinu těchto faktorů v sobě zahrnuje Reynoldsovo číslo, jež je víceméně směrodatné pro charakter proudění.

Bereme-li v úvahu chladicí kanálek motoru v podobě trubice, do něhož proudí médium, utvoří se s prvním stykem se stěnami mezní vrstva, která postupně roste, až je velká přes celý průřez kanálku. Utvoří se ustálený stav (obrázek č. 2.3), kde už nerozeznáme mezní vrstvu a proudící médium. Dá se říci, že u stěn bude rychlost nulová. A u laminárního proudění vprostřed největší a u turbulentního také jen s větším poloměrem (obrázek č. 2.3). Protékala-li by kanálkem ideální tekutina, nedocházelo by k vnitřnímu tření, a rychlost by se rovnala ve všech místech průřezu.



Obrázek č. 2.1: Rozložení rychlosti v chladicím kanálku motoru: a) laminární proudění b) turbulentní proudění [1]

Reynoldsovo číslo.

Mnohačetnými pokusy bylo objeveno, že pro charakter proudění je směrodatné bezrozměrové Reynoldsovo číslo [9]

$$Re = \frac{vD}{\nu} \quad \left[-; \frac{m}{s}, m, \frac{Ns}{m^2} \right] \quad (2.5)$$

Kde Re je Reynoldsovo číslo,
 ν je rychlost tekutiny,
 D průměr kanálu,
 ν je její viskozita.

Dle [9] bylo laboratorně zjištěno, že přechod mezi výše zmiňovanými prouděními je pro $Re=2000$.

Laminární proudění

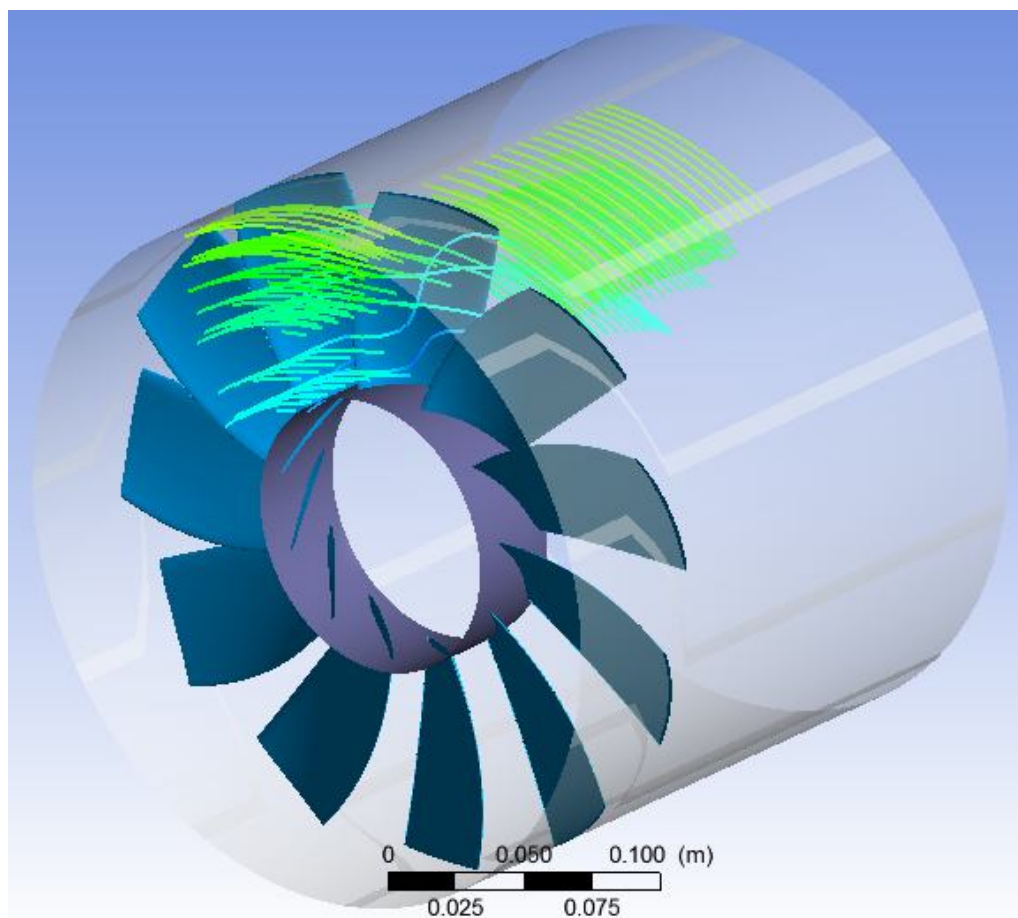
Jak již bylo řečeno, toto proudění nastává přibližně do Reynoldsova čísla 2000. Maximální rychlost tohoto proudění je v ose kanálu a zmenšuje se směrem ke stěnám. Rychlostní profil je parabola. V každém průřezu se vyskytují soustředné kružnice, což sou vlastně isotachy (křivky stejných rychlostí). Tlakový spád stoupá úměrně v kruhovém kanále s rychlostí kapaliny. V elektrických strojích se laminární proudění většinou nevyskytuje, navíc odvod tepla pomocí něj je nižší než u turbulentního proudění.

Turbulentní proudění

Platí pro $Re > 2000$. Nastává tedy při vyšších rychlostech. Jeho charakter má také tvar paraboly, s tím rozdílem, že rychlost se u středu více vyrovnává. Jednotlivé vrstvy tekutiny neklouzají klidně, nýbrž tvoří turbulony (makroskopické shluky molekul). Ke vzniku tohoto typu proudění přispívají vlivy jako například chvění. Přestup tepla, jak již bylo uvedeno, je mnohem vyšší u tohoto typu proudění, proto je žádáno v elektrických strojích.

Přechodný obor

Jelikož hranice mezi laminárním a turbulentním prouděním byla určena v laboratorních podmínkách na hladkých kruhových kanálech, v praxi se přechod mezi těmito prouděními udává v rozmezí od 1800 do 4000. Například turbulentní proudění v elektrických strojích, při vlivech které mu přispívají (drsnot stěn, chvění atd.), může nastat už u $Re = 1000$ [9].



Obrázek č. 2.2: Proudění v axiálním ventilátoru (CFX)

3 CHLAZENÍ

Chlazení elektrického stroje vlastně znamená odvod tepla, které se ve stroji tvoří vlivem ztrát elektromagnetických a mechanických. Dané teplo odvádíme ze strojem chladicí tekutinou, což je látka, která má za úkol chladit stroj. Jako chladicího média je možné použít plynu (např. vzduch, vodík) nebo kapalin (nejčastěji voda).

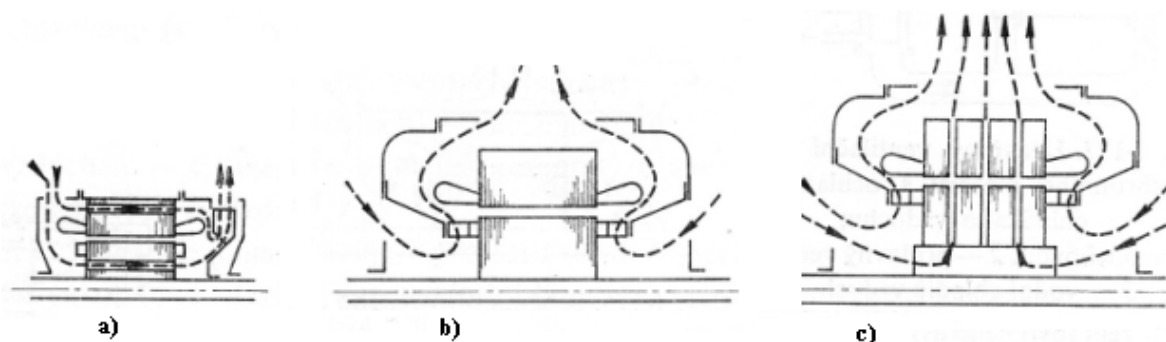
Dále můžeme mluvit o tepelném a chladicím okruhu. Tepelným okruhem máme na mysli zdroje ztrát (tepla), a dále přenos ztrát přes materiály stroje do chladicích ploch, kde už následuje chladicí okruh. Chladicí okruh je možno dále dělit podle obíhajícího chladiva. Je-li chladivem plynná látka, jedná se o ventilační okruh a je-li chladivem kapalná látka, je to hydraulický okruh. Obecně tedy chladicí okruh začíná zdrojem tlaku (ventilátor, čerpadlo) a pokračuje chladicími kanálky, kde se teplo z chladicích ploch předává chladicí tekutině.

V elektrických strojích rozeznáváme tři základní typy chlazení dle směru chladicího média. Je to axiální chlazení (obrázek:2.22 a)), dále radiální (obrázek:2.22 b)) a axiálně - radiální chlazení (obrázek:2.22 c)) [5]. Dále můžeme rozeznávat otevřený a uzavřený oběh chladiva. U otevřeného oběhu se médium neustále obnovuje, bere se tedy z okolního prostředí, a poté se mu odevzdává. Uzavřený oběh se vyznačuje tím, že chladivo primární odevzdává ve výměníku své teplo sekundárnímu médiu, čili oběh je zprostředkováván stále stejným chladivem.

Z hlediska nároku na vlastnosti chladicích médií je důležité dělení chlazení na přímé a nepřímé. U přímého chlazení je chlazený objekt vystaven přímo chladicímu médiu, zatímco u nepřímého je tento styk zprostředkován např. mezistěnou, či izolací vodičů. Je zřejmé, že u nepřímého chlazení jsou menší nároky na vlastnosti média, než u přímého chlazení.

Velice důležitý je taktéž zdroj energie pro ventilátor, či jiný přístroj zajišťující tok chladiva. Zdroj může být závislý, nebo nezávislý. Nezávislý zdroj získává energii pro oběh chladiva ze zdroje nezávislého na daném elektrickém přístroji. Jedná se třeba o ventilátor, který je postaven k motoru z boku a je napájen z jiného zdroje než motor. Závislý zdroj je poháněn energií z chlazeného stroje. Jde třeba o případ, kdy je ventilátor umístěn na hřídeli chlazeného stroje. V některých případech je proudění chladicího vzduchu zajištěno rozdílem teplot uvnitř stroje, či otáčením rotoru. Jde o takzvané přirozené chlazení a daný stroj nepotřebuje ventilátor.

Chlazení se označuje velkými písmeny IC (z anglického International Cooling), dále je pomocí třetího velkého písmena vytyčen typ média. Poté následuje, dvojčíslí udávající způsob oběhu média a zdroj energie zajišťující oběh [5].



Obrázek č. 3.1: Typy chlazení a) axiální chlazení, b) radiální chlazení, c) axiálně radiální – chlazení [5]

3.1 Nejčastější typy chlazení

Mezi nejčastější typy se řadí vzduchové a kapalinové chlazení. Oba dva typy mají své určité výhody a nevýhody.

3.1.1 Vzduchové chlazení

Stroje s tímto typem chlazení najdeme jak ve venkovních tak vnitřních instalacích. Při konstrukci stroje se musí uvážit tvary a velikosti chladicích kanálků pro správné proudění vzduchu. Tlakovým zdrojem zde bývá ventilátor, jenž se nejčastěji umísťuje na hřídel. Ten je buď tlačný, nebo sací. To poznáme podle toho, jestli je umístěn před nebo za strojem. Lepšího chlazení dosáhneme u prvního typu, proto bývá častější. Při otevřeném chlazení je nutno brát v úvahu zanášení stroje nečistotami ze vzduchu.

3.1.2 Kapalinové chlazení

Nejčastějším druhem kapaliny bývá voda. Její nevýhodou je že zamrzá při 0°C, proto bývá většinou používána ve vnitřních instalacích. Má ovšem lepší tepelné vlastnosti. Má šestkrát větší tepelnou kapacitu než vzduch, a také její tepelná vodivost je lepší (až 24 krát). Proto bývá používána u výkonnějších strojů. Taktéž je cenově dobře dostupná a ekologická. Tento chladicí okruh bývá většinou uzavřený, což má za následek nezanášení stroje nečistotami a taky snadnou kontrolu teploty chladiva, ale kvůli velkému množství vody v zásobnících je tento okruh značně objemný.

3.2 Nároky na chladicí média

U chladicích kapalin, které jsou v přímém styku s chlazenými částmi, je záhodno, aby měly dobré elektrické vlastnosti, čili vysoký izolační odpor a elektrickou pevnost. Z tepelných vlastností je nejdůležitější malá viskozita a povrchové napětí a vysoká tepelná kapacita a vodivost. Dále by tyto kapaliny neměly reagovat jakkoliv s povrchem kovů (slučování, rozpouštění atd.), měly by tedy být chemicky a fyzikálně netečné. Dále se požaduje nehořlavost, nízká teplota tání a nejedovatost.

U kapalin v nepřímém kontaktu, jak již bylo zmíněno, jsou nároky menší. Hlavní je, aby byly chemicky a fyzikálně netečné, a aby měly dobré tepelné vlastnosti.

Povrchové napětí

Je to děj, kdy se kapalina snaží dosáhnout co nejmenší plochy při určitém objemu. V praxi to znamená, že se tekutina zakulacuje a usiluje tím dospět ke stavu o co nejmenší energii. Dá se říci, že čím větší má kapalina povrchové napětí, tím více se zakulacuje. To vše se děje v důsledku interakce molekul povrchové vrstvy. Pro potřebu chlazení jsou nejvýhodnější kapaliny, s co nejmenší hodnotou povrchového napětí, jelikož lépe vyplní chladicí prostor.

Elektrická pevnost

Zvyšujeme-li při namáhání izolantů napětí, dosáhne intenzita pole jisté hodnoty, kdy dojde u tekutých izolantů k přeskoku a u pevných izolantů k průrazu. Tato intenzita je vlastně elektrická pevnost, značí se E_p . Popisuje specifický parametr elektroizolačních látek pro jejich použití v praxi. Je dána dle [9] vztahem

$$E_p = \frac{U_p}{d}, \quad \left[\frac{V}{m}; V, m \right] \quad (3.1)$$

kde E_p je elektrická pevnost,
 U_p je průrazné napětí a
 d tloušťka izolantu v místě přeskoku, či průrazu.

3.3 Chladicí média

Jak již bylo řečeno, chladicí médium je látka, která má za úkol chladit stroj. Mezi základní chladicí tekutiny, které se používají v elektrických strojích, patří vzduch, vodík, voda a silikonový olej. Jako primární chladivo se označuje chladivo, jež odvádí teplo zevnitř stroje, zatímco sekundární chladivo odvádí teplo z kostry nebo z chladiče stroje.

Vzduch

Toto médium bývá nejužívanější, co se týče chlazení elektrických strojů. Ventilátor, nejčastěji umístěný na hřídeli, vhání lopatkami vzduch přímo do motoru. Při otevřené ventilaci dochází k zanášení části ventilačních kanálů v motoru, což může vést ke zvětšení oteplení vinutí a železa stroje, což vede k zmenšení životnosti stroje, proto se používá k čištění vzduchu různých filtrů. Při otevřené ventilaci je neustálý přísun kyslíku do stroje, což může vlastně vést ke vzniku požáru po průrazu izolace a vzniku obloukového výboje. Tyto nedostatky můžeme odstranit ventilací se zavřeným oběhem paliva.

Vodík

Používá se směs, která je složena z 97% vodíku a 3% vzduchu. Tato směs má nižší hustotu asi 10krát než vzduch, což nám snižuje ventilační ztráty. Zvýšíme-li tlak vodíku, snižuje se jeho oteplení a teplotní spády mezi plynem a tělesem. Díky tomu se snižuje tepelné zatížení stroje a stroj může být menší. Mezi nevýhodu patří, že se neustále musí kontrolovat čistota vodíku, neboť při větší koncentraci se vzduchem tvoří výbušnou směs.

Voda

Je nehořlavá a nejedovatá. Mezi její nevýhody patří malá elektrická pevnost a reakce s různými látkami (koroze). Dále taky to, že při 0°C zamrzá. Používá se výhradně destilovaná voda. Zabraňuje se tak zanášení vodních kanálů nánosy solí.

Silikonové oleje

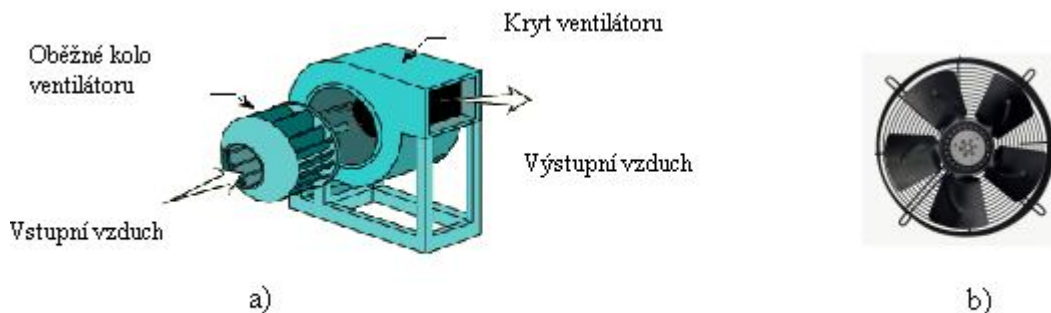
Jsou chemicky i tepelně stabilní. Mezi jejich přednosti patří dlouhá životnost. Jejich viskozita se změnou teploty mění málo. Velice často se používá pro chlazení velkých transformátorů.

3.4 Ventilátory

Ventilátory průmyslové se liší od ventilátorů v elektrických strojích velmi značně. Jenom zcela základní fyzikální zákony platí pro oba typy ventilátorů. Účinnosti průmyslových ventilátorů jsou okolo 90%, zatímco malé ventilátory v elektrických strojích mají účinnost 10 až 20% a velké přibližně 20 až 50%.

Ventilátory dělíme dle [9] na:

- Radiální – Zprostředkovávají vysoký tlak.
- Axiální – Užívají se při nízkých tlacích a velkých objemech vzduchu. Dále se vyznačují menšími ztrátami než radiální ventilátory.
- Kombinovaný – Z předchozích dvou ventilátorů.



Obrázek č. 3.2: Ventilátory a) Radiální ventilátor [4] b) Axiální ventilátor [6]

3.5 Kvadratický Atkinsonův zákon

U ventilací jsou zásadní dvě veličiny. První je množství média Q_v , protékajícího okruhem, které je potřebné k odvodu tepla ze stroje. Druhá veličina je tlak H , který musí vytvořit tlakový zdroj (ventilátor atd.) pro průchod chladícího média strojem. Poté je dle [9] možno psát

$$H = Q^2 \sum K. \quad \left[\frac{kp}{m^2}, \frac{m^3}{s}, \frac{kps^2}{m^8} \right] \quad (3.2)$$

Kde K je aerodynamický odpor protékaného úseku, jenž se liší pro různé kanály. To jak na rozměrech a tvaru, tak na podmínkách vstupu a výstupu kanálů. Pro odpor můžeme dle [9] psát

$$K = \frac{\Delta p}{Q^2} \quad \left[\frac{kps^2}{m^8}, \frac{kp}{m^2}, \frac{m^3}{s} \right] \quad (3.3)$$

4 ZTRÁTY, ASYNCHRONNÍHO STROJE

Jelikož se v následujících projektech budeme dále zabývat chlazením asynchronního stroje. Jsou v této kapitole shrnuty ztráty u elektrických strojů všeobecně a dále je zde věnována pozornost asynchronnímu stroji.

4.1 Ztráty v elektrických strojích

U každého elektrického stroje vznikají při provozu ztráty, ty se dělí podle míst a způsobu vzniku. Tato místa je zajisté nutné chladit, pro správnou činnost daného stroje. Všeobecně lze ztráty vznikající v elektrických strojích dle [7] dělit

1. ΔP_j Elektrické ztráty, jež se vyskytují ve vodivých částech stroje [W].
2. ΔP_{Fe} Magnetické ztráty, jež vznikají ve feromagnetických dílech, díky střídavému magnetickému poli. Taktéž se nazývají ztráty v železe [W].
3. ΔP_{mech} Mechanické ztráty, které zahrnují i ztráty ventilační [W].

Celkové ztráty ΔP_C získáme součtem jednotlivých ztrát

$$\Delta P_C = \Sigma \Delta P_n. \quad [W] \quad (4.1)$$

Pro účinnost stroje lze poté dle [7] psát

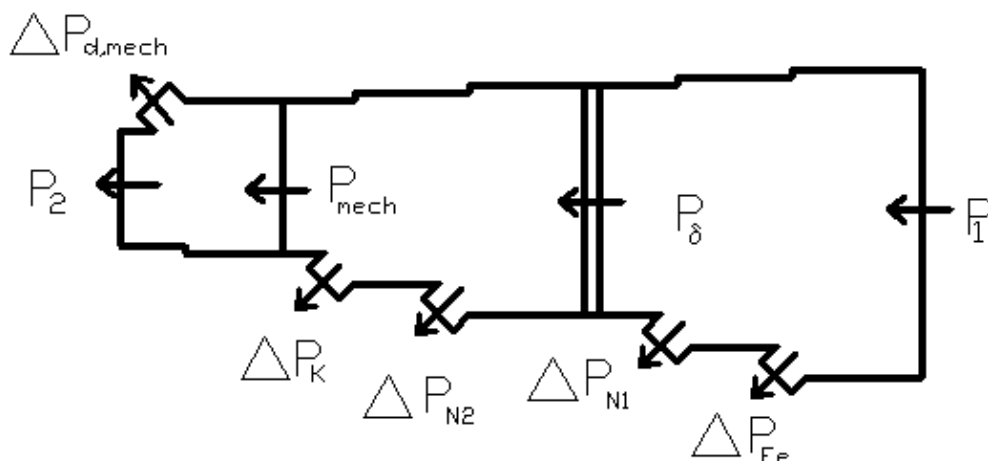
$$\eta = \frac{P}{P_p} = \frac{P_p - \Delta P_C}{P_p} = 1 - \frac{\Delta P_C}{\Delta P_C + P_p}. \quad [-] \quad (4.2)$$

Největší ztráty představují ztráty elektrické, přesněji Jouleovy ztráty ve vodičích, jimiž prochází proud. Teplo způsobené průchodem proudu zůstává částečně ve vodičích, kde způsobuje jejich oteplení a částečně odchází povrchem do okolí.

4.2 Rozdělení ztrát v asynchronním stroji

Teplotní pole souvisí s tokem výkonu, ztrátami, čili oteplením a taky s chlazením. Na obrázku (č. 4.2) je názorně vidět tok výkonu v asynchronním stroji i jeho ztráty. Dle [5] se u asynchronního stroje se určují tyto ztráty:

1. Jouleovy ztráty ve vinutí statoru ΔP_{N1} [W]
2. Jouleovy ztráty ve vinutí rotoru ΔP_{N2} [W]
3. Ztráty v železe (magnetické) rotoru a statoru ΔP_{Fe} [W]
4. Ztráty mechanické ΔP_{mech} [W]
5. Přídavné ztráty ΔP_d [W]



Obrázek č. 4.1: Tok výkonu asynchronního motoru

Kde P_1 je příkon [W],
 P_2 je výkon [W],
 P_δ je výkon ve vzduchové mezeře [W].

Ad. 1) a 2) Jouleovy ztráty

Jouleovy ztráty, taktéž elektrické, závisí na průchodu zatěžovacího proudu I , a to sice přímo úměrně jeho druhé mocnině. Dají se určit dle [5] vztahem

$$\Delta P_N = RI^2 \quad [W; \Omega, A] \quad (4.3)$$

kde R je činný odpor vinutí.

Ad. 3) Ztráty v železe

Dělí se na dva typy, a to na ztráty hysterezi P_H a vířivé P_V . Vznikají v plechách magnetického obvodu a nejvíce se tyto ztráty vyskytují ve jhu. Jejich velikost závisí na typu použité oceli.

$$\Delta P_{Fe} = \Delta P_V + \Delta P_H. \quad [W] \quad (4.4)$$

V rotoru jsou tyto ztráty zanedbatelné, pokud jeho kmitočet není velký. Vyskytují se tedy převážně ve statoru [5].

Ad. 4) Mechanické ztráty

Pod tyto ztráty se zahrnují např. ztráty v ložiskách nebo např. ventilační ztráty. Výpočet je ovšem vždy složitý a pouze přibližný. Nejpresněji se dají určit měření na daných strojích. Používá se různých empirických vztahů podle typu stroje [5].

Ad. 5) Přídavné ztráty.

Tyto ztráty vznikají především díky drážkování, což vede k nerovnoměrnosti vzduchové mezery.

Jejich výpočet je velice nesnadný. Dle [5] stačí použít vztah

$$\Delta P_d = 0,5\%P_1 \quad [W] \quad (4.5)$$

Kde ΔP_d jsou přídavné ztráty a
 P_1 je příkon.

4.2.1 Oteplení asynchronních strojů

Ztrátové teplo se mezi částmi asynchronního motoru šíří vedením, sáláním či konvekcí. Tyto děje se nevyskytují zvlášť, ale navzájem se ovlivňují a uplatňují se společně. Níže jsou uvedeny jen některé případy těchto dějů.

Přenos tepla vedením se v asynchronním stroji uplatňuje například vedením v hřídeli a v patkách stroje. Přirozená konvekce se vyskytuje u asynchronního stroje s otevřenou ventilací, kdy po doběhu stroje dochází k ventilaci, díky zmíněné přirozené konvekci tak, že vzduch se uvnitř stroje otepluje a jde ven ze stroje směrem nahoru. Nutno podotknout, že u tohoto děje je proudění vesměs laminární. Sálání lze uvažovat u pracujícího asynchronního stroje, jenž stojí daleko od stěn a vyzařuje do okolí určitý tepelný výkon.

Při umělé konvekci u asynchronního stroje je proudění udáváno do pohybu tlakovým zdrojem, nejčastěji radiální ventilátorem na hřídeli, tak aby překonávalo odpory v kanálech, a tím byla zaručena tepelná výměna. Převážně se vyskytuje proudění turbulentní.

4.3 Odvod tepla z asynchronních strojů

Jsou různé způsoby konstrukcí ventilací, jež závisí na druhu krytí a zatížení stroje. Podle směru proudění vzduchu rozeznáváme dle [5] tři způsoby ventilace: radiální, axiální a radiálně axiální.

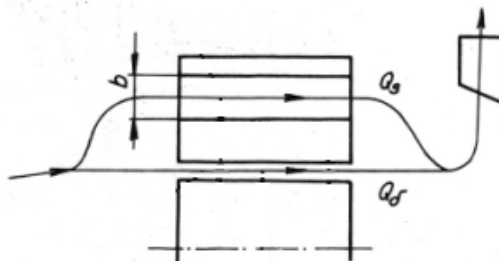
V elektrických strojích se při oběhu chladicího média vyskytuje převážně proudění turbulentní, jenž je podporováno drsností stěn statoru a rotoru a chvěním stroje. Na výsledné proudění mají také vliv chladicí kanály, a to jak tvar jejich na vstupu a výstupu tak tvar samotného kanálu.

4.3.1 Kanály v asynchronních strojích

Kanály slouží k průchodu proudění chladicího média strojem tam, kde je nutno odebírat teplo ze zahřívajících se částí. V asynchronních strojích se vyskytuje mnoho možností jak vést chladicí médium. Dle [9] můžeme mít stroj bez radiálních kanálů, stroje s radiálními kanály v rotoru, poté stroje s radiálními kanály ve statoru a také stroje s radiálními kanály v rotoru i statoru. Většinou se posuzuje tvar a typ kanálu a jejich tlakový vliv na tok chladicího média.

Asynchronní stroj bez radiálních kanálů

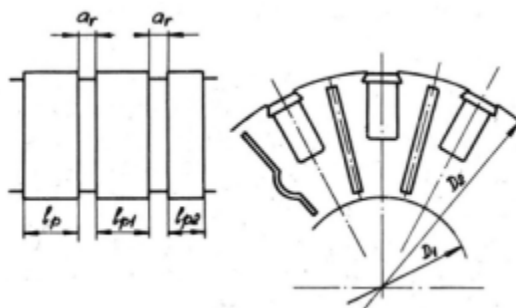
V tomto případě prochází proudění chladicího média paralelními axiálními kanály. Přičemž nejvíce se uplatňují statorové axiální kanály. Vzduchovou mezerou prochází většinou něco okolo 2% z celkového toku. Toto číslo je ještě menší, pokud se ve stroji vyskytují i rotorové axiální kanály. Naopak je tato hodnota větší u větších asynchronních strojů [9].



Obrázek č. 4.2: Tok vzduchovou mezerou Q_δ paralelní s tokem Q_s ve statorové větvi [9]

Asynchronní stroj s radiálními kanály v rotoru

V dlouhých strojích se rotorový svazek plechů dělí v pakety o délce l_p . Mezi nimi jsou umístěny distanční vložky, jež jsou přichyceny k paketům. Mezera mezi dvěma distančními vložkami je dělena na dva kanálky klínem a vinutím. Takto vzniklé axiální mezery (kanály) a dají se přirovnat k radiálním ventilátorům [9].

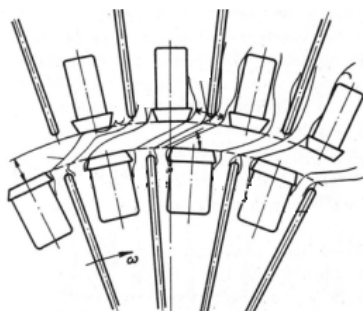


Obrázek č. 4.3: Radiální ventilační kanály v rotoru [9]

Asynchronní stroj s radiálními kanály v statoru, v statoru a rotoru

Konstrukce těchto kanálků je stejná jako konstrukce radiálních kanálků v rotorech. Statorový svazek plechů se dělí v pakety, mezi kterými jsou umístěny distanční vložky. Takto vzniklá mezera je ještě dělena na dva kanálky klínem a vinutím.

Šířky statorových a rotorových mezer jsou většinou stejné, ovšem jejich počet může být odlišný. Poté nám nastávají situace, kdy jsou jednotlivé mezery různě přesazené a tok se dělí nepravidelně. Tyto stroje, u kterých se vyskytují radiální kanály v rotoru i statoru patří k výkonově větším asynchronním strojům [9].

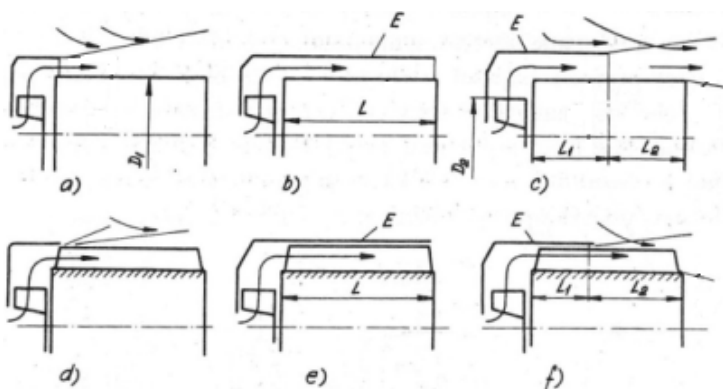


Obrázek č. 4.4: Přechod toku z radiálního kanálu v rotoru do radiálního kanálu ve statoru [9]

4.3.2 Vnější chladicí okruh uzavřených asynchronních strojů

U těchto strojů je teplo odváděno proudícím médiem z povrchu stroje. Přitom se chladivo trvale obnovuje. Jedná se tedy o otevřený okruh. Zajisté existují případy, kdy je okruh uzavřen a je vybaven chladičem, který předává teplo dalšímu chladicímu okruhu. Vnitřní chladicí okruh se u těchto strojů může a nemusí vyskytovat.

Ventilátor u tohoto typu chlazení může být jak závislý na energii stroje, tak nezávislý. Je-li ventilátor, zpravidla radiální, umístěn na hřídeli stroje, vzduch se ohýbá z radiálního směru do axiálního, to se v praxi nejčastěji realizuje ventilátorovým krytem E , který nám i poté vede proudění nad kostrou stroje jak je patrné např. z obrázku 4.5 e). Dále můžeme ventilátor umístit samostatně na stroj, či někde vedle něj. Poté je většinou tento ventilátor napájen jiným zdrojem a je tedy na stroji nezávislý.



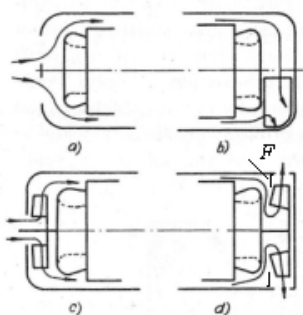
Obrázek č. 4.5: Vnější chladicí okruh uzavřených strojů, a) b) c) povrch hladký, d) e) f) povrch žebrovaný, a) d) volný povrch b) e) částečně zakrytý, c) f) zakrytý [9]

Nutno podotknout, že vnější chladicí okruh můžeme také dělit podle typu ovívané plochy. Je-li povrch hladký, či žebrovaný a jsou-li tyto dvě možnosti zakryté, nezakryté či částečně zakryté viz obrázek 4.6.

4.3.3 Štíty asynchronních strojů

Štíty můžeme dále dle [9] na:

- | | |
|-----------------------|---|
| štíty bez ventilátoru | - vstupní štíty sací ventilace a
- výstupní štíty tlačné ventilace |
| štíty s ventilátorem | - vstupní štíty tlačné ventilace a
- výstupní štíty sací ventilace |

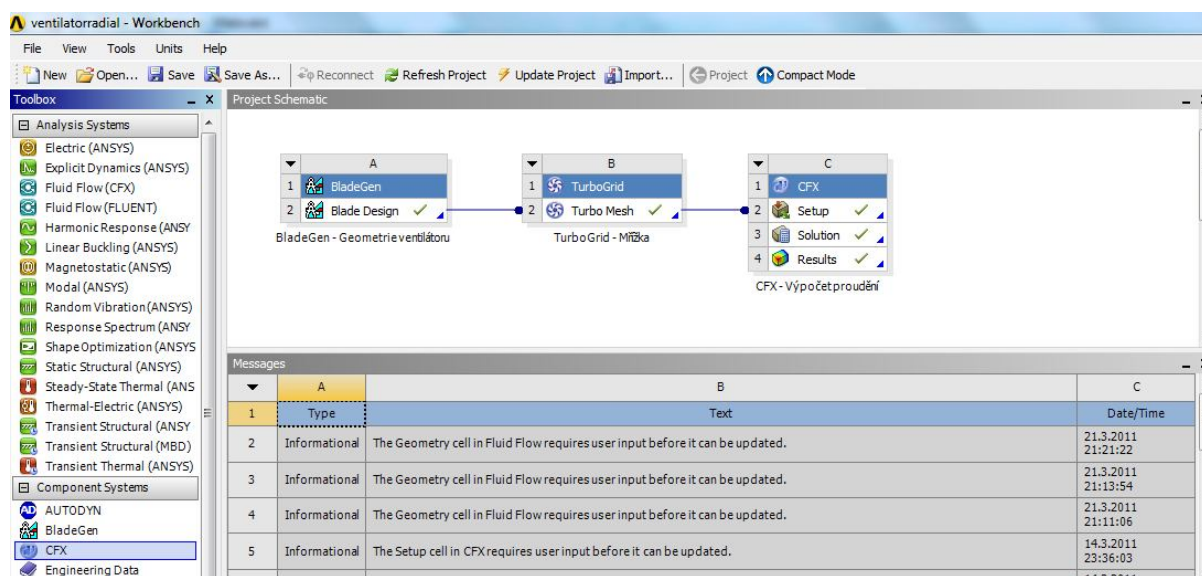


Obrázek č. 4.6: Vstupní a výstupní víka, a) vstupní víko u sací ventilace, b) výstupní víko u tlačné ventilace, c) vstupní víko u tlačné ventilace, d) výstupní víko u sací ventilace [9]

Proudění ve štítech je vesměs turbulentní. Z obrázků je patrný tvar pohybu média. Je vidět, že u vstupních štítů, jsou po prvním ohybu toku chlazená čela vinutí a po druhém ohybu jde médium do chladících kanálků. U výstupních štítů je tomu obdobně. Štíty jsou vesměs rotačně symetrické.

5 VYTVOŘENÍ MODELU VENTILÁTORU

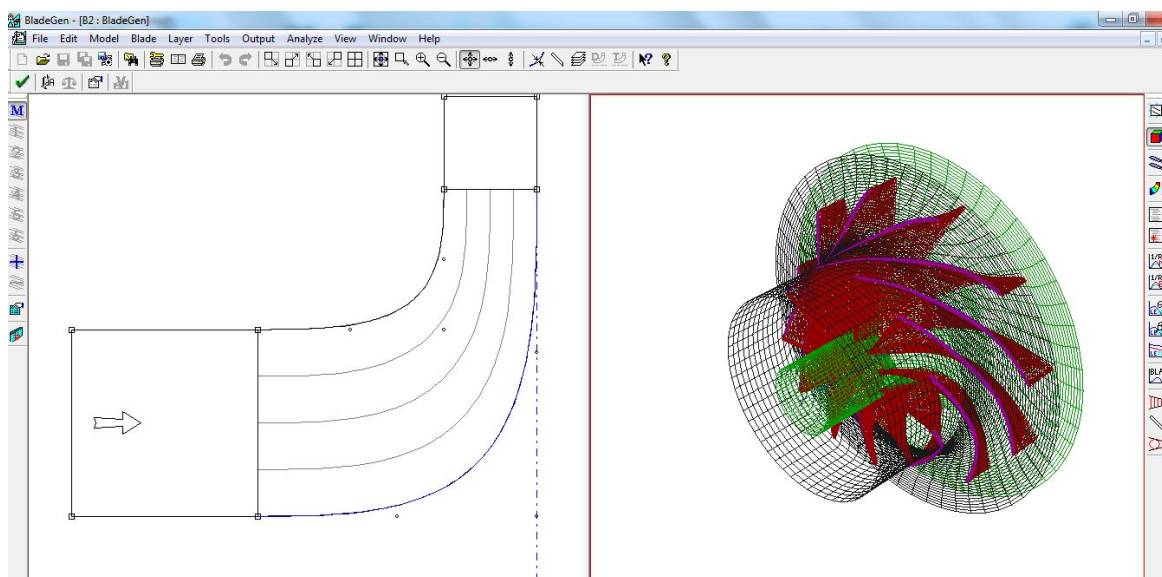
Pro vytvoření modelu ventilátoru asynchronního stroje byl použit výpočetní program BladeGen, který je součástí programu Ansys Workbench (viz. obrázek 5.1). Prostředí BladeGen obsahuje nástroje pro návrh ventilátorů, kompresorů, turbín atd.



Obrázek č. 5.1: Schéma modelování ventilátoru

5.1 Vytvoření modelu ventilátoru v programu BladeGen

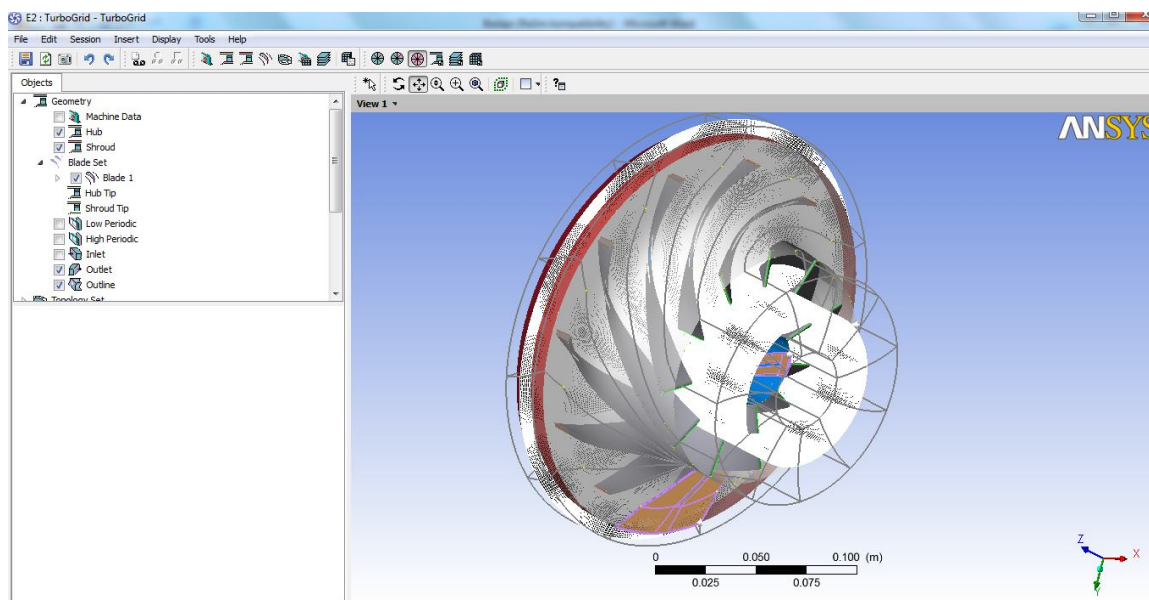
Po spuštění programu BladeGen a založení nového projektu, se nám objeví nabídka, kde si můžeme vybrat typ ventilátoru, či jiného typu přístroje. Byl zvolen typ – *Radial Impeller*. V další nabídce si můžeme navolit počet lopatek a rozměry daného modelu. Počet lopatek byl ponechán na jedenácti. Dále donastavíme vlastnosti našeho modelu v záložce *Model – Properties*: *Component Type* nastavíme na *Fan*, *Rotation type* zvolíme *Positive* a nakonec nastavíme délkové jednotky modelu na milimetry. V záložce *Tools – Scale Models* můžeme dále model zvětšovat a zmenšovat pomocí měřítka. Po vybrání námi zvoleného typu, můžeme následně různě upravovat geometrii ventilátoru, pomocí pravého okna (viz. Obrázek 5.2). V levém okně vidíme, jak se nám ventilátor pozměňuje. Měnit můžeme například tvar lopatek, vstupních a výstupních krytů atd. Pomocí programu BladeGen máme tedy vytvořenou geometrii radiálního ventilátoru o určité velikosti a počtu lopatek. Abychom tento model mohli použít pro výpočet proudění, je nutné udělat plošnou a objemovou mřížku (mesh). Tu je možno udělat pomocí programu TurboGrid, jenž je opět součástí Ansys Workbench (obrázek číslo 5.1).



Obrázek č. 5.2: Programové prostředí BladeGen

5.2 Vytvoření plošné a objemové mřížky

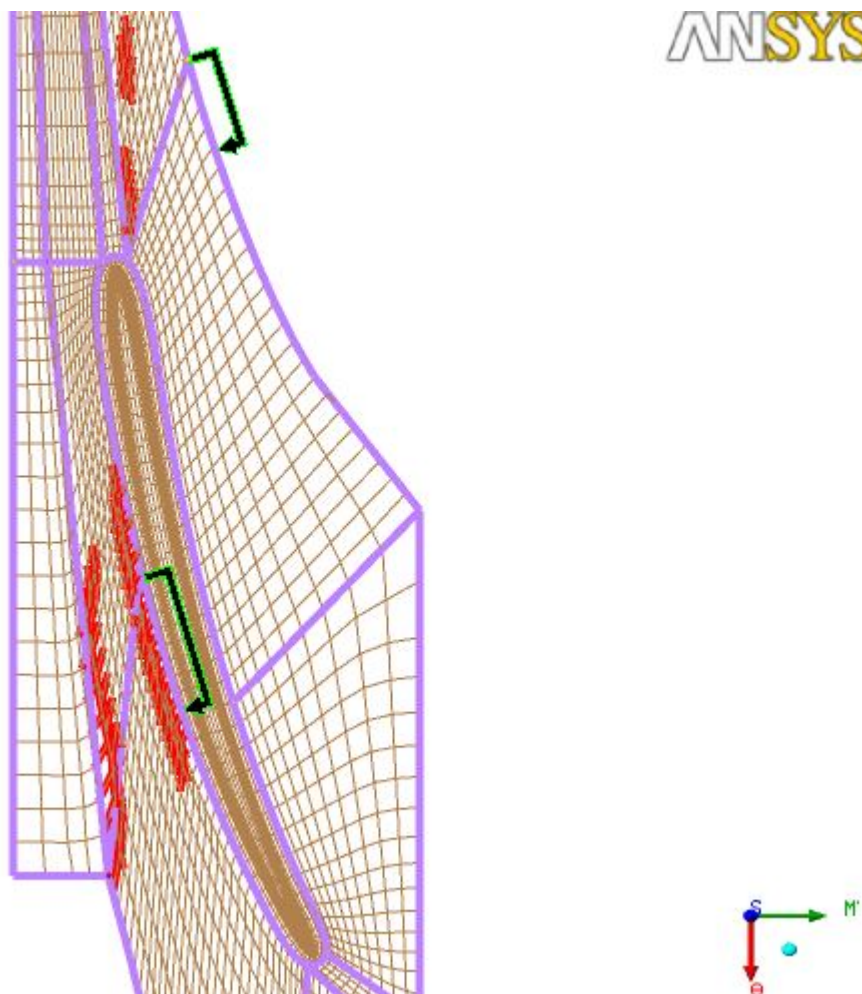
Jak již bylo napsáno, mřížka (mesh) byla vytvořena pomocí programu TurboGrid (obrázek 5.3). Tento program je přímo vytvořen pro generování mřížek ventilátorů, turbín, čerpadel a dalších strojů a přístrojů pro fluidní inženýrství.



Obrázek č. 5.3: Mřížka radiálního ventilátoru

Po naimportování geometrie vytvořené v programu BladeGen, si navolíme typ a velikost mřížky. Rozklikneme nabídku *Topology Set* a zvolíme druh mřížky *H/J/C/L-Grid*, dále zaškrtneme záložku *Include O-Grid*. Tím máme zvolen typ mřížky. Kvalitu mřížky nastavíme v záložce *Mesh Data*. Položku *Node Count* dáme na *Fine*, čímž navolíme dostatečný počet uzlů. A dále zaškrtneme záložky *Inlet Domain* a *Outlet Domain*, tak přidáme vstupní a výstupní oblast

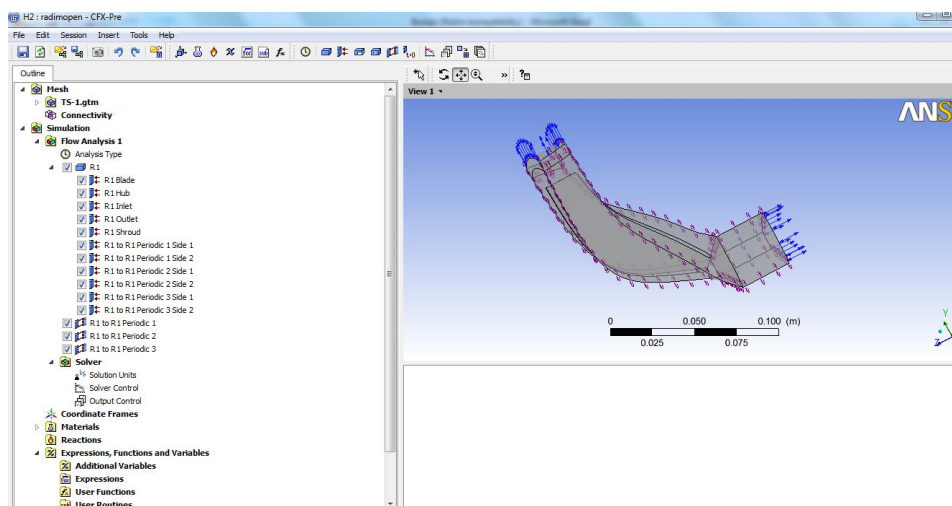
pro chladicí médium. V záložce *Insert* zvolíme *Mesh* a program TurboGrid nám vygeneruje objemovou mřížku. Pokud nám program zahlásí chybu, je možno mřížku rychle upravit. V tomto softwaru je možné navolit několik typů různých zobrazení, můžeme se tak podívat na námi vytvořenou mřížku a tažením bodů ji upravovat, až bude přesně odpovídat tvaru geometrie (obrázek 5.4). Výsledný model poté nainportujeme do programu CFX, který nám vypočte průběh proudění.



Obrázek č. 5.4: Úprava mřížky radiálního ventilátoru

6 VÝPOČET VZNIKU PROUDĚNÍ U VENTILÁTORU

Námi vytvořený model radiálního ventilátoru je pomocí Ansys Workbench naimportován do programu CFX jak lze opět vidět z obrázku číslo 5.1. Z obrázku č. 6.1 lze vidět, že v programu CFX je zobrazena pouze jedna jedenáctina ventilátoru, tedy lopatka se vstupní a výstupní doménou a část krytu, dále jsou vidět periodické rozhraní ventilátoru, které vlastně definují osy symetrie. Zbylé části jsou tedy geometricky shodné a není je nutné počítat. To nám urychluje výpočet.



Obrázek č. 6.1: Ventilátor v CFX-PRE

6.1 Nastavení a vypočtení modelu v CFX-PRE a CFX-Solver

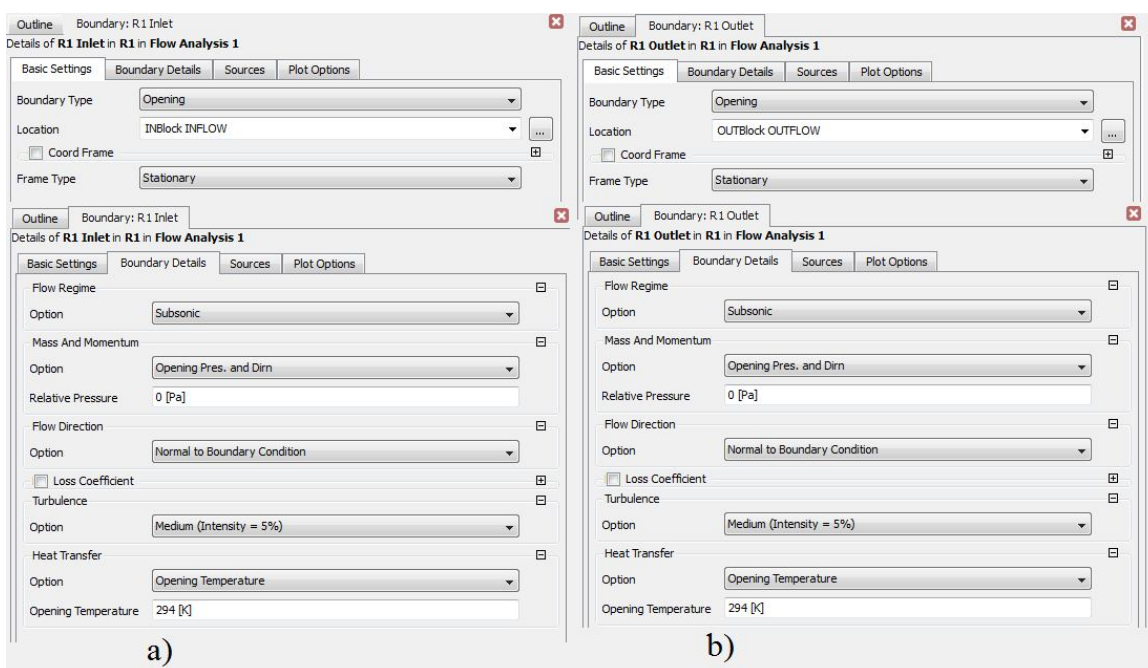
Po načtení modelu s vypočtenou sítí, je nutno zapnout turbínový mód, ten najdeme v záložce *Tools – Turbo Mode*. V základním nastavení zvolíme typ stroje, zde se jedná o ventilátor, čili zvolíme *Machine Type - Fan*, osu rotace ponecháme na *Z, Rotation - Z* a klikneme na *Next*.

V novém okně pro celkové nastavení komponenty zvolíme, že se jedná o rotující komponentu. *Type-Rotating*. Můžeme zde zapsat také rychlost, jakou se ventilátor bude otáčet. V této práci je radiální ventilátor propočten dvakrát a to pro otáčky 3000 a 5000 ot.min⁻¹. Ventilátor je totiž umístěn na hřídeli motoru, takže otáčky 3000 ot.min⁻¹ znázorňují normální chod a otáčky 5000 ot.min⁻¹ znázorňují chod s připojeným měničem frekvence.

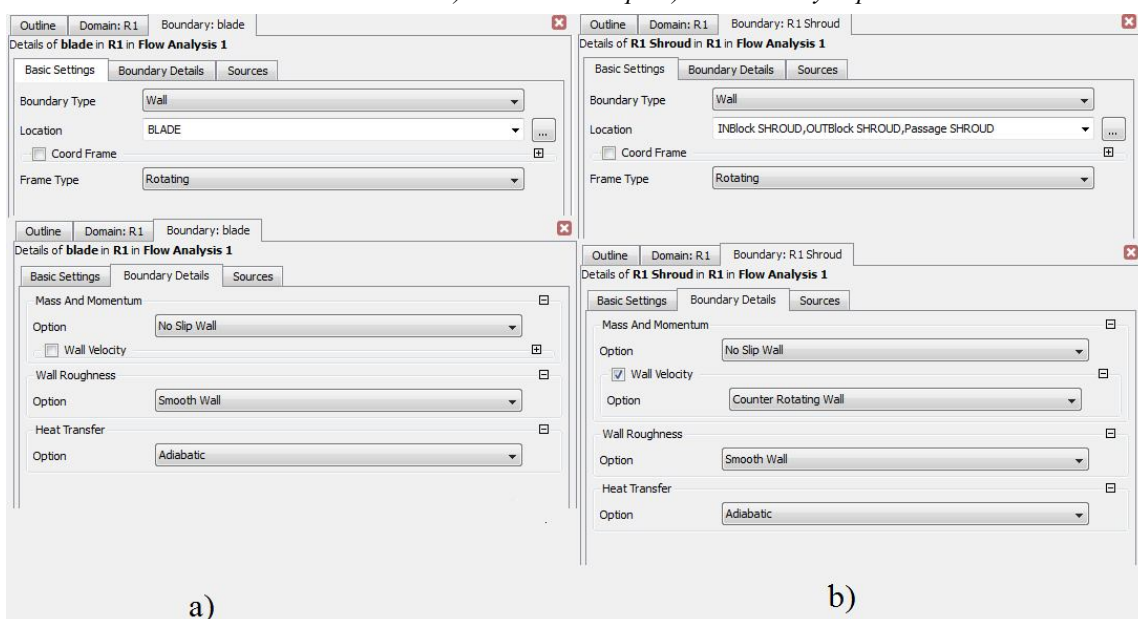
Přejdeme do dalšího okna, pomocí tlačítka *Next*. V tomto okně se nastavují základní fyzikální vlastnosti. Typ tekutiny bude ideální vzduch a typ analýzy bude ustálený stav. *Fluid - Air Ideal Gas, Analysis Type – Steady State*. Dále nastavíme referenční tlak, jenž bude jedna atmosféra, typ přenosu tepla bude celkovou energií a turbulentní model bude *k-Epsilon*. *Reference Pressure – 1atm, Heat Transfer – Total Energy, Turbulence – k-Epsilon*. Dále si zvolíme, že teplota vzduchu na vstupu bude 20°C. *T-Total – 20°C*.

Kliknutím na tlačítko *Next* se dostaneme do okna, kde vidíme jednotlivá periodická rozhraní. Jelikož všechny doposud použité programy spadají pod Ansys Workbench, umí spolu dobře komunikovat, a tak program sám pozná tyto periodické rozhraní, díky nimž rozpozná symetrické oddělení jednotlivých sekcí lopatek.

Opět klikneme na tlačítko *Next* a dostaneme se do okna pro jednotlivá rozhraní jako vstup, výstup, lopatka a kryty ventilátoru. Program je opět rozpoznal a nastavil je jako otáčející se stěnu, dále z předchozích informací nastavil velikosti teploty a tlaku na vstupních a výstupních doménách. Jen je nutno nadefinovat, aby vstup i výstup měli typ rozhraní otevřený, což znamená, že ventilátor si sám vlivem otáčení vsaje vzduch a nebude mít tedy žádné doplňující podmínky. Poté se opět po kliknutí na tlačítko *Next*, dostaneme k nabídce do vstupu Všeobecného módu – *Enter General Mode*. Zde můžeme opět nastavovat rozhraní a taktéž tady můžeme nastavit přesnost a počet kroků řešiče, poklikáním na záložku *Solver Control*. Na následujících obrázcích je ukázáno, jak je nastaven vstup, výstup, lopatka a kryt ventilátoru.

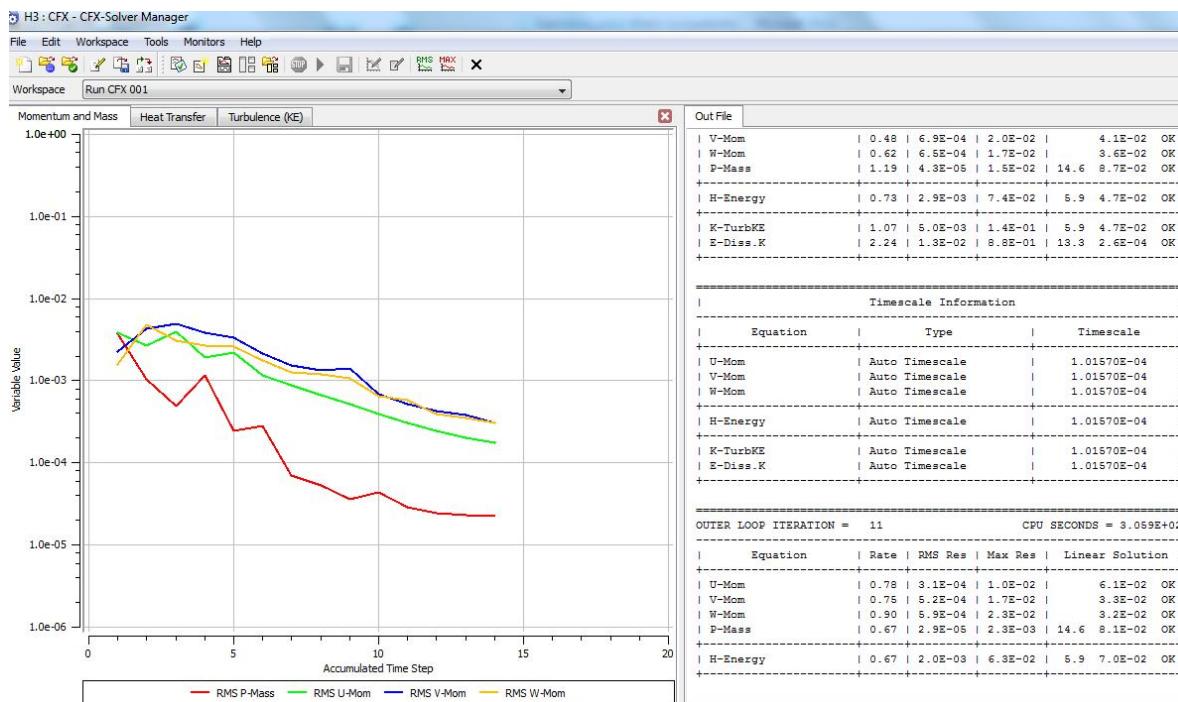


Obrázek č. 6.2: a) Nastavení vstupu b) Nastavení výstupu



Obrázek č. 6.3: a) Nastavení lopatky b) Nastavení krytu ventilátoru

Nyní máme nastavený model pro výpočet. Můžeme tedy zavřít CFX-PRE a v programu Ansys Workbench spustíme řešič, tedy CFX-Solver, a to tak, že poklepeme na ikonku CFX Solution. Na následujícím obrázku vidíme prostředí řešiče.



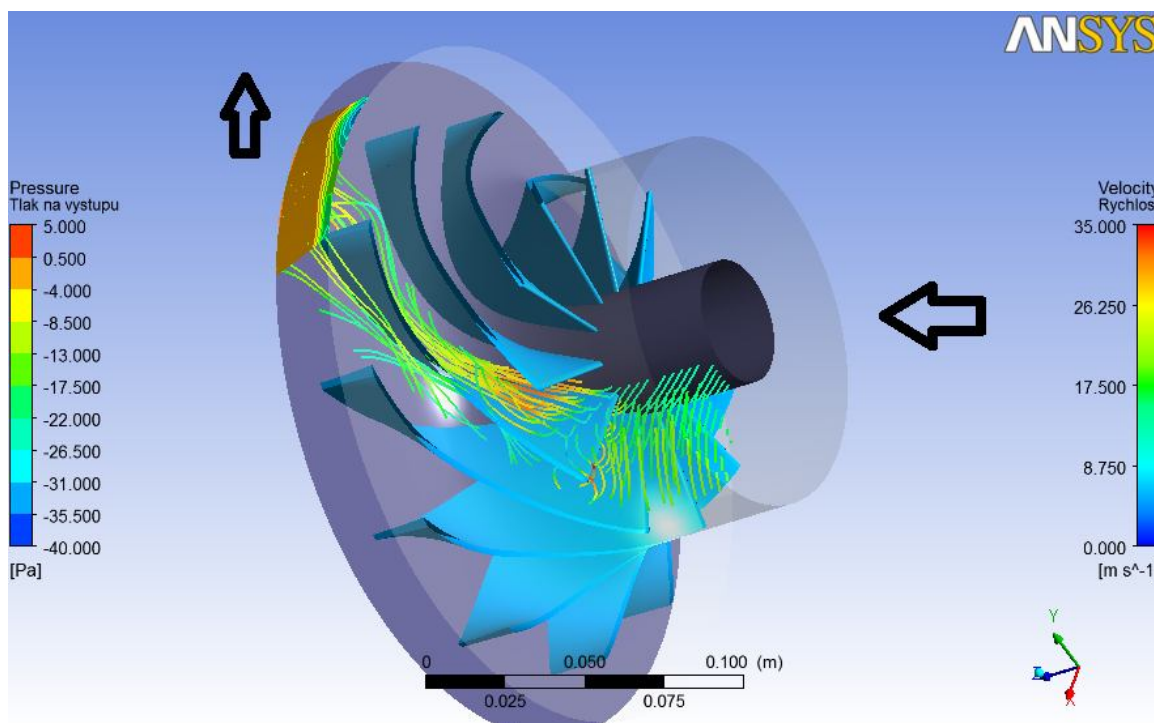
Obrázek č. 6.4: Řešič – CFX Solver

6.2 Vyhodnocení modelu pro otáčky 3000ot.min⁻¹

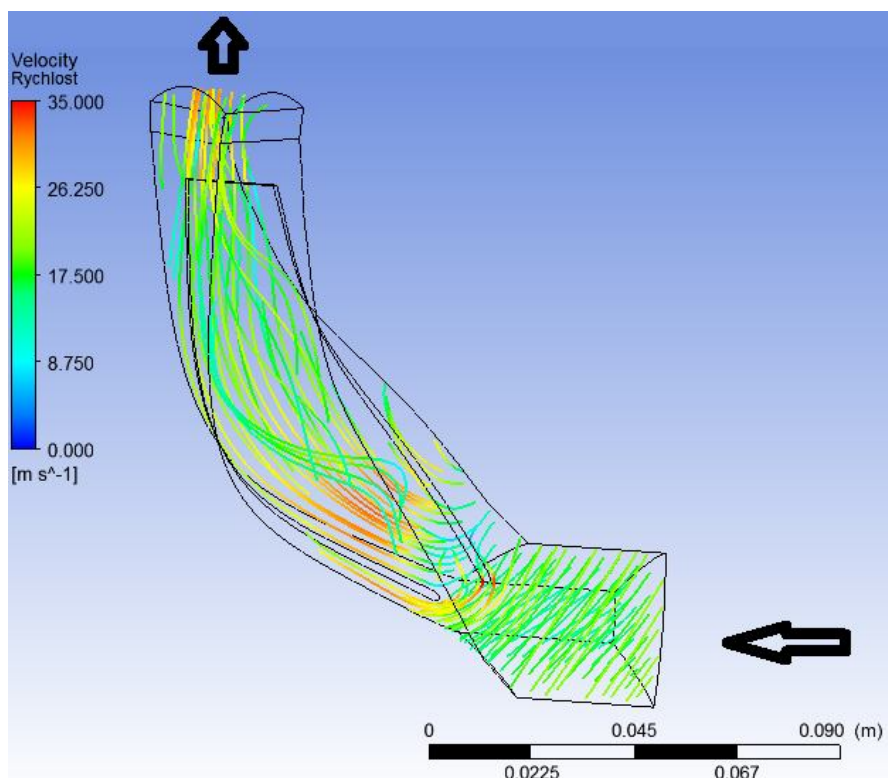
Nejprve bude vyhodnoceno proudění, způsobené ventilátorem umístěným na hřídeli rotoru při rychlosti otáčení motoru 3000ot.min⁻¹. Výpočet, jenž byl vyřešen programem CFX-Solver si nyní otevřeme v programu CFX-Post. Tento software je dělán přímo na vyhodnocování proudění. Můžeme si tady vynášet proudnice, kontury, vektory, grafy atd. Na obrázku 6.5 vidíme celý radiální ventilátor, kde šipkami je znázorněn vstup a výstup. Dále jsou zde ukázány proudnice s rychlostí média a tlak, kterého médium dosáhne na výstupu.

Na níže uvedeném obrázku 6.6, vidíme proudnice znázorňující rychlost. Je vidět, že ventilátor urychlí vzduch na vstupu vlivem otáčení na rychlost okolo 17m.s⁻¹. V blízkosti lopatky se nám tvoří turbulentní proudění. Můžeme vidět, že někde se proudění zpomaluje, což může být zapříčiněno třením a narážením do lopatky.

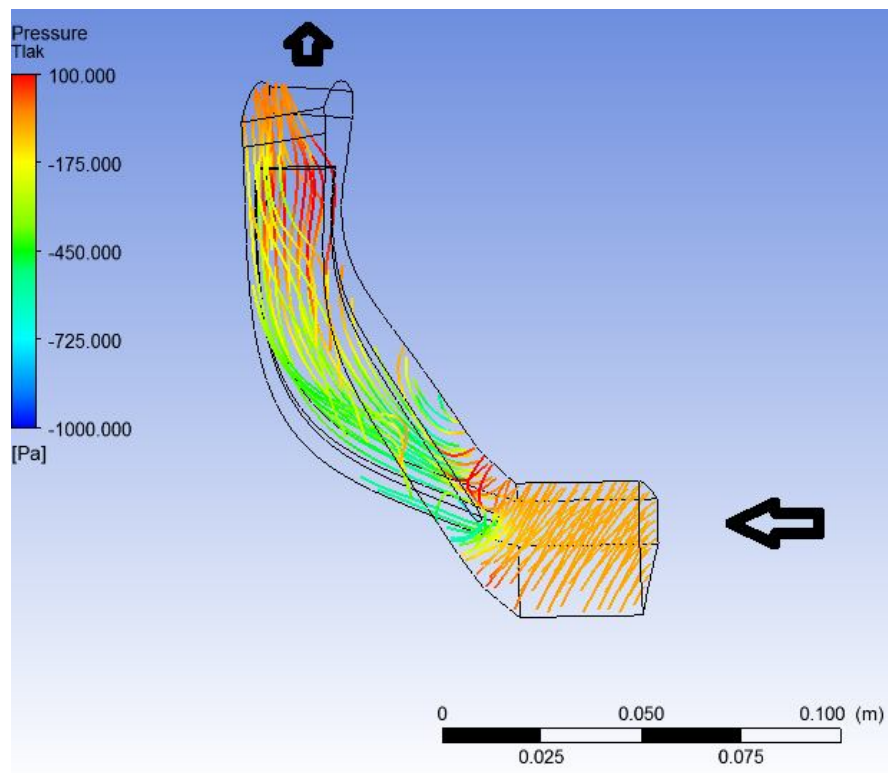
Na dalším obrázku 6.7 vidíme proudnice zobrazující tlak, kterého dosahuje médium průchodem otáčejícího se radiálního ventilátoru. Jak je vidno na vstupu u lopatky dosahuje proudění podtlaku, ventilátor si vlastně nasává vzduch. V těchto místech taktéž vidíme větší rychlost vzduchu (obrázek číslo 6.6). Na konci lopatky má vzduch nejvyšší tlak, a zároveň s porovnáním s obrázkem číslo 6.6 nejmenší rychlost.



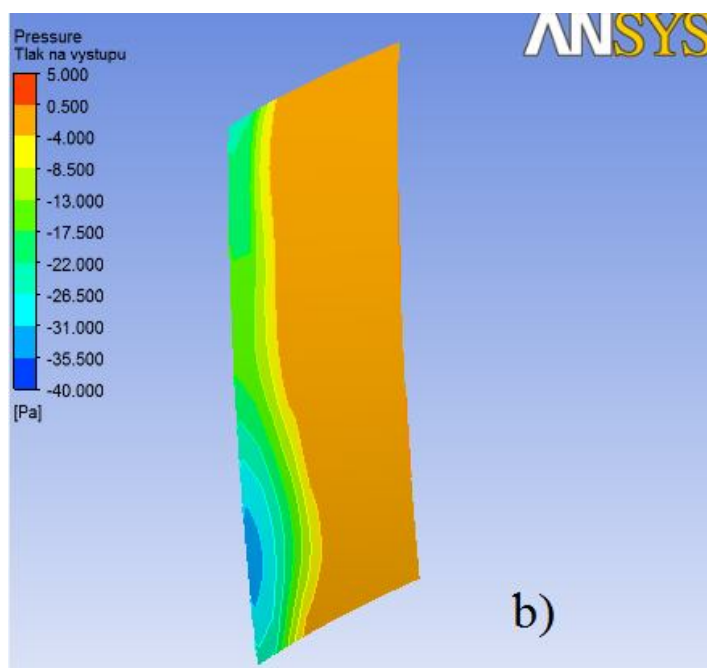
Obrázek č. 6.5: Průchod média ventilátorem



Obrázek č. 6.6: Rychlost vzduchu proudící ventilátorem, otáčky 3000ot.min⁻¹



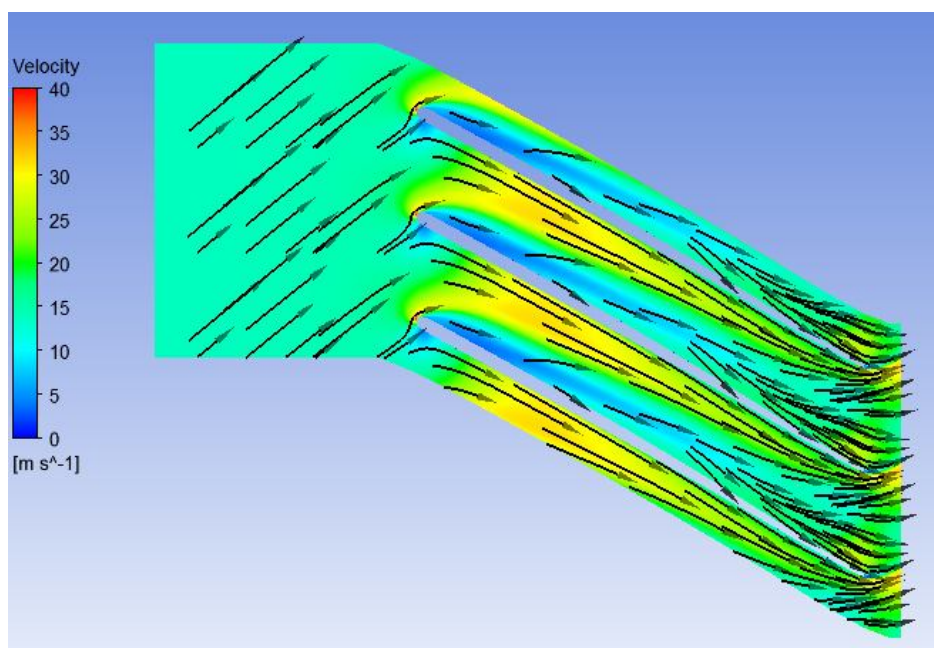
Obrázek č. 6.7: Tlak vzduchu proudící ventilátorem, otáčky 3000ot.min⁻¹



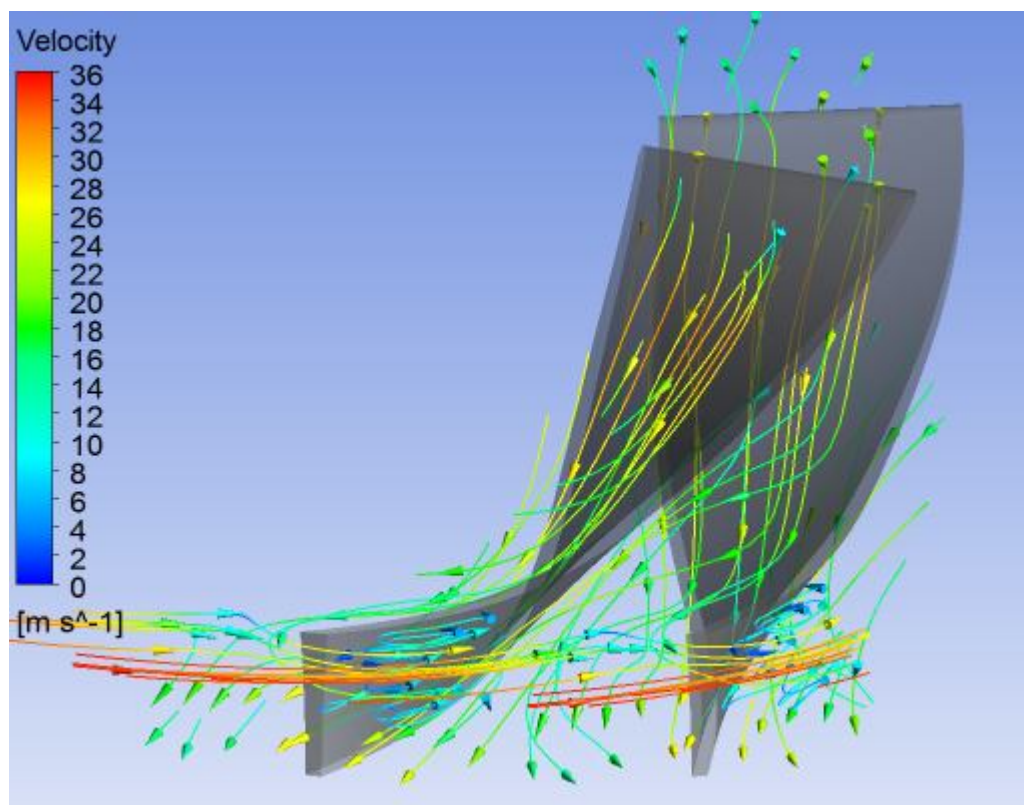
Obrázek č. 6.8: Profil výstupu - tlak vzduchu na výstupu proudící z ventilátoru, otáčky $3000 \text{ ot. min}^{-1}$

Na obrázku 6.8 máme profil výstupu z jedné jedenáctiny ventilátoru. Je zde zobrazeno rozložení tlaku, které médium dosahuje na výstupu z ventilátoru.

Program CFX-Post nám nabízí samotnou analýzu námi počítaného ventilátoru. Stačí si zvolit v nabídce *File – Report – Load Fan Report Template*. Program nám poté zobrazí množství grafů a obrázků s různými daty. Níže byly vybrány pouze některé obrázky pro přehled, co vše tento program dokáže.



Obrázek č. 6.9: Meridionální řez ventilátorem – vektory rychlosti, otáčky $3000 \text{ ot. min}^{-1}$



Obrázek č. 6.10: 3D proudnice rychlosti, otáčky $3000 \text{ ot. min}^{-1}$

Na obrázku číslo 6.9 vidíme meridionální (rovníkový) řez ventilátorem. Jsou zde zobrazeny vektory rychlosti vzduchu. Na obrázku číslo 6.10 vidíme nyní 3D proudnice s vektory rychlosti.

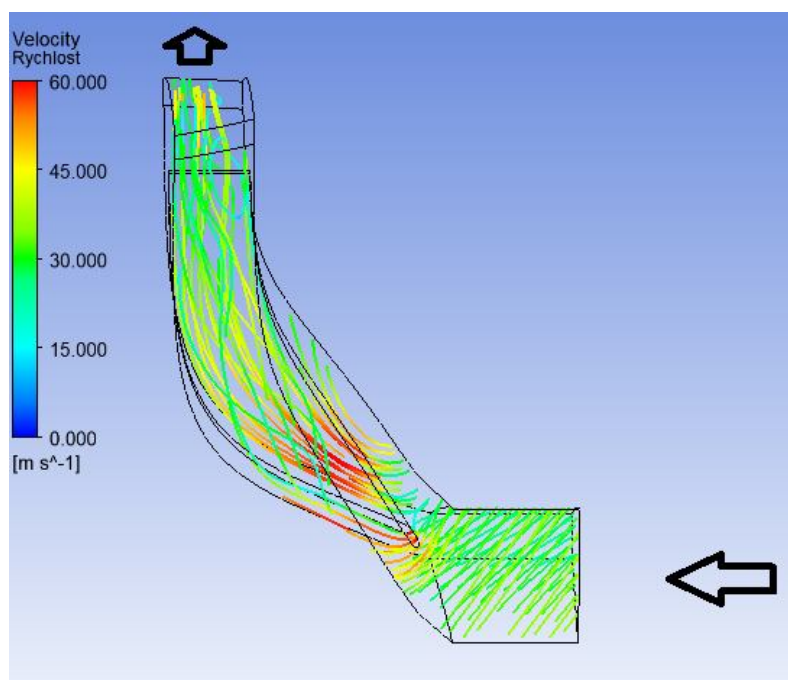
Jelikož budeme v následující kapitole analyzovat proudění, které vytvořil ventilátor ve vzduchové mezeře motoru, musíme si uložit výstupní parametry proudění z ventilátoru. To lze udělat v záložce *File – Export*. V okně které nám vyskočí, si nastavíme, které rozhraní chceme uložit, u nás je to tedy výstup – *Outlet*. Tento soubor poté nahrajeme jako vstup u modelu vzduchové mezery.

6.3 Vyhodnocení modelu pro otáčky 5000ot.min⁻¹

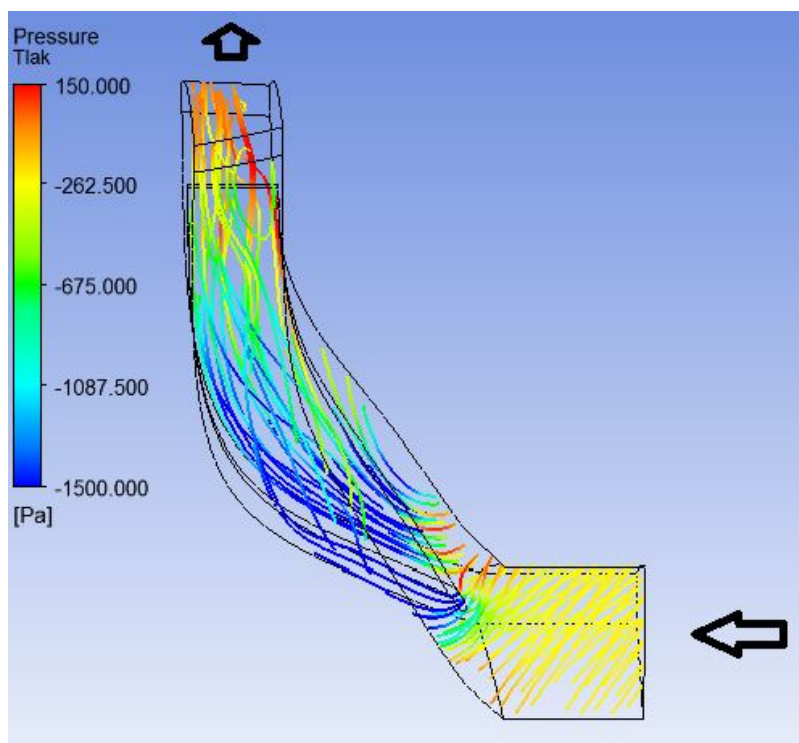
V programu CFX-Pre pouze změníme velikost rychlosti otáčení ventilátoru a spustíme výpočet.

Na níže uvedeném obrázku 6.11, vidíme proudnice znázorňující rychlost. Je vidět, že ventilátor nyní urychlí vzduch na vstupu ventilátoru díky vyšším otáčkám motoru na rychlost okolo 30m.s⁻¹. V blízkosti lopatky se nám opět tvoří turbulentní proudění. Z obrázku je vidět, že někde se proudění zpomaluje, což může být zapříčiněno třením a narážením do lopatky.

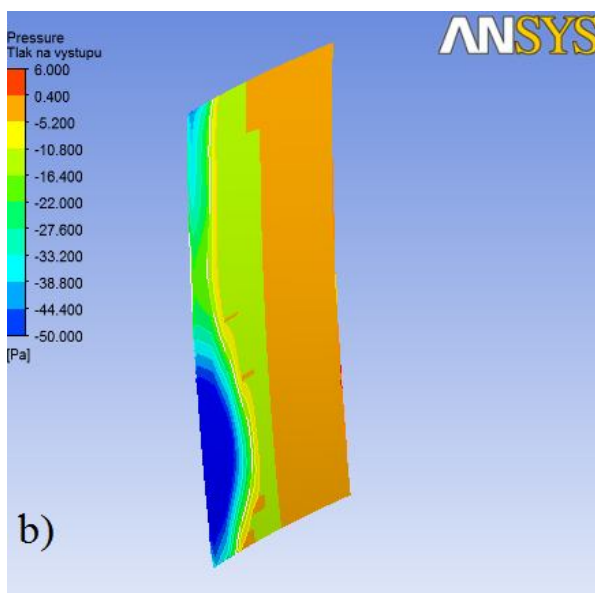
Na dalším obrázku 6.12 vidíme proudnice zobrazující tlak, kterého dosahuje médium průchodem otáčejícího se radiálního ventilátoru. Jak je vidno na vstupu u lopatky dosahuje proudění podtlaku, jenž je opět větší, díky vyšší rychlosti otáčení, ventilátor si vlastně ještě více nasaje vzduch. V těchto místech také vidíme větší rychlost vzduchu na obrázku č. 6.11. Na konci lopatky má vzduch nejvyšší tlak, a zároveň v porovnání s obrázkem č. 6.11 nejmenší rychlost v daném místě.



Obrázek č. 6.11: Rychlost vzduchu proudícího ventilátorem, otáčky 5000ot.min⁻¹



Obrázek č. 6.12: Tlak vzduchu proudícího ventilátorem, otáčky $5000 \text{ ot. min}^{-1}$



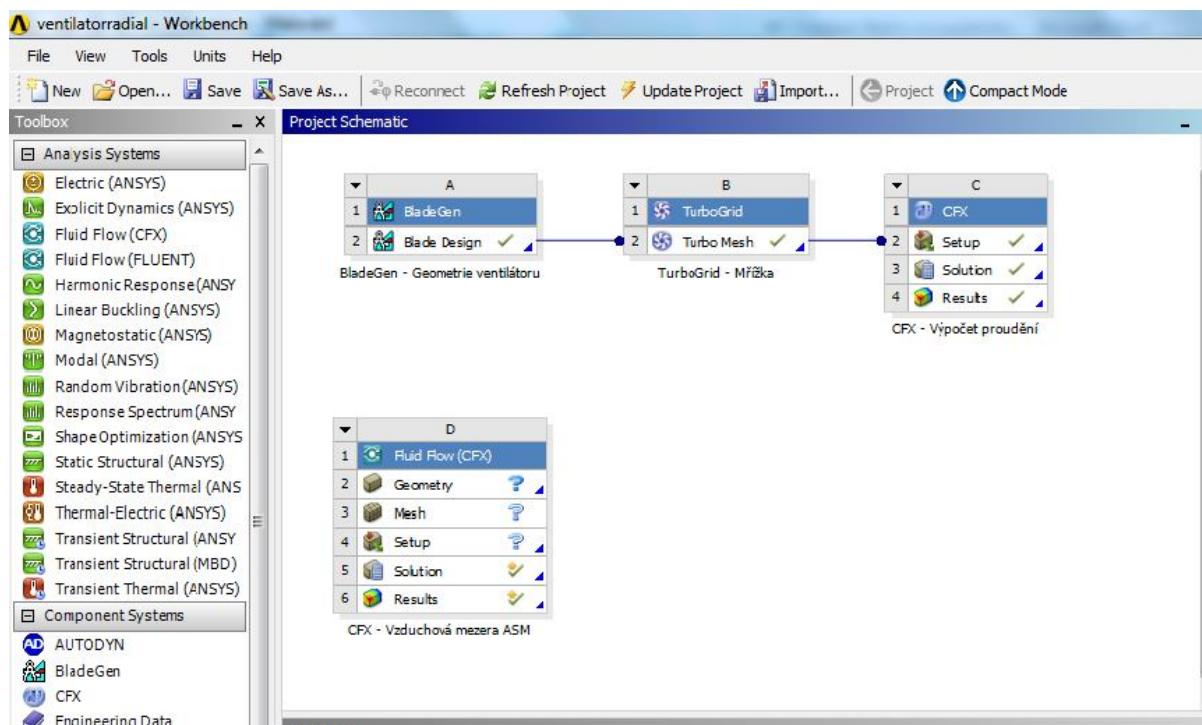
Obrázek č. 6.13: Profil výstupu - tlak vzduchu na výstupu proudící z ventilátoru, otáčky $5000 \text{ ot. min}^{-1}$

Na obrázku číslo 6.13, máme opět profil výstupu z jedné jedenáctiny ventilátoru se zobrazením rozložení tlaku, které médium dosahuje na výstupu z ventilátoru.

Nakonec musíme opět uložit výstupní parametry proudění, které vytvořil ventilátor pro otáčky $5000 \text{ ot. min}^{-1}$. Tyto výstupní parametry budou nahrány jako vstupní parametry u modelu vzduchové mezery asynchronního motoru. Uložení nalezneme v záložce *File – Export*.

7 VYHODNOCENÍ VLIVU RYCHLOSTI OTÁČENÍ VENTILÁTORU NA PROUDĚNÍ VE VZDUCHOVÉ MEZEŘE

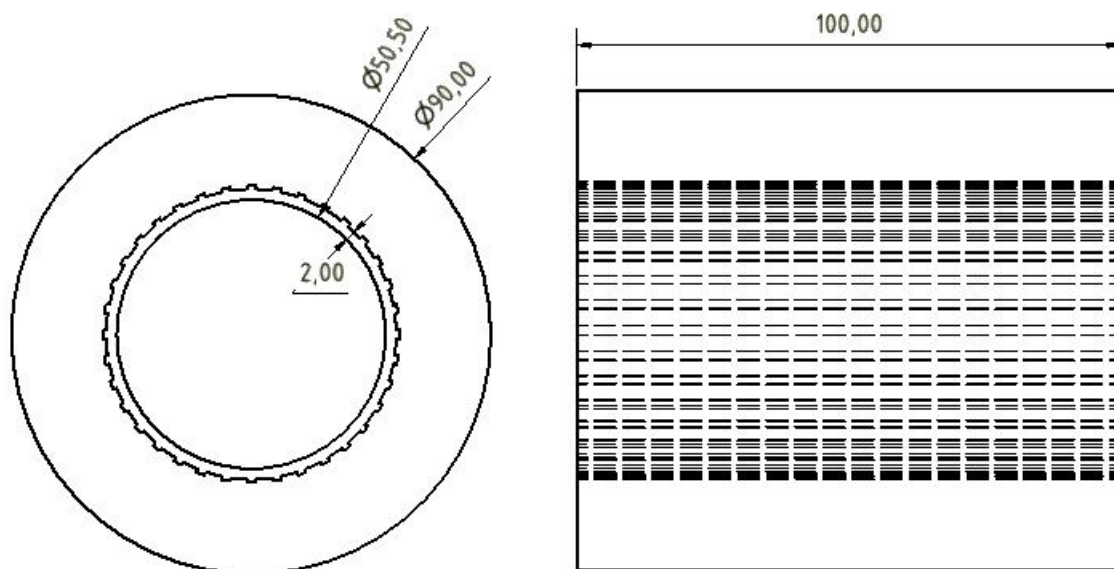
Nyní je třeba vytvořit model vzduchové mezery asynchronního motoru. Vytvořit mřížku a nainportovat do programu CFX, kde se nechá vyřešit z hlediska proudění, které máme vypočteno a uloženo z minulých kapitol. Napojení v programu Ansys Workbench je vidět na následujícím obrázku číslo 7.1. V předchozích částech jsme modelovali radiální ventilátor, je patrné, že aby motor mohl být tímto ventilátorem chlazen, musel by být zajisté použit nějaký kryt, jenž by nám nasměroval proudění vytvořené ventilátorem do vzduchové mezery. Kryt v tomto projektu není zohledňován i z hlediska časové náročnosti. Víceméně je v tomto projektu ukázáno, jak se dá postupovat při uvažování chlazení ve výpočetní technice.



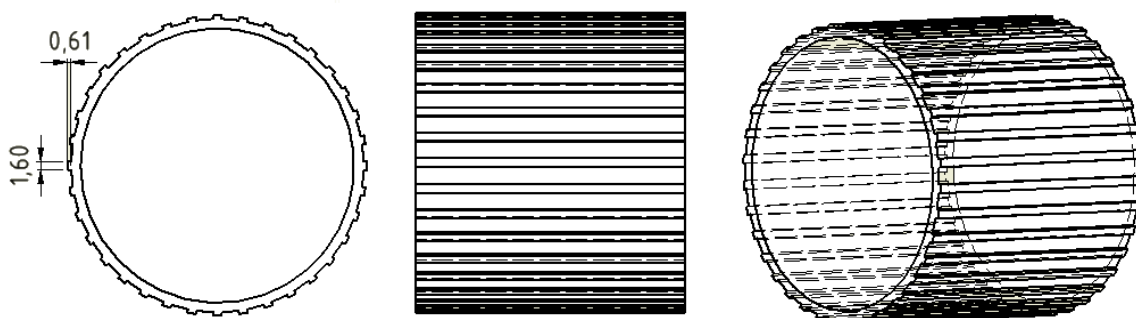
Obrázek č. 7.1: Ventilátor a vzduchová mezera motoru

7.1 Model vzduchové mezery asynchronního motoru

V programu Autodesk Inventor byl dle zadaného třífázového asynchronního modelu vytvořen zjednodušený model vzduchové mezery vhodný pro program Ansys CFX. Na obrázku číslo 7.2 je namodelován zjednodušený model třífázového asynchronního motoru. Model, který byl použit pro výpočet proudění vzduchovou mezerou, můžeme vidět na obrázku číslo 7.3.



Obrázek č. 7.2: Zjednodušený model asynchronního motoru

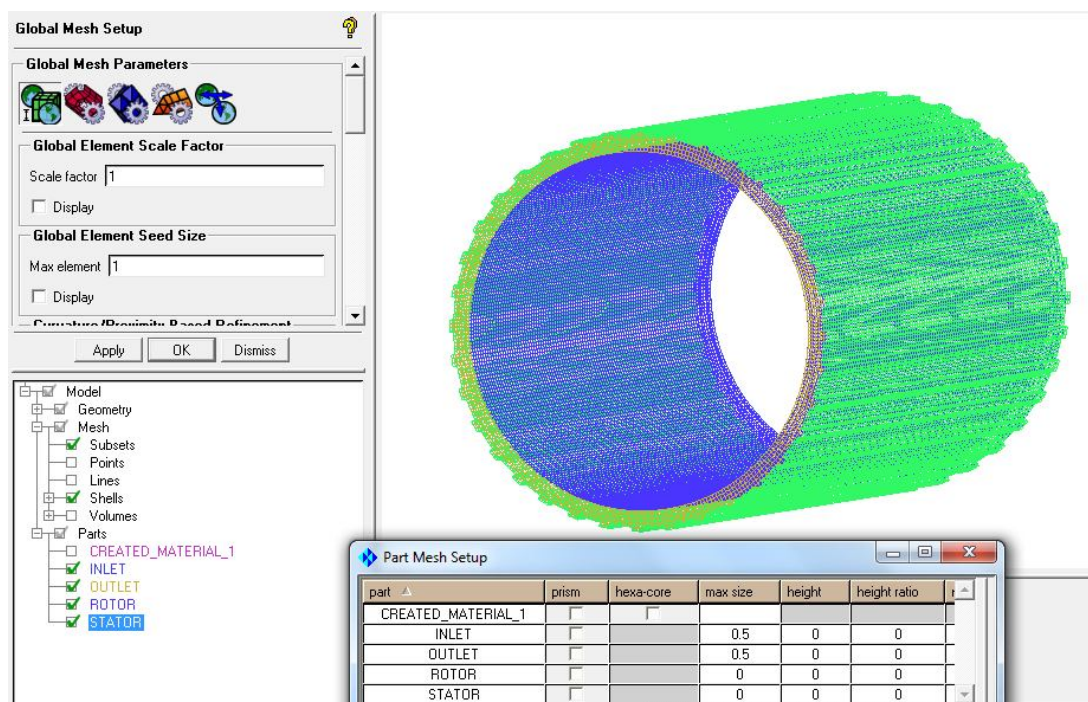


Obrázek č. 7.3: Model vzduchové mezery

Výpočet byl proveden v programu Ansys CFX. Nejdříve byl ale model vzduchové mezery z programu Autodesk Inventor naimportován ve vhodného formátu (byl zvolen formát .igs) a nahrán do programu Ansys Icem, což je další software pro vytvoření sítě (meshe).

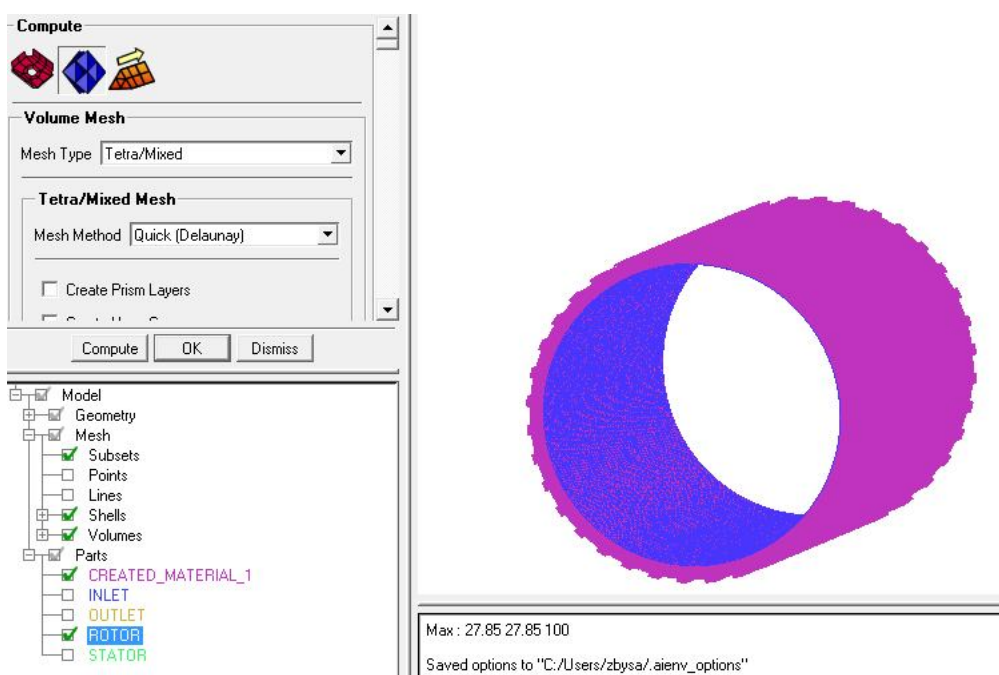
7.2 Vytvoření sítě pro daný model

Model vzduchové mezery byl tedy naimportován do programu Ansys Icem, zde byly z jednotlivých ploch a křivek vytvořeny plochy pro vstup a výstup proudění a dále plochy, jež znázorňují stator a rotor. Poté bylo provedeno generování plošné sítě. Typ meshe byl *Quad Dominant*, čili čtvercový. Velikost jednotlivých elementů u statoru a rotoru byla dána na hodnotu 1. Velikost elementů pro vstup a výstup byla zvolena na hodnotu 0.5, neboť jsou dané plochy členitější. Viz obrázek číslo 7.4.



Obrázek č. 7.4: Plošná síť

Dále byla vytvořena objemová síť, jelikož program CFX řeší objemovou problematiku proudění. Plošný mesh byl udělán jenom pro správné navolení vstupu, výstupu a stěn v samotném Ansys CFX. Jako objemový typ meshe byl zvolen *Tetra/Mixed* a metoda meshování *Quick (Delaunay)*, jak lze vidět z obrázku číslo 7.5. Nakonec byl tento model uložen do formátu .cfx5, a načten do programu Ansys CFX.

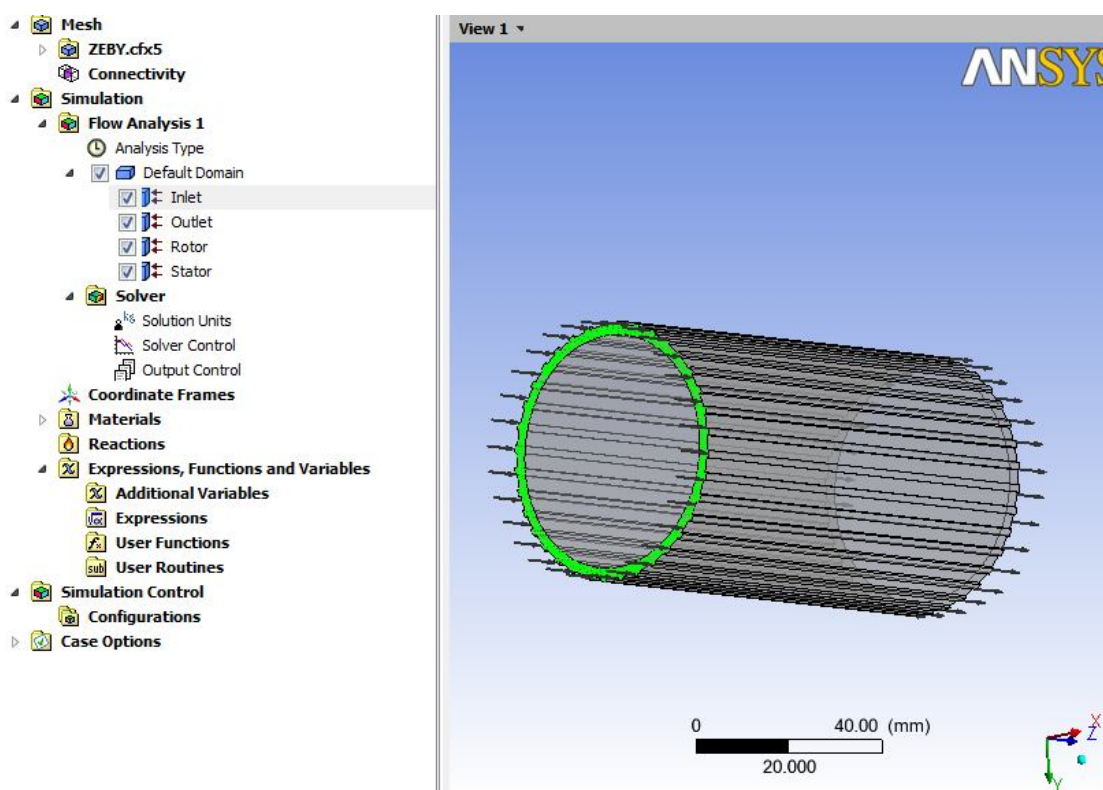


Obrázek č. 7.5: Objemová síť

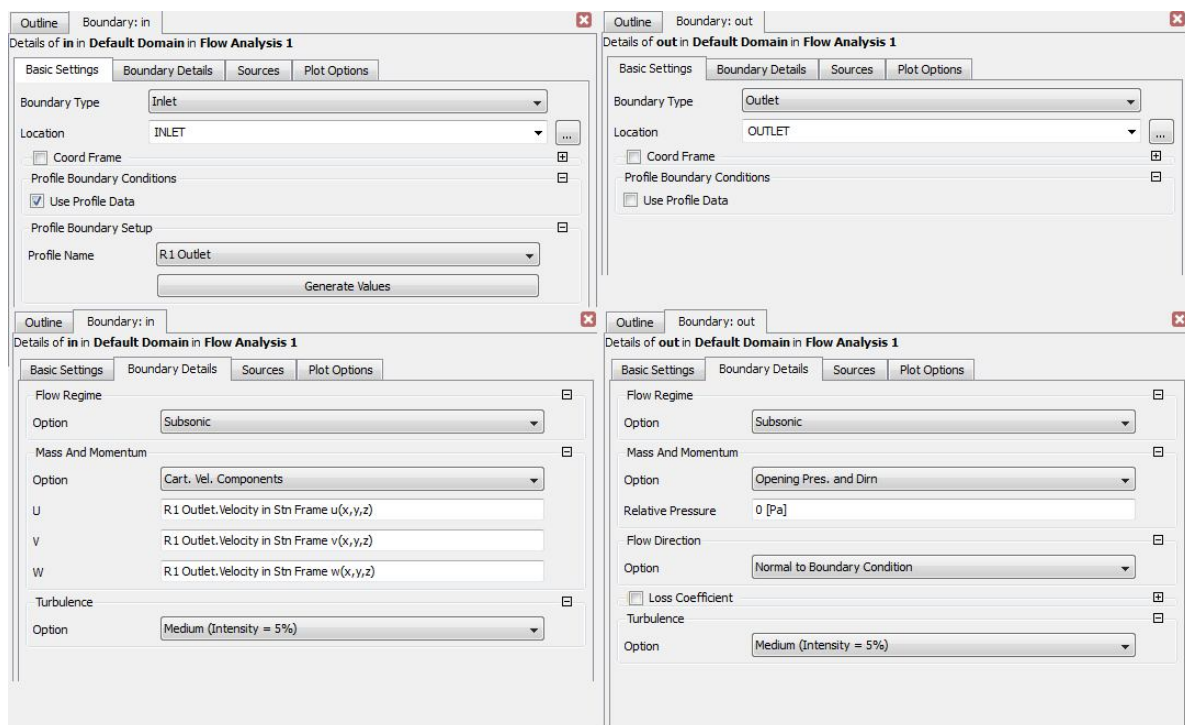
7.3 Nastavení modelu v CFX

Po načtení modelu s vypočtenou sítí, je třeba nadefinovat typ analýzy. Ta byla nastavena jako ustálený stav – *Steady State*. Dále je nutno přednastavit výchozí doménu. Zde byl jako proudící tekutina nastaven vzduch o teplotě 20°C, dále model turbulence *K-epsilon* a že daná problematika bude s přestupem tepla – *Total Energy*. Definovat lze různé problematiky z proudění, které můžeme podrobněji najít v [2].

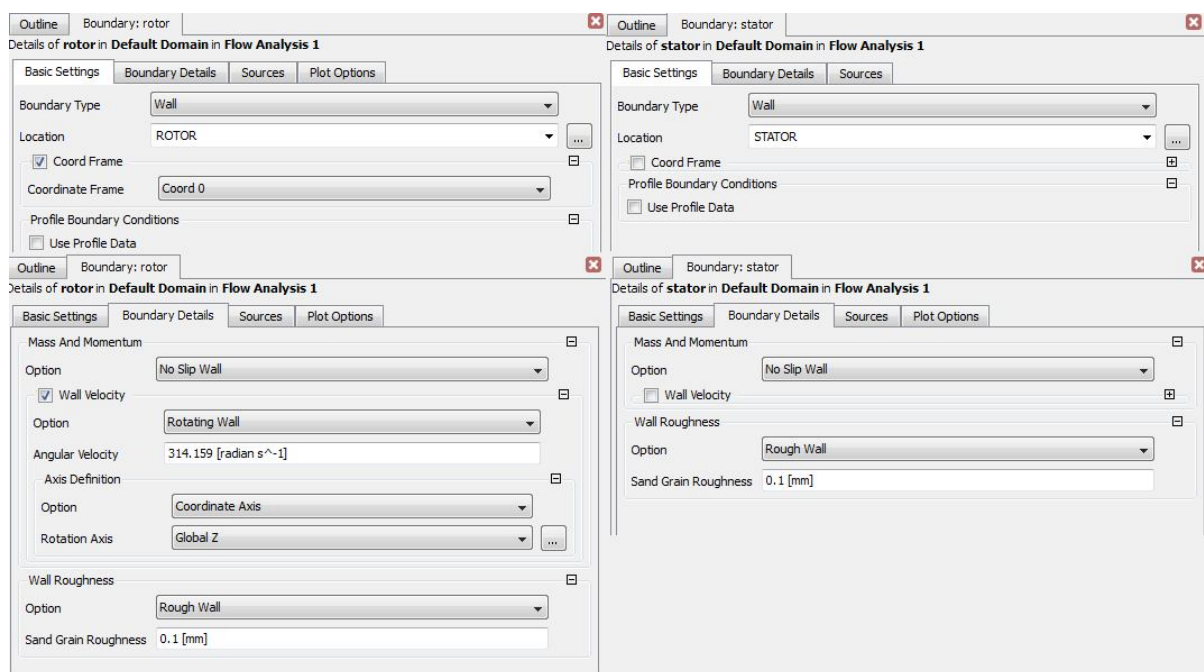
Potom byla nastavena jednotlivá rozhraní, čili vstup, výstup, dále pak rotor a stator. Pro vstup a výstup jsou již předdefinované rozhraní *Inlet* a *Outlet*. U vstupu byly pomocí záložky *Tools – Initialise Profile Data* vybrány námi uložené výstupy z ventilátorů. Tím vlastně nastavíme, že výstup ventilátoru je vstup do vzduchové mezery. Toto ještě musíme potvrdit v rozhraní *Inlet*, kde necháme vygenerovat patřičné hodnoty. U výstupu se definuje pouze tlak na výstupu. Stator a rotor byly nastaveny jako rozmezí – *wall*, a dále byla nastavena jejich drsnost na 0,1mm. U rotoru, byla nastavena rychlost otáčení kolem osy z. *Rotation Axis – Global Z*. Základní nastavování v jednotlivých záložkách je vidět na následujících obrázcích.



Obrázek č. 7.6: Prostředí CFX s načteným modelem.



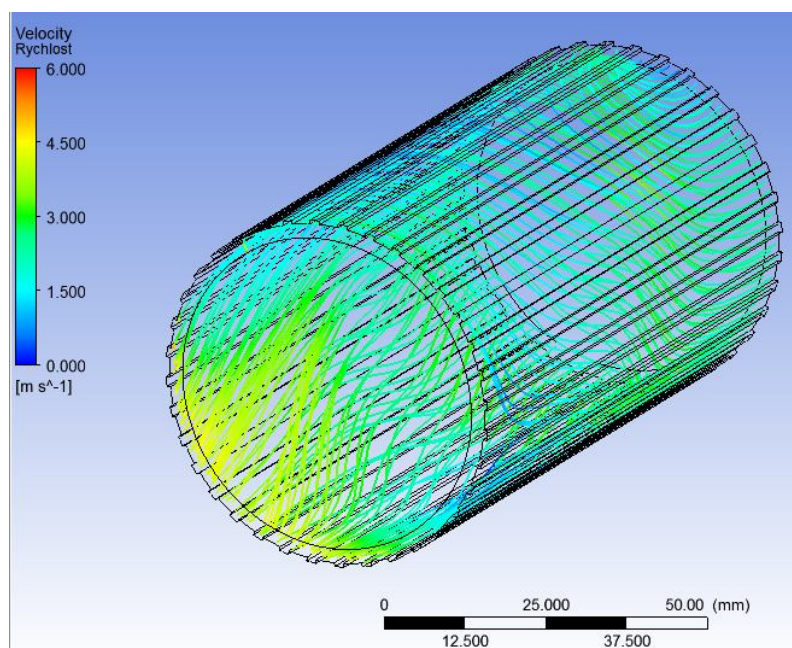
Obrázek č. 7.7: Nastavení rozhraní – Vstup a výstup



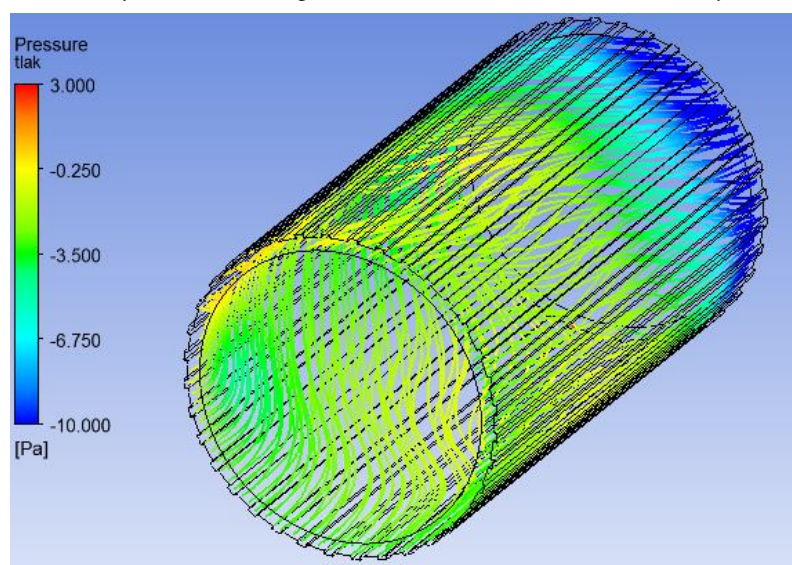
Obrázek č. 7.8: Nastavení rozhraní – Rotor a stator

7.4 Vyhodnocení proudění ve vzduchové mezeře pro otáčky motoru $3000 \text{ ot. min}^{-1}$

Jak již bylo uvedeno, výstup z radiálního ventilátoru pro otáčky $3000 \text{ ot. min}^{-1}$ byl nastaven jako vstup do vzduchové mezery a propočten. Nyní je na řadě vyhodnocení. Na obrázku číslo 7.9 máme opět proudnice rychlosti. Vidíme, že médium nahnané ventilátorem má rychlost kolem 5 m.s^{-1} , poté ji vlivem drsnosti stěn a nahuštění vzduchu ztrácí. Dále vidíme, jak se uplatňuje strhávání vzduchu způsobené rotorem a nakonec je vidět nepatrný nárůst rychlosti.



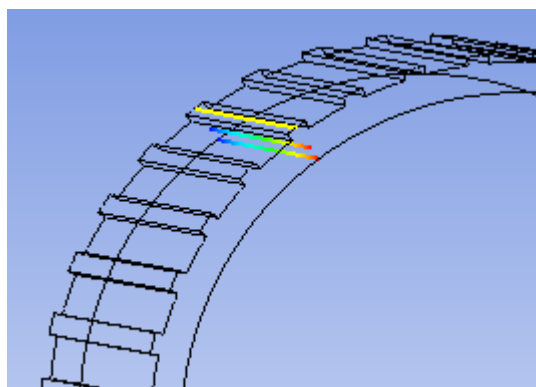
Obrázek č. 7.9: Rychlost vzduchu proudícího vzduchovou mezerou, otáčky $3000 \text{ ot. min}^{-1}$



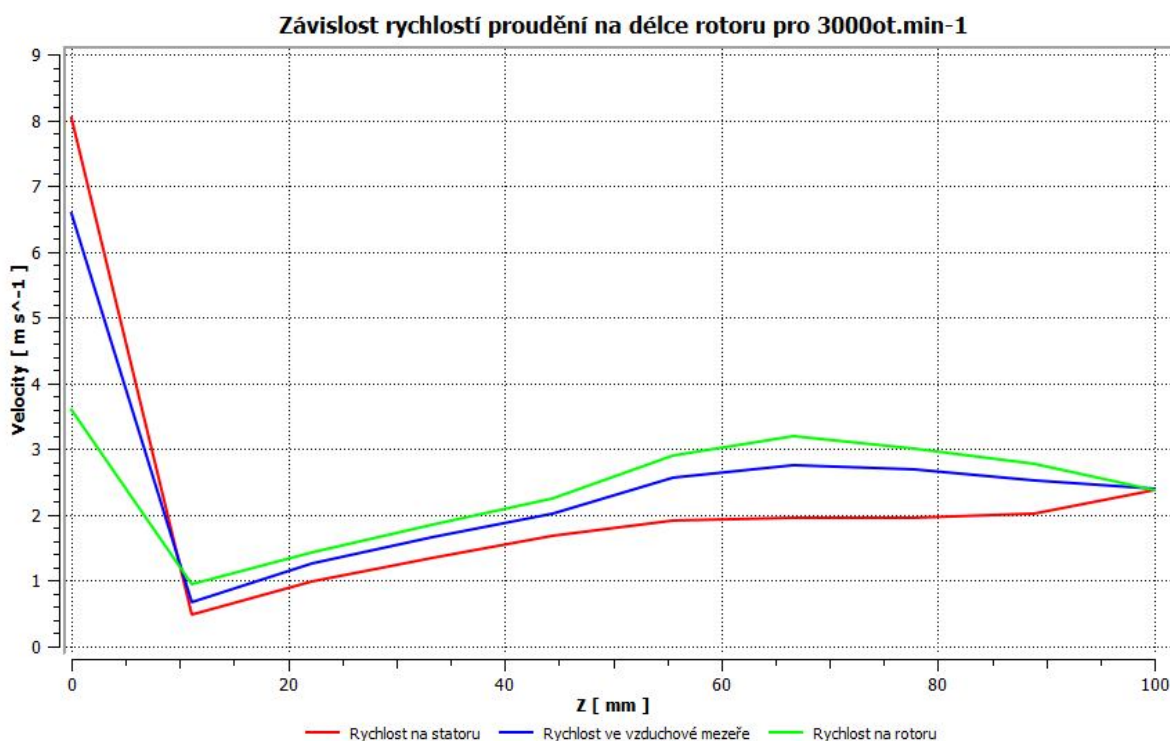
Obrázek č. 7.10: Tlak vzduchu proudícího vzduchovou mezerou, otáčky $3000 \text{ ot. min}^{-1}$

Na obrázku číslo 7.10, máme tlak vzduchu proudící vzduchovou mezerou, jak je vidět na vstupu je největší, postupem délky se zmenšuje, patrně vlivem otáčení rotoru, jenž urychluje vzduch. Na konci vzduchové mezeře se vyskytuje již podtlak, což nejspíše zhorší chlazení.

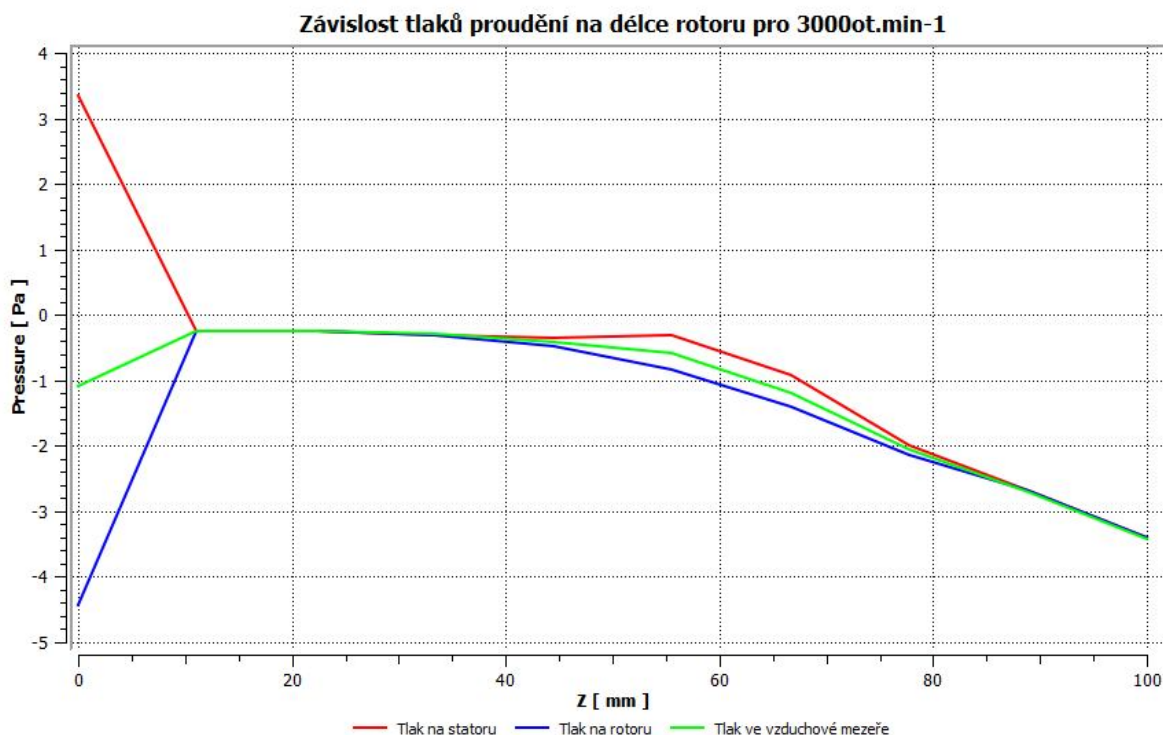
Aby bylo možno udělat grafy, které zobrazují rychlosti a tlaky jakých vzduch dosahuje na statoru, rotoru a ve vzduchové mezeře, je třeba v modelu udělat přímky, na které se nanesou dané data a z těch se vynese graf v závislosti na délce motoru (viz obrázek č. 7.11). Na následujících grafech je vynesena závislost rychlosti a tlaku (v závislosti na délce motoru) jakých vzduch dosahuje na statoru, rotoru a ve vzduchové mezeře. To vše zpřesňuje úvahy, které byly odvozeny z obrázků.



Obrázek č. 7.11: Přímky pro zhotovení grafů



Graf č. 1: Závislost rychlostí proudění na délce rotoru pro 3000ot.min⁻¹



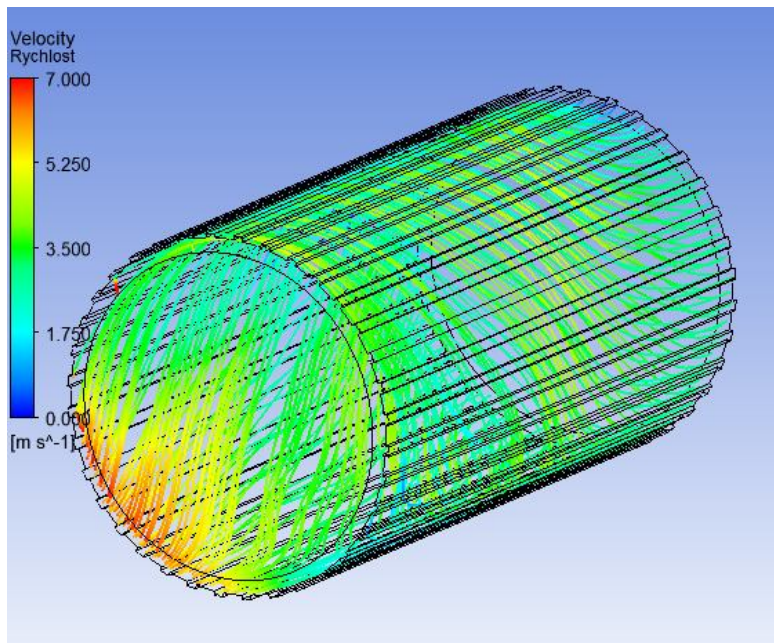
Graf č. 2: Závislost tlaků proudění na délce rotoru pro 3000ot.min⁻¹

Z grafu číslo 1 je patrné, že po nahnání vzduchu z ventilátoru do mezery ztrácí vzduch rychlost. To je způsobeno patrně nahuštěním vzduchu, drsností stěn a otáčením rotoru. S postupnou délkou motoru vidíme, že rotor vzduch urychluje, což se projeví vyšší rychlostí proudícího média na rotoru.

Z grafu číslo 2 lze vypožorovat, že tlaky jsou na vstupu do vzduchové mezery rozdílné, což je způsobeno nejspíš otáčením rotoru. S postupnou délkou se tlaky na statoru, rotoru a ve vzduchové mezeře vyrovnají. Ke konci vzduchové mezery nám tlaky klesají (rychlost stoupá) a je pozorován podtlak, jenž patrně zhorší chlazení.

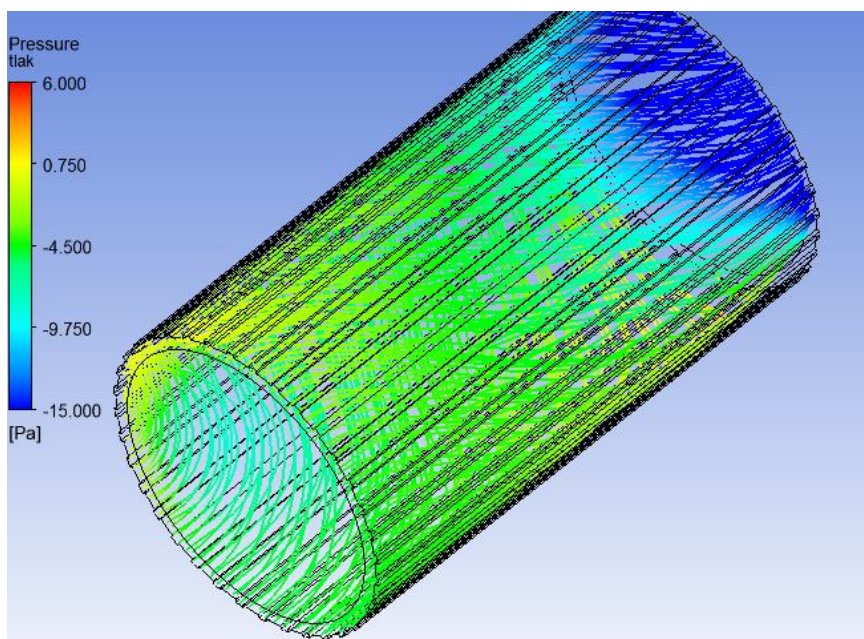
7.5 Vyhodnocení proudění ve vzduchové mezeře pro otáčky motoru $5000 \text{ ot. min}^{-1}$

V modelu v CFX-Pre pouze přenastavíme rychlost otáčení rotoru a spustíme výpočet.



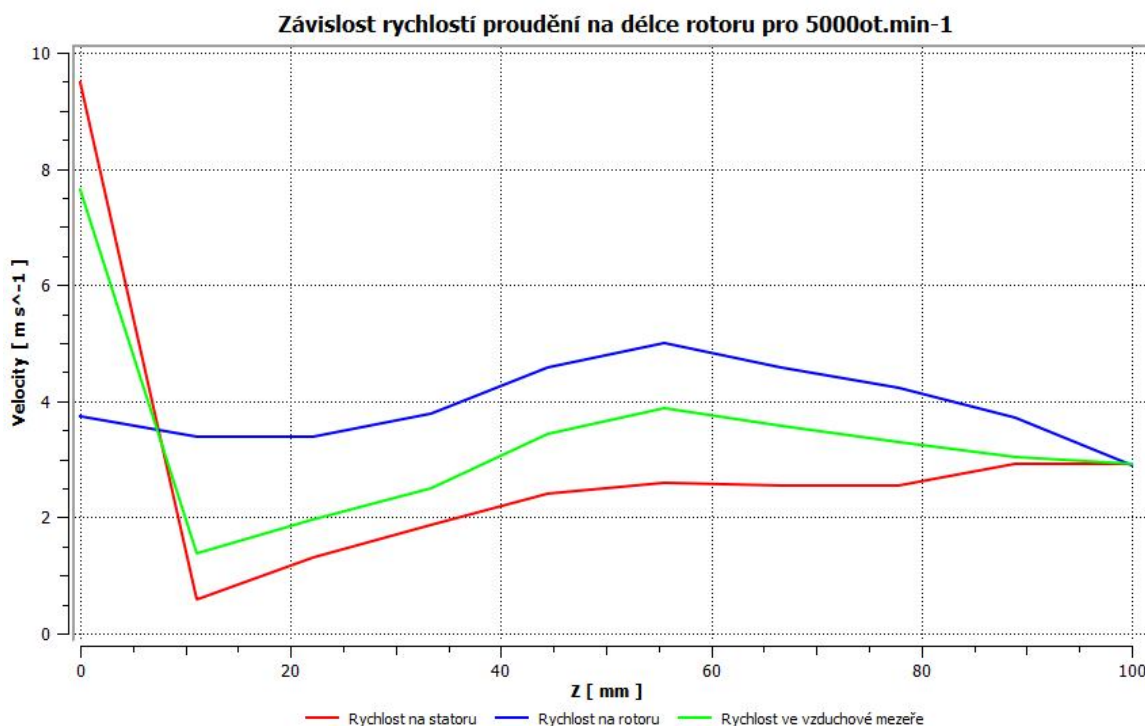
Obrázek č. 7.12: Rychlost vzduchu proudícího vzduchovou mezerou, otáčky $5000 \text{ ot. min}^{-1}$

Z obrázku č. 7.12 je vidno, že vzduch má opět na výstupu z ventilátoru, a tedy vstupu do vzduchové mezey nejvyšší rychlost, poté ji opět ztrácí, díky nahuštění vzduchu a drsnosti stěn. Také je vidět ještě zřetelnější strhávání proudnic vlivem větších otáček rotoru.

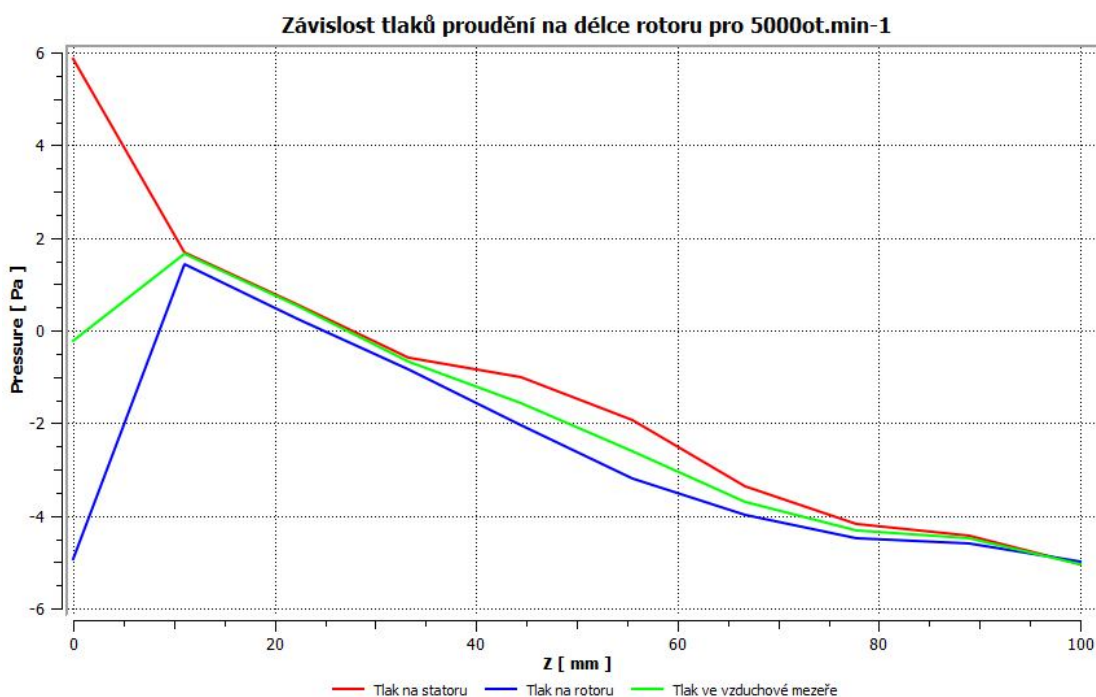


Obrázek č. 7.13: Tlak vzduchu proudícího vzduchovou mezerou, otáčky $5000 \text{ ot. min}^{-1}$

Z průběhu tlakových proudnic, obrázek č. 7.13, je patrné, že tlak je největší opět na vstupu, poté se zmenšuje a na konci je ještě větší podtlak než v předešlém případě, patrně díky vyšším otáčkám. Níže jsou opět pro zpřesnění uvedeny grafické závislosti rychlosti a tlaku vzduchu na délce motoru.



Graf č. 3: Závislost rychlostí proudění na délce rotoru pro 5000ot.min⁻¹



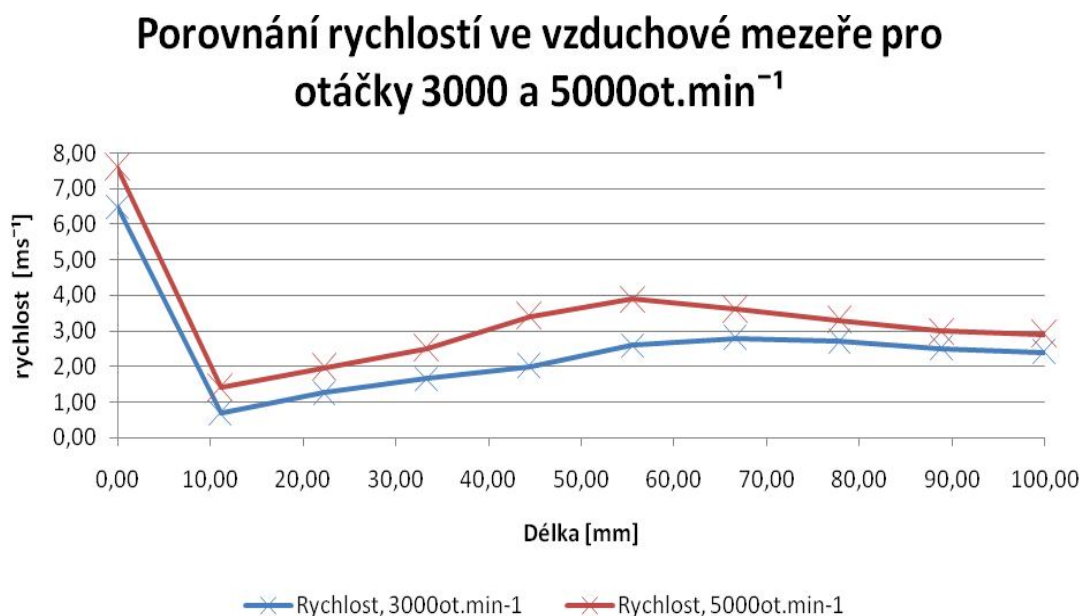
Graf č. 4: Závislost tlaků proudění na délce rotoru pro 5000ot.min⁻¹

Z grafu číslo 3 opět vidíme, že po nahnání vzduchu z ventilátoru do mezery ztrácí vzduch rychlost. S postupnou délkou motoru je ale vidno, že rotor vzduch urychluje, což se projeví ještě vyšší rychlostí proudícího média v mezeře a taktéž na výstupu, než v předešlém případě.

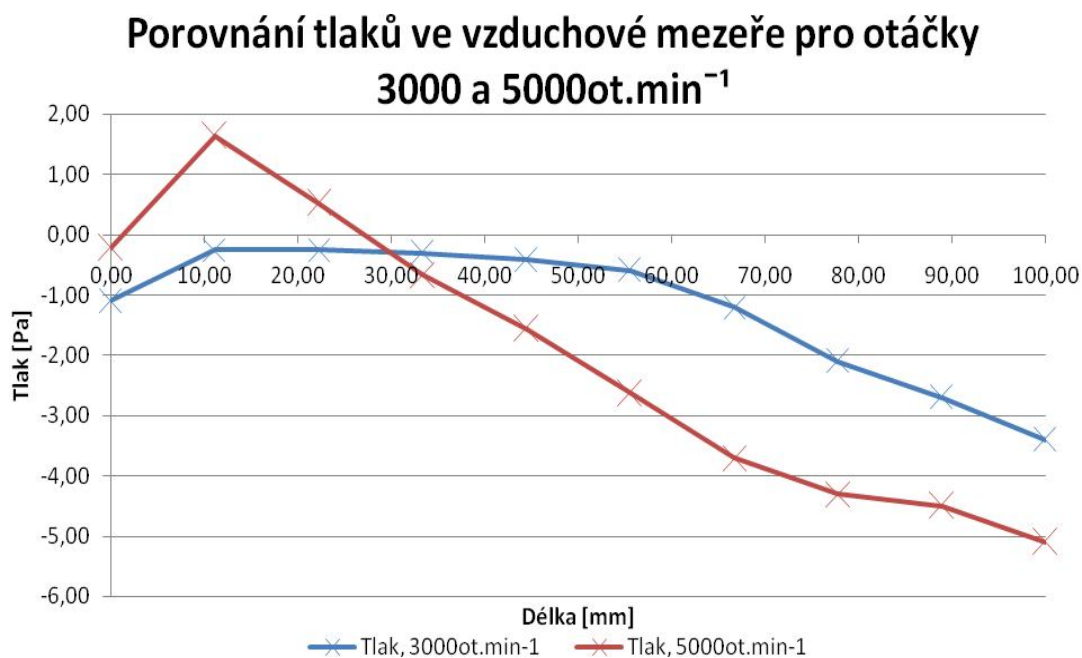
Z grafu č. 4 lze vypořizovat, že tlaky na vstupu do vzduchové mezery jsou opět rozdílné. S postupnou délkou se tlaky na statoru, rotoru a ve vzduchové mezeře vyrovnávají. Ke konci vzduchové mezery nám tlaky klesají (rychlost stoupá) a je pozorován ještě větší podtlak než v předešlém případě.

7.6 Porovnání výpočtů

V této kapitole jsou vyneseny do grafů rychlosti a tlaky, jakých dosahuje chladicí vzduch z radiálního ventilátoru ve vzduchové mezeře asynchronního motoru pro otáčky 3000 a 5000ot.min⁻¹.



Graf č. 5: Porovnání dosažených rychlostí ve vzduchové mezeře pro otáčky 3000 a 5000ot.min⁻¹



Graf č. 6: Porovnání dosažených tlaků ve vzduchové mezeře pro otáčky 3000 a 5000ot.min⁻¹

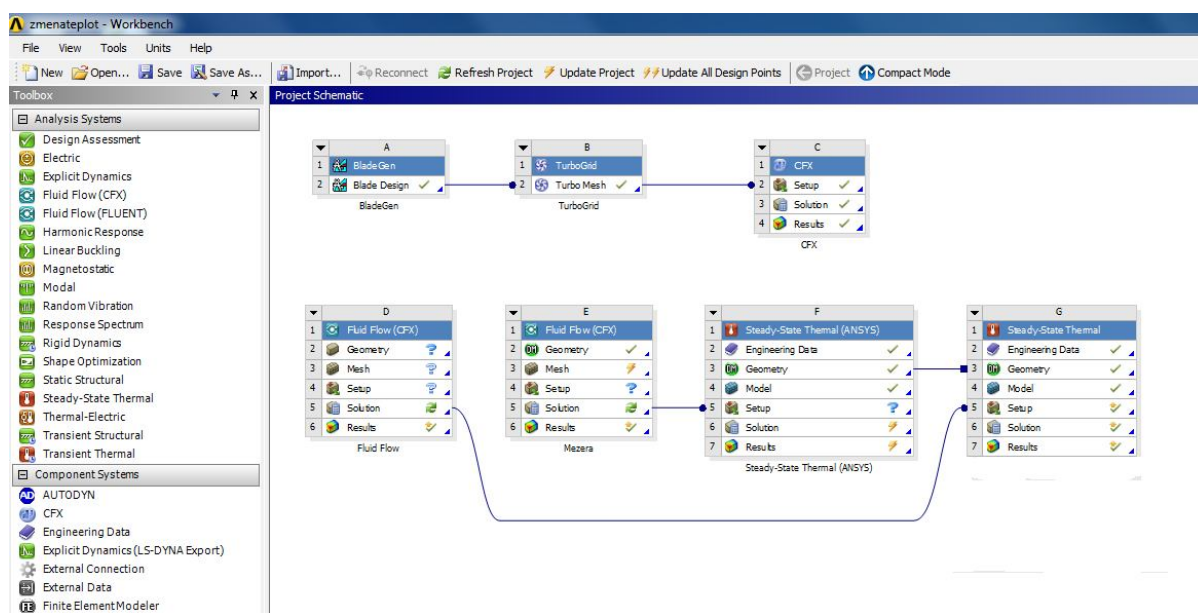
Při vyšších otáčkách motoru, dosahujeme vyšších hodnot rychlostí, tlaků a podtlaků, jak je vidět na obou grafech. Ventilátor díky větším otáčkám dokáže zprostředkovat proudění o větším tlaku a rychlosti na vstupu do vzduchové mezery. Dále se nám více uplatňuje otáčení rotoru při vyšších otáčkách, tlak klesá rychleji a na konci vzduchové mezery se poté vyskytuje větší podtlak.

8 STATICKÁ TEPELNÁ ANALÝZA MOTORU

Dále bylo v této práci vyhodnoceno ochlazování asynchronního motoru pomocí programu Steady State-Thermal, jenž je opět součástí programu Ansys Workbench. Byl vytvořen model asynchronního motoru v podobě rotoru, statoru a vinutí. Použito bylo chladicí proudění z radiálního ventilátoru při otáčkách motoru $3000 \text{ ot. min}^{-1}$, které bylo navedeno do vzduchové mezery motoru a vyřešeno v programu CFX. Vyřešené proudění bylo naimportováno do modelovaného motoru. Z důvodu nedostatku času, byla provedena analýza pouze pro jednu sekundu. Je nutno tuto kapitolu brát pouze jako ověření možnosti propojení těchto programů.

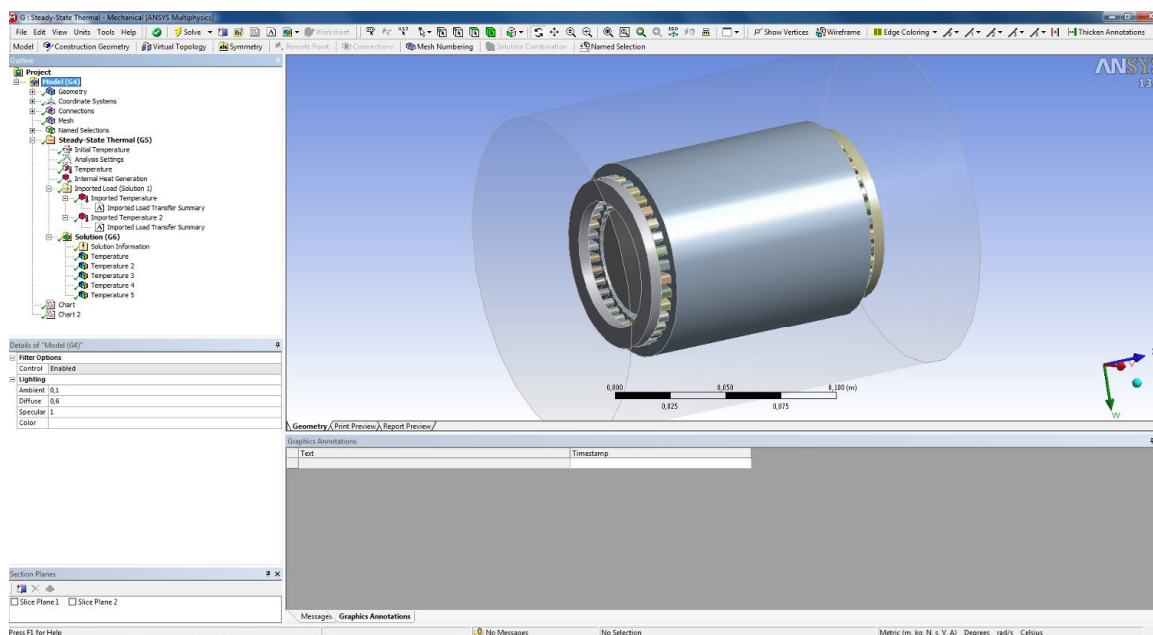
8.1 Vytvoření modelu motoru pro tepelnou analýzu

Aby výpočet správně fungoval, musí být použita stejná geometrie, jaká byla použita pro výpočet proudění vzduchovou mezerou. Vyřešené proudění z programu CFX Solver, si totiž, jak naimportujeme do programu Steady State-Thermal, kde bude provedena tepelná analýza (obrázek 8.1).



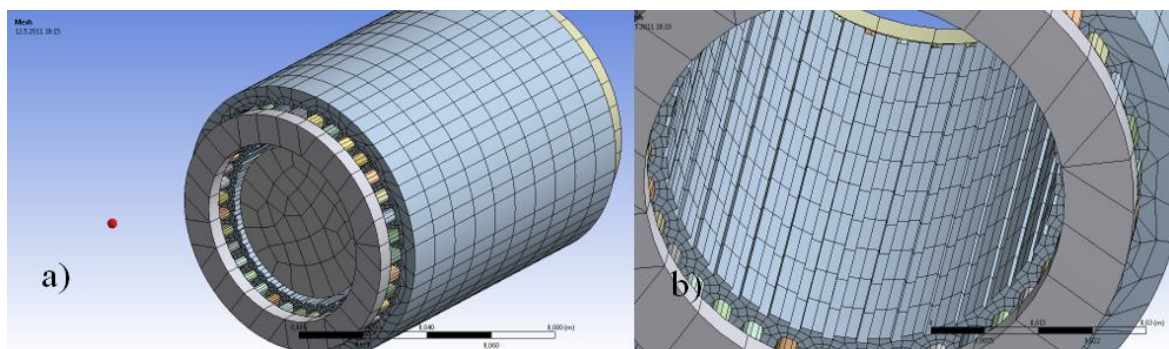
Obrázek č. 8.1: Výpočet oteplení (Ustálený stav)

Model motoru byl vytvořen v programu Inventor, za použití geometrie vzduchové mezery, byl dodělán rotor a stator se zjednodušeným vinutím, jenž se uzavírá v čelech. Tato geometrie byla naimportovaná, jako soubor .igs, do programu Steady State-Thermal (viz. Obrázek 8.2).



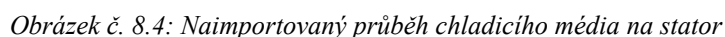
Obrázek č. 8.2: Naimportovaný model

Vzduchová kapsle obklopující motor byla vytvořena pomocí funkce *Enclosure*. Tím je zajištěna reálná situace. Poté byly nastaveny materiály. Kapsle-vzduch, vinutí a čela-měď, rotorové a statorové plechy-ocel. Dále je opět nutno vypočítat mřížku modelu. Jelikož se jedná o lehčí objekt, můžeme ji udělat pomocí tohoto programu, kde dáme *Import Mesh*, přidáme pouze kvalitnější mřížku ke vzduchové mezeře a k vinutí, jak je patrné z obrázku 8.3.



Obrázek č. 8.3: Mřížka modelu: a) celkový pohled, b) detail

Nyní naimportujeme proudění ze vzduchové mezery na stěnu rotoru a statoru. Program si přetáhne tepelná data a ukáže nám je na daných plochách, jak je patrné z následujícího obrázku číslo 8.4.

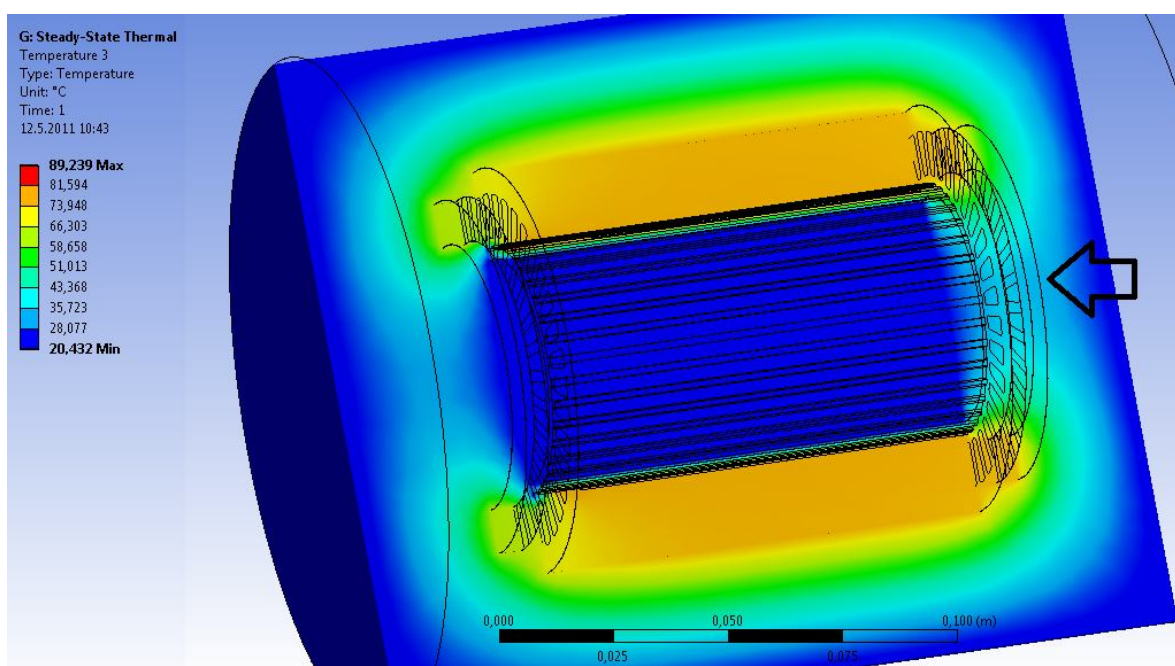


The screenshot displays the ANSYS Workbench interface for a Steady-State Thermal analysis. The 3D model is a cylindrical heat exchanger with internal fins. The software is set to 'Steady-State Thermal' analysis. The model is a cylinder with a length of 1 m and an inner diameter of 0.025 m. The material is 'Inconel 600' with a thermal conductivity of 14.5 W/m-K. The boundary conditions include a temperature of 1000 K on the inner surface and a convective heat transfer coefficient of 100 W/m²-K on the outer surface. The results show a temperature distribution across the cylinder, with a maximum temperature of 1000 K and a minimum temperature of 100 K. A graph at the bottom shows the temperature profile along the length of the cylinder, which is a straight line from 100 K to 1000 K.

Obrázek č. 8.5: Zdroj tepla – vinutí a čela

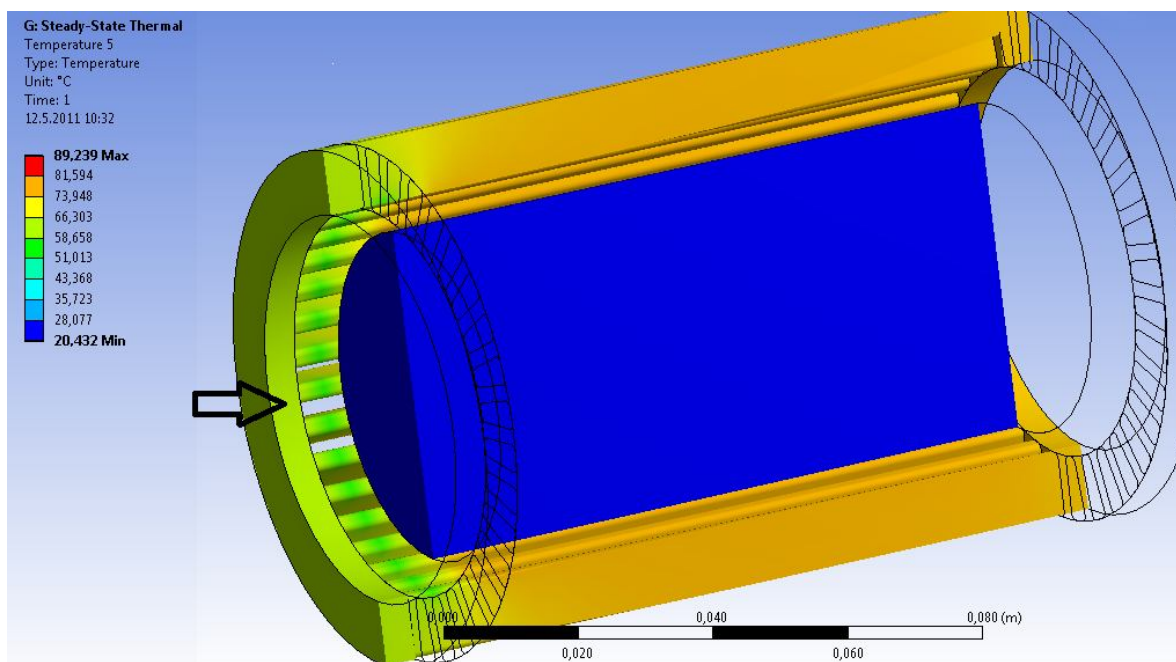
8.2 Vyhodnocení statické tepelné analýzy motoru

Po vypočtení analýzy si můžeme objekt různě upravovat pomocí natáčení pohledů a tvoření řezů. K přehlednějším výsledkům nám mohou pomoci přímky, na které vyneseme tepelná data a z nich poté můžeme vynést grafy. Na obrázku níže je zobrazen celý motor ve vzduchové kapsli v řezu.



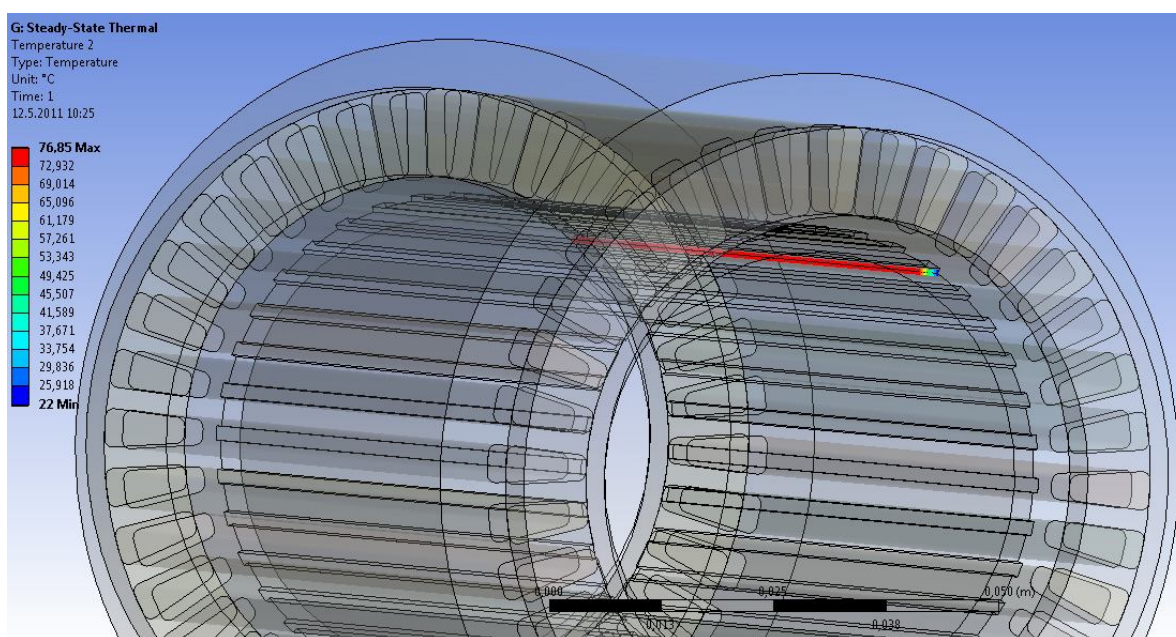
Obrázek č. 8.6: Tepelná analýza motoru - celek

Z obrázku číslo 8.6 je zřejmé, že teplota vzduchu ve vzduchové kapsli okolo 20°C, dále se zde také uplatňuje sálání tepla z povrchu motoru do okolí. Přibližováním k motoru nám teplota vzduchu stoupá. Kromě toho je vidět, jak je motor chlazen chladicím médiem na vstupu (pravá strana). Taktéž je patrné, že teplota na povrchu statoru je okolo 50°C, zatímco uvnitř je okolo 70°C. Je zde totiž zdroj tepla v podobě vinutí. Z obrázku je možno vidět, že teplota rotoru byla nastavena na teplotu okolí. Na dalším obrázku číslo 8.7 jsou vyobrazeny čela vinutí spolu s vinutím. Vstup je nyní napravo. Vstupující chladicí médium ochlazuje vstupní čelo o téměř 5°C, taktéž vinutí je na začátku chlazeno, ale s přibývajícím délkou se chladicí médium již neuplatňuje.

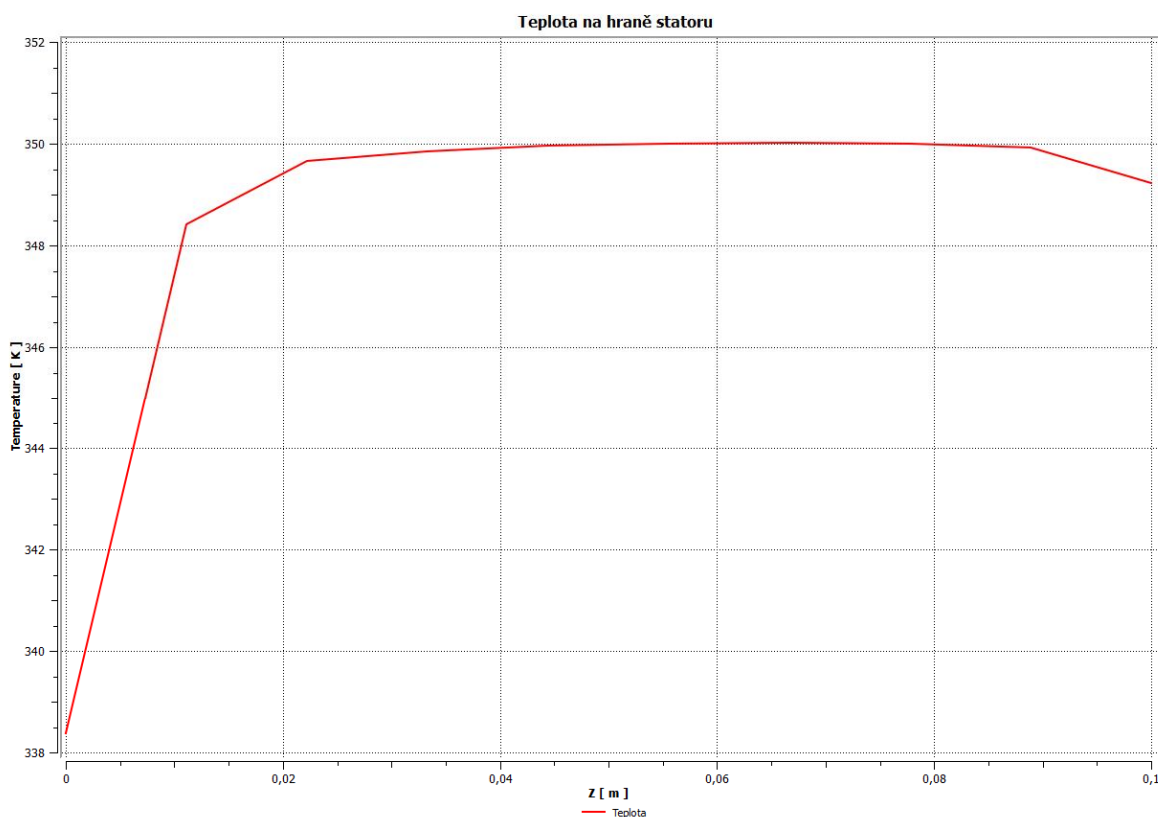


Obrázek č. 8.7: Tepelná analýza motoru- vinutí a čela

Pro přehlednější rozbor byla vynesena přímka na hranu statoru, na tuto přímku byla naimportována teplota, které je dosaženo v daném místě (obrázek č. 8.8). Tato přímka převedena do grafické závislosti teploty na délce statoru (graf č. 7). Z přímky je opět vidět, jak vstupující médium chladí stator.



Obrázek č. 8.8: Přímka na hraně statoru



Graf č. 7: Teplota na hraně statoru v závislosti na délce statoru

Z výše uvedeného grafu je patrný nárůst teploty na hodnotu okolo 70°C. Můžeme vypožorovat, že chladicí médium se v první sekundě uplatňuje již na prvním centimetru statoru, a také, že druhá strana statoru se ochlazuje, a to od okolního vzduchu téměř o 3°C.

9 ZÁVĚR

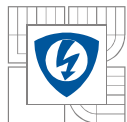
V dané diplomové práci jsme se nejprve věnovali všeobecným zákonům a poznatkům, které se týkají proudění tekutin. Poté je zde věnován prostor chlazení elektrických strojů. Zmíněny jsou základní typy chlazení a typů médií, které se pro chlazení používají. Protože bylo za úkol dáno namodelovat ventilátor pro asynchronní motor, tak velká pozornost je věnována ventilátorům a asynchronnímu motoru. Nakonec, je tedy namodelován radiální ventilátor a vzduchová mezera zadaného třífázového asynchronního motoru. Pomocí programu Ansys CFX je vyhodnoceno proudění vzduchu způsobené tímto ventilátorem, a dále je toto proudění navedeno do vzduchové mezery a propočteno pro dvě rychlosti otáčení rotoru. Správně by měl být použit vodící kryt pro proudění, aby byl chladicí vzduch správně nasměrován do mezery, tím se ale práce nezabývá, jde spíše o to prověřit propojování různých modelů pomocí programů Ansys Workbench a nastínit postup, jak se dá v praxi postupovat.

Nejprve byla vytvořena geometrie radiálního ventilátoru pomocí programu BladeGen. Dále byla vytvořena plošná a objemová mřížka (mesh) pomocí programu TurboGrid, aby daný ventilátor mohl být propočten v programu CFX. V programu CFX byl ventilátor nastaven tak, že si sám, pouze díky otáčkám, vsaje vzduch. Výstup ventilátoru je pak nastaven jako vstup do vzduchové mezery. Nutno podotknout, že všechny zde uvedené programy jsou součástí programu Ansys Workbench. Radiální ventilátor je vlastně umístěn na hřídeli motoru. Proudění, které díky němu vzniká, bylo vypočítáno pro dvě rychlosti otáčení rotoru 3000 a 5000 ot.min⁻¹. Otáčení rotoru, které je rovno 3000 ot.min⁻¹, znázorňuje normální provoz třífázového asynchronního motoru a otáčky 5000 ot.min⁻¹ znázorňují chod motoru s připojeným měničem frekvence.

Následně byl vytvořen model vzduchové mezery zadaného asynchronního motoru. Jako vstup byl tedy nastaven výstup z radiálního ventilátoru. Ve výpočtu číslo jedna pro otáčky 3000 ot.min⁻¹, je vidět, že otáčení rotoru způsobí strhávání proudění ve směru otáčení. Taktéž se danému proudění zvyšuje rychlost díky otáčení rotoru. Tlak ovšem klesá s postupnou délkou rotoru a na konci vzduchové mezery nám vzniká podtlak, jenž je způsoben právě otáčením. Všechny tyto jevy se ještě zvětší u výpočtu číslo 2 při uvažování otáček rotoru 5000 ot.min⁻¹. Rychlost proudění je ještě větší a stejně tak tlakové rozdíly, jak je patrné z grafů číslo 5 a 6.

Dále jako poslední bonusový bod, je nastíněno jak pomocí Ansys Workbench můžeme propojit a spočítat ochlazování motoru, díky proudění z ventilátoru. Z důvodu nedostatku času je tento výpočet udělán pouze pro jednu sekundu. A je nutno jej brát pouze jako ověření možnosti propojování daných modelů a dat.

Správně navržený chladicí systém je velice důležitý, neboť jak již bylo v této práci zmíněno, zvyšuje spolehlivost a životnost stroje. Taktéž snižuje hmotnost a tedy i náklady na výrobu. Výpočetní programy pro analýzu proudění představují velmi dobrou možnost při konstruování chlazení strojů. Rovněž usnadňují práci při hledání chyb v návrhu, neboť určité platí, že je lepší několikrát upravovat, než vyrobit ne dobře fungující stroj.



LITERATURA

- [1] Brůha, Oldřich: Úvod do nauky o proudění a teple: Praha ČVUT, Státní nakladatelství technické literatury 1963, 188s
- [2] Blejchař Tomáš: Návod do cvičení “Modelování proudění“ – CFX: Ostrava VŠB, 1. Vydání Ediční středisko VŠB – TU Ostrava 2009, 133s
- [3] Webové stránky společnosti innovative [Online]. [Citace duben 2010]
Dostupné na WWW: <http://www.innovative-cfd.com/cfd-solvers.html>
- [4] Wikipedia [Online]. [Citace květen 2009]
Dostupné na WWW: <http://cs.wikipedia.org>
- [5] Petrov, G. N.: Elektrické stroje 2. Vydala Academia, Praha 1982, 1. vydání, 732 s.
- [6] Webové stránky společnosti Kovoslužba OTS [Online]. [Citace květen 2009]
Dostupné na WWW: <http://.kovosluzbaots.cz/och-ventila.htm>
- [7] Vávra, Zdeněk: Vysoké napětí a elektrické přístroje. Část 2 – Elektrické přístroje. Skriptum VUT, 83 s.
- [8] Elektronický text – Elektrické stroje, 79 s.
- [9] Hak, Josef, Ošlejšek, Oldřich: Výpočet chlazení elektrických strojů – 1. Díl: Fyzikální podklady výpočtu chlazení a ventilační výpočet. Vydání VUES Brno, 1973, 628s.