

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 CHLAZENÍ ASYNCHRONNÍHO STROJE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

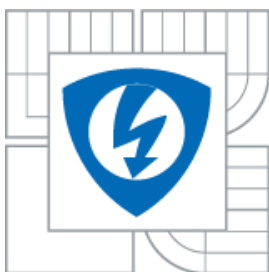
AUTHOR

JAN ZÁRUBA

BRNO 2014



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 CHLAZENÍ ASYNCHRONNÍHO STROJE

CALCULATION OF INDUCTION MACHINE COOLING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

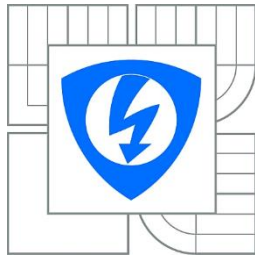
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

JAN ZÁRUBA

VEDOUcí PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. MARCEL JANDA Ph.D.

BRNO



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika

Student: Jan Záruba
Ročník: 3

ID: 146133
Akademický rok: 2013/14

NÁZEV TÉMATU:

Výpočet chlazení asynchronního stroje

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Seznamte se s metodami výpočtu proudění chladicího média v elektrických strojích
2. Dvěma metodami proveďte výpočet proudění na konkrétním typu elektrického stroje.
3. Proveďte měření teploty a proudění chladicího média na elektrickém stroji.
4. Porovnejte výsledky výpočtů a měření chladicích poměrů na elektrickém stroji.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] STŘEDA, Ivo. Termodynamika: Celost. vysokošk. učebnice. 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 1991, 149 s. ISBN 80-010-0452-X.
- [2] CIGÁNEK, Ladislav. Stavba elektrických strojů: Celost. vysokošk. učebnice. 1. vyd. Praha: SNTL, 1958, 714, [1] s.

Termín zadání: 27. 9. 2013

Termín odevzdání: 2. 6. 2014

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

Konzultanti bakalářské práce:

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.
Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské 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 části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Tato bakalářská práce pojednává ve své první části o teoretickém pojetí proudění a chlazení asynchronního stroje. O jeho chování, charakteristických znacích a o možných variantách jeho výpočtu. Věnuje se problematice od ztrát motoru, přes druhy chlazení, typů proudění a nakonec jeho výpočet. V druhé části je zaměřena na praktické měření v laboratoři na reálném modelu. Dále pak vyhodnocování jeho výsledků. Třetí část je zaměřena na počítačové simulace a výpočet. Třetí část práce je rozdělena do dalších tří fází, kde se v první fázi věnuje výpočtu a simulaci proudění na ventilátoru motoru. V druhé fázi třetí části se zabývá prouděním u samotného motoru a ve třetí je popsána a simulována teplotní analýza. V konečné třetí fázi jsou tyto počítačové simulace následně vyhodnoceny a srovnány s měřením praktickým. Toto porovnání založeno na teorii popsané ze začátku práce.

Abstract

This thesis discusses in the first part of the theoretical concept of flow and cooling induction machine. His behavior, characteristics and possible variants of its calculation. Questions concerning losses from the engine, through the second cooling flow types and finally the calculation. The second part focuses on practical laboratory measurements on a real model. Furthermore, the evaluation of its results. The third part focuses on computer simulation and calculation. The third part is further divided into three phases, where in the first phase devoted to the calculation and simulation flow to the fan motor. In the second stage, the third part deals with the flow of the engine itself, and the third is described and simulated temperature analysis. In the final third phase are subsequently evaluated by computer simulations and compared with practical measurements. This comparison is based on the theory described from the beginning.

Klíčová slova

Asynchronní stroj; chlazení; proudění; ventilátor; ANSYS; CFX; Autodesk Inventor 2012; oteplení; analýza; metoda konečných prvků; ztráty

Keywords

Induction machin; cooling; flow; fan; ANSYS; CFX; Autodesk Inventor 2012; thaw; analysis; Finite element method; losses

Bibliografická citace

ZÁRUBA, J. *Výpočet chlazení asynchronního stroje*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 53 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Marcel Janda, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Výpočet chlazení elektrického stroje, jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské 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 bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské 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 bakalářské práce Ing. Marcelu Jandovi, Ph.D., za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

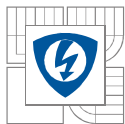
V Brně dne

Podpis autora

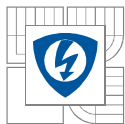


Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	9
SEZNAM TABULEK	11
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	12
1 ÚVOD.....	14
2 ASYNCHRONNÍ STROJE	15
2.1 KONSTRUKCE.....	15
2.2 ZTRÁTY ASYNCHRONNÍHO STROJE	16
2.2.1 ZTRÁTY VE STATORU	16
2.2.2 ZTRÁTY V ROTORU	17
3 OTEPLENÍ A CHLAZENÍ ASYNCHRONNÍHO STROJE	19
3.1 OTEPLENÍ ASYNCHRONNÍHO STROJE.....	19
3.2 CHLAZENÍ ASYNCHRONNÍHO STROJE	20
3.2.1 CHLADÍCÍ MÉDIA.....	20
4 PROUDĚNÍ.....	23
4.1 LAMINÁRNÍ PROUDĚNÍ.....	24
4.2 TURBULENTNÍ PROUDĚNÍ	25
5 VENTILÁTORY.....	26
5.1 RADIÁLNÍ VENTILÁTORY.....	26
5.2 AXIÁLNÍ VENTILÁTOR	27
5.3 OBECNÉ VZTAHY PRO (ZJEDNODUŠENÝ) VÝPOČET CHLAZENÍ.....	28
5.3.1 POSTUP PŘI NÁVRHU CHLAZENÍ	29
6 PRAKTICKÁ ČÁST MĚŘENÍ V LABORATOŘI.....	30
6.1 VÝSLEDKY LABORATORNÍHO MĚŘENÍ S CHLAZENÍM AS MOTORU.....	31
6.2 VÝSLEDKY LABORATORNÍHO MĚŘENÍ BEZ CHLAZENÍ AS MOTORU	32
6.3 POROVNÁNÍ A VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH HODNOT.....	32
7 KONSTRUKCE A METODIKA VÝPOČTU.....	34
7.1 METODA KONEČNÝCH PRVKŮ.....	34
7.2 ANSYS	35
7.2.1 ANSYS WORKBENCH 15.....	35
7.3 VYTVOŘENÍ MODELU AS MOTORU A VENTILÁTORU	36
8 VÝPOČET PROUDĚNÍ VENTILÁTORU.....	38

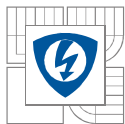


9 SIMULACE PROUDĚNÍ A VÝPOČET TEPLOTNÍ ANALÝZY ASYNCHRONNÍHO MOTORU.....	42
9.1 VÝPOČET CHLAZENÍ MOTORU	42
9.1.1 VÝSLEDEK ANALÝZY CHLAZENÍ MOTORU	43
9.2 VÝPOČET TEPELNÉ ANALÝZY MOTORU	45
9.2.1 VÝPOČET TEPELNÉ ANALÝZY MOTORU S CHLAZENÍM	45
9.2.2 VÝPOČET TEPELNÉ ANALÝZY MOTORU BEZ CHLAZENÍ	47
9.3 POROVNÁNÍ NAMĚŘENÝCH A VYPOČTENÝCH HODNOT TEPELNÉ ANALÝZY	49
ZÁVĚR	50
LITERATURA	52

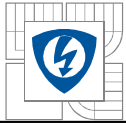


SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 2-1-Konstrukce asynchronního motoru [5]</i>	<i>16</i>
<i>Obrázek 2-2-Výkonová bilance asynchronního motoru [4]</i>	<i>18</i>
<i>Obrázek 3-1 Otevřené chlazení s axiálním prouděním vzduchu [1]</i>	<i>20</i>
<i>Obrázek 3-2 Otevřené chlazení s radiálním prouděním vzduchu [1]</i>	<i>20</i>
<i>Obrázek 3-3 Uzavřené (nepřímé) chlazení asynchronního motoru [1]</i>	<i>21</i>
<i>Obrázek 4-1Rychlostní profil jednotlivých typů proudění uvnitř kruhového kanálu [9]</i>	<i>24</i>
<i>Obrázek 4-2Laminární proudění.....</i>	<i>25</i>
<i>Obrázek 5-1Radiální ventilátor - 1)oběžné kolo, 2) sací hrdlo, 3)výtlačné hrdlo, 4) spirální skříň, 5)elektromotor [10].....</i>	<i>26</i>
<i>Obrázek 5-2Nosná plocha-α-náběhový úhel, A-vztlaková síla, W-brzdná síla, l-délka plochy, w-proudění, b-šířka plochy [6]</i>	<i>27</i>
<i>Obrázek 5-3Axiální ventilátor - 1)rotor, 2)oběžné lopatky, 3)plášť, 4)elektromotor, 5)příruby [10]</i>	<i>27</i>
<i>Obrázek 6-1 Laboratorní měření</i>	<i>30</i>
<i>Obrázek 6-2 Charakteristika závislosti teploty kostry ASM na čase s usměrněným chlazením.....</i>	<i>31</i>
<i>Obrázek 6-3 Charakteristika závislosti teploty kostry ASM na čase bez chlazení.....</i>	<i>32</i>
<i>Obrázek 7-1 Objekt rozdělený na síť konečných prvků [13].....</i>	<i>34</i>
<i>Obrázek 7-2 Prostředí ANSYS Workbench 15 a CFX rozložení</i>	<i>35</i>
<i>Obrázek 7-3Model asynchronního motoru vymodelovaný v programu Autodesk Inventor 2012..</i>	<i>36</i>
<i>Obrázek 7-4 Radiální ventilátor měřeného modelu</i>	<i>37</i>
<i>Obrázek 8-1 Radiální ventilátor uzavřený do objemu pro vypočtení hodnot proudění (vlevo); Vytvoření sítě konečných prvků (vpravo)</i>	<i>38</i>
<i>Obrázek 8-2 Grafická závislost hmotnostního průtoku vzduchu na otáčkách ventilátoru.....</i>	<i>39</i>
<i>Obrázek 8-3Grafická závislost rychlosti proudění na otáčkách motoru (ventilátoru)</i>	<i>40</i>
<i>Obrázek 8-4 Turbulentní proudnice vzduchu při otáčkách 1498 ot.min⁻¹</i>	<i>40</i>
<i>Obrázek 8-5 Zobrazení rychlosti proudění při otáčkách 200 ot.min⁻¹</i>	<i>41</i>
<i>Obrázek 8-6 Zobrazení rychlosti proudění radiálního ventilátoru při otáčkách 1498 ot.min⁻¹.....</i>	<i>41</i>
<i>Obrázek 9-1Vytvoření objemu kolem motoru potřebný pro výpočet (prostředí ANSYS Workbench 15 –CFX).....</i>	<i>42</i>
<i>Obrázek 9-2 Proudnice vzduchu promítnuté na ploše řezu motoru.....</i>	<i>43</i>
<i>Obrázek 9-3 Výpočet teplotní analýzy s chlazením - Rozložení teploty v okolí a na povrchu asynchronního motoru v konečném stádiu výpočtu => t=3000s.....</i>	<i>45</i>

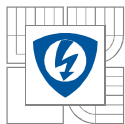


<i>Obrázek 9-4 Výpočet teplotní analýzy s chlazením - Rozložení teploty v okolí a na povrchu stroje - čelní pohled (rozložení na MKP), řez motorem; $t=3000s$.....</i>	<i>46</i>
<i>Obrázek 9-5 Grafická závislost vypočtených hodnot tepelné analýzy s chlazení ASM; $T=f(t)$.....</i>	<i>46</i>
<i>Obrázek 9-6 Grafická závislost vypočtených hodnot tepelné analýzy bez chlazení ASM; $T=f(t)$..</i>	<i>47</i>
<i>Obrázek 9-7 Rozložení teploty v řezu počítaného objemu a uvnitř motoru v čase $t=3000s$</i>	<i>47</i>
<i>Obrázek 9-8 Rozložení teploty vřezu na AS motoru bez chlazení – rozložení na konečný počet prvků</i>	<i>48</i>
<i>Obrázek 10-1 Grafické porovnání naměřených a vypočtených hodnot oteplení</i>	<i>49</i>



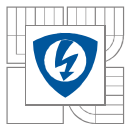
SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 1 Šítkové hodnoty ASM Lenze DERA A-4470 Enns</i>	<i>30</i>
<i>Tabulka 2 Hodnoty získané pomocí simulace v programu ANSYS CFX.....</i>	<i>39</i>

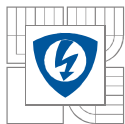


SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Značka	Název veličiny	Jednotka
A	Vztlak-axiální ventilátor	kp
B	Indukce	T
b	Šířka lopatky ventilátoru	m
c	Měrné teplo chlad. média	W.s.m ⁻¹
c	Absolutní rychlost proudění	m.s ⁻¹
c_x	Odporový (ztrátový) činitel	-
c_z	Vztlakový činitel	-
d	průměr	m
f_1	Kmitočet synchronní	Hz
f_2	Kmitočet skluzový	Hz
H	Vnější tlak	kp.m ⁻²
I_1	Proud statoru AS motoru	A
I_2	Proud rotoru AS motoru	A
k	Střední drsnost stěny potrubí	mm
k_e	Materiálová konstanta pro daný materiál při frekvenci 50Hz	-
k_r	Drsnost povrchu potrubí	-
k_h	Hysterezní materiálová konst. Při frekvenci 50Hz	-
l	Délka	m
L	Charakteristický rozměr	m
m_1	Počet fází	-
P	Činný výkon	W
P_p	Činný příkon	W
p_b	Atmosférický tlak	kp.cm ⁻²
p_d	Dynamický tlak	W
p_s	Statický tlak	W
P_6	Výkon přenesený vzduchovou mezerou	W
ΔP_{Fe}	Ztráty v železe	W
$\Delta P'_d$	Přídavné ztráty	W
ΔP_h	Ztráty hysterezní	W



Značka	Název veličiny	Jednotka
ΔP_{j1}	Ztráty ve vinutí statoru	W
ΔP_{j2}	Ztráty ve vinutí rotoru	W
ΔP_{mech}	Ztráty mechanické	W
ΔP_v	Ztráty vířivými proudy	W
p_d	Dynamický tlak	kp.m ⁻²
p_{zt}	Ztráty třením	Pa
Q	Tok chladicího média	m ³ .s ⁻¹
R	Odpor	W
R_ϑ	Odpor při teplotě ϑ [°C]	Ω
Re	Reynoldsovo podobnostní číslo	-
S	Průřez toku	m ²
T	Teplota	K; °C
ΔT	Dovolené oteplení chladicího média; Rozdíl teplot	K; °C
v	Rychlost	m.s ⁻¹
W	Síla ve směru proudění	kp
w	Relativní rychlost toku	m.s ⁻¹
α	Teplotní součinitel odporu	K ⁻¹
α_i	Měrná chladiivost	W.°C ⁻¹ .m ²
β_2	Úhel natočení lopatky	°
ξ	Odporový činitel	-
Λ	Součinitel tření	-
ϑ	teplota	K
$\Delta\vartheta$	Oteplení	°C
ν	Kinematická viskozita	m ² .s ⁻¹
ϱ	Hustota	kp.s ² .m ⁻⁴



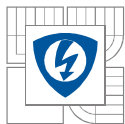
1 ÚVOD

Při chodu jakéhokoliv stroje dochází k jevu zvanému oteplování. Aby stroj mohl správně fungovat a nedošlo k trvalým škodám nebo dokonce k úplnému zničení, je zapotřebí zajistit jeho ochlazování. Toto chlazení spočívá hlavně v předávání energie zahřátého prvku chladicímu médiu.

Jak již zaznělo z úvodních vět, je chlazení motoru velmi důležitým prvkem při jeho výrobě, ne-li dokonce jedním z hlavních prvků posuzování správnosti chodu motoru. Proto je na něj kladen velký nárok a platí přísná kritéria pro schválení norem. Tato práce je zaměřena na asynchronní motory, které jsou velmi populární pro využití v průmyslu díky jejich velké výkonové škále s velkými rozsahy otáček. Právě díky velké škále výkonností motorů, které se daná problematika musí věnovat, se problém chlazení rozvětňuje a dalo by se říci i díky tomu zdokonaluje.

Díky různým výkonnostním typům proběhla velká modernizace chlazení a stále se vyvíjejí nové typy. V počátcích se chladilo pouze vzduchem. I v dnešní době je toto chlazení velmi rozšířené, avšak s relativně malou účinností. Ta se odvíjí i od toho, zda je motor uzavřený či otevřený. Novějším způsobem je chlazení kapalinou (olej, voda, atd.), které se provádí u motoru větších výkonů. V dnešní době jsou technologie ovšem ještě dál a přichází s dalšími způsoby chlazení vzácnými plyny. Mezi zástupce jsou řazeny prvky jako hélium a vodík. Tento způsob je však velmi finančně náročný.

Výpočet chlazení se svou důležitostí spojuje jeden zásadní problém a tím je relativní obtížnost výpočtu. V době, kdy ještě neexistovala žádná výpočetní technika, probíhaly pokusy, na základě metody „pokus-omyl“ a následně byly doladěny vzniklé problémy, které mohly nastat i přes správně pochopenou teorii, nepřesným výpočtem. Kolem poloviny 20. století, přišli vědci s novou výpočetní metodou, nazvanou *Metoda konečných prvků*, která se začala využívat i pro výpočet chlazení. V dnešní době jsou již plně využity počítačové technologie, které pomáhají k relativně velmi přesným výpočtům a simulacím před uvedením do výroby. Jedním z velmi využívaných programů se stal program ANSYS pracující v grafickém rozhraní Workbench. Jeho výpočet probíhá právě na základě metody konečných prvků, čímž dosahuje velmi efektivních výsledků. Pro svoji práci ji využívají firmy, jako jsou Toyota a Red Bull Racing, pro zlepšení aerodynamiky vozidel, dále pak firma Dyson pro optimalizaci vzduchu u ventilátorů.



2 ASYNCHRONNÍ STROJE

Asynchronní stroje, stejně jako ostatní elektrické stroje, přeměňují elektrickou energii na mechanickou a patří mezi nejrozšířenější a nejpoužívanějších. Tyto stroje lze rozdělit podle užití na asynchronní motory a asynchronní alternátory. Více používané jsou ale asynchronní motory a patří mezi nejrozšířenější elektromotory. Jejich velké využití spočívá hlavně v jednoduchosti, ceně, spolehlivosti a v neposlední řadě je také spojen s nízkou údržbou. Mezi nejčastěji používané vinutí statoru patří vinutí trojfázové a jednofázové, v minimu případů je i vinutí dvoufázové. Výroba asynchronních strojů z hlediska výkonové řady se pohybuje od W do tisíců kW, proto mají velkou škálu použitelnosti. Pohání například výtahy, jeřáby, čerpadla, atd. U jednofázových asynchronních motorů je ovšem výkon omezen pouze do 500W a pohání tak jen menší pohony, mezi něž řadíme například domácí spotřebiče.

2.1 Konstrukce

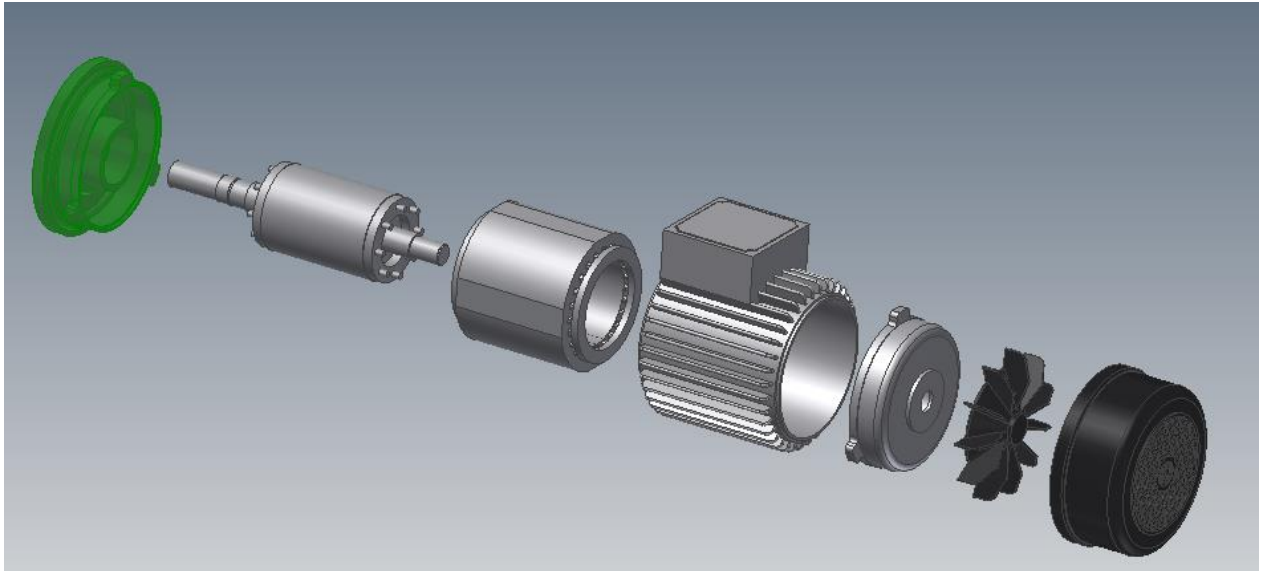
Konstrukce asynchronních strojů se liší vzhledem k velikosti jeho výkonu. Asynchronní stroje se konstruují, jako stroje s vlastním chlazením.

- Pro otevřené stroje je uvnitř ventilátor, který rozhání vzduch ve stroji. Otvory pro vzduch jsou buď na svislých stěnách nebo ve spodní části. Toto opatření je hlavně kvůli vodě, aby nepronikla dovnitř [2].
- Pro zavřené stroje je motor úplně uzavřen. Ochlazení je zajištěno pouze chladicími žebry nebo kanály, na které je pro zvýšení účinnosti chlazení přiváděn vzduch pomocí ventilátoru umístěného na hřídeli motoru [2].

Hlavní částí asynchronních strojů jsou zajisté dvě části. Stator a rotor.

Stator - Je to stacionární část nacházející se v motorové části. Vinutí statoru (nejčastěji bývá třífázové), je vloženo v drážkách magnetického obvodu, který se skládá z plechů, jež jsou vzájemně izolovány. Tyto plechy se zalisují do rámu poháněného stroje. Mají obvykle tloušťku 0,5mm. Konec vinutí je potom vyvedeno na svorkovnici, kde je možné zapojit asynchronní stroj buď do hvězdy, nebo trojúhelníka [4], [2].

Rotorová část (rotační), se nachází na ose (hřídeli) motoru. I rotor, stejně jako stator, je složen z tenkých plíšků. Vinutí rotoru mohou být u strojů s velkými výkony dvojího typu: 1) Dvouvrstvá tyčová vinutí a 2) Klecová vinutí. Více rozšířená vinutí jsou klecová. Klecové vinutí jsou buď jednoduché, nebo dvojité. Jsou s tyčemi mající různý průměr z různých materiálů, kterým je například hliník, měď a jiné slitiny. Hřídel se nachází ve většině případů ve vodorovné poloze. Jsou ovšem i případy, kdy se tato osa nachází v poloze svislé. V těchto případech slouží asynchronní motory zejména u odstředivek nebo čerpadel [4], [1].



Obrázek 2-1-Konstrukce asynchronního motoru [5]

Popis konstrukce asynchronního motoru, zleva doprava: ložiskový štít, rotor + hřídel, stator, kostra + svorkovnice, ventilátor, kryt ventilátoru

Princip nejvíce využívaného trojfázového asynchronního motoru spočívá ve vyvedení vinutí na svorkovnici, odkud je připojeno do trojfázové sítě. Zde vytváří točivé magnetické pole, které indukuje napětí (jednotlivé vinutí fází je natočena o 120°). Jestliže je vinutí rotoru uzavřeno, rotorem prochází proud vytvářející magnetické pole. U jednofázových asynchronních motorů po připojení do sítě vzniká pouze pulzující magnetické pole, které nestačí na to jeho rozběh. Rozběh je tedy zajištěn dvěma způsoby. První způsob je mechanický. Druhý je vytvořením točivého magnetického pole, které je zajištěno systémem dvou fází. Je to vinutí vzájemně posunutá o 90°, kterým prochází proud také vzájemně posunut.

2.2 Ztráty asynchronního stroje

Ztráty asynchronního stroje vychází z výkonové bilance. Pro získání výsledného výkonu asynchronního stroje je nutné tyto ztráty vypočítat. Ztráty se dělí na ztráty ve statoru a na ztráty v rotoru. Ve statoru a v rotoru pak vzniká více dalších ztrát. Vše se odvíjí od příkonu dodávaného ze sítě do vinutí statoru. Příkon ze sítě je dán vztahem

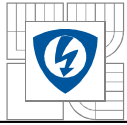
$$P_p = m \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \cos\varphi_1 \quad [\text{W}] \quad (1)$$

2.2.1 Ztráty ve statoru

- **Ztráty ve vinutí statoru (Jouleovy)** – Vznikají zahříváním asynchronního motoru. Jouleovy ztráty jsou určeny díky proudové hustotě v drážce, měrného odporu materiálu vinutí, z počtu závitů, proudu procházejícího vodiči drážky. Ztráty vychází ze vztahu

$$\Delta P_{j1} \approx I_1^2$$

$$\Delta P_{j1} = m \cdot R_1 \cdot I_1^2 \quad [\text{W}] \quad (2)$$



- **Ztráty v železe** – Lze také nazvat ztráty v magnetickém obvodu statoru. Tyto ztráty se dělí ještě na ztráty hysterezní a ztráty vířivými proudy. Ztráty hysterezní jsou úměrné kmitočtu statorového signálu. Výpočet je určen na základě vztahu [7]

$$\Delta P_h = k_h \cdot B^n \cdot m \cdot \left(\frac{f_1}{50}\right) \quad [\text{W}] \quad (3)$$

Ztráty vířivými proudy vznikají indukujícím se materiálem. Ztráty jsou tím vyšší, čím vyšší jsou otáčky, které zmenšují čas doby změny toku, a tím roste indukované napětí. Vztah pro jejich určení lze popsat následovně [7]

$$\Delta P_v = k_e \cdot B^2 \cdot m \cdot \left(\frac{f_1}{50}\right) \quad [\text{W}] \quad (4)$$

Odečtením ztrát ve vinutí statoru a ztrát v železe statoru o příkonu dodávaného ze sítě je získán vnitřní výkon, který je přenášen točivým magnetickým polem rotoru.

2.2.2 Ztráty v rotoru

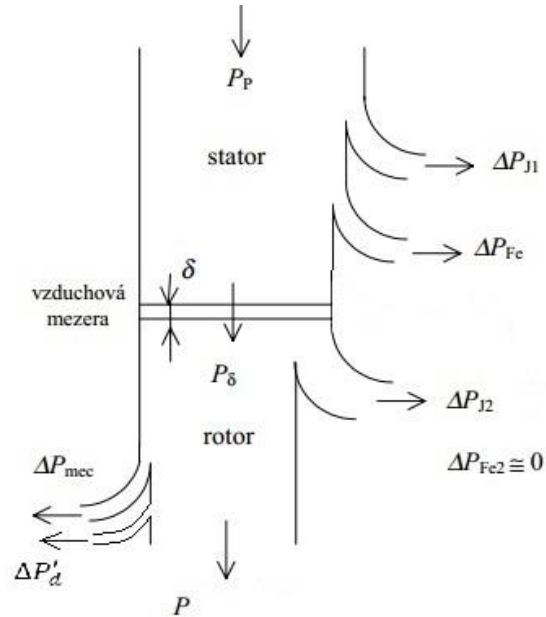
- **Ztráty ve vinutí rotoru** – Tyto ztráty vznikají zejména při dlouhém rozběhu stroje. Jsou obvykle poměrně malé a je možné je zanedbat.

$$\Delta P_{j2} = m \cdot R_2 \cdot I_2^2 \quad [\text{W}] \quad (5)$$

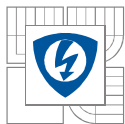
- **Ztráty mechanické** – Po odečtení ztrát vinutí rotoru od přeneseného vnitřního výkonu je získán mechanický výkon. Ten se spotřebovává při mechanických ztrátách, ale také při ztrátách vedlejších $\Delta P'_d$ (tyto ztráty souvisí s otáčením rotoru) [1].
- **Ztráty v železe rotoru** – Ztráty tohoto typu v rotoru se zanedbávají při otáčkách blízkých k synchronním. Přepokládá se tedy, že $\Delta P_{Fe} \approx 0$. Je to díky přemagnetování frekvence rotoru, která je velmi malá, jestliže se frekvence statoru blíží ke jmenovité ($f_2 = s \cdot f_1$) [3].

Výsledný výkon je tedy dán rozdílem příkonu ze sítě a sumou všech ztrát

$$P = P_p - \sum \Delta P = P_p - \Delta P_{j1} - \Delta P_{Fe} - \Delta P_d - \Delta P_{j2} - \Delta P_{mech} - \Delta P'_d \quad [W] \quad (6)$$



Obrázek 2-2-Výkonová bilance asynchronního motoru [4]



3 OTEPLENÍ A CHLAZENÍ ASYNCHRONNÍHO STROJE

3.1 Oteplení asynchronního stroje

Je-li zatížení asynchronního stroje rovnoměrné, může se dosáhnout stavu, při kterém se teplo vznikající ve stroji rovná teplu sálajícímu z jeho povrchu do okolí. Uvnitř stroje se tak vytvoří tepelné pole, jež udržuje v jednotlivých částech stroje konstantní teplotu. Toto tepelné pole je závislé na prostorovém rozložení ztrát, dále také na rychlosti a zejména směru a množství proudění chladicího média. Při návrhu asynchronního stroje, je potřeba brát v úvahu i časté spouštění, při němž hodnoty proudu mohou převýšit až šestkrát hodnoty jmenovité a značně tak ovlivnit oteplení stroje. Určení hodnoty tepelného pole je složité, protože díly potřebné pro měření jsou nedostupné. Pro složitost určení tepelného pole je nutné postupovat pro výpočet, přes střední hodnotu teploty vinutí statoru, statorového železa a vinutí rotoru. Tyto hodnoty lze získat ze změřené změny jeho odporu při průchodu stejnosměrným proudem. Odvozením z rovnice [1]

$$R_{\vartheta_2} = R_{\vartheta_1} \cdot [1 + \alpha \cdot (\vartheta_2 - \vartheta_1)] \quad [\Omega] \quad (7)$$

Lze vyjádřit vztah pro hledanou střední teplotu

$$\vartheta_2 = \frac{R_{\vartheta_2} - R_{\vartheta_1}}{R_{\vartheta_1}} (235 + \vartheta_1) + \vartheta_1 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (8)$$

Jak bylo již zmíněno, asynchronní motory pracují při různých stavech zatížení, díky kterým je jejich izolace velmi namáhána. Tyto stavy, byly rozřazeny do osmi druhů chodu, podle kterých se asynchronní motory vyrábí. Tyto tři jsou nejdůležitější a nejvíce využívané [1]:

- a) **Trvalé zatížení** – Je to zatížení, při němž je dosažena ustálená hodnota oteplení. Zároveň se předpokládá neměnná teplota okolí [1].
- b) **Krátkodobý chod** – U tohoto chodu zařízení se střídají stavy při konstantním jmenovitým zatížením s konstantní teplotou chladicího média se stojícím stavem stroje. Doba zatížení není dost dlouhá na to, aby stroj dosáhl konstantní teploty při chodu, ale doba klidu stroje stačí na to, aby došlo k úplnému ochlazení stroje. Podle normy ČSN 35 0000 jsou udávány doby chodu, které jsou nutné právě pro návrh asynchronních strojů tyto: 0,5; 1; 3; 5; 10; 15; 30; 45; 60; 90; 120 minut [1].
- c) **Přerušovaný chod** – Tento stav se liší od krátkodobého tím, že přestávky již nejsou tak dlouhé na to aby se stroj stačil plně ochladit, ale zároveň nedosáhne konstantních ustálených hodnot oteplení [1].

3.2 Chlazení asynchronního stroje

Se vznikajícími elektrickými, magnetickými i mechanickými ztrátami vzniká i teplo, které je potřeba eliminovat, pro správný chod stroje. Správně navřeným chlazením lze zajistit dlouhou životnost stroje a zamezit poruchám izolace. Chlazení je téma velmi rozšířené, ovšem základní dělení je do dvou skupin

- a) **Aktivní chlazení** – Při tomto způsobu chlazení je teplo odváděno díky proudění chladicího média, které je rozháněno pomocí ventilátoru nebo čerpadla. Díky tomu je zajištěna větší účinnost chlazení [8].
- b) **Pasivní chlazení** – Tento typ chlazení lze provádět pouze u strojů s malým výkonem, neboť teplo, které sálá z jeho povrchu je odvedené jen přirozeným prouděním tepla [8].

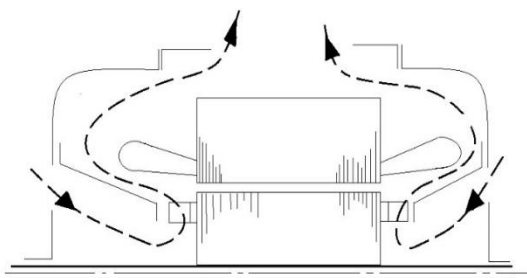
Při chlazení je nesporně důležité vědět, jak velké množství chladicího média má protéct, aby byl stroj efektivně chlazen. Vyplývá to z rovnice

$$Q_v = \frac{\Delta P_v}{c_v \theta_v} \quad [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}] \quad (9)$$

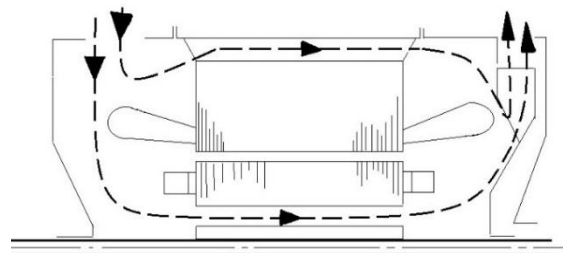
3.2.1 Chladicí média

Při chlazení je nutné dbát na to, aby chladicí médium bylo efektivně použito na místa, kde je vznik tepla největší. Pro právě větší efektivnost a účinnost chlazení a přívod média na vhodné místo zajišťují ventilátory nebo jiná další vhodná zařízení sloužící k rozhánění zvoleného media (*kapitola 5*).

- a) **Vzduch** - Pro chlazení tímto médiem je chlazení děleno dále na:
 - **Chlazení otevřené** – Při tomto chlazení vzduch proudí z okolního prostředí do stroje, ve kterém přijímá teplo stroje a je vyváděn ze stroje ven. U tohoto chlazení je značnou nevýhodou nasávání nečistot a prachu z okolí a následně jeho zanášení. Chlazení otevřené se dále dělí podle směru, jakým vzduch stojem proudí [8].
 - Radiální (Obrázek 3-1)
 - Axiální (Obrázek 3-2)
 - Radiálně-axiální

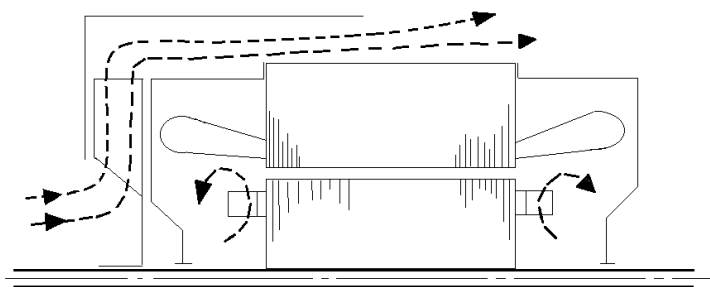


Obrázek 3-2 Otevřené chlazení s radiálním prouděním vzduchu [1]



Obrázek 3-1 Otevřené chlazení s axiálním prouděním vzduchu [1]

- **Chlazení uzavřené** – Uvnitř stroje se nachází vzduch, který cirkuluje díky pohybu rotoru a stykem s chladnějšími částmi stroje toto teplo předává. Následným stykem odevzdá tepelnou energii přes chladíč nebo kostru motoru vzduchu, proudícího kolem stroje. V případě uzavřeného chlazení lze odvody tepla dále dělit [8].
 - **Přímé chlazení** – zde dochází ke přímému styku chladícího vzduchu s oteplenou aktivní částí stroje
 - **Nepřímé chlazení** – V tomto případě prochází chladící vzduch před stykem s ohřátým povrchem další částí stroje.



Obrázek 3-3 Uzavřené (nepřímé) chlazení asynchronního motoru [1]

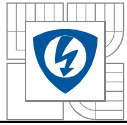
b) Kapalina

Při chlazení kapalinou je stroj chlazen uzavřeným druhem chlazení za stálého a neměnného množství chladící látky. Chladící látka u kapalin je preferovaná především voda a v občasných případech také olej. U chlazení kapalinou bývá chlazen kapalinou stator. K ochlazení rotoru stačí chladit vzduchem. Je to způsob takzvaného chlazení voda-vzduch.

Přímé chlazení vodou je v tomto ohledu, co se týče chlazení kapalin nejvýhodnější a nejlepší. Díky vyšší tepelné kapacitě pohlcuje víc tepla právě oproti oleji, u kterého dochází k většímu ohřevu stroje. U vody je možné dále vyzdvihnout menší nákladnost, společně s ekologičtějším pojetím likvidace. Oproti vodě olej, má daleko větší schopnost odolávat mrazu a lepší elektroizolační schopnost [6],[8].

c) Další způsoby chlazení

Mezi tyto způsoby chlazení patří například chlazení vzácnými plyny, jako jsou hélium a vodík. U těchto prvků je využita hlavně jejich tepelná vodivost a nízká měrná vodivost, která je pro čistý vodík rovna 1 [6].



U chlazení jsou využita chladiva, která se následně dělí do skupin podle důležitosti využití [14]

- **Primární chladivo** – Slouží k ochlazení hlavních částí uvnitř elektrických strojů.
- **Sekundární chladivo** – Sekundární chladivo slouží pro chlazení primárního chladiva a přebírá jeho tepelnou energii.
- **Nouzové chladivo** – Dojde-li k selhání chladiva primárního či sekundárního, lze využít chladiva nouzového.

4 PROUDĚNÍ

Proudění samo o sobě, je velmi podstatnou kapitolou, týkající se chlazení nejen asynchronních strojů. Při chlazení se často objevuje takzvané jednorozměrné proudění, při kterém je počítáno s tekutinou stlačitelnou nebo nestlačitelnou. Při nutném uvažování ztrát v případě proudění nestlačitelné kapaliny, je nutné vycházet z rovnice kontinuity, která popisuje danou problematiku. Tento vztah určuje objemový průtok při konstantní hustotě ρ .

$$Q_v = S \cdot c \quad [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}] \quad (10)$$

V případě kapaliny stačitelné se vychází z rovnice kontinuity, ve které je hustota pouze funkcí souřadnice $\rho = \rho(s)$. Platí vztah pro hmotnostní průtok kapaliny za určitý čas

$$Q_m = \rho \cdot S \cdot c \quad [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (11)$$

V případě chlazení asynchronních strojů se uvažuje proudění, které má potenciál ideální nestlačené kapaliny. Při počítání právě s tímto prouděním, kdy je tekutina brána jako ideální (v reálu se některé tekutiny k těmto hodnotám blíží), je získán zjednodušený výpočet, který je jinak velmi složitý [9].

- **Stacionární proudění**

Je to právě proudění, kde je rychlost částic látky konstantní s tlakem v jakémkoliv libovolném místě. Vychází se z rovnice kontinuity, z které plyne zákon o zachování hmotnosti

$$\text{div } c = \frac{\partial c_x}{\partial x} + \frac{\partial c_y}{\partial y} + \frac{\partial c_z}{\partial z} = 0 \quad (12)$$

Obecně vyjádřená rovnice pro stacionární proudění nestlačitelné kapaliny v prostoru [9].

Lze uvažovat proudění stacionární nestlačitelné vazké kapaliny, při kterém dochází ke vzniku vnitřních ztrát. S ohledem na rovnici kontinuity vztah (9) je objemový průtok konstantní díky rychlosti, která částice proudí $Q_v = \text{konst.}$ Při stacionárním proudění stlačitelné kapaliny vztah (10) platí opět konstanta průtoku. Ovšem zde je touto konstantou průtok hmotnostní $Q_m = \text{konst.}$ [9].

- **Nestacionární proudění**

Při nestacionární proudění již pro rychlost a tlak konstantnost neplatí. U proudění tohoto typu se tyto veličiny mění v závislosti na čase. Vyjádřením z rovnice kontinuity zákonu o zachování hmotnosti plyne

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho c_x) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho c_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho c_z) = 0 \quad (13)$$

Obecně vyjádřená rovnice kontinuity, pro nestacionární prostorové proudění stlačitelné kapaliny, kde c je rychlost proudění kapaliny. Tato rovnice platí za předpokladu konstantní hmotnosti dané kapaliny a neměnném průřezu [9].

Pro vztah (9) je tedy průtok $Q_v = Q_v(t)$ a pro vztah (10) $Q_m = Q_m(t)$ [9].

V případě již zmíněných ztrát u nestlačené kapaliny, vzniká ztrátové tření v trubici určité délky a průřezu, z kterých lze odvodit těchto ztrát

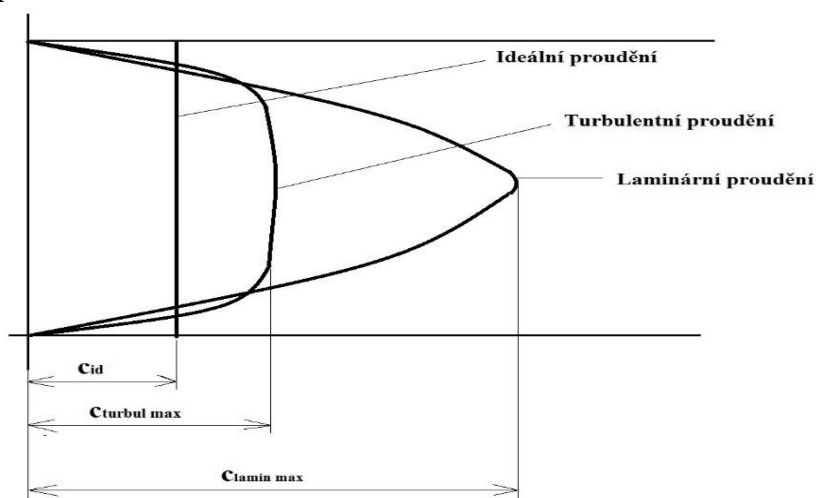
$$p_{zt} = \Lambda \cdot \frac{1}{d} \cdot \rho \cdot \frac{c^2}{2} \quad [\text{Pa}] \quad (14)$$

V tomto vztahu se vyskytuje neznámá Λ , která značí součinitel tření. Tento součinitel tření je závislý na drsnosti k_r protékáním potrubím a na takzvaném Reynoldsově podobnostním čísle, které nám určuje druh proudění [9]

$$\text{Re} = \frac{c \cdot L}{\nu} \quad [-] \quad (15)$$

Rozlišují se tři druhy proudění

- a) Laminární proudění
- b) Turbulentní proudění
- c) Ideální proudění



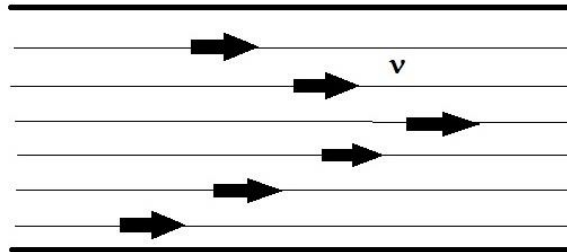
Obrázek 4-1 Rychlostní profil jednotlivých typů proudění uvnitř kruhového kanálu [9]

4.1 Laminární proudění

Při laminárním proudění, jsou proudnice rovnoběžné a nenastává jejich protínání. Proudění laminárního typu je vrstvené v takzvaných destičkách a tím dochází ke tření. Rychlost tekutiny je různá, ale největší rychlost je nejbliž ose proudění. Proudění v rychlostním profilu v kruhovém kanálu má tvar paraboly. Hranice hodnoty Reynoldsova čísla, kdy je uvažováno proudění za laminární je $\text{Re}_{\text{krit}}=2300$. Je to hranice přechodu na turbulentní proudění, kdy je laminární proudění nestabilní, proto bude platit pro laminární proudění stav $2300 \leq \text{Re}$. V případě, kdy je navrhováno chlazení asynchronních strojů, je lepší se tomuto typu proudění co nejvíce vyhnout, neboť na rozdíl od proudění turbulentního je sdílení tepla značně nižší [6],[9].

Jestliže je proudění laminární, pak platí pro součinitel tření Λ následující vztah, který je určen Poiseuilleovou rovnicí

$$\Lambda = \frac{64}{Re} \quad (16)$$



Obrázek 4-2 Laminární proudění

4.2 Turbulentní proudění

U turbulentního proudění, se tvoří drobné makroskopické vířivé shluky, jež mění směr proudění a prolínají se navzájem s proudnicemi, poté toto víření zaniká a následně vytváří nové. Vytvářením tohoto pohybu způsobuje také vnitřní tření. Při turbulentním proudění se rychlostní profil blíží více než proudění laminární k proudění ideální kapaliny. Turbulentní proudění v souvislosti s Reynoldsovým číslem je podstatně větší, než je u laminárního. Zde platí, že $Re \leq 10.000$. Nyní je ovšem nutné počítat s relativní drsností trubek [6].

5 VENTILÁTORY

Ventilátory obecně slouží k pohánění chladicího média ve stroji. U elektrických strojů, například právě asynchronních, se ventilátory liší od ventilátorů průmyslových. Průmyslové ventilátory jsou navrhovány tak, aby sloužily jako samoučelný stroj a nelze tedy je tedy u asynchronních motorů použít. U ventilátorů, jež se využívají u asynchronních strojů, se pracuje s dvěma typy: *Radiálními ventilátory* a *Axiálními ventilátory*.

5.1 Radiální ventilátory

U ventilátorů radiálních probíhá axiální nasávání vzduchu, zatímco vyfukování je radiální. Vzduch, který je vháněn do stroje, je usměrněn krytem ventilátoru, díky čemuž dochází k správnému ochlazení stroje. Pro asynchronní stroj je tento typ ventilátoru nejčastěji využíván.

Při výpočtu lze uvažovat kanál, složený dvěma sousedními lopatkami a médium proudící proměnnou rychlostí, které vstupuje bočními stěnami. Při této problematice platí, že rychlost proudícího média bude jiná na vstupu a jiná na výstupu, proto zavádíme pojem střední proudnice, spojuje proudění o maximálních rychlostech. Je to ovšem pouze odhad. Nejsou-li známy maximální rychlosti ji udávající, pak počítáme s proudnicí protínající střed průřezu. Při počítání rychlosti je zde počítáno s rychlostí absolutní c_1 a c_2 , která je uvažována vzhledem k oběžnému kolu, a dále pak s relativní rychlostí w_1 a w_2 , která je uvažovaná vzhledem k okolí. Ovšem nejdůležitějšími veličinami je tok Q a tlak H . Ze závislosti těchto dvou veličin plyne dělení ventilátoru podle výstupního úhlu β_2 [6].

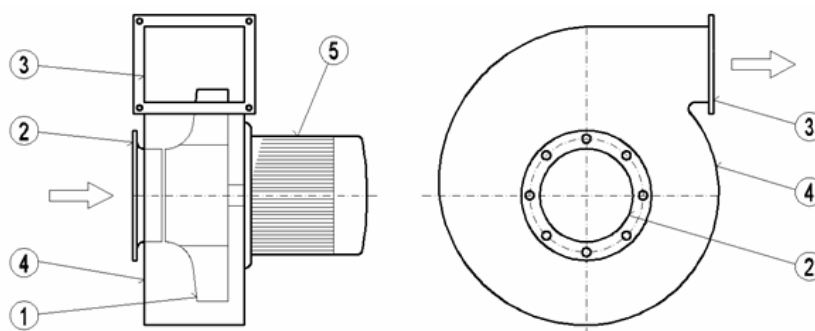
Dělíme je na

- $\beta_2 > 90^\circ$
- $\beta_2 = 90^\circ$
- $\beta_2 < 90^\circ$

Užitečný výkon je vypočítán pomocí tlaku a objemu vzduchu ze vztahu

$$P = \frac{(H \cdot Q)}{102} \quad [\text{W}], \quad (22)$$

. Účinnost je u ventilátorů použitých u elektrických strojů poměrně nízká a hlavně se pohybuje v širokém pásmu. U malých ventilátorů je to od cca 10-20% a u velkých je to od 20-50% [6].



Obrázek 5-1 Radiální ventilátor - 1) oběžné kolo, 2) sací hrdlo, 3) výtlačné hrdlo, 4) spirální skříň, 5) elektromotor [10]

5.2 Axiální ventilátor

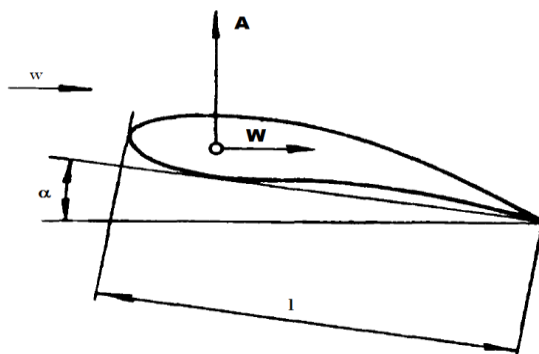
U axiálních ventilátorů závisí síly, jako vztlak A , brzdná síla W a bezrozměrné součinitelé c_z (vztlakový) a c_x (ztrátový) na náběhovém úhlu α . Ten je určen podle teorie nosné plochy, vůči které se provádí teoretické výpočty axiálních ventilátorů (obrázek 5-2). Jestliže na tuto plochu proudí vzduch w , tak vztlak je na toto proudění kolmý. Ovšem brzdná síla působí ve směru proudění. Tuto brzdou sílu a vztlak je možné si vyjádřit, tehdy, kdy známe působící odpovídající dynamický tlak p_d , na plochu lb . Dynamický tlak je počítán pomocí vztahu [6].

$$p_d = \left(\frac{\rho}{2}\right) \cdot w^2 \quad [\text{kp}\cdot\text{m}^{-1}] \quad (23)$$

Následný vztah pro vztlak A a brzdou sílu W bude tedy

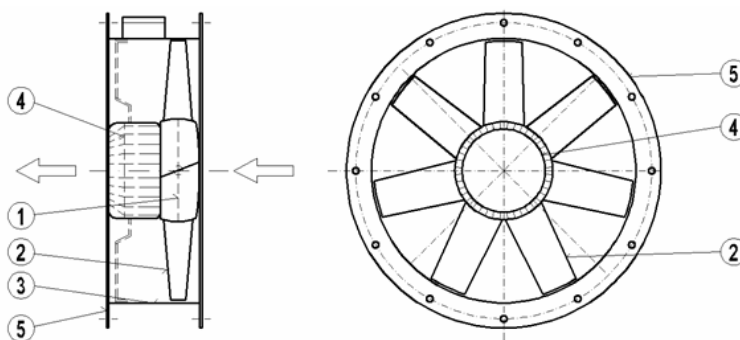
$$A = c_z \cdot p_d \cdot l \cdot b \quad [\text{kp}] \quad (24)$$

$$W = c_x \cdot p_d \cdot l \cdot b \quad [\text{kp}] \quad (25)$$



Obrázek 5-2 Nosná plocha- α -náběhový úhel, A -vztlaková síla, W -brzdná síla, l -délka plochy, w -proudění, b -šířka plochy [6]

Konstruování axiálního ventilátoru je takové, že jedna z částí je připevněna na hřídel a druhá část odděluje od pevné části vzduchová mezera pláště či kanálu, v kterém rotuje. Účinnost takového ventilátoru je definovaná stejně jako u radiálních ventilátorů [6].



Obrázek 5-3 Axiální ventilátor - 1) rotor, 2) oběžné lopatky, 3) plášť, 4) elektromotor, 5) příruby [10]



U axiálních ventilátorů probíhá, jak nasávání, tak i vyfukování axiálním prouděním vzduchu. Zde nastává problém, kde je vzduch vháněn do stroje přímo na ložiska umístěná na hřídeli a od nich je rozvířen do části krytu ventilátoru. Odtud může být vzduch usměrněn správným směrem pro chlazení, ovšem v této fázi již ztratil potřebnou rychlost a sílu pro správné chlazení. Při správně navržené konstrukci může být tento problém řešen.

5.3 Obecné vztahy pro (zjednodušený) výpočet chlazení

Při výpočtu chlazení se vychází vždy z teoretického uvažování nejjednoduššího tvaru Bernoulliho rovnice, kde se předpokládá dokonalé proudění chladiva (kapalina nebo plyn) se stálou rychlostí v s průřezem toku S beze ztrát. Z této úvahy plyne konstantní hodnoty tlaku statického a tlaku dynamického. Statický tlak je závislý na tlaku atmosférickém. Je-li hodnota jejich rozdílu kladná, nastává přetlak ($p_b - p_s$). Je-li záporná, jedná se o podtlak $-(p_b - p_s)$ [6].

$$p_b = 1 \text{ kp.cm}^{-2} - \text{Atmosférický tlak}$$

Dynamický tlak je „synonymem“ pro kinetickou energii hmoty pohybující se konstantní rychlostí v . Jak působí tyto tlaky na ventilátor je popsáno v kapitole 5.

Z těchto předpokladů pak lze psát jednoduché vztahy pro součet obou tlaků, který je také konstantní a představuje tekutinu beze ztrát

$$p_s + p_d = p_c = \text{konst} \quad (26)$$

Díky této rovnici pak lze předpokládat konstantní objemový tok tekutiny, který spočívá právě v zákoně zachování hmotnosti, nebo jinak rovnici kontinuity. Je potřeba tento tok konstantní, aby mohl být zachován průřez daného toku [6]

$$Q = v \cdot S = \text{konst} \quad [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}] \quad (27)$$

V reálném případě nastává ovšem situace, kde je potřeba zakomponovat do těchto rovnic ztráty, jež vznikly během chodu stroje. Tyto ztráty je potřebné co nejvíce kompenzovat, aby nedošlo k trvalým škodám na daném stroji. Ztráty mohou vznikat různými způsoby, jakými jsou například náhlé zúžení či náhlé rozšíření kanálu. Nesmí se opomenout také ztráty třením. V těchto případech je nutné počítat se ztrátovým součinitelem, který udává velikost ztrát [6].

Pro jednotlivé případy jsou udávány tyto vztahy [14]:

- Změna prouděním

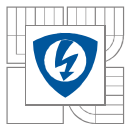
$$\text{Náhlé rozšíření} \quad \xi_r = \left(\frac{S_{\text{rozšířený}}}{S_{\text{zúžený}}} - 1 \right)^2 \quad [-] \quad (28)$$

$$\text{Náhlé zúžení} \quad \xi_z = 0,5 \cdot \left(1 - \frac{S_{\text{zúžený}}}{S_{\text{rozšířený}}} \right) \quad [-] \quad (29)$$

- Třením

$$\xi_t = \Lambda \cdot \frac{1}{d} \quad [-] \quad (30)$$

Λ – součinitel tření závisí na laminárním či turbulentním prouděním (kapitoly 4.1 a 4.2)



Ztráty pak lze vyjádřit pomocí vztahu [6]

$$\Delta p = \xi_i \cdot p_{di} = \xi_i \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v_i^2 \quad [\text{kp} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (31)$$

5.3.1 Postup při návrhu chlazení

Při návrhu chladicího systému, lze postupovat následujícím způsobem. Jako první je nutné určit ztráty stroje pomocí energetické bilance. Udává součet mechanického výkonu se ztrátami stroje.

$$P = P_m + P_z \quad [\text{W}] \quad (32)$$

Dále je potřebné určit množství požadovaného chladicího média. Toto množství požadovaného média je závislé na ztrátách stroje.

$$Q \geq \frac{P_z}{c \cdot \Delta T} \quad [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}] \quad (33)$$

Jestliže ztráty, jak již bylo zmíněno, jsou závislé na různém průřezu jednotlivých částí stroje, je tedy důležité určit jednotlivé průřezy v částech stroje. Nejmenší stanovený průřez lze pokládat jako nejkritičtější průřez $\Rightarrow S_{\min}$. V tomto případě je nutno určit takzvanou maximální rychlost proudění v tomto daném průřezu.

Pro zjištění maximální rychlosti v nejkritičtějším průřezu je ovšem potřeba znát množství vzduchu v daném místě. Je tedy zapotřebí rozdělit potřebné množství vypočítané vztahem (33) do jednotlivých částí stroje (statoru, rotoru).

Nyní již lze ze známých parametrů vypočítat potřebnou rychlost v_{\max} .

$$v_{\max} = \frac{Q_i}{S_{\min}} \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (34)$$

Pro vypočtenou rychlost náleží kritérium určité hranice, které nesmí být převyšeno, neboť se stává práce nerealizovatelnou. Pro rychlost tedy platí

$$v_{\max} < 20(30) \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (35)$$

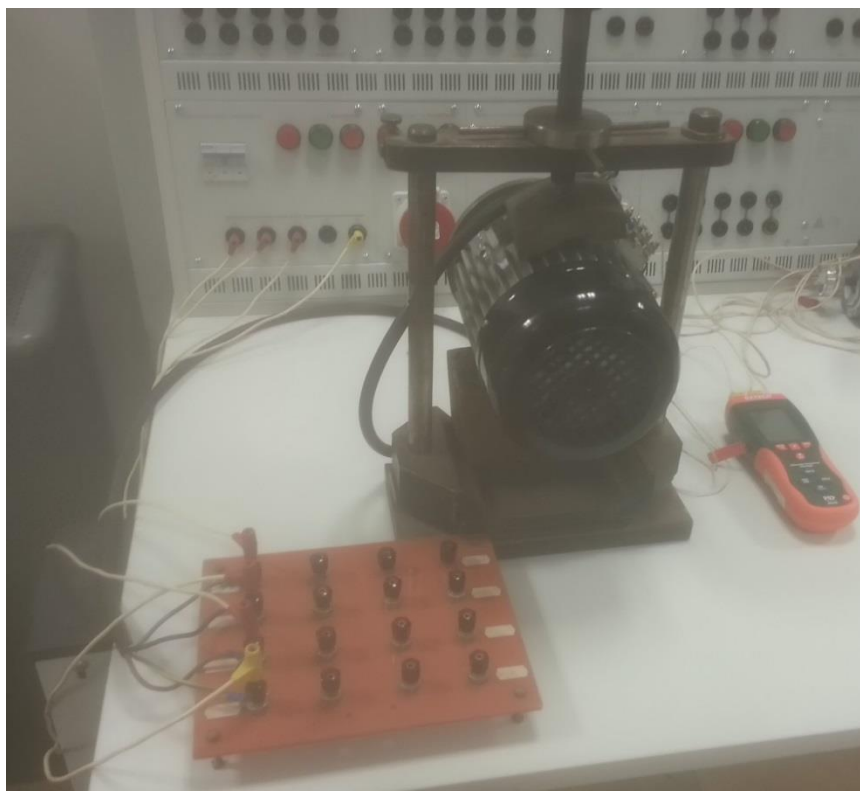
Je-li rychlost větší než podmínka udává, je nutné zvětšit tento kritický průřez a výpočet opakovat od hledání kritického průřezu. Pakliže rychlost vyhovuje, systém se stává realizovatelným [14].

6 PRAKTICKÁ ČÁST MĚŘENÍ V LABORATOŘI

Podstatou této bakalářské práce je porovnávání reálných naměřených výsledků na asynchronním motoru, který byl následně modelován a zanalyzován na PC. Model pro laboratorní měření je třífázový asynchronní motor typ Lenze DERA A-4470 Enns (*Tabulka 1*). Byl zapojen na svorkovnici do hvězdy naprázdno => bez zatížení na napětí $U=400\text{V}$ a proudu $I=2,35\text{A}$. V tomto stavu dosahoval otáček cca 1498/min. Měření spočívalo v odečítání teploty pomocí IR teploměru HD200 Extech Instruments s dvěma čidly umístěnými na povrchu kostry motoru. Těmito čidly byly získány průběžné hodnoty oteplení kostry, která rostla s přibývajícím časem. Proběhly dvě laboratorní měření. První bylo realizováno s **chlazením** a druhé **bez chlazení**. Tyto hodnoty jsou následně srovnány s hodnotami nasimulovanými na PC. Naměřené hodnoty z laboratoře jsou přiloženy v příloze.

Lenze Dera A-4470 Enns 3~Mot				
WSK 160°C, IP55, EN60034				
YΔ	380-415/220-240V		3,9/6,7A	
cosφ	0,8	1,50kW	1400/min	50Hz
YΔ	380-440/220-254V		3,5/6,1A	
cosφ	0,85	1,50kW	1700/min	60Hz

Tabulka 1 Štítkové hodnoty ASM Lenze DERA A-4470 Enns



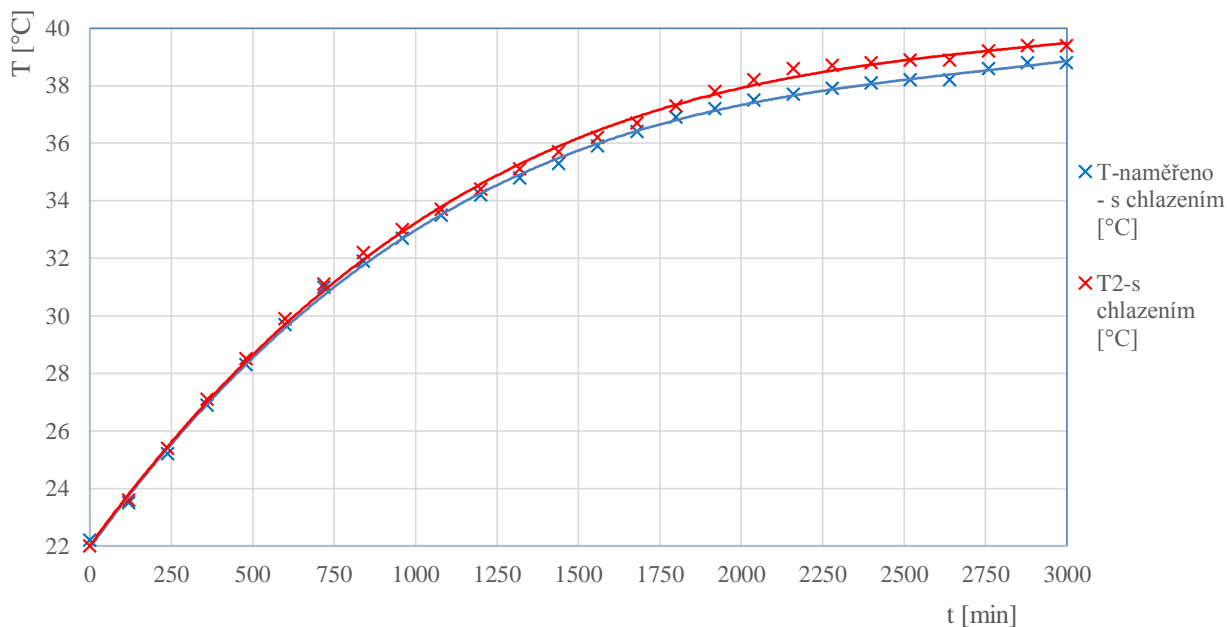
Obrázek 6-1 Laboratorní měření

6.1 Výsledky laboratorního měření s chlazením AS motoru

Měření s chlazením, neboli také jako měření s usměrněným směrem vzduchu rozvířeným díky ventilátoru. U tohoto měření nedochází logicky k tak prudkému oteplení kostry a tím i celkovému ohřevu stroje. Podle teoretického předpokladu má vliv usměrnění vzduchu, díky krytu ventilátoru, jež směřuje ventilátorem rozproušený vzduch na kostru, na ochlazení až o několik desítek stupňů celsia. Laboratorní měření probíhalo 50 minut a hodnoty byly odečítány z obou čidel po dvou minutách.

Počáteční hodnota naměřená na povrchu kostry asynchronního motoru byla $T_1=22,2^{\circ}\text{C}$ a $T_2=22^{\circ}\text{C}$. Teplota s časem, rostla podle předpokladů logaritmicky. Z grafu lze vyčíst, že růst teploty na kostře motoru bylo ze začátku větší než ke konci měření, kdy se teplota začala kolem čtyřicáté minuty ustalovat. Konečně naměřené hodnoty teploty na čidlech se pohybovaly zhruba kolem teplot $T_1=38,8^{\circ}\text{C}$ a $T_2=39,4^{\circ}\text{C}$. Slovo „zhruba“ je zde použito z toho důvodu, neboť hodnoty na čidlech termometru velmi kolísaly.

*Měření ASM s usměrněným chlazením
Grafická závislost teploty na čase $T=f(t)$*

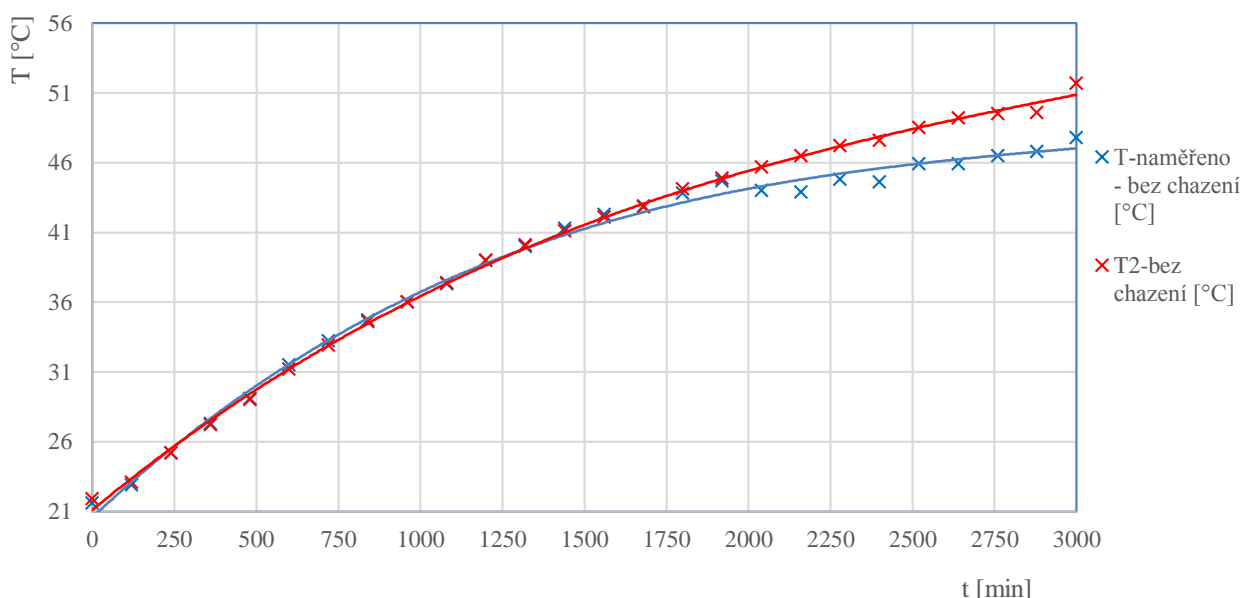


Obrázek 6-2 Charakteristika závislosti teploty kostry ASM na čase s usměrněným chlazením

6.2 Výsledky laboratorního měření bez chlazení AS motoru

Měření bez chlazení spočívá v tom, že je z motoru odejmut kryt ventilátoru. Díky tomu není chladivo (\Rightarrow vzduch) usměrněno na potřebná místa k ochlazení celého motoru. Vzduch v tomto okamžiku proudí do stran mimo motor. To způsobí velký teplotní růst, který v případě delší doby trvání může zapříčinit nevratné škody motoru. Měření opět probíhalo po dobu 50 minut a hodnoty byly také odečítány po dvou minutách.

*Měření ASM bez usměrnění chlazení
Grafické závislost teploty na čase $T=f(t)$*



Obrázek 6-3 Charakteristika závislosti teploty kostry ASM na čase bez chlazení

Počáteční teplota před měřením byla zaznamenána na čidle $T1=21,6^{\circ}\text{C}$ a $T2=21,9^{\circ}\text{C}$. Na charakteristice lze pozorovat velký teplotní nárůst a teplotní rozdíl mezi počáteční hodnotou až dvacet stupňů Celsia. Teplota čidel na konci laboratorního měření se pohybovala na čidle prvním $T1=47,8^{\circ}\text{C}$ a na druhém $T2=51,7^{\circ}\text{C}$. Tento tepelný nárůst způsobuje právě neodváděné teplo vytvořené při chodu stroje. Ve vnitřní části motoru, tak lze očekávat teploty větší o cca $20\text{-}30^{\circ}\text{C}$.

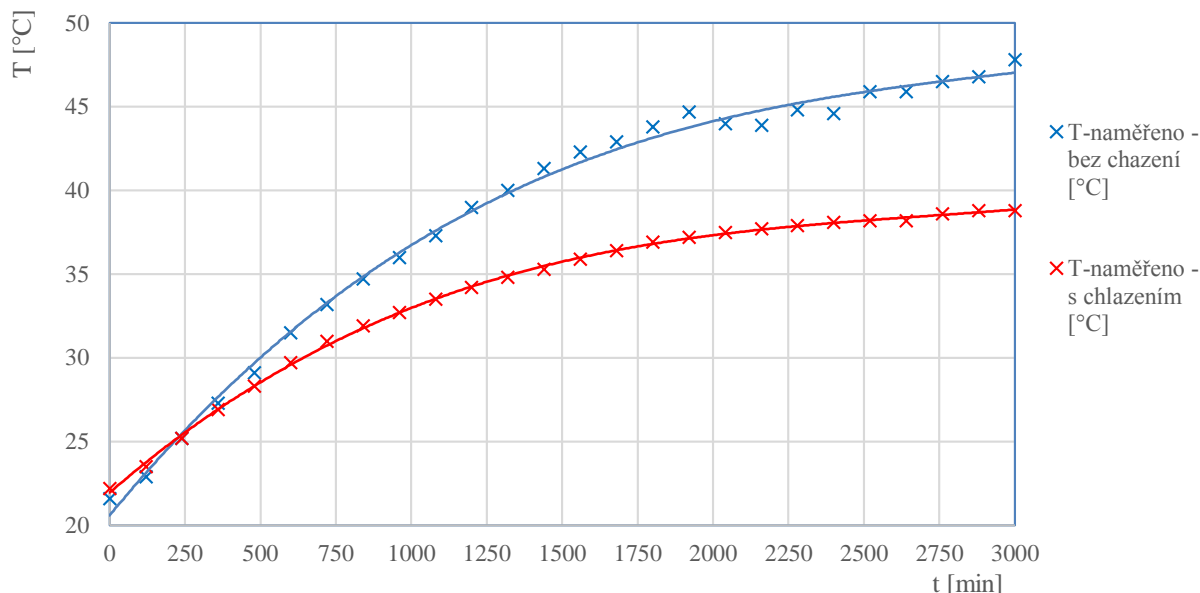
6.3 Porovnání a vyhodnocení naměřených hodnot

Na hodnotách obou měření si lze povšimnout drobných odchylek mezi jednotlivými čidly. Tyto odchylky mohou být zapříčiněny tím, že čidla byla připevněna na kostru asynchronního motoru pomocí speciální pásky, která má sice lepší přilnavost u vyšších tepelných hodnot, avšak i přes tyto vlastnosti nelze dosáhnout stejných hodnot těsnění pásky. Další z příčin by mohlo být nerovnoměrné zahřívání motoru.

V grafech na obrázcích 6-4.1 a 6-4.2 jsou vidět jasné rozdíly strmosti růstu teploty při měření s chlazením a měřením bez chlazení. Do desáté minuty měření se teploty cca shodují. O dalším vývoji toto tvrdit nelze. Je možné všimnout si jasněho vlivu chlazení, kde teplota díky usměrněnému chlazení, které je směřováno na kostru, roste s menší intenzitou a na menší konečnou hodnotu. Naměřené hodnoty teplot při měření s chlazením se rychleji začali ustalovat a rozdíl činil na prvním čidle $T1=9^{\circ}\text{C}$ a na druhém čidle $T2=12,3^{\circ}\text{C}$.

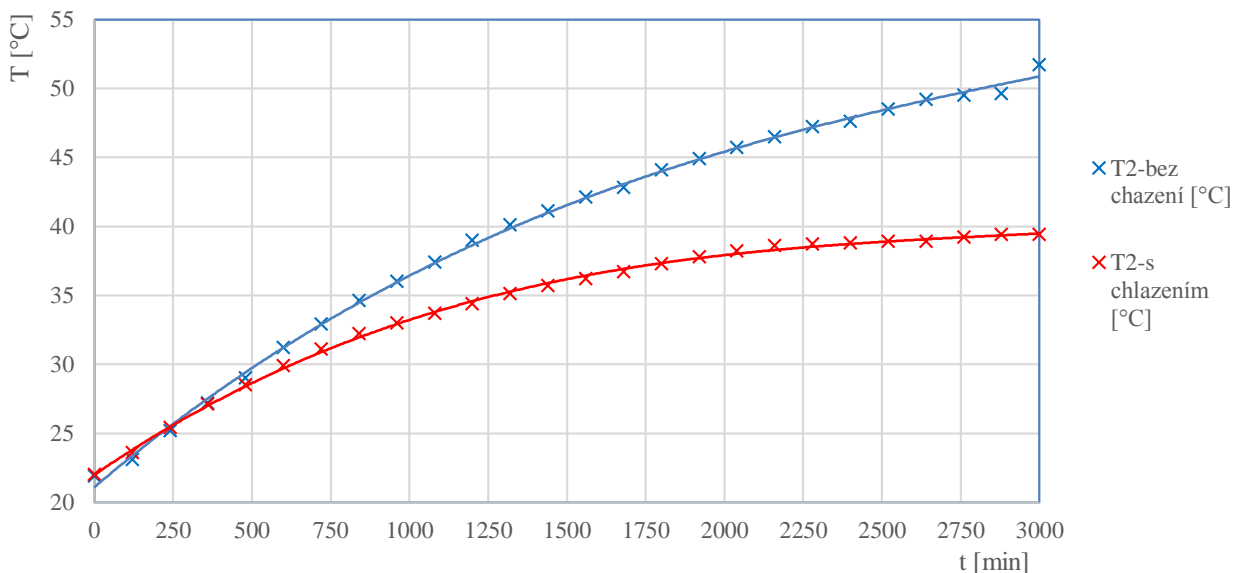
Teplotní rozdíl mezi jednotlivými čidly ($\Delta T=3,3^{\circ}\text{C}$) ukazuje právě výše zmiňovaný problém s odchylkami jednotlivých čidel. Čidla byla při obou měřeních na stejných místech, proto lze spíše než rozdílné teploty motoru na jednotlivých místech kostry předpokládat netěsnost pásky. I přes problémy s páskou pro upevnění čidel byly ovšem teoretické předpoklady, pro velké teplotní rozdíly mezi měřeními dokázány.

Porovnání naměřených hodnot teplotním čidlem T1 - bez chlazení T1-1 a s chlazením T1-2
 Grafická závislost teploty na čase $T=f(t)$



Obrázek 6-4.1 Grafické porovnání naměřených hodnot teplotního čidla T1 - bez chlazení T1-1, s chlazením T1-2

Porovnání naměřených hodnot teplotním čidlem T2 bez chlazení T2-1 s chlazením T2-2
 Grafická závislost teploty na čase $T=f(t)$



Obrázek 6-4.2 Grafické porovnání naměřených hodnot teplotního čidla T2 - bez chlazení T2-1, s chlazením T2-2

7 KONSTRUKCE A METODIKA VÝPOČTU

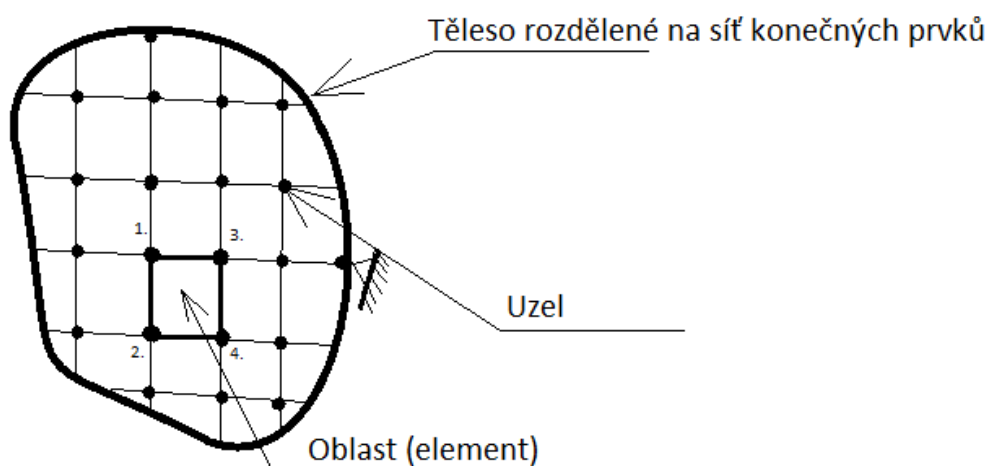
7.1 Metoda konečných prvků

Pro výpočet chlazení, ať už je to asynchronní motor nebo jakýkoliv jiný objekt se využívá metody konečných prvků. Tato metoda spočívá v rozdělení objektu pro výpočet na menší části (konečné prvky), které jsou spojeny jednotlivými uzly. Metoda konečných prvků využívá rozdělení na části u rovinných částí na troj úhlové, nebo čtyř úhlové. V prostoru jsou pak využity i prvky o šesti stěnách. Základním pravidlem je ovšem rozklad na co nejjednodušší geometrické prvky, které se nepřekrývají.

Výpočet popisuje soustavu rovnic, které se zakládají v případě chlazení na primárním fyzikálním zákoně a to je zákon zachování energie. Tento jev je založen na faktu, že energii jednotlivého bodu (uzlu) lze popsat součtem vnitřní energie konkrétního bodu se součtem energií bodů v okolí [11].

Výpočet lze stručně rozdělit na tyto části [12]:

1. Rozdělení objektu na malé oblasti (konečné prvky) spojené uzly
2. Definice chování oblasti
3. Sestavení soustavy rovnic získané pomocí definic jednotlivých oblastí, které popisují chování celého počítaného objektu
4. Zavedení podmínek (okrajových nebo počátečních)
5. Získání hlavních neznámých pro výpočet
6. Odvození dalších potřebných výpočtů



Obrázek 7-1 Objekt rozdělený na síť konečných prvků [13]

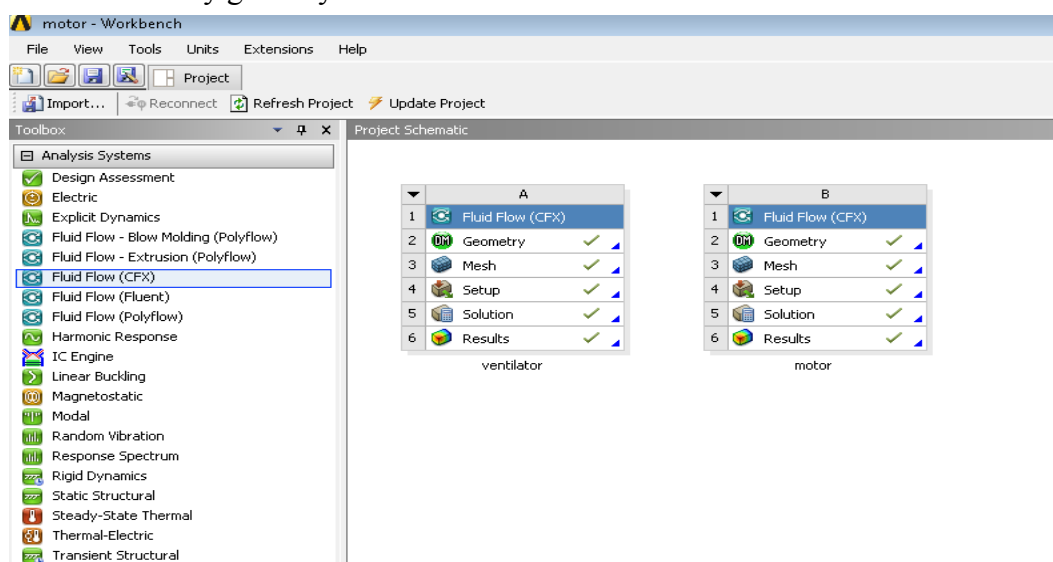
7.2 ANSYS

Výpočet chlazení pomocí metody konečných prvků je složitý, a také velmi zdoluhavý. Tento problém je ovšem vyřešen díky výpočetní technice. Jedním z počítačových programů, zabývajících se výpočtem problematiky tohoto typu, je program ANSYS. Tento program je specifický právě výpočtem přes metodu konečných prvků. Je schopný provádět výpočty a řešit problematiky v několika odvětvích fyziky. Počínaje statickými, přes dynamické a tepelné simulace. ANSYS je využíván firmami, které jej požívají k simulaci objektů pro přísné přezkoumání před uvedením na trh.

7.2.1 ANSYS Workbench 15

Program ANSYS lze dále dělit podle prostředí, které tento program nabízí. Patří sem rozhraní ANSYS Classic a ANSYS Workbench. Tato prostředí prošla již několika inovacemi. Pro výpočet v této práci bylo využito prostředí ANSYS Workbench 15 (14.5). Toto grafické prostředí dále nabízí spoustu možností pro výběr simulací. Pro práci bylo zvoleno rozhraní CFX. Toto prostředí se zaměřuje na výpočet proudění daného objektu a počítá je pomocí rozložení sítě na konečný počet prvků. Na *obrázku 7-2* lze vidět prostředí rozhraní Workbench 15 a zobrazení jednotlivých kroků simulace CFX.

- **Geometry** - V této části lze v programu vytvářet nebo importovat objekty, které jsou připraveny k výpočtu. Import lze provádět z programů SolidWorks, AutoCAD, Inventor. Kolem objektu se následně vytvoří objemová oblast, která slouží k výpočtu.
- **Mesh** - Zde se daná objemová oblast kolem tělesa vytvořená *Geometry* rozdělí na síť konečných prvků funkcí MESH.
- **Setup** - Slouží pro zadávání okrajových podmínek a definic pro výpočet oblasti.
- **Solution** - Jedná se pouze o výpočetní část, která se váže na nastavené podmínky v části *Setup*.
- **Results** - Konečná část projektu. Zde jsou zobrazovány vypočtené hodnoty, číselně, tak i simulovány graficky.



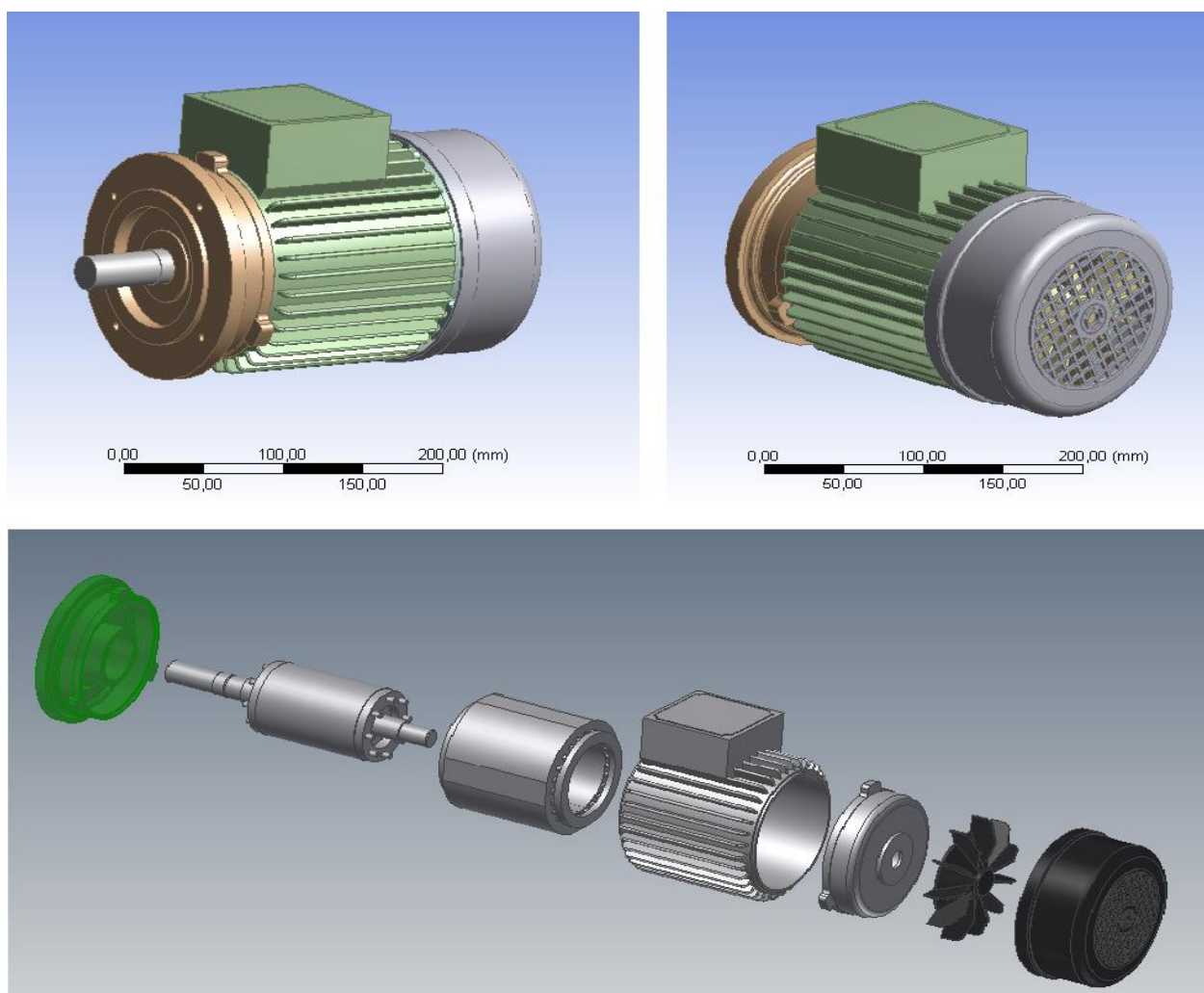
Obrázek 7-2 Prostředí ANSYS Workbench 15 a CFX rozložení

7.3 Vytvoření modelu AS motoru a ventilátoru

Pro vytvoření výpočetní analýzy je zapotřebí zkonstruovat samotný prvkem. Jak již bylo zmíněno samotný program ANSYS nabízí i prvky jak pro 2D, tak i pro 3D modelaci. Tento způsob je ovšem již pro dnešní dobu a zvláště pro osoby, které nemají zkušenosti v tomto programu složitější. Ke kompenzaci tohoto problému slouží import objektů vymodelovaných v jiných programech.

Pro modelování motoru ve 3D bylo v této práci využito programu Autodesk Inventor Professional 2012. Tento program je pro změnu všestranným programem v oblasti konstruování jak pro 2D, tak pro 3D modelace, pro které má primární využití. Byla zde vytvořena kompletní sestava motoru včetně ventilátoru.

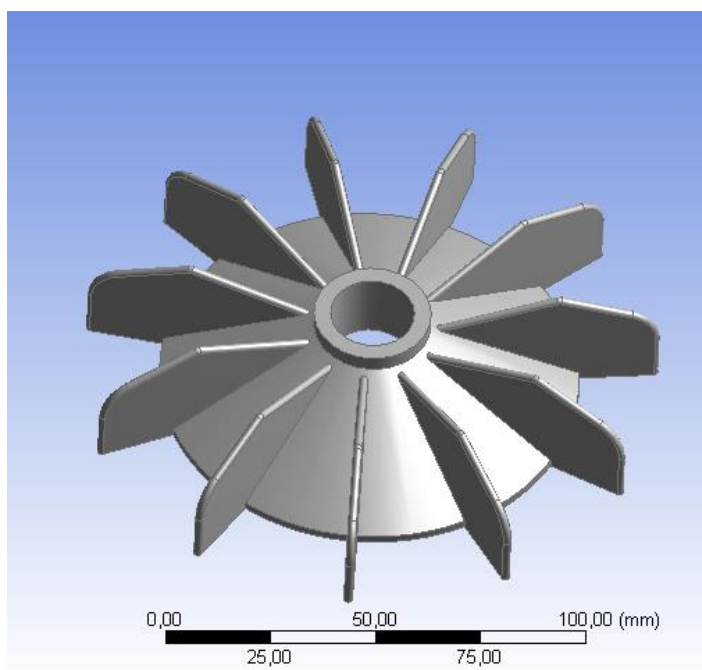
Všechny prvky motoru včetně ventilátoru jsou modelovány v měřítku 1:1 k modelu, na němž bylo provedeno měření v laboratoři. Proto celému modelování předcházelo naměření jednotlivých komponentů posuvným měřítkem. Jelikož je výpočet chlazení velmi složitý proces, bylo nutné z časových důvodů tento výpočet omezit a zjednodušit. Toto zjednodušení se dotklo i samotného modelu asynchronního motoru.



Obrázek 7-3 Model asynchronního motoru vymodelovaný v programu Autodesk Inventor 2012

Zjednodušení motoru se týkalo hlavně uspání různých otvorů, které by mohly ovlivnit výsledky. Dále pak zjednodušení zahrnuje odstranění šroubů a částí spojujících jednotlivé části motoru dohromady.

Součástí celého výpočtu byl také výpočet radiálního ventilátoru. Zde bylo nutné při samostatném výpočtu ventilátoru, vyplnit jeho střed na místo, kam patří zasunout hřídel, neboť při simulaci otáček by vznikly vířivé proudy vzduchu, které se v těchto místech nevyskytují, a tím by došlo ke zkreslení výpočtu. Na *obrázku 7-4* je zobrazený ventilátor v měřítku bez uzavřené středového kruhu.



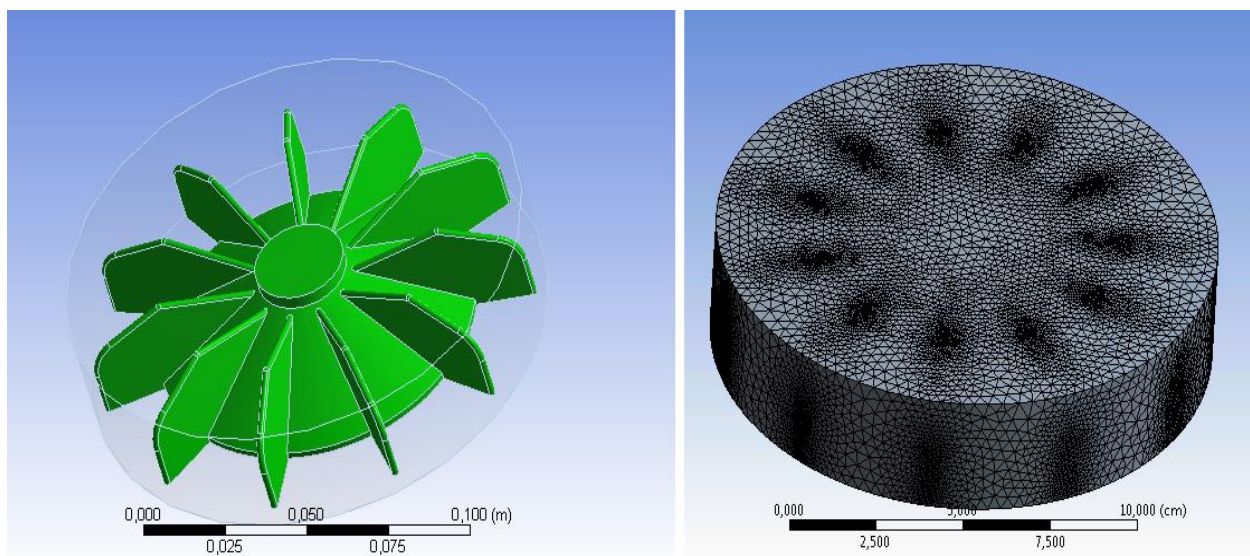
Obrázek 7-4 Radiální ventilátor měřeného modelu

8 VÝPOČET PROUDĚNÍ VENTILÁTORU

Výpočet chlazení motoru lze provádět několika způsoby. V této práci bylo koncipováno řešení výpočtu tak, že v první části je nutné vypočítat hodnoty proudění kolem samotného ventilátoru. Tyto výsledky pak následně importovat do koncového modelu motoru.

Vytvořený model radiálního ventilátoru v programu Autodesk Inventor 2012, bylo nutné nahradit pro lepší komunikaci s programem ANSYS místo obvyklé přípony „.ipt“ příponou „.sat“. V programu ANSYS byl zvolen pro výpočet bloku CFX, pro simulaci proudění. Složky, jež se v tomto bloku nacházejí, jsou vypsány v *podkapitole 7.2.1* a na *obrázku 7-2*.

Do složky *Geometry* je naimportován vytvořený ventilátor. Pro získání dat z měření, byl kolem ventilátoru vytvořen válcový objem, opisující jeho tvar pomocí funkce *Enclosure*. Čím menší je nastavená vzdálenost mezi stěnou válce a ventilátorem, tím přesnější budou vypočtená data. Pro tento výpočet byla zvolena vzdálenost 2mm. Dalším krokem bylo vytvoření ve složce *Mesh* síť konečných prvků celé oblasti objemu kolem ventilátoru, jak je také vidět na *obrázku 7-5*. V jeho levé části je zobrazený ventilátor uzavřený do válcové objemové části, který určuje oblast daného výpočtu. V pravé části pak vytvořená síť konečných prvků objemu pro výpočet. Je potřeba také zakázat pro výpočet těleso, neboť pro výpočet je podstatná část vzduchu. Funkcí *Generate mash* lze vytvořit síť konečných prvků v požadované oblasti. Složka *Setup* slouží pro nadefinování podmínek, pro počítanou oblast a ventilátor. Díky možnostem, které program ANSYS nabízí, je možné nadefinovat otáčky tělesu, které je označeno, jako rotační. V tomto případě ventilátor. Pro objem kolem ventilátoru byla nadefinována okrajová podmínka „*Opening*“, která určuje objemu prodyšnou vlastnost a objem se tím pádem chová, jako vzduch. Vnitřní tlak byl v podmínce definován 1atm, čímž jsou stanoveny stejné podmínky pro výpočet, jaké byly při laboratorním měření.



Obrázek 8-1 Radiální ventilátor uzavřený do objemu pro vypočtení hodnot proudění (vlevo); Vytvoření sítě konečných prvků (vpravo)

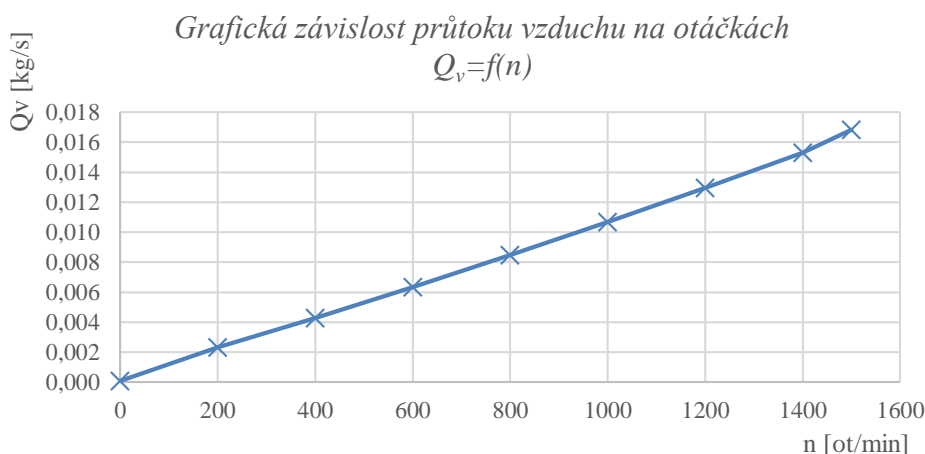
Pomocí složky *Solution* je spuštěn výpočet analýzy a posledním krokem *Results* jsou následně zobrazeny výsledky analýzy výpočtu.

Měření samotného ventilátoru, bylo měření a porovnávání velikosti rychlosti proudění vzduchu a hmotnostního průtoku vzduchu na otáčkách s maximální hodnotou, což byly hodnoty při otáčkách 1498 ot.min^{-1} . Měření probíhalo po kroku 200 ot.m^{-1} . Jak je vidět z *tabulky 2*, čím byly otáčky vyšší, tím se zvyšovala jak hodnota rychlosti, tak hodnota hmotnostního průtoku. V tabulce jsou zobrazeny rychlosti průměrné a rychlosti maximální. Ani u jedné z hodnot nepřesáhly hodnoty vyšší než 20 m.s^{-1} což splňuje podmínky pro návrh systému ventilací. Maximální hodnota rychlosti proudění, která je logicky nejvyšší při nejvyšších otáčkách, dosahuje rychlosti $v_{\max}=14,0052 \text{ m.s}^{-1}$. Této rychlosti je ovšem dosahováno pouze v těsné blízkosti ventilátoru. V dalším průběhu, je pak rozptylována díky nárazům na stěnu krytu ventilátoru, ale také vzduchem okolním, takže tato rychlost je velmi brzy utlumena.

Radiální ventilátor ASM			
n	V _{ave}	V _{max}	Q _v
[ot.min ⁻¹]	[m.s ⁻¹]	[m.s ⁻¹]	[kg.s ⁻¹]
1498	9,7810	14,0052	0,0168
1400	9,0955	12,9261	0,0153
1200	7,7925	11,1377	0,0130
1000	6,4781	9,3115	0,0107
800	5,1640	7,4620	0,0085
600	3,8470	5,6213	0,0063
400	2,5214	3,7730	0,0043
200	1,2028	1,1850	0,0023
0	0,0381	0,1697	0,0001

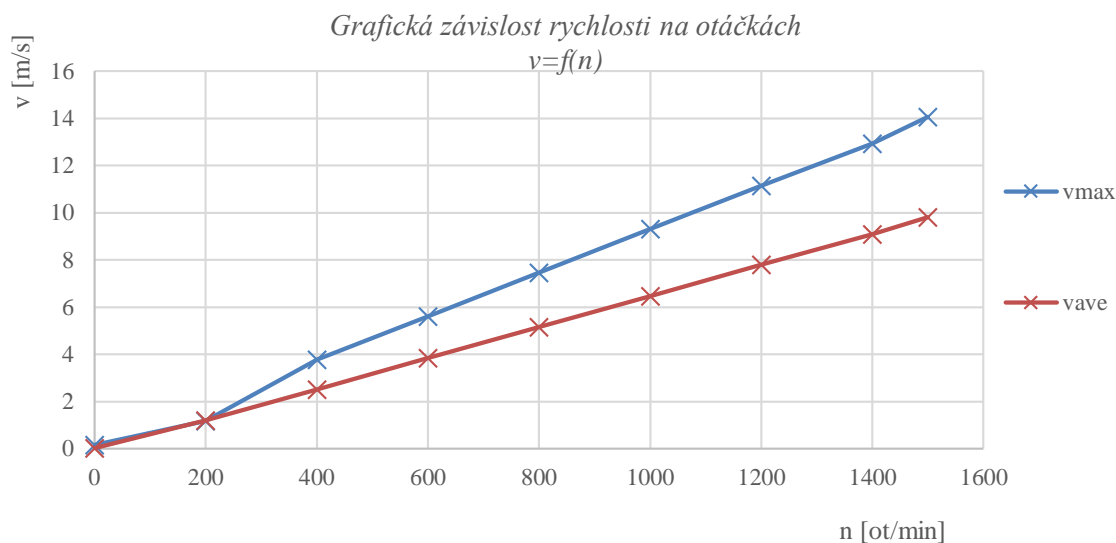
Tabulka 2 Hodnoty získané pomocí simulace v programu ANSYS CFX

Výsledky výpočtu jsou zobrazeny na *obrázku 7-6* a *obrázku 7-7*. *Obrázek 7-6* udává závislost velikosti hmotnostního průtoku vzduchu na otáčkách. Tento objem vzduchu roste s přibývajícím otáčkami. S velikostí otáček roste také vzniklé teplo uvnitř stroje, které je potřeba odvádět, a proto nárůst objemu chladicího vzduchu je na shodě.



Obrázek 8-2 Grafická závislost hmotnostního průtoku vzduchu na otáčkách ventilátoru

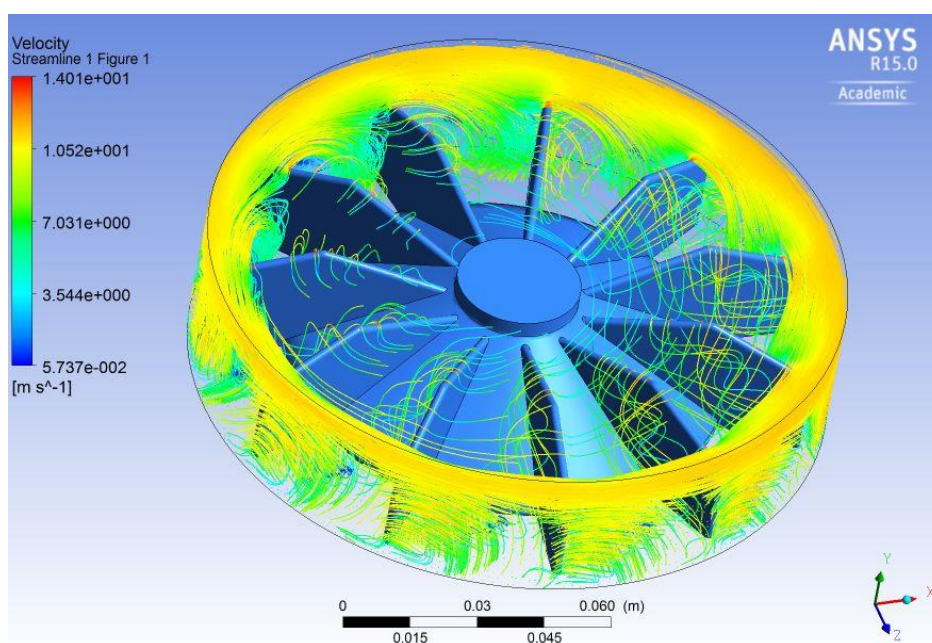
Výsledek hodnot promítnutých do grafu na *obrázku 7-7* se dal předpokládat stejně, jako výsledek velikosti hmotnostního průtoku, již před měřením. Rychlost proudění je větší, čím vyšší jsou otáčky ventilátoru.



Obrázek 8-3 Grafická závislost rychlosti proudění na otáčkách motoru (ventilátoru)

Lze si také všimnout lineárního růstu grafického zobrazení, které potvrzuje teoretické předpoklady. Tento lineární nárůst je deformován u křivky s maximální hodnotou rychlosti, neboť od 0 do 400 ot.min⁻¹ se hodnoty maximální od průměrných liší jen velmi málo. Naopak čím jsou otáčky vyšší, rozdíl mezi průměrnou a maximální rychlostí bude narůstat.

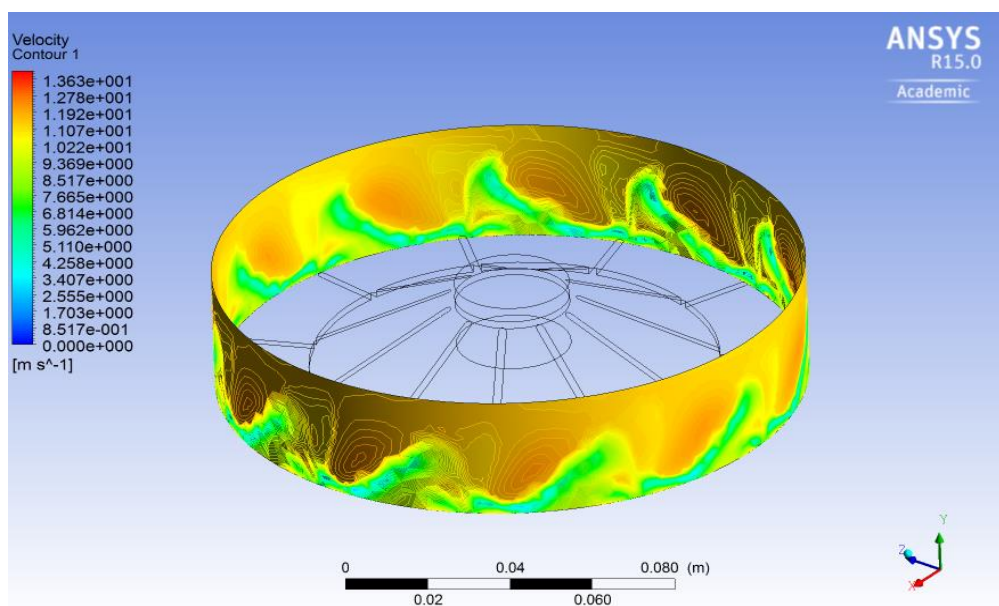
Jak již bylo zmíněno na začátku v *kapitole 4*, pro proudění je charakteristický jeho typ. U ventilátoru vzhledem k jeho konstrukci lze předpokládat typ proudění turbulentní.



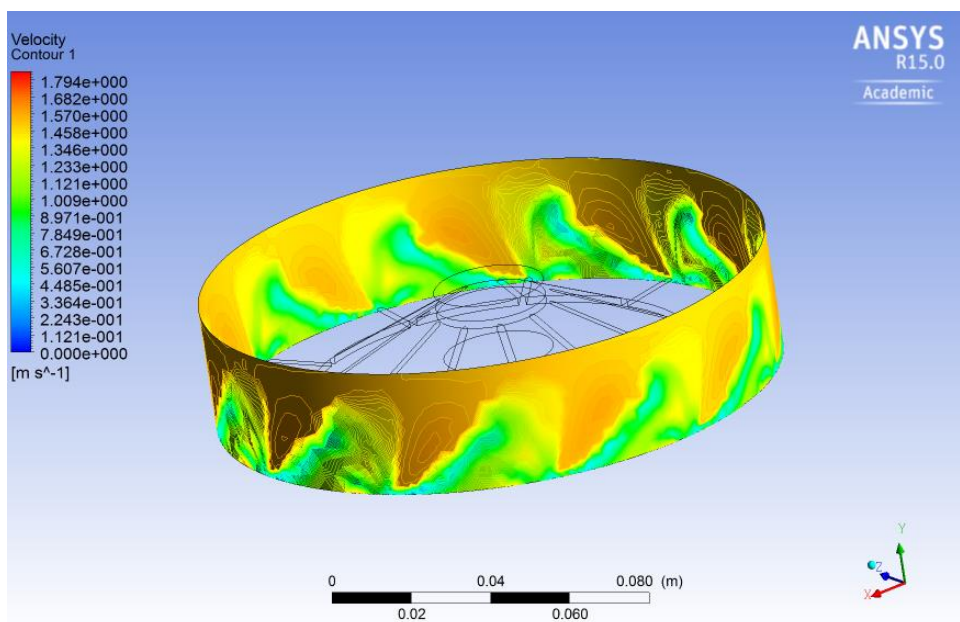
Obrázek 8-4 Turbulentní proudnice vzduchu při otáčkách 1498 ot.min⁻¹

Díky lopatkám, které před sebou vzduch tlačí a naopak za sebou zanechávají vzduchové vaky, toto turbulentní proudění vytváří. Tak, jak je tomu na *obrázku 7-8*. Typ proudění udává také tvar lopatky.

Porovnáním výsledku měření nejvyšší a nejnižší rychlosti na obrázcích 7-9 a 7-10 je jasné vidět energie proudění vzduchu a velikost rychlosti proudění. Při otáčkách $1498 \text{ ot. min}^{-1}$ je zřejmá větší energie ventilátoru a tím pádem i vyšší rychlosti proudění. Za lopatkami ventilátoru lze vidět turbulentní proudy vzduchu, které v těchto místech dosahují nejnižších rychlostí. Je to oblast, kde se tvoří vzduchové vaky, které jsou příhodné právě pro tvorbu turbulentních proudů. Nejvyšší rychlost je naopak za těmito vzduchovými vaky, kde je vzduch tlačěn lopatkou, která je za ním.



Obrázek 8-6 Zobrazení rychlosti proudění radiálního ventilátoru při otáčkách $1498 \text{ ot. min}^{-1}$



Obrázek 8-5 Zobrazení rychlosti proudění při otáčkách 200 ot. min^{-1}

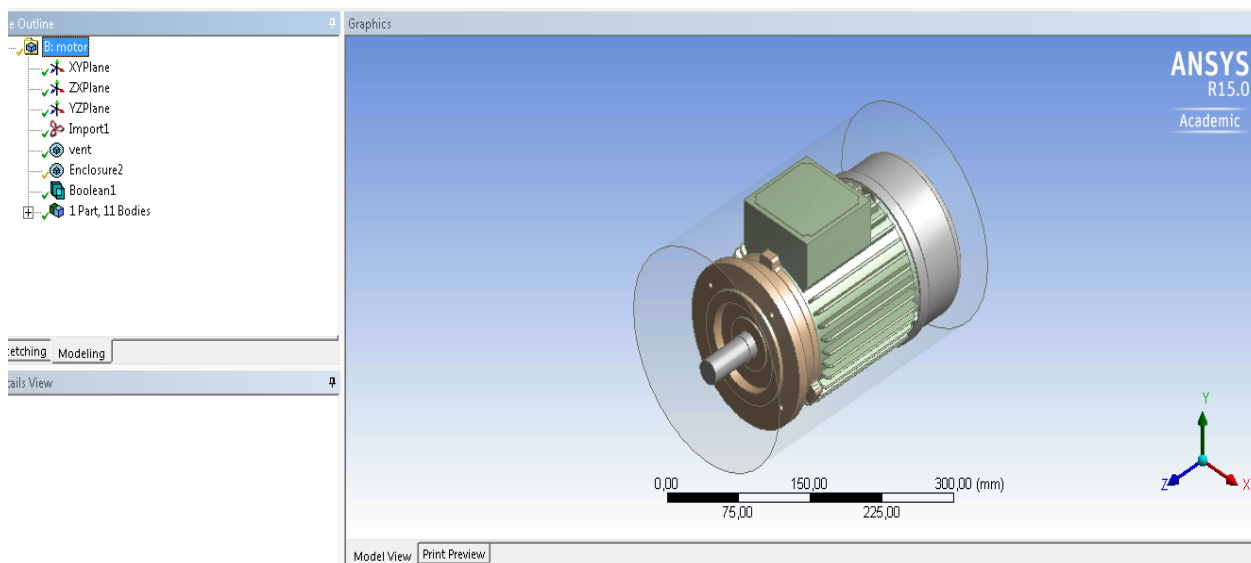
9 SIMULACE PROUDĚNÍ A VÝPOČET TEPLOTNÍ ANALÝZY ASYNCHRONNÍHO MOTORU

V této části, práce přechází do konečné části a to výpočtu jednotlivých analýz na motoru. Analýza pro proudění, a také teplotní, kde bude simulováno oteplení naměřené při laboratorním měření. U těchto výpočtů, jak již bylo zmíněno, bylo zanedbáno několik konstrukčních prvků ovlivňujících výpočet. Dalším z prvků, který je nutno zanedbat, je drsnost povrchu. Problematika tohoto typu je příliš rozsáhlá, než aby se jí mohla věnovat tato práce, proto bude uvažována na všech částech motoru stejná drsnost povrchu.

9.1 Výpočet chlazení motoru

Výpočet chlazení motoru je závislý na výpočtu ventilátoru, který byl popsán v kapitole 8. Závislý v tom smyslu, že hodnoty výpočtu ventilátoru simulovaného při otáčkách $1498 \text{ ot. min}^{-1}$, jsou exportovány do složky v počítači a následně importovány do sestavy motoru. Postup nastavení výpočtu motoru je také podobný, jako tomu bylo při výpočtu ventilátoru.

Zde se opět vychází v programu ANSYS Workbench 15 z bloku CFX pro proudění. Do složky *Geometry* je naimportována sestava asynchronního motoru, jež byla zkomponována v programu Autodesk Inventor. Nyní je opět nutné uzavřít komponenty do objemů, v kterých budou prováděny výpočty. Jelikož se vychází z hodnot vypočtené v první fázi pouze na ventilátoru, je nutné uzavřít do objemové části nejprve ventilátor a následně celý motor. Nastavená vzdálenost objemového válce, jak od ventilátoru, tak od motoru 2mm. I přes udělení vazeb jednotlivým částem motoru v programu Inventor, program ANSYS zobrazuje tyto části jako samostatná tělesa. Pro vyhnutí se chybám při vyvážení sítě konečných prvků je nutné tyto jednotlivé součásti spojit do jednoho tělesa.



Obrázek 9-1 Vytvoření objemu kolem motoru potřebný pro výpočet (prostředí ANSYS Workbench 15 – CFX)

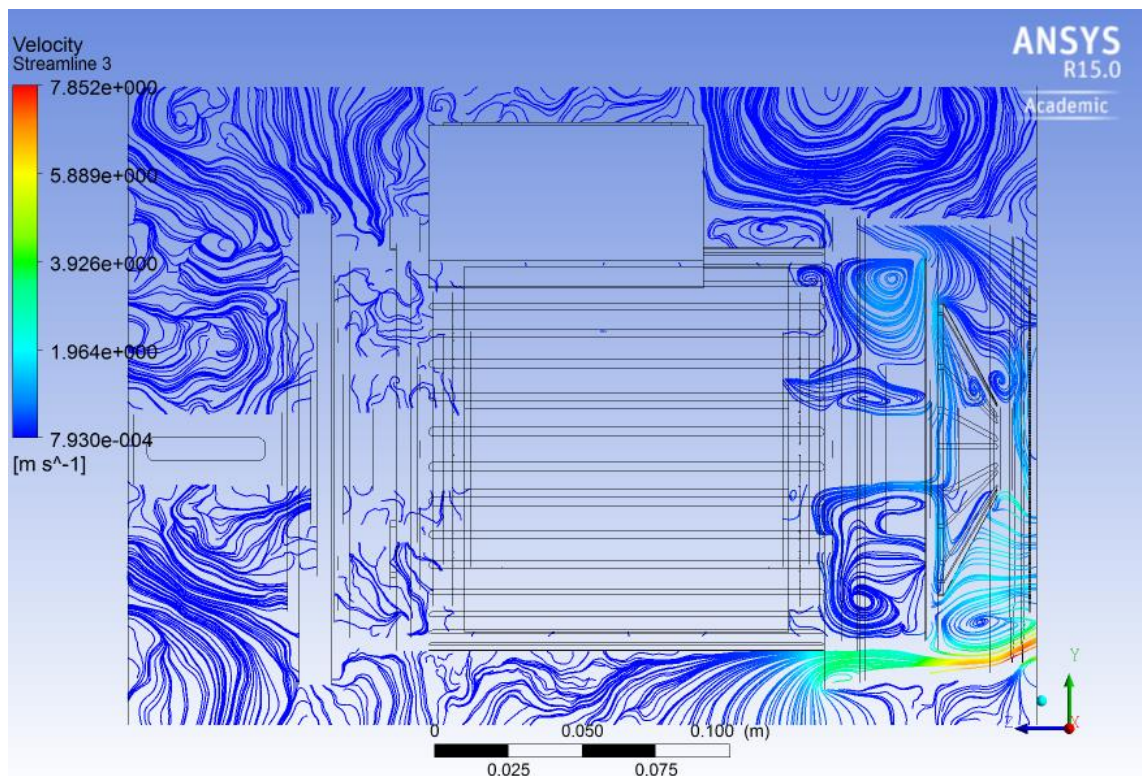
V následujícím kroku ve složce *Mesh*, je tato síť vygenerována a je připravena k určení okrajových podmínek pro danou analýzu. Ve složce *Setup* přichází právě zmiňované importování vypočtených hodnot objemu ventilátoru, které byly při výpočtu ventilátoru vybrány a exportovány do složky v počítači.

Tato vzduchová oblast, která byla naimportována, má již zadané okrajové podmínky, proto stačí označit oblast kolem zatím neurčeného nového ventilátoru a nadefinovat mu totožné s odkliknutím nabízené položky „použití importovaných hodnot“. Okrajová podmínka pro objem kolem motoru bude určena opět jako „*Opening*“, jelikož je potřeba, aby v okolí motoru byly stejné podmínky, jako při měření. Tlak uvnitř bude odpovídat opět 1 atm.

9.1.1 Výsledek analýzy chlazení motoru

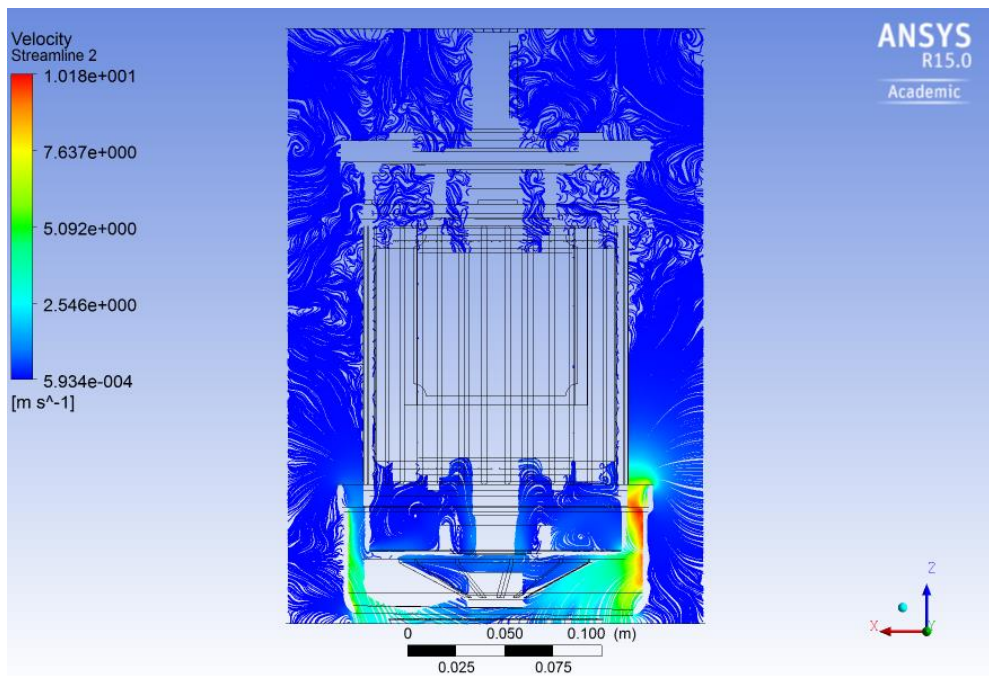
Díky analýze je vidět jasný pokles rychlosti proudění. Největší turbulence a proudění nastává u zdroje, což je v tomto případě ventilátor. Díky krytu ventilátoru, který kromě bezpečnostního prvku tvoří také prvek usměrňující proudnice vzduchu na místa potřebná k ochlazení, dochází ke snížení rychlosti proudění. Lze tedy předpokládat, že největší rychlost bude před nárazem proudnice do krytu ventilátoru. Z podkrytu ventilátoru je vzduch rozháněn mezi žebra, které slouží jako kanálky pro rozvod vzduchu po motoru a tím zaručuje jeho vhodné chlazení.

Na *obrázku 9-2* je zobrazen řez a na ploše řezu jsou zobrazeny proudnice jdoucí od zdroje (ventilátoru) a opisující obrys motoru. Už na první pohled je jasné, že rychlost vzhledem k nárazům pod krytem a tvorbou spousty vířivých proudů poklesla. I přes tento pokles je chlazení dostatečné a odpovídající reálným hodnotám.

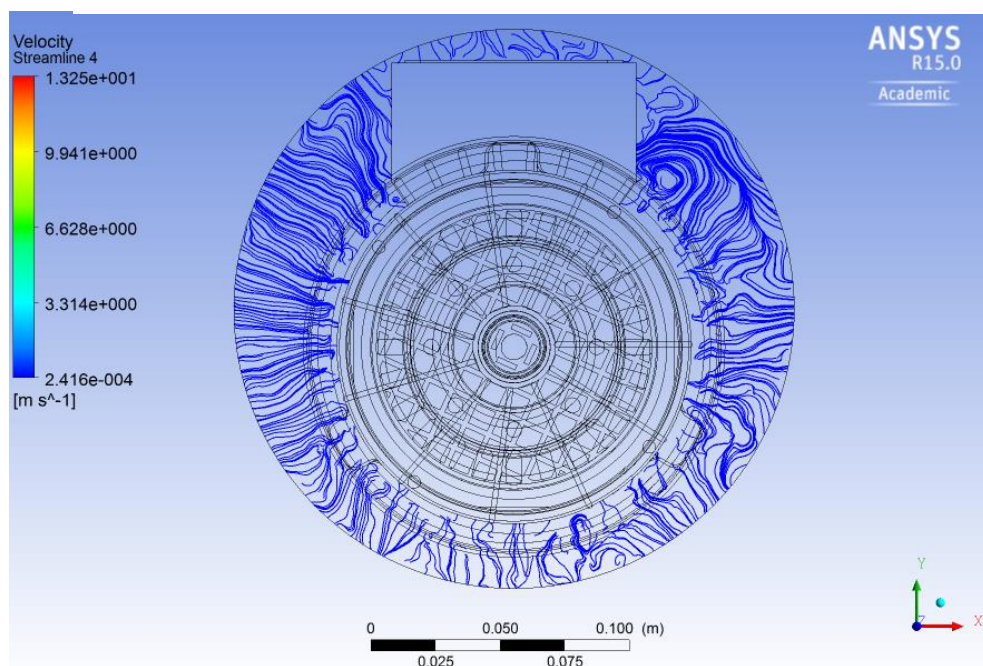


Obrázek 9-2 Proudnice vzduchu promítnuté na ploše řezu motoru

Dále pak na *Obrázku 9-3*, který zabírá vypočítanou část a na motoru z vrchní části je jasně vidět, že nejvyšší rychlost proudnic vzduchu, která je zobrazena červenou barvou, je v místech okraje lopatky a těsně za ní. Zaznamenaná nejvyšší hodnota rychlosti je $v=10,18 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Obecně v oblasti ventilátoru pod krytem, lze vidět vyšší hodnoty rychlosti, než jsou na výstupu, a také na kostře. Je to způsobené tím, co již bylo zmíněno. Tedy tím, že vzduch je brzděn nárazy a jeho rychlost následně klesá. Proto dosahuje na kostře malých, ale i tak efektivních hodnot pro chlazení. Na obrázku 9-5 jsou zobrazeny proudnice vzduchu procházející mezi žebry na kostře motoru.



Obrázek 9-3 Pohled na chování proudnic z vrchního pohledu na motor



Obrázek 9-4 Čelní pohled na motor zobrazující proudnice vzduchu procházející žebry kostry motoru

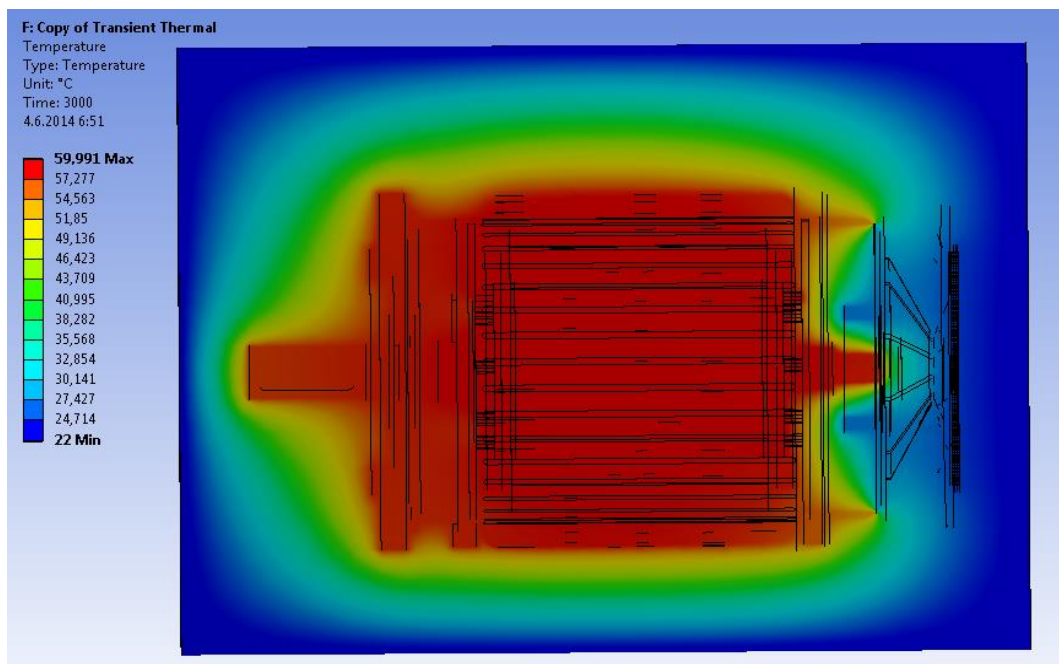
9.2 Výpočet tepelné analýzy motoru

Výpočtem proudění vzduchu bylo dosaženo výsledku, jakou velikost má rychlost proudění u zdroje (ventilátoru) a na povrchu kostry, kam je následně rozháněn. Tento výpočet je ovšem jen další nutný předvýpočet pro výpočet konečné tepelné analýzy, která má zjistit teplotu motoru při stavech s chlazením i bez chlazení.

Výpočet tepelné analýzy byl počítán v programu Ansys pomocí modulu Transient Thermal. Zde byly modelu motoru nadefinovány ztráty, které zapříčiňuje právě dané oteplení. Dále pak byl vytvořen vzduchový objem stejně jako v případě výpočtu chlazení, a tomuto vzduchovému objemu byla nadefinována teplota, která odpovídala teplotě při laboratorním měření $T=22^{\circ}\text{C}$. Důležitým prvkem, který hraje největší roli při výpočtu teploty, stroje a následně celého okolního vzduchu je koeficient odvodu tepla. Tento koeficient je zajištěn díky importu vypočtených dat, jež byly vypočteny v části výpočtu proudění vzduchu kolem motoru v modulu CFX. Doba měření byla nastavena na stejnou dobu jako při laboratorním měření $t=3000\text{s}$.

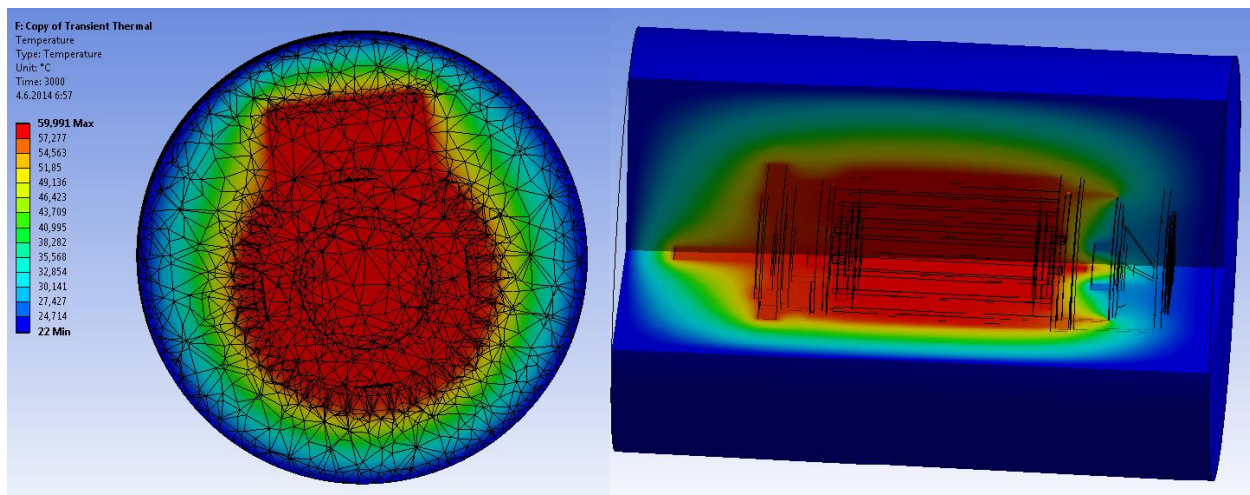
9.2.1 Výpočet tepelné analýzy motoru s chlazením

Při prvním výpočtu tepelné analýzy bylo bráno v potaz chlazení, které bylo vyprodukováno pomocí ventilátoru umístěnému na hřídeli stroje. Data, která byla vypočtena v modulu CFX sem byla naimportována. Výpočet probíhal tím způsobem, že program rozdělil vytvořený vzduchový objem kolem motoru na konečný počet prvků, jak je vidět na *obrázku 9-4* v levé části. Lze si povšimnout větší četnosti elementů v okrajových částech motoru, kde je výpočet komplikovanější kvůli povrchovým změnám. Následně pak porovnává tento objem stanovený na okolní teplotu $T=22^{\circ}\text{C}$ a motor, kterému jsou nadefinovány ztráty, s objemem kolem motoru, ve kterém bylo vypočteno proudění vzduchu. Tím pak dostává konečné hodnoty oteplení vzduchu, a také ochlazení motoru.



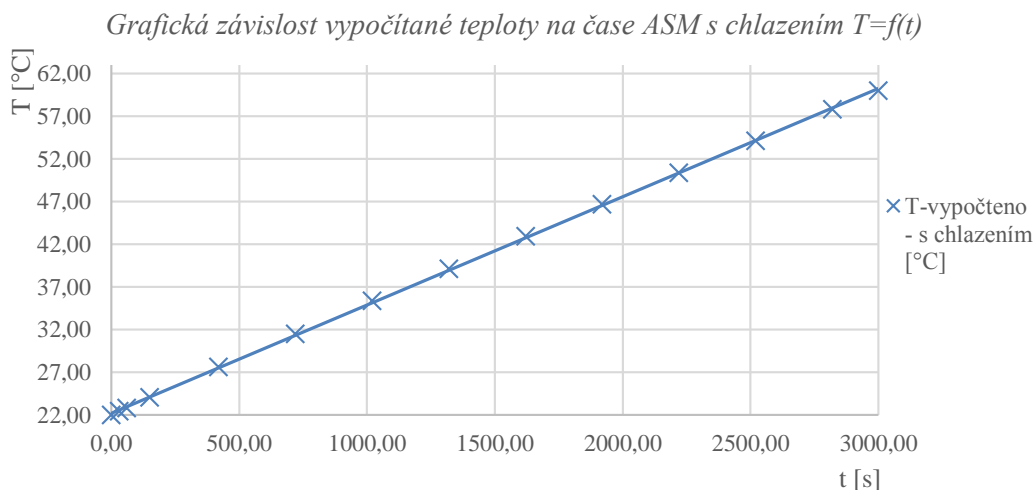
Obrázek 9-3 Výpočet teplotní analýzy s chlazením - Rozložení teploty v okolí a na povrchu asynchronního motoru v konečném stádiu výpočtu => $t=3000\text{s}$

Jako mezní vrstva mezi chladícím vzduchem a zahřátým motorem zde slouží kostra a štítý motoru. Na *obrázcích 9-3 a 9-4* lze vidět snímek z výsledku výpočtu tepelné analýzy, kde chlazení přispívá ke snížení teploty uvnitř stroje, které se díky ztrátám pohybuje kolem $T_{\max}=60^{\circ}\text{C}$. Lze si povšimnout, že na povrchu motoru převládá oranžová barva jasně znázorňující chladicí efekt vzduchu, který je poháněn kolem jeho povrchu. Díky neustále proudícímu vzduchu kolem kostry je snížena její teplota a tato teplota má zase vliv na teplotu uvnitř motoru. Toto chlazení je zapříčiněno „dobrým“ součinitelem přestupu tepla, díky kterému je snížena hodnota oteplení.



Obrázek 9-5 Výpočet teplotní analýzy s chlazením - Rozložení teploty v okolí a na povrchu stroje -čelní pohled (rozložení na MKP), řez motorem; $t=3000\text{s}$

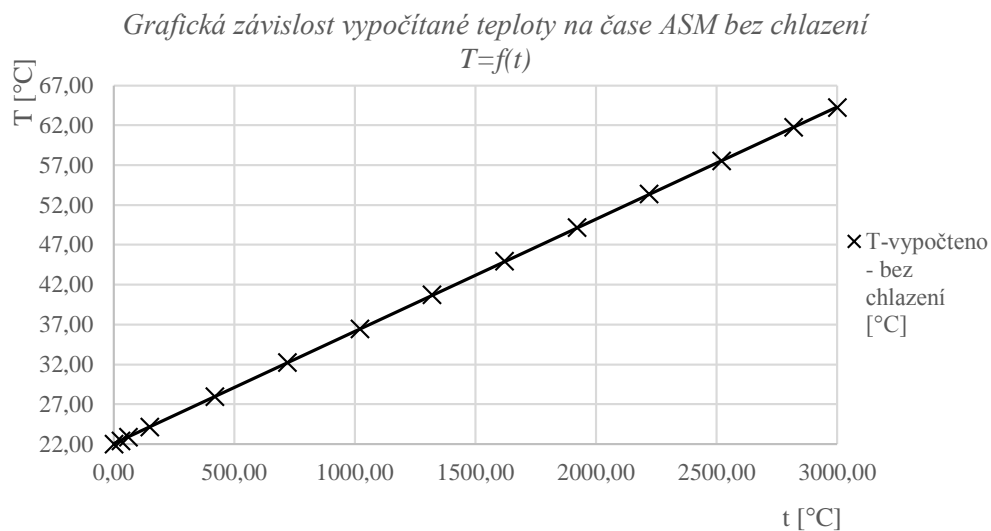
Na *obrázku 9-5* lze vidět lineární průběh, který je zobrazen z vypočtených hodnot přiložených v *příloze A*. Tento průběh jasně naznačuje jisté pochybnosti daného výpočtu, jelikož vypočtené hodnoty nezobrazují známku ustálení teploty, ale naopak stále rostou. Je to důsledek zjednodušení, které bylo z počátku uvažováno. Jde o zanedbání drsnosti povrchu materiálu, a také daných tepelných vlastností jednotlivých prvků motoru. Dalším důležitým prvkem, díky kterému je teplota tak vysoká je ten, že před výpočtem byl motor spojen do jednoho celku, aby došlo k potlačení možných chyb při výpočtu. To ovšem zapříčinilo tyto vysoké teploty.



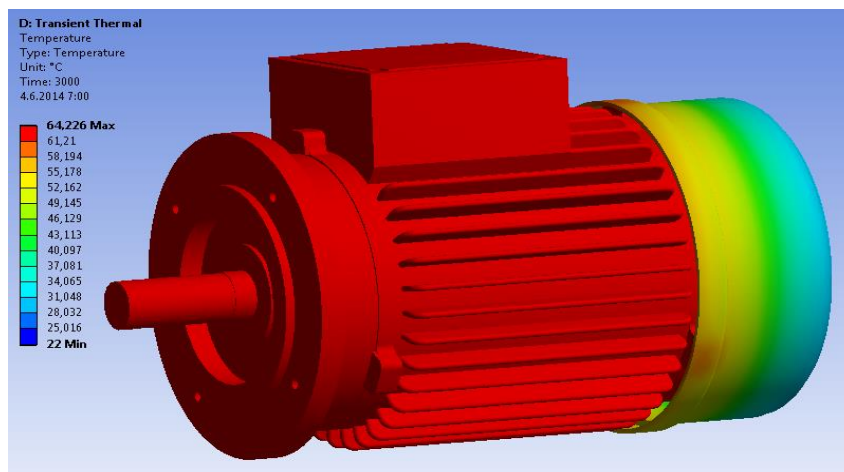
Obrázek 9-4 Grafická závislost vypočtených hodnot tepelné analýzy s chlazením ASM; $T=f(t)$

9.2.2 Výpočet tepelné analýzy motoru bez chlazení

U výpočtu tepelné analýzy pro případ, kdy motor není chlazen (proudnicе vzduchu z ventilátoru nejsou usměrněny na kostru motoru a směřují do okolí) probíhá výpočet stejným způsobem porovnáváním objemů. Zde je ovšem výpočet značně zjednodušen z toho důvodu, že zde nejsou rozháněny proudnicе ovlivňující chlazení motoru a ten je tak závislý jen na teplotě okolí. Nastává zde ovšem stejný problém, jako v případě s chlazením. Teplota je v tomto případě reálnější než v prvním případě s chlazením, ale stále nastává problém se zanedbáním a zjednodušením motoru. Na obrázku 9-6 je zcela patrné, že oteplení opět nedosahuje jistého ustálení hodnot a má stále potenciál lineárního růstu.

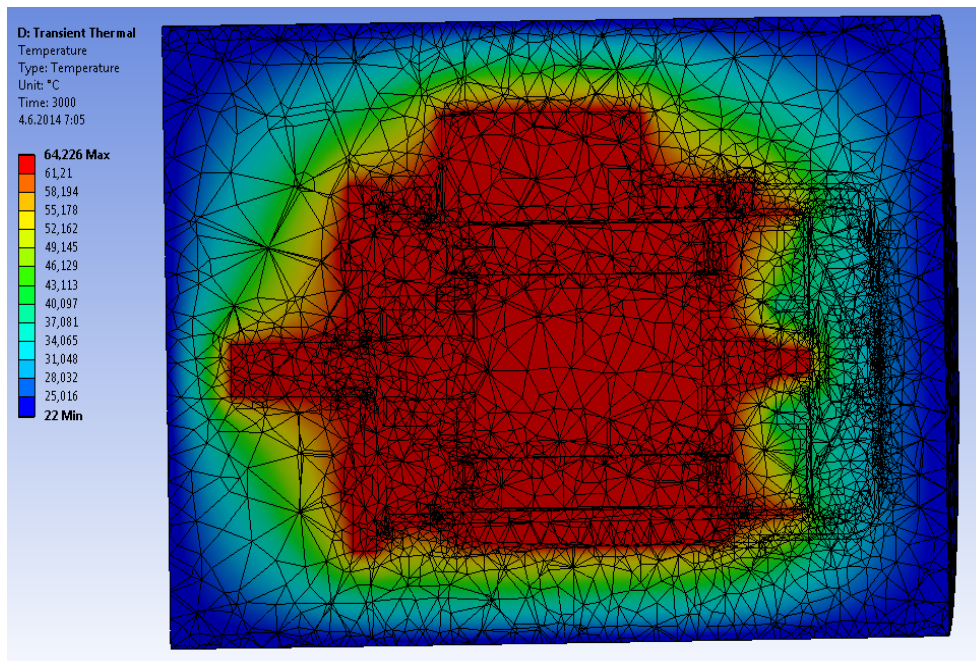


Obrázek 9-6 Grafická závislost vypočtených hodnot tepelné analýzy bez chlazení ASM; $T=f(t)$



Obrázek 9-7 Rozložení teploty v řezu počítaného objemu a uvnitř motoru v čase $t=3000s$

I přes tyto neshody, které vyvrací reálné výsledky lze potvrdit jeden teoretický předpoklad a to je ten, že motor, který je podroben chlazení dosahuje menších hodnot oteplení. Na *obrázcích 9-7 a 9-8* je vidět motor, na kterém si lze všimnout, že kostra není chlazena a okolní teplota vzduchu dosahuje minimálních změn. Až ve větší vzdálenosti je zaznamenán větší tepelný pokles. Maximální hodnota teploty zde dosahuje $T_{\max}=64,226^{\circ}\text{C}$. Vypočítané hodnoty jsou přiloženy v *příloze B*. Na obrázku 9-8 lze také vidět rozložení počítané oblasti na konečný počet prvků. Čím je část komplikovanější, tím hustší je rozložení na menší prvky.

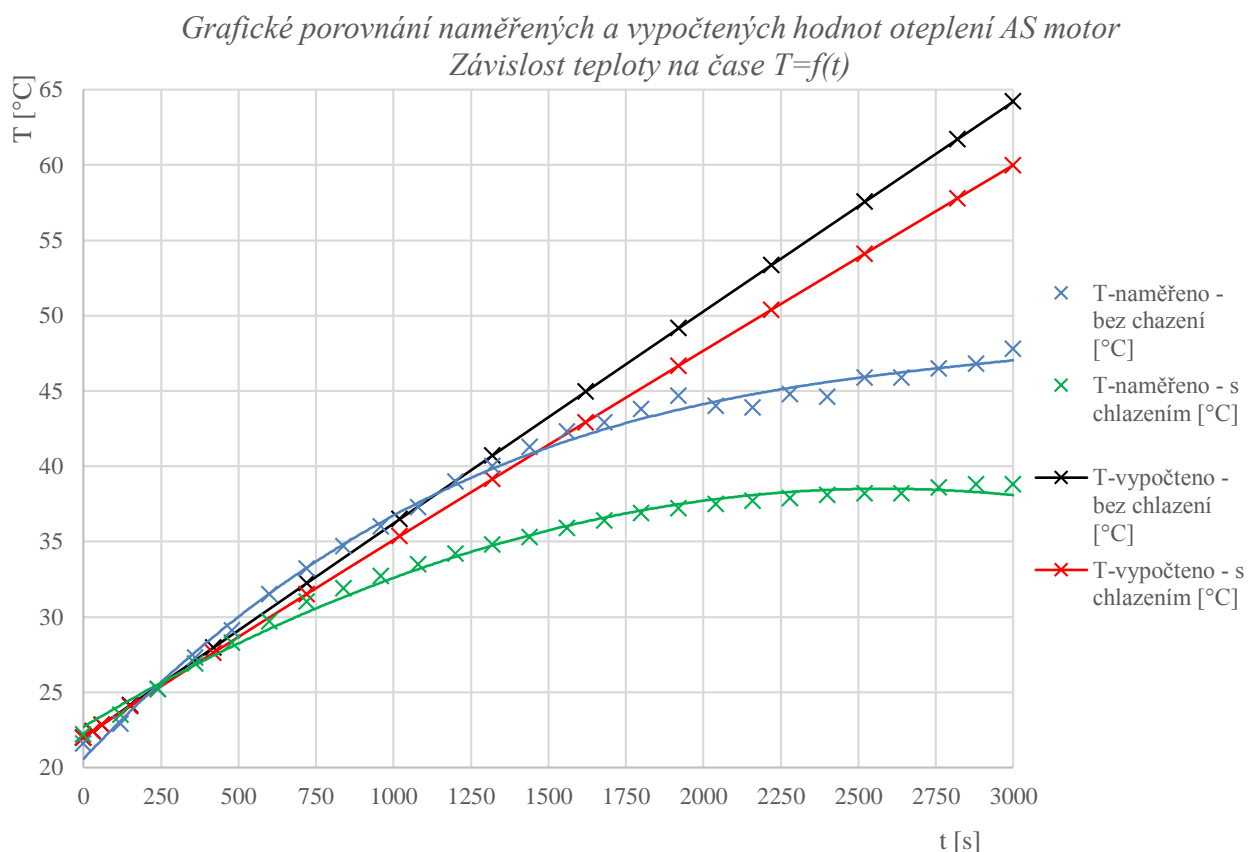


Obrázek 9-8 Rozložení teploty vřezu na AS motoru bez chlazení – rozložení na konečný počet prvků

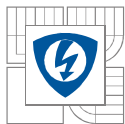
9.3 Porovnání naměřených a vypočtených hodnot tepelné analýzy

Již při prvním pohledu na naměřené a vypočtené hodnoty (viz *Příloha*) lze vidět velké odchylky, které nastaly. Těchto odchylek si lze také povšimnout na *obrázku 10-1*, kde jsou zobrazeny charakteristiky jak naměřených, tak vypočtených hodnot.

Z grafického zobrazení plyne, že jak při výpočtu, tak při měření s chlazením, bylo dosaženo menších tepelných hodnot. Jak již bylo zmíněno, teplota vypočtená dosahuje daleko vyšších hodnot, než jaká byla naměřena. Je to zapříčiněno právě daným zjednodušením, které je zmíněno již v předešlé kapitole 9.2.1 a 9.2.2 (zanedbání drsnosti povrchu, materiálu prvků, motor při výpočtu spojen jako jeden celek kvůli odstranění možné chyby při výpočtu atd.). Tyto vlastnosti ovlivňují chování teploty natolik, že výsledná odchylka bohužel dosahuje takovýchto výsledků. Důležité je ovšem brát v potaz to, že teploty, jež jsou uvažovány ve vypočtených hodnotách, jsou ty hodnoty, které byly naměřeny jako maximální, oproti naměřeným, kde byly hodnoty odečítány pouze ze dvou míst na povrchu kostry. Z tohoto jasně plyne, jak moc je důležitý materiál, z kterého jsou dané prvky konstruovány. Také se zde může projevit velikost nadefinovaných ztrát pro výpočet a přirozené proudění okolního vzduchu, který se při výpočtu zanedbává.



Obrázek 9-9 Grafické porovnání naměřených a vypočtených hodnot oteplení



ZÁVĚR

Tato bakalářská práce byla zaměřena na problematiku výpočtu chlazení asynchronního motoru. Vypracování práce bylo rozděleno na dvě části. První část byla praktická, druhá část byla zaměřena na výpočet díky výpočetní technice pomocí programu Ansys Workbench.

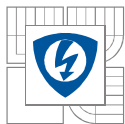
V druhé části práce se vycházelo z motoru, na němž bylo prováděno laboratorní měření. Jednalo se o třífázový asynchronní motor s kotvou nakrátko. Jedná se o motor, který je uzavřený. Jako chladivo slouží vzduch, který je rozháněn po kostře mezi žebry radiálním ventilátorem umístěným za štítem na hřídeli.

Praktická část práce probíhala ve školní laboratoři. Měření bylo prováděno na zmiňovaném asynchronním motoru, který byl připojen do sítě na napětí 400V naprázdno. Při tomto stavu motor dosahoval 1498 ot.min^{-1} . Měření probíhalo při dvou částech, na které se následně upínala celá práce. První část byla s *chlazením*, kdy byl na motoru ponechán kryt ventilátoru, který kromě bezpečnostního charakteru plní svou funkci usměrněním vzduchu, jež ventilátor rozproudí. Druhé měření spočívalo v tom, že byl sejmout kryt ventilátoru, takže vzduch nebyl usměrněn na kostru a ta nemohla být chlazená, tudíž *bez chlazení*. Na kostru motoru byla připevněna dvě tepelná čidla difrakčního teploměru, která měřila postupně oteplující se kostru motoru. Měření probíhalo padesát minut a hodnoty byly odečítány po dvou minutách (*Tabulka 1*). Z počáteční teploty povrchu kostry cca $T=22^{\circ}\text{C}$, se kostra motoru ohřála v případě, kdy bylo chlazení usměrněno na teplotu cca $T=39^{\circ}\text{C}$. V případě bez chlazení se hodnota teploty pohybovala okolo $T=51^{\circ}\text{C}$. Tyto hodnoty jasně ukazují to, že chlazení je jednoznačně problematika, na kterou je nutno brát ohled. Z charakteristik, které z těchto hodnot vyšly, také plyne, že charakteristika oteplení s chlazením se začala postupně ustalovat, kdežto z hodnot bez chlazení tato hodnota stále rostla.

Porovnáním laboratorních měření těchto teplotních analýz plyne, že chlazení je velmi důležitou součástí pro zachování dobrého technického stavu a chodu stroje. V případě, kdy by motor nebyl dostatečně chlazen a oteplovací charakteristika by rostla, mohlo by dojít k trvalému poškození motoru.

Druhou částí této práce bylo simulovat chlazení na „stejném“ asynchronním motoru v programu Ansys Workbench. Motor byl modelován v měřítku 1:1 vzhledem k původnímu typu motoru použitému v laboratoři. K modelaci celé sestavy motoru byl využit program společnosti Autodesk, Inventor 2012 Professional. Tento model byl zjednodušen o několik prvků (spojovací šrouby ložiska, všeobecné zjednodušení motoru), ale také o několik vlastností (drsnot povrchu materiálu prvků motoru), jež bylo potřeba vynechat z důvodu časového omezení, neboť návrh chlazení je velmi komplikovaným procesem návrhu celého motoru.

Pro celkovou simulaci na počítači bylo třeba tento výpočet rozdělit do několika částí. Výpočet probíhal v programu Ansys Workbench 15, který provádí výpočet pomocí metody konečných prvků. První z částí bylo nutné simulovat proudění na samotném ventilátoru. Na ventilátoru proběhlo několik měření, kde bylo simulováno proudění od nulových otáček do 1498 ot.min^{-1} (při těchto otáčkách probíhalo laboratorní měření), které probíhaly po 200 ot.min^{-1} (*Tabulka 2*). Byly odečítány hodnoty maximální a průměrné rychlosti proudění a také hmotnostního průtoku vzduchu za sekundu. Z naměřených hodnot byly sestaveny grafy, které měly lineární průběh. Maximální rychlosti proudění, které byly vypočteny při simulaci, se pohybují pouze v těsné blízkosti ventilátoru, neboť je tato rychlost rozptýlena a zpomalena nárazy v krytu ventilátoru. Maximální



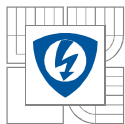
rychlost proudění při maximálních otáčkách 1498ot/min byla $v_{max}=14,0052m.s^{-1}$ a průměrná rychlost byla naměřena $v_{ave}=9,7810m.s^{-1}$. Podmínkou bylo, aby se podle teoretických předpokladů pohybovala $v<20(30)m.s^{-1}$. Tato podmínka byla dodržena a tudíž i potvrzená realizovatelnost chlazení.

Hodnoty výpočtu ventilátoru při maximálních otáčkách byly exportovány do složky počítače a následně importovány do výpočtu chlazení celého motoru. Tento výpočet probíhal opět pomocí programu Ansys Workbench v modulu CFX pro výpočet proudění. Místo ventilátoru v sestavě byly naimportovány právě zmiňované výsledky otáček $1498ot.min^{-1}$, které byla vypočteny u výpočtu s ventilátorem. Byly nastaveny stejné podmínky jako při laboratorním měření, aby se daly výsledky dobře porovnat. Výpočet s chlazením jasně ukazuje rychlost, která je nerychlejší v místě zdroje rozhánění vzduchu. Chlazení, které vychází z podkrytu je již značně zpomaleno, ale i přesto obrázky 9-2, 9-3, 9-4 jasně ukazují, že proudnice vzduchu rozháněny ventilátorem se pohybují kolem kostry, která je následně chlazená.

Dalším krokem, kterým práce pokračovala, byl výpočet tepelné analýzy. Tento výpočet byl proveden jak pro stav, kdy byl motor chlazen, tak pro stav bez chlazení. Výpočet tepelné analýzy byl založen na výpočtech v modulu CFX, kde bylo simulováno proudění pro ventilátor a následně pro celý motor. Pro tepelnou analýzu byl vytvořen modul *Transient Thermal*, kam byl naimportován motor a kolem něj vytvořen vzduchový objem kde probíhal výpočet. Tomuto objemu byla nadefinována hodnota okolního prostředí a motoru ztráty. Z modulu CFX byly do modulu *Transient Thermal* importována data vypočteného objemu s daty o proudění a porovnány s objemem novým. Následný výpočet již porovnaných hodnoty vzduchu uvnitř objemu určil konečné oteplení dané oblasti. Výsledky podle předpokladu potvrdily, že při stavu bez chlazení dosahuje teplota sálající z povrchu motoru, ale i samotnou teplotu motoru větších hodnot oproti stavu, kdy je motor chlazen. Tento fakt je ovšem znehodnocen tím, že rozdíl teplot je i přes rostoucí tendenci mezi těmito stavy stále velmi malý. Je to zapříčiněno několika možnými věcmi. Jednou z nich je zanedbání materiálových vlastností při výpočtu (drsnost, tepelná vodivost, druh materiálu). Další příčinou je počítání s motorem, jako s jedním spojeným tělesem, což zabraňuje možnému lepšímu chlazení, avšak při tomto výpočtu byla kvůli zjednodušení udělána výjimka. Dále pak je možnost samotné definice, kde mohly být motoru nadefinovány odlišné hodnoty ztrát, než ve skutečnosti byly a zanedbané přirozené proudění vzduchu. Nesmí se pak také opomenout, že hodnoty, které byly naměřeny a zaznamenány jsou teplotami maximálními.

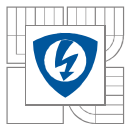
Z porovnání naměřených a vypočtených výsledků jasně plyne nedokonalost výpočtu v případě zanedbání materiálových vlastností a opomíjení zprvu, dalo by se říci, nepodstatných věcí. V případě chlazení asynchronního stroje, lze jasně vidět, že jsou věci, které byly v této práci zanedbány, ať už z časových omezení pro tuto práci, nebo také pro obtížnost řešení v dané problematice, jsou podstatnou součástí daných výpočtů. Už jen z toho důvodu, že tepelný rozdíl mezi naměřenými a vypočtenými výsledky je tvořen až $\Delta T=21^{\circ}C$ rozdílem. To je velmi velký rozdíl, který může ovlivnit správný chod a životnost stroje. Pro lepší výsledek, je tedy nutno uvažovat prvky, jež byly v tomto výpočtu zanedbány a provést novou analýzu.

Samotný program Ansys je velmi kvalitní program nejen pro výpočet chlazení. Nevýhodou je ovšem velká hardwarová, časově-výpočetní náročnost a drobné nedostatky při importu geometrie z jiných programů. Je to zapříčiněno tím, že každý program je založen na odlišných prvcích vykreslování dané geometrie, proto mohou vzniknout problémy u jednotlivých složitějších prvků.



LITERATURA

- [1] PETROV, G. N. *Elektrické stroje 2: Asynchronní stroje-Synchronní stroje*. Vydání 1. Praha: Československé akademie věd, 1982.
- [2] CIGÁNEK, Ladislav. *Stavba elektrických strojů*. Vydání 1. Spálená 51, Praha II: Státní nakladatelství technické literatury, n.p., 1958.
- [3] IGOR PETROVIČ KOPYLOV A KOLEKTIV. *Stavba elektrických strojů*. Vydání první. Spálená 51, 113 02 Praha 1: SNTL-Nakladatelství technické literatury, n.p., 1988.
- [4] KOČMAN, Stanislav. *Asynchronní stroje* [online]. Katedra obecné elektrotechniky VŠB Ostrava, 2002 [cit. 2013-12-05]. Dostupné z: <http://p.kobrlc.sweb.cz/stroje/as-skriptum.pdf>
- [5] Pohonná Technika: Asynchronní motory. *Pohonná technika* [online]. 2007 [cit. 2013-12-05]. Dostupné z: <http://www.pohonnatechnika.cz/skola/motory/asynchronni-motor>
- [6] HAK, Josef a Oldřich OŠLEJŠEK. *Výpočet chlazení elektrických strojů: Fyzikální podklady výpočtu chlazení a ventilační výpočet* [online]. Vydání 1. Brno: VUES, 1973 [cit. 2013-12-05]. ISBN 80-7078-132-7.
- [7] ONDRŮŠEK, Čestmír a JARMARA. *Výpočet ztrát univerzálního motoru metodou konečných prvků* [online]. Brno, 2004 [cit. 2013-12-06]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/04026/index.html>. Experimentální měření. VUT - FEKT.
- [8] SIKORA, M. Inovace systému chlazení točivých elektrických strojů s využitím CFD metod. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 182 s. Vedoucí dizertační práce prof. Ing. Ctirad Kratochvíl, DrSc.
- [9] RAČEK, Jiří. *Technická mechanika: mechanika tekutin a termomechanika*. Vyd. 4. Brno: Novpress, 2009. 236 s. ISBN 978-80-214-3881-1. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.
- [10] Prvky větracích a klimatizačních zařízení 1.část: Rozdělení ventilátorů. *Tzb-info, stovebnictví, úspory energie* [online]. 2006 [cit. 2013-12-11]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/3733-prvky-vetracich-a-klimatizacnich-zarizeni-i-1-cast>
- [11] HALFAR, I. *Optimalizace chladicího systému asynchronního stroje*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 65 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Marcel Janda, Ph.D.
- [12] FUSEK, Martin a Radim HALAMA. *MKP a MHP* [online]. 2011 [cit. 2014-05-28]. Dostupné z: http://mi21.vsb.cz/sites/mi21.vsb.cz/files/unit/metoda_konecných_prvku_a_hranicnich_prvku.pdf



-
- [13] HRUBÝ, Jiří. *Metoda konečných prvků* [online]. [cit. 2014-05-28]. Dostupné z: <http://www.345.vsb.cz/jirihruby/TTV/19FEM%20TT10.pdf>
- [14] VLACH, Radek. *Ventilace elektrických strojů* [ppt]. 2009, 16 s. [cit. 26. 5. 2014].