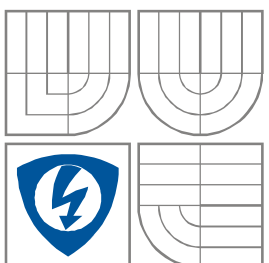


**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLÓGIÍ**

**ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY  
A ELEKTRONIKY**

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

# **VÝPOČET TEPLOTNÍCH POLÍ V ASYNCHRONNÍCH STROJÍCH**

**CALCULATION OF TEMPERATURE FIELDS IN INDUCTION MACHINES**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

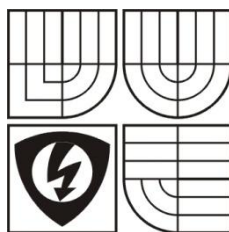
Lukáš Horálek

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

Ing. Marcel Janda, Ph.D.

BRNO, 2014



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor  
Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika

**Student:** Lukáš Horálek

**Ročník:** 3

**ID:** 146011

**Akademický rok:** 2013/2014

**NÁZEV TÉMATU:**

## Výpočet teplotních polí v asynchronních strojích

**POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

1. Seznamte se s metodami teplotních výpočtů používaných v elektrických strojích
2. Vytvořte trojrozměrný model asynchronního motoru a pomocí metody konečných prvků proveďte výpočet oteplení stroje a analytický výpočet jedné části stroje
3. Proveďte měření teploty na konkrétním stroji za různých provozních podmínek
4. Výsledky měření a výpočtů porovnejte a vyhodnoťte

**DOPORUČENÁ LITERATURA:**

- [1] STŘEDA, Ivo. Termodynamika: Celost. vysokošk. učebnice. 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 1991, 149s. IBS 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 projektu:** Ing. Marcel Janda, Ph.D.

**Konzultanti bakalářské práce:**

**doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.**

*předseda oborové rady*

**UPOZORNĚNÍ:**

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

## **Abstrakt**

Problematika této bakalářské práce se zabývá termikou elektrických strojů. Konkrétně výpočtem teplotních polí pomocí metody konečných prvků a analytického výpočtu jedné části stroje pomocí náhradního tepelného obvodu. Pomocí programu Autodesk Inventor vytvoříme 3D model reálného elektrického stroje a následně v programu ANSYS Workbench provedeme teplotní analýzu pomocí metody konečných prvků. Dále provedeme analytický výpočet jedné části stroje, konkrétně statoru, pomocí zjednodušeného náhradního tepelného schématu. Také uskutečníme měření teploty na konkrétním stroji za různých provozních podmínek, jednotlivé výpočty a měření mezi sebou porovnáme.

## **Abstract**

The issue of this thesis deals with the thermals electrical machines. Specifically, the calculation of temperature fields using the finite element method and analytical calculation of one of the machines with a replacement thermal circuit. Using Autodesk Inventor create a 3D model of the real electric machine and then in the ANSYS Workbench perform thermal analysis using finite element method. Next, perform analytical calculation of one part of the machine, namely the stator, using a simplified thermal replacement scheme. Also, we realize the measurement of temperature on the specific machine under various operating conditions, the calculations and measurements between them compared.

## **Klíčová slova**

Asynchronní motor, Teplotní analýza, Tepelný obvod, Metoda konečných prvků, Inventor, Ansys Workbench, Teplo, Teplota, Měření

## **Keywords**

Asynchronous motor, Thermal analysis, Thermal circuit, Finite element method, Inventor, Ansys Workbench, Heat, Temperature, Measurement

## **Bibliografická citace**

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..

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Výpočet teplotních polí v asynchronních strojích 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 .....

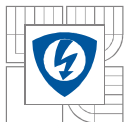
Podpis autora .....

## **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.

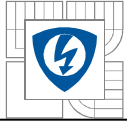
V Brně dne .....

Podpis autora .....



## Obsah

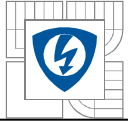
ÚVOD.....	13
<b>1 ASYNCHRONNÍ MOTOR .....</b>	<b>14</b>
1.1 ZÁKLADY KONSTRUKČNÍCH ČÁSTÍ ASYNCHRONNÍHO MOTORU.....	14
1.2 PRINCIP ČINNOSTI ASYNCHRONNÍHO MOTORU .....	15
<b>2 ZÁKLADY TERMIKY ELEKTRICKÝCH STROJŮ .....</b>	<b>17</b>
2.1 TEPLA .....	17
2.2 TEPLOTA.....	17
2.3 TEPLOTNÍ STUPNICE .....	18
<b>3 ZTRÁTY V ASYNCHRONNÍM MOTORU.....</b>	<b>19</b>
<b>4 ŠÍŘENÍ TEPLA.....</b>	<b>22</b>
4.1 ŠÍŘENÍ TEPLA VEDENÍM .....	22
4.2 ŠÍŘENÍ TEPLA PROUDĚNÍM (KONVEKČÍ) .....	22
4.3 ŠÍŘENÍ TEPLA SÁLÁNÍM .....	23
<b>5 ANSYS-METODA KONEČNÝCH PRVKŮ .....</b>	<b>24</b>
<b>6 TEPELNÝ VÝPOČET POMOCÍ NÁHRADNÍCH TEPELNÝCH OBVODŮ.....</b>	<b>26</b>
<b>7 VYTVÁŘENÍ MODELU V PROSTŘEDÍ AUTODESK INVENTOR.....</b>	<b>30</b>
7.1 AUTODESK INVENTOR .....	30
7.2 MODELOVÁNÍ ASYNCHRONNÍHO MOTORU .....	30
<b>8 VÝPOČET TEPLOTNÍHO POLE V PROGRAMU ANSYS.....</b>	<b>32</b>
8.1 VYTVÁŘENÍ TEPLOTNÍ ANALÝZY .....	32
8.1.1 NASTAVENÍ MATERIÁLOVÝCH VLASTNOSTÍ – „ENGINEERING DATA“ .....	32
8.1.2 PŘIŘAZENÍ GEOMETRIE - „GEOMETRY“ .....	33
8.1.3 FUNKCE „ENCLOSURE“ .....	33
8.1.4 NASTAVENÍ PARAMETRU MODELU .....	34
8.1.5 VÝBĚR PARAMETRŮ VÝPOČTU - „SETUP“ .....	35
8.1.6 VÝBĚR TYPU VÝSLEDKU - „SOLUTION“ .....	36
8.2 VÝSLEDKY TRANSIENTNÍ TEPELNÉ ANALÝZY NA AS MOTORU .....	37
<b>9 MĚŘENÍ TEPLoty NA ASYNCHRONNÍM MOTORU .....</b>	<b>45</b>
9.1 MĚŘENÍ NAPRÁZDNO .....	46
9.2 MĚŘENÍ PŘI ZATÍŽENÍ 2Nm.....	47
<b>10 ANALYTICKÝ VÝPOČET TEPLoty .....</b>	<b>48</b>
<b>11 POROVNÁNÍ JEDNOTLIVÝCH ANALÝZ.....</b>	<b>52</b>
<b>12 ZÁVĚR.....</b>	<b>53</b>
<b>LITERATURA .....</b>	<b>54</b>



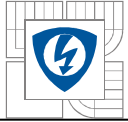
## Seznam obrázků

<i>Obrázek 1: Řez konstrukcí ASM.....</i>	<i>15</i>
<i>Obrázek 2: Tok výkonu asynchronního motoru .....</i>	<i>19</i>
<i>Obrázek 3: Graf závislosti rezistivity mědi na teplotě[5] .....</i>	<i>20</i>
<i>Obrázek 4: Tvar prvků[11] .....</i>	<i>24</i>
<i>Obrázek 5: Síť modelu asynchronního motoru .....</i>	<i>24</i>
<i>Obrázek 6: Úplné náhradní tepelné schéma ASM, MOD[3] .....</i>	<i>27</i>
<i>Obrázek 8: Výsledný sestavený model AS motoru.....</i>	<i>31</i>
<i>Obrázek 7: Jednotlivé součásti modelu AS motoru.....</i>	<i>31</i>
<i>Obrázek 9: Nastavitelné bloky vybrané analýzy .....</i>	<i>32</i>
<i>Obrázek 10: Knihovny a jednotlivé materiály.....</i>	<i>33</i>
<i>Obrázek 11: Model uzavřený pomocí funkce „Enclosure“ .....</i>	<i>33</i>
<i>Obrázek 12: Rozdělení větví pro jednotlivé moduly.....</i>	<i>34</i>
<i>Obrázek 13: Síť konečných prvků ASM – celkový pohled a řezy .....</i>	<i>35</i>
<i>Obrázek 14: Závislost oteplení AM v programu ANSYS .....</i>	<i>37</i>
<i>Obrázek 15: Oteplení asynchronního motoru v čase 600s.....</i>	<i>38</i>
<i>Obrázek 16: Oteplení asynchronního motoru v čase 600s (příčný řez strojem) .....</i>	<i>38</i>
<i>Obrázek 17: Oteplení asynchronního motoru v čase 1200s.....</i>	<i>39</i>
<i>Obrázek 18: Oteplení asynchronního motoru v čase 1200s (příčný řez strojem).....</i>	<i>39</i>
<i>Obrázek 19: Oteplení asynchronního motoru v čase 2400s.....</i>	<i>40</i>
<i>Obrázek 20: Oteplení asynchronního motoru v čase 2400s (příčný řez strojem).....</i>	<i>40</i>
<i>Obrázek 21: Oteplení asynchronního motoru v čase 3000s.....</i>	<i>41</i>
<i>Obrázek 22: Oteplení asynchronního motoru v čase 3000s (příčný řez strojem).....</i>	<i>41</i>
<i>Obrázek 23: Rozložení teploty do okolí v čase 3000s (podélný řez) .....</i>	<i>42</i>
<i>Obrázek 24: Rozložení teploty do okolí v čase 3000s (příčný řez) .....</i>	<i>42</i>
<i>Obrázek 25: Umístění teplotních sond na kostře modelu AM.....</i>	<i>43</i>
<i>Obrázek 26: Závislost oteplení AM v programu ANSYS pro sondu 1 a 2 .....</i>	<i>44</i>
<i>Obrázek 27: Termočlánky T1 a T2 teploměru EXTECH Instrumental, bod T3 - měření teploty pomocí pyrometru.....</i>	<i>45</i>
<i>Obrázek 28: Závislost oteplení AM ve stavu naprázdno čidly T1 a T2.....</i>	<i>46</i>
<i>Obrázek 29: Závislost oteplení AM při zatížení čidly T1, T2 a T3.....</i>	<i>47</i>
<i>Obrázek 30: Tepelné schéma obvodu statoru střídavého AS při konstantní teplotě chladicího vzduchu, MOD [3].....</i>	<i>48</i>



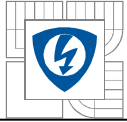


Obrázek 31: Grafické srovnání použitých metod .....52



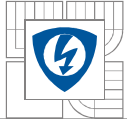
## SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 1: Hodnoty důležitých veličin jednotlivých těles .....</i>	<i>36</i>
<i>Tabulka 2: Tabulka nasimulovaných hodnot programem ANSYS pro transientní analýzu .....</i>	<i>37</i>
<i>Tabulka 3: Tabulka nasimulovaných hodnot programem ANSYS pro transientní analýzu pro sondu 1 a 2 .....</i>	<i>44</i>
<i>Tabulka 4: Teplotní analýza asynchronního motoru pracujícího ve stavu naprázdno a při zatížení .....</i>	<i>45</i>
<i>Tabulka 5: Tabulka použitých hodnot pro výpočet tepelných odporů .....</i>	<i>49</i>
<i>Tabulka 6: Tabulka vypočtených hodnot tepelných toků a teplot .....</i>	<i>51</i>

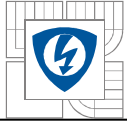


## SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

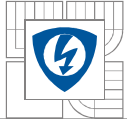
A	[K <sup>-1</sup> ]	Teplotní součinitel odporu
c	[J. kg <sup>-1</sup> . K <sup>-1</sup> ]	Měrná tepelná kapacita
d	[m]	Tloušťka stěny
d <sub>i</sub>	[m]	Tloušťka tělesa
d <sub>iz</sub>	[m]	Tloušťka drážkové izolace
f	[Hz]	Synchronní otáčky magnetického pole indukované ve statoru
I	[A]	Proud ve vinutí
I <sub>e</sub>	[W. m <sup>2</sup> ]	Intenzita záření
l <sub>Fe</sub>	[m]	Délka železa statoru
m	[kg]	Hmotnost dané látky
m <sub>f</sub>	[-]	Počet fází
n	[min <sup>-1</sup> ]	Otáčky rotoru
n <sub>s</sub>	[min <sup>-1</sup> ]	Synchronní otáčky magnetického pole indukované ve statoru
O <sub>d</sub>	[m]	Obvod drážky
P <sub>1</sub>	[W]	Příkon motoru neboli výkon z napájecí sítě
P <sub>2</sub>	[W]	Výkon na hřídeli motoru
P <sub>12</sub>	[W]	Tepelný tok mezi jednotlivými částmi stroje
P <sub>č</sub>	[W]	Tepelný tok odváděný z povrchu čel
P <sub>dr</sub>	[W]	Tepelný tok vycházející od drážkové části vinutí
P <sub>Fe</sub>	[W]	Tepelný tok železa statoru
P <sub>i</sub>	[W]	Tepelný tok procházející stěnami drážek
P <sub>m</sub>	[W]	Mechanický výkon
P <sub>v</sub>	[W]	Tepelný tok k chladicímu vzduchu v radiálních kanálech
P <sub>vk</sub>	[W]	Vyrovňovací tepelný tok
p	[-]	Počet pólových dvojic statoru
Q	[J]	Teplo
Q <sub>dr</sub>	[-]	Počet drážek
Q <sub>T</sub>	[W]	Tepelný tok
q	[W. m <sup>2</sup> ]	Hustota tepelného toku
R	[Ω]	Činný odpor vinutí



$R_{\delta}$	$[K \cdot W^{-1}]$	Tepelná vazba mezi státorem a rotorem
$R_1$	$[\Omega]$	Odpor při teplotě $\vartheta_1$
$R_2$	$[\Omega]$	Odpor při teplotě $\vartheta_2$
$R_{12}$	$[K \cdot W^{-1}]$	Tepelný odpor mezi jednotlivými částmi stroje
$R_{\check{c}}$	$[K \cdot W^{-1}]$	Tepelný odpor čel vinutí
$R_{dr}$	$[K \cdot W^{-1}]$	Tepelný odpor drážkové části
$R_{Fe}$	$[\Omega]$	Odpor respektující ztráty v železe
$R_{Fe}$	$[K \cdot W^{-1}]$	Tepelný odpor železa statoru
$R_i$	$[K \cdot W^{-1}]$	Tepelný odpor drážkové izolace
$R_v$	$[K \cdot W^{-1}]$	Tepelný odpor kovu vinutí
$R_{vk}$	$[K \cdot W^{-1}]$	Tepelný odpor části vinutí k chladicímu vzduchu v radiálních ventilačních kanálech
$S$	$[m^2]$	Plocha stěny
$S_{\check{c}}$	$[m^2]$	Ochlazovací plocha čel
$S_{ef}$	$[m^2]$	Průřez efektivního vodiče
$S_{er}$	$[m^2]$	Vnější povrch paketů
$S_{\delta}$	$[m^2]$	Plocha vzduchové mezery, z níž se odvádí teplo
$S_i$	$[m^2]$	Plocha izolace
$S_{ir}$	$[m^2]$	Vnitřní povrch paketů
$S_{vk}$	$[m^2]$	Plocha povrchu vinutí v radiálních kanálech
$s$	$[\%]$	Skluz
$t$	$[^{\circ}C]$	Teplota ve stupních celsia
$T$	$[K]$	Teplota v kelvinech
$T_0$	$[K]$	Koncová teplota
$T_C$	$[^{\circ}C]$	Celsiova teplota
$T_F$	$[F]$	Fahrenheitova teplota
$T_{po\check{c}}$	$[K]$	Počáteční teplota
$T_{td}$	$[K]$	Termodynamická teplota
$U_i$	$[V]$	Indukované napětí
$V$	$[m^3]$	Objem tělesa
$v$	$[m \cdot s^{-1}]$	Rychlost vzduchu
$V_{ef}$	$[-]$	Počet efektivních vodičů drážce



$\Delta P_{\xi}$	[W]	Ztráty obou čel stroje
$\Delta P_d$	[W]	Ztráty dodatečné
$\Delta P_{dr}$	[W]	Ztráty drážkové části vinutí
$\Delta P_j$	[W]	Joulovy ztráty
$\Delta P_{Fe}$	[W]	Ztráty v železe
$\Delta P_h$	[W]	Hysterezní ztráty
$\Delta P_{j1}$	[W]	Joulovy ztráty ve statoru
$\Delta P_{j2}$	[W]	Joulovy ztráty v rotoru
$\Delta P_m$	[W]	Mechanické ztráty
$\Delta P_w$	[W]	Ztráty vzniklé výřivými proudy
$\Delta P_x$	[W]	Ztráty těles
$\Delta T$	[K]	Rozdíl teplot
$\eta$	[%]	Účinnost
$\alpha_{\xi}$	[W.m <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> ]	Součinitel přestupu tepla čel vinutí
$\alpha'_{\delta}$	[W.m <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> ]	Součinitel přestupu tepla vzduchové mezery
$\alpha_{er}$	[W.m <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> ]	Součinitel přestupu tepla vnějšího povrchu paketů
$\alpha_{vk}$	[W.m <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> ]	Součinitel přestupu tepla
$\delta$	[m]	Velikost vzduchové mezery
$\lambda$	[W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]	Součinitel tepelné vodivosti
$\lambda_i$	[W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]	Součinitel tepelné vodivosti izolace
$\sigma$	[W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-4</sup> ]	Stefan-Bolzmannova konstanta
$\vartheta_0$	[K]	Počáteční teplota (teplota okolí)
$\vartheta_1, \vartheta_2$	[°C]	Střední teploty jednotlivých částí stroje
$\vartheta_{\xi}$	[K]	Střední teplota obou čel
$\vartheta_{dr}$	[K]	Střední teplota drážkové části vinutí
$\vartheta_{Fe1}$	[K]	Teplota železa statoru
$\vartheta_{Fe2}$	[K]	Teplota železa rotoru
$\phi$	[W]	Tepelný tok
AS		Asynchronní stroj
ASM		Asynchronní motor
SI		Mezinárodně domluvená soustava jednotek fyzikálních veličin



## ÚVOD

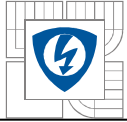
Problémy v konstrukci elektrických strojů spočívají zejména v rychlosti vývoje. V současné době tento problém můžeme eliminovat pomocí simulačních aplikací. Tyto aplikace a jejich stálé vylepšování nám umožňuje pracovat rychleji a efektivněji.

Takové řešení nabízí například software Autodesk Inventor nebo Ansys Workbench, který přináší uživateli všechny potřebné nástroje k návrhu, konstrukci a testování jednotlivých objektů v oblastech pevnostních a termálních analýz, proudění atd.

Průmyslově nejběžněji používaným motorem je asynchronní motor. Při konstrukci takového stroje je třeba dbát na teploty, které může stroj dosahovat. Pokud by teplota stroje dosáhla hodnoty vyšší než provozní teploty, tak by mohlo dojít například ke zničení izolace a dalších materiálů. V konečném důsledku by mohlo dojít k samotnému zničení stroje.

Výpočet rozložení teplotního pole v asynchronním motoru a jeho okolí je velmi složitý, ale v současné době, díky simulačním programům, můžeme samotný výpočet daleko zjednodušit.

Tato bakalářská práce se tedy zabývá výpočtem teplotního pole v asynchronním stroji. Vytvoření trojrozměrného modelu zvoleného typu asynchronního motoru. Dále teplotní analýzou jednotlivých součástí metodou konečných prvků, analytického výpočtu oteplení jedné části stroje, konkrétně statoru, měřením teploty na konkrétním stroji za různých provozních podmínek a následně porovnání jednotlivých výsledků.



# 1 ASYNCHRONNÍ MOTOR

Asynchronní nebo také indukční motor patří mezi nejpoužívanější elektromotory v elektrotechnice. To je dáno zejména jeho jednoduchou konstrukcí, velkou provozní spolehlivostí a dobrými provozními vlastnostmi. Asynchronní motory se vyrábějí pro výkony od 60W pro nízké napětí do 14MW pro vysoké napětí.[1]

Asynchronní motory dělíme podle napájecího napětí na jednofázové a třífázové, které jsou výrazně používanější.

## 1.1 Základy konstrukčních částí asynchronního motoru

**Stator** je tvořen elektrotechnickými plechy, naskládanými na sebe do tvaru dutého válce. Po vnitřní části obvodu jsou drážky, ve kterých jsou uložena vinutí vzájemně pootočená o příslušný úhel. U třífázového asynchronního motoru jsou jednotlivá vinutí vůči sobě pootočena o úhel  $120^\circ$  a dále jsou vyvedena na svorkovnici. Vinutí na svorkovnici můžeme zapojit do hvězdy nebo do trojúhelníka.

**Rotor** je tvořen pomocí elektrotechnických plechů, které jsou připevněny na hřídeli elektromotoru a po jeho obvodu jsou taktéž drážky, ve kterých jsou navzájem spojené vodiče tvořené měděnými nebo hliníkovými tyčemi. Na obou koncích jsou spojeny zkratovacími kroužky - kotva nakrátko. Dále rozeznáváme kotvu kroužkovou, která je navíc opatřena sběrnými kroužky.

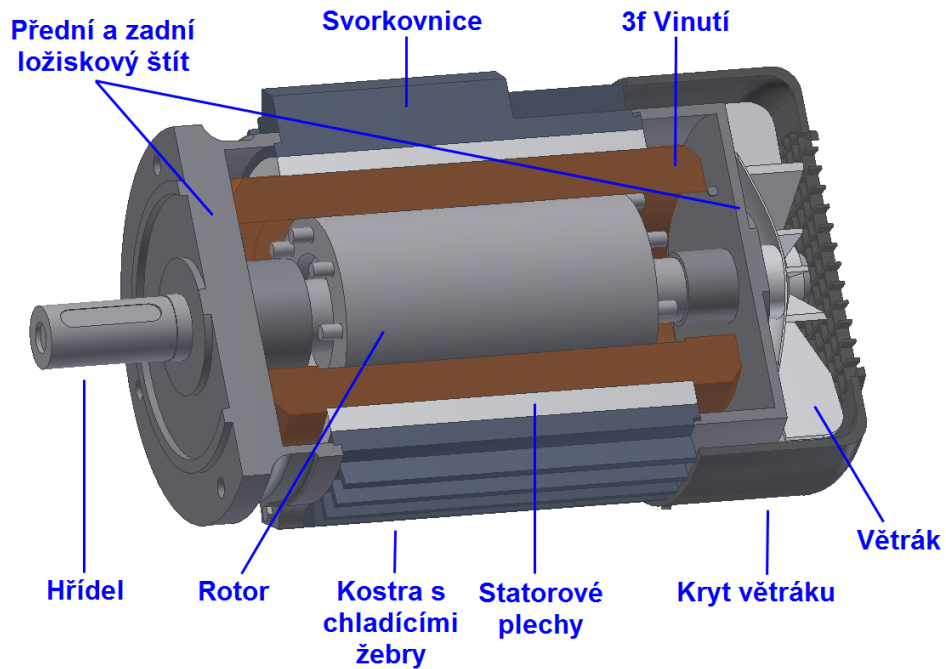
**Vinutí** je uloženo v drážkách statorových a rotorových plechů. Na statoru obvykle bývá třífázové vinutí (nebo jednofázové i dvoufázové). Začátky a konce vinutí jsou vyvedeny na svorkovnici. V rotorových drážkách je uloženo vinutí, nazývané se kotva. U motoru s kotvou nakrátko jsou v drážkách rotoru neizolované měděné, mosazné a hliníkové spojovací kruhy na krátko, které jsou používány nejčastěji. Vinutí u menších motorů je z hliníku a odlévá se spolu s větracími lopatkami metodou tlakového lití. Takové vinutí nazýváme klec. U motorů s vinutým rotorem a kroužky je v drážkách rotoru uloženo třífázové vinutí z izolovaných vodičů. Začátky fází jsou připojeny do uzlu a konce připojeny ke třem sběracím kroužkům, ke kterým přiléhají kartáče.

**Vzduchová mezera** se nachází mezi magnetickým obvodem statoru a magnetickým obvodem rotoru. Velikost vzduchové mezery závisí na výkonu stroje. Čím je vzduchová mezera menší, tím menší je magnetický odpor mezi státorem a rotorem, čímž se zlepšuje účinnost stroje. Velikost vzduchové mezery bývá většinou od 0,2 do 2mm.

**Kostra** motoru bývá litinová nebo hliníková, která se používá u menších motorů. Kostra je uzavřena ložiskovými štíty a je opatřena patkami, sloužícími k připevnění celého motoru pomocí zemnicích šroubů.

**Ložiska** motoru slouží ke snížení tření hřídele motoru při jejím otáčení. Ložiska jsou umístěna v ložiskových štítech.

**Ventilátor** je složen z určitého počtu lopatek, které slouží k chlazení stroje. Umístěn je na **hřídeli**, která se otáčí v **ložiscích**. Ty jsou uložena v **ložiskových štítech**. [1],[2],[3]



Obrázek 1: Řez konstrukcí ASM

## 1.2 Princip činnosti asynchronního motoru

Statorové vinutí asynchronního motoru je připojeno na třífázovou síť a vytváří točivé magnetické pole. Toto točivé magnetické pole protíná vodiče rotoru, ve kterých se indukují napětí. Pokud je vinutí rotoru uzavřeno, tak tímto vinutím protéká proud, který vytváří magnetické pole rotoru. Vzájemným působením magnetických polí vzniká síla, která působí na vodiče rotoru ve směru pohybu magnetického pole statoru. Napětí i proud se bude ve vodičích rotoru indukovat jen v případě relativního pohybu pole statoru vůči vodičům rotoru. Otáčky točivého pole statoru  $n_s$  a otáčky rotoru  $n$  nemohou být stejné. Rozdíl otáček točivého magnetického pole statoru  $n_s$  a pole rotoru  $n$  se udává tzv. skluzem.[1],[2],[3]

Označení:  $s$

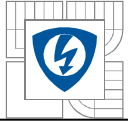
Jednotka: [%]

Vztah: 
$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \cdot 100 \quad (1.1)$$

Ostatní proměnné:  $n_s$  ...synchronní otáčky magnetického pole indukované ve statoru [min<sup>-1</sup>]

$n$  ...otáčky rotoru [min<sup>-1</sup>]





Synchronní otáčky magnetického pole indukovaného ve statoru udávají závislost frekvence napájecího napětí vůči počtu pólových dvojic statoru. Pro dvoupólový stroj jsou synchronní otáčky  $3000 \text{ min}^{-1}$ .

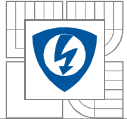
Označení:  $n_s$

Jednotka:  $[\text{min}^{-1}]$

Vztah: 
$$\mathbf{n_s = \frac{60 \cdot f}{p}} \quad (1.2)$$

Ostatní proměnné:  $f$  ...synchronní otáčky magnetického pole indukované ve statoru  
[Hz]

$p$  ...počet pólových dvojic statoru [-]



## 2 ZÁKLADY TERMIKY ELEKTRICKÝCH STROJŮ

Termika je nauka o teple a jeho přeměnách neboli transformacích na jiné formy energie. Elektromechanická přeměna energií v elektrických strojích je doprovázena přeměnou elektrické nebo mechanické energie v teplo. Teplo vznikající při práci stroje zahřívá jednotlivé části elektrického stroje a zvyšuje jejich teplotu. Nadměrné zvýšení teploty může vyvolat v elektrických strojích snížení elektrické a mechanické pevnosti izolace vinutí.[4]

### 2.1 Teplo

Teplo je energie přenesená z jednoho tělesa na druhé nebo mezi tělesem a okolím v důsledku rozdílu teplot. Dále teplo můžeme definovat jako změnu vnitřní energie těles při tepelné výměně. Teplo není stavová veličina. Jeho hodnota závisí na způsobu, kterým je dodáváno nebo odebíráno.

Teplo bereme jako kladné, jestliže jej dodáváme do systému z okolí. Teplo je záporné, pokud přešlo ze systému do okolí.[5]

Označení: Q

Jednotka: [J]

Vztah:  $Q = m \cdot c \cdot (T_{\text{poč}} - T_0)$  (2.1)

Ostatní proměnné: m ...hmotnost dané látky [kg]

c ...měrná tepelná kapacita [J. kg<sup>-1</sup>. K<sup>-1</sup>]

( $T_{\text{poč}} - T_0$ ) ...rozdíl mezi počáteční a koncovou teplotou [K]

### 2.2 Teplota

Teplota je jednou ze základních jednotek soustavy SI. Tento stavový parametr charakterizuje stav termodynamické rovnováhy systému. Je těsně spojena s neuspořádaným tepelným pohybem částic.

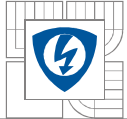
Pokud se soustavy nacházejí v rovnovážných stavech, že mezi nimi nedochází k tepelné výměně, pak soustavy mají stejnou teplotu. Jestliže se soustavy nacházejí v rovnovážných stavech, kdy mezi nimi probíhá tepelná výměna, soustavy mají různou teplotu. Soustava, u níž došlo během tepelné výměny ke zvýšení vnitřní energie, měla nižší teplotu. Zatím co soustava, u níž došlo během tepelné výměny ke snížení vnitřní energie, měla vyšší teplotu. Po skončení tepelné výměny přejdou jednotlivé soustavy do nových rovnovážných stavů. K tepelné výměně už dále nedochází, tudíž soustavy mají stejnou teplotu.[5],[6]

Označení: T

Jednotka: [K]

Vedlejší jednotkou je stupeň Celsia [°C]. Nejnižší možnou teplotou je tzv. teplota absolutní nuly, tedy 0K, neboli -273,15°C, které se lze libovolně přiblížit, avšak nelze ji dosáhnout.

K měření teploty využíváme nejrůznější druhy teploměrů. Například rtuťový, lihový nebo plynový teploměr. Dále můžeme teplotu měřit změnou délky pomocí bimetalového pásku.[5]



## 2.3 Teplotní stupnice

Při měření teploty se používá teplotní stupnice. Rozeznáváme Kelvinovu, Celsiovu a Fahrenheitovu stupnici.

**Kelvinova stupnice** je základní teplotní stupnice, která má za počátek nejnižší teplotu, absolutní nulu. Jednotkou je kelvin, značeno písmenem K. Absolutní nula je definována základním referenčním bodem, kterým je trojný bod vody - jediná teplota, při které se samotná voda vyskytuje současně ve všech třech skupenství - led, voda a vodní pára ( $273,16\text{K}=0,01^\circ\text{C}$ ).

**Celsiova stupnice** je stupnice, která se ve většině zemí používá pro všeobecné, obchodní a často i pro vědecké účely. Celsiova teplota se měří ve stupních. Celsiův stupeň je stejně velký jako kelvin, avšak počátek je posunut k příhodnějším teplotám.

Označení:	$T_C$	
Jednotka:	$[\text{C}^\circ]$	
Vztah:	$T_C = t - 273,15\text{C}^\circ$	(2.2)
Ostatní proměnné:	$T_C$ ... Celsiova teplota $[\text{C}^\circ]$	
	$t$ ... teplota $[\text{C}^\circ]$	

Při vyjadřování v Celsiově stupnici užíváme symbol stupně  $^\circ$ . Tento symbol za písmenem značí rozdíl údajů, například  $3\text{C}^\circ$  neboli  $3\text{K}$ . Tedy pokud teplota přes den vzrostla o tři Celsiovy stupně  $3\text{C}^\circ (=3\text{K})$  na teplotu  $23\text{C}^\circ (=296\text{K})$ .

**Fahrenheitova stupnice** je stupnice, která se používá v USA. Tato stupnice užívá menší stupeň než Celsiova a jinou hodnotu nuly. Tedy  $32^\circ\text{F}=0^\circ\text{C}$ . K převodu mezi stupni Celsia a stupni Fahrenheitova využíváme převodního vztahu, viz níže.[5],[6]

Označení:	$T_F$	
Jednotka:	[F]	
Vztah:	$[T_F] = \frac{9}{5} [T_C] + 32$	(2.3)
Ostatní proměnné:	$T_F$ ... Fahrenheitova teplota [F]	
	$T_C$ ... Celsiova teplota $[\text{C}^\circ]$	

### 3 ZTRÁTY V ASYNCHRONNÍM MOTORU

V asynchronním motoru vznikají ztráty, které jsou závislé na různých fyzikálních veličinách. V motorickém režimu nám vstupuje do statorového obvodu výkon z napájecí sítě, neboli příkon  $P_1$ . Statorové vinutí má nenulový elektrický odpor, ve kterém vznikají Joulovy ztráty  $\Delta P_{j1}$ . V železném magnetickém obvodu motoru vznikají magnetizační ztráty nazývané také ztráty v železe  $\Delta P_{Fe}$ . Zbývající výkon  $P_\delta$  způsobí ztráty, které jsou přenášeny vzduchovou mezerou na rotor. Vinutím rotoru protékají proudy, které obdobně jako ve statorovém vinutí způsobí vznik Jouleových ztrát  $\Delta P_{j2}$ . Na hřídeli vzniká mechanický výkon  $P_m$ . Část tohoto výkonu se v motoru spotřebuje na krytí mechanických ztrát  $\Delta P_m$  a ztrát dodatečných  $\Delta P_d$ . Zbývající výkon  $P_2$  je užitečným výkonem motoru.

Celkový výkon asynchronního motoru se spočítá jako rozdíl mezi příkonem motoru a jednotlivých ztrát, které v motoru vznikají.

Označení:  $P_2$

Jednotka: [W]

Vztah:  $P_2 = P_1 - \Delta P_{j1} - \Delta P_{j2} - \Delta P_{Fe} - \Delta P_d - \Delta P_m$  (3.1)

Účinnost asynchronního motoru je dána podílem výkonu na hřídeli motoru  $P_2$  a příkonu motoru  $P_1$ .

Označení:  $\eta$

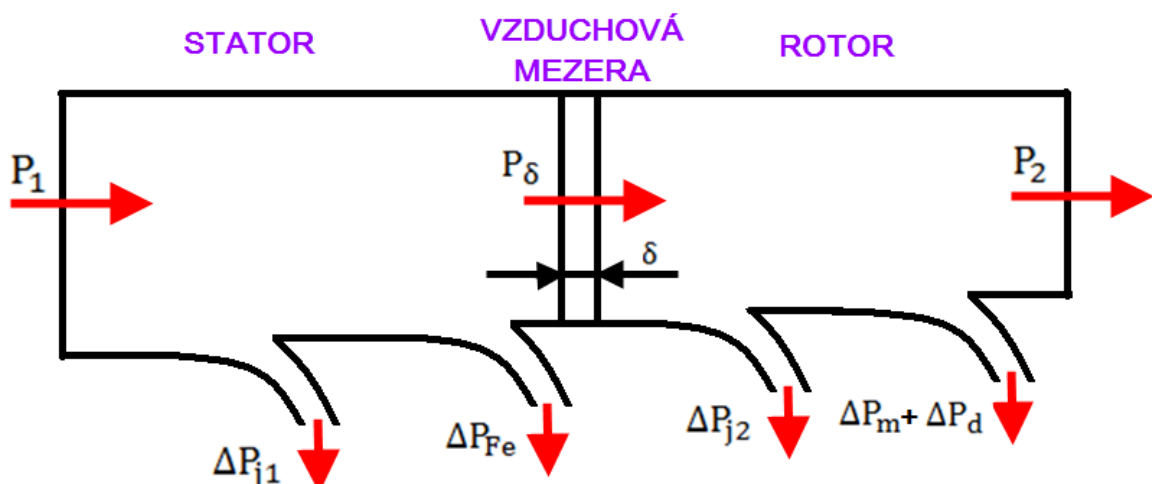
Jednotka: [%]

Vztah:  $\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100$  (3.2)

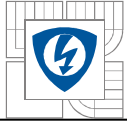
Ostatní proměnné:  $P_2$  ... výkon na hřídeli motoru [W]

$P_1$  ... příkon motoru neboli výkon z napájecí sítě [W]

Účinnost asynchronního motoru je při jmenovitém zatížení poměrně velká. U nejmenších motorů je hodnota účinnosti 0,6. U těch největších až nad 0,95.



Obrázek 2: Tok výkonu asynchronního motoru



**Ztráty ve vinutích  $\Delta P_j$**  neboli ztráty Jouleovy jsou závislé na procházejícím proudu ve vinutí statoru, rotoru a přímo úměrné jeho druhé mocnině.[1],[2],[3]

Označení:  $\Delta P_j$

Jednotka: [W]

Vztah:  $\Delta P_j = m_f \cdot R \cdot I^2$  (3.3)

Ostatní proměnné:  $m_f$  ... počet fází [-]

$R$  ... činný odpor vinutí [ $\Omega$ ]

$I$  ... proud ve vinutí [A]

Teplota zásadně ovlivňuje ztráty stroje. Závislost odporu na teplotě úzce souvisí s materiálem vinutí na elektrických stojích. Pro výrobu vinutí se používají materiály s velkou elektrickou vodivostí jako je měď, hliník, popřípadě slitiny těchto kovů. Odpor vodičů s teplotou roste.

Vztah:  $R_2 = R_1 \cdot [1 + \alpha(T_2 - T_1)]$  (3.4)

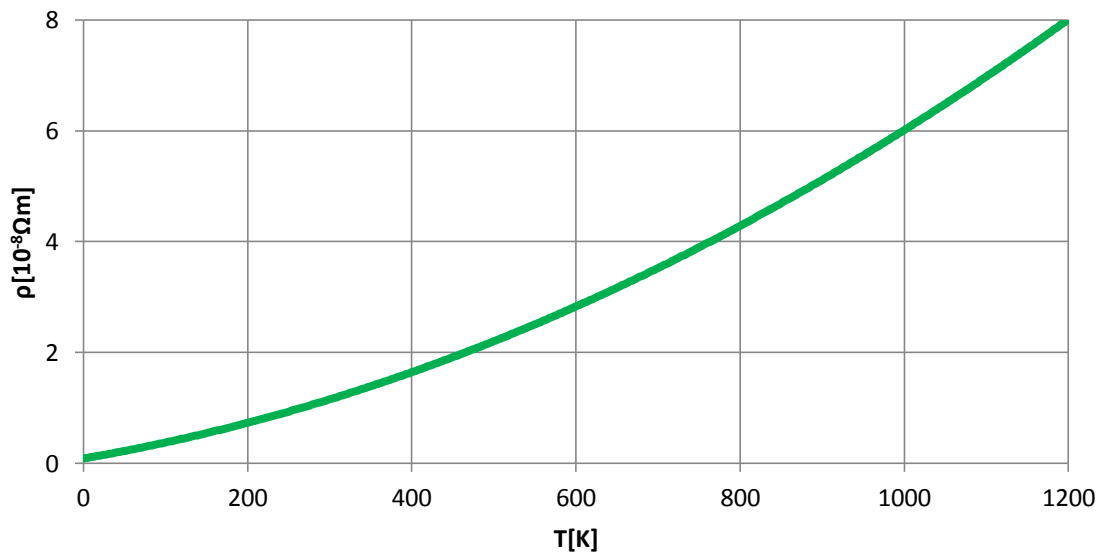
Ostatní proměnné:  $R_1$  ... odpor při teplotě  $T_1$  [ $\Omega$ ]

$R_2$  ... odpor při teplotě  $T_2$  [ $\Omega$ ]

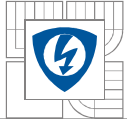
$\alpha$  ... teplotní součinitel odporu [ $K^{-1}$ ]

$(T_2 - T_1)$  ... rozdíl teplot [K]

Vztah mezi teplotou a rezistivitou mědi je téměř lineární v širokém teplotním rozsahu. Tohle tvrzení platí i pro jiné kovy.[5]



Obrázek 3: Graf závislosti rezistivity mědi na teplotě[5]



**Ztráty v magnetickém obvodu  $\Delta P_{Fe}$** , taktéž ztráty v železe, které jsou přímo úměrné druhé mocnině indukovaného napětí a odporem respektujícím ztráty v železe. V železe magnetického obvodu statoru vznikají ztráty hysterezní  $\Delta P_h$  a ztráty vířivými proudy  $\Delta P_w$ , které jsou úměrné čtverci kmitočtu, přičemž obojí jsou úměrné na kvadrátu magnetické indukce. Tyto ztráty závisejí na jakosti použité oceli, tloušťce plechů, na frekvenci a indukci.[1]

Označení:  $\Delta P_{Fe}$

Jednotka: [W]

Vztah: 
$$\Delta P_{Fe} = m_f \cdot \frac{U_i^2}{R_{Fe}} \quad (3.5)$$

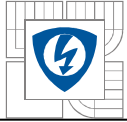
Ostatní proměnné:  $m_f$  ... počet fází [-]

$U_i$  ... indukované napětí [V]

$R_{Fe}$  ... odpor respektující ztráty v železe [ $\Omega$ ]

**Ztráty mechanické  $\Delta P_m$**  se skládají ze ztrát, které vznikají třením v ložiskách a z ventilačních ztrát. Ztráty vznikající třením v ložiskách jsou lineárně úměrné úhlové rychlosti. Tyto ztráty převládají při pomalém pohybu. Ztráty ventilační jsou úměrné třetí mocnině úhlové rychlosti a převládají při rychlém pohybu.

**Ztráty dodatečné  $\Delta P_d$**  se vyskytují při chodu naprázdno nebo v závislosti na zatěžovacím proudu. Podle toho se první druh nazývá dodatečné ztráty naprázdno (povrchové a pulzní ztráty) a druhý druh dodatečné ztráty při zatížení.[3]



## 4 ŠÍŘENÍ TEPLA

Teplu se šíří z místa s vyšší teplotou do místa s teplotou nižší. Rozeznáváme tři základní způsoby šíření tepla, podle toho v jakém prostředí a na jakém fyzikálním principu se tento přenos tepla uskutečňuje. Způsoby šíření tepla tedy jsou:

- vedením (kondukcí)
- prouděním (konvekcí)
- sáláním

V praxi se jednotlivé způsoby přenosu tepla vyskytují současně. Většinou, ale jeden způsob šíření nad ostatními převyšuje. Občas se vyskytují odděleně.[8]

### 4.1 Šíření tepla vedením

Při styku mikroskopických částic dvou těles, které nemají stejnou teplotu, dochází k přímému přenosu energie. Podstatou je difuze volných elektronů u pevných kovových látek, elektrické vlnění u pevných nekovových látek a kapalin, také difuze atomů nebo molekul u plynů. Ve všech těchto případech je výsledkem vyrovnání kinetické energie a pohybu molekulárních částic. Navenek se projeví jako přechod tepla z teplejších částic na chladné.

Vedením můžeme rozumět například **přechod tepla rovinnou stěnou složenou** z několika vrstev různé tloušťky a různé tepelné vodivosti, při které je průtoková plocha stejná. Předpokládáme, že stěna je homogenní a izotropní, proto tedy proudí teplo jen kolmo k povrchovým plochám.[8],[9]

Průchod tepla rovnou plochou je popsán tepelným tokem  $Q_T$ .

Označení:  $Q_T$

Jednotka: [W]

Vztah:  $Q_T = \frac{\lambda}{d} \cdot S \cdot (T_1 - T_2)$  (4.1)

Ostatní proměnné:  $Q_T$  ... tepelný tok [W]

$\lambda$  ... součinitel tepelné vodivosti materiálů [ $Wm^{-1}K^{-1}$ ]

$S$  ... plocha stěny [ $m^2$ ]

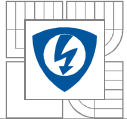
$d$  ... tloušťka stěny [m]

$(T_1 - T_2)$  ... rozdíl teplot [K]

### 4.2 Šíření tepla prouděním (konvekcí)

Přenos tepla prouděním se vyskytuje pouze u kapalin a plynů. Při pohybu proudící kapaliny nebo plynu se přemísťují částice různé teploty. Při vzájemném styku částice o vyšší teplotě předávají teplo chladnějším částicím. Rozeznáváme dva druhy konvekce tepla:

- **přirozená** - rozumí se samovolný pohyb kapaliny nebo plynu, který je způsobený nestejným rozdělením teploty v kapalině nebo plynu. Jedná se například o šíření tepla z radiátorů do vytápěné místnosti.
- **nucená** - pohyb kapalin či plynů je uměle zachován, například ventilátorem nebo čerpadlem.



Vztah pro šíření tepla prouděním vychází z rovnice na výpočet tepelného toku, který prochází skrze plochu stěny.[8]

Označení:	$\phi$	
Jednotka:	[W]	
Vztah:	$\phi = \alpha \cdot S \cdot (T_1 - T_2)$	(4.2)
Ostatní proměnné:	$\phi$	... tepelný tok [W]
	$S$	... plocha stěny [m <sup>2</sup> ]
	$\alpha$	... součinitel přestupu tepla [W. m <sup>-2</sup> . K <sup>-1</sup> ]
	$(T_1 - T_2)$	... rozdíl teplot ohřívané nebo ochlazované tekutiny [K]

### 4.3 Šíření tepla sáláním

Sáláním se rozumí šíření tepelné energie zářením. Každé těleso, které má vyšší teplotu než 0K vyzařuje všemi směry elektromagnetické záření o vlnových délkách 0,7 až 4 $\mu$ m. Zařízení se šíří rychlostí světla. Při dopadu na jiné těleso se zčásti odrazí zpět, zčásti tělesem projde a zčásti je tělesem pohlceno. Následně je přeměněno na tepelnou energii.

Těleso, které pohltí všechnu dopadající energii, nazýváme absolutně černé těleso. Tomuto stavu se nejvíce podobají saze.

Těleso se zahřívá, když přijme více energie, než samo vyzařuje. Těleso se ochlazuje, převažuje-li jeho vlastní vyzařování. Pro velikost energie vyzářenou absolutně černým tělesem, tedy celkovou intenzitu záření, platí Stefan-Bolzmannův zákon.[8]

Označení:	$I_e$	
Jednotka:	[W.m <sup>2</sup> ]	
Vztah:	$I_e = \sigma \cdot T_{td}^4$	(4.3)
Ostatní proměnné:	$\sigma$	... Stefan-Bolzmanna konstanta [W. m <sup>-2</sup> . K <sup>-4</sup> ]
	$T_{td}$	... termodynamická teplota [K]

Hodnota Stefan-Bolzmannové konstanty sálání absolutně černého tělesa je  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{W. m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$

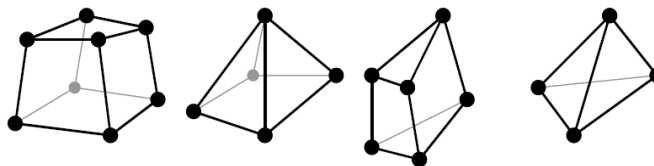


## 5 ANSYS-METODA KONEČNÝCH PRVKŮ

ANSYS Workbench je prostředí, které sdružuje široké spektrum technologií, které jsou použity v simulačním software od společnosti ANSYS. Tento projekt automaticky propojuje programy, užití ve všech krocích simulace, provádí uživatele celým procesem. ANSYS Workbench přináší mimořádnou produktivitu, která spočívá v možnosti vyvíjet produkty s použitím simulačních nástrojů pomocí oboustranného propojení s CAD nástroji výkonným automatizovaným nástrojem pro vytváření sítí. Dále také automatickou aktualizací jednotlivých projektů, parametrizací veškerých úloh a spoustu dalších možností.[10]

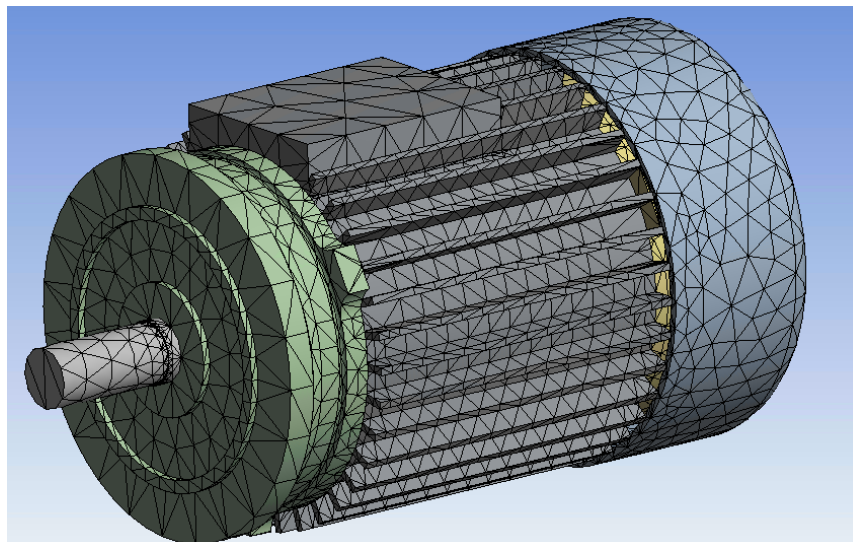
Jednotlivé součásti jsou posuzovány z hlediska vnitřních napětí a vnějších deformací, které jsou s ohledem na tvar součásti, fyzikální veličiny a vnější síly rozděleny na konečný počet prvků neboli elementů. Elementy mají tvar například čtyřstěnu. Zatížení prvků vede k řešení mnoha rovnic. K řešení soustavy rovnic se používá právě metoda konečných prvků, která patří mezi nejdůležitější numerickou metodu. Soustavy rovnic popisují model součásti, jeho zatížení a také vlastnosti.[11]

Metoda konečných prvků nejprve vyžaduje rozdělení dané oblasti na konečný počet podoblastí - elementů. Musíme tedy vytvořit na modelu tělesa síť konečných prvků, které mají tvar čtyřúhelníků, trojúhelníků apod. Pro každý druh prvku kromě tvaru je vyznačený počet a poloha jednotlivých uzlů. Uzly sítě slouží k hledání neznámých parametrů řešení, mezi něž patří natočení či posuvy, z kterých počítáme napětí. Hustota prvků sítě ovlivňuje kvalitu výsledku.

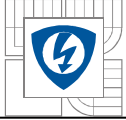


Obrázek 4: Tvar prvků[11]

Pokud je síť příliš hustá, řešení trvá příliš dlouho. Je-li však příliš krátká, síť může vést k podhodnocení napětí. Hustotu sítě tedy volíme na základě své zkušenosti. U trojrozměrného modelu obsahuje každý uzlový bod sítě tři neznámé parametry - hodnoty posuvů ve třech směrech.



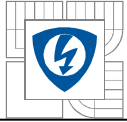
Obrázek 5: Síť modelu asynchronního motoru



Všem prvkům musíme zadat základní parametry materiálů, musíme definovat okrajové podmínky, mezi které patří vazby a zatížení. Tyto podmínky musí zajistit jednoznačnou polohu tělesa v prostoru.

Přehled základních prvků podle tvaru:

- 2D prvky - rovinné, případně rotačně symetrické
- 3D prvky - prostorové
- skořepinové prvky
- deskostěnové prvky
- prutové prvky - pouze pro tah-tlak, případně ohyb nebo krut
- speciální prvky - kontaktní, trhlinové, prvky se speciální konstitutivními vztahy apod.[13]



## 6 TEPELNÝ VÝPOČET POMOCÍ NÁHRADNÍCH TEPELNÝCH OBVODŮ

Metoda náhradních tepelných obvodů využívající tepelných odporů je založena na analogickém řešení elektrických obvodů. Použití náhradních tepelných obvodů slouží k určení středních teplot jednotlivých částí elektrického stroje, které se chápou jako homogenní tělesa.

Pro každou část tepelného schématu vycházíme ze základní rovnice:

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

Proměnné hodnoty:  $\vartheta_1, \vartheta_2$  ... střední teploty jednotlivých částí stroje [°C]  
 $P_{12}$  ... tepelný tok mezi jednotlivými částmi stroje [W]  
 $R_{12}$  ... tepelný odpor mezi jednotlivými částmi stroje [K·W<sup>-1</sup>]

Čím větší bude počet prvků ve schématu, tedy jednotlivých částí stroje, tím přesnější bude výpočet. Při sestavování náhradního tepelného obvodu elektrického stroje postupujeme tak, že stator i rotor rozdělíme z tepelného hlediska na tři poměrně stejnorodá tělesa, která jsou zdroji tepla.

**Stator** - drážková část vinutí statoru se ztrátami  $\Delta P_{dr1}$ , dvě strany čel s celkovými ztrátami  $\Delta P_{\zeta1}$  a železo statoru se ztrátami  $\Delta P_{Fe1}$ .

Ve schématu se dále vyskytuje tepelný odpor:

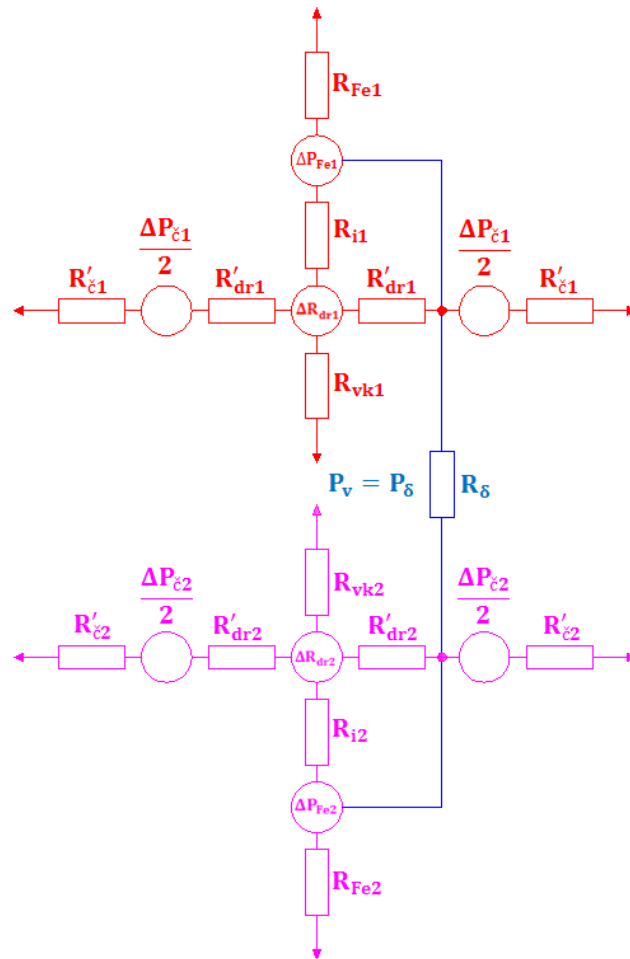
- drážkové izolace statoru  $R_{i1}$
- části od vinutí k chladicímu vzduchu v radiálních ventilačních kanálech statoru  $R_{vk1}$
- drážky statoru  $R'_{dr1}$
- čel vinutí  $R'_{\zeta1}$

**Rotor** - drážková část vinutí statoru se ztrátami  $\Delta P_{dr2}$ , dvě strany čel s celkovými ztrátami  $\Delta P_{\zeta2}$  a železo statoru se ztrátami  $\Delta P_{Fe2}$ .

Ve schématu se dále vyskytuje tepelný odpor:

- drážkové izolace statoru  $R_{i2}$
- části od vinutí k chladicímu vzduchu v radiálních ventilačních kanálech statoru  $R_{vk2}$
- drážky statoru  $R'_{dr2}$
- čel vinutí  $R'_{\zeta2}$

**Vzduchová mezera** - tepelná vazba mezi státorem a rotorem je vyjádřena tepelným odporem  $R_{\delta}$ . [3]



Obrázek 6: Úplné náhradní tepelné schéma ASM, MOD[3]

Tepelný odpor drážkové izolace:

Označení:  $R_i$

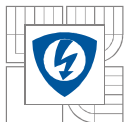
Jednotka:  $[K \cdot W^{-1}]$

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

Ostatní proměnné:  $d_{iz}$  ... je tloušťka drážkové izolace [m]

$\lambda_i$  ... součinitel tepelné vodivosti izolace  $[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$

$S_i$  ... plocha izolace  $[m^2]$



Tepelný odpor čel vinutí:

Označení:  $R_{\zeta}$

Jednotka:  $[K \cdot W^{-1}]$

Vztah: 
$$R_{\zeta} = \frac{d_{iz}}{\lambda_i \cdot S_{\zeta}} + \frac{1}{\alpha_{\zeta} \cdot S_{\zeta}} \quad (6.3)$$

Ostatní proměnné:  $d_{iz}$  ... tloušťka izolace cívky [m]

$\lambda_i$  ... součinitel tepelné vodivosti  $[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$

$S_{\zeta}$  ... ochlazovací plocha čel  $[m^2]$

$\alpha_{\zeta}$  ... součinitel přestupu tepla čel vinutí  $[W \cdot m^{-2} K^{-1}]$

Tepelný odpor kovu vinutí:

Označení:  $R_v$

Jednotka:  $[K \cdot W^{-1}]$

Vztah: 
$$R_v = \frac{l_1 + l_{\zeta}}{12 \cdot Q_{dr} \cdot V_{ef} \cdot S_{ef} \cdot \lambda} = \frac{R'_{dr}}{2} \quad (6.4)$$

Ostatní proměnné:  $V_{ef}$  ... počet efektivních vodičů drážce [-]

$\lambda$  ... součinitel tepelné vodivosti kovů izolace  $[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$

$S_{ef}$  ... průřez efektivního vodiče  $[m^2]$

$R'_{dr}$  ... tepelný odpor drážky  $[K \cdot W^{-1}]$

$Q_{dr}$  ... počet drážek [-]

Tepelný odpor části vinutí k chladicímu vzduchu v radiálních ventilačních kanálech:

Označení:  $R_{vk}$

Jednotka:  $[K \cdot W^{-1}]$

Vztah: 
$$R_{vk} = \frac{d_{iz}}{\lambda_i \cdot S_{vk}} + \frac{1}{\alpha_{vk} \cdot S_{vk}} \quad (6.5)$$

Ostatní proměnné:  $d_{iz}$  ... tloušťka izolace cívky [m]

$\lambda_i$  ... součinitel tepelné vodivosti drážkové izolace  $[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$

$S_{vk}$  ... plocha povrchu vinutí v radiálních kanálech  $[m^2]$

$\alpha_{vk}$  ... součinitel přestupu tepla  $[W \cdot m^{-2} K^{-1}]$

Tepelná vazba mezi statorem a rotorem:

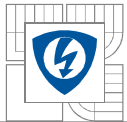
Označení:  $R_{\delta}$

Jednotka:  $[K \cdot W^{-1}]$

Vztah: 
$$R_{\delta} = \frac{1}{\alpha'_{\delta} \cdot S_{\delta}} \quad (6.6)$$

Ostatní proměnné:  $\alpha'_{\delta}$  ... součinitel přestupu tepla vzduchové mezery  $[W \cdot m^{-2} K^{-1}]$

$S_{\delta}$  ... plocha vzduchové mezery, z níž se odvádí teplo  $[m^2]$



Vyrovnávací tepelný tok:

Označení:  $P_v$

Jednotka: [W]

Vztah: 
$$P_v = \frac{\vartheta_{Fe1} - \vartheta_{Fe2}}{R_\delta} \quad (6.7)$$

Ostatní proměnné:  $\vartheta_{Fe1}, \vartheta_{Fe2}$  ... teplota železa statoru a rotoru [K]

$R_\delta$  ... tepelná vazba mezi státorem a rotorem [K. W<sup>-1</sup>]

Tepelný odpor od železa statoru (rotoru) k chladicímu vzduchu:

Označení:  $R_{Fe}$

Jednotka: [K. W<sup>-1</sup>]

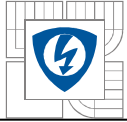
Vztah: 
$$R_{Fe} = \frac{1}{\alpha_{er} \cdot S_{er} + \alpha_{ir} \cdot S_{ir}} \quad (6.8)$$

Ostatní proměnné:  $\alpha_{er}$  ... součinitel přestupu tepla vnějšího povrchu paketů při radiální ventilaci [W.m<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>]

$\alpha_{ir}$  ... součinitel přestupu tepla vnitřního povrchu paketů [W.m<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>]

$S_{er}$  ... vnější povrch paketu [m]

$S_{ir}$  ... vnitřní povrch paketu [m]



## 7 VYTVÁŘENÍ MODELU V PROSTŘEDÍ AUTODESK INVENTOR

Při vytváření modelu asynchronního motoru byla možnost využít spousty CAD systémů, avšak v této práci byl využit software od firmy Autodesk a to Inventor.

### 7.1 Autodesk Inventor

Autodesk Inventor patří v praxi mezi nejrozšířenější CAD aplikace pro strojírenskou 3D konstrukci. Tento program obsahuje funkce pro adaptivní a parametrické 3D navrhování jednotlivých součástí, tvorbu výkresové dokumentace ve 2D, prezentace, vizualizace a animace. Také je vhodný pro správu dat pomocí databáze Vault. Dále program bere v úvahu fyzikální vlastnosti konstruovaných výrobků.

Součástí programu je kromě tvorby základních 3D modelů také funkce pro modelování ocelových konstrukcí, plechových součástí, svárů apod.

Další součástí tvoří Modul Inventor Studio, které slouží například k tvorbě animací. Nedílnou součástí programu je i Obsahové centrum, neboli široká databáze mnoha normalizovaných součástí ISO, DIN, ANSI aj.

### 7.2 Modelování asynchronního motoru

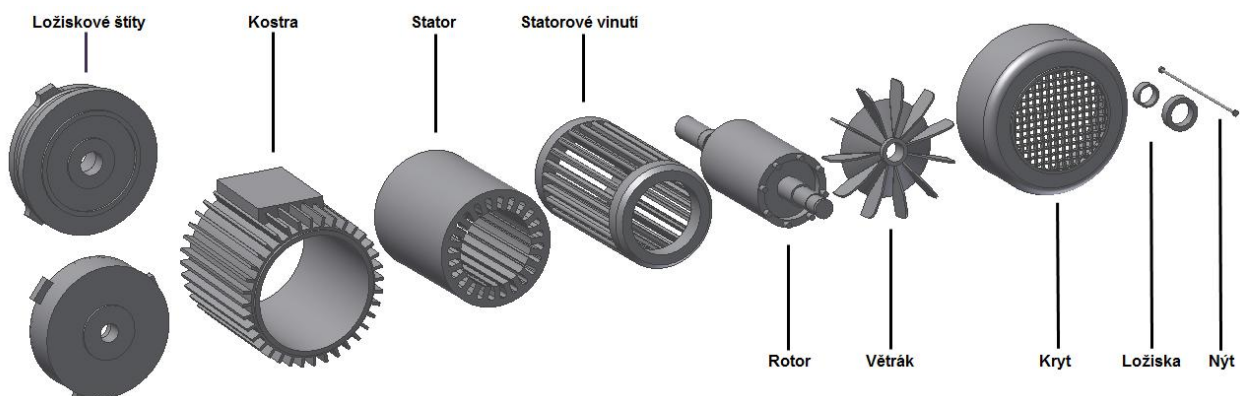
Model asynchronního motoru byl tvořen na základě reálného zadání. Byly zadány veškeré parametry, potřebné k jeho zkonstruování.

Práce tedy spočívala ve vytvoření jednotlivých komponentů stroje - statoru, statorového vinutí, rotoru, jehož součástí je hřídel, kostry motoru, ložiskových štítů, ložisek, nýtů, větráku a jeho krytu.

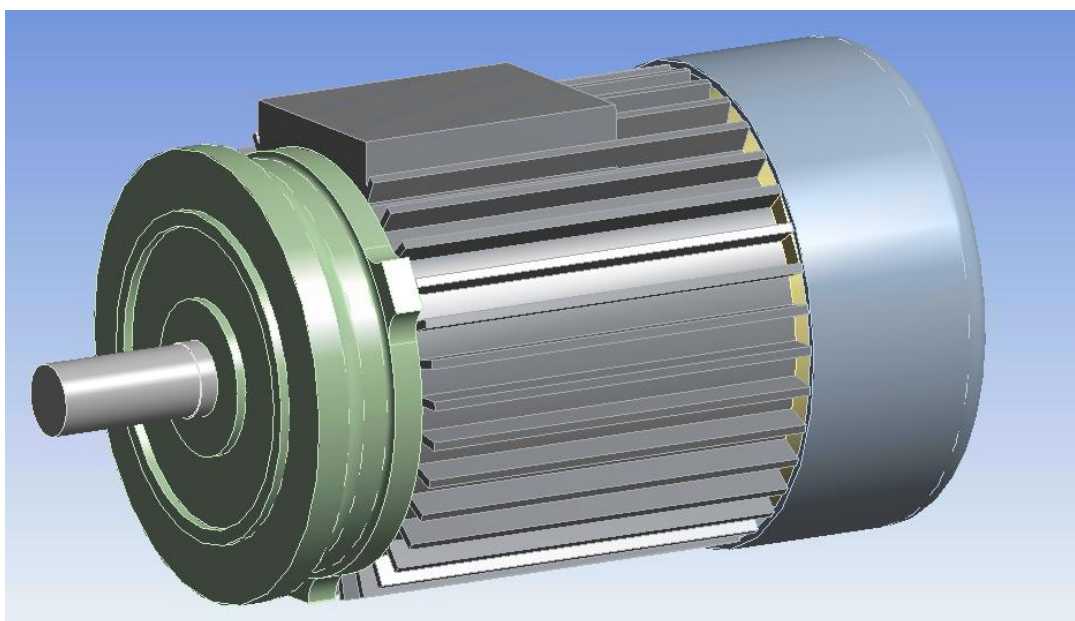
Pro konstrukci komponentu bylo nejprve vybráno modelování Součástí (přípona ipt) a dále pomocí funkce 2D Náčrt základní návrh součásti ve 2D prostoru. Po návrhu součásti ve 2D byla součást pomocí funkce Vysunutí vytažena do prostoru a vzniklo tak 3D těleso.

Posledními úpravami na tělese bylo zkosení či zaoblování hran. Poté, co byly veškeré součásti namodelovány, přistoupilo se k jejich následnému sestavení pomocí funkce Sestava (přípona iam). K jednotlivým tělesům se přiřadily parametrické vazby mezi sebou, jako například společná hrana, plocha, osa apod.

Po dokončení celkové sestavy bylo nutné zkontrolovat možnost kolizí mezi jednotlivými součástmi, ze kterých se sestava skládá. K této kontrole slouží funkce Kontrola kolizí. Pokud by se nějaká kolize vyskytla, mohla by mít negativní vliv na následující výpočty.



*Obrázek 7: Jednotlivé součásti modelu AS motoru*



*Obrázek 8: Výsledný sestavený model AS motoru*

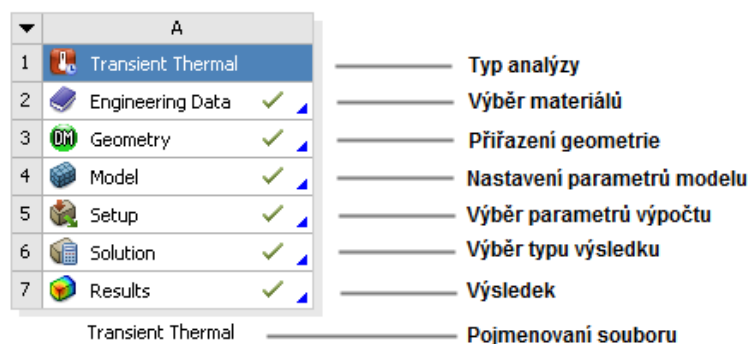


## 8 VÝPOČET TEPLOTNÍHO POLE V PROGRAMU ANSYS

Program ANSYS obsahuje několik analyzačních systémů, díky kterým je možno řešit výpočet teplotních úloh. V našem případě jsme využili transientní analýzu, tedy „*Transient Thermal*“, která závisí na čase.

### 8.1 Vytváření teplotní analýzy

Při vytváření nové analýzy je zapotřebí v programu ANSYS vybrat v panelu nástrojů příslušný typ analýzy. Tyto typy se nacházejí na levé straně rozhraní tohoto programu. Poté je nutno vybraný typ analýzy přetáhnout pomocí levého tlačítka myši do projektového schématu. Následně získáme tabulku jednotlivých operací, kterou je nutno nejprve nastavit, než přejdeme k samotnému výpočtu.



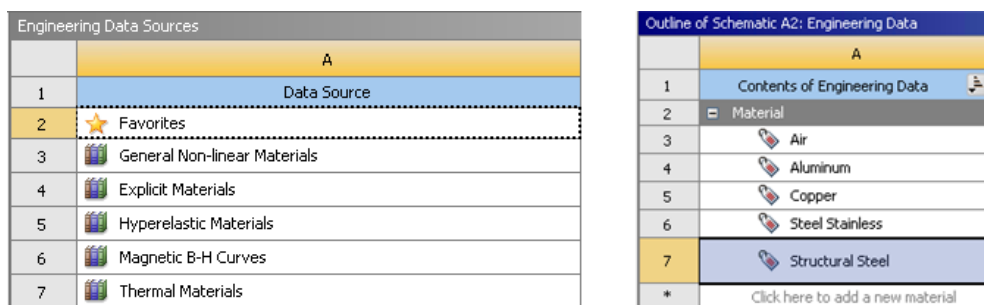
Obrázek 9: Nastavitelné bloky vybrané analýzy

Transientní analýza, nám umožňuje sledovat oteplování jednotlivých částí motoru v závislosti na čase. Tato analýza dovoluje kromě měření při ustáleném stavu také měření při různých druzích zatížení apod.

#### 8.1.1 Nastavení materiálových vlastností – „Engineering Data“

Blok „*Engineering Data*“ slouží k nastavení jednotlivých druhů materiálů používaných v dané simulaci. Obsahuje knihovny s celou řadou materiálů – „*General Non-linear Materials, Explicit Materials, Hyperelastic Materials, Magnetic B-H Curves a Thermal Materials*“ (viz. Obrázek 10). Další možností je vytvoření vlastního materiálu, kdy pro přidání materiálu využijeme příkazu „add new material“.

Pro naši simulaci jsme vybrali knihovnu „*Thermal Materials*“ neboli Tepelné materiály, které obsahují veškeré materiály potřebné pro náš model, jako například měď, ocel a hliník. Po výběru jednotlivých materiálů se nám všechny objeví v samostatné tabulce, která slouží pro lepší přehled. V této tabulce vidíme, které materiály zrovna používáme. Po výběru je nutné aktualizovat projekt. K tomu nám slouží tlačítko „*update project*“, které námi vybrané materiály vygeneruje. Při použití tlačítka „*refresh project*“ převedeme jednotlivé materiály do bloku s názvem „*Model*“, tedy nastavení parametrů modelu.



Obrázek 10: Knihovny a jednotlivé materiály

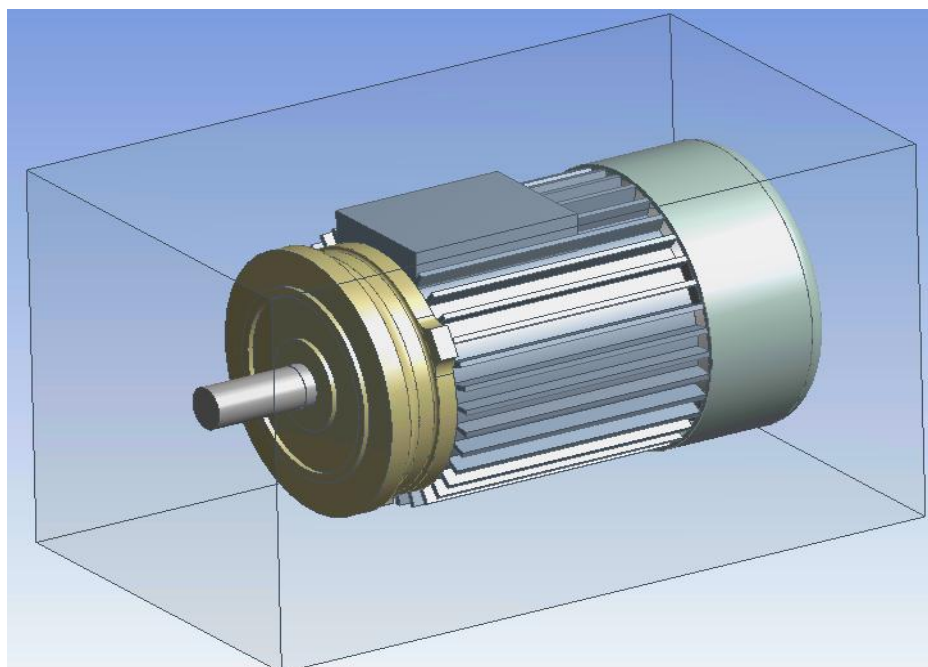
### 8.1.2 Přiřazení geometrie - „Geometry”

Blok „*Geometry*” slouží k modelování případně k otevírání modelů z jiných systémů CAD. Modul se spouští v novém okně nesoucí název „*DesignModeler*”. V programu ANSYS je samotné ovládání sloužící k modelování složitější, než například programu Autodesk Inventor. Využili jsme tedy druhou možnost, a to otevření geometrie modelu, vytvořeného v programu Autodesk Inventor. Důležité je mít soubor uložený s příponou *sat*, aby jej ANSYS mohl otevřít. K tomu nám slouží funkce s názvem „*add external geometry file*”. Před samotným vygenerováním sestavy našeho modelu je důležité zvolit používané jednotky. Obvykle se používají jednotky, které byly použity v původní sestavě, v našem případě milimetry.

### 8.1.3 Funkce „Enclosure”

Funkce „*Enclosure*” umožňuje model uzavřít vnějším polem, které může být ve tvaru kvádru, válce, koule, případně uživatelsky definovaného tvaru. Uzavření je možné vyplnit nejružnějšími materiály, ve kterých se model bude při výpočtu vyskytovat.

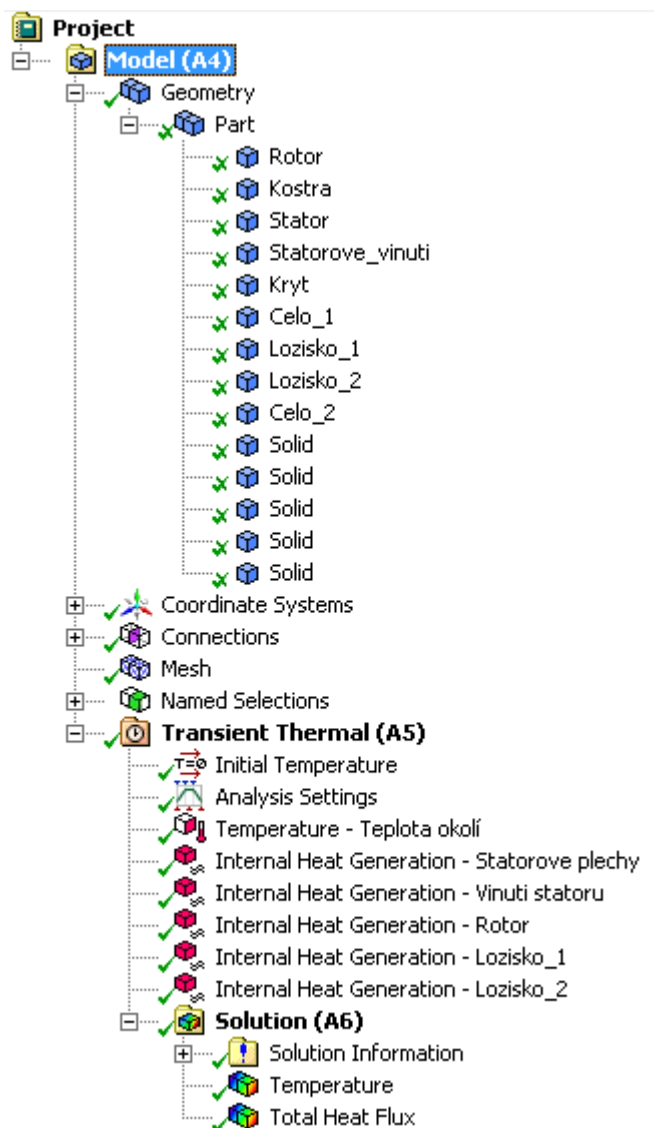
Pro naši analýzu bylo zvoleno pole ve tvaru kvádru skládajícího se ze šesti uzavírajících se ploch. Toto pole bylo vyplněno vzduchem (viz. Obrázek 11).



Obrázek 11: Model uzavřený pomocí funkce „*Enclosure*”

### 8.1.4 Nastavení parametru modelu

Nastavení parametrů modelu se spouští blokem s názvem „*Model*“. Dojde k otevření nového okna „*Mechanical*“, které je společné pro zbývající bloky - „*Setup, Solution a Result*“. V levé části programu se objeví tzv. strom s rozdělením jednotlivých větví, viz. Obrázek 12.



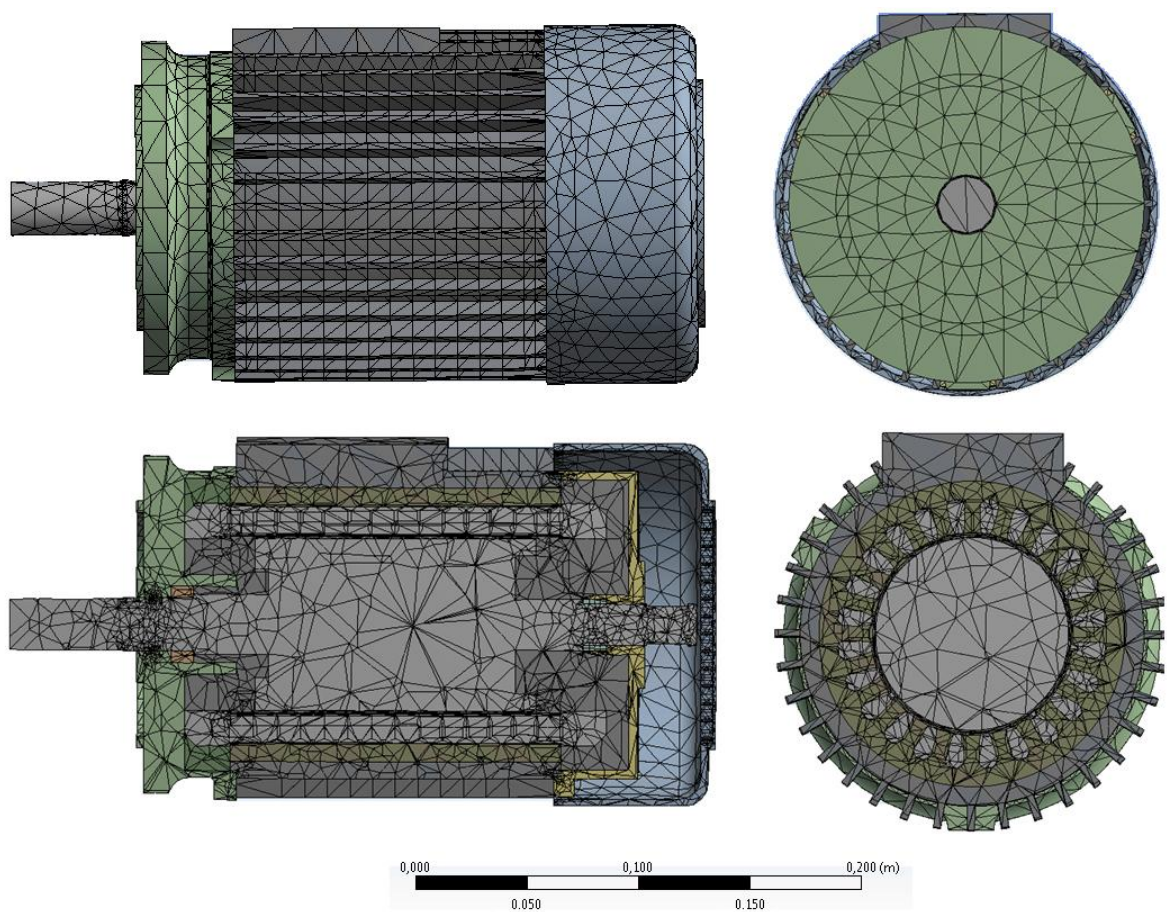
Obrázek 12: Rozdělení větví pro jednotlivé moduly

V první větvi „*Geometry*“ se po rozbalení objeví jednotlivé objekty dané sestavy. Tyto objekty většinou nesou název, který je použit při vkládání sestavy do programu ANSYS. Názvy součástí můžeme přejmenovat. Dále jsou ve větvi obsaženy objekty s názvem „*Solid*“. Tyto objekty jsou vzduchové výplně objektu, který je uzavřen funkcí „*Enclosure*“. Objekty můžeme skrývat (funkce „*hide body*“) nebo zviditelnovat (funkce „*show body*“). Tyto funkce slouží například k lepší orientaci. Je patrné, že jednotlivé objekty ve větvi „*Geometry*“ jsou zaškrtnuty zeleným křížkem, na rozdíl od ostatních položek stromu. To je způsobené tím, že jsou skryty veškeré vzduchové výplně.

Po označení prvků modelu se objeví na levé straně programu tabulka s detaily daného objektu. V záložce „*material-assignment*“ přiřadíme materiály jednotlivých prvku - měď, ocel a

hliník. Také v záložce „*properties*” zobrazíme vlastnosti vybraného tělesa – obsah „*volume*” a hmotnost „*mass*”.

Dále je potřeba použít funkci „*Mesh*”, která se nachází v záložce „*statistic*”, ve které je možno nastavit počet elementů. Tato funkce využívá metodu konečných prvků na dané těleso, v našem případě model asynchronního motoru. Funkce vytvoří síť konečných prvků, ve které můžeme nastavit její hustotu. Díky této hustotě určujeme, s jakou přesností bude program počítat. Pokud bude síť opravdu hustá, výpočet se může několikanásobně prodloužit. V tomto projektu bylo využito automatické vytvoření sítě konečných prvků (viz. Obrázek 13).



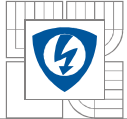
Obrázek 13: Síť konečných prvků ASM – celkový pohled a řezy

### 8.1.5 Výběr parametrů výpočtu - „*Setup*”

Blok „*Setup*” slouží k přiřazení teplotních vlastností materiálu v podobě vedení či vyzařování tepla, případně tepelného toku.

Nejprve nastavíme teplotou vzduchového obalu tělesa pomocí funkce „*Temperature*”, tedy teplotu okolí 22°C. Dále využijeme funkci „*Internal Heat generation*” neboli generace vnitřního tepla, kterou se tato práce zabývá. Generace vnitřního tepla udává ztráty v objemu tělesa. Jednotlivým součástem tedy přiřadíme vnitřní generaci tepla o velikosti, kterou definuje položka „*Magnitude*”. Následující tabulka (Tabulka 1) uvádí hodnoty jednotlivých ztrát, které platí pro zadaný motor, také objemy součástí a hodnoty vnitřní generace ztrát v objemu těles „*Magnitude*”.





Těleso	Objem - V	Ztráty - $\Delta P_x$	Magnitude
	[m <sup>3</sup> ]	[W]	[W/m <sup>3</sup> ]
Statorové plechy	7,02 · 10 <sup>-4</sup>	46,00	65532,65
Vinutí statoru	4,61 · 10 <sup>-4</sup>	66,00	143140,22
Rotor	6,29 · 10 <sup>-4</sup>	50,00	79421,26
Ložisko	4,71 · 10 <sup>-6</sup>	10,00	2122065,90

Tabulka 1: Hodnoty důležitých veličin jednotlivých těles

Pro výpočet vnitřní generace v objemu tělesa platí následující vztah:

$$\text{Magnitude} = \frac{[\Delta P_x]}{[V]} \quad (8.1)$$

Jednotka: [W/m<sup>3</sup>]

Ostatní proměnné:  $\Delta P_x$  ... Ztráty těles [W]

V ... objem těles [m<sup>3</sup>]

Například generace pro Statorové plechy se spočítá následovně:

$$\text{Magnitude} = \frac{[46,00]}{[7,02 \cdot 10^{-4}]} = \underline{\underline{65532,65 \text{ W/m}^3}}$$

Dalším krokem k úspěšnému výpočtu teplotního pole je nastavení doby výpočtu, neboli „*Analysis Setting*“. V levé části programu v záložce „*Step Controls*“, kde je možné nastavit konečný čas simulace „*Step End Time*“, dále minimální a maximální časový krok simulace „*Minimum Step Time*“ a „*Maximum Step Time*“, časovou integraci „*Time Integration*“, případně využít funkce „*Auto Time Stepping*“, který slouží k optimálnímu vyhodnocení počtu kroků za daný čas. V této práci byl nastaven výpočet v celkové délce 3000s. Zaznamenávání teploty bylo nastaveno každých 120s.

### 8.1.6 Výběr typu výsledku - „*Solution*“

V bloku nesoucí název „*Solution*“ stanovíme výstup simulace, tedy vyhodnocení teploty „*Temperature*“ a určení celkového tepelného toku „*Total Heat Flux*“. Po zadání nám program ANSYS vykreslí teplotní model celkového modelu asynchronního motoru. Součástí výsledku je také tabulka s údaji zaznamenaných v dobách, které byly nastaveny v programu „*Analysis Setting*“ včetně grafu, udávající průběh oteplení modelu za celkovou nastavenou dobu.

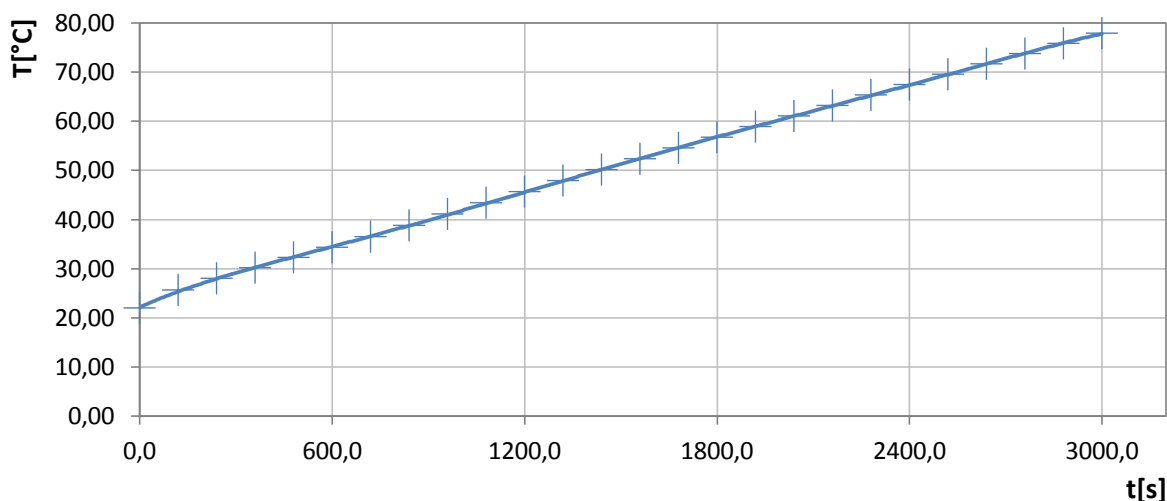
## 8.2 Výsledky transientní tepelné analýzy na AS motoru

Po vyhodnocení simulace transientní tepelné analýzy jsme získali hodnoty, které jsou uvedeny v následující tabulce (viz. Tabulka 2). Pro tyto hodnoty jsme vynesli charakteristiku, udávající oteplení celého asynchronního motoru za jednotku času (viz. Obrázek 14).

Charakteristiku jsme simulovali po dobu 3000 sekund a je patrné, že teplota nebyla zcela ustálená. Teplota by tedy dále nepatrně rostla, dokud by nedosáhla maximální teploty. Z charakteristiky je také patrné, že z výchozího stavu 22°C se model asynchronního motoru ohřál na hodnotu 77,9°C. Celkově se tedy ohřál o 55,9°C. Dále můžeme pozorovat, že největší přírůstek teploty byl po výchozím stavu měření, kdy teplota za 120 sekund vzrostla o 3,7°C.

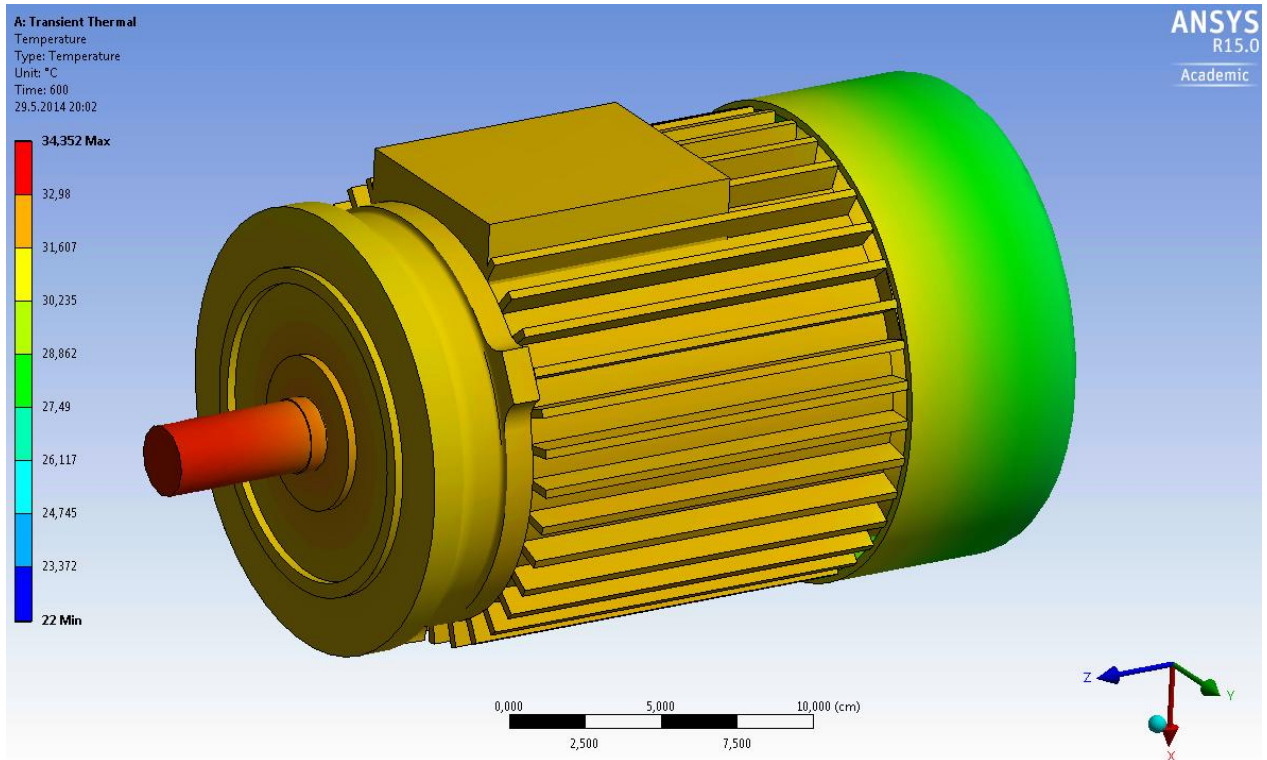
t	T	t	T
[s]	[°C]	[s]	[°C]
0,0	22,0	1560,0	52,3
120,0	25,7	1680,0	54,5
240,0	28,0	1800,0	56,7
360,0	30,2	1920,0	58,9
480,0	32,3	2040,0	61,0
600,0	34,4	2160,0	63,2
720,0	36,5	2280,0	65,3
840,0	38,8	2400,0	67,4
960,0	41,1	2520,0	69,5
1080,0	43,4	2640,0	71,6
1200,0	45,7	2760,0	73,7
1320,0	47,9	2880,0	75,8
1440,0	50,1	3000,0	77,9

Tabulka 2: Tabulka nasimulovaných hodnot programem ANSYS pro transientní analýzu

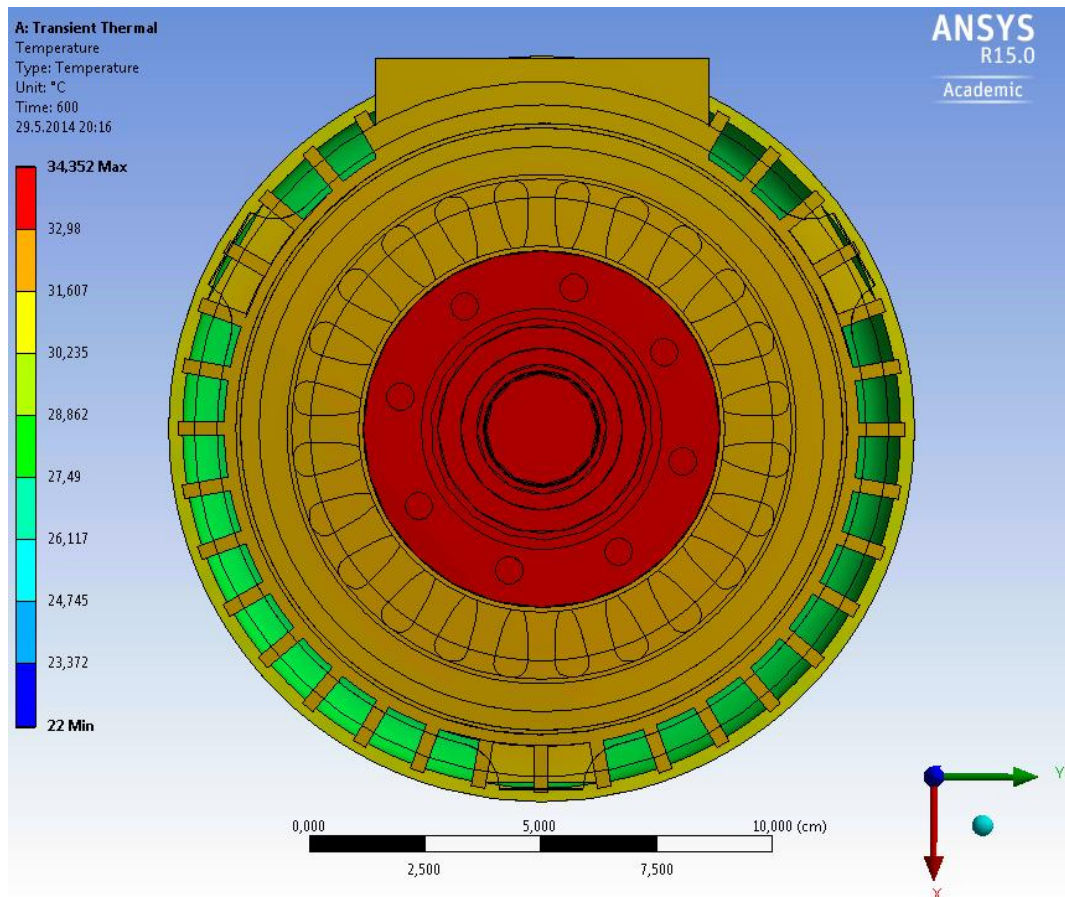


Obrázek 14: Závislost oteplení AM v programu ANSYS

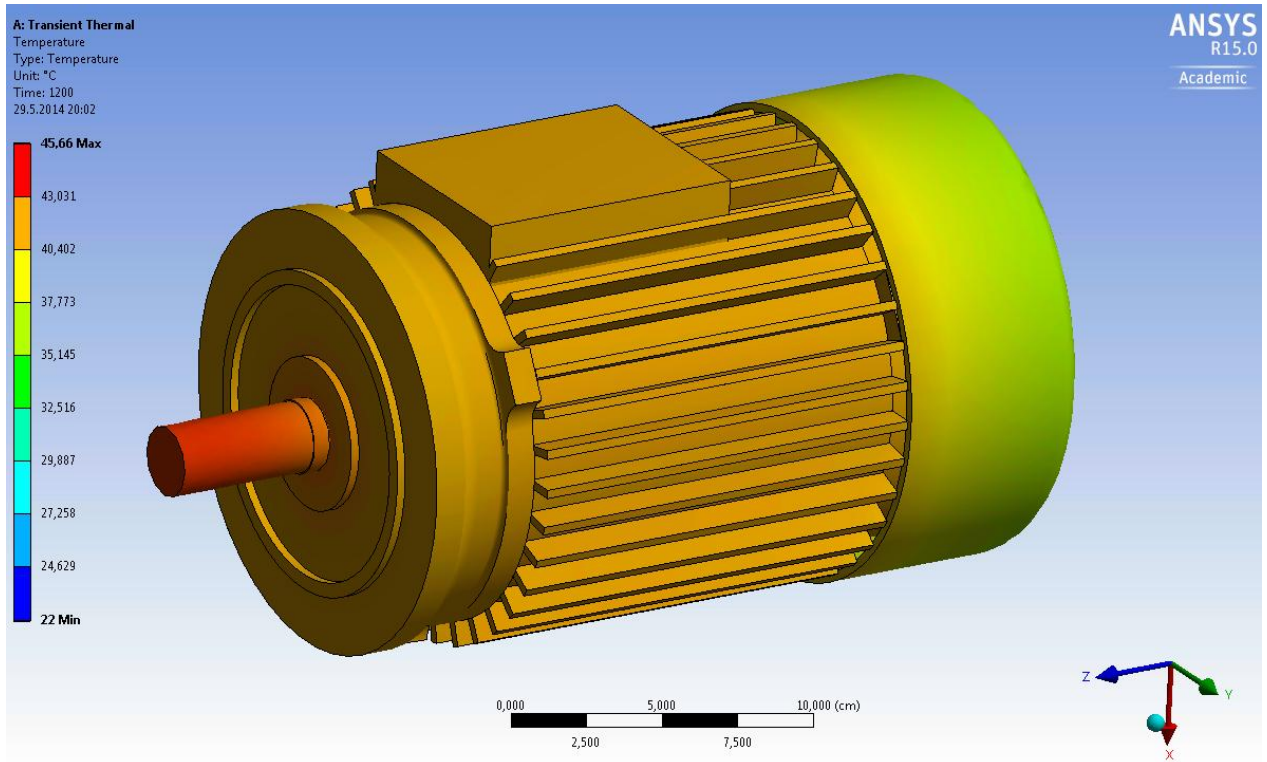
Dále jsou uvedeny teplotní snímky, udávající celkový pohled na model asynchronního motoru a jeho příčný řez (viz. Obrázek 15 až 22) zachycené při oteplení v čase 600 sekund, 1200 sekund, 2400 sekund a v konečném čase 3000s. Z obrázku lze pozorovat oteplení jednotlivých částí modelu motoru. K největšímu oteplení dochází v rotoru stroje a ložiscích.



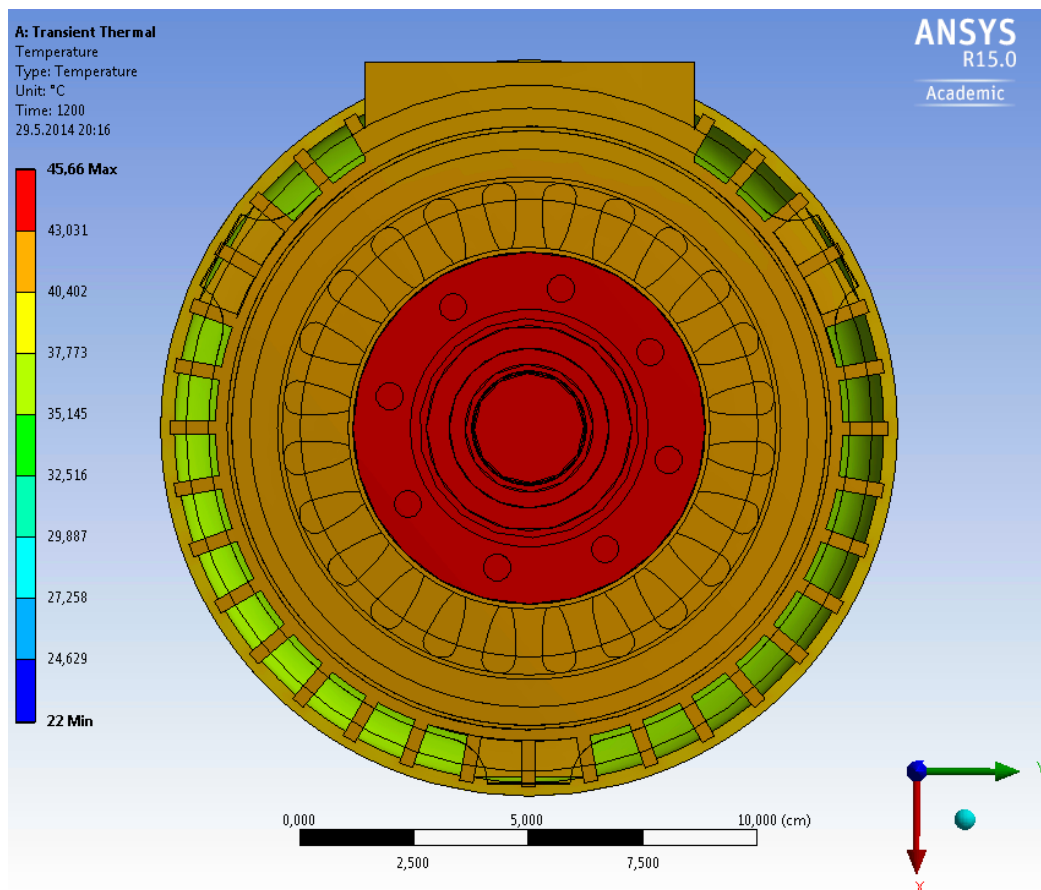
Obrázek 15: Oteplení asynchronního motoru v čase 600s



Obrázek 16: Oteplení asynchronního motoru v čase 600s (příčný řez strojem)

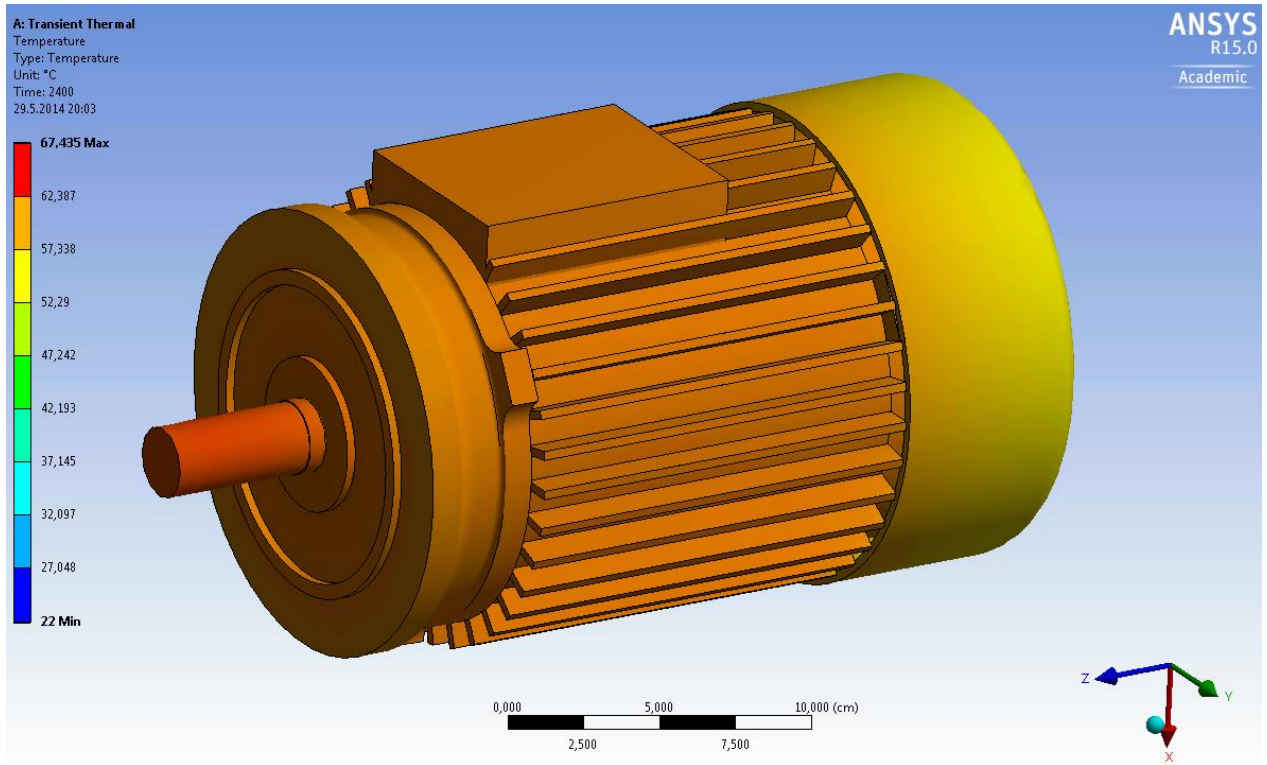


Obrázek 17: Oteplení asynchronního motoru v čase 1200s

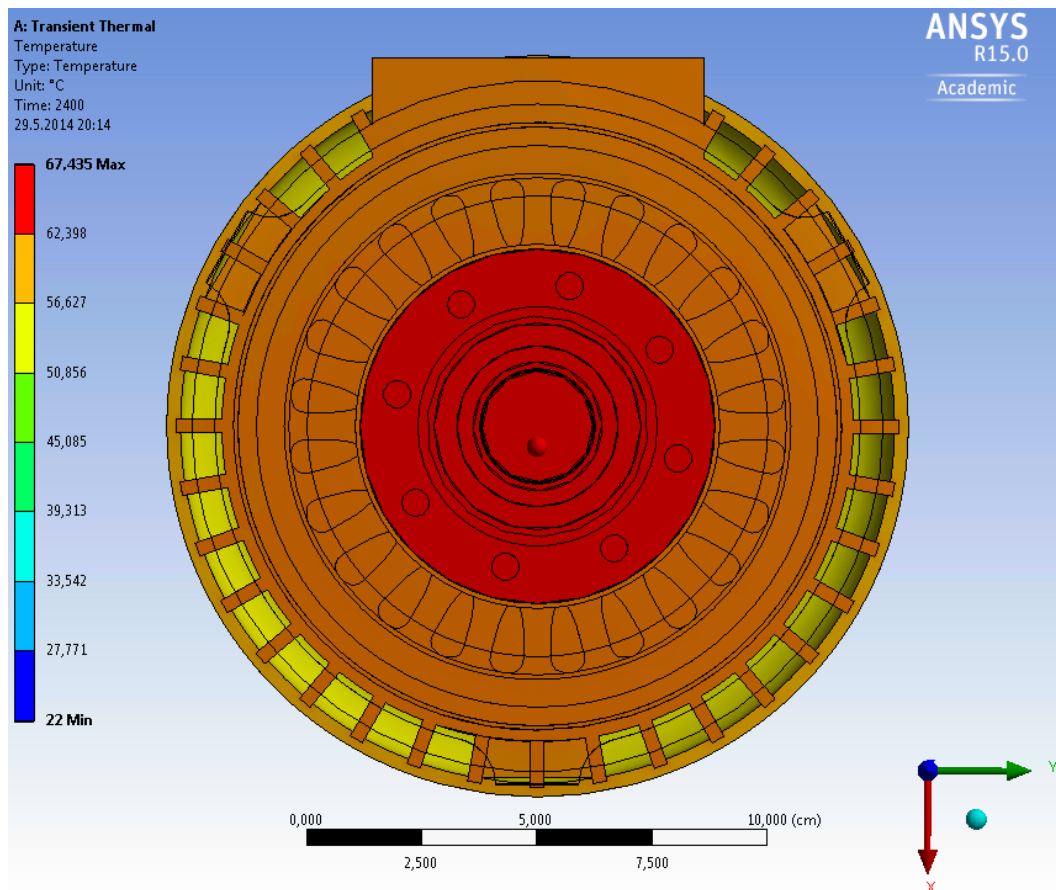


Obrázek 18: Oteplení asynchronního motoru v čase 1200s (příčný řez strojem)

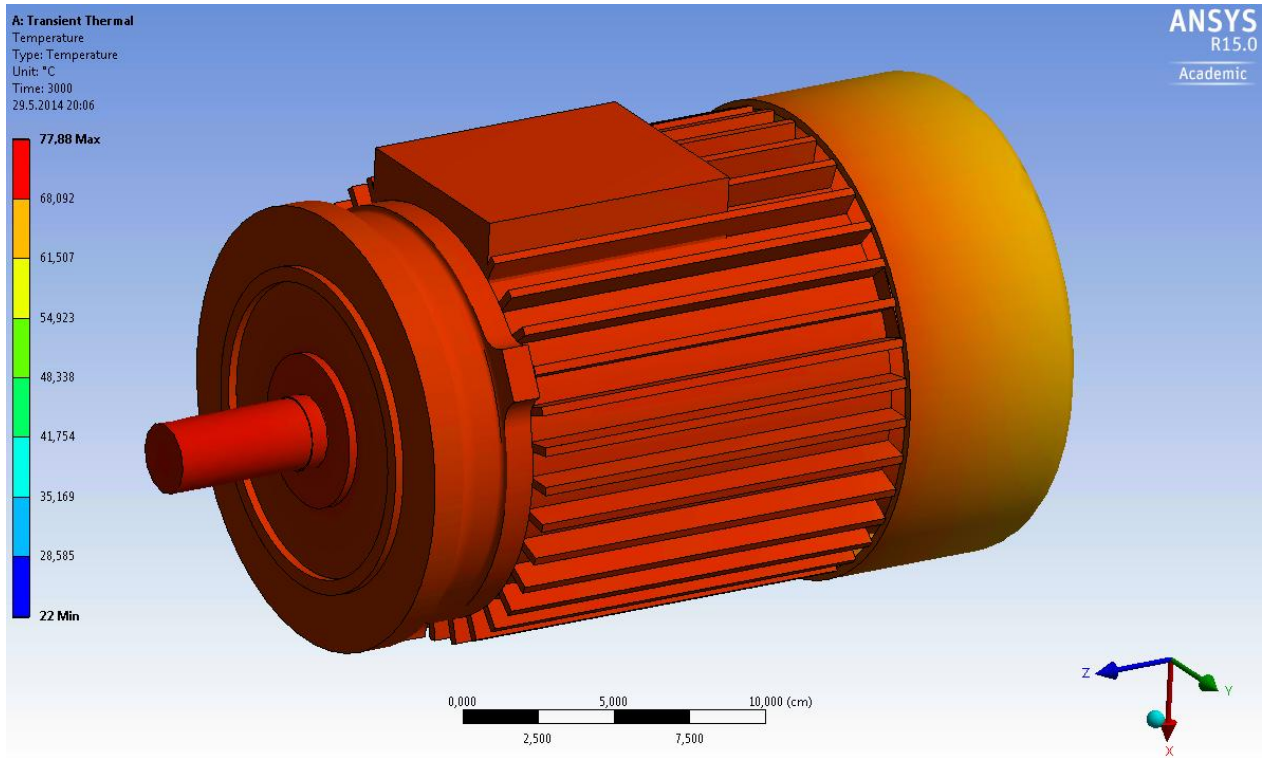




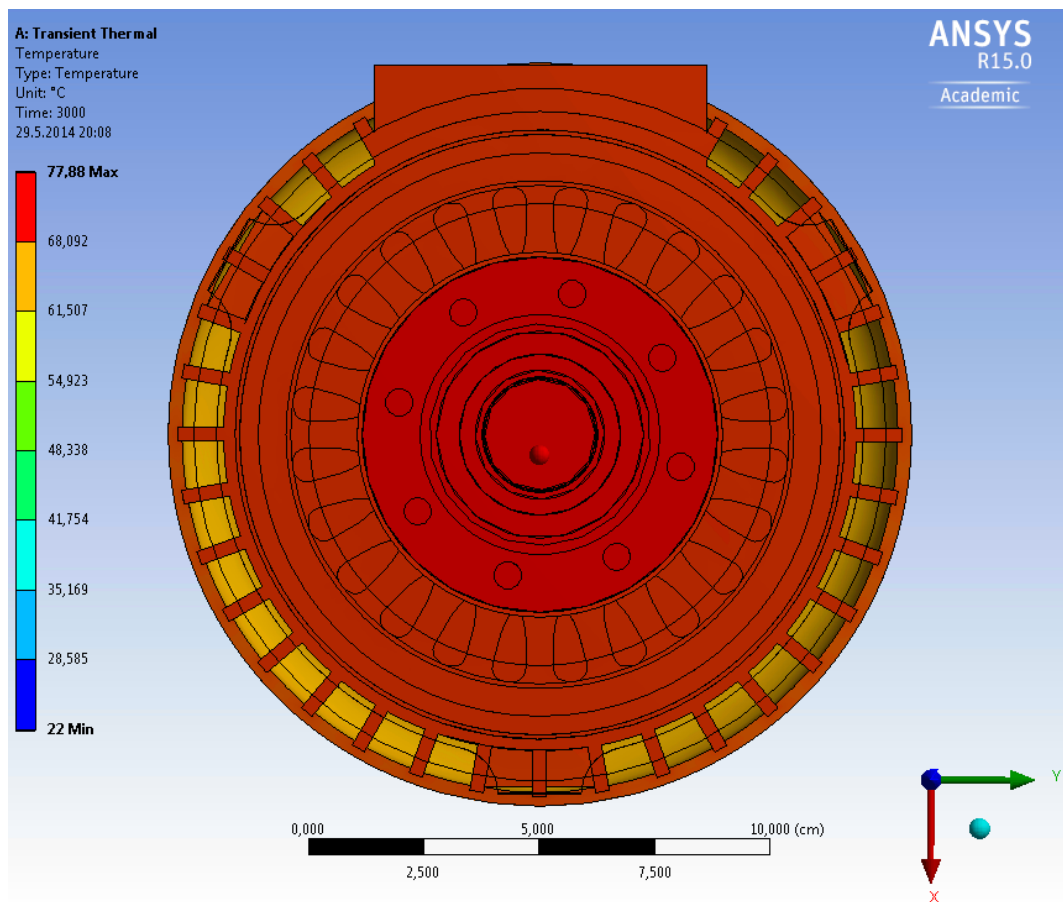
Obrázek 19: Oteplení asynchronního motoru v čase 2400s



Obrázek 20: Oteplení asynchronního motoru v čase 2400s (příčný řez strojem)

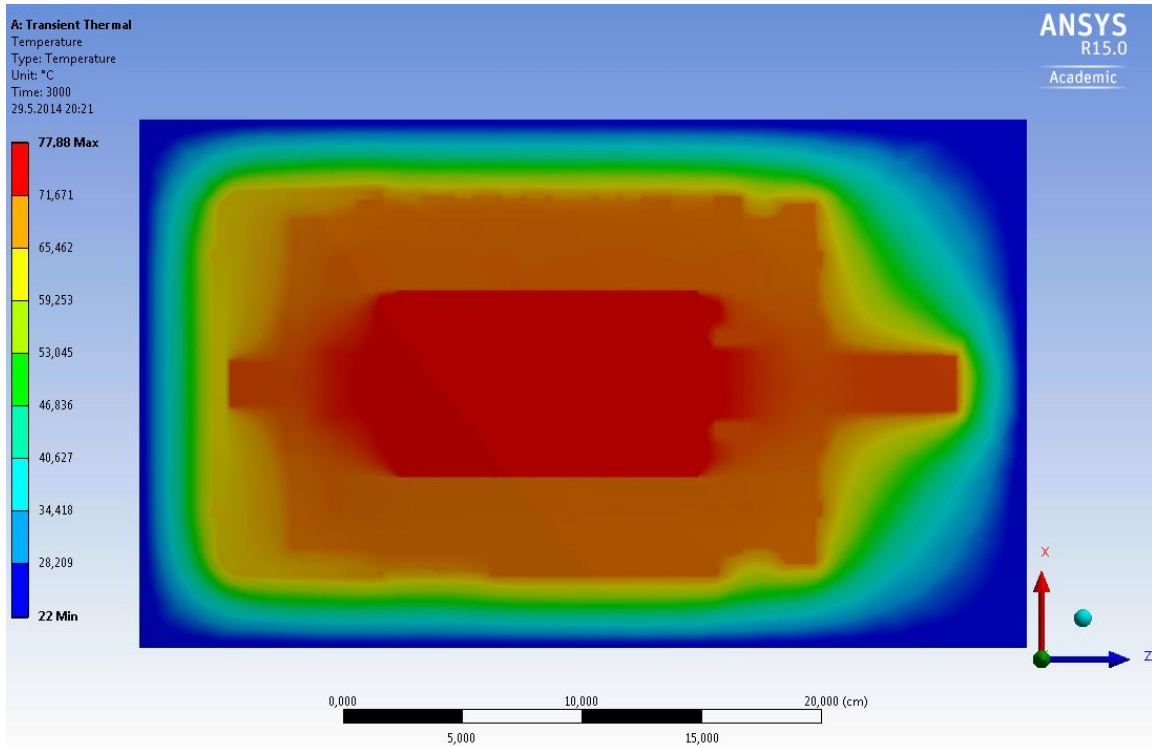


Obrázek 21: Oteplení asynchronního motoru v čase 3000s

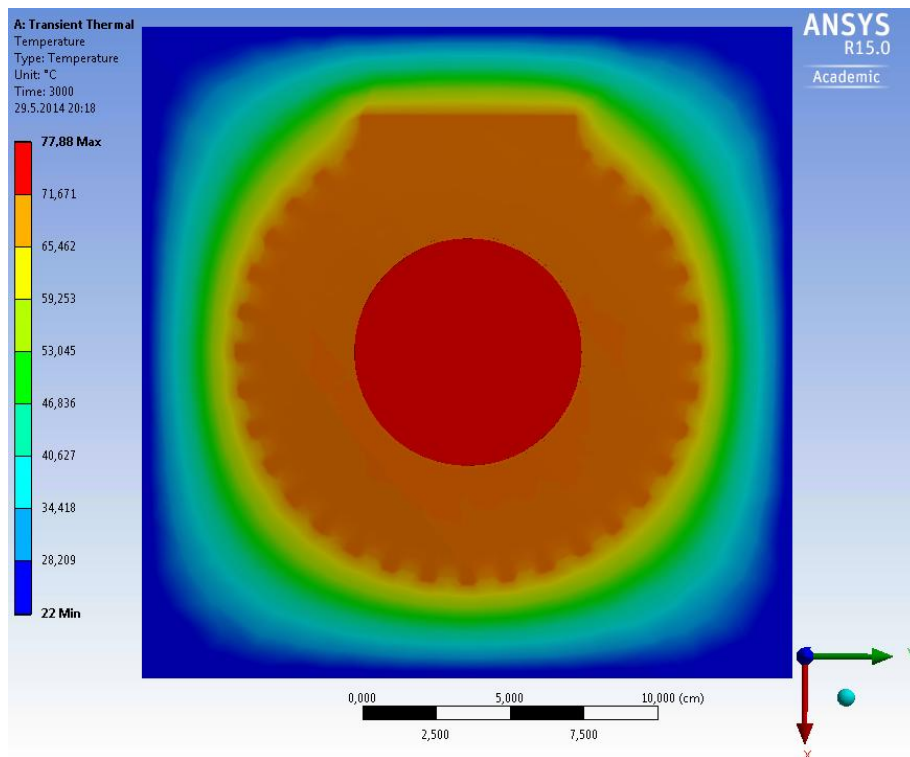


Obrázek 22: Oteplení asynchronního motoru v čase 3000s (příčný řez strojem)

Na následujících snímcích (viz. Obrázek 23 a 24) lze pozorovat rozložení teploty do okolí v čase 3000 sekund, tedy na konci našeho měření. Na snímcích je znázorněn podélný a příčný řez modelu asynchronního motoru. Jako nejteplejší část znázorněna červenou barvou se jeví rotor spolu s ložisky. Naopak nejchladnější část je okolí motoru, které je znázorněno modrou barvou.

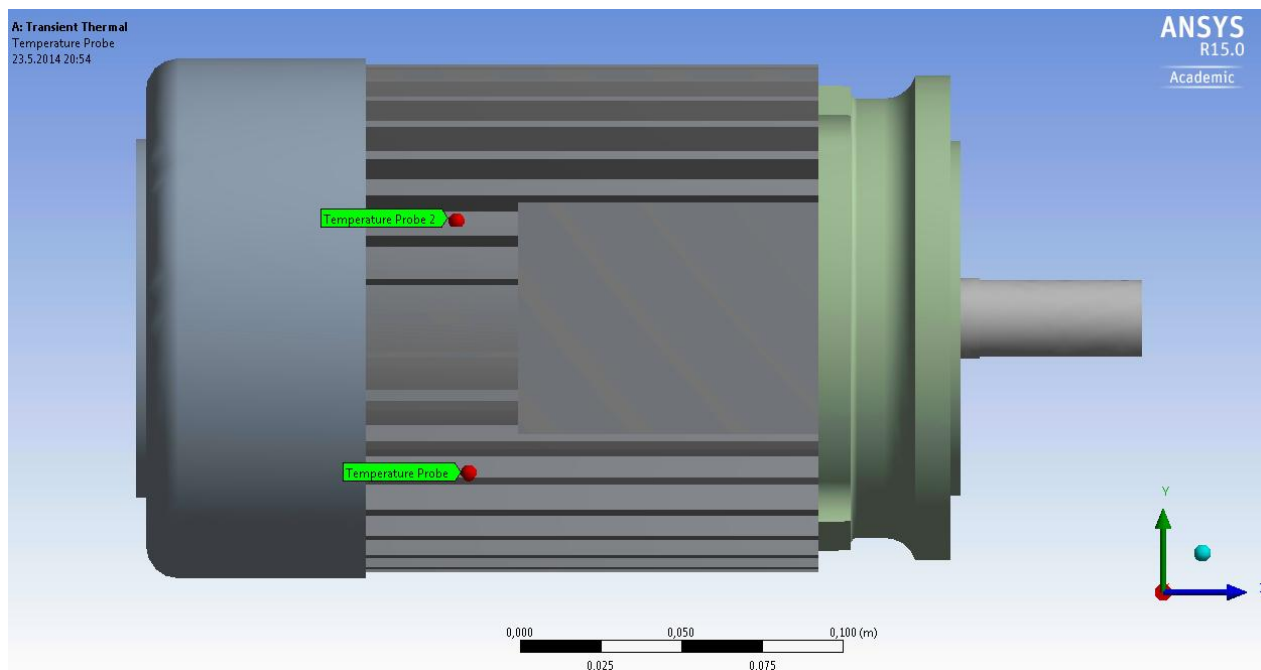


Obrázek 23: Rozložení teploty do okolí v čase 3000s (podélný řez)



Obrázek 24: Rozložení teploty do okolí v čase 3000s (příčný řez)

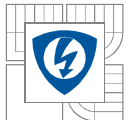
Nedílnou součástí teplotní analýzy modelu asynchronního motoru bylo určení, k jakému dojde oteplení na povrchu kostry motoru z důvodu porovnání změřených hodnot v laboratoři. Oteplení ze zjišťovalo pomocí teplotních sond „*Temperature Probe*” (sonda 1) a „*Temperature Probe 2*” (sonda 2). Sonda 1 byla umístěna mezi dvěma žebry kostry motoru a sonda 2, byla umístěna taktéž mezi dvěma žebry, avšak blíže ke svorkovnici stroje, viz. Obrázek 25.



Obrázek 25: Umístění teplotních sond na kostry modelu AM

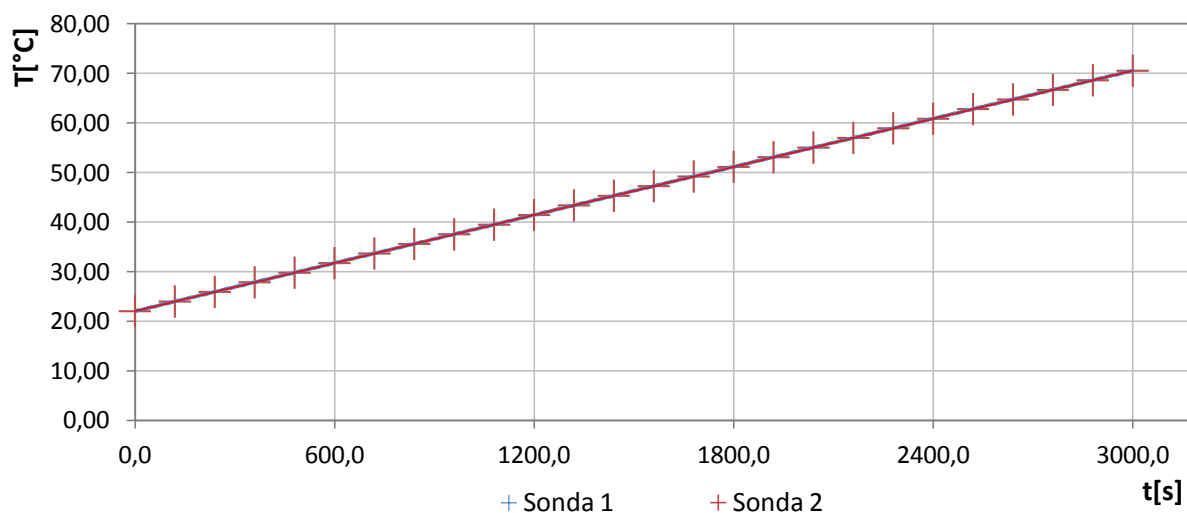
Po vyhodnocení simulace transienční tepelné analýzy pro obě sondy - „*Temperature Probe*” a „*Temperature Probe 2*” jsme získali hodnoty, které jsou uvedeny v následující tabulce (viz. Tabulka 3). Pro tyto hodnoty byla vynesena charakteristika (viz. Obrázek 26), která nám udává oteplení kostry motoru na dvou místech za celkové doby simulace 3000 sekund.

Z charakteristiky je patrné, že se jednotlivé sondy ve větší míře překrývají. Jejich rozdíl činí pouze několik desetin stupně. Můžeme tedy konstatovat, že teplota v místě mezi chladícími žebry je stejná, jako v druhém místě, taktéž mezi chladícími žebry, kde ale ke správnému odvodu tepla brání svorkovnice samotného motoru. Z charakteristiky také vyplývá, že teplota nebyla zcela ustálená. Teplota by tedy dále nepatrně rostla, dokud by nedosáhla maximální teploty a teplota by se ustálila. Z grafu je patrné, že z výchozího stavu 22°C se model asynchronního motoru v místě umístění první sondy „*Temperature Probe*” ohřál na hodnotu 70,57°C a v místě umístění druhé sondy „*Temperature Probe 2*” se ohřál na hodnotu 70,55°C . Celkově se tedy model motoru ohřál o 52°C.



t	Sonda 1	Sonda 2	t	Sonda 1	Sonda 2
	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>		T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>
[s]	[°C]	[°C]	[s]	[°C]	[°C]
0,0	22,00	22,00	1560,0	47,27	47,25
120,0	23,97	23,96	1680,0	49,22	49,19
240,0	25,92	25,90	1800,0	51,16	51,14
360,0	27,86	27,84	1920,0	53,11	53,08
480,0	29,80	29,78	2040,0	55,05	55,03
600,0	31,73	31,71	2160,0	57,00	56,97
720,0	33,67	33,65	2280,0	58,94	58,92
840,0	35,61	35,59	2400,0	60,88	60,86
960,0	37,55	37,53	2520,0	62,82	62,80
1080,0	39,49	39,47	2640,0	64,76	64,74
1200,0	41,44	41,41	2760,0	66,70	66,68
1320,0	43,38	43,36	2880,0	68,64	68,61
1440,0	45,33	45,30	3000,0	70,57	70,55

Tabulka 3: Tabulka nasimulovaných hodnot programem ANSYS pro transientní analýzu pro sondu 1 a 2

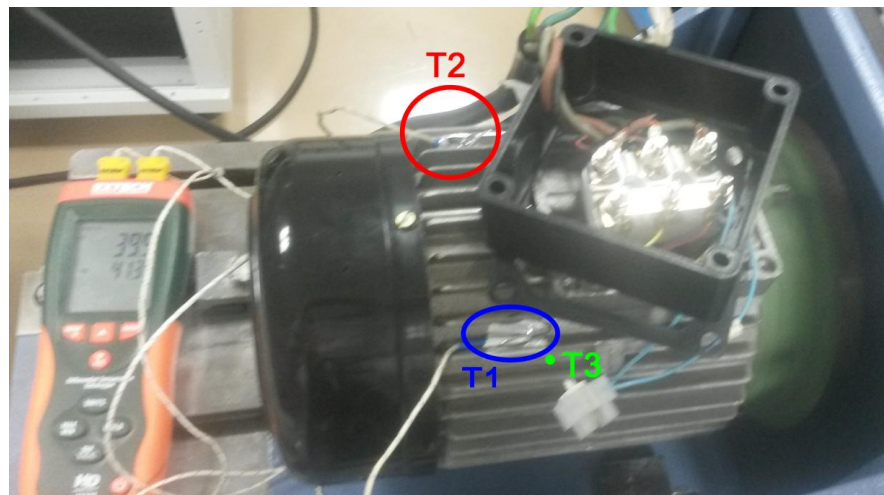


Obrázek 26: Závislost oteplení AM v programu ANSYS pro sondu 1 a 2



## 9 MĚŘENÍ TEPLOTY NA ASYNCHRONNÍM MOTORU

Měření teplotní analýzy probíhalo na daném asynchronním motoru po dobu 3000 sekund. Tento motor byl napájen sdruženým napětím 400V. Průběh teploty byl zaznamenáván ve stavu naprázdno a při zatížení. Při měření ve stavu naprázdno jsme průběhy teploty měřili pomocí dvou termočlánků  $T_1$  a  $T_2$  umístěných na obou stranách kostry motoru (viz Obrázek 27). Při měření ve stavu při zatížení jsme navíc použili bezkontaktní měření pomocí pyrometru  $T_3$  (viz. Obrázek 27). Všechny měřidla byla připojena do diferenciálního teploměru EXTECH Instrumental. Záznam jednotlivých teplot probíhal každé 2 minuty. Naměřené hodnoty pro stav naprázdno i při zatížení jsou uvedeny v tabulce 4.



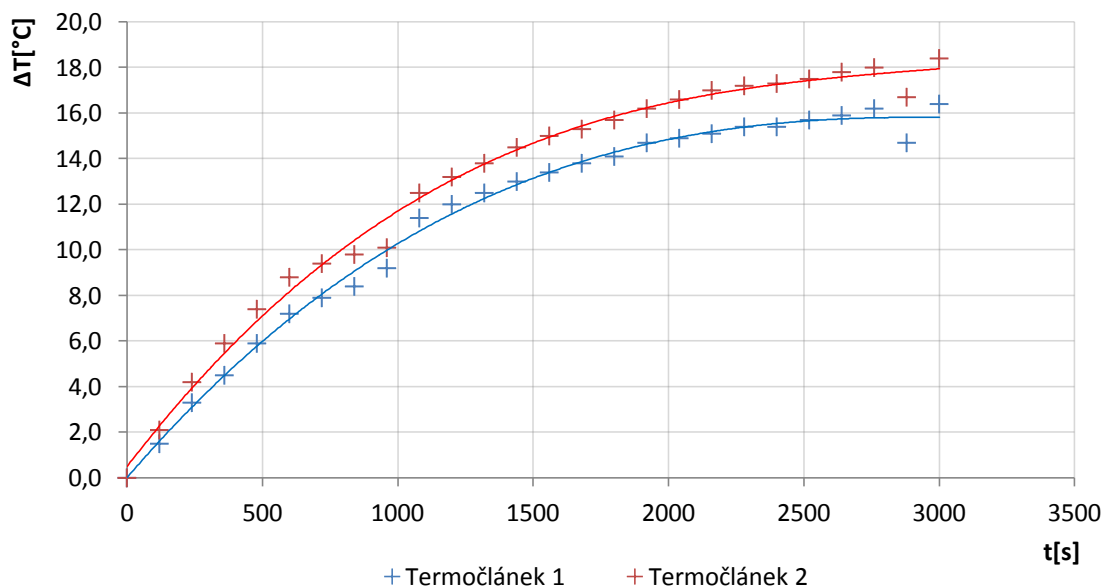
Obrázek 27: Termočlánky  $T_1$  a  $T_2$  teploměru EXTECH Instrumental, bod  $T_3$  - měření teploty pomocí pyrometru

Naprázdno					Poznámka	Při zatížení						Poznámka
Čas	Termočlánek 1		Termočlánek 2			Termočlánek 1		Termočlánek 2		Pyrometr		
t	T1	$\Delta T_1$	T2	$\Delta T_2$		T1	$\Delta T_1$	T2	$\Delta T_2$	T3	$\Delta T_3$	
[s]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]		
0	24,0	0,0	24,0	0,0	U=400V	32,1	0,0	32,6	0,0	26,9	0,0	$\sigma=2Nm$
120	25,5	1,5	26,1	2,1	$I_1=2,35A$	31,3	0,8	30,6	2,0	27,8	0,9	U=400V
240	27,3	3,3	28,2	4,2	$I_2=2,35A$	32,8	0,7	32,0	0,6	27,6	0,7	$I_1=2,35A$
360	28,5	4,5	29,9	5,9	$I_3=2,35A$	34,0	1,9	33,1	0,5	28,5	1,6	$I_2=2,35A$
480	29,9	5,9	31,4	7,4	P=0,068kW	34,8	2,7	33,9	1,3	28,8	1,9	$I_3=2,35A$
600	31,2	7,2	32,8	8,8	f=50Hz	35,3	3,2	34,5	1,9	29,4	2,5	P=0,172kW
720	31,9	7,9	33,4	9,4	N=1480ot/min	35,9	3,8	35,0	2,4	29,7	2,8	f=50Hz
840	32,4	8,4	33,8	9,8		36,5	4,4	35,6	3,0	29,8	2,9	N=1480ot/min
960	33,2	9,2	34,1	10,1		37,0	4,9	36,2	3,6	30,1	3,2	
1080	35,4	11,4	36,5	12,5		37,3	5,2	36,6	4,0	30,2	3,3	
1200	36,0	12,0	37,2	13,2		37,7	5,6	36,9	4,3	30,3	3,4	
1320	36,5	12,5	37,8	13,8		38,2	6,1	37,4	4,8	30,8	3,9	
1440	37,0	13,0	38,5	14,5		38,3	6,2	37,7	5,1	30,9	4,0	
1560	37,4	13,4	39,0	15,0		38,5	6,4	38,0	5,4	31,0	4,1	
1680	37,8	13,8	39,3	15,3		38,8	6,7	38,2	5,6	31,2	4,3	
1800	38,1	14,1	39,7	15,7		39,1	7,0	38,6	6,0	31,3	4,4	
1920	38,7	14,7	40,2	16,2		39,4	7,3	39,0	6,4	31,4	4,5	
2040	38,9	14,9	40,6	16,6		39,7	7,6	39,1	6,5	31,5	4,6	
2160	39,1	15,1	41,0	17,0		39,9	7,8	39,4	6,8	31,5	4,6	
2280	39,4	15,4	41,2	17,2		39,7	7,6	39,4	6,8	31,6	4,7	
2400	39,4	15,4	41,3	17,3		39,7	7,6	39,6	7,0	31,7	4,8	
2520	39,7	15,7	41,5	17,5		39,6	7,5	39,9	7,3	31,6	4,7	
2640	39,9	15,9	41,8	17,8		40,2	8,1	39,8	7,2	31,9	5,0	
2760	40,2	16,2	42,0	18,0		40,3	8,2	39,8	7,2	31,8	4,9	
2880	38,7	14,7	40,7	16,7		40,5	8,4	40,0	7,4	31,9	5,0	
3000	40,4	16,4	42,4	18,4		40,9	8,8	40,2	7,6	31,9	5,0	

Tabulka 4: Teplotní analýza asynchronního motoru pracujícího ve stavu naprázdno a při zatížení

## 9.1 Měření naprázdno

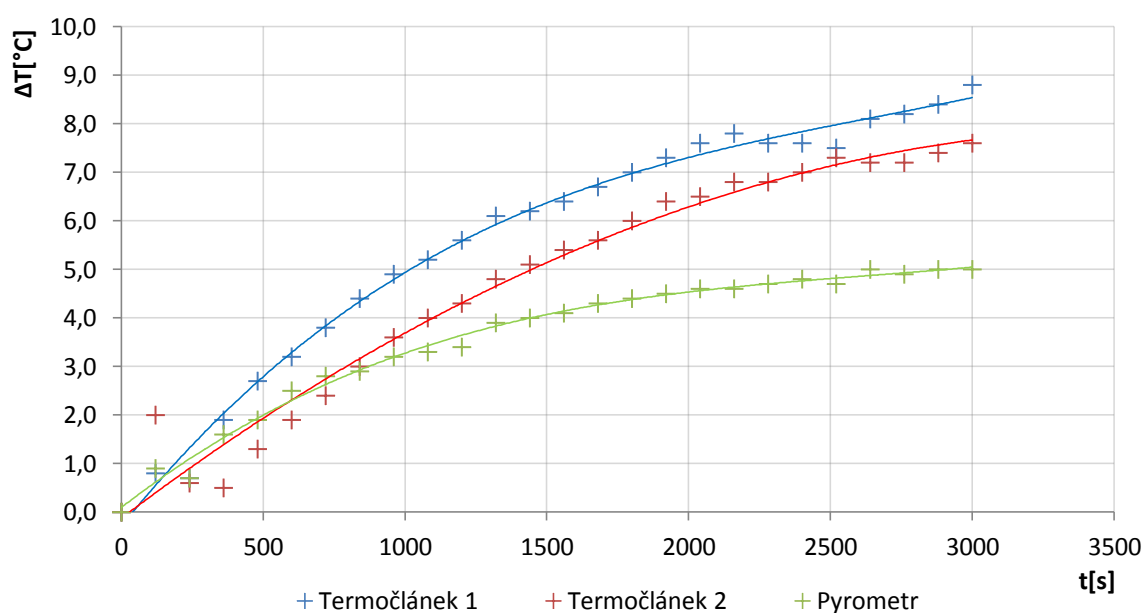
Při měření naprázdno nám výsledná charakteristika (viz. Obrázek 28) popisuje průběh oteplení dvou termočlánků  $T_1$  a  $T_2$  na obou stranách kostry motoru. Je patrné, že s narůstajícím časem roste i oteplení samotného motoru. Teplota se začíná ustalovat přibližně od čtyřicáté minuty měření. Rozdíl mezi čidly termočlánků  $T_1$  a  $T_2$  po dobu měření činil maximálně 5%. Oteplení při posledním odečtu pro čidlo termočlánku  $T_1$  dosahovala  $40,4^\circ\text{C}$ , což je nárůst o  $16,4^\circ\text{C}$ . Pro čidlo termočlánku  $T_2$  dosahovala teplota  $42,4^\circ\text{C}$ , došlo tedy k nárůstu o  $18,4^\circ\text{C}$ . Konečné měřené teploty můžeme považovat za ustálené. Rozdíl teplot spočívá především v umístění samotných termočlánků na kostře motoru. Termočlánek  $T_1$  je umístěn mezi chladicími žebry kostry motoru a odvod tepla je zde daleko lepší než v případě termočlánku  $T_2$ . Druhý termočlánek je taktéž umístěn mezi žebry kostry motoru, ale ke správnému odvodu tepla mu brání svorkovnice samotného motoru.



Obrázek 28: Závislost oteplení AM ve stavu naprázdno čidly  $T_1$  a  $T_2$

## 9.2 Měření při zatížení 2Nm

Při měření při zatížení nám výsledná charakteristika (viz. Obrázek 29) popisuje průběh oteplení dvou termočlánků  $T_1$  a  $T_2$  na obou stranách kostry motoru a pyrometru v bodu  $T_3$ . Je patrné, že stejně jako při měření naprázdno, tak i při zatížení s narůstajícím časem roste i oteplení samotného motoru. Rozdíl mezi čidly termočlánků  $T_1$  a  $T_2$  po dobu měření činil maximálně 2,5%. Rozdíl mezi teplotami  $T_1$  a  $T_3$  dosahoval nejvýše 22% a u teplot  $T_2$  a  $T_3$  rozdíl činil maximálně 20%. Lze pozorovat, že pyrometr se od termočlánků  $T_1$  a  $T_2$  výrazně liší. Tato chyba vznikla nemožností nastavení emisivity měřeného povrchu. Oteplení při posledním odečtu pro čidlo termočlánku  $T_1$  dosahovala  $40,9^\circ\text{C}$ , což je nárůst o  $8,8^\circ\text{C}$ . Pro čidlo termočlánku  $T_2$  dosahovala teplota  $40,2^\circ\text{C}$ , došlo tedy k nárůstu o  $7,6^\circ\text{C}$ . Pyrometr nabývala konečná hodnota  $31,9^\circ\text{C}$ , tedy došlo k nárůstu o  $5^\circ\text{C}$ . Konečné měřené teploty  $T_1$  a  $T_2$  považujeme za neustálené, teplota  $T_3$  je ustálená přibližně od dvacáté šesté minuty.

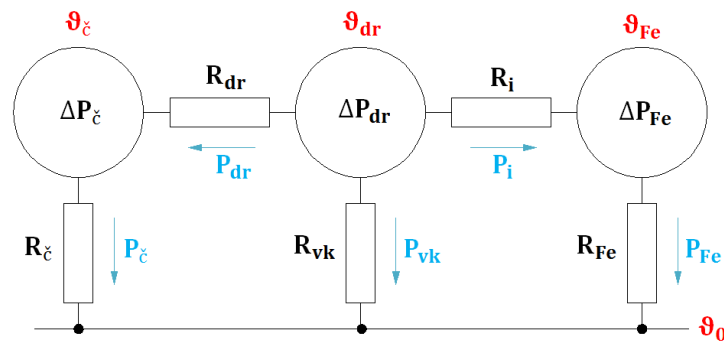


Obrázek 29: Závislost oteplení AM při zatížení čidly  $T_1$ ,  $T_2$  a  $T_3$



## 10 ANALYTICKÝ VÝPOČET TEPLIT

Analytický výpočet teplot byl řešen pomocí zjednodušeného modelu asynchronního motoru, kdy uvažujeme pouze náhradní tepelné schéma obvodu statoru střídavého asynchronního stroje při konstantní teplotě chladicího vzduchu (viz. Obrázek 30). Řešením tohoto výpočtu jsou hodnoty teplot jednotlivých částí statoru ( $\vartheta_{\check{c}}$ ,  $\vartheta_{dr}$ ,  $\vartheta_{Fe}$ ) a tepelné toky ( $P_{\check{c}}$ ,  $P_{vk}$ ,  $P_{Fe}$ ,  $P_i$ ,  $P_{dr}$ ).



Obrázek 30: Tepelné schéma obvodu statoru střídavého AS při konstantní teplotě chladicího vzduchu, MOD [3]

Pro určení neznámých sestavíme pomocí obrázku 30 soustavu rovnic:

$$\Delta P_{dr} + \Delta P_{\check{c}} + \Delta P_{Fe} = P_{\check{c}} + P_{vk} + P_{Fe} \quad (10.1)$$

$$P_{\check{c}} = \Delta P_{\check{c}} + P_{dr} \quad (10.2)$$

$$P_{Fe} = P_i + \Delta P_{Fe} \quad (10.3)$$

$$\vartheta_{dr} - \vartheta_0 = P_{vk} \cdot R_{vk} \quad (10.4)$$

$$\vartheta_{\check{c}} - \vartheta_0 = P_{\check{c}} \cdot R_{\check{c}} \quad (10.5)$$

$$\vartheta_{Fe} - \vartheta_0 = P_{Fe} \cdot R_{Fe} \quad (10.6)$$

$$\vartheta_{dr} - \vartheta_{\check{c}} = P_{dr} \cdot R_{dr} \quad (10.7)$$

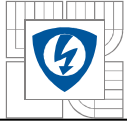
$$\vartheta_{dr} - \vartheta_{Fe} = P_i \cdot R_i \quad (10.8)$$

Dále je nutné k výpočtu zjistit tepelné odpory jednotlivých částí modelu statoru asynchronního motoru. Tepelné odpory spočítáme pomocí vztahů, které jsou uvedeny v kapitole 6. Využijeme tedy vztahy 6.2, 6.3, 6.8.

Výpočet tepelného odporu drážkové izolace:

$$S_i = Q_{dr} \cdot O_d \cdot l_{Fe} = 24 \cdot 0,03706 \cdot 0,146 = \underline{\underline{0,1299m^2}}$$

$$R_i = \frac{d_{iz}}{\lambda_i \cdot S_i} = \frac{0,1}{0,1 \cdot 0,12986} = \underline{\underline{7,7010 \cdot 10^{-3} K \cdot W^{-1}}}$$



Výpočet tepelného odporu čel vinutí:

$$\alpha_{\zeta} = 10 \cdot (1 + 0,54 \cdot v^2) = 10 \cdot (1 + 0,54 \cdot 5^2) = \underline{\underline{145}}$$

$$R_{\zeta} = \frac{d_{iz}}{\lambda_i \cdot S_{\zeta}} + \frac{1}{\alpha_{\zeta} \cdot S_{\zeta}} = \frac{0,1}{0,1 \cdot 0,0306} + \frac{1}{145 \cdot 0,0306} = \underline{\underline{0,2577 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}}}$$

Výpočet tepelného odporu železa statoru k chladicímu vzduchu:

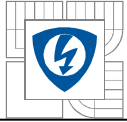
$$\alpha_{ir} = \alpha' = \frac{\lambda}{2 \cdot \delta} = \frac{0,0266}{2 \cdot 0,001} = \underline{\underline{13,3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}}}$$

$$R_{Fe} = \frac{1}{\alpha_{er} \cdot S_{er} + \alpha_{ir} \cdot S_{ir}} = \frac{1}{20 \cdot 0,0559 + 13,3 \cdot 0,0362} = \underline{\underline{0,6246 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}}}$$

Veškeré použité hodnoty pro výpočet tepelných odporů jsou uvedeny v následující tabulce .

Tepelný odpor drážkové izolace	Značka	Hodnota	Jednotka
Tloušťka drážkové izolace	$b_i$	0,0001	[m]
Součinitel tepelné vodivosti	$\lambda_i$	0,1	[W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]
Plocha izolace	$S_i$	0,1299	[m <sup>2</sup> ]
Počet drážek statoru	$Q_{dr}$	24	[-]
Obvod drážky	$O_d$	0,03706	[m]
délka železa statoru	$l_{Fe}$	0,146	[m]
Tepelný odpor čel vinutí	Značka	Hodnota	Jednotka
Tloušťka izolace cívky	$b_i$	0,0001	[m]
Součinitel tepelné vodivosti	$\lambda_i$	0,1	[W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]
Ochlazovací plocha čel	$S_{\zeta}$	0,0306	[m <sup>2</sup> ]
Konstanta	$\alpha_{\zeta}$	145	[-]
Rychlost vzduchu	$v$	5	[m.s <sup>-1</sup> ]
Tepelný odpor železa statoru k chladicímu vzduchu	Značka	Hodnota	Jednotka
Součinitel přestupu tepla vnějšího povrchu paketů	$\alpha_{er}$	20	[W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]
Součinitel přestupu tepla vnitřního povrchu paketů	$\alpha_{ir}=\alpha'$	13,3	[W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]
Vnější povrch paketů	$S_{er}$	0,0559	[m <sup>2</sup> ]
Vnitřní povrch paketů	$S_{ir}$	0,0362	[m <sup>2</sup> ]
Součinitel tepelné vodivosti vzduchu	$\lambda$	0,0266	[W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]
Velikost vzduchový mezery	$\delta$	0,001	[m]

Tabulka 5: Tabulka použitých hodnot pro výpočet tepelných odporů



Pro výpočet hledaných hodnot jednotlivých částí statoru pomocí tepelného schématu obvodu statoru střídavého asynchronního stroje využijeme soustavy rovnic uvedených výše pod obrázkem 30.

Nejprve si však spočítáme ztráty obou čel stroje a ztráty drážkové části vinutí statoru, kde počítáme pomocí poměru jednotlivých objemů kvůli neznalosti potřebných veličin a zároveň k zmenšení náročnosti samotného výpočtu.

$$\Delta P_{\check{c}1} = \frac{\Delta P_v}{V_{vin}} \cdot V_{k1} = \frac{66}{4,61086 \cdot 10^{-4}} \cdot 0,85975 \cdot 10^{-4} = \underline{\underline{12,31W}}$$

$$\Delta P_{\check{c}2} = \frac{\Delta P_v}{V_{vin}} \cdot V_{k2} = \frac{66}{4,61086 \cdot 10^{-4}} \cdot 0,85975 \cdot 10^{-4} = \underline{\underline{12,31W}}$$

$$\Delta P_{\check{c}} = \Delta P_{\check{c}1} + \Delta P_{\check{c}2} = 12,31 + 12,31 = \underline{\underline{24,62W}}$$

$$\Delta P_{dr} = \Delta P_v - \Delta P_{\check{c}} = 66 - 24,62 = \underline{\underline{41,38W}}$$

#### Výpočet hodnot neznámých teplot jednotlivých částí statoru a tepelných toků

Nejprve použijeme vztah 10.4, kdy uvažujeme nulovou hodnotu vyrovnávacího tepelného toku z důvodu toho, že námi použity model asynchronního motoru neobsahuje radiální ventilační kanály.

$$\vartheta_{dr} - \vartheta_0 = P_{vk} \cdot R_{vk} \Rightarrow \vartheta_{dr} - \vartheta_0 = 0 \cdot R_{vk} \Rightarrow \vartheta_{dr} = \vartheta_0 = \underline{\underline{22^\circ C}}$$

Vydeme ze vztahu 10.6 a vyjádříme si z něj teplotu železa statoru  $\vartheta_{Fe}$

$$\vartheta_{Fe} - \vartheta_0 = P_{Fe} \cdot R_{Fe} \Rightarrow \vartheta_{Fe} = P_{Fe} \cdot R_{Fe} + \vartheta_0$$

Za tepelný tok železa statoru dosadíme  $P_{Fe}$  rovnici 10.3

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

Po dosazení vztahu 10.8 za tepelný tok procházející stěnami drážek dostaneme následující

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

Rovnici upravíme do požadovaného tvaru

$$\vartheta_{Fe} = \frac{\vartheta_{dr} \cdot R_{Fe} + \Delta P_{Fe} \cdot R_{Fe} \cdot R_i + \vartheta_0 \cdot R_i}{R_i + R_{Fe}} = \frac{22,0 \cdot 6246 + 46,0 \cdot 6246 \cdot 7,7010 \cdot 10^{-3} + 22,7 \cdot 7010 \cdot 10^{-3}}{7,7010 \cdot 10^{-3} + 0,6246} = \underline{\underline{22,34^\circ C}}$$

Dále využijeme vztahu 10.6 a vyjádříme si z něj tepelný tok železa statoru  $P_{Fe}$

$$\vartheta_{Fe} - \vartheta_0 = P_{Fe} \cdot R_{Fe} \Rightarrow P_{Fe} = \frac{\vartheta_{Fe} - \vartheta_0}{R_{Fe}} = \frac{22,34 - 22}{0,6246} = \underline{\underline{0,54W}}$$

Pro výpočet tepelného toku odváděného z povrchu čel  $P_{\check{c}}$  platí vztah 10.1

$$\Delta P_{dr} + \Delta P_{\check{c}} + \Delta P_{Fe} = P_{\check{c}} + P_{vk} + P_{Fe}, \text{ kde } P_{vk} = 0$$

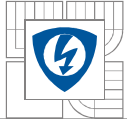
$$P_{\check{c}} = \Delta P_{dr} + \Delta P_{\check{c}} + \Delta P_{Fe} - P_{Fe} = 41,38 + 24,62 + 53 - 0,54 = \underline{\underline{118,46W}}$$

Následně si vypočítáme střední teplotu obou čel stroje  $\vartheta_{\check{c}}$  podle vztahu 10.5

$$\vartheta_{\check{c}} = P_{\check{c}} \cdot R_{\check{c}} + \vartheta_0 = 118,46 \cdot 0,2577 + 22 = \underline{\underline{52,53^\circ C}}$$

Pro výpočet tepelný tok vycházející od drážkové části vinutí  $P_{dr}$  platí vztah 10.2

$$P_{\check{c}} = \Delta P_{\check{c}} + P_{dr} \Rightarrow P_{dr} = P_{\check{c}} - \Delta P_{\check{c}} = 118,46 - 24,62 = \underline{\underline{93,84W}}$$



Poslední neznámou je tepelný tok procházející stěnami drážek  $P_i$ , který spočítáme ze vztahu 10.8

$$\vartheta_{dr} - \vartheta_{Fe} = P_i \cdot R_i \Rightarrow P_i = \frac{\vartheta_{dr} - \vartheta_{Fe}}{R_i} = \frac{22 - 22,34}{7,7010 \cdot 10^{-3}} = \underline{\underline{-44,15W}}$$

Hledané hodnoty teplot jednotlivých částí statoru ( $\vartheta_{\zeta}, \vartheta_{dr}, \vartheta_{Fe}$ ) a tepelné toky ( $P_{\zeta}, P_{vk}, P_{Fe}, P_i, P_{dr}$ ) jsou uvedeny pro přehlednost v následující tabulce (viz. Tabulka 6)

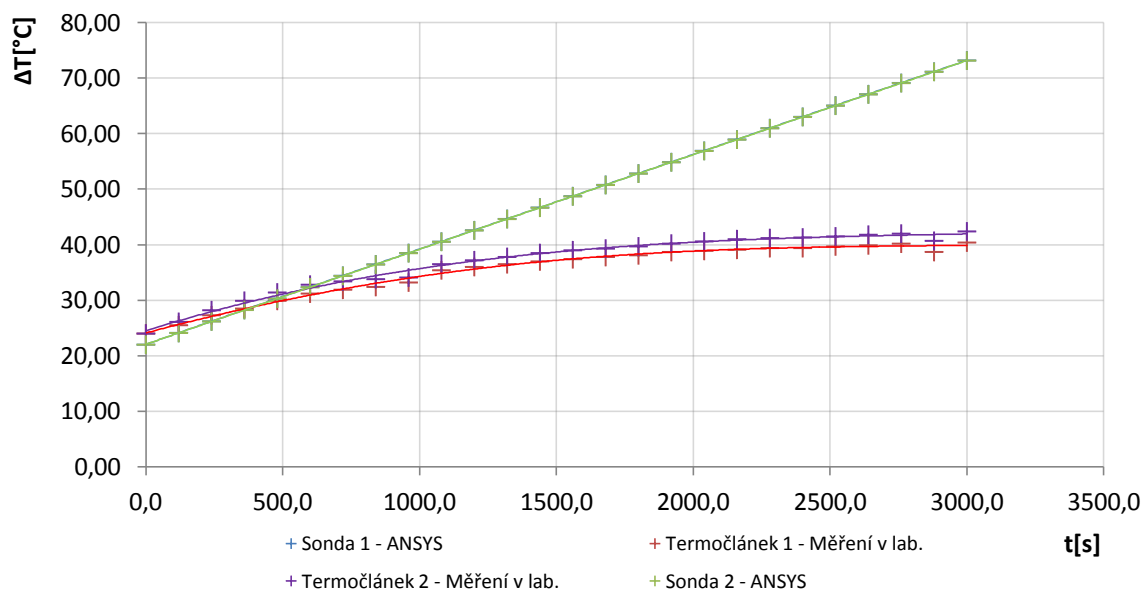
Název	Značka	Hodnota
Počáteční teplota (teplota okolí)	$\vartheta_0$	22,00 °C
Střední teplota drážkové části vinutí	$\vartheta_{dr}$	22,00 °C
Teplota železa statoru	$\vartheta_{Fe}$	22,34 °C
Střední teplota obou čel stroje	$\vartheta_{\zeta}$	52,53 °C
Vyrovnávací tepelný tok	$P_{vk}$	0W
Tepelný tok železa statoru	$P_{Fe}$	0,54W
Tepelný tok vycházející od drážkové izolace	$P_{dr}$	93,84W
Tepelný tok odváděný z povrchu čel	$P_{\zeta}$	118,46W
Tepelný tok procházející stěnami drážek	$P_i$	-44,15W

Tabulka 6: Tabulka vypočtených hodnot tepelných toků a teplot

## 11 POROVNÁNÍ JEDNOTLIVÝCH ANALÝZ

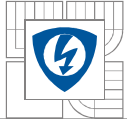
Porovnání jednotlivých analýz má za úkol vyhodnotit přesnost metod vůči reálným výsledkům. K porovnání byly použity tři metody. První z nich byla metoda konečných prvků v programu ANSYS Workbench, druhá měření konkrétního asynchronního motoru v laboratořích pomocí dvou termočlánků a pyrometru. Jako poslední metodou byl použit analytický výpočet teplot vycházející ze zjednodušeného modelu asynchronního motoru, kdy jsme uvažovali pouze náhradní tepelné schéma obvodu statoru střídavého asynchronního stroje při konstantní teplotě chladícího vzduchu.

Obrázek 31 nám udává porovnání dvou analýz, konkrétně metody konečných prvků v programu ANSYS pro obě sondy a metodou měření motoru pomocí dvou termočlánků. Z grafu je patrné, že hodnoty nasimulované v programu ANSYS mají průběh spíše lineární, zatímco pomocí měření termočlánků jsou spíše logaritmického tvaru. U metody konečných prvků se charakteristiky (Sonda 1 a Sonda 2) překrývají, přičemž u termočlánků se rozdíl teplot pohybuje okolo 2°C, což je způsobeno v umístění samotných termočlánků na kostře motoru. Při srovnání metody konečných prvků můžeme pozorovat prudký nárůst oproti metodě měření v laboratoři pomocí termočlánků. Rozdíl posledních teplot v čase 3000s dosahoval zhruba 32°C. Tato odchylka je způsobená neúplným množstvím vstupních parametrů pro výpočet metody konečných prvků v programu ANSYS.



Obrázek 31: Grafické srovnání použitých metod

Porovnání analytického výpočtu teplot pomocí tepelného schématu statoru se zbylými metodami je uveden až v samotném závěru.



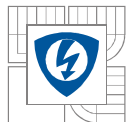
## 12 ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo seznámení se s metodami teplotních výpočtů používaných v elektrických strojích. Při návrhu či konstrukci elektrického stroje je třeba dbát na teploty, kterých může stroj nabývat. Měření teploty patří mezi hlavní diagnostické metody. Překročení dovolených teplot v elektrických strojích může mít neblahý vliv na chod stroje. Může například dojít ke zničení izolace vodičů či dalších materiálů. V konečném důsledku může dojít k samotnému zničení elektrického stroje. Při správném návrhu můžeme výrazně snížit náklady na vývoj či výrobu stojů.

Základem bakalářské práce bylo vytvoření zjednodušeného 3D modelu asynchronního motoru v programu Autodesk Inventor. Pro snížení náročnosti výpočtů bylo využito zjednodušení některých částí modelu stroje, konkrétně vinutí a ložisek. Pro výpočet oteplení stroje byl použit program ANSYS Workbench, který k výpočtu využívá metodu konečných prvků. Na model asynchronního motoru byla použita síť konečných prvků a také přiřazeny jednotlivé parametry potřebné k samotnému výpočtu. Při výpočtu zanedbáváme problémy s chlazením motoru vlivem proudění vzduchu. Výsledkem simulace byla transienční tepelná analýza stroje. Při srovnání nasimulované a naměřené charakteristiky bylo zjištěno, že simulace je daleko vhodnější. Charakteristiky se po celou dobu měření překrývaly, kdežto při měření v laboratoři dosahovaly hodnoty po celou dobu měření odchylky 5%. Tuto odchylku způsobilo umístěním termočlánků na kostře motoru. První termočlánek, umístěn mezi chladicími žebry kostry motoru, dosahoval lepšího odvodu tepla než v případě druhého článku, umístěného taktéž mezi žebry kostry motoru, ale ke správnému odvodu tepla mu bránila svorkovnice motoru. Průběh charakteristiky byl při měření v laboratoři v konečném stavu ustálený, kdežto při simulaci byly hodnoty neustálené. Charakteristika rostla spíše lineárně. Rozdíl naměřených a nasimulovaných hodnot byl způsoben jednak zjednodušením modelu, tak i neznalostí přesných typů materiálů jednotlivých částí stroje, z něž jsou vyrobeny.

Při porovnání analytického výpočtu s naměřenými a nasimulovanými hodnotami musíme brát v potaz využití zjednodušeného modelu asynchronního motoru, tedy pouze náhradní tepelné schéma obvodu statoru při konstantní teplotě chladícího vzduchu. Do výpočtu nebyl zahrnut rotor, kostra motoru ani vzduchová mezera. Pokud bychom využili celkové náhradní tepelné schéma asynchronního motoru, výsledky by byly daleko přesnější, avšak kvůli složitosti a neznalosti některých zásadních veličin to nebylo možné. Metoda analytického výpočtu byla uvedena spíše pro názornou ukázkou jako jedné z možností výpočtu oteplení stroje.

Porovnáme-li jednotlivé metody pro výpočet teplotních polí, tak můžeme konstatovat, že veškeré metody jsou využitelné při návrhu nových elektrických strojů, avšak záleží jednak na možnostech výpočetního zařízení či použitého programu, případně přesnosti a množství vkládajících dat. Simulační programy se jistě budou nadále vyvíjet a s jejich pomocí bude návrh elektrických strojů daleko přesnější a rychlejší.



## LITERATURA

- [1] UHLÍŘ, Ivan. Elektrické stroje a pohony. Vyd.2., přeprac. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2007. 137s. ISBN 978-80-01-03730-0
- [2] ONDRŮŠEK, Čestmír. Elektrické stroje. 103s. Vysoké učení technické v Brně. Skripta
- [3] KOPYLOV, Igor. Stavba elektrických strojů. Praha: Energija, Moskva, 1988. 685s.
- [4] Termika. PETR JIZBA. [online]. [cit. 2013-11-07]. Dostupné z: [http://www.fjfi.cvut.cz/files/k402/pers\\_hpgs/jizba/termika%20update/Termika\\_\(D\)b.pdf](http://www.fjfi.cvut.cz/files/k402/pers_hpgs/jizba/termika%20update/Termika_(D)b.pdf)
- [5] HALLIDAY, David, Robert RESNICK a Jearl WALKER. Fyzika: vysokoškolská učebnice obecné fyziky. Vyd. 1. Praha: Prometheus, 2000, xxiv, 119s. Překlady, vysokoškolských učebnic. ISBN 80-214-1869-9.
- [6] Molekulová fyzika a termodynamika. [online]. [cit. 2013-11-07]. Dostupné z: [http://nanotechnologie.vsb.cz/Studiumbc/fyzika\\_I/molekulova\\_fyzika\\_MMF.pdf](http://nanotechnologie.vsb.cz/Studiumbc/fyzika_I/molekulova_fyzika_MMF.pdf)
- [7] Emisivita. [online]. 2012 [cit. 2013-11-08]. Dostupné z: <http://www.htprint.cz/termo/emisivita.html>
- [8] WILDA, Libor. Elektrická zařízení I.: Elektrické teplo.
- [9] Přenos tepla: Termika. VOLF, Ivo, Miroslava JANEŠOVÁ a Miroslav OUHRABKA. [online]. [cit. 2013-11-10]. Dostupné z: [http://www.jaroska.cz/fo\\_media/archiv/knihovna/termika.pdf](http://www.jaroska.cz/fo_media/archiv/knihovna/termika.pdf)
- [10] ANSYS: Platforma ANSYS Workbench. [online]. [cit. 2013-11-15]. Dostupné z: <http://www.techsoft-eng.cz/produkty/ansys---technologie-workflow/platforma-ansys-workbench/>
- [11] FEM/MKP - Základy použití metody konečných prvků pro technické výpočty v programu Autodesk Inventor Professional. FINK a Ladislav ŘEZNÍČEK. [online]. Trutnov, 2006 [cit. 2013-11-15]. Dostupné z: <http://www.spstrutnov.cz/o-skole/projekty/technicke-vypocty/skripta-fem-mkp.pdf>
- [12] Pevnostní analýza. ZAHRADNÍK, Radek. [online]. 2013 [cit. 2013-11-15]. Dostupné z: <http://www.autodeskclub.cz/clanek/6313-pevnostni-analyza-v-aip-7-dil-zakladni-staticka-analyza-4-cast>
- [13] Studijní opory: Metoda konečných prvků. BURŠA, Jiří. [online]. 2013 [cit. 2013-11-20]. Dostupné z: [http://www.umt.fme.vutbr.cz/~jbursa/Stud\\_opory/Stud\\_opory.htm](http://www.umt.fme.vutbr.cz/~jbursa/Stud_opory/Stud_opory.htm)
- [14] Tepelné procesy v Mechatronických soustavách: Metoda konečných prvků. VLACH, Radek. [online]. [cit. 2013-11-22]. Dostupné z: [www.umt.fme.vutbr.cz/~rvlach/skripta.doc](http://www.umt.fme.vutbr.cz/~rvlach/skripta.doc)
- [15] SQUIRREL CAGE MOTORS. [online]. 1999. vyd. May, 2005 [cit. 2013-12-12]. Dostupné z: [http://www-mdp.eng.cam.ac.uk/web/library/enginfo/textbooks\\_dvd\\_only/DAN/motors/steady/steady.html](http://www-mdp.eng.cam.ac.uk/web/library/enginfo/textbooks_dvd_only/DAN/motors/steady/steady.html)