

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

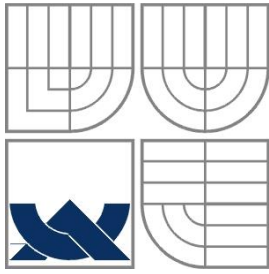
VÝPOČET TEPLOTNÍHO POLE ASYNCHRONNÍHO MOTORU

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

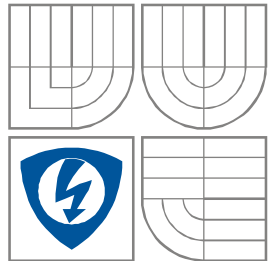
JIŘÍ SUK

BRNO 2015



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 TEPLOTNÍHO POLE ASYNCHRONNÍHO MOTORU

CALCULATION OF THE DISTRIBUTION OF TEMPERATURE FIELD OF INDUCTION MACHINE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

JIŘÍ SUK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. MARCEL JANDA, Ph.D.

BRNO 2015



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: Jiří Suk

ID: 153197

Ročník: 3

Akademický rok: 2014/2015

NÁZEV TÉMATU:

Výpočet rozložení teplotního pole asynchronního motoru

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Vytvořte model asynchronního stroje
2. Pomocí metody konečných prvků vytvořte model rozložení teplotního pole na tomto modelu
3. Proveďte měření teploty na asynchronním stroji různými metodami
4. Vyhodnoťte výsledky měření a porovnejte je s vypočtenými hodnotami

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: 22.9.2014

Termín odevzdání: 2.6.2015

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 se zabývá problematikou výpočtu rozložení teplotního pole asynchronního motoru. Pro jeho výpočet je využito třech metod, které jsou následně srovnány. První metodou je laboratorní měření povrchové teploty na různých místech motoru při chodu naprázdno bez aktivního chlazení. Teplota je měřena na čtyřech vybraných bodech na povrchu motoru za použití různých měřicích zařízení. Další bodem je počítačová simulace v programu ANSYS Workbench za využití metody konečných prvků. Tato metoda vyžaduje vytvoření konkrétního modelu motoru v CAD systému. V tomto případě je využito systému Autodesk Inventor 2015. Poslední metodou je zjednodušený analytický výpočet, kde je využito náhradního tepelného schématu statorové části motoru. Nedílnou součástí je srovnání všech použitých způsobů výpočtu rozložení teplotního pole, výsledků a přesnosti výpočtu.

Abstract

The issue of this bachelor's thesis is calculation of the distribution of temperature field of induction machine. There is used three different methods of calculating which are compared in the conclusion. First method is lab measuring of surface temperature on different spots on the machine while unloaded without active cooling. Temperature is measured on four spots using different devices. Another way how to calculate temperature field is computer simulation in ANSYS Workbench using finite elements method. In this method is necessary to create real-based model of motor in CAD system. In this case Autodesk Inventor 2015 was used. Last method was simplified analytics calculation using heat circuit of the stator part. Last but not least is comparison of all used methods, results and accuracy of calculation.

Klíčová slova

Asynchronní motor; Transientní teplotní analýza; Teplo; Teplotní pole; Metoda konečných prvků; ANSYS Workbench;

Keywords

Induction machine; Transient thermal analysis, Heat; Temperature field; Finite element method; ANSYS Workbench

Bibliografická citace

SUK, J. *Výpočet teplotního pole asynchronního motoru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015. 55 s. Vedoucí semestrální práce Ing. Marcel Janda, Ph.D..

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma *Výpočet teplotního pole asynchronního motoru* 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

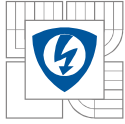
Podpis autora

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.

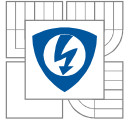
V Brně dne

Podpis autora



OBSAH

1 ÚVOD	14
2 ASYNCHRONNÍ MOTOR A JEHO KONSTRUKCE	15
2.1 ZÁKLADNÍ KONSTRUKČNÍ PRVKY ASM	15
2.2 PRINCIP ČINNOSTI ASYNCHRONNÍHO MOTORU	16
2.3 ZTRÁTY V ASYNCHRONNÍM MOTORU	17
2.3.1 VZTAH PRO ÚČINNOST	17
2.3.2 ROZLOŽENÍ ZTRÁT	17
2.3.3 JOULOVY ZTRÁTY (ΔP_{j1} , ΔP_{j2})	18
2.3.4 ZTRÁTY MAGNETIZAČNÍ (ΔP_{FE})	18
2.3.5 MECHANICKÉ A DODATEČNÉ ZTRÁTY (ΔP_{mech} , ΔP_d)	18
3 ZPŮSOBY CHLAZENÍ TOČIVÝCH ELEKTRICKÝCH STROJŮ	19
3.1 PASIVNÍ CHLAZENÍ	19
3.2 AKTIVNÍ CHLAZENÍ	19
3.2.1 CHLAZENÍ VZDUCHEM	19
3.2.2 CHLAZENÍ KAPALINOU	20
4 TEPLA, TEPLOTA, MATERIÁLOVÉ VLASTNOSTI	21
4.1 TEPLA	21
4.2 TEPLOTA	21
4.3 TEPELNÁ KAPACITA	21
4.4 TEPELNÁ VODIVOST	22
4.5 EMISIVITA	23
5 PŘENOSY TEPLA	24
5.1 PŘENOS TEPLA VEDENÍM (KONDUKČÍ)	24
5.2 PŘENOS TEPLA PROUDĚNÍM (KONVEKČÍ)	24
5.3 PŘENOS TEPLA ZÁŘENÍM (RADIACÍ)	26
6 TEPELNÝ VÝPOČET POMOCÍ NÁHRADNÍCH TEPELNÝCH OBVODŮ	27
7 ANALYTICKÝ VÝPOČET	31
8 ANSYS, INVENTOR A METODA KONEČNÝCH PRVKŮ	34
8.1 METODA KONEČNÝCH PRVKŮ	34
8.2 ANSYS WORKBENCH	35
8.3 AUTODESK INVENTOR	35
8.4 TVORBA MODELU ASYNCHRONNÍHO MOTORU V AUTODESK INVENTOR 2015	35

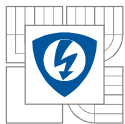


9 TEPLOTNÍ ANALÝZA V ANSYS.....	37
9.1 NASTAVENÍ VÝPOČTU	37
9.2 VÝSLEDKY ANALÝZY	40
10 MĚŘENÍ NA REÁLNÉM NEZATÍŽENÉM ASYNCHRONNÍM MOTORU BEZ AKTIVNÍHO CHLAZENÍ	44
11 SROVNÁNÍ POUŽITÝCH METOD	48
11.1 SROVNÁNÍ LABORATORNÍHO MĚŘENÍ A ANALÝZY V ANSYS	48
11.2 SROVNÁNÍ VYPOČTENÝCH HODNOT ANALYTICKY A ANALÝZOU ANSYS.....	50
12 ZÁVĚR.....	52



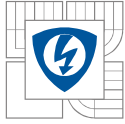
SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 1: Tok výkonu asynchronním motorem</i>	17
<i>Obrázek 2: Přenos tepla prouděním u plochy stěny</i>	25
<i>Obrázek 3: Úplné náhradní tepelné schéma asynchronního stroje</i>	30
<i>Obrázek 4: Náhradní tepelný obvod statoru asynchronního motoru při konstantní teplotě okolního vzduchu</i>	31
<i>Obrázek 5: Řez motorem při použití funkce Mesh</i>	34
<i>Obrázek 6: Kompletní sestava asynchronního motoru</i>	36
<i>Obrázek 7: Jednotlivé části sestavy asynchronního motoru</i>	36
<i>Obrázek 8: Knihovny materiálů</i>	37
<i>Obrázek 9: Uzavřený model funkcí Enclosure</i>	38
<i>Obrázek 10: Stromová struktura - tepelné parametry motoru + výsledky</i>	39
<i>Obrázek 11: Teplotní pole motoru v čase $t = 600$ s</i>	40
<i>Obrázek 12: Obrázek 11: Teplotní pole motoru v čase $t = 1800$ s</i>	40
<i>Obrázek 13: Příčný řez motorem i okolním vzduchem v čase $t = 1800$ s</i>	41
<i>Obrázek 14: Kombinovaný řez motorem v čase $t = 1800$ s</i>	41
<i>Obrázek 15: Podélný řez motorem v čase $t = 3600$ s</i>	42
<i>Obrázek 16: Kombinovaný řez motorem v čase $t = 3600$ s</i>	42
<i>Obrázek 17: Podélný řez motorem i okolním vzduchem v čase $t = 3600$ s</i>	43
<i>Obrázek 18: Měření na asynchronním motoru</i>	44
<i>Obrázek 19: Ilustrace místa i způsobu měření pyrometrem</i>	45
<i>Obrázek 20: Oteplovací charakteristiky na kostře a ložiskovém štítu</i>	46
<i>Obrázek 21: Oteplovací charakteristiky na svorkovnici a druhém ložiskovém štítu</i>	46
<i>Obrázek 22: Srovnání oteplovacích charakteristik na svorkovnici</i>	48
<i>Obrázek 23: Srovnání oteplovacích charakteristik na ložiskovém štítu</i>	49
<i>Obrázek 24: Srovnání oteplovacích charakteristik na kostře motoru</i>	49
<i>Obrázek 25: Srovnání oteplovacích charakteristik na druhém ložiskovém štítu</i>	50
<i>Obrázek 26: Ověření teploty čela vinutí v čase $t = 3600$ s</i>	51



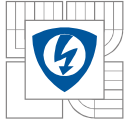
SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 1: Měrná tepelná kapacita pro různé materiály.....</i>	<i>22</i>
<i>Tabulka 2: Součinitel tepelné vodivosti pro různé materiály.....</i>	<i>23</i>
<i>Tabulka 3: Přehled vypočítaných teplot a tepelných toků</i>	<i>33</i>
<i>Tabulka 4: Hodnoty ztrát a vnitřní generace tepla</i>	<i>39</i>

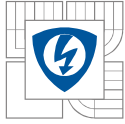


SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

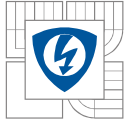
b_{iz}	[m]	tloušťka izolace cívk
C	[J.K ⁻¹]	tepelná kapacita
c	[J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	měrná tepelná kapacita
d_{iz}	[m]	tloušťka drážkové izolace
f	[Hz]	frekvence sítě
I	[A]	napájecí proud
$l_{\check{c}}$	[m]	délka čela
l_{Fe}	[m]	osová délka železa statoru
m_f	[-]	počet fází
m	[kg]	hmotnost
n	[min ⁻¹]	otáčky rotoru
n_s	[min ⁻¹]	synchronní otáčky mag. pole statoru
O_d	[m]	obvod statoru
p	[-]	počet pólových dvojic statoru
P_1	[W]	výkon z napájecí sítě
P_{12}	[W]	tepelný tok mezi částmi stroje
P_2	[W]	výkon na hřídeli
$P_{\check{c}}$	[W]	tepelný tok čel vinutí
P_{dr}	[W]	tepelný tok od drážkové části vinutí
P_{Fe}	[W]	tepelný tok ze statorového svazku
P_i	[W]	tepelný tok mezi drážkami
P_{mech}	[W]	mechanický výkon
P_r	[W]	výkon vyzařujícího tělesa
P_{vk}	[W]	vyrovnávací tepelný tok
P_{δ}	[W]	výkon na vzduchové mezeře
Q_s	[-]	počet drážek statoru
Q	[J]	obecné označení tepla
R	[W]	činný odpor vinutí
R_{12}	[K.W ⁻¹]	tepelný odpor mezi částmi stroje
$R_{\check{c}}$	[K.W ⁻¹]	tepelný odpor čel statorového vinutí



R_{dr}	[K.W ⁻¹]	tepelný odpor drážek vinutí
R_i	[K.W ⁻¹]	tepelný odpor drážkové izolace
R_v	[K.W ⁻¹]	tepelný odpor kovu vinutí
R_{vk}	[K.W ⁻¹]	tepelný odpor od vinutí k chladicímu vzduchu
R_{δ}	[K.W ⁻¹]	tepelná vazba mezi statorem a rotorem
R_{δ}	[K.W ⁻¹]	tepelná vazba mezi statorem a rotorem
s	[-]	skluz
S	[m ²]	plocha tělesa
$S_{\check{c}}$	[m ²]	ochlazovaná plocha čel
S_{ef}	[m ²]	efektivní průřez vodiče
S_{er}	[m ²]	vnější povrch paketů předávajících teplo
S_i	[m ²]	plocha izolace
S_{ir}	[m ²]	vnitřní povrch paketů předávajících teplo
S_{vk}	[m]	plocha povrchu vinutí v radiálních kanálech
S_{δ}	[m ²]	plocha vzduchové mezery
T	[K]	termodynamická teplota
t	[s]	čas
T_1	[K]	počáteční teplota
T_2	[K]	koncová teplota
U_s	[V]	sdužené napětí
$V_{\check{c}}$	[m ³]	objem čel vinutí
V_{ef}	[m]	efektivní počet vodičů v drážce
V_v	[m ³]	celkový objem vinutí
$\alpha_{\check{c}}$	[W.m ⁻² .K ⁻¹]	součinitel přestupu tepla čela vinutí
α	[W.m ⁻² .K ⁻¹]	součinitel přestupu tepla
α_{er}	[W.m ⁻² .K ⁻¹]	souč. přest. tepla vnějšího povrchu paketů
α_{ir}	[W.m ⁻² .K ⁻¹]	souč. přest. tepla vnitřního povrchu paketů
α_{vk}	[W.m ⁻² .K ⁻¹]	součinitel přestupu tepla
α_{δ}	[W.m ⁻² .K ⁻¹]	součinitel přestupu tepla vzduch. mezery
λ_i	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	součinitel tepelné vodivosti izolace
λ	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	součinitel tepelné vodivosti



ϑ_0	[K]	teplota okolí
ϑ_1	[K]	počáteční teplota
ϑ_2	[K]	koncová teplota
$\vartheta_{\check{c}}$	[K]	teplota čel vinutí
ϑ_{Fe}	[K]	teplota železa statoru
ϑ_{dr}	[K]	teplota drážkové části vinutí
$\vartheta_{Fe,r}$	[K]	teplota železa rotoru
$\vartheta_{Fe,s}$	[K]	teplota železa statoru
$\Delta P_{j1}; \Delta P_{j2}$	[W]	Joulovy ztráty na vinutích
$\Delta P_{\check{c}}$	[W]	ztráty v čelech vinutí
ΔP_d	[W]	ztráty dodatečné
ΔP_{dr}	[W]	ztráty v drážkové části vinutí
ΔP_{Fe}	[W]	ztráty v železe
ΔP_{Fe-h}	[W]	hysterezní ztráty
ΔP_{Fe-v}	[W]	ztráty vířivými proudy
ΔP_{mech}	[W]	ztráty mechanické
ΔP_v	[W]	celkové ztráty ve vinutí
Φ	[W]	tepelný tok
δ	[m]	šířka vzduchové mezery
ε	[-]	emisivita
η	[-]	účinnost stroje
σ	[W.m ⁻² .K ⁻⁴]	Stefan-Boltzmannova konstanta



1 ÚVOD

Teplota a teplota jsou faktory velice blízko spojené s řešením velké škály inženýrských problémů. V této bakalářské práci je řešeno rozložení teplotního pole asynchronního motoru více různými metodami, které jsou vzájemně porovnány.

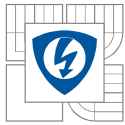
Na základě reálného asynchronního motoru a získání všech potřebných rozměrů klasickým posuvným měřidlem vznikne 3D model tohoto motoru v program Autodesk Inventor 2015. Model bude následně vyexportován ve formátu vhodném k dalšímu zpracování v simulačním software ANSYS Workbench, který využívá metodu konečných prvků pro mnoho typů simulací. V této bakalářské práci bude použita Transientní teplotní analýza, pomocí které bude teplotní pole vypočteno. Výhodou výstupu této analýzy bude rozložení teploty přes kompletně celý motor.

Další metodou bude měření reálného asynchronního motoru bez zatížení i bez aktivního chlazení v laboratorních podmínkách. Povrchová teplota bude měřena třemi různými měřidly a zaznamenávána každých 120 sekund. Z výsledků bude sestavena oteplovací charakteristika, která bude srovnána s vypočtenými hodnotami pomocí transientní teplotní analýzy.

Poslední částí bude analytický výpočet, tepelných toků mezi jednotlivými součástmi asynchronního motoru a následné srovnání s výsledky, které budou vycházet opět z tranzientní teplotní analýzy.

Simulační systémy jako je ANSYS Workbench jsou velkým pomocníkem při zefektivňování návrhu elektrických strojů. Díky svému uživatelsky přívětivému prostředí se práce při návrhu elektrického stroje nejen urychlí, ale konstruktérovi se dále nabízí nepřeborné množství možností, které velkou část takového návrhu stroje ucelí do jedné platformy, ať už se jedná o analýzu pevnostní, obtékáním chladicím médiem nebo šířením tepla na jednotlivých částech stroje.

Pro stroj, jakým je asynchronní motor, je velice důležitým faktorem přenos ztrátového tepla mezi jednotlivými součástmi a z toho plynoucí celkové teplotní rozložení v celém stroji. Je totiž podstatné jej udržovat v rozsahu teplot, které neohrožují jeho chod a nesnižují jeho životnost. Jedním z omezení je fakt, že je složen z několika různých materiálů, které nemají totožné tepelné vlastnosti, a proto je nutné si uvědomovat, že teplota, která není nebezpečná pro jednu část stroje, může mít fatální následky pro část jinou. Je proto nutné počítat se všemi vlivy a dimenzovat stroj tak, aby provozní teploty byly bezpečné pro dlouhodobý provoz a zároveň aby dokázal krátkodobě pracovat i ve ztížených podmínkách například vlivem poruchy a podobně.



2 ASYNCHRONNÍ MOTOR A JEHO KONSTRUKCE

2.1 Základní konstrukční prvky ASM

Asynchronní motor je elektrický stroj, jehož konstrukce je poměrně jednoduchá, málo poruchová a téměř bezúdržbová. Skládá se z několika základních prvků, jež jsou součástí každého asynchronního motoru, které jsou popsány v této kapitole (až na ventilátor, který může být nahrazen jiným typem chlazení, viz kapitola 5) [1],[3].

- **Stator**

Stator je složen z elektrotechnických plechů, které jsou na sebe naskládány do tvaru válce. Plechy mají na vnitřní straně drážky, kde je zpravidla uloženo trojfázové vinutí, které bývá u asynchronního motoru vůči sobě pootočeno o 120° . Toto vinutí je vyvedeno na svorkovnici tak, aby se dalo přepojovat mezi zapojením do trojúhelníku a zapojením do hvězdy. Drážky statoru mohou být buď polozavřené, nebo otevřené (případně s magnetickými klíny), aby se nezvětšovala efektivní délka vzduchové mezery a tím magnetizační proud [3],[9],[12].

- **Rotor**

Rotor je sestaven opět z plechů, které jsou nalisovány na hřídeli. Vinutí může být buď vinuté (podobně jako u statoru) a vyvedené na kroužky – motor s kotvou vinutou nebo klecové – motor s kotvou nakrátko [1],[3].

- **Vinutí**

U motoru s vinutou kotvou se vinutí rotoru přes kartáče a kroužky připojuje spouštěcí odpor, který omezuje záběrným proud a také pomůže ke zlepšení spouštěcích charakteristik motoru. Po rozběhu se spouštěcí odpor vyřadí, případně se kroužky spojí nakrátko a kartáče odklopí tak, aby se při normálním běhu motoru neopotřebovaly [3],[12].

Klecové vinutí tvoří tyče, které jsou uloženy v drážkách rotoru a na čelech spojené kruhy nakrátko. Tento typ vinutí je nejčastěji z hliníku u motorů menších výkonů. Tato klec se zhotovuje metodou tlakového lití. Pro větší výkony se obvykle využije mědi, bronzu nebo jiných slitin [3],[12].

- **Kostra motoru**

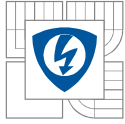
Je litinová nebo hliníková. Hliníková se používá většinou u motorů menších výkonů. Je to „obal“ motoru, který je uzavřen ložiskovými štíty. Další nedílnou součástí jsou patky, díky nimž lze motor připevnit zemnicími šrouby [1],[3].

- **Ložiska**

Slouží k omezení tření hřídele při jejím otáčivém pohybu. Jsou uložena v ložiskových štítech [1],[3].

- **Ventilátor**

Ventilátor je umístěn na hřídeli a slouží k chlazení stroje [1],[3].



2.2 Princip činnosti asynchronního motoru

Princip spočívá v interakci točivého magnetického pole statoru vyvolaného v jeho vinutí, které je připojeno na třífázovou síť a magnetického pole rotoru, které je vyvolané průchodem indukovaného proudu vinutím rotoru. Tento proud vzniká v rotorovém vinutí, protože točivé magnetické pole statoru protíná vodiče rotoru a tím v nich indukuje napětí. Vzájemným působením obou polí vzniká síla, která způsobuje pohyb rotoru ve směru magnetického pole statoru.

Napětí se však indukuje jen v případě relativního pohybu magnetického pole statoru vůči magnetickému poli rotoru. To znamená, že otáčky obou magnetických polí jsou rozdílné. Rozdíl otáček magnetického pole statoru (n_s) a otáček rotoru (n) popisuje tzv. skluz (s), který nabývá hodnot od 0 do 1 [9],[12].

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad [-] \quad (2.1)$$

Kde

n_s	...	synchronní otáčky magnetického pole statoru	[min^{-1}]
n	...	otáčky rotoru	[min^{-1}]

Rychlost otáčení statorového magnetického pole se nazývá synchronní rychlost (ω_s). Je závislá na napájecí frekvenci a také na počtu pólových dvojic. Proto v dvoupólovém stroji, připojeném na 50Hz síť, dosahují otáčky magnetického pole statoru hodnoty $n_s = 3000 \text{ min}^{-1}$ [9],[12].

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p} \quad [\text{min}^{-1}] \quad (2.2)$$

Kde

f	...	frekvence sítě	[Hz]
p	...	počet pólových dvojic statoru	[-]

Asynchronní motor lze řídit změnou počtu pólů, skluzu a také změnou napájecí frekvence. V minulosti se používaly první dvě možnosti. V současnosti je nejčastěji využíváno změny frekvence frekvenčním měničem [9],[10].

2.3 Ztráty v asynchronním motoru

V asynchronním motoru rozeznáváme mnoho druhů ztrát, které vznikají při jeho chodu. Ty jsou závislé na různých aspektech. Pokud je motor v motorickém režimu, vstupuje do jeho statorového obvodu výkon přivedený z napájecí sítě zvaný příkon (P_1) [12].

2.3.1 Vztah pro účinnost

Účinnost motoru je dána podílem výkonu na hřídeli (P_2) a příkonu (P_1) [3].

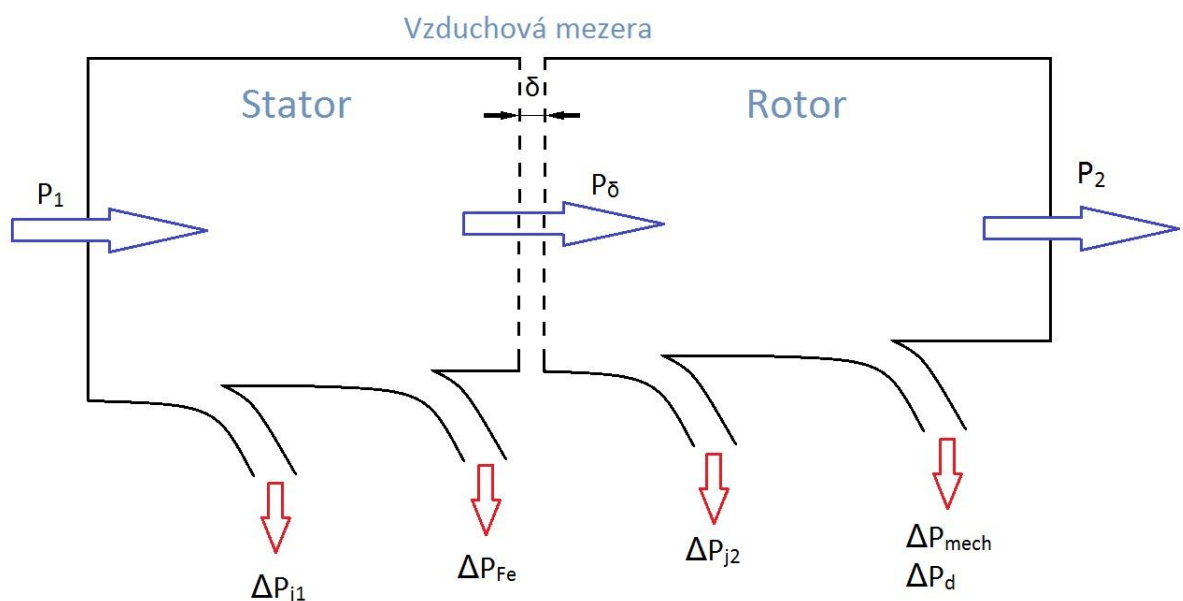
$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \quad [-] \quad (2.3)$$

Kde: P_2 ... výkon na hřídeli [W]
 P_1 ... příkon motoru [W]

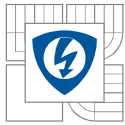
2.3.2 Rozložení ztrát

Užitečný výkon na hřídeli potom spočítáme jako příkon, od kterého odečteme součet všech ztrát vzniklých při chodu motoru, což je popsáno rovnicí (2.4) [3]. Jednotlivé ztráty jsou rozepsány v následujících podkapitolách.

$$P_2 = P_1 - (\Delta P_{j1} + \Delta P_{j2} + \Delta P_{Fe} + \Delta P_{mech} + \Delta P_d) \quad [W] \quad (2.4)$$



Obrázek 1: Tok výkonu asynchronním motorem



Celkové ztráty na motoru se skládají z několika prvků, kterými jsou:

2.3.3 Joulovy ztráty (ΔP_{j1} , ΔP_{j2})

Vzhledem k tomu, že satorové vinutí má nenulový elektrický odpor, se vinutí zahřívá, a tím vznikají Joulovy ztráty (ΔP_{j1}). Tyto ztráty jsou přímo úměrné druhé mocnině procházejícího proudu [3].

$$\Delta P_j = m_f \cdot R \cdot I^2 \quad [\text{W}] \quad (2.5)$$

Kde

m_f	...	počet fází	[-]
R	...	činný odpor vinutí	[Ω]
I	...	napájecí proud	[A]

V rotorovém vinutí vznikají, obdobně jako ve vinutí satorovém, Joulovy ztráty (ΔP_{j2}), které se vypočtou obdobně jako Joulovy ztráty ve satoru. Po odečtení těchto ztrát dostáváme mechanický výkon (P_{mech}) [3].

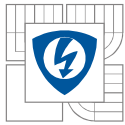
2.3.4 Ztráty magnetizační (ΔP_{Fe})

Dalšími jsou ztráty v magnetickém obvodu motoru. Jsou to ztráty magnetizační neboli také ztráty v železe (ΔP_{Fe}). Vzhledem k tomu, že v železe rotoru je frekvence skluzová, která bývá velmi malá, jsou rozhodující ztráty v železe satoru. Ztráty v železe jsou potom dány dvěma složkami. První jsou ztráty hysterezní ($\Delta P_{\text{Fe-h}}$). Ty jsou přímo úměrné frekvenci síťového napětí. Dále ztráty vířivými proudy ($\Delta P_{\text{Fe-v}}$), které jsou přímo úměrné druhé mocnině této frekvence. Ztráty vířivými proudy jsou zároveň přímo úměrné druhé mocnině magnetické indukce (B) [3], [12].

Hlavní část výkonu však přechází přes vzduchovou mezeru mezi státorem a rotorem je označována (P_δ) [3].

2.3.5 Mechanické a dodatečné ztráty (ΔP_{mech} , ΔP_d)

Na hřídeli dostáváme výstupní výkon P_2 . Je to výkon P_{mech} , od kterého jsou odečteny mechanické ztráty ΔP_{mech} , které vznikají třením v ložiskách a také aerodynamickým působením okolního vzduchu na točivé části motoru a také ztráty dodatečné ΔP_d . Ty mohou vznikat například působením vyšších harmonických složek napětí a proudu. Tyto harmonické složky mohou ovlivňovat i některé části magnetického obvodu [3], [12].



3 ZPŮSOBY CHLAZENÍ TOČIVÝCH ELEKTRICKÝCH STROJŮ

Způsob chlazení točivých elektrických strojů lze rozdělit podle mnoha hledisek. Jedním z nejobecnějších je však rozdělení na chlazení pasivní a aktivní.

3.1 Pasivní chlazení

Pasivní chlazení je založeno pouze na přirozených odvodech tepla. Tomu se napomáhá například žebrováním na kostře motoru. Z tohoto faktu vyplývá, že tento způsob chlazení je jednoduchý a tím odpadájí nároky na další odběr výkonu určeného pro chod chladicí soustavy. Je však použitelné pouze pro točivé stroje malých výkonů, protože přirozenou cestou dochází k málo účinnému odvodu tepla [8].

3.2 Aktivní chlazení

Aktivní chlazení je způsob chlazení, kdy se teplo odvádí především díky nucenému proudění (konvekci) s použitím chladicího média. Proudění média je podpořeno např. ventilátorem nebo čerpadlem. Dochází k účinnějšímu přenosu tepla, a proto je nutné pro použití u strojů vyšších výkonů. Nevýhodou je složitost zařízení pracující na aktivním chlazení a také fakt, že k jeho provedení je zapotřebí určitý výkon. Tím může být např. snížení účinnosti motoru (pokud je ventilátor umístěn přímo na hřídeli) nebo zvenčí přivedený výkon potřebný pro chod samostatného ventilátoru nebo čerpadla. Aktivní chlazení můžeme dále dělit podle média, které je používáno. Nabízí se kapalina nebo plyn. Dále je proto popsáno nejčastější chlazení ze zástupců plynných médií – vzduch a obecně popsáno chlazení kapalinou [8].

3.2.1 Chlazení vzduchem

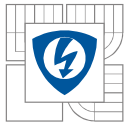
Chlazení vzduchem je pravděpodobně nejběžnější způsob, jak snižovat zahřívání asynchronního motoru. Je zde použit ventilátor, který je umístěn buď na vstupu do motoru, což nazýváme jako tlačné uspořádání nebo na výstupu vzduchu z motoru – sací uspořádání [8].

- **Otevřené**

Do motoru vstupuje vzduch přímo z jeho okolí. Uvnitř přijímá energii v podobě tepla a odchází ven ze stroje. Výhodou je jednoduchost daného provedení. Nevýhodou je však fakt, že do motoru mohou být nasávány nečistoty z jeho okolí [8].

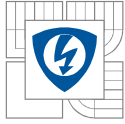
- **Uzavřené**

Vzduch cirkuluje uvnitř stroje nebo v uzavřeném okruhu mezi strojem a tepelným výměníkem. V uzavřeném okruhu je proudění podpořeno ventilátorem, který vzduch tlačí přes motor, kde dojde k tepelné výměně a dále do výměníku, kde vzduch teplo předá dál, ochladí se a pokračuje v oběhu. Hlavní nevýhodou jsou velké rozměry tepelného výměníku, které zvyšují nároky na prostor [8].



3.2.2 Chlazení kapalinou

Chlazení kapalinou se nejčastěji používá v provedení s uzavřeným okruhem. V tomto okruhu cirkuluje neměnné množství chladiva. Nejdůležitější předností tohoto typu chlazení je použití běžně dostupných kapalin, které mají vysokou tepelnou kapacitu a zároveň dosahují vyšších koeficientů přestupu tepla na plochách, které jsou smáčeny. Nejčastěji užívanou kapalinou je voda. Mohou to ale být i různé oleje. Mezi výhody olejů patří dobré elektroizolační vlastnosti a odolnost proti mrazu. Nevýhodami však jsou nižší tepelná kapacita, vyšší nákladnost a ekologické nebezpečí, vyšší viskozita (s tím spojené tlakové ztráty a nižší hodnoty koeficientů přestupu tepla) a často i hořlavost [8].



4 TEPLO, TEPLOTA, MATERIÁLOVÉ VLASTNOSTI

4.1 Teplo

Teplo (Q) nebo také tepelná energie je změna vnitřní energie při tepelné výměně. Vzhledem k tomu, že se nejedná o stavovou veličinu, závisí na způsobu jeho dodání nebo odebrání. Chápeme ho jako kladné, je-li do systému dodáváno a záporné je-li ze systému odebíráno [2].

Další možnou definicí je teorie, která teplo popisuje jako celkovou kinetickou energii neuspořádaného pohybu všech částic tvořících dané těleso [2].

4.2 Teplota

Teplota (T) je základní stavový parametr charakterizující termodynamickou rovnováhu systému. Dvě termodynamické soustavy mají stejnou teplotu, jestliže jsou v rovnovážném stavu. Pakliže dochází k výměně tepla, znamená to, že mají teplotu rozdílnou. K tepelné výměně potom dochází do doby, než soustavy dospějí do rovnovážného stavu [2].

Teplota (T) patří mezi sedm základních jednotek SI. Její jednotka je kelvin [K]. Vedlejší jednotka je stupeň Celsia [$^{\circ}\text{C}$]. Nejnížší možná teplota, ke které se lze teoreticky dosáhnout je 0 K, což se rovná $-273,15^{\circ}\text{C}$ [2].

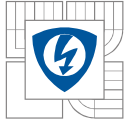
4.3 Tepelná kapacita

Tepelná kapacita (C) je konstanta úměrnosti mezi dodaným (odebraným) množstvím tepla určitému tělesu a změnou teploty tím způsobenou[2]. Platí:

$$Q = C \cdot (T_2 - T_1) \quad [\text{J}] \quad (4.1)$$

Kde

Q	...	celkové dodané (odebrané) teplo	[J]
C	...	tepelná kapacita	[J.K ⁻¹]
T_2	...	koncová teplota	[K]
T_1	...	počáteční teplota	[K]



Jelikož se tepelná kapacita vztahuje ke konkrétnímu tělesu, je zavedena veličina měrná tepelná kapacita, která je vztažena ke konkrétnímu materiálu. Popisuje, kolik tepla musí přijmout 1 kg dané látky, aby se jeho teplota zvýšila o 1 K [2]. Platí:

$$Q = m \cdot c \cdot (T_2 - T_1) \quad [\text{J}] \quad (4.2)$$

Kde

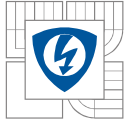
Q	...	celkové dodané (odebrané) teplo	[J]
m	...	hmotnost	[kg]
c	...	měrná tepelná kapacita	[J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]
T ₂	...	koncová teplota	[K]
T ₁	...	počáteční teplota	[K]

Tabulka 1: Měrná tepelná kapacita pro různé materiály

Látka	c [J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]
Stříbro	236
Měď	386
Sklo	840
Hliník	900
Led (-10 °C)	2220
Voda	4190

4.4 Tepelná vodivost

Tepelná vodivost je veličina, která udává, jak rychle se šíří teplo v daném látkovém prostředí. Látky můžeme porovnat díky součiniteli teplotní vodivosti (λ) jehož rozměr je W.m⁻¹.K⁻¹. Podle jeho hodnoty lze rozdělit látky na tepelné izolanty a vodiče [5]. Tepelným izolantem se označuje látka s hodnotou součinitele tepelné vodivosti $\lambda < 0,1 \text{ W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$ [6].



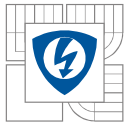
Tabulka 2: Součinitel tepelné vodivosti pro různé materiály

Materiál	λ [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
Stříbro	428
Měď	401
Hliník	235
Okenní sklo	1,0
Skelná vata	0,048
Suchý vzduch	0,026

4.5 Emisivita

Emisivita (ε) je faktor, který ovlivňuje schopnost tělesa vyzařovat tepelnou energii. Jedná se o podíl tepelné energie vyzářené daným povrchem reálného tělesa a energie vyzářené absolutně černým tělesem stejných rozměrů a teploty. Teoreticky tak dosahuje hodnot od 0 do 1, přičemž hodnoty 1 dosahuje právě absolutně černé těleso a závisí na následujících faktorech [4]:

- struktura povrchu
- materiál
- teplota povrchu
- barva povrchu



5 PŘENOSY TEPLA

Teplu se šíří z místa s teplotou vyšší do místa s teplotou nižší tzn., že spěje do rovnováhy. Existují tři druhy přenosu tepla:

- Vedení
- Proudění
- záření

Je důležité uvést, že se v praxi nejčastěji vyskytují současně.

5.1 Přenos tepla vedením (kondukcí)

Klasickým příkladem přenosu tepla vedením je kovová tyč zahřívána na jednom konci. Teplu se šíří z ohřívajícího konce na konec druhý. V tomto případě je důležitý materiál, ze kterého je tyč vyrobena, protože například přenos tepla v hliníkovém materiálu probíhá rychleji než v nerezové oceli. To závisí na experimentálně určené veličině součiniteli tepelné vodivosti (λ). Tento jev se nazývá vedení tepla [2],[11].

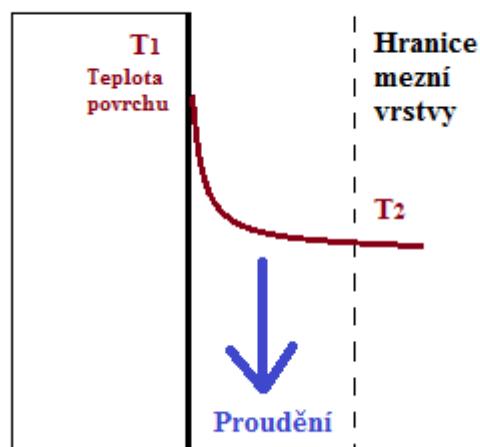
Lze vysvětlit tak, že atomy kovu v tyči přijímají energii a tím se zvyšuje jejich amplituda kmitání. Díky tomuto jevu se předává energie z jednoho atomu na dalším a energie se tak šíří podél kovového materiálu až k místu úchopu, který je horký aniž by se dostal do přímého kontaktu [2],[11].

5.2 Přenos tepla prouděním (konvekcí)

Tento jev nastává, je-li tekutina (např. vzduch nebo voda) ve styku s předmětem vyšší teploty. Teplota tekutiny v místě styku narůstá, roztahuje se a klesá její hustota. Díky tomu se stává lehčí a vlivem vztlaku stoupá vzhůru. Na její místo se dostává část chladnější tekutiny a proces takto pokračuje. Toto je příklad proudění přirozeného [2].

V asynchronních motorech se však uplatňuje hlavně proudění nucené. To nastává, je-li tekutina uměle uvedena do pohybu tak, aby obtékala těleso, s nímž teplo vyměňuje. Umělé proudění bývá (pokud přihlídneme k toku média) laminární, turbulentní nebo přechodné. Nejjednodušeji se popisuje případ, proudí-li tekutina v kanálu kruhového průřezu [2].

Na obrázku č. 2 je naznačeno proudění plynu (například vzduchu) podél stěny. Jedná se o příklad proudění nuceného, protože stěna předává energii vzduchu a ten proudí směrem dolů. O přirozené proudění by se mohlo jednat v případě, kdy by vzduch přijímal teplo a samovolně stoupal vzhůru. Hranice mezní vrstvy je hranice, kde již nedochází k tepelné výměně a proudění tak již od tohoto místa neovlivňuje dané látkové prostředí.



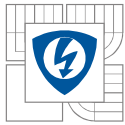
Obrázek 2: Přenos tepla prouděním u plochy stěny

Vztah vychází z výpočtu tepelného toku skrz plochu stěny. Tepelný tok je intenzita přenosu tepla za jednotku času. K tepelnému toku tedy dochází u každé formy přenosu tepla [2]. Platí vztah:

$$\Phi = \alpha \cdot S \cdot (T_2 - T_1) \quad [\text{W}] \quad (5.1)$$

Kde

S	...	plocha stěny	$[\text{m}^2]$
α	...	součinitel přestupu tepla	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$
T_2	...	koncová teplota	$[\text{K}]$
T_1	...	počáteční teplota	$[\text{K}]$



5.3 Přenos tepla zářením (radiací)

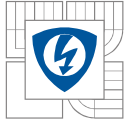
Záření je přenos tepla prostřednictvím elektromagnetických vln. Pro tento typ přenosu není třeba žádného hmotného prostředí. Výkon vyzařujícího tělesa (P_r), resp. rychlost jakou je energie vyzařována elektromagnetickými vlnami. Závisí na emisivitě, velikosti povrchu, teplotě tělesa a je dán Stefan-Boltzmannovým zákonem [11]:

$$P_r = \sigma \varepsilon S T^4 \quad [\text{W}] \quad (5.2)$$

Kde

S	...	povrch tělesa	[m ²]
T	...	teplota	[K]
σ	...	Stafan-Boltzmannova konstanta	[$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$]
ε	...	emisivita	[-]

Z rovnice 5.2 plyne, že každý předmět je zdrojem záření. Část záření se při dopadu na jiné těleso odrazí, část projde skrz a část se pohltí. Pokud těleso přijme více energie, než vyzáří, zahřívá se. Pokud naopak vyzařuje více energie, než přijímá, ochlazuje se [11].



6 TEPELNÝ VÝPOČET POMOCÍ NÁHRADNÍCH TEPELNÝCH OBVODŮ

Metoda tepelných odporů je založena na analogickém řešení odporů elektrických. Je používána pro dvoj i trojrozměrné úlohy. Pomocí ní lze analyticky spočítat střední hodnoty teplot různých částí stroje, které jsou uvažovány jako homogenní tělesa [1].

Výpočet pro každou část stroje vychází ze základní rovnice:

$$\vartheta_1 - \vartheta_2 = P_{12} \cdot R_{12} \quad (6.1)$$

Kde

ϑ_1, ϑ_2	...	střední teploty jednotlivých částí stroje	[K]
P_{12}	...	tepelný tok mezi jednotlivými částmi	[W]
R_{12}	...	tepelný odpor mezi částmi stroje	[K.W ⁻¹]

Je zřejmé, že přesnost výpočtu je spjatá s počtem prvků v daném schématu, které charakterizují jednotlivé části stroje. Při samotném sestavování tepelného obvodu jsou stator s rotorem rozděleny na tři tepelně stejnorodá tělesa, která generují teplo. Následuje výčet všech složek náhradního tepelného schématu včetně jejich vysvětlení a doplněným schématem [1].

Stator

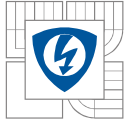
Ve statoru se z hlediska tepelných ztrát uplatňují ztráty v drážkové části vinutí ΔP_{dr1} , dále ztráty v obou čelech statorového vinutí $\Delta P_{\varepsilon 2}$ a ztráty v železe statoru ΔP_{Fe1} [1].

Ve schématu se uplatňují tyto tepelné odpory:

- tepelný odpor drážkové izolace R_{i1}
- tepelný odpor části od vinutí k chladicímu vzduchu v radiálních ventilačních kanálech R_{vk1}
- tepelný odpor čel statorového vinutí $R_{\varepsilon 1}$
- tepelný odpor drážek statoru R_{dr1}

Rotor

V rotoru jsou tepelné ztráty obdobného charakteru jako ztráty ve statoru. Jsou značeny indexem 2 následovně: ztráty v drážkové části vinutí ΔP_{dr2} , dále ztráty v obou čelech rotorového vinutí $\Delta P_{\varepsilon 2}$ a ztráty v železe statoru ΔP_{Fe2} [1].



Také tepelné odpory jsou pro rotor obdobné jako pro stator:

- tepelný odpor drážkové izolace R_{i2}
- tepelný odpor části od vinutí k chladicímu vzduchu v radiálních ventilačních kanálech R_{vk2}
- tepelný odpor čel statorového vinutí $R_{\check{c}2}$
- tepelný odpor drážek statoru R_{dr2}

Vzduchová mezera

V náhradním tepelném obvodu je také zohledněna tepelná vazba mezi rotorem a státorem zastoupená tepelným odporem R_{δ} [1].

Následuje přehled výpočtu jednotlivých tepelných odporů uplatňovaných v náhradním tepelném schématu.

Všechny další výpočty v této kapitole jsou inspirovány odborným zdrojem [1].

- **Tepelný odpor drážkové izolace R_i [K.W⁻¹]**

$$R_i = \frac{d_{iz}}{\lambda_i \cdot S_i} \quad (6.2)$$

Kde

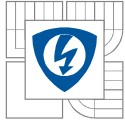
d_{iz}	...	tloušťka drážkové izolace	[m]
λ_i	...	součinitel tepelné vodivosti izolace	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
S_i	...	plocha izolace	[m ²]

- **Tepelný odpor čel vinutí $R_{\check{c}}$ [K.W⁻¹]**

$$R_{\check{c}} = \frac{b_{iz}}{\lambda_i \cdot S_{\check{c}}} + \frac{1}{\alpha_{\check{c}} \cdot S_{\check{c}}} \quad (6.3)$$

Kde

b_{iz}	...	tloušťka izolace cívk	[m]
λ_i	...	součinitel tepelné vodivosti izolace cívk	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
$S_{\check{c}}$	...	ochlazovaná plocha čel vinutí	[m ²]
$\alpha_{\check{c}}$	...	součinitel přestupu tepla	[W.m ⁻² .K ⁻¹]



▪ **Tepelný odpor kovu vinutí R_v [$K \cdot W^{-1}$]**

$$R_v = \frac{l_{Fe} + l_\xi}{12 \cdot Q_s \cdot V_{ef} \cdot S_{ef} \cdot \lambda} = \frac{R'_{dr}}{2} = R_{dr} \quad (6.4)$$

Kde

V_{ef}	...	efektivní počet vodičů v drážce	[m]
λ	...	součinitel tepelné vodivosti kovu	[$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]
S_{ef}	...	efektivní průřez vodiče	[m^2]
l_ξ	...	délka čela	[m]
l	...	osová délka železa statoru	[m]
Q_s	...	počet drážek statoru	[-]

▪ **Tepelný odpor části od vinutí k chladicímu vzduchu v radiálních ventilačních kanálech R_{vk} [$K \cdot W^{-1}$]**

$$R_{vk} = \frac{b_{iz}}{\lambda_i \cdot S_\xi} + \frac{1}{\alpha_{vk} \cdot S_{vk}} \quad (6.5)$$

Kde

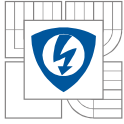
b_{iz}	...	tloušťka izolace cívk	[m]
λ_i	...	součinitel tepelné vodivosti izolace cívk	[$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]
S_ξ	...	ochlazovaná plocha čel vinutí	[m^2]
α_{vk}	...	součinitel přestupu tepla	[$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$]
S_{vk}	...	plocha povrchu vinutí v radiálních kanálech	[m^2]

▪ **Tepelný odpor železa statoru popř. rotoru R_{Fe} k chladicímu okolnímu vzduchu [$K \cdot W^{-1}$]**

$$R_{Fe} = \frac{1}{\alpha_{er} \cdot S_{er} + \alpha_{ir} \cdot S_{ir}} \quad (6.6)$$

Kde

α_{er}	...	souč. přest. tepla vnějšího povrchu paketů	[$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$]
α_{ir}	...	souč. přest. tepla vnitřního povrchu paketů	[$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$]
S_{er}	...	vnější povrch paketů předávajících teplo	[m^2]
S_{ir}	...	vnitřní povrch paketů předávajících teplo	[m^2]



- **Tepelná vazba mezi státorem a rotorem R_δ [K.W⁻¹]**

$$R_\delta = \frac{1}{\alpha_\delta \cdot S_\delta} \quad (6.7)$$

Kde

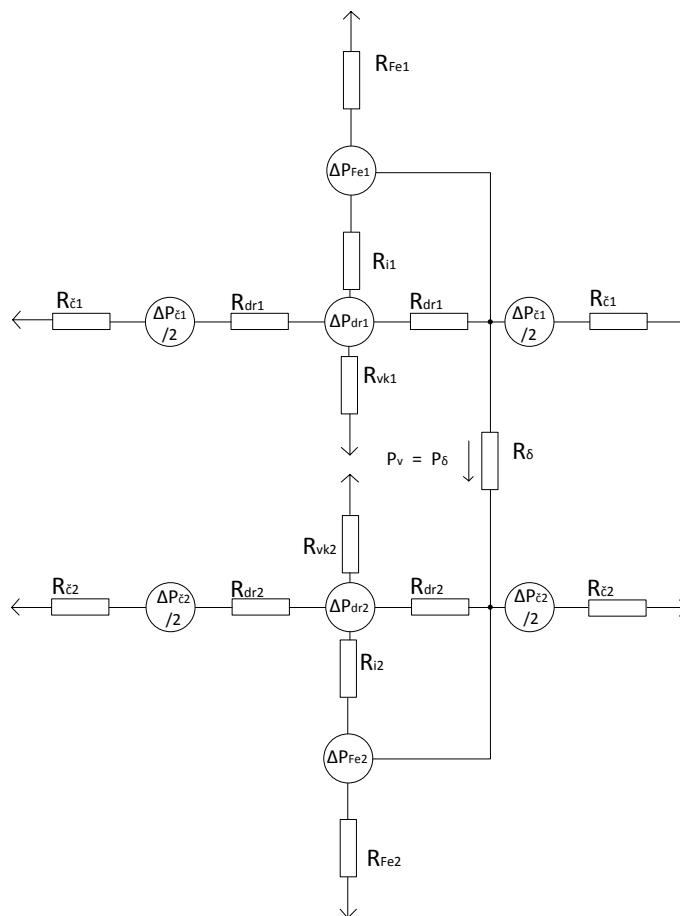
α_δ	...	součinitel přestupu tepla vzduch. mezery	[W.m ⁻² .K ⁻¹]
S_δ	...	plocha vzduchové mezery	[m ²]

- **Vyrovnávací tepelný tok P_v [W]**

$$P_v = \frac{\vartheta_{Fe,s} - \vartheta_{Fe,r}}{R_\delta} \quad (6.8)$$

Kde

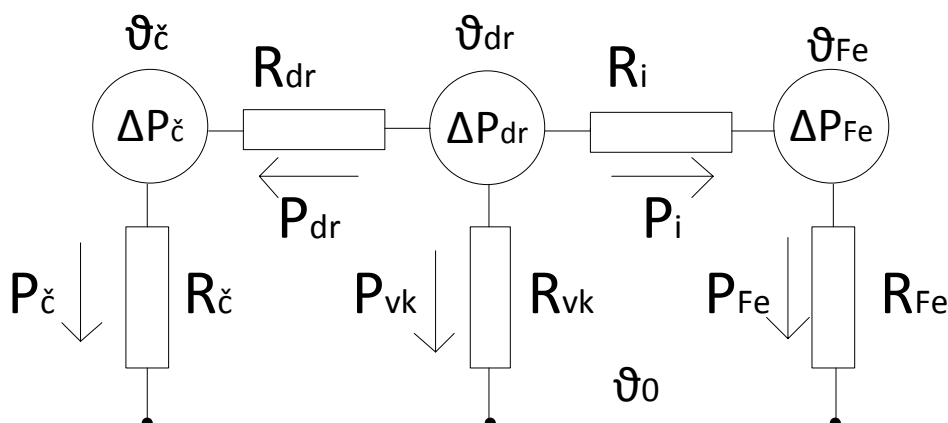
$\vartheta_{Fe,s}$	...	teplota železa statoru	[K]
$\vartheta_{Fe,r}$	...	teplota železa rotoru	[K]
R_δ	...	tepelná vazba mezi státorem a rotorem	[K.W ⁻¹]



Obrázek 3: Úplné náhradní tepelné schéma asynchronního stroje

7 ANALYTICKÝ VÝPOČET

Pro analytický výpočet bylo využito zjednodušeného náhradního tepelného obvodu asynchronního motoru při konstantní teplotě chladicího vzduchu.



Obrázek 4: Náhradní tepelný obvod statoru asynchronního motoru při konstantní teplotě okolního vzduchu

Z obrázku 4 vyplývá celkem osm neznámých – ϑ_{dr} , $\vartheta_{\check{c}}$, ϑ_{Fe} (střední hodnoty teplot postupně: drážkové části vinutí, čel vinutí a železa statoru) a dále P_i , P_{dr} , P_{vk} , $P_{\check{c}}$, P_{Fe} (tepelné toky popsané postupně: procházející mezi stěnami drážek, od drážkové části vinutí, k chladicímu vzduchu v radiálních ventilačních kanálech, odvádějící teplo z čelních částí vinutí a tepelný tok odvádějící teplo ze statorového svazku) [1].

$$\Delta P_{dr} + \Delta P_{\check{c}} + \Delta P_{Fe} = P_{\check{c}} + P_{vk} + P_{Fe} \quad (7.1)$$

$$P_{\check{c}} = \Delta P_{\check{c}} + P_{dr} \quad (7.2)$$

$$P_{Fe} = P_i + \Delta P_{Fe} \quad (7.3)$$

$$\vartheta_{dr} - \vartheta_0 = P_{vk} \cdot R_{vk} \quad (7.4)$$

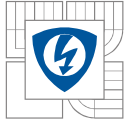
$$\vartheta_{\check{c}} - \vartheta_0 = P_{\check{c}} \cdot R_{\check{c}} \quad (7.5)$$

$$\vartheta_{Fe} - \vartheta_0 = P_{Fe} \cdot R_{Fe} \quad (7.6)$$

$$\vartheta_{dr} - \vartheta_{\check{c}} = P_{dr} \cdot R_{dr} \quad (7.7)$$

$$\vartheta_{dr} - \vartheta_{Fe} = P_i \cdot R_i \quad (7.8)$$

Nyní je nutné z rozměrů a materiálových vlastností stroje vypočítat jednotlivé tepelné odpory, za pomoci rovnic v předchozí kapitole. Tyto výpočty jsou inspirované odbornou literaturou [1]. Hodnoty jsou odměřené nástroji v programu Autodesk Inventor na modelu stroje nebo volené na základě doporučení v odborné literatuře.



Tepelný odpor drážkové izolace:

$$R_i = \frac{d_{iz}}{\lambda_i \cdot S_i} = \frac{0,0002}{0,1 * 0,0764} = 0,0262 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$$
$$S_i = Q_m \cdot O_d \cdot l_{Fe} = 24 \cdot 0,0295 \cdot 0,108 = 0,0764 \text{ m}^2$$

Tepelný odpor čel vinutí:

$$R_{\zeta} = \frac{b_{iz}}{\lambda_i \cdot S_{\zeta}} + \frac{1}{\alpha_{\zeta} \cdot S_{\zeta}} = \frac{0,0002}{0,1 \cdot 0,0342} + \frac{1}{96,4 * 0,0342} = 0,362 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$$
$$\alpha_{\zeta} = 10 \cdot (1 + 0,54 \cdot v^2) = 10(1 + 0,54 * 16) = 96,4$$

Tepelný odpor železa statoru k chladicímu vzduchu:

$$R_{Fe} = \frac{1}{\alpha_{er} \cdot S_{er} + \alpha_{ir} \cdot S_{ir}} = \frac{1}{19,0,0431 + 18,571 \cdot 0,021} = 0,827 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$$
$$\alpha_{ir} = \frac{\lambda}{2\delta} = \frac{0,026}{2 \cdot 0,0007} = 18,571 \text{ W} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K}$$

Nyní přichází na řadu výpočet ztrát v čelech vinutí. Z důvodu, že je znám pouze objem vinutí a také objem obou čel, lze spočítat hodnotu ztrát v obou čelech díky poměrnému přepočtu vůči celému vinutí následovně:

$$\Delta P_{\zeta} = \Delta P_v \cdot \frac{V_{\zeta}}{V_v} = 65 \cdot \frac{8,170 \cdot 10^{-5}}{2,1864 \cdot 10^{-4}} = 24,29 \text{ W}$$

V dalším kroku se určí ztráty drážkové části vinutí, které jsou rozdílem celkových ztrát ve vinutí a ztrát v obou čelech:

$$\Delta P_{dr} = \Delta P_v - \Delta P_{\zeta} = 65 - 24,29 = 40,71 \text{ W}$$

Určení tepelných teplot a tepelných toků:

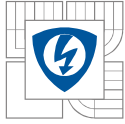
Zkoumaný asynchronní motor se uvažuje, z důvodu absence ventilačních kanálů bez vyrovnávacího tepelného toku. Z této skutečnosti vyplývá, že $P_{vk} = 0 \text{ W}$. Je to jisté zjednodušení, díky němuž se předpokládá a zároveň z rovnice 7.4 vyplývá, že $\vartheta_{dr} = \vartheta_0$, za daných podmínek 22 °C. Všechny teploty uvedené v této kapitole jsou pro lepší přehlednost uváděny přímo v °C.

Ze vztahu 7.6 lze vyjádřit teplotu železa jako $\vartheta_{Fe} = P_{Fe} \cdot R_{Fe} + \vartheta_0$, přičemž za tepelný tok dosadíme rovnici 7.3 a získáme vztah:

$$\vartheta_{Fe} = (P_i + \Delta P_{Fe}) \cdot R_{Fe} + \vartheta_0$$

Finální podobu vztahu dostaneme dosazením rovnice 7.8 za P_i následovně:

$$\vartheta_{Fe} = \left(\frac{\vartheta_{dr} - \vartheta_{Fe}}{R_i} + \Delta P_{Fe} \right) \cdot R_{Fe} + \vartheta_0$$



Protože se teplota železa vyskytuje na obou stranách rovnice, je nutné ji vyjádřit:

$$\vartheta_{Fe} = \frac{\vartheta_{dr} \cdot R_{Fe} + R_i \cdot R_{Fe} \cdot \Delta P_{Fe} + \vartheta_0 \cdot R_i}{R_{Fe} + R_i} = \frac{22 \cdot 0,827 + 0,0262 \cdot 0,827 \cdot 52 + 22 \cdot 0,0262}{0,827 + 0,0262} = 23,32 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Z rovnice 7.6 lze vyjádřit tepelný tok železa statoru následovně:

$$P_{Fe} = \frac{\vartheta_{Fe} - \vartheta_0}{R_{Fe}} = \frac{23,32 - 22}{0,827} = 1,60 \text{ W}$$

Z rovnice 7.1 je možné vyjádřit a vypočítat tepelný tok obou čel vinutí:

$$\begin{aligned} P_{\zeta} &= \Delta P_{dr} + \Delta P_{\zeta} + \Delta P_{Fe} - P_{vk} - P_{Fe} = \\ &= 40,71 + 24,29 + 52 - 1,60 = 115,4 \text{ W} \end{aligned}$$

Díky znalosti všech neznámých lze podle rovnice 7.5 vypočítat teplotu obou čel statorového vinutí:

$$\vartheta_{\zeta} = P_{\zeta} \cdot R_{\zeta} + \vartheta_0 = 115,4 \cdot 0,362 + 22 = 63,77 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Výpočet tepelného toku od drážkového vinutí podle rovnice 7.2 je následovný:

$$P_{dr} = P_{\zeta} - \Delta P_{\zeta} = 115,4 - 24,29 = 91,11 \text{ W}$$

Poslední neznámou výpočtu je tepelný tok procházející stěnami drážek s teplotním spádem na tepelném odporu drážkové izolace, je dle rovnice 7.8 roven:

$$P_i = \frac{\vartheta_{dr} - \vartheta_{Fe}}{R_i} = \frac{22 - 23,32}{0,0262} = -50,38 \text{ W}$$

Tabulka 3: Přehled vypočítaných teplot a tepelných toků

Vypočítaná veličina	Označení	Vypočítaná hodnota
Teplota okolí a drážkového vinutí	$\vartheta_0, \vartheta_{dr}$	22,00 °C
Teplota statoru	ϑ_{Fe}	23,32 °C
Teplota čel statorového vinutí	ϑ_{ζ}	63,77 °C
Tepelný tok od statoru	P_{Fe}	1,60 W
Tepelný tok od povrchu čel vinutí	P_{ζ}	115,4 W
Tepelný tok od drážkového vinutí	P_{dr}	91,11 W
Tepelný tok stěnami drážek	P_i	-50,38 W

8 ANSYS, INVENTOR A METODA KONEČNÝCH PRVKŮ

8.1 Metoda konečných prvků

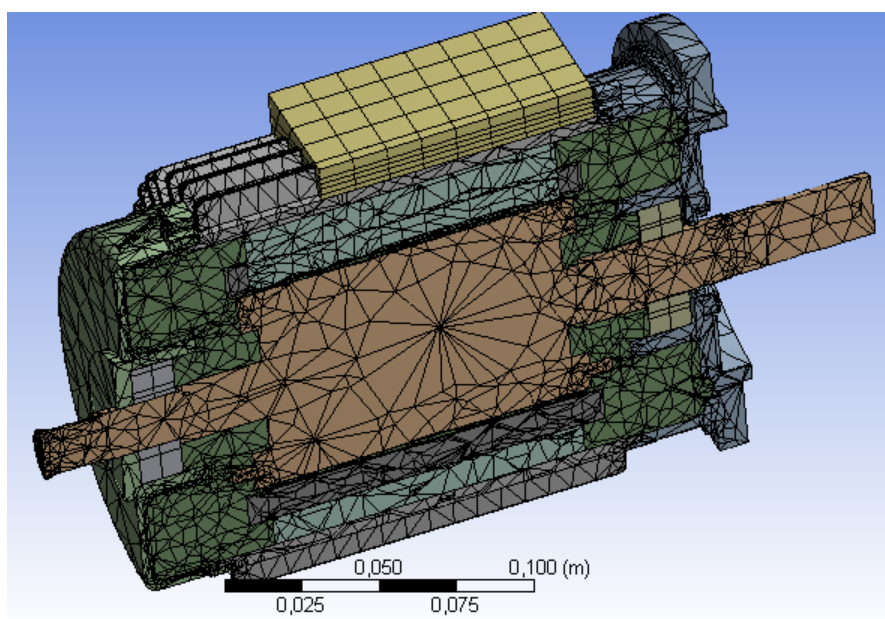
Metoda konečných prvků je metoda určená k řešení rozsáhlé škály problémů. Její rozvoj je úzce spojen s rozvojem výpočetní techniky. Původní určení bylo pro potřeby výpočtu konstrukcí v různých průmyslových odvětvích. Z počátku, kdy se používala pro řešení pružnosti a dynamiky, se postupně rozšířila do oblastí jako proudění kapalin a plynů, šíření tepla, záření, elektromagnetismus apod. [7].

V dnešní době je pro její aplikaci k dispozici mnoho komerčních systémů jako například ANSYS, ABAQUS, Cosmos aj [7]. Cílem tohoto projektu je využití softwaru ANSYS pro analýzu šíření tepla v modelu asynchronního motoru ze zadaných hodnot vnitřní generace tepla jednotlivých součástí motoru.

Jak z názvu vyplývá, základním stavebním kamenem je prvek konečných rozměrů. Řešenou oblast je právě proto nutno rozdělit do konečného počtu podoblastí – prvků. Pro každý z těchto prvků je jeho charakteristikou rozměr, tvar, počet a poloha uzlů. Právě uzly sítě jsou body, v nichž hledáme neznámé parametry [7].

Každý prvek musí mít udané parametry materiálů a definované okrajové podmínky. Tyto podmínky definují a zajišťují polohu tělesa v prostoru [7].

Metoda je ovšem poměrně časově a výpočetně náročná, z čehož plyne, že jedním z omezení je výpočetní výkon. Právě proto se využívá pro výpočet optimalizačních výpočtů pouze v malé míře. Její nespornou výhodou je však jednoduchá změna geometrie a okrajových podmínek. Jednou z dalších výhod je možnost sledovat průběh změny hledaných parametrů v libovolném místě daného modelu v libovolném čase [11].



Obrázek 5: Řez motorem při použití funkce Mesh



8.2 ANSYS Workbench

ANSYS Workbench je softwarové prostředí, které spojuje širokou škálu simulačních metod. S těmito metodami, oboustrannou podporou CAD nástrojů a automatizovaným nástrojem na vytváření sítí dosahuje dobré kompaktnosti v řešení široké škály projektů. Další výhodou je automatická aktualizace projektů a parametrizace veškerých úloh. Pomáhá zvyšovat efektivitu práce, protože jeden projekt (produkt) lze analyzovat ve všech potřebných ohledech v jednom prostředí. ANSYS Workbench je uživatelsky poměrně přívětivá platforma určená pro užití v inženýrské praxi, která je vyvinutá z původního systému ANSYS určeného pro vědce a vědecké účely [10].

8.3 Autodesk Inventor

Autodesk Inventor je pravděpodobně nejrozšířenější CAD aplikací pro 3D konstruování. Obsahuje funkce, které podporují adaptivní a parametrické modelování ve 3D a zároveň vytváření 2D výkresové dokumentace, ale i prezentace, animace, vizualizace aj. Je primárně určená pro operační systém Windows. Každým rokem je vydávána nová verze, přičemž tou nejnovější je Autodesk Inventor 2016. Pro potřebu této bakalářské byl využit Inventor 2015 – Studentská verze.

Další funkcí je skládání sestav, kdy z jednotlivých dílů lze poskládat sestavu a následně simulovat její budoucí uplatnění. Obsahuje i databázi normalizovaný součástí, materiálů atd. Výhodný je i modul pro zpracování plechových součástí, který umožňuje vytvořit výkresovou dokumentaci i pro rozvinutý tvar dané plechové součásti.

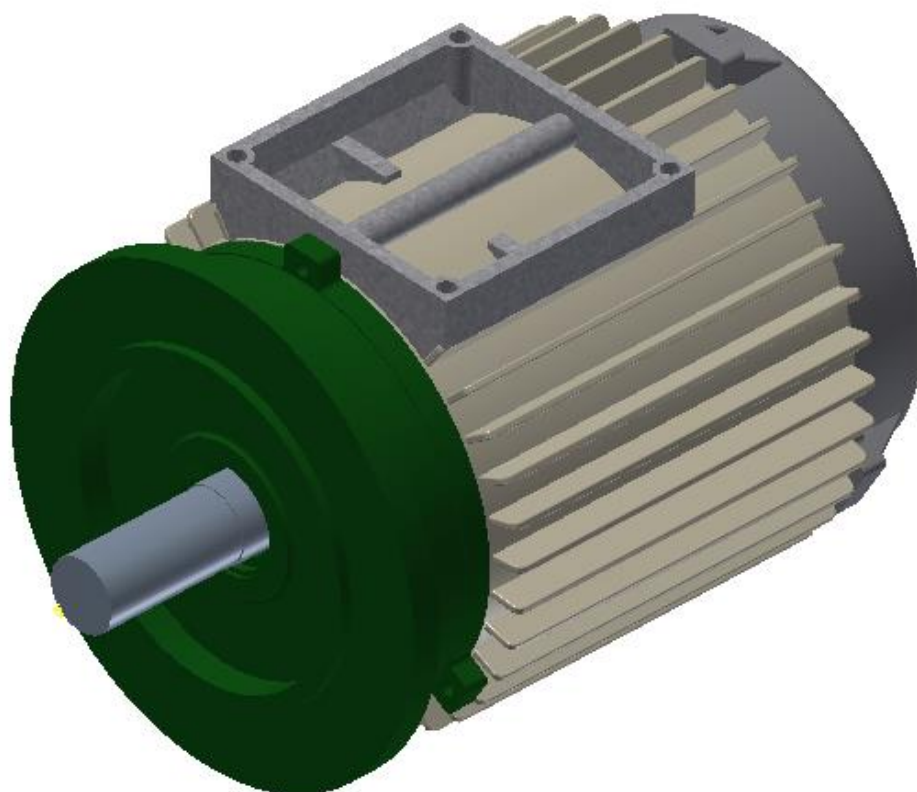
8.4 Tvorba modelu asynchronního motoru v Autodesk Inventor 2015

Model asynchronního motoru, který je podstatou této práce, byl vytvářen bez výkresové dokumentace měřením všech důležitých rozměrů posuvným měřidlem. Model proto není konstruován s přesností na desetiny či setiny milimetru, ale z praktických důvodů byla nejmenší použitá jednotka 0,5 mm.

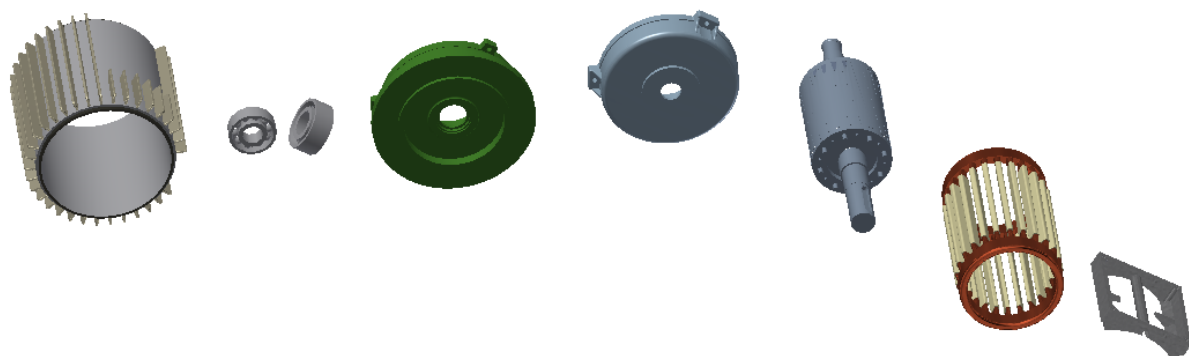
Pro využití k výpočtu tepelného modelu však model dostal jistých zjednodušení, kterými jsou například plná ložiska a svorkovnice, statorové vinutí vyplňující celou drážku nebo omezení zaoblení různých hr. Důvodem je jednodušší vytvoření sítě konečných prvků.

Modelování probíhalo postupným vytvářením jednotlivých součástí se souborovou příponou xxx.ipt. Samotná konstrukce probíhala standardními 2D náčrtky, které jsou postupně vytahovány do prostoru, což dá vzniknout finálnímu 3D modelu dané součásti.

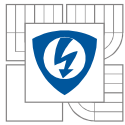
Jednotlivé součásti byly změřeny a pomocí vlastních náčrtů vymodelovány. Tato metoda však není bezchybná a proto v průběhu sestavování docházelo k drobným korekcím v rámci desetin milimetru, tak aby nedocházelo ke kolizím při sestavování finální podoby modelu – sestavy se souborovou příponou xxx.iam. Inventor disponuje nástrojem, který právě tyto kolize dokáže odhalit a zobrazit problémová místa. Sestava byla vytvořena pomocí vazeb mezi jednotlivými součástmi, jakou jsou protilehlé plochy, sousost apod.



Obrázek 6: Kompletní sestava asynchronního motoru



Obrázek 7: Jednotlivé části sestavy asynchronního motoru



9 TEPLOTNÍ ANALÝZA V ANSYS








V nabídce programu ANSYS Workbench je mnoho analýz napříč inženýrským spektrem. V této bakalářské práci je podstatná analýza „Transient thermal“, které je věnována následující kapitola.

9.1 Nastavení výpočtu

Při založení projektu se z levého postranního panelu vybere příslušný typ analýzy a přetáhnutím do projektového schématu se umožní změna jednotlivých parametrů daného modelu.

Dvojklikem na modul „Engineering Data“ se dostaneme do tabulky výběru materiálů, které následně přiřadíme k modelu. K dispozici je více knihoven, které obsahují jednotlivé materiály logicky poskládané podle nějaké společné vlastnosti či účelu jejich uplatnění. Na obrázku 8 jsou zobrazeny dostupné knihovny materiálů.

Pro účely výpočtu byly použity knihovny „General Materials“ a „Thermal Materials“, ze kterých byly vybrány následující materiály: air (vzduch), cooper (měď), aluminum (hliník), stainless steel (nerezová ocel) a structural steel (konstrukční ocel).

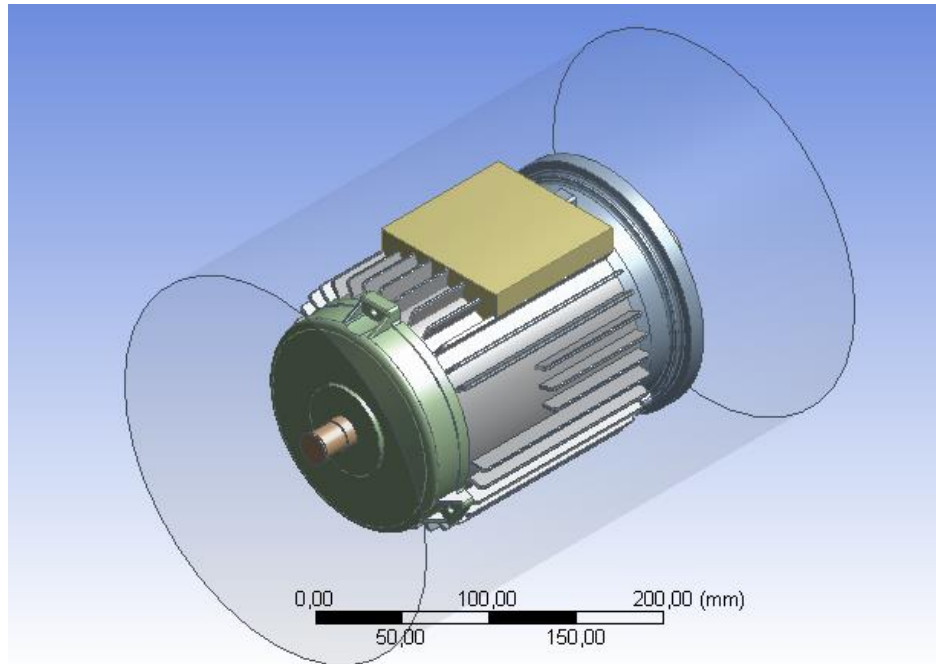
3		General Materials
4		General Non-linear Materials
5		Explicit Materials
6		Hyperelastic Materials
7		Magnetic B-H Curves
8		Thermal Materials
9		Fluid Materials

Obrázek 8: Knihovny materiálů

Dalším bodem nastavení je modul „Geometry“. Znovu dvojklikem se dostáváme do úplně nového okna - DesignModeler. Zde je nutné nejprve naimportovat model vytvořený v Inventoru. Tento model byl z Inventoru vyexportován s příponou .sat. Vybereme tedy záložku „File“ a následně „Import External Geometry File...“. Před samotným importováním je ještě nutné zvolit jednotku shodnou s jednotkou, která byla použita při modelování (milimetry) a v nastavení parametrů položku „Add Frozen“ změnit na „Add Material“. Následně stačí kliknout na tlačítko „Generate“ a nechat program model vygenerovat do prostředí ANSYS.

Druhou nezbytností, je uzavřít model do vzduchového obalu. To se provede funkcí „Enclosure“. V nastavení funkce vybereme v poli „Shape“ možnost „Cylinder“ a poté v poli „Cylinder alignment“ zvolíme správnou orientaci vzduchového válce, do kterého je následně model uzavřen. Nastavení se znovu odsouhlasí políčkem „Generate“. Po chvíli by se, při správném rýsování, měl objevit výsledná geometrie použitelná pro výpočet. V levém dialogovém okně, kde je počet částí, ze kterých je model složen, se nyní počet zvýší o počet „vzduchových částí“. V mém případě to byly dvě – vzduch obepínající motor zvenčí a vzduch vyplňující vnitřní prostor motoru.

V některých případech se může stát, že se těchto vzduchových částí vytvoří více nebo uzavírání úplně selže. Poté je nutné přistoupit k postupnému uzavírání do vzduchových obalů. Například tak, že nejprve uzavřeme samostatný rotor a následně až celý motor. Díky poměrně přesnému rýsování a vytvoření celé sestavy jsem podobné problémy neměl a vše bylo generováno automaticky.

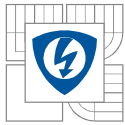


Obrázek 9: Uzavřený model funkci Enclosure

V následujícím kroku (modul Model) se nastavují jednotlivé parametry modelu. Po dvojkliku se objeví další nové okno „Mechanical“, které je společné pro všechny zbývající moduly v tomto typu analýzy.

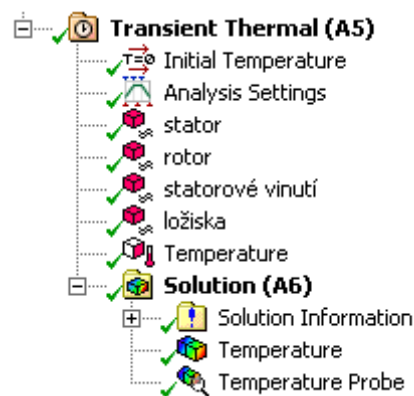
V levém dialogovém okně je znovu zobrazen seznam všech součástí, ze kterých je model složen. Nyní je důležité přiřadit materiály k jednotlivým součástím. To se provede po označení dané součásti, kde se ve spodní části objeví její vlastnosti. V řádku „Material assignment“ přiřadíme součástem danou materiálovou vlastnost. Nesmíme zapomenout na vygenerovaný „vzduchový obal“, protože vzduchovým se stává až ve chvíli, kdy je mu přiřazen parametr vzduchu v materiálových vlastnostech.

Další nedílnou součástí tohoto modulu je funkce „Mesh“, která má za úkol vytvořit síť konečných prvků celého modelu. Zde nastal problém, který bylo třeba vyřešit. ANSYS nebyl schopen síť konečných prvků vypočítat a po enormně dlouhém času výpočtu jsem ho byl nucen přerušit. Po důkladném hledání problému a konzultaci s vedoucím práce bylo nalezeno několik ploch šířky v řádu tisíců milimetrů, které obepínaly statorové vinutí a znemožňovaly výpočet dokončit. Bylo proto nutné tuto vadu odstranit. S touto úpravou bylo zjednodušeno i několik dalších prvků. Jednalo se o zaoblení na statorovém vinutí a zaoblení na žebrech pasivního chlazení. Po těchto drobných korekcích byla výsledná síť konečných prvků vygenerována bez problémů.



Posledním krokem je nastavení modulu „Setup“. V tomto modulu se nastavují okrajové podmínky, zdroje tepelné energie apod. Jak je patrné ze stromové struktury na obrázku 10, je třeba nastavit počáteční teplotu „Initial Temperature“ na teplotu, která byla v laboratorních podmínkách při měření reálného motoru, tedy přibližně 22 °C. V řádku „Analysis Settings“ se nastavuje hlavně celkový čas a počet kroků simulace. Další čtyři řádky pojmenované podle jednotlivých částí motoru jsou ve skutečnosti funkce „Internal Heat Generation“, tedy vnitřní generace tepla. Tabulka 4 je tabulkou hodnot, zadávaných pro potřebu výpočtu. Do ANSYS se zadává hodnota „Magnitude“, což jsou ztráty v dané části motoru přepočtené na jeden metr krychlový materiálu. Pro úplnost je v tabulce 4 také přepočtená hodnota ztrát v dané části motoru ve wattech.

Ve stromové struktuře se nachází ještě řádek „Temperature“. Pro tuto položku se vybere vnější plocha vzduchového obalu a přiřadí se jí teplota (v tomto případě 22 °C). Tím se dává najevo, že okolní vzduch motoru se samozřejmě také ohřívá, ale teplota v místnosti zůstává konstantní a tím se teplo generované uvnitř motoru odvádí pryč. Kdybych tuto funkci nepoužil, znamenalo by to, že je motor uzavřen v izolovaném vzduchovém válci, který nepředává energii okolí a tak by se postupem času ohřál na teplotu motoru.



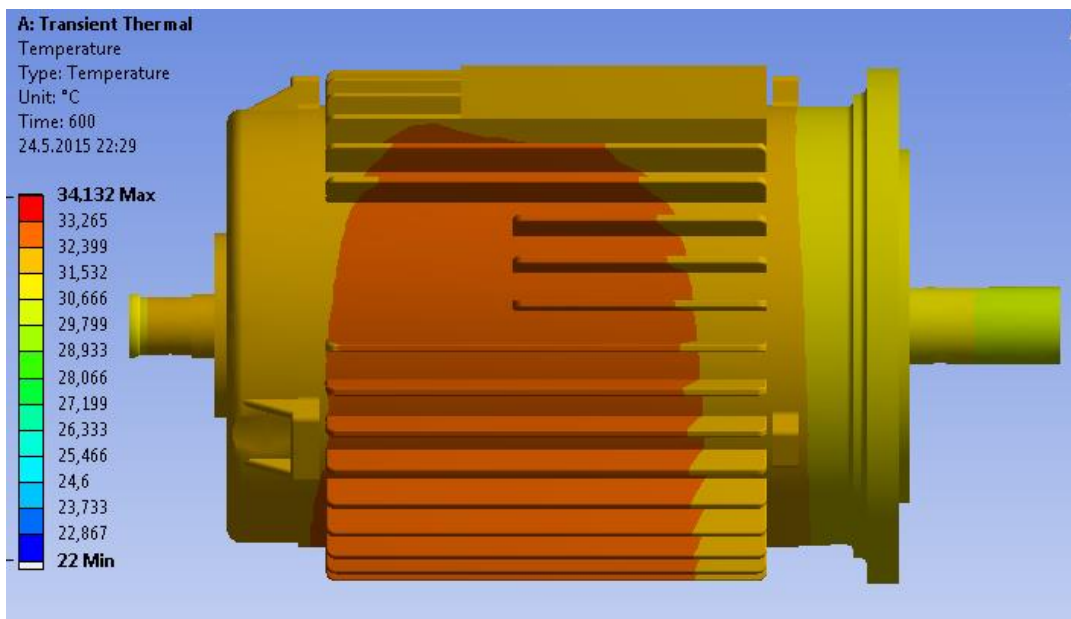
Obrázek 10: Stromová struktura - tepelné parametry motoru + výsledky

Tabulka 4: Hodnoty ztrát a vnitřní generace tepla

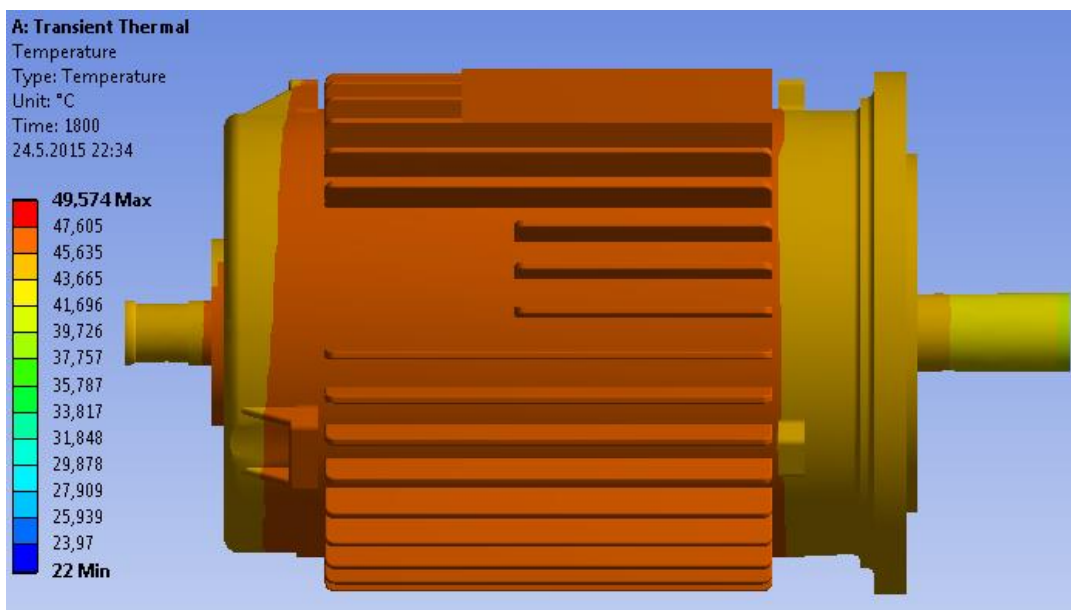
Součást	Magnitude	Objem	Ztráty
	[W/m ³]	[m ³]	[W]
statorové plechy	$8,0457 \cdot 10^4$	$6,4631 \cdot 10^{-4}$	52
rotor	$7,1721 \cdot 10^4$	$6,2743 \cdot 10^{-4}$	45
statorové vinutí	$2,9729 \cdot 10^5$	$2,1864 \cdot 10^{-4}$	65
ložiska	$1,8068 \cdot 10^5$	$4,4277 \cdot 10^{-5}$	8

Poslední fází je výběr typu výstupních hodnot, které chceme vypočítat. Ty se nastavují pod řádkem „Solution“. Nejdůležitější je teplota (Temperature), která v požadovaných intervalech zajistí vypočtení a následné vykreslení teplotního pole v daném čase. Použil jsem také funkci „Temperature Probe“ neboli teplotní sonda, jejíž data jsou srovnána níže s teplotní sondou při měření na reálném motoru (kapitola 11).

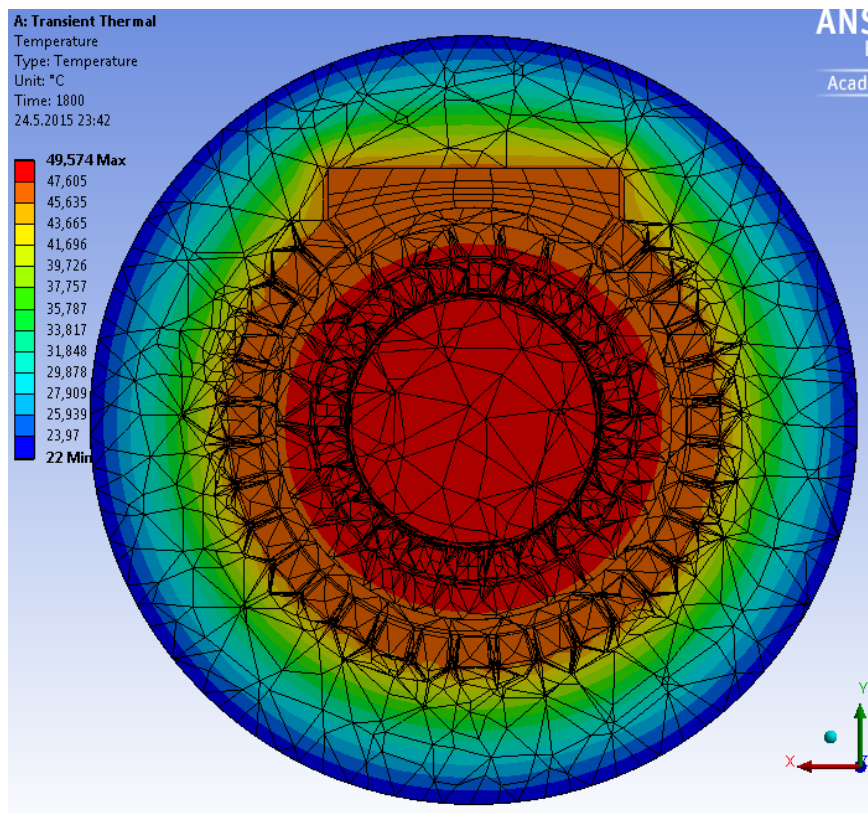
9.2 Výsledky analýzy



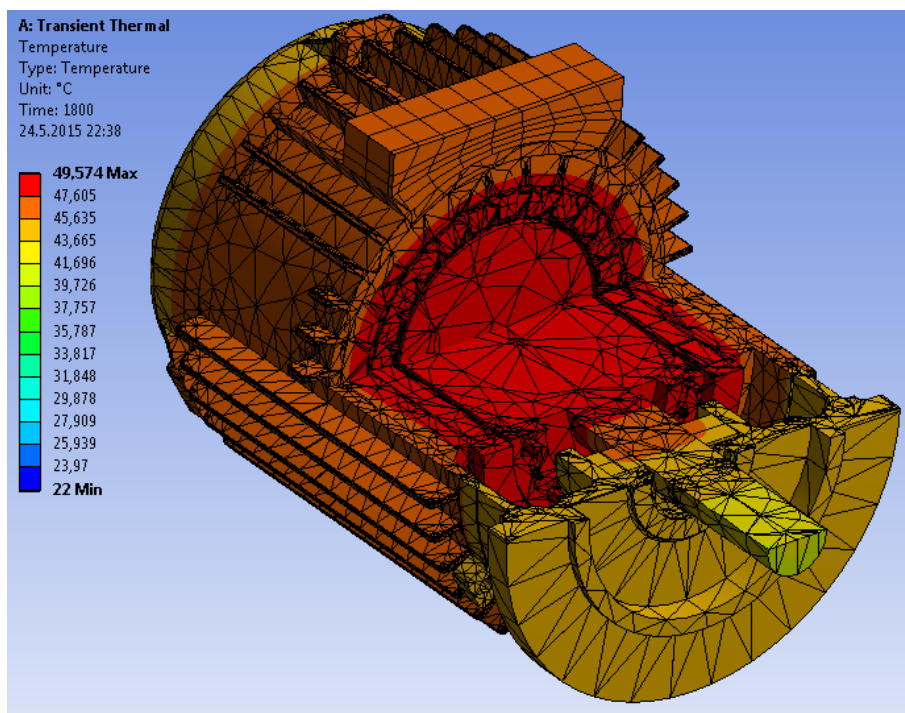
Obrázek 11: Teplotní pole motoru v čase $t = 600$ s



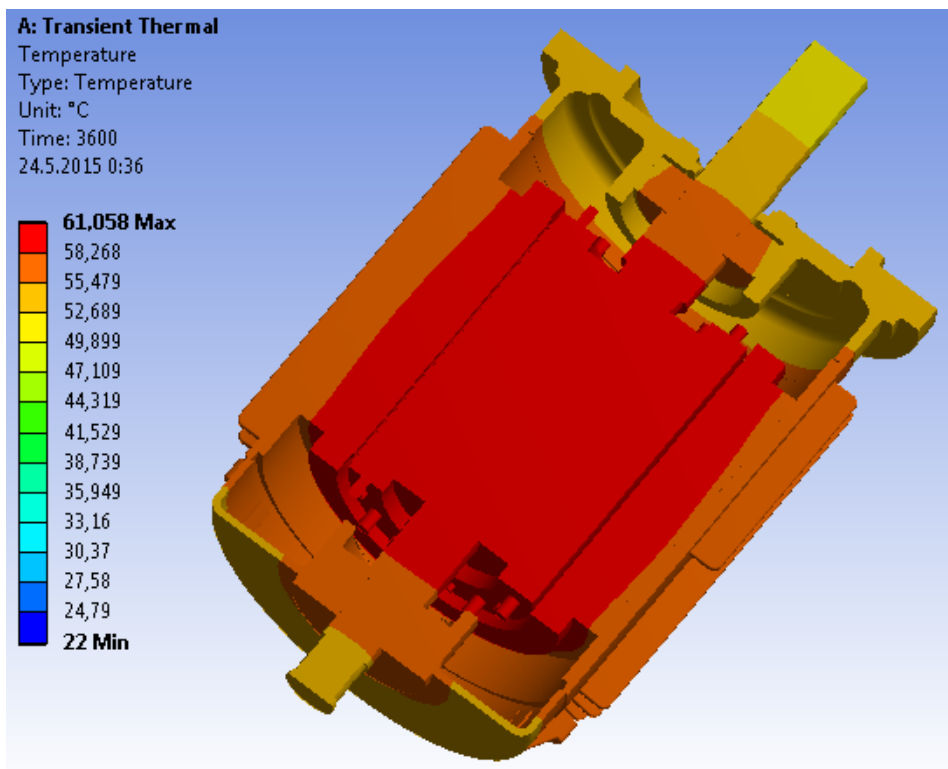
Obrázek 12: Obrázek 11: Teplotní pole motoru v čase $t = 1800$ s



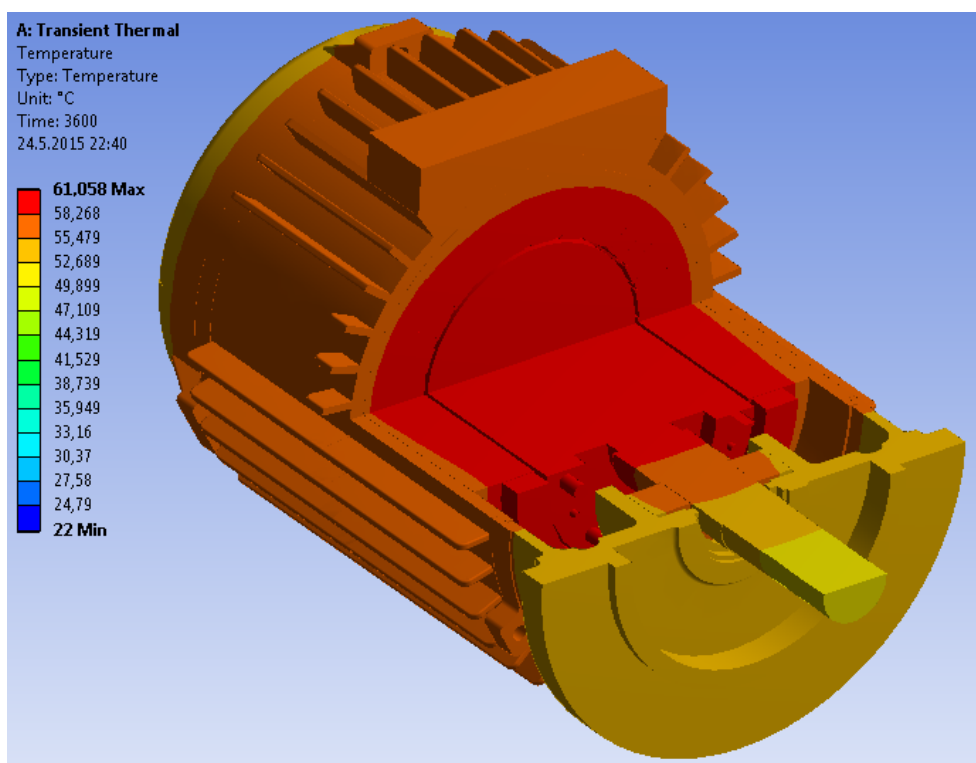
Obrázek 13: Příčný řez motorem i okolním vzduchem v čase $t = 1800$ s



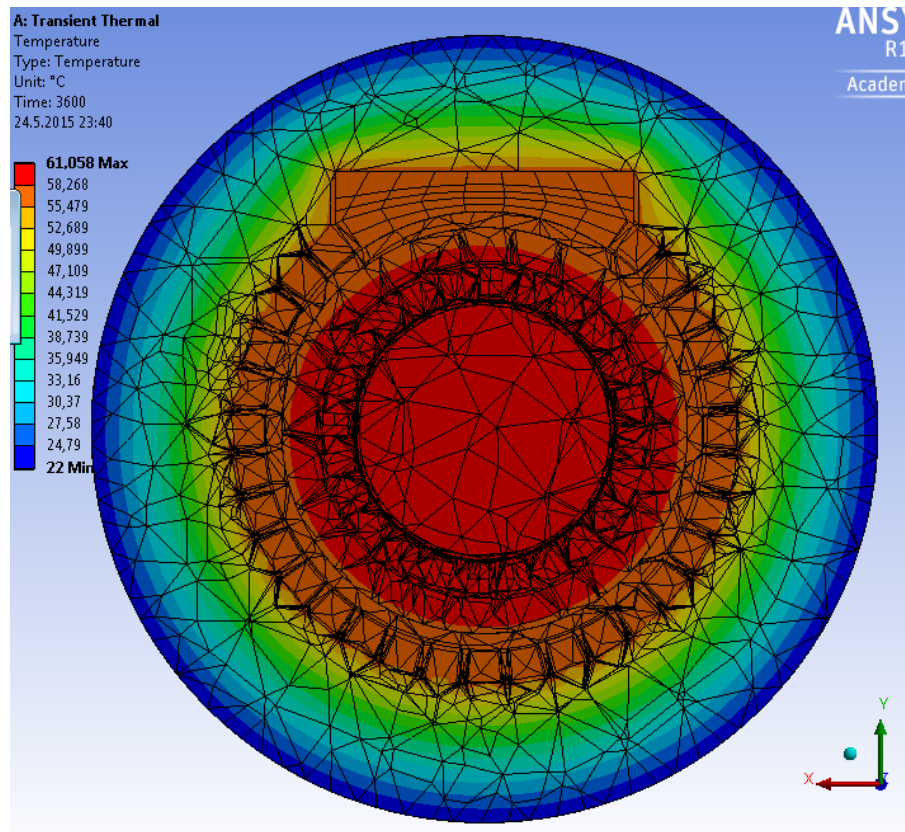
Obrázek 14: Kombinovaný řez motorem v čase $t = 1800$ s



Obrázek 15: Podélný řez motorem v čase $t = 3600$ s



Obrázek 16: Kombinovaný řez motorem v čase $t = 3600$ s

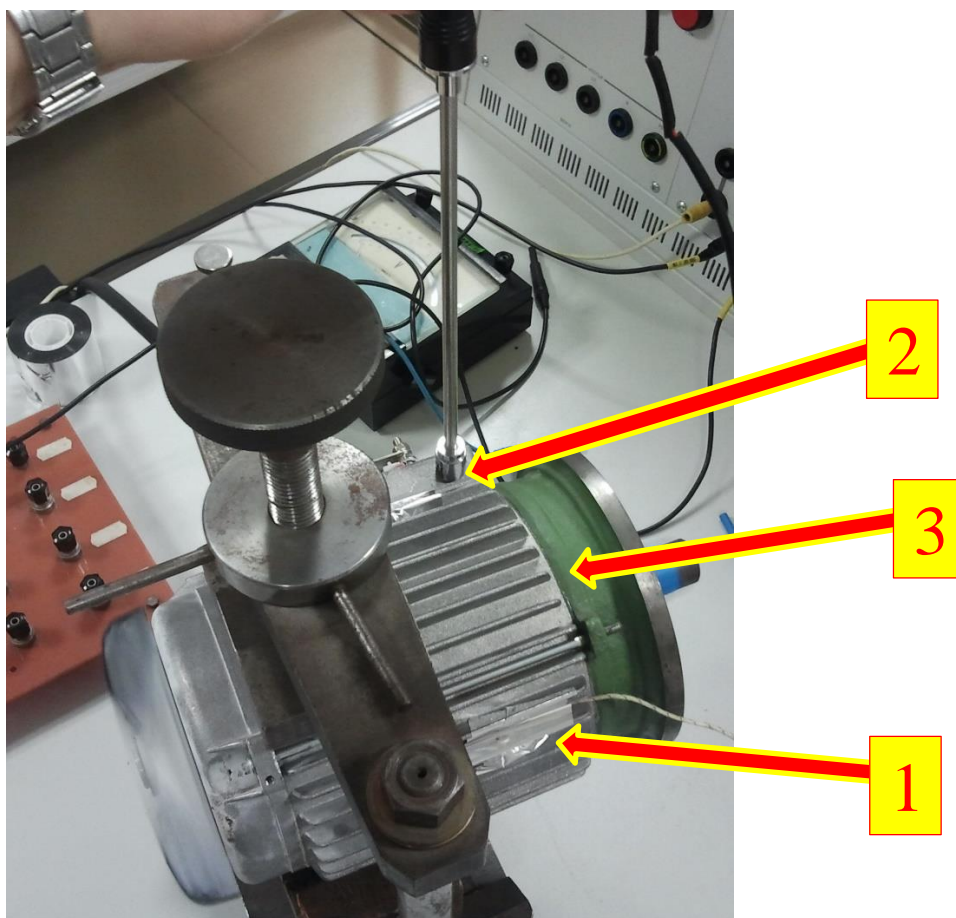


Obrázek 17: Podélný řez motorem i okolním vzduchem v čase $t = 3600$ s

10 MĚŘENÍ NA REÁLNÉM NEZATÍŽENÉM ASYNCHRONNÍM MOTORU BEZ AKTIVNÍHO CHLAZENÍ

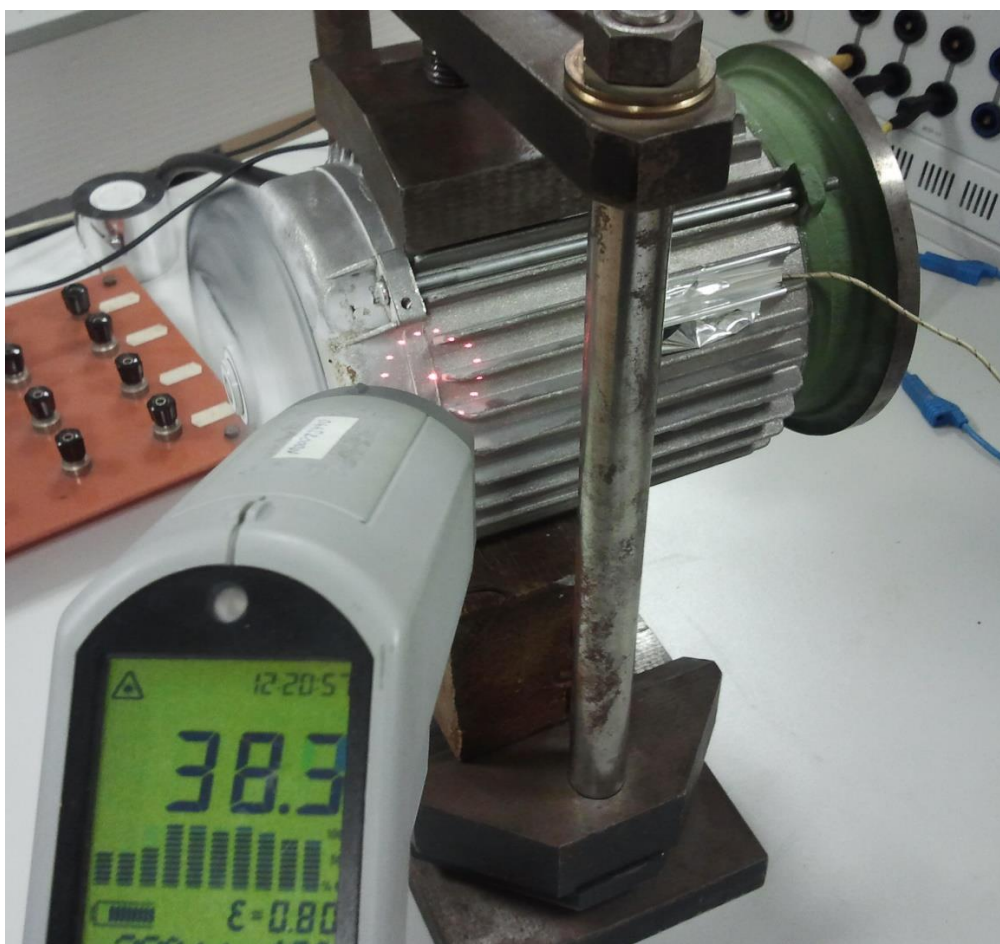
Měření na reálném asynchronním motoru probíhalo do přibližného ustálení teploty po dobu 1 hodiny a 40 minut (6000 s). Třífázový asynchronní motor byl napájen ze standardní sítě o sdruženém napětí $U_s = 400 \text{ V}$. Nutné je podotknout, že měření probíhalo bez krytu na ventilátoru, z čehož vyplývá, že nedocházelo k aktivnímu chlazení motoru.

Postupné oteplování na předem stanovených místech motoru bylo zaznamenáváno v časových intervalech 120 s. První teplotní sondou byl termočlánek staticky upevněný na kostru pomocí hliníkové lepicí pásky obrázek 18. Druhou byla povrchová teplotní sonda Agilent U1182A, která byla přikládána na dvě různá místa – ložiskovém štítu a svorkovnici viz obrázek 18. Na druhém ložiskovém štítu byla teplota měřena pomocí pyrometru Sefram MX4PG obrázek 19. Emisivita materiálu v nastavení pyrometru byla na výchozí hodnotě 0,8; přičemž emisivita daného povrchu mohla být nižší a proto při náhodné kontrole měřených hodnot sondou Agilent, byla teplota vykazovaná dotykovou metodou rozdílná od měření pyrometrem.



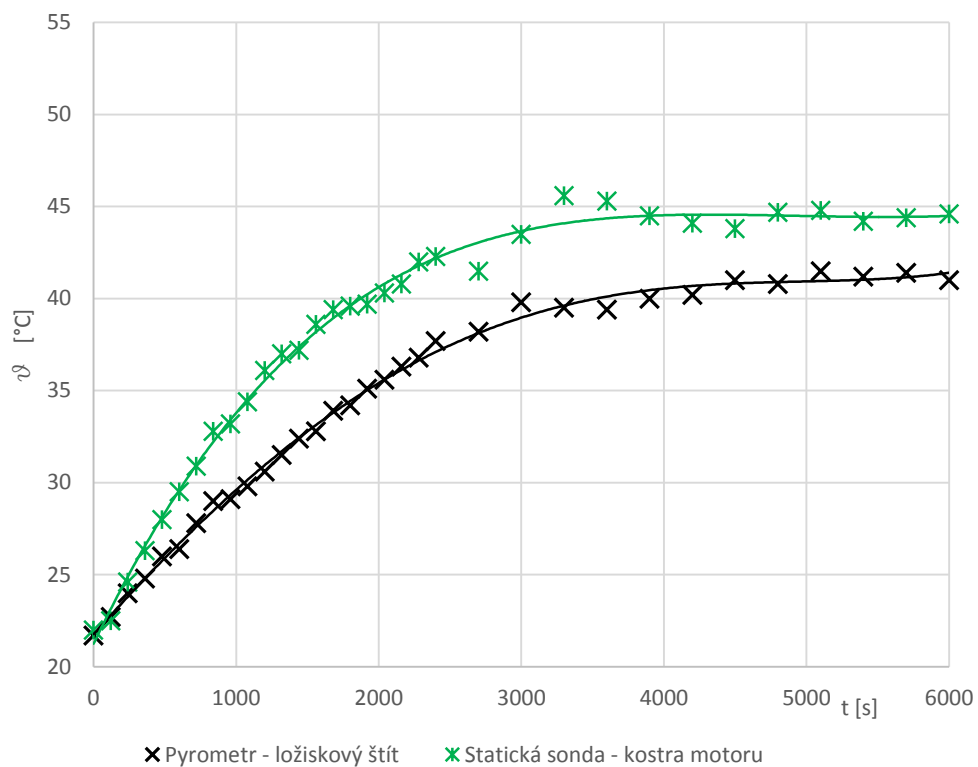
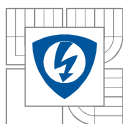
Obrázek 18: Měření na asynchronním motoru.

Na obrázku číslo 18 jsou zobrazeny body měření jednotlivými teplotními čidly. Číslem jedna je označeno statické teplotní čidlo uchycené hliníkovou páskou. Číslo dva (bod na svorkovnici) a tři (bod na ložiskovém štítu) označují body měření povrchové teploty asynchronního motoru teplotní sondou Agilent.

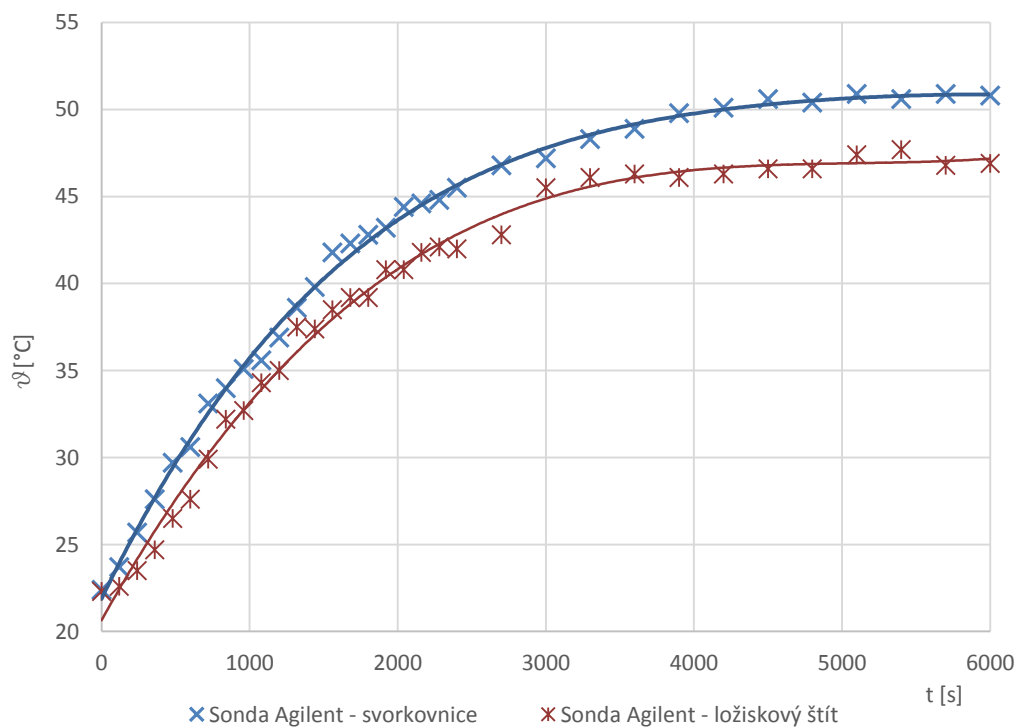


Obrázek 19: Ilustrace místa i způsobu měření pyrometrem.

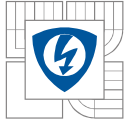
Na obrázku 19 je zachyceno měření povrchové teploty motoru pyrometrem Sefram. Je zde patrná naměřená teplota ve stupních Celsia (nejvýraznější číslo) a také nastavení emisivity na hodnotu 0,8.



Obrázek 20: Oteplovací charakteristiky na kostře a ložiskovém štítu



Obrázek 21: Oteplovací charakteristiky na svorkovnici a druhém ložiskovém štítu



Z oteplovacích charakteristik je patrné, že k ustalování teploty dochází přibližně od času $t = 3600$ s. Nejnižší ustálená teplota ($\vartheta = 41$ °C) byla na ložiskovém štítu, na kterém byla teplota měřena pyrometrem. Naopak nejvyšší ustálená teplota ($\vartheta = 51$ °C) byla naměřena sondou Agilent na svorkovnici motoru.

Dále lze vyčíst, že nejnižší naměřené teplota byla v blízkosti ložiskového štítu. Tento fakt může být dán jednak odlišnou metodou měření, kterou byl pyrometr s automaticky nastavenou hodnotou emisivity, která pravděpodobně neodpovídala skutečné emisivitě daného materiálu. S velkou pravděpodobností lze říci, že hodnota byla ovlivněná do jisté míry ventilátorem (patrné z obrázku 19), na kterém sice nebyl připevněn kryt tak, aby motor ochlazoval, ale vzduch proudil okolo ložiskového štítu a následnou kondukcí ochlazoval i místo, kde bylo prováděno samotné měření.

Vhodné je také porovnat naměřené hodnoty sondou Agilent a to jak na svorkovnici, tak na ložiskovém štítu. Faktem je, že měření na svorkovnici bylo přesnější z důvodu hladší plochy a snazšímu přístupu. Na svorkovnici doléhala měřicí ploška sondy celým svým povrchem, přičemž na oblouku ložiskového štítu nebyla její poloha ideální. Dalším a nejspíše nejdůležitějším důvodem rozdílné teploty je lepší vedení tepla vzhledem ke svorkovnici. Tyto fakty ovlivnily výsledky o konečné 3 °C.

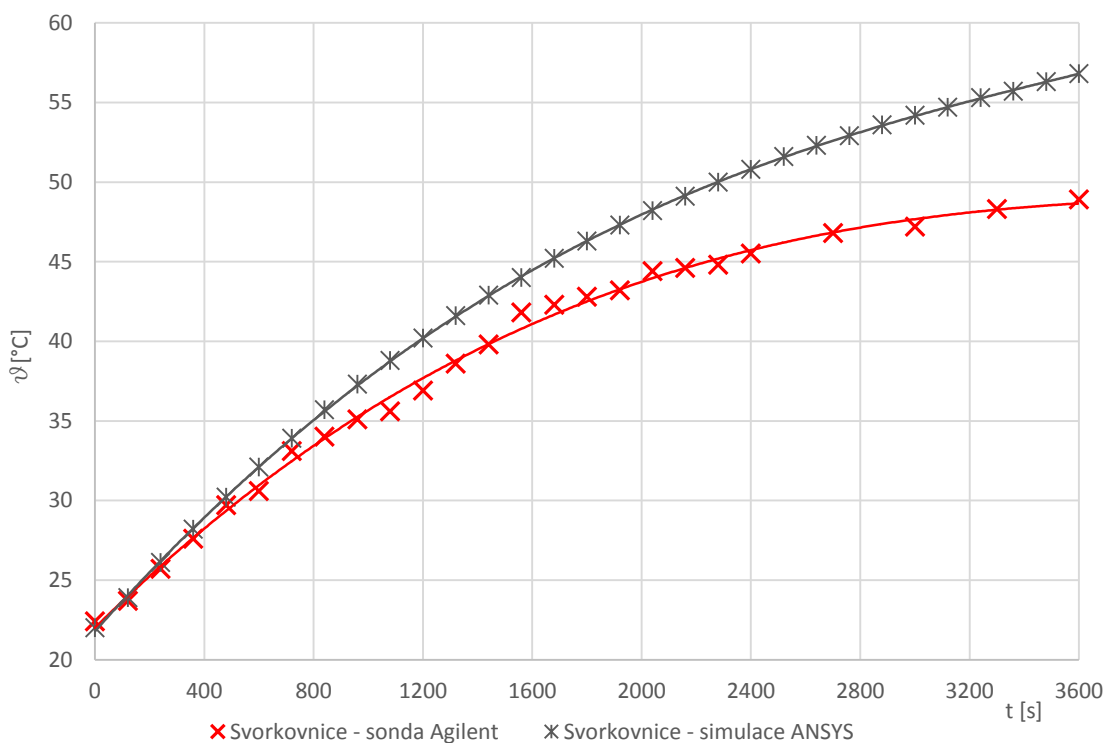
Za zmínku stojí také rozdílná teplota na svorkovnici a mezi chladícími žebry. Domnívám se, že rozdíl je dán použitím rozdílné metody, kdy sonda přilepená hliníkovou páskou nepřiléhala dokonale na povrch kostry motoru, čímž mohl být rozdíl teploty 5 °C způsoben.

11 SROVNÁNÍ POUŽITÝCH METOD

Srovnání použitých metod jsem se rozhodl rozčlenit a srovnat vždy dvě z nich nezávisle. Srovnání všech třech najednou lze jen obtížně, protože použitá analytická metoda je relevantní pouze pro výpočet oteplení statorového vinutí.

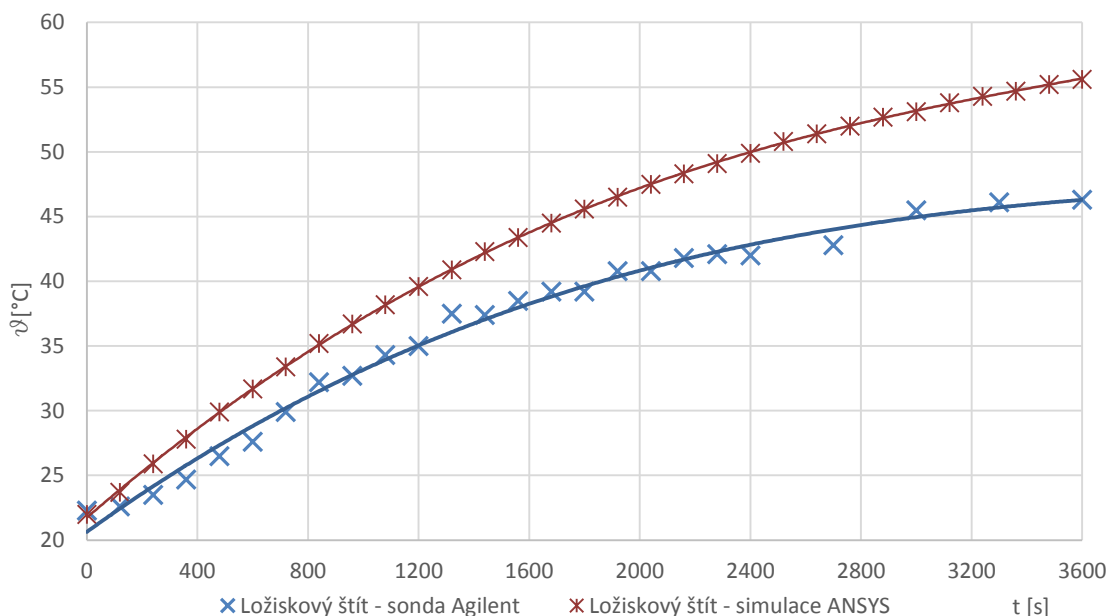
11.1 Srovnání laboratorního měření a analýzy v ANSYS

Toto srovnání je provedeno pomocí vývoje oteplovací charakteristiky pro daný bod na povrchu motoru. V laboratoři bylo měření prováděno různými měřicími přístroji, jak je uvedeno v kapitole 10. Pro konstrukci oteplovací charakteristiky na základě analýzy v ANSYS bylo využito funkce „Probe“ (sonda), kdy body měřené na motoru v laboratoři byly označeny touto funkcí a hodnoty teploty v daném čase zaznamenány a následně graficky porovnány.

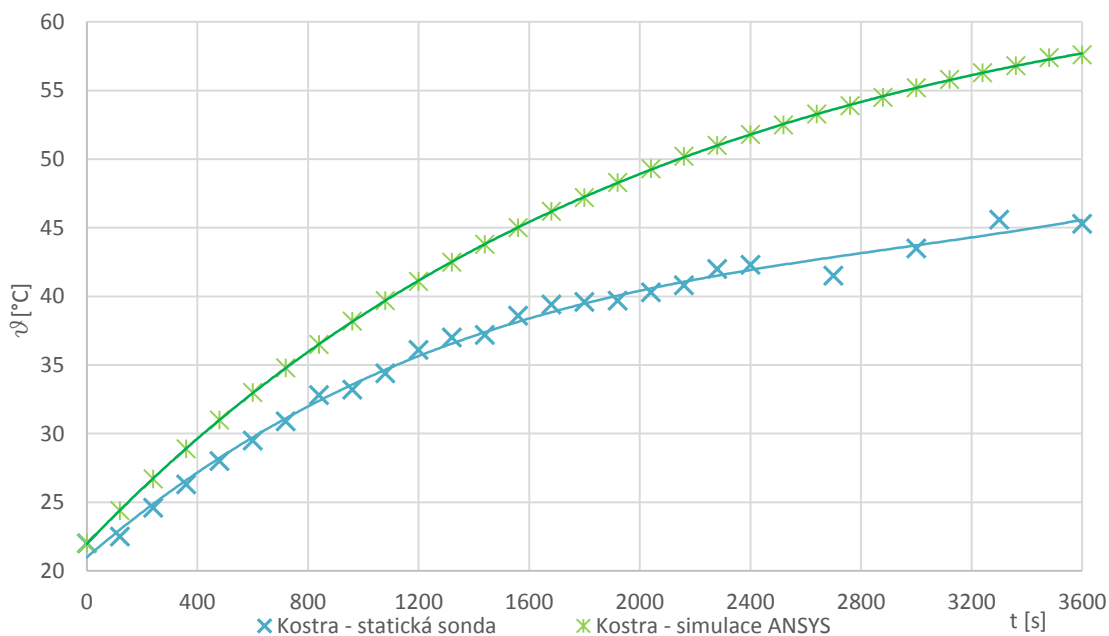


Obrázek 22: Srovnání oteplovacích charakteristik na svorkovnici

Z první grafické závislosti (obrázek 22) vyplývá, že po hodině chodu a simulace se hodnoty teploty liší o 7,5 °C. Průběh oteplovací charakteristiky simulací ANSYS je ideální, zatímco hodnoty změřené sondou Agilent kopírují oteplovací křivku s drobnými odchylkami. Odchyłka mezi naměřenou a spočítanou hodnotou je způsobena rozdílem ve výpočtu rychlosti odvádění tepla z povrchu motoru, daná parametry okolního vzduchu. Další možnou příčinou mohou být použité materiály a zjednodušení jako například vyplněná svorkovnice na modelu motoru. Jedná se samozřejmě také o parametry vnitřní generace tepla, které se nikdy nebudou dokonale shodovat s parametry na reálném motoru v daných podmínkách, zahrnující jeho současný stav apod.

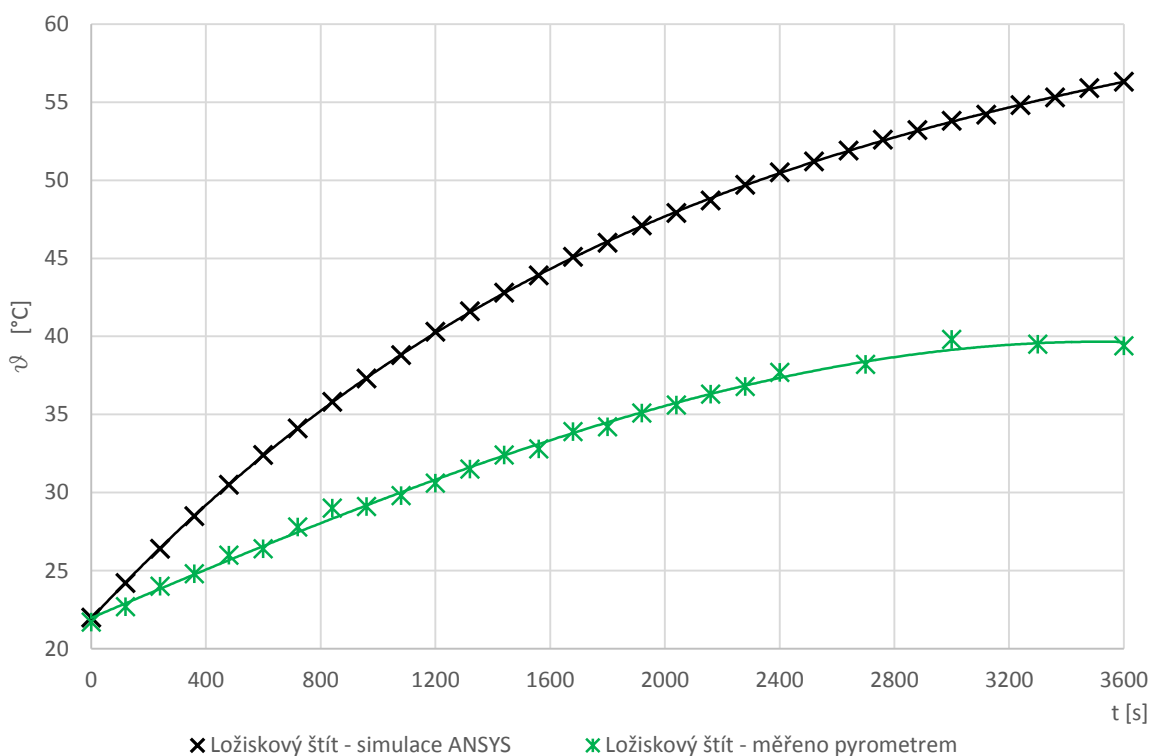


Obrázek 23: Srovnání oteplovacích charakteristik na ložiskovém štítu



Obrázek 24: Srovnání oteplovacích charakteristik na kostře motoru

U oteplovací charakteristiky ložiskového štítu je rozdíl mezi naměřenou a vypočtenou 9,5 °C. U charakteristiky měřené na kostře motoru je to 12,5 °C. Tyto odchylky jsou způsobeny důvody popsanými u obrázku 22. U obrázku 24 může být větší rozdíl odůvodnitelný pravděpodobně nedokonalým uchycením statické sondy mezi žebra kostry motoru hliníkovou páskou.

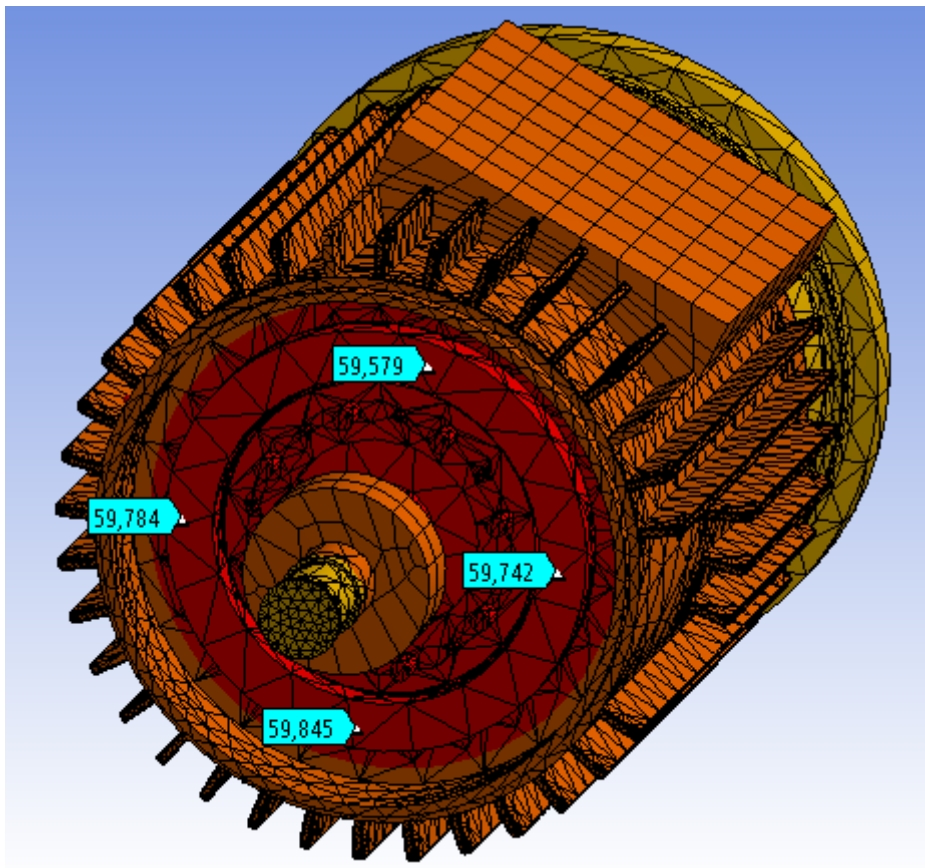


Obrázek 25: Srovnání oteplovacích charakteristik na druhém ložiskovém štítu

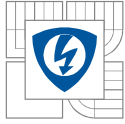
Poslední oteplovací charakteristika (obr. 25) vykazuje největší rozdíl naměřené a vypočtené hodnoty teploty. Pravděpodobné důvody jsou naznačené v kapitole 10. Tento ložiskový štít je v těsné blízkosti ventilátoru, na kterém není nasazen kryt, takže vzduch je odváděn mimo motor. Část štítu byla ovšem ochlazována a následnou kondukcí mohlo dojít k ochlazení, se kterým tepelný model v ANSYS nepočítá. Rozdíl naměřené a vypočtené hodnoty teploty je 15 °C, což je poměrně vysoká hodnota, která pravděpodobně koresponduje s výše uvedeným.

11.2 Srovnání vypočtených hodnot analyticky a analýzou ANSYS

V této kapitole je srovnána pouze hodnota teploty čel statorového vinutí, protože jako jediná relevantní hodnota vystupuje z analytického výpočtu. Hodnota této střední teploty čel vinutí je $\vartheta_{\zeta} = 63,77 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Výstupem z analýzy ANSYS je obrázek 26, kde je zřetelně vidět vinutí a použita funkce „Probe“, kde zprůměrováním čtyř hodnot vychází konečná teplota $\vartheta_{\zeta-A} = 59,7 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Nutné je však podotknout, že tato teplota neodpovídá úplnému ustálení stroje, ale času 3600 s, po který byla analýza prováděna.



Obrázek 26: Ověření teploty čela vinutí v čase $t = 3600$ s



12 ZÁVĚR

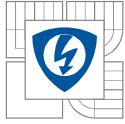
Cílem bakalářské práce bylo srovnat několik metod výpočtu rozložení teplotního pole asynchronního motoru. Teplota, kterou dosahují jednotlivé části motoru je jeden z rozhodujících parametrů při konstrukci. Stroj musí být teplotně vhodně dimenzován tak, aby byl zabezpečen jeho bezproblémový chod při běžných podmínkách provozu, ale i při krátkodobých výkyvech normálního provozního stavu. Příliš vysokou teplotou může být dáno znehodnocení některých částí až do úplného zničení stroje. Nejnáchylnějším prvkem bývá izolace.

Po vyhotovení všech komponent v Inventoru byl sestaven model, který byl importován do programu ANSYS. Po nastavení všech parametrů, zejména pak vnitřní generace tepla, která je spojena se ztrátami v jednotlivých částech stroje, bylo vypočteno teplotní pole motoru. Pro srovnání bylo důležité odečíst z této analýzy data čtyř vybraných bodů na povrchu motoru.

Toto srovnání proběhlo graficky na obrázcích 22 – 25. Z charakteristik je patrné, že simulované oteplení motoru dosahuje vyšších teplot než oteplení naměřené v laboratoři. Dalším zřetelným bodem je, že oteplovací křivky z měření v laboratoři dosahují ustálené hodnoty dříve než křivky vykreslené na základě dat z ANSYS. To je způsobeno několika fakty a sice, teplo je z motoru odváděno v reálu jinak, než jak je tomu u simulace, což je dáno parametry okolního vzduchu a jeho oteplování v průběhu času, od teplejšího motoru a následné proudění v jeho okolí. Druhým faktem, který do výsledků vstupuje, jsou parametry materiálů, které se neshodují stoprocentně s parametry vybranými z knihoven ANSYS. Dalším jsou hodnoty vnitřní generace tepla. Pro výpočet byly využity hodnoty poskytnuté vedoucím práce, odměřené pro daný stroj za daných provozních podmínek. Tyto hodnoty jsou určeny experimentálně a neodpovídají realitě dokonale. Navíc jsou přiřazeny prvkům, které podléhají také jistým zjednodušením. Vinutí není tvořeno svazkem vodičů, všechny ztráty v rotoru jsou zastoupeny jednou hodnotou, která byla vložena na celý objem rotoru nebo například v modelu není zahrnuta izolace. Jak je uvedeno v kapitole 10, největší rozdíl naměřené a simulované hodnoty byl na ložiskovém štítu, v jehož těsné blízkosti byl umístěn ventilátor. Na tomto ventilátoru nebyl nasazen kryt a tak motor nebyl ochlazován. I přesto však vzduch proudil okolo tohoto štítu a postupnou kondukcí bylo místo, které bylo měřeno, ochlazováno, což způsobilo výsledný rozdíl obou teplot 15 °C. Na svorkovnici byl tento rozdíl mezi oběma teplotami 7,5 °C. Na druhém ložiskovém štítu byl rozdíl 9,5 °C a kostře motoru mezi žebry činil 12,5 °C.

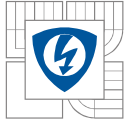
Součástí práce je také analytický výpočet, který vychází z náhradního tepelného obvodu, který zahrnuje statorovou část motoru. Je inspirovaný odbornou literaturou a jeho hlavním výstupem je střední teplota čel vinutí $\vartheta_{\xi} = 63,77 \text{ °C}$. Pro srovnání bylo funkcí „Probe“ v ANSYS změřena teplota na čelu vinutí v čase $t = 3600 \text{ s}$. Výsledná teplota $\vartheta_{\xi-A} = 59,7 \text{ °C}$, vykazuje rozdíl 4 °C. Tento rozdíl je ovlivněn faktem, že teplota při simulaci nebyla zcela ustálená, takže by se dal předpokládat její nárůst v rámci jednotek °C.

Hlavní výhodou simulačních software je možnost zjištění teploty kterékoli části zařízení, v kterémkoli čase, kdekoli v celém objemu. Přesnost výpočtu je ovlivněna množstvím a správností zadaných parametrů daného zařízení do simulačního software. Při klasickém analytickém výpočtu dostáváme pouze střední hodnotu oteplení dané části. To však nesnižuje její korektnost. Znovu platí, že čím použijeme složitější výpočet a čím více vstupních dat bude zahrnuto, tím relevantnější výsledek dostáváme.



Použitá literatura

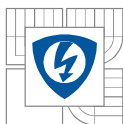
- [1] KOPYLOV, Igor Petrovič a Petr VOŽENÍLEK. *Stavba elektrických strojů*. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1988. ISBN 04-532-88.
- [2] HALLIDAY, David, Robert RESNICK, Jearl WALKER, Petr DUB, Jiří KOMRSKA, Bohumila LENCOVÁ, Jana MUSILOVÁ, Jan OBDRŽÁLEK a Marian ŠTRUNC. *Fyzika: Vysokoškolská učebnice obecné fyziky*. VUT v Brně: VUTIUM a PROMETHEUS Praha, 2000. ISBN 80-214-1869-9.
- [3] MĚŘIČKA, Jiří, Václav HAMATA a Petr VOŽENÍLEK. *Elektrické stroje*. Vyd. 2. Praha: ČVUT, Elektrotechnická fakulta, 311 s. ISBN 80-010-2109-2.
- [4] Emisivita - BRZOBOHATÝ, T. Měření emisivity vlhkých a suchých povrchů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 52 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Milan Pavelek, CSc.
- [5] HERR, T. Měření tepelné vodivosti. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 62 s. Vedoucí bakalářské práce byl doc. Ing. Petr Beneš, Ph.D.
- [6] SEDLÁŘOVÁ, Ivana. Vlastnosti izolačních materiálů na přírodní bázi. *Vlastnosti izolačních materiálů na přírodní bázi* [online]. 2008 [cit. 2014-11-14]. Dostupné z: http://www.fce.vutbr.cz/veda/juniorstav2008_sekce/pdf/4_1/Sedlarova_Ivana_CL.pdf
- [7] VRBKA, Martin a Michal VAVERKA. Metoda konečných prvků. *Metoda konečných prvků* [online]. [cit. 2014-11-26]. Dostupné z: http://old.uk.fme.vutbr.cz/kestazeni/MKP/prednaska1_mkp.pdf
- [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] NEKVAPIL, J. *Řízení trojfázového asynchronního motoru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 76 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Bohumil Klíma, Ph.D.
- [10] HORÁLEK, L. *Výpočet teplotních polí v asynchronních strojích*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 54 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Marcel Janda, Ph.D.
- [11] JANDA, M. Teplotní optimalizace částí elektrických strojů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 129 s. Vedoucí doktorské práce doc. Dr. Ing. Hana Kuchyňková
- [12] CIGÁNEK, Ladislav. *Stavba elektrických strojů: Celost. vysokošk. učebnice 1. vyd.* Praha: SNTL, 1958, 714, [1] s.



Příloha A

Tabulka A-1: Naměřené hodnoty v laboratoři

Čas	Teplota součástí			
	Statická sonda - kostra	Sonda Agilent - ložiskový štít 1	Sonda Agilent - svorkovnice	Pyrometr - ložiskový štít 2
[s]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
0	22,0	22,3	22,4	21,7
0	22,0	22,3	22,4	21,7
120	22,5	22,6	23,7	22,7
240	24,6	23,5	25,7	24,0
360	26,3	24,7	27,6	24,8
480	28,0	26,5	29,7	26,0
600	29,5	27,6	30,6	26,4
720	30,9	29,9	33,1	27,8
840	32,8	32,2	34,0	29,0
960	33,2	32,7	35,1	29,1
1080	34,4	34,3	35,6	29,8
1200	36,1	35,0	36,9	30,6
1320	37,0	37,5	38,6	31,5
1440	37,2	37,4	39,8	32,4
1560	38,6	38,5	41,8	32,8
1680	39,4	39,2	42,3	33,9
1800	39,6	39,2	42,8	34,2
1920	39,7	40,8	43,2	35,1
2040	40,3	40,8	44,4	35,6
2160	40,8	41,8	44,6	36,3
2280	42,0	42,1	44,8	36,8
2400	42,3	42,0	45,5	37,7
2700	41,5	42,8	46,8	38,2
3000	43,5	45,5	47,2	39,8
3300	45,6	46,1	48,3	39,5
3600	45,3	46,3	48,9	39,4
3900	44,5	46,1	49,8	40,0
4200	44,1	46,3	50,1	40,2
4500	43,8	46,6	50,6	41,0
4800	44,7	46,6	50,4	40,8
5100	44,8	47,4	50,9	41,5
5400	44,2	47,7	50,6	41,2
5700	44,4	46,8	50,9	41,4
6000	44,6	46,9	50,8	41,0



Tabulka A-2: Výsledné hodnoty teplotní analýzy ANSYS

Čas	Teplota součástí			
	Svorkovnice	Kostra	Ložiskový štít 1	Ložiskový štít 2
[s]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
0	22,0	22,0	22,0	22,0
120	23,9	24,4	23,7	24,2
240	26,1	26,7	25,9	26,4
360	28,2	28,9	27,8	28,5
480	30,2	31,0	29,9	30,5
600	32,1	33,0	31,7	32,4
720	33,9	34,8	33,4	34,1
840	35,7	36,5	35,2	35,8
960	37,3	38,2	36,7	37,3
1080	38,8	39,7	38,2	38,8
1200	40,2	41,1	39,6	40,3
1320	41,6	42,5	40,9	41,6
1440	42,9	43,8	42,3	42,8
1560	44,0	45,0	43,4	43,9
1680	45,2	46,2	44,5	45,1
1800	46,3	47,2	45,6	46,0
1920	47,3	48,3	46,5	47,1
2040	48,2	49,3	47,5	47,9
2160	49,1	50,2	48,3	48,7
2280	50,0	51,0	49,1	49,7
2400	50,8	51,8	49,9	50,5
2520	51,6	52,5	50,8	51,2
2640	52,3	53,3	51,4	51,9
2760	52,9	53,9	52,0	52,6
2880	53,6	54,5	52,7	53,2
3000	54,2	55,2	53,1	53,8
3120	54,7	55,8	53,8	54,2
3240	55,3	56,3	54,3	54,8
3360	55,7	56,8	54,7	55,3
3480	56,3	57,4	55,2	55,9
3600	56,8	57,6	55,6	56,3