

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

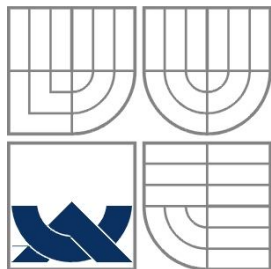
MĚŘENÍ TEPLOTNÍCH POLÍ V ELEKTRICKÝCH STROJÍCH

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

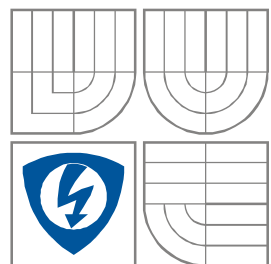
Bc. Martin Dostálek

BRNO 2010



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLGIÍ**

**ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY
A ELEKTRONIKY**

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

MĚŘENÍ TEPLOTNÍCH POLÍ V ELEKTRICKÝCH STROJÍCH

MEASUREMENT OF THERMAL FIELD IN ELECTRIC MACHINES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Martin Dostálek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Marcel Janda, Ph.D.

BRNO, 2010



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Diplomová práce

Magisterský navazující studijní obor
Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika

Student: Dostálek Martin, Bc.

ID: 83837

Ročník: 2

Akademický rok: 2009/10

NÁZEV TÉMATU:

Měření teplotních polí v elektrických strojích

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Na konkrétním typu elektrického stroje proveďte měření oteplení při různých provozních stavech.
2. U konkrétního typu elektrického stroje proveďte návrh modifikace chlazení.
3. Proveďte teoretický výpočet oteplení pro modifikované chlazení.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Termín zadání: 1.10.2009

Termín odevzdání: 20.05.2010

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

doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

Abstrakt

Diagnostika teploty je jednou z nejdůležitějších oborů. Setkáváme se s ní v běžném životě, ale velmi důležitá je pro všechna odvětví průmyslu. Jedná se o měření zjišťující okamžitý stav měřeného objektu. Kontaktní měření rozdílnými teplotními senzory a bezdotykovým měřením pomocí termokamery. Důležitou částí je měření oteplení asynchronního motoru. Část práce se zabývá ztrátami v motoru. Tyto ztráty se přeměňují na teplo, které zatěžuje jednotlivé části stroje. Správné určení teplotního pole významně pomůže při návrhu ventilačního systému daného přístroje. Prakticky získané údaje jsou porovnány s údaji teoretickými. Provedeme digitalizaci součástí motoru a zrealizujeme tepelnou simulaci ve vhodném simulačním programu. Navrhne modifikaci chlazení stroje a výsledné údaje ze simulace porovnáme.

Abstract

Diagnosis temperature is one of the most important disciplines. We meet it in everyday life, but it is very important for all sectors of industry. This is a measurement providing an immediate state of the measured object. Contact measurement of different temperature sensors and contactless measurement using thermal imagers. The important part is the measurement of temperature rise of induction motor. Part of the work deals with losses in the electric motor. These losses are converted into heat, which affects from various parts of the machine. Correct identification of the temperature field is important in helping to design the cooling system of the instrument. Virtually the data obtained are compared with theoretical data. We will capture part of the device and realize thermal simulations in a suitable simulation program. We propose modifying the cooling machine and the resulting data from the simulation compares.

Klíčová slova

Asynchronní motor; dotykový snímač teploty; emisivita; chlazení; měření teploty; snímač teploty; termokamera; termočlánek; ventilace; ventilátor

Keywords

Asynchronous motor; touch temperature sensor; emissivity; cooling; temperature measurement; temperature sensor; thermal imager; thermal imager; ventilation; fan

Bibliografická citace

Bibliografická citace – příklad: Dostálek, M. *Měření teplotních polí v elektrických strojích*, Brno: FEKT VUT v Brně, 2010. 63 s.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Měření teplotních polí v elektrických strojích jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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

V Brně dne

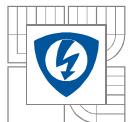
Podpis autora

Poděkování

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

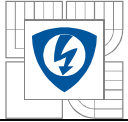
V Brně dne

Podpis autora

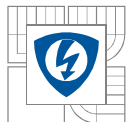


OBSAH

1 ÚVOD	13
2 TEPLOTA, TEPLA A JEHO ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI	14
2.1 TEPLA14	14
2.2 TEPLOTA.....14	14
2.3 TEPELNÁ KAPACITA.....16	16
2.4 MĚRNÁ TEPELNÁ KAPACITA.....17	17
2.5 PŘENOS TEPLA17	17
2.6 PŘENOS TEPLA VEDENÍM17	17
2.7 SDÍLENÍ TEPLA ZÁŘENÍM (SÁLÁNÍM).....18	18
2.8 PŘENOS TEPLA PROUDĚNÍM (KONVEKCE TEPLA).....18	18
3 ZTRÁTY V ASYNCHRONNÍM MOTORU	20
3.1 PRINCIP ČINNOSTI ASYNCHRONNÍHO MOTORU	20
3.2 ROZDĚLENÍ ZTRÁT V ASYNCHRONNÍM MOTORU.....21	21
3.3 MĚŘENÍ ZTRÁT ASYNCHRONNÍHO STROJE NAPRÁZDNO.....26	26
3.4 MĚŘENÍ ZTRÁT ASYNCHRONNÍHO STROJE NAKRÁTKO.....28	28
4 CHLAZENÍ STROJE	29
4.1 OTEPLENÍ ASYNCHRONNÍHO MOTORU	29
4.2 VENTILACE	30
4.3 AXIÁLNÍ VENTILÁTORY	30
4.4 RADIÁLNÍ VENTILÁTORY	31
4.5 ZPŮSOB ODVODU TEPLA.....32	32
4.6 VENTILÁTOROVÁ CHARAKTERISTIKA.....33	33
4.7 VENTILAČNÍ VÝPOČET.....34	34
5 KONTAKTNÍ MĚŘENÍ TEPLoty ELEKTRICKÉHO STROJE	38
5.1 TERMoeLEKTRICKÉ SENZORY TEPLoty.....38	38
5.2 TYPY TERMOČLÁNKŮ	40
6 BEZKONTAKTNÍ MĚŘENÍ TEPLoty	41
6.1 EMISIVITA.....42	42
6.2 TERMOKAMERA.....43	43
7 MĚŘENÍ TEPLoty NA ASYNCHRONNÍM MOTORU	44
7.1 NTC TERMISTOR A TERMOČLÁNEK.....45	45
7.2 MĚŘENÍ TERMOKAMEROU.....47	47
8 TVORBA MODELU ASYNCHRONNÍHO MOTORU	50
8.1 NÁVRH CHLAZENÍ STROJE	52
9 TEPLotNÍ SIMULACE V PROGRAMU ANSYS WORKBENCH	53
9.1 MESHOVÁNÍ - METODA KONEČNÝCH PRVKŮ (MKP)	53

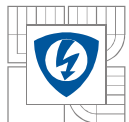


9.2 PŘECHODOVÁ TEPLOTNÍ ANALÝZA	56
10 ZÁVĚR.....	60
LITERATURA	62
11 PŘÍLOHY:	63

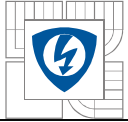


SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 3-1: a) stator asynchronního stroje b) rotor - klecové vinutí [7].....</i>	<i>20</i>
<i>Obrázek 3-2: Výkonová bilance asynchronního motoru</i>	<i>21</i>
<i>Obrázek 3-3: Rozdělení ztrát v železe a mechanických ztrát [2]</i>	<i>27</i>
<i>Obrázek 4-1: Axiální ventilátor[5].....</i>	<i>30</i>
<i>Obrázek 4-2: Proudění vzduchu v motoru -Axiální ventilace [2].....</i>	<i>30</i>
<i>Obrázek 4-3: Radiální ventilátor [5].....</i>	<i>31</i>
<i>Obrázek 4-4: a) Schéma radiální ventilace asynchronního motoru [2].....</i>	<i>31</i>
<i>Obrázek 4-5: Schéma přirozeného chlazení uzavřeného motoru malého výkonu[2].....</i>	<i>32</i>
<i>Obrázek 4-6: Uzavřený ventilační systém motoru s ochlazováním chladicího vzduchu[2].....</i>	<i>32</i>
<i>Obrázek 4-7: ventilátorová charakteristika.....</i>	<i>33</i>
<i>Obrázek 4-8: Zjednodušené teplotní schéma asynchronního motoru[2]</i>	<i>35</i>
<i>Obrázek 5-1: Zapojení termočlánku.....</i>	<i>39</i>
<i>Obrázek 5-2: Charakteristiky vybraných typů termočlánků[6]</i>	<i>40</i>
<i>Obrázek 6-1: Blokové schéma bezdotykového měřicího systému</i>	<i>41</i>
<i>Obrázek 6-2: Termokamera[4]</i>	<i>43</i>
<i>Obrázek 7-1: Umístění teplotních čidel.....</i>	<i>44</i>
<i>Obrázek 7-2: Graf teploty naměřené termočlánky.....</i>	<i>46</i>
<i>Obrázek 7-3: Graf teploty naměřené NTC termistorem.....</i>	<i>46</i>
<i>Obrázek 7-4: Teplotní pole po 10min.....</i>	<i>47</i>
<i>Obrázek 7-5: Teplotní pole po 15min.....</i>	<i>47</i>
<i>Obrázek 7-6: Teplotní pole po 20min.....</i>	<i>47</i>
<i>Obrázek 7-7: Teplotní pole po 25min.....</i>	<i>47</i>
<i>Obrázek 7-8: Teplotní pole po 30min.....</i>	<i>48</i>
<i>Obrázek 7-9: Teplotní pole po 35min.....</i>	<i>48</i>
<i>Obrázek 7-10: Teplotní pole po 40min.....</i>	<i>48</i>
<i>Obrázek 7-11: Průběh oteplení měřený termokamerou</i>	<i>49</i>
<i>Obrázek 8-1: Tělo motoru s charakteristickým mřížkováním</i>	<i>50</i>
<i>Obrázek 8-2: Klecové vinutí a stator.....</i>	<i>50</i>
<i>Obrázek 8-3: a) Nákres čtvrtiny čela motoru b) Kompletní čelo motoru.....</i>	<i>51</i>
<i>Obrázek 8-4: Kruhové pole prvků (statorové vinutí).....</i>	<i>51</i>
<i>Obrázek 8-5: Model stroje s modifikovaným chlazením.....</i>	<i>52</i>
<i>Obrázek 8-6: Upravená čela motoru.....</i>	<i>52</i>

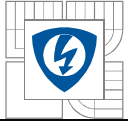


<i>Obrázek 9-1: Příklad rovinných a prostorových elementů.....</i>	<i>54</i>
<i>Obrázek 9-2: Síť elementů po meshování.....</i>	<i>54</i>
<i>Obrázek 9-3: Nastavení vlastností meshování.....</i>	<i>55</i>
<i>Obrázek 9-4: Síť prvků původního modelu.....</i>	<i>55</i>
<i>Obrázek 9-5: Síť prvků po úpravě čel stroje.....</i>	<i>55</i>
<i>Obrázek 9-6: Nastavení simulace.....</i>	<i>57</i>
<i>Obrázek 9-7: Rozložení tepelného pole motoru.....</i>	<i>58</i>
<i>Obrázek 9-8: Znáznornění tepelného toku.....</i>	<i>58</i>
<i>Obrázek 9-9: Vektorové zobrazení tepelného toku.....</i>	<i>59</i>
<i>Obrázek 9-10: Teplota statoru po dobu 60min.....</i>	<i>59</i>



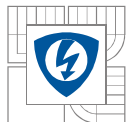
SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 1: Rozdělení ztrát v asynchronním motoru (14kW, 2p=4)</i>	<i>22</i>
<i>Tabulka 2: Typy termočlánků.....</i>	<i>40</i>
<i>Tabulka 3: Emisivita pro určité materiály.....</i>	<i>42</i>
<i>Tabulka 4: Data naměřená termokamerou.....</i>	<i>49</i>
<i>Tabulka 5: Vlastnosti materiálů.....</i>	<i>56</i>
<i>Tabulka 6: Naměřené hodnoty termistorem NTC a termočlánky</i>	<i>63</i>



SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Q	teplo
c	měrná tepelná kapacita
c_v	objemové měrné teplo
d	vzdálenost
E	termoelektrické napětí
FEM	Finite Element Method
H	tepelný tok
I_f	fázový proud tekoucí vodičem
k	součinitel tepelné vodivosti
m	hmotnost
MKP	metoda konečných prvků
Mz	zátěžný moment
n	otáčky motoru
n_s	synchronní otáčky
NTC	negastor (negative temperature coefficient)
P_r	tepelný tok vyzařovaný do okolí [W]
PTC	pozistor (positive temperature coefficient)
Q	objemový tok [$m^3 \cdot s^{-1}$]
q	zářivý tok
S	průřez předmětu
s	skluz motoru
T	termodynamická teplota
t, v	teplota
U_f	fázové napětí mezi vodiči
v	rychlost proudící kapaliny
α	teplotní součinitel elektrického odporu
ε	Stefan – Boltzmanova konstanta
ε	emisivita
η	účinnost
φ	fázový posun mezi napětím a proudem



1 ÚVOD

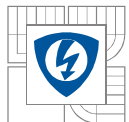
Cílem diplomové práce je srovnání možností měřicích prostředků pro diagnostiku teploty a teplotní simulace, které nám umožňují moderní programové prostředky.

Měření teploty vychází z nultého zákona termodynamiky: Dva termodynamické systémy, které se dostanou do stavu termické rovnováhy, tento stav je určen výslednou teplotou obou soustav.

Teplotu měříme na základě změn vhodných fyzikálních veličin závislých na teplotě. Jedná se o jedno z nejdůležitějších měření, které určuje stav hmoty. Převážná většina vyskytujících se látek je teplotně závislá. Teplota nám u těchto látek vlastně určuje míru kinetické energie molekul a atomů.

Diagnostika teploty je významná například pro osobní potřebu člověka. Zjišťování teploty vzduchu, měření teploty v elektrických spotřebičích nebo užívání lékařského teploměru, jsou jen základním kamenem pro širokou škálu možností a potřeb. Měření teploty je zejména důležitým oborem ve všech průmyslových odvětvích, kde hraje důležitou roli v bezpečnosti a spolehlivosti provozu. Příkladem je energetický průmysl, těžký průmysl, letecká, železniční a automobilová doprava, výroba elektrických zařízení a spotřebičů. Monitorování teploty je důležité i v potravinářství, chemickém průmyslu a farmaceutické výrobě. Snímání teplotních polí pomocí termovize usnadňuje pohled na celkové rozložení měřené teploty v prostoru. Slouží například ke zjištění hospodárnosti vytápění obytných a pracovních prostor, oteplování mechanicky nebo elektricky zatížených součástí strojů.

V poslední části práce se zabývám programovými prostředky pro digitalizaci a následnou simulaci oteplení asynchronního motoru. Možnost simulace různých fyzikálních dějů usnadňuje postupy při vývoji, šetří čas a finanční náklady. Jako předloha posloužil reálný motor, na kterém bylo provedeno předchozí měření teplotního pole. Pro vytvoření modelu stroje je použit Autodesk Inventor. Součástí práce je také návrh pro modifikaci chlazení. Model s upraveným chlazením je následně otestován v simulačním programu Ansys Workbench a výsledky porovnány.



2 TEPLOTA, TEPLO A JEHO ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI

Naznačme si rozdíl mezi těmito veličinami. Teplota je fyzikální veličinou, která popisuje v podstatě stav dané soustavy. Teplo je druh energie. Je veličinou, která se vztahuje k určitému ději, například výměně tepla.

2.1 Teplo

Značka: Q

Jednotky: J (Joule)

Tepelnými ději se zabývá fyzikální obor termodynamika. Teplo je fyzikální veličinou, která popisuje změnu termodynamického stavu soustavy, ale ne stav samotný. Představuje část vnitřní energie, kterou soustava buď přijme, nebo odevzdá jiné soustavě aniž přitom dochází ke konání práce. Jde o tepelnou výměnu. Obor zabývající se měřením tepla se nazývá kalorimetrie a teplo samotné je měřeno kalorimetrem.

Při tepelné výměně dochází k předávání energie chaotického pohybu částic, ze kterých jsou obě soustavy, mezi nimiž k výměně dochází, složeny.

Množství tepla přijatého homogenním systémem, které je spjato se změnou teploty je dáno vztahem:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T \quad [J] \quad (2.1)$$

m - hmotnost soustavy [kg]

c - měrná tepelná kapacita [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$]

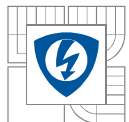
ΔT - rozdíl teplot ($\Delta T = T_2 - T_1$) [K]

2.2 Teplota

Teplota je velmi důležitá termodynamická vlastnost určující stav hmoty. Je stavovou veličinou popisující termodynamickou rovnováhu a bývá charakterizována termodynamickou teplotou. Většina vlastností látek a fyzikálních dějů je teplotně závislá. Tato veličina je spjata s průměrnou kinetickou energií molekul a atomů, kdy se vzrůstající teplotou vzrůstá i míra kinetické energie částic.

Teplota je veličina, kterou nelze měřit přímo. Výslednou hodnotu získáme pomocí jiných fyzikálních veličin. Z toho vyplývá, že se jedná o nepřímé měření.

Pro měření teploty je důležitá volba teplotní stupnice. Rozlišujeme několik základních druhů stupnic: Termodynamická teplotní stupnice, Celsiova stupnice a Fahrenheitova stupnice.



Termodynamická stupnice:

Symbol: t, T

Jednotka SI: K (Kelvin)

Stupnice vyplývá z Carnotovy věty: Účinnost všech vratných Carnotových cyklů, které pracují mezi dvěma teplotami, je shodná. Není závislá na jiných vnitřních ani vnějších parametrech (tzn. Nezávislá na použité teploměrové látce). Počátek termodynamické stupnice je dán absolutní nulou. Což je nejnižší teplota, která je fyzikálně definována. $T=273,16\text{K}$ je termodynamická teplota trojného bodu vody (tj. skupenství ledu, vody a syté páry).

$$\eta = \frac{|Q_2| - |Q_1|}{|Q_2|} = \frac{T_2 - T_1}{T_2} \quad [-] \quad (2.2)$$

Ze vztahu vyplývá:

$$\frac{|Q_2|}{|Q_1|} = \frac{T_2}{T_1} \quad (2.3)$$

Q2 - teplo přijaté od ohříváče s teplotou T2 [J]

Q1 - teplo odevzdané chladiči o teplotě T1 [J]

η - účinnost Carnotova cyklu [-]

T - termodynamická teplota [K]

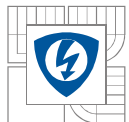
Celsiova stupnice:

Symbol: t

Jednotka: °C (Stupeň Celsia)

Celsiova stupnice je stanovena dvěma pevnými body: 0°C a 100°C, což je bod tání ledu a bod varu vody. Stupnice je vedlejší jednotkou soustavy jednotek SI. Je definována o 0,01K níž než je pevný bod teploty trojného bodu vody. Přepočítání termodynamické teploty na teplotu Celsiovu je dán rozdílem termodynamické teploty a teploty 273,15K.

$$t(^{\circ}\text{C}) = T - T_0 = T - 273,15\text{K} \quad (2.4)$$



Fahrenheitova stupnice:

Symbol: t

Jednotka: °F (Stupeň Fahrenheita)

Tato stupnice je používána převážně ve státech USA. Referenční body stupnice jsou: 32°F bod mrazu vody a 212°F což je bod varu vody. Jeden stupeň Fahrenheita odpovídá 5/9K, (resp. °C). Pro přepočítání termodynamické teploty nebo stupňů Celsia na Fahrenheitovu stupnici je používán vztah:

$$t = \frac{9}{5}T - 459,67 = \frac{9}{5}t - 32 \quad [^{\circ}F] \quad (2.5)$$

Mezi dalšími méně používanými stupnicemi může být jmenována například: Mezinárodní teplotní stupnice ITS-90, Rankinova, Delisleova, Newtonova, Réamurova atd.

2.3 Tepelná kapacita

Tepelná kapacita c_v nám udává konstantu úměrnou množství tepla, dodaného předmětu a tím způsobenou změnu teploty. Tepelná kapacita nám v podstatě určí, kolik tepla je potřeba ke zvýšení teploty o jednotku Kelvina.

Tepelná kapacita je veličina hrající důležitou úlohu například při návrhu chlazení tepelně namáhaných součástí. Vztah vyjadřuje podíl přivedeného nebo naopak odebraného tepla při změně teploty:

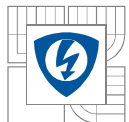
$$c_v = \frac{W}{\Delta T} = \frac{dW}{d\Delta T} \quad \left[\frac{J}{K} \right] \quad (2.6)$$

$$\Delta T = T_2 - T_1$$

$$\Delta v = v_2 - v_1$$

T_2, v_1 - počáteční teplota

T_2, v_2 - konečná teplota



2.4 Měrná tepelná kapacita

Jedná se o veličinu, která udává množství tepla na jednotku hmotnosti. Vyjadřuje kolik tepla je potřeba k ohřátí 1kg materiálu o jeden stupeň (°K). Tato veličina se nevztahuje k předmětu, ale k jeho materiálu.

Vztah vyjadřující součin měrného tepla a hmotnosti tělesa m:

$$c = \frac{c_g}{m} \quad \left[\frac{J}{K \cdot kg} \right] \quad (2.7)$$

c - měrná tepelná kapacita [J.K⁻¹.kg⁻¹]

m - hmotnost [kg]

c_v - tepelná kapacita [J.K⁻¹]

2.5 Přenos tepla

Přenos tepla (nebo také sdílení, vedení), je děj probíhající na rozhraní dvou různých látek s rozdílnou teplotou a dochází k přestupu tepla z jedné látky na druhou. Poznatky z tohoto tématu jsou využívány k návrhu chladicích systémů, u strojů a jiných tepelně namáhaných součástí. Teplo vzniká na částech, v nichž vznikají ztráty. K přestupu tepla dochází vzájemně mezi všemi částmi stroje. Sdílení tepla probíhá třemi různými způsoby:

- vedením
- zářením (sáláním)
- prouděním

2.6 Přenos tepla vedením

Přenos tepla vedením probíhá v pohyblivém i statickém prostředí různého skupenství (pevné, kapalné, plynné), ale především se tento druh týká tuhých materiálů. Teplo se zpravidla přenáší z prostředí s nižší teplotou do prostředí s vyšší teplotou.

$$H = \frac{Q}{t} = kS \frac{T_H - T_S}{d} \quad [W] \quad (2.8)$$

H - tepelný tok [W]

Q - teplo [J]

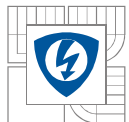
T_H - vyšší teplota [K]

T_S - nižší teplota [K]

k - součinitel tepelné vodivosti [W.m⁻¹.K⁻¹]

d - vzdálenost přenosu [m]

S - průřez předmětu [m²]



Při vedení tepla, je důležité počítat s tepelným odporem R . Jedná se o ekvivalenci elektrického odporu. Čím nižší je tepelná vodivost daného materiálu, tím větší je jeho tepelný odpor. Každé prostředí, kterým se teplo šíří klade procházejícímu teplu určitý tepelný odpor. Ten je dán vztahem:

$$R_g = \frac{d}{kS} \quad \left[\frac{K}{W} \right] \quad (2.9)$$

- R_g - tepelný odpor [$K \cdot W^{-1}$]
 k - součinitel tepelné vodivosti [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]
 d - vzdálenost přenosu [m]
 S - průřez předmětu [m^2]

2.7 Sdílení tepla zářením (sáláním)

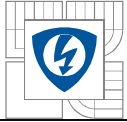
Přenos tepla zářením, které probíhá mezi předmětem a okolím, je způsobeno prostřednictvím elektromagnetických vln. Je možné ve vakuu i v plynném prostředí. Výkon P_r vyzařujícího předmětu nám udává rychlost, s jakou zdroj tepla vyzařuje energii pomocí elektromagnetických vln. Tento výkon je dán Stefan – Boltzmannovým zákonem:

$$P_r = \sigma \varepsilon S T^4 \quad [W] \quad (2.10)$$

- P_r - tepelný tok vyzařovaný do okolí [W]
 ε - Stefan – Boltzmanova konstanta; $\varepsilon = 5,67 \cdot 10^{-8} [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}]$
 σ - emisivita [-]
 S - plocha předmětu [m^2]
 T - teplota [K]

2.8 Přenos tepla prouděním (konvekce tepla)

Jedná se o fyzikální děj, kdy dochází k šíření tepla prouděním nějaké tekutiny o různé teplotě. Děj se týká přenosu tepla zejména v kapalinách a plynech. Toto proudění můžeme rozdělit do dvou základních skupin. Přenos tepla přirozenou konvencí a umělou konvencí. U přirozené konvence dochází k samovolnému proudění tekutiny díky fyzikálním zákonům. Teplejší médium se pohybuje směrem vzhůru kvůli rozdílným teplotám. U umělé konvence je chladivo poháněno ventilátorem nebo jiným přístrojem. Přestup tepla prouděním je užíván při návrhu plyných a kapalných chladících systémů. Základem je přestup tepla vedením do chladícího média a poté může být teplo odvedeno prouděním.



Hustota tepelného toku vychází z Newtonova zákona:

$$q = \alpha \cdot \Delta v = \alpha \cdot (v_1 - v_2) \quad [W \cdot m^{-2}] \quad (2.11)$$

Tepelný tok:

$$Q = q \cdot S = \alpha \cdot S \cdot (v_1 - v_2) \quad [W] \quad (2.12)$$

- α - součinitel přestupu tepla [$W \cdot m^{-2} K^{-1}$]
- S - plocha přicházející do styku s proudící tekutinou [m^2]
- v - teplota tekutiny a teplota povrchu [$^{\circ}C$]

Přenos tepla konvekcí je určen také množstvím média, které je schopno vzniklé teplo odvádět. Tato vlastnost závisí na rychlosti proudící tekutiny a na jejím množství. Velikost objemového toku nám určuje vztah:

$$Q = v \cdot S \quad [m^3 \cdot s^{-1}] \quad (2.13)$$

- Q - objemový tok [$m^3 \cdot s^{-1}$]
- v - rychlost proudící kapaliny [$m \cdot s^{-1}$]
- S - průřez toku proudící kapaliny [m^2]

3 ZTRÁTY V ASYNCHRONNÍM MOTORU

3.1 Princip činnosti asynchronního motoru

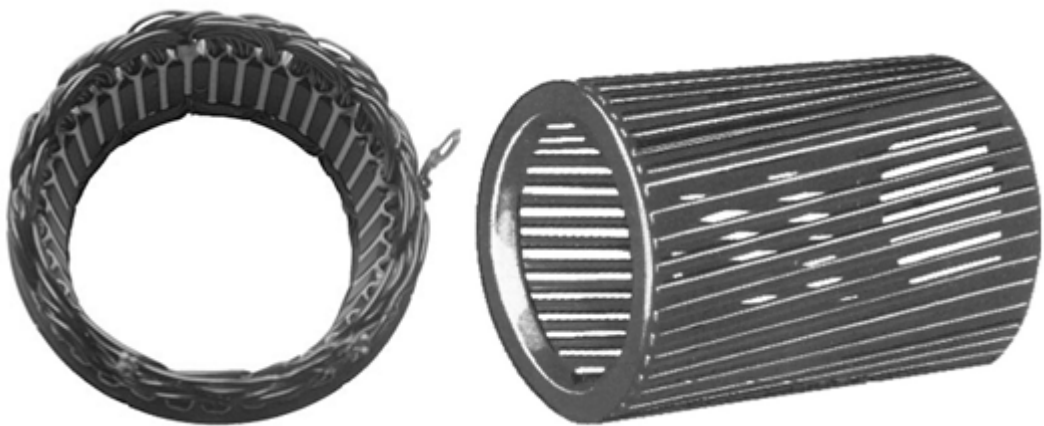
Jedná se o točivý elektrický stroj, který je napájený střídavým proudem. Tento druh pohonu je nejrozšířenějším v elektrotechnice.

Nejdříve si popíšeme zjednodušený princip konstrukce asynchronního motoru. Napájení stroje je zpravidla spojeno se vstupním vinutím statoru. Vinutí statoru bývá většinou trojfázové (může být ale jednofázové, nebo taky dvoufázové). Výstupní vinutí je umístěno na rotoru, a je obvykle spojeno nakrátko.

Rotorové trojfázové vinutí je u menších strojů obyčejně jednovrstvé a uložené do drážek. U větších strojů je vinutí řešeno jako dvouvrstvé, tyčové. Nejběžnější provedení bývá tzv. klecové vinutí. Kotva nakrátko je realizována tak, že do drážek motoru jsou nalisovány neizolované měděné, hliníkové nebo mosazné tyče. Ty jsou na svých koncích propojeny kroužky, které všechny tyče propojí.

Konstrukce asynchronního stroje obvykle postrádá vyniklé póly. Tím pádem je vzduchová mezera rovnoměrná. Velikost vzduchové mezery se pohybuje od zlomků milimetru po několik milimetrů. Tím dostaneme tzv. klecové vinutí, jenž je zobrazeno na obr. 3-1. Konstrukce kroužkové kotvy z toho, že na hřídeli jsou umístěny také sběrné kroužky. V drážkách je uloženo izolované třífázové vinutí, která je zpravidla zapojené do hvězdy. Sběrací kroužky slouží k připojení činných odporů pro rozběh motoru.

Princip činnosti je založen na vzájemném elektromagnetickém působení točivého magnetického pole statoru a proudů, které jsou vytvořeny ve vinutí rotoru působením tímto magnetickým polem. Tok energie mezi státorem a rotorem probíhá pomocí elektromagnetické indukce (indukční motor).



Obrázek 3-1: a) stator asynchronního stroje b) rotor - klecové vinutí [7]

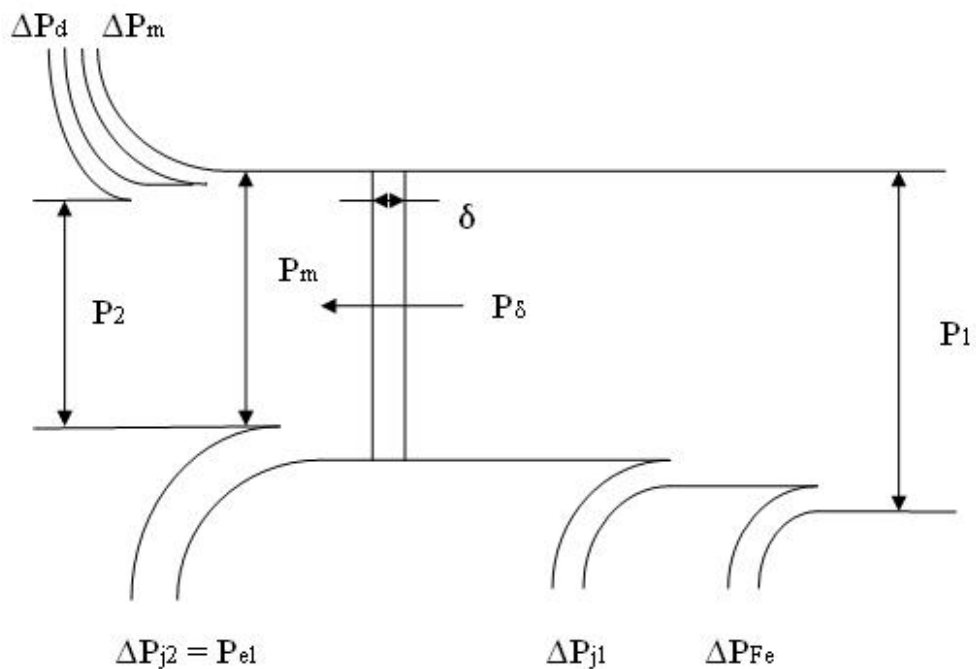
3.2 Rozdělení ztrát v asynchronním motoru

Ztráty v elektrickém stroji můžeme obecně rozdělit do následujících skupin:

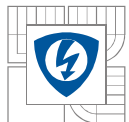
- Ztráty elektrické vznikající ve vodičích a jiných vodivých součástech stroje.
- Ztráty v železe (magnetické), ve feromagnetických částech stroje.
- Ztráty dielektrické v izolacích.
- Ztráty mechanické.

Při chodu motoru vznikají ztráty, které zapříčiňují oteplení stroje. Tyto ztráty se mění se změnou zatížení, neboli se změnou výkonu. Z celkových ztrát také určíme celkovou účinnost stroje. Jsou to Jouleovy ztráty ve vinutí statoru a rotoru, elektrické ztráty v trvale přiložených kartáčích, ztráty v železe (ve jhu i zubech) statoru i rotoru. Ztráty mechanické a ztráty přídatné. Při chodu naprázdno to jsou ztráty v železe, mechanické ztráty, elektrické ztráty v budících obvodech a elektrické ztráty od zatížení proudem naprázdno v jednotlivých vinutích. Za ustáleného chodu přibývají Joulové ztráty ve vinutích a ztráty v magnetických a elektrických obvodech.

$$\Delta P = \Delta P_j + \Delta P_{Fe} + \Delta P_d + \Delta P_{mech} \quad (3.1)$$



Obrázek 3-2: Výkonová bilance asynchronního motoru

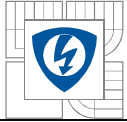


P_1	- výkon odebíraný motorem z napájecí sítě
ΔP_{Fe}	- ztráty v železe (v magnetickém obvodu statoru)
ΔP_{j1}	- ztráty v mědi (vinutí statoru)
ΔP_d	- dodatečné ztráty
P_δ	- elektromagnetický výkon procházející přes vzduchovou mezeru
δ	- vzduchová mezera
$\Delta P_{j2} = P_{el}$	- ztráty v mědi (vinutí rotoru)
P_{mech}	- mechanický výkon
ΔP_{mech}	- mechanické ztráty
P_2	- mechanický výkon na hřídeli motoru

V tabulce níže je znázorněno rozdělení ztrát v asynchronním motoru 14kW, 2p=4, 380V, 50Hz. Je zřejmé, že převážná část ztrát vzniká ve vinutích, zubech a na povrchu statoru a rotoru.

Druh ztrát	P [W]	[%]
Ztráty ve vinutí statoru	760	42,2
Ztráty ve vinutí rotoru	405	22,5
Přídavné ztráty	80	4,4
Magnetické ztráty ve jhu* statoru	176	10,2
Magnetické ztráty v zubech statoru	92	5,1
Povrchové ztráty ve statoru	8	0,4
Pulsační ztráty ve statoru	4	0,2
Povrchové ztráty v rotoru	37	2,0
Pulsační ztráty v rotoru	35	1,9
Mechanické a ventilační ztráty	200	11,1
Celkové ztráty	1797	100

Tabulka 1: Rozdělení ztrát v asynchronním motoru (14kW, 2p=4)



Příkon odebíraný 3f motorem ze sítě:

$$P_1 = 3U_f I_f \cos \varphi \quad (3.2)$$

U_f – fázové napětí mezi vodiči

I_f – fázový proud tekoucí vodičem

φ – fázový posun mezi napětím a proudem

Jak je zřejmé z výkonové bilance asynchronního motoru na obr. 9, je celkový výkon P_2 dán rozdílem příkonu odebíraným ze sítě P_1 a ztrát vznikajících v motoru.

$$P_2 = P_1 - \Delta P_{Fe} - \Delta P_{j1} - \Delta P_{j2} - \Delta P_{mech} - \Delta P_d \quad (3.3)$$

Elektromagnetický výkon procházející přes vzduchovou mezeru:

$$P_\delta = P_1 - \Delta P_{Fe} - \Delta P_{j1} \quad (3.4)$$

P_{el} představuje výkon spotřebovaný na všech činných odporech v rotoru (včetně odporu spouštěče, který může být v kroužkovém rotoru zapojen).

Celková účinnost stroje

Je dána poměrem výkonu na hřídeli motoru a příkonu odebíraného z napájecí sítě. Celková účinnost strojů na vyšší napětí je menší než u strojů na nižší napětí. To, ale neplatí v případě kroužkových motorů, kde je tomu právě naopak.

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \quad (3.5)$$

Ztráty v železe ΔP_{Fe} :

Ztráty v železe (hysterezní a vířivé) vznikají v plechách magnetického obvodu a z velké části ve statoru. Elektrické ztráty v rotoru P_{Fe2} nejsou uvažovány, protože jsou zanedbávány z důvodu malého kmitočtu v obvodu rotoru. Proto je uvažujeme jen tehdy je-li kmitočet rotoru velký.

Předpokládáme konstantní velikost ztrát v železe. Určíme je z charakteristiky naprázdno při napětí U_n . Napětí nastavíme na 130% U_1 a snižujeme, tak aby skluz nepřesáhl 1%. Ztráty naprázdno ve vinutí statoru ΔP_{j10} určíme ze vztahu:

$$\Delta P_{j10} = 3R_{10} \cdot I_{10}^2 \quad (3.6)$$



Mechanické ztráty ΔP_{mech}

Vznikají třením rotoru o vzduch, třením v ložiskách, ventilační ztráty a třením na trvale přiložených kartáčích. Určíme je z charakteristiky naprázdno. Při výpočtu účinnosti je uvažujeme konstantní. (přičítáme polovinu mechanických ztrát každému stroji při zatěžovací zkoušce)

Ztráty v mědi ΔP_{j1}

Určujeme při zatěžovací zkoušce. Při zatěžovací zkoušce jsou na společné hřídeli dva stroje: měřený a zatěžovací. Nastavíme proudové přetížení 1,5In a trátový výkon určíme pro jednotlivé hodnoty proudu.

$$\Delta P_{j1} = 3R_1 I^2 \quad (3.7)$$

R_1 je přepočten na dovolené oteplení stroje určeným třídou izolace. Rozlišujeme stroje otevřené, kde je dovolené oteplení 55°C a uzavřené s dovoleným oteplením 65°C.

Vzorec pro přepočet odporu na vyšší teplotu:

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{c + \vartheta_2}{c + \vartheta_1} \quad (3.8)$$

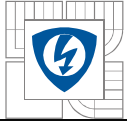
$\vartheta_{1,2}$ - nižší a vyšší hodnota oteplení [°C]

c - konstanta (=235)

Dodatečné ztráty ΔP_d

Nebo také přídavné ztráty uvažujeme při jmenovitém stavu stroje. Určují se velmi obtížně, a proto je určujeme podle norem ČSN (ČSN 35 0301). Do těchto ztrát spadají ztráty vířivými proudy ve vinutích statoru, rotoru a jiných částech stroje. Přídavné ztráty na povrchu rotoru i statoru.

$$\Delta P_d = 0,005 P_1 \quad (3.9)$$



Ztráty ve vinutí rotoru ΔP_{j2}

Uuríme jako součin skluzu a výkonu procházejícího přes vzduchovou mezeru P_δ .

$$\Delta P_{j2} = s \cdot P_\delta = \frac{n_s - n}{n_s} \cdot P_\delta \quad (3.10)$$

- s - skluz motoru [-]
n - otáčky motoru [ot.min⁻¹]
n_s - synchronní otáčky [ot.min⁻¹]

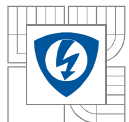
Pro každý pracovní stroj je vzhledem k jeho konstrukci a procesu, v němž je zařazený, přiřazen nějaký systém elektrického pohonu. Ten musí svému účelu vyhovovat. A to hlavně z technického a ekonomického hlediska.

Zatížení motoru je závislé na způsobu a druhu dynamických dějů. Důležitými ději jsou rozběh, ustálený chod, zatížení, brzdění, reverzace. Tyto děje probíhají v různých provozech v rozdílném sledu. U některých pohonů je závislost otáček na čase velmi proměnlivá. To závisí na využití pohonu. U tažných zařízení jsou, po rozběhu motoru, otáčky konstantní, pak následuje doběh a brzdění. V řízených pohonech tyto děje mohou probíhat velmi rychle za sebou a při různých proměnlivých otáčkách. Při návrhu pohonu je důležité tyto skutečnosti nezanedbat. Zvláště pro daný účel určit správný jmenovitý výkon motoru. Výkonově moc velký motor by pracoval zvláště neekonomicky a zhorší dynamiku pohonu. Na druhou stranu při volbě moc malého jmenovitého výkonu bude motor mechanicky a tepelně přetěžován, což se může projevit na zmenšení jeho celkové životnosti.

Elektrický stroj je kompaktní nehomogenní těleso obsahující magnetické a elektrické obvody. Dále je složen z částí, v nichž jsou tyto součásti uloženy.

Oteplování stroje vzniká v důsledku ztrát. Ztráty výkonu se přeměňují na teplo a při běhu motoru způsobují změnu teploty. Zvýšení teploty má za následek strukturální změny izolace, kterými se zmenšuje její elektrická a mechanická pevnost.

Při určování výkonu motoru je zadání zjednodušeno o předpoklad, že se jedná o homogenní těleso.



3.3 Měření ztrát asynchronního stroje naprázdno

Motor při chodu naprázdno se otáčí bez zátěže na hřídeli. Napájecí napětí udržujeme konstantní. Skluz motoru je malý, ale není nulový. Měříme proudy naprázdno ve fázích I_{10} , příkon naprázdno P_p , který je přiváděn do statorového vinutí. Měření se provádí při změně hodnot napětí U_1 . Zkoušku provádíme asi pro deset různých hodnot napětí. Začínáme na $(1,1 \div 1,3)U_n$ a snižováním U_n pokračujeme do hodnoty $0,3U_n$, při jmenovitém kmitočtu. Pro lepší tepelnou ustálenost je doporučeno provádět zkoušky dostatečně dlouho, a to podle výkonu stroje. Při vyšších výkonech je pro přesnější měření výhodnější nechat běžet bez zatížení déle.

Z měření dostaneme charakteristiky při chodu naprázdno. Jak už vyplývá z předchozího odstavce, charakteristika nám udává závislost příkon naprázdno P_{p0} , proud naprázdno I_{10} , účinník naprázdno $\cos \varphi_0$ na U_{10} .

Známe-li odpor statorového vinutí a proud naprázdno dostaneme ztráty ve vinutí statoru: $3R_1 I_{10}^2$ a následně je odečteme od celkových ztrát naprázdno $\Delta P_0 = P_0$ a získáme součet ztrát v železe a mechanických ztrát.

$$\Delta P_{j10} = 3R_1 I_{10}^2 \quad (3.11)$$

$$\Delta P_{Fe} + \Delta P_{mech} = \Delta P_0 - 3R_1 I_{10}^2 \quad (3.12)$$

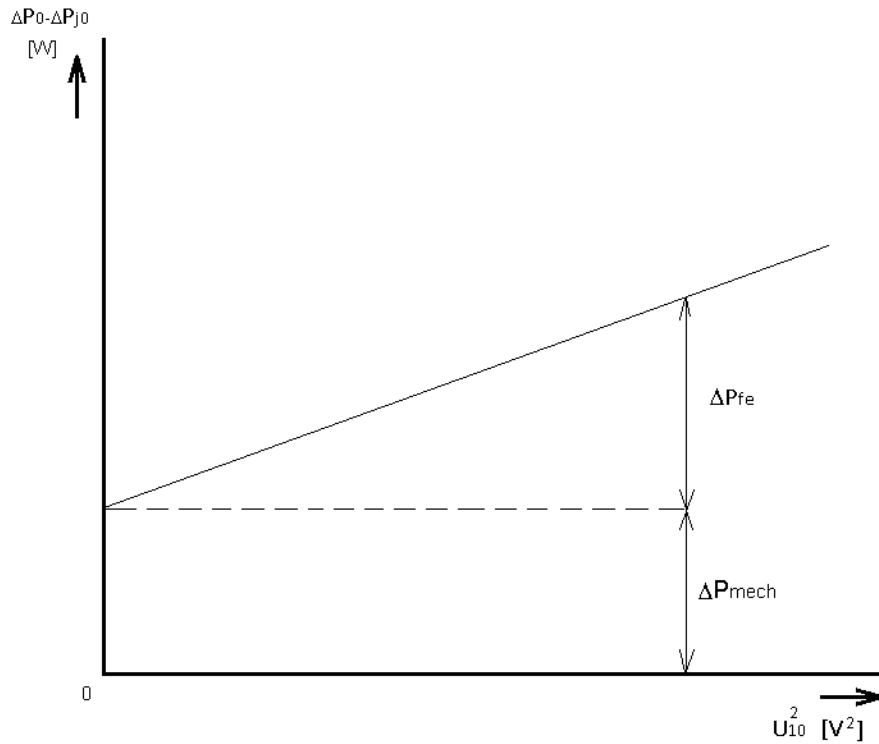
proud naprázdno:

$$I_{10} = \frac{I_{10} + I_{20} + I_{30}}{3} \quad (3.13)$$

účinník naprázdno:

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{3}U_{10}I_{10}} \quad (3.14)$$

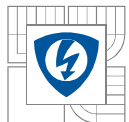
Ztráty, které měříme při chodu naprázdno, jsou součtem ztrát v železe magnetického obvodu statoru, mechanických ztrát a Joulových ztrát.



Obrázek 3-3: Rozdělení ztrát v železe a mechanických ztrát [2]

Ztráty v železe a mechanické ztráty mohou být rozděleny pomocí tzv. extrapolace křivky na obr. 3-3. U_1 je na ose x uvedeno v druhé mocnině pro pohodlnější extrapolaci, protože při menších hodnotách U_1 je křivka mírně zohýbaná. Tento jev se při extrapolaci zanedbává.

Při chodu naprázdno jsou v magnetickém obvodu statoru ztráty zanedbány díky malému skluzu. V rotoru tečou malé proudy, proto i Joulovy ztráty můžeme zanedbat.



3.4 Měření ztrát asynchronního stroje nakrátko

Účelem tohoto měření je zjistit velikost ztrát ve vinutí, proud nakrátko, účinník narátka, rozběhový proud a záběrný moment. Měření nakrátko je prováděno během stavu motoru, kdy je rotor mechanicky zabrzděn, neboli skluz je roven 1 ($s=1$). Na vinutí statoru je přivedeno snížené napětí o jmenovitém kmitočtu asi $(15\div 20\%)U_n$, potom napětí postupně zvyšujeme na určitou hodnotu. Proud se mohou pohybovat v rozmezí $(1\div 2)I_n$, v závislosti na typu stroje. Měříme napětí, proud, příkon a moment (I_{1k} ; U_{1k} ; P_k ; M). Po odečtení hodnot motor vypneme. Během této zkoušky je stroj ve stavu spouštění. Díky tomuto faktu je možné určit z naměřených hodnot záběrný moment a záběrný proud. Při zkoušení strojů do 100kW je doporučeno měřit záběrný moment pomocí dynamometru. U větších výkonů je možné určit záběrný moment výpočtem.

Odečítání hodnot musí být prováděno dostatečně rychle a po té se motor vypíná. Protože je motor v zabrzděném stavu, jeho hřídel se netočí a neprobíhá tak cirkulace vzduchu v motoru. Teplota zatěžovaných součástí se tímto rychle zvyšuje. Nejvíce namáhané je vinutí a teplota nesmí překročit dovolené oteplení. Mohlo by dojít k poškození izolace.

Charakteristika nakrátko $I_{1k}=f(U_{1k})$, která je vynesena z naměřených hodnot by měla být teoreticky přímková, ale proud I_{1k} je ovlivňován v závislosti na vzájemné poloze zubů statoru a rotoru. Dochází k změnám rozptylového pole ve vzduchové mezeře.

Naměřené hodnoty:

proud nakrátko:

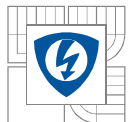
$$I_{1k} = \frac{I_{1k} + I_{2k} + I_{3k}}{3} \quad (3.15)$$

účinník nakrátko:

$$\cos\varphi_k = \frac{P_k}{\sqrt{3}U_{1k}I_{1k}} \quad (3.16)$$

Ztráty nakrátko, které jsme naměřili, jsou složeny ze ztrát Joulových a přídavných.

$$P_k = \Delta P_{jk} + \Delta P_d \quad (3.17)$$



4 CHLAZENÍ STROJE

Chlazením elektrického stroje máme na mysli odvádění tepla z oteplujících se částí stroje. Nejčastějším chladivem je proudící vzduch, ale je využíváno i jiných plynů, jako třeba vodíku. Z kapalných chladiv je nejčastěji využíváno vodního chlazení. Při konstruování stroje se jedná o jeden z důležitých problémů, jak zajistit správný odvod tepla.

Při chlazení musí být zajištěno správné usměrnění proudícího vzduchu. To zajišťuje správné uspořádání ventilačního systému. Druh chlazení je volen podle druhu krytí stroje a jeho konstrukčního uspořádání.

Při oběhu chladiva je systém dělí na dva základní druhy způsobu oběhu chladiva. Nejčastějším způsobem, který je využíván, je otevřený oběh. V tomto případě se použité chladivo už zpět nevrací a je odváděno pryč. Při uzavřeném oběhu je chladivo uzavřeno ve vlastním ventilačním systému.

4.1 Oteplení asynchronního motoru

U všech točivých strojů se předpokládá, že při jejich chodu vznikají ztráty. Tím pádem vzniká předpoklad pro fakt, že se za provozu stroj zahřívá. Problematice oteplení je třeba se důkladně věnovat. Použité izolační materiály mají omezenou tepelnou stálost a při její překročení může dojít k poruše nebo nehodě. Zvýšení teploty má také za následek urychlení stárnutí izolace stroje. To způsobuje zkracování životnosti stroje,

Zdroj vznikajícího tepla je třeba hledat v částech stroje, kde vznikají elektrické, mechanické nebo magnetické ztráty. Teplo, které vzniká, je potřeba při provozu odvádět do okolí. Odvod tepla je proveden vedením, sdílením a sáláním z míst kde vzniká do okolí a do ostatních částí stroje. Pokud je zatížení stroje konstantní, tak po určitém časovém úseku je dosaženo ustálení tepelného pole stroje. Toto teplo, vznikající za chodu, je odváděno z povrchu stroje do okolí. Je to stav, kdy teplo vznikající je rovno teplu odváděnému.

Při provozních podmínkách většiny asynchronních strojů dochází k častému opětovnému spouštění motoru. Proudění ve vinutích rotoru i statoru, za těchto podmínek značně převyšují jmenovité hodnoty a to pětkrát až šestkrát. Tento fakt má značný vliv na oteplení stroje.

Asynchronní stroje jsou v provozu vystavovány proměnnému zatěžování. Druh zatížení je možné rozdělit do tří základních skupin:

1. Trvalé zatížení – Stroj je zatížen stálou zátěží a oteplení stroje se po určité době ustálí na ustálené hodnotě.
2. Krátkodobý chod – V tomto případě se chod s konstantním jmenovitým zatížením střídá s obdobím zastavení stroje. Stroj nedosahuje ustálených hodnot oteplení, ale období zastavení je dostatečně dlouhé k tomu aby se stroj mohl zcela vychladit.
3. Přerušovaný chod – Jedná se o krátká období chodu se stálým zatížením, která se střídají krátkými cykly zastavení. Teplo nedosahuje ani ustálených hodnot a při zastavení se stroj nestihne zcela vychladit.

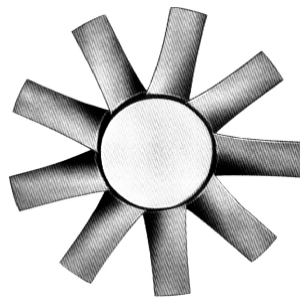
4.2 Ventilace

U běžných asynchronních strojů je nejčastějším chladivem proudící vzduch. Pro zajištění jeho účinného proudění se využívají tři základní druhy ventilace:

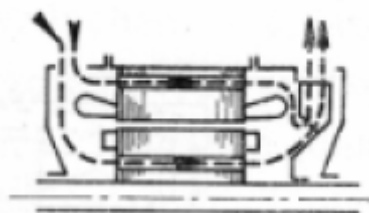
- axiální
- radiální
- radiálně axiální

4.3 Axiální ventilátory

Axiální ventilátory mají lopatky pohánějící vzduch, které se pohybují souběžně s hřídelí. Axiální ventilátory ženu vzduch přes osu ventilátoru lineárně, odtud pochází jejich název. Tento typ ventilátoru je určen pro širokou škálu aplikací, od malých chladících ventilátorů pro elektroniku po obří ventilátory používané v aerodynamickém tunelu. Axiální ventilátory jsou využívány v systémech, kde není potřeba dodávat chladivo pod velkým tlakem. Ventilátor přečerpá menší objem vzduchu, ale za to je teplo odváděno s menšími ztrátami. Tento druh ventilátoru se vyznačuje svojí jednoduchostí.



Obrázek 4-1: Axiální ventilátor[5]



Obrázek 4-2: Proudění vzduchu v motoru -Axiální ventilace [2]

4.4 Radiální ventilátory

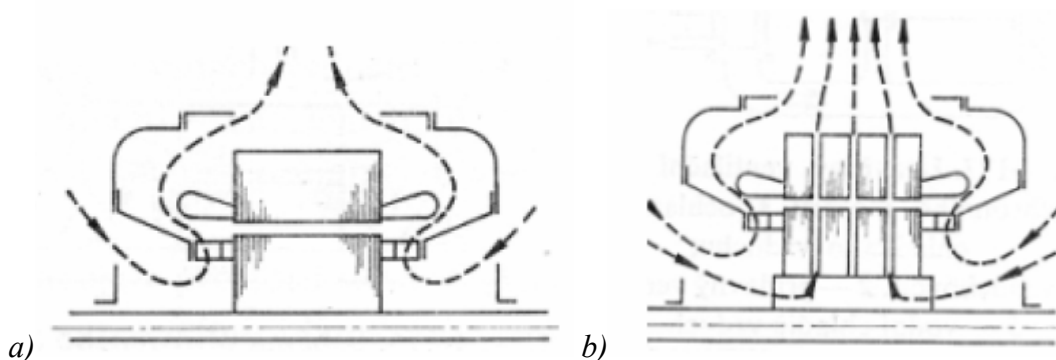
Radiální ventilátory vytvářejí vyšší tlak na daný objem vzduchu a jsou používány tehdy, pokud je potřeba dodat více chladiva a pod větším tlakem.

V radiálních ventilátorech je dopravované médium nasáváno v axiálním směru, radiálně urychleno v rotujícím oběžném kole a poté tangenciálně vystupuje ze spirální skříně.

Radiální ventilátory jsou dále členěny do dvou tříd: Radiální ventilátory s dopředu zahnutými lopatkami a s dozadu zahnutými lopatkami. Toto členění lze dále rozdělit na jednostranně sající a oboustranně sající ventilátory.



Obrázek 4-3: Radiální ventilátor [5]



Obrázek 4-4: a) Schéma radiální ventilace asynchronního motoru [2]

b) Schéma radiálně - axiální ventilace asynchronního motoru [2]

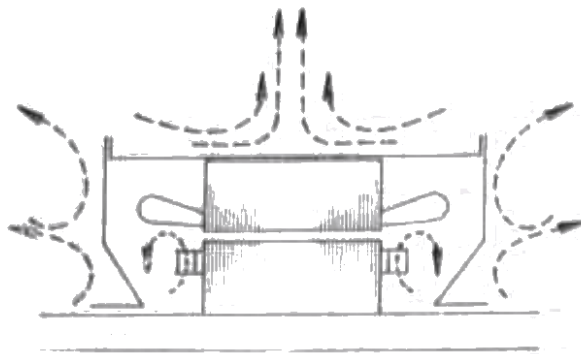
4.5 Způsob odvodu tepla

Vzniklé teplo je třeba odvádět z míst, kde dochází k jeho vzniku. Chlazení stroje můžeme rozdělit na:

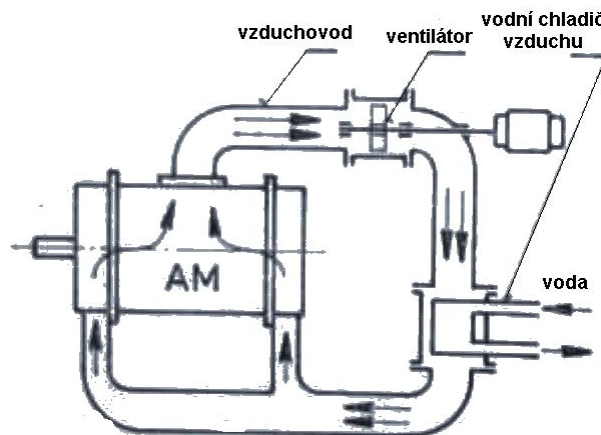
přímé – chladivo přichází do přímého styku s chlazenou částí

nepřímé – teplo prochází před stykem s chladivem i jinými částmi stroje

Důležitou otázkou je také, jak bude zvolen zdroj energie pro zařízení, které zajišťuje oběh chladiva (např. ventilátor). Tento zdroj buď závislý na energii dodávané chlazeným strojem, nebo nezávislý, kdy oběh chladiva zajišťuje například ventilátor poháněný vlastním motorem. Chladicí voda může být poháněna čerpadlem nebo tlakem z vodovodní sítě. V případě závislého chlazení jde třeba o ventilátor umístěný na hřídeli stroje. V určitých případech není stroj vybaven žádným ventilátorem. Jde o takzvané přirozené chlazení, kdy proudění chladiva vyvolává pouze rozdíl teplot či účinek otáčení rotoru.



Obrázek 4-5: Schéma přirozeného chlazení uzavřeného motoru malého výkonu[2]



Obrázek 4-6: Uzavřený ventilační systém motoru s ochlazováním chladicího vzduchu[2]

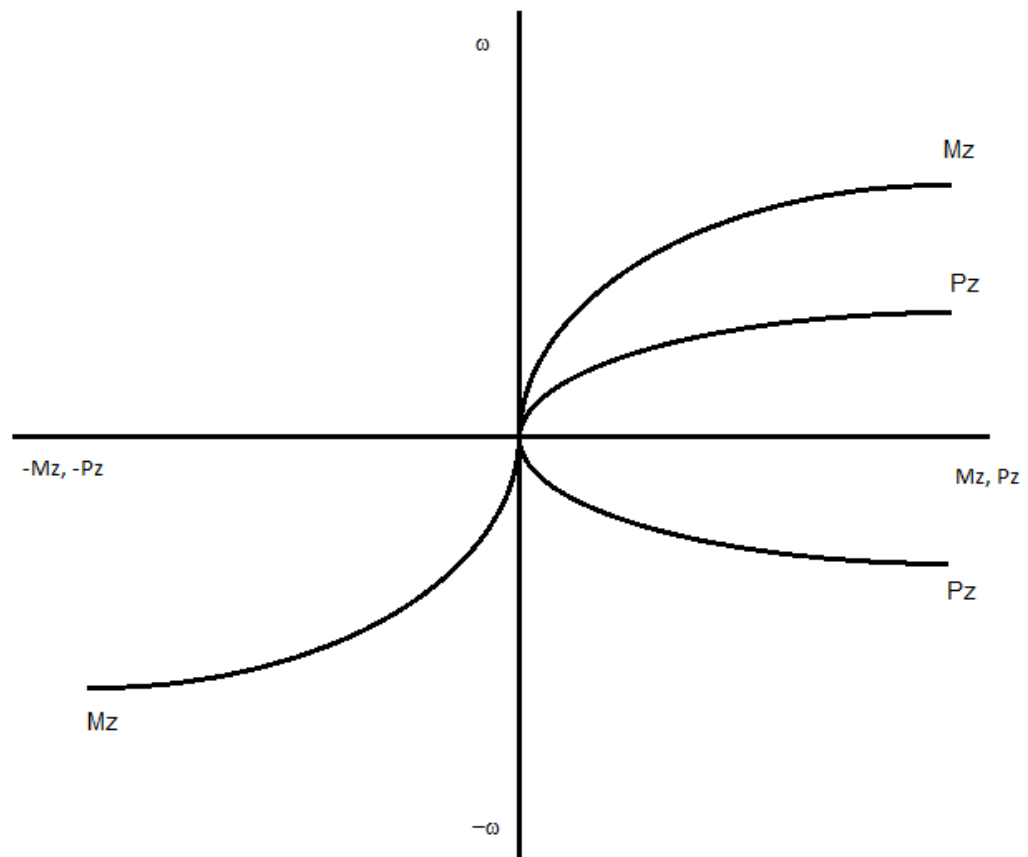
4.6 Ventilátorová charakteristika

Ventilátor, který je umístěný na hřídeli a vytváří sílu, jenž pohání vzduch procházející strojem. Tato činnost vytváří na hřídeli určitý zátěžný moment. Tento moment je závislý na rychlosti, kterým pracovní mechanismus zatěžuje hnací soustavu. Mechanická charakteristika na obr. 4-7 udává grafickou podobu průběhu zátěžného momentu ventilátorové charakteristiky.

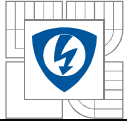
Mechanické ztráty u točivých elektrických strojů zahrnují také ztráty způsobené třením v ložiskách nebo prouděním vzduchu. Vzduch ve většině strojů slouží jako chladicí médium. Je hnán od předního čela k zadnímu a tím ochlazuje celý stroj. Ztráty v ložiskách jsou poměrně nízké, pokud jsou dobře udržované, ale i tak působí jako zdroj tepla. Ztráty ventilací rostou kvadraticky s otáčkami stroje.

Zátěžný moment M_z ventilátorové charakteristiky má kvadratický průběh v I. a III. kvadrantu. Ztrátový výkon P_z má tvar křivky třetího stupně. To je charakteristické pro ventilátory, kompresory, dmychadla, odstředivá čerpadla a vývěvy.

Pracovní mechanismus je určen mechanickou charakteristikou. Pro jejich matematický popis se používá obecný výraz pro pasivní zátěžný moment. [4]



Obrázek 4-7: ventilátorová charakteristika



$$M_z = a + \operatorname{sgn} \cdot \varpi \cdot \sum_{i=1}^n b_i \cdot |\varpi|^{k_i} \quad (4.1)$$

a; b_i; k_i; n – konstanty

$$M_z = \operatorname{sgn} \cdot \varpi \cdot b_2 \cdot |\varpi|^2 \quad (4.2)$$

a=0; k_i=2

$$P_z = M_z \cdot \varpi = \operatorname{sgn} \cdot \varpi \cdot b_2 \cdot |\varpi|^2 \cdot \varpi \quad (4.3)$$

4.7 Ventilační výpočet

Chlazení stroje se zabývá odvodem tepla z tepelně namáhaných částí elektrického stroje. Špatně navržené chlazení stroje pak povede k přehřívání určitých částí motoru. Při řešení ventilačního výpočtu stroje vycházíme ze dvou základních kroků. Důležitými údaji jsou:

- 1) Výpočet množství vzduchu, potřebné pro odvod tepla.
- 2) Tlak, který musí ventilátor vytvořit na protlačovaný vzduch.

Množství vzduchu, které slouží k chlazení motoru je dáno rovnicí:

$$Q_v = \frac{\Delta P_v}{c_v \vartheta_v} \quad [m^3 \cdot s^{-1}] \quad (4.4)$$

ΔP_v - ztráty, které ohřívají procházející vzduch [W]

ϑ_v - rozdíl mezi teplotou vstupujícího chladiva a vystupujícího chladiva [°C]

c_v - objemové měrné teplo

$$c_v = 1290 \frac{b}{101325} \cdot \frac{273}{273 + \vartheta_{1v}} \quad (4.5)$$

b - barometrický tlak [Pa]

ϑ_{1v} - počáteční teplota chladiva [°C]

Celkové oteplení chladiva dosahuje (0,25 – 0,3) povoleného oteplení vinutí nad okolní teplotu.

Určení tlaku p_v :

$$p_v = Z_a \cdot Q_v^2 \quad [Pa] \quad (4.6)$$

p_v - tlak vytvořený ventilátorem [Pa]

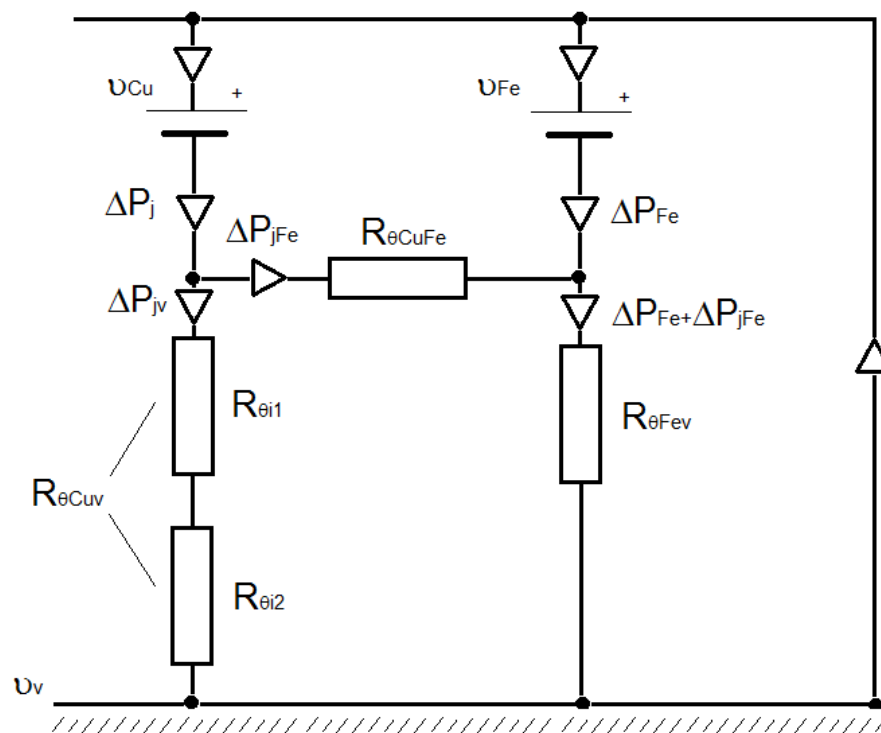
Z_a - aerodynamický odpor celé soustavy

Q_v - průtočné množství vzduchu [$m^3 \cdot s^{-1}$]

Veličina Z_a je aerodynamický odpor celé ventilační soustavy motoru. Určení tohoto odporu nám umožní určit hodnotu tlaku p_v , který vytvoří ventilátor.

Při tepelném výpočtu určíme rozdíl teplot těch částí vinutí, které jsou nejvíce tepelně namáhány a chladícího vzduchu. Je zřejmé, že magnetický obvod statoru se obvykle otepluje méně nežli vinutí. Ale musíme na tuto hodnotu brát zřetel, protože čím je jeho teplota vyšší, tím je i vyšší teplota vinutí.

Tepelné náhradní schéma na obr. 4-8 slouží jako pomůcka při určování výsledné teploty. Schéma platí pro ustálený tepelný stav.

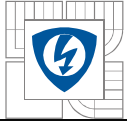


Obrázek 4-8: Zjednodušené teplotní schéma asynchronního motoru[2]

V náhradním schématu jsou znázorněny dva zdroje tepla. Prvním zdrojem tepla je vinutí statoru, kde vznikají ztráty ΔP_j a druhým zdrojem je magnetický obvod statoru. Tomu odpovídají ztráty ΔP_{Fe} .

Teplo, které vzniká ve vinutí, přechází do svého okolí. Stěnami drážek přechází do magnetického obvodu (ΔP_{jFe}). Z magnetického obvodu je teplo také sdíleno do chladícího vzduchu. Také je sdíleno do chladícího vzduchu povrchem čel vinutí (ΔP_{jv}), takže platí:

$$\Delta P_j = \Delta P_{jFe} + \Delta P_{jv} \quad (4.7)$$



Tepelný stav stroje je popsán třemi základními teplotami a tepelnými odpory:

- ϑ_{Fe} - střední teplota magnetického obvodu
- ϑ_{Cu} - střední teplota vinutí
- ϑ_v - střední teplota vzduchu uvnitř stroje
- $R_{\theta CuFe}$ - tepelný odpor mezi vinutím a magnetickým obvodem [K. W⁻¹]
- $R_{\theta Fe}$ - tepelný odpor mezi magnetickým obvodem a vzduchem [K. W⁻¹]
- $R_{\theta Cuv}$ - tepelný odpor mezi vinutím a vzduchem [K. W⁻¹]

$$R_{\theta Cuv} = R_{\theta 1} + R_{\theta 2} \quad (4.8)$$

- $R_{\theta 1}$ - tepelný odpor izolace čel [K. W⁻¹]
- $R_{\theta 2}$ - tepelný odpor přestupu tepla z povrchu izolace čel do vzduchu [K. W⁻¹]

Tepelný odpor izolace:

$$R_{\theta i} = \frac{\delta_i}{\lambda_i S_i} \quad [^{\circ}C \cdot W^{-1}] \quad (4.9)$$

- δ_i - tloušťka izolace [m]
- λ_i - tepelná vodivost izolace [W. °C⁻¹.m⁻¹]
- S_i - plocha izolace kolmá ke směru tepelného toku [m²]

Tepelné odpory $R_{\theta 12}$ a $R_{\theta Fev}$ určují tepelný odpor přestupu tepla z izolace do vzduchu.

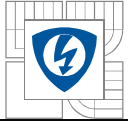
$$R_{\theta} = \frac{1}{kS} \quad [^{\circ}C \cdot W^{-1}] \quad (4.10)$$

- S - plocha izolace kolmá ke směru tepelného toku [m²]
- k - součinitel přestupu tepla [W.m⁻².°C⁻¹]

Tepelné schéma je možné popsat následující soustavou rovnic:

$$\begin{aligned} \mathcal{G}_{Cu} - \mathcal{G}_v &= \Delta P_{jv} R_{\theta Cuv} \\ \mathcal{G}_{Cu} - \mathcal{G}_{Fe} &= \Delta P_{jFe} R_{\theta CuvFe} \\ \mathcal{G}_{Fe} - \mathcal{G}_v &= (\Delta P_{Fe} + \Delta P_{jFe}) R_{\theta Fev} \end{aligned}$$

V této soustavě rovnic jsou čtyři neznámé: ϑ_{Cu} ; ϑ_{Fe} ; ΔP_{jFe} ; ΔP_{jv}



Tepelné pole každého točivého elektrického stroje je nerovnoměrně rozloženo. Je závislé na rozložení ztrát v motoru a na směru, množství a rychlosti proudícího chladiva. Fakt, že je teplotní pole stroje takto nerovnoměrně rozloženo, nás nutí uvažovat oteplení stroje pouze podle střední teploty vinutí statoru, statorového železa a vinutí rotoru.

Střední teplota vinutí je dána změnou odporu, který je měřen při průchodu stejnosměrného proudu.

$$R_{g_2} = R_{g_1} [1 + \alpha (\vartheta_1 - \vartheta_0)] \quad [\Omega] \quad (4.11)$$

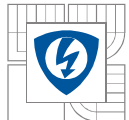
$$\vartheta_2 = \frac{R_{g_2} - R_{g_1}}{R_{g_1}} (235 + \vartheta_0) + \vartheta_1 \quad [^{\circ}\text{C}^{-1}] \quad (4.12)$$

Teplotní součinitel:

$$\alpha_{cu} = \frac{1}{(235 + \vartheta_0)} [^{\circ}\text{C}^{-1}]$$
$$\alpha_{Al} = \frac{1}{(245 + \vartheta_0)} [^{\circ}\text{C}^{-1}] \quad (4.13)$$

- R_{g_0} - odpor vinutí měřený při teplotě ϑ_0
- R_{g_1} - odpor změřený při střední teplotě vinutí ϑ_1
- α - teplotní součinitel odporu

Při určování teploty není jednoduché určit teplotu nejteplejších částí stroje. K největšímu oteplení dochází v uzavřených částech stroje, které jsou těžko dostupné.



5 KONTAKTNÍ MĚŘENÍ TEPLoty ELEKTRICKÉHO STROJE

Teplota patří mezi nejvýznamnější veličiny ovlivňující téměř veškeré stavy měřeného přístroje. Všeobecně dělíme měření teploty na dotykové a bezdotykové. V tomto případě se jedná o dotykové měření teploty. Měření proběhne dvěma způsoby, a to termočlánkem a teplotní sondou.

V tomto případě vzniká při měření teploty jistá chyba měření. Hlavním důvodem je dotyk snímače a povrchu tělesa, který způsobuje změnu sdílení tepla mezi oběma objekty a okolním prostředím. Tato skutečnost z určité části naruší i teplotní pole uvnitř tělesa. Sice je tato skutečnost ve velké většině případů zanedbatelná, ale i tak vzniká jistá odchylka hodnoty od naměřené teploty původní, která by byla na daném místě bez čidla. Pokud je teplota objektu vyšší než teplota okolního prostředí, tak vždy naměříme menší teplotu, než je skutečná teplota měřeného tělesa. Při dotykovém měření teploty povrchu tělesa jsou nevhodnější termoelektrické články, jejichž vodiče musí mít nejmenší možný průřez a malý součinitel tepelné vodivosti.

5.1 Termoelektrické senzory teploty

Termoelektrický jev byl pozorován již roku 1795, kdy se jím zabýval Alessandro Volta . Při styku dvou různých kovů vzniká mezi nimi tzv. kontaktní potenciál. Velikost potenciálu je přímo závislá na použitém materiálu. Obě látky se totiž liší svou výstupní prací a prostorovou hustotou elektronového plynu. Proto při styku přechází jedním směrem více elektronů než druhým. Tento jev je závislý také na rozdílu teplot obou ploch. Tento jev byl blíže popsán T. J. Seebeckem.

Výhody termočlánků jsou: vysoký teplotní rozsah, rychlá odezva na změnu teploty, velká odolnost proti vibracím a dlouhá životnost. Termoelektrické senzory teploty neboli termočlánky jsou tvořeny dvěma vodiči z různých kovových materiálů. Oba vodiče jsou k sobě vodivě spojeny v místě, kde probíhá měření teploty. Na druhém konci jsou vodiče rozpojeny a jsou připojeny na svorky měřícího přístroje. Na rozpojeném konci termočlánku vzniká měřitelné napětí, nazýváme ho termoelektrické napětí E_{MS} (V). Toto napětí vzniká v případě, že se teploty obou spojů liší. Vznik tohoto napětí je založen na principu zvaném Seebeckův jev.

Základní zapojení termočlánku je naznačeno na obr. 5-1 . V bodě, kde dochází ke kontaktu s měřeným povrchem je teplota t_m . Ve srovnávacím spoji vzniká termoelektrické napětí. Teplota v tomto bodě je t_0 . Pokud teplota t_m bude různá od teploty t_0 , dojde ke vzniku termoelektrického napětí.

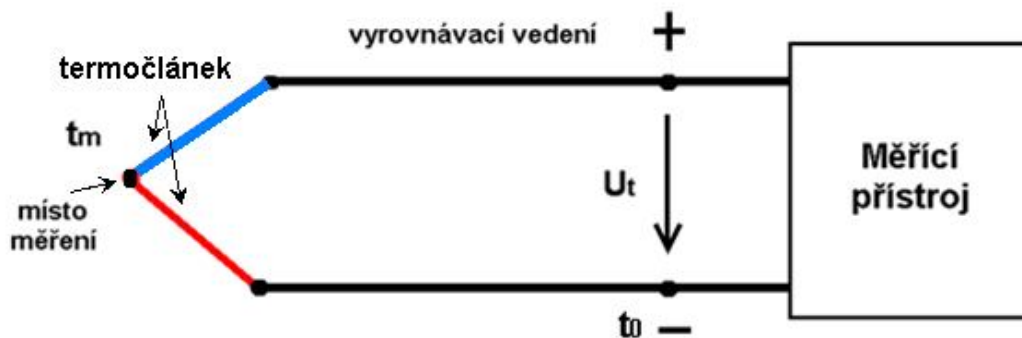
Zjednodušený vztah pro výpočet termoelektrického napětí:

$$E = \alpha_{12} \cdot t_m + \alpha_{21} \cdot t_0 = \alpha_{AB}(t_m - t_0) \quad [V] \quad (5.1)$$

- E - termoelektrické napětí [V],
A₁₂ a α₂₁ - termoelektrické konstanty [V/K], platí α₁₂ = -α₂₁
t_m - teplota měřícího spoje [K],
t₀ - teplota srovnávacího spoje [K].

Termočlánky mohou být zdrojem napětí řádově až desítek mV. Pro měření teploty je důležité zapojení článku. Vyrovňovací vedení je rozpojeno a jeho konce připojíme na svorky měřeného přístroje.

Pokud je potřeba z nějakého důvodu termočlánek prodloužit, lze použít tzv. prodlužovací vedení. To je sestaveno z vodiče téhož nominálního materiálu jako termočlánek.



Obrázek 5-1: Zapojení termočlánku

Vlivy působící na výsledek měření:

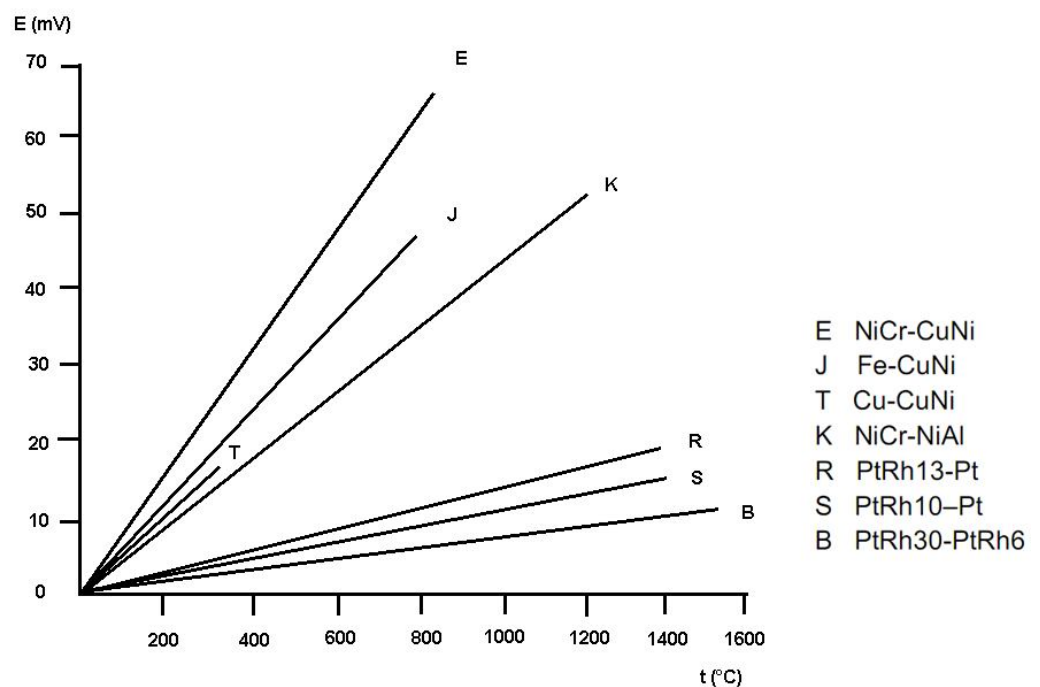
- Změna teploty ve srovnávacím spoji
- Špatný kontakt nebo špatné vedení tepla podél termočlánku
- Vliv odporu spojovacího vedení
- Velikost vnitřního odporu měřícího přístroje
- Mechanická napětí a deformace
- Prodloužení termočlánku do místa srovnávacího spoje pomocí vyrovňovacího vedení

5.2 Typy termočlánků

Materiál na výrobu termoelektrických článků musí vykazovat stabilní údaje při dlouhodobém provozu a odolnost proti chemickým a mechanickým vlivům. Termočlánky jsou rozděleny podle určitých norem. Jednotlivé dvojice vodičů tvořících termočlánek mají přiřazeny barevné a písmenné označení.

Označení	Použitý materiál	Teplotní rozsah (°C)	Barevné označení
T	Cu-CuNi	- 200 až 350	Oranžová
J	Fe-CuNi	- 200 až 750	Černá
E	NiCr-CuNi,	- 100 až 900	Hnědá
K	Ni-Cr-Ni	- 200 až 1200	Zelená
N	NiCrSi-NiSi	- 200 až 1200	Růžová
S	PtRh10-Pt	0 až 1600	Zelená
R	PtRh13-Pt	0 až 1600	Zelená
B	PtRh30-PtRh6	300 až 1700	Šedá

Tabulka 2: Typy termočlánků



Obrázek 5-2: Charakteristiky vybraných typů termočlánků[6]

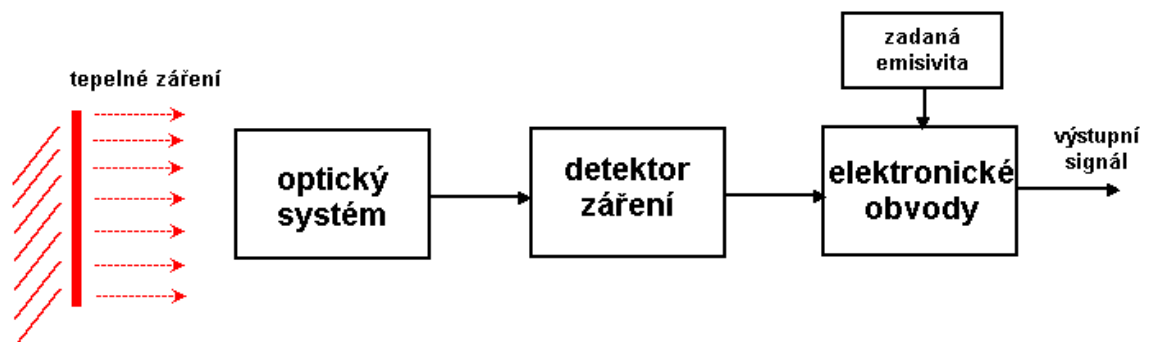
6 BEZKONTAKTNÍ MĚŘENÍ TEPLoty

Bezdotykové měření teploty patří mezi jednoduché a v podstatě přesné způsoby měření teploty. Přístroje pro bezdotykové měření teploty dosáhly v posledních letech značného pokroku. Značný podíl na tom má pokrok v optice a elektronice. Původním využitím tzv. radiačních pyrometrů (teploměrů) bylo měření vyšších teplot. Dnes je možné měřit i teploty pod bodem mrazu. Proto je dnes tento druh měření hojně využíván v potravinářství, elektronice, papírnictví atd.

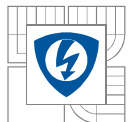
Metoda vychází z fyzikálního poznatku, že každé těleso o povrchové teplotě vyšší než 0K vysílá elektromagnetické záření, které odpovídá dané teplotě tělesa.

Výhody bezdotykového měření teploty:

- Měřicí technika má zanedbatelný vliv na měřený objekt – to znamená, že není narušeno teplotní pole objektu.
- Přístroj je schopen měřit i velmi rychlé změny teplot.
- Schopnost měření vysokých teplot (až 3000°C).
- Možnost měřit i pohybující se tělesa z bezpečné vzdálenosti.
- Možnost digitálního zpracování teploty celého povrchu tělesa.



Obrázek 6-1: Blokové schéma bezdotykového měřicího systému



6.1 Emisivita

Emisivita vyjadřuje poměr vyzařované energie měřeným objektem při jeho teplotě k energii vyzařované ideálně černým tělesem při stejné teplotě.

$$\varepsilon = \frac{q}{q_0} \quad [-] \quad (6.1)$$

ε - emisivita [-]

q - celkový zářivý tok [W]

q_0 - tok vyzařený absolutně černým tělesem [W]

Emisivita ε je důležitým faktorem, který se při měření nesmí zanedbávat. Závisí na materiálu a úpravě povrchu. K emisivitě se vztahuje též odrazivost materiálu ρ (schopnost odrazet záření) a prostupnost τ (schopnost propouštět záření).

$$\varepsilon + \rho + \tau = 1$$

Absolutně černé těleso	1,00
Černý matový lak	0,99
Zoxidovaný ocelový plech	0,75
Zoxidovaný hliník	0,55
Lesklý ocelový plech	0,25

Tabulka 3: Emisivita pro určité materiály

Platí, že objekt, který má vyšší emisivitu, tak se snadněji dopravujeme přesnější hodnotě měřenou infračerveným teploměrem. Objekty s emisivitou pod hodnotou 0,2 jsou obtížně měřitelné. U materiálů s velmi vysokou odrazivostí v infračervené oblasti je přesné měření téměř vyloučené.

Chyba způsobená špatným určením emisivity patří mezi nejčastější chyby při bezdotykovém měření. Abychom tuto chybu co nejvíce eliminovali, můžeme si vybrat vhodnou metodu pro nastavení emisivity.

- Vyhledat hodnotu emisivity v tabulkách materiálů
- Ohřejeme vzorek na známou teplotu a hodnotu emisivity pak podle ní upravíme
- Použití speciálních materiálů nebo nátěrů o známé emisivitě
- Využití pyrometru s dotykovou sondou

6.2 Termokamera

Termokamera patří mezi účinné a rychlé snímače teplotních polí. Jde o zjišťování teplotních polí na povrchu měřeného materiálu pomocí měření intenzity infračerveného záření. Elektronická soustava kamery je schopná tuto energii zaznamenat měřicím systémem a pomocí infračerveného detektoru ji převede ji na elektrický signál. Je možné měřit i vzdálenější a nepřístupné povrchy a elektrická zařízení v provozu nebo pod napětím. Termografické měření je navíc schopno zaznamenat mnohem rychleji teplotní změny než kontaktní měření.

Pomocí termokamery docílíme snímání teplotních polí v širším měřítku. Jde o metodu, díky které dostaneme 2D obraz měřeného objektu s rozložením oteplení jeho jednotlivých částí. Pomocí softwaru, který je schopen vyhodnotit jednotlivé body na snímku, dostaneme hodnotu teplot požadovaných bodů. Termovize nám usnadňuje pohled na celkové rozložení tepelného pole. Zjistí, které části jsou nejvíce tepelně namáhány nebo kde dochází k únikům tepla. Termokamery jsou úspěšně využívány při zjišťování úniku tepla v obytných stavbách. Nastavení emisivity je zde stejně důležité jako u jiných bezdotykových teploměrů. Je k němu nutná znalost stavební fyziky, ale i zákonitostí šíření infračerveného záření a emisivity jednotlivých materiálů. Zejména emisivita může značně ovlivnit vzhled termogramu a výrazné rozdíly v zobrazované teplotě.



Obrázek 6-2: Termokamera[4]

7 MĚŘENÍ TEPLoty NA ASYNCHRONNÍM MOTORU

Měření oteplení stroje bylo pro porovnání provedeno třemi různými způsoby: Jedním teplotním čidlem NTC 640-10K, dvěma termočlánky a termokamerou. Termočlánek T1 (1) a NTC (3) čidlo jsou umístěny na čelo motoru a termočlánek T2 (2) na hřbet motoru. Hodnoty jsou odečítány po 1 min a snímky kamerou každých 5 minut.

Parametry asynchronního motoru:

$$P=1,1\text{kW}$$

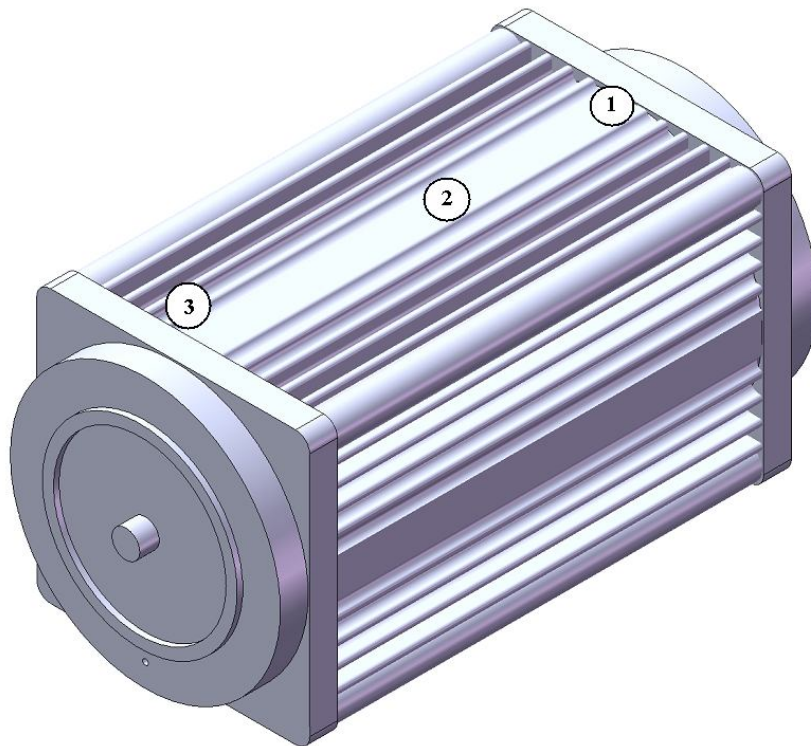
$$I=2,4\text{A}$$

$$U=400\text{V}$$

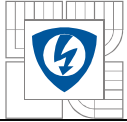
$$\cos \varphi=0,87$$

$$n=2845 \text{ ot. min}^{-1}$$

$$\mu=0,77$$



Obrázek 7-1: Umístění teplotních čidel



7.1 NTC termistor a termočlánek

Jde o termistor se záporným teplotním součinitelem odporu. Takže s rostoucí teplotou klesá jeho rezistivita.

Při přepočítání naměřeného odporu na teplotu musíme znát typ teplotního čidla a jeho barevný kód. Ten určuje velikost referenčního odporu. Jde o hodnotu odporu čidla při teplotě 25°C (R_{25}). Tuto hodnotu použijeme při výpočtech.

$$B_{25/85} = 2990 \text{ K}$$

$$T = \left(A_1 + B_1 \cdot \ln \frac{R}{R_{25}} + C_1 \cdot \ln^2 \frac{R}{R_{25}} + D_1 \cdot \ln^3 \frac{R}{R_{25}} \right)^{-1} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (7.1)$$

Konstanty:

$$R_{25} = 10 \Omega$$

$$A_1 = 3,354016 \cdot 10^{-3}$$

$$B_1 = 3,415560 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$$

$$C_1 = 1,955455 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-2}$$

$$D_1 = 4,364236 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-3}$$

Příklad výpočtu s dosazením do vztahu (7.1):

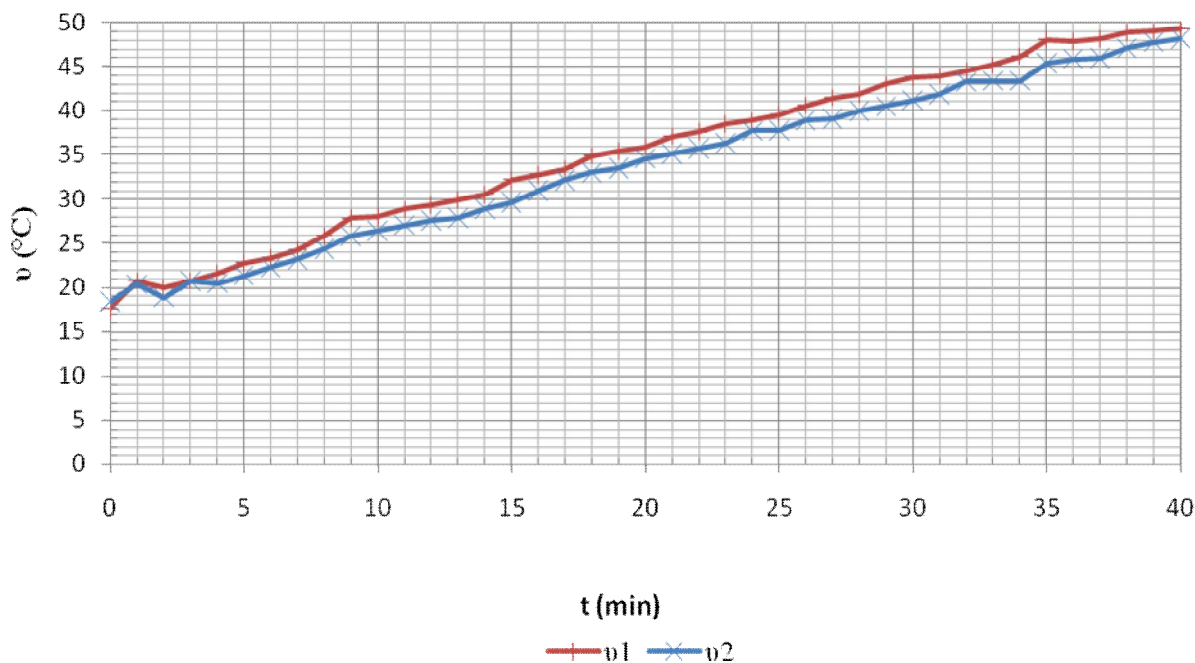
$$R = 5,16 \Omega$$

$$T = \left(3,35 \cdot 10^{-3} + 3,41 \cdot 10^{-4} \cdot \ln \frac{5,16}{10} + 1,96 \cdot 10^{-6} \cdot \ln^2 \frac{5,16}{10} + 4,36 \cdot 10^{-7} \cdot \ln^3 \frac{5,16}{10} \right)^{-1}$$

$$\underline{\underline{T = 46,3^{\circ}\text{C}}}$$

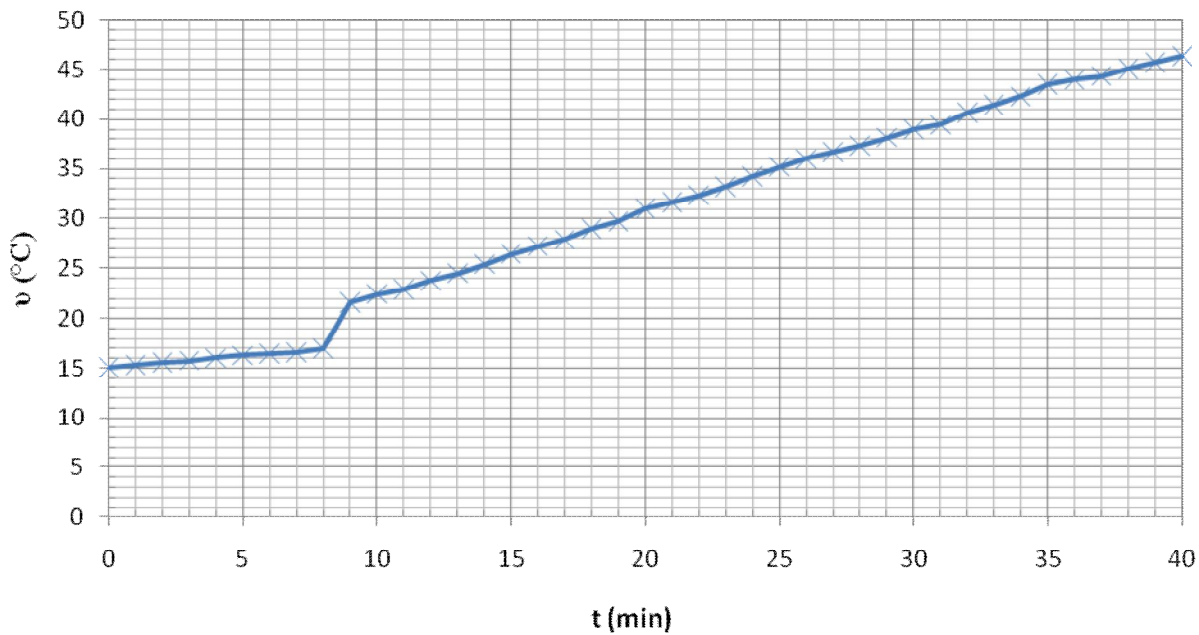
Jak vidíme na výsledných grafech, je mezi naměřenými hodnotami jistý rozdíl. Ten je dán rozdílným osazením stroje teplotními senzory. Termistor NTC byl umístěn na přední čelo a termočlánek 1 na zadní čelo motoru. Na těchto místech je naměřena nejvyšší teplota. Druhý termočlánek umístěný uprostřed zaznamenal nejnižší teplotu.

Termočlánky



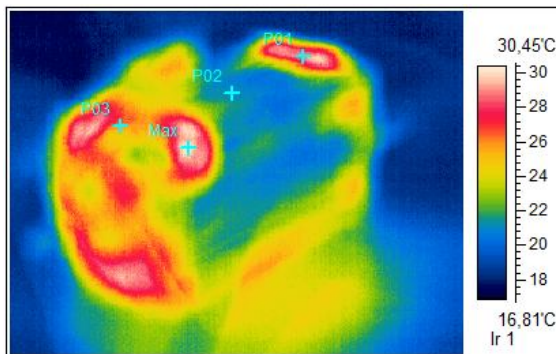
Obrázek 7-2: Graf teploty naměřené termočlánky

NTC termistor



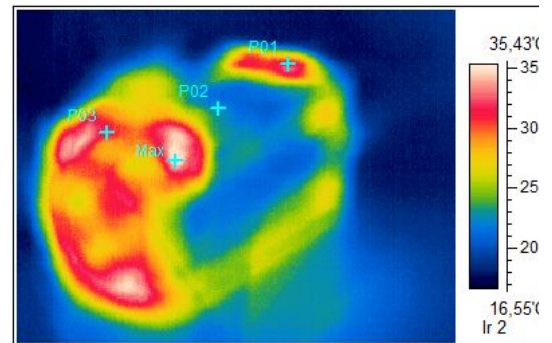
Obrázek 7-3: Graf teploty naměřené NTC termistorem

7.2 Měření termokamerou



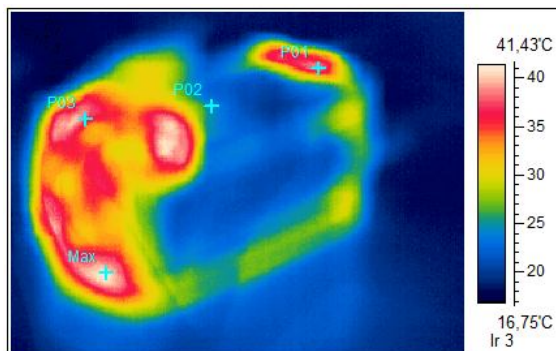
Label	Value
P01:Temp	29,04
P01:ems	0,58
P02:Temp	21,36
P02:ems	0,58
P03:Temp	26,19
P03:ems	0,58
Max:Temp	30,45
Max:ems	0,58

Obrázek 7-4: Teplotní pole po 10min



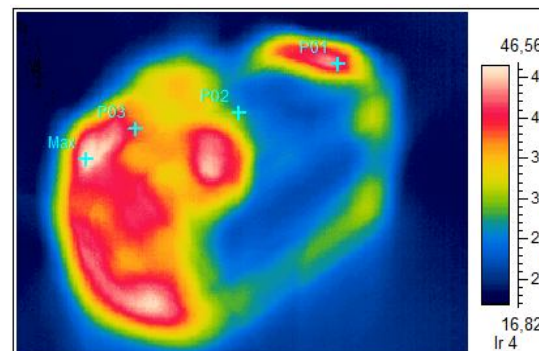
Label	Value
P01:Temp	32,4
P01:ems	0,58
P02:Temp	22,81
P02:ems	0,58
P03:Temp	30,85
P03:ems	0,58
Max:Temp	35,43
Max:ems	0,58

Obrázek 7-5: Teplotní pole po 15min



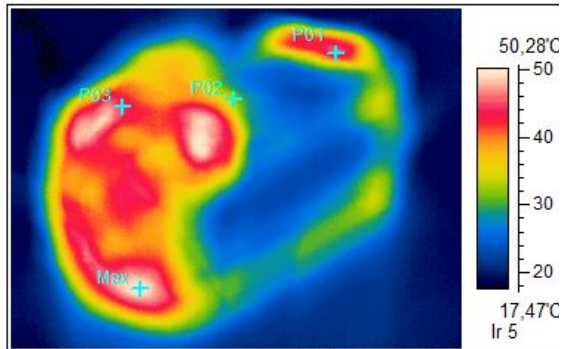
Label	Value
P01:Temp	38,27
P01:ems	0,58
P02:Temp	24,63
P02:ems	0,58
P03:Temp	37,68
P03:ems	0,58
Max:Temp	41,43
Max:ems	0,58

Obrázek 7-6: Teplotní pole po 20min



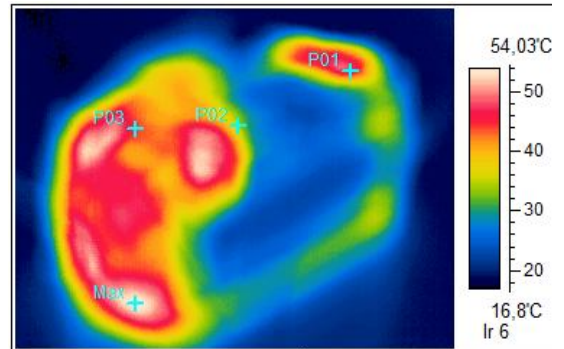
Label	Value
P01:Temp	42,03
P01:ems	0,58
P02:Temp	28,56
P02:ems	0,58
P03:Temp	39,42
P03:ems	0,58
Max:Temp	46,56
Max:ems	0,58

Obrázek 7-7: Teplotní pole po 25min



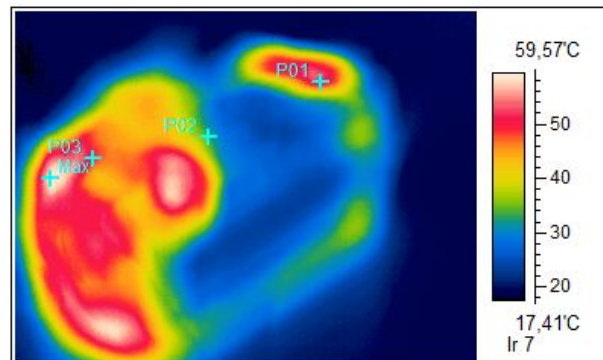
Label	Value
P01:Temp	45,49
P01:ems	0,58
P02:Temp	33,97
P02:ems	0,58
P03:Temp	45,3
P03:ems	0,58
Max:Temp	50,28
Max:ems	0,58

Obrázek 7-8: Teplotní pole po 30min



Label	Value
P01:Temp	47,4
P01:ems	0,58
P02:Temp	36,52
P02:ems	0,58
P03:Temp	45,66
P03:ems	0,58
Max:Temp	54,03
Max:ems	0,58

Obrázek 7-9: Teplotní pole po 35min

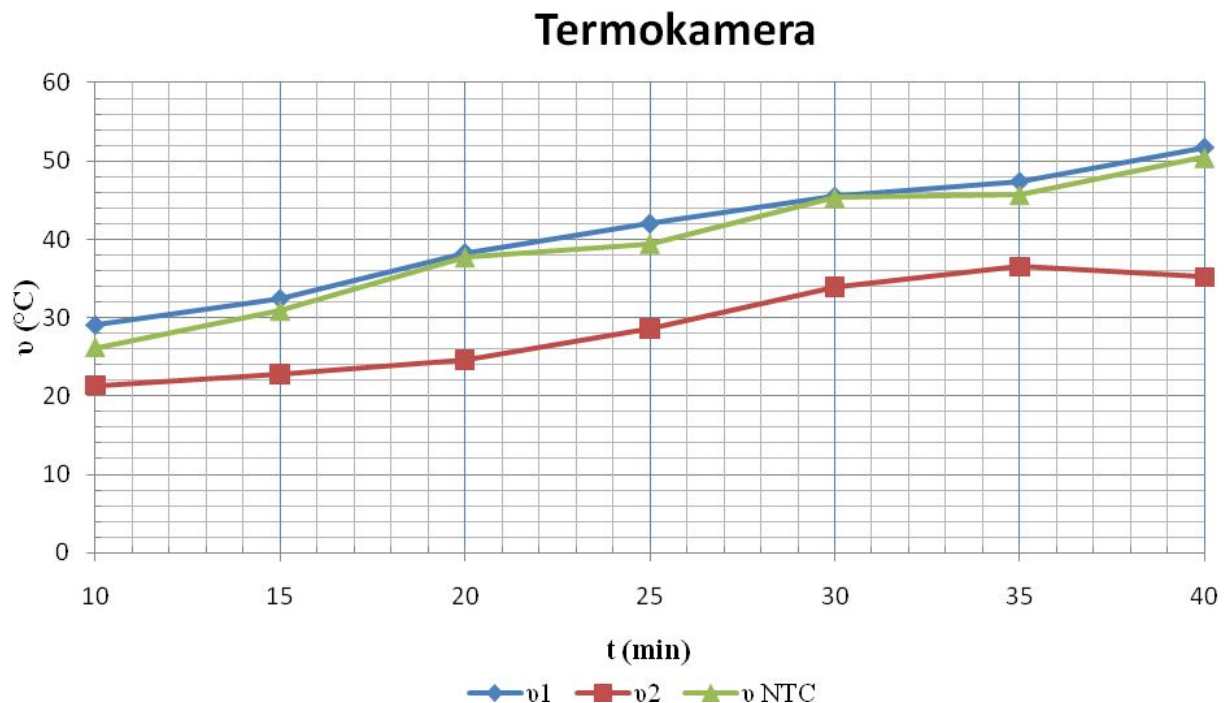


Label	Value
P01:Temp	51,76
P01:ems	0,58
P02:Temp	35,19
P02:ems	0,58
P03:Temp	50,45
P03:ems	0,58
Max:Temp	59,57
Max:ems	0,58

Obrázek 7-10: Teplotní pole po 40min

t	v₁	v₂	v_{NTC}
[min]	[°C]	[°C]	[°C]
10	29,04	21,36	26,19
15	32,4	22,81	30,85
20	38,27	24,63	37,68
25	42,03	28,56	39,42
30	45,49	33,97	45,30
35	47,4	36,52	45,66
40	51,76	35,19	50,45

Tabulka 4: Data naměřená termokamerou



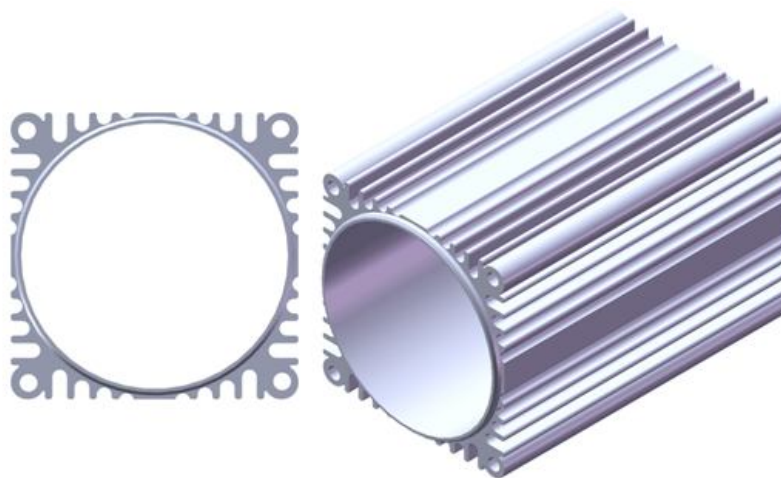
Obrázek 7-11: Průběh oteplení měřený termokamerou

Měření termokamerou se uskutečnilo vždy po 5 min. Snímek v čase $t = 0\text{min}$ a $t = 5\text{min}$ zde nejsou zobrazeny, protože při snímání došlo k chybě a nasnímaná pole nemohla být následně vyhodnocena. K upravení a vyhodnocení snímků bylo provedeno v příslušném softwaru SATReport 2003. Emisivita byla nastavena na hodnotu 0,58. Pro lesklý povrch motoru je toto měření méně přesné. Posloužilo k orientačnímu náhledu a k porovnání s ostatními metodami měření.

8 TVORBA MODELU ASYNCHRONNÍHO MOTORU

Model asynchronního motoru je vytvořen v programu Autodesk Inventor Professional. Umožní nám namodelovat jednotlivé komponenty, které ve výsledku zkompletujeme.

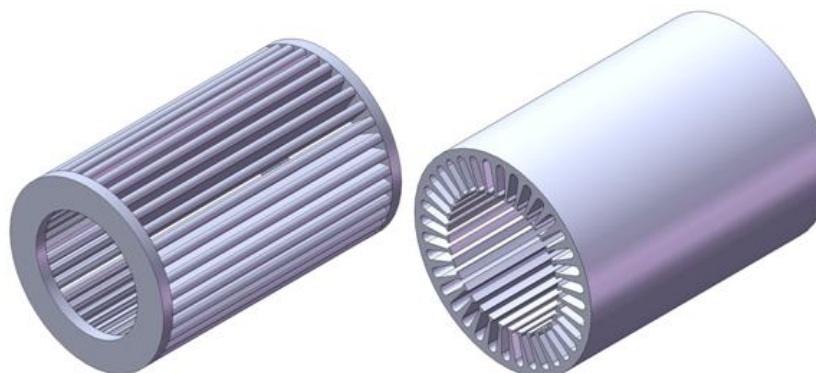
Při návrhu klademe důraz na ty části motoru, jež mají pro simulaci oteplení nejdůležitější význam. Jednotlivé součásti kreslíme s co největší přesností, ale kvůli jednoduchosti simulace je stejně důležité některé části motoru vynechat. Jedná se hlavně o části, které se významným způsobem nepodílejí na oteplení nebo nezasahují do systému chlazení stroje. Je důležité vyvarovat se drobným vzduchovým mezerám, nerovnostem materiálu a nepodstatným zaoblením, které jsou problematické při tvorbě sítě konečných prvků.



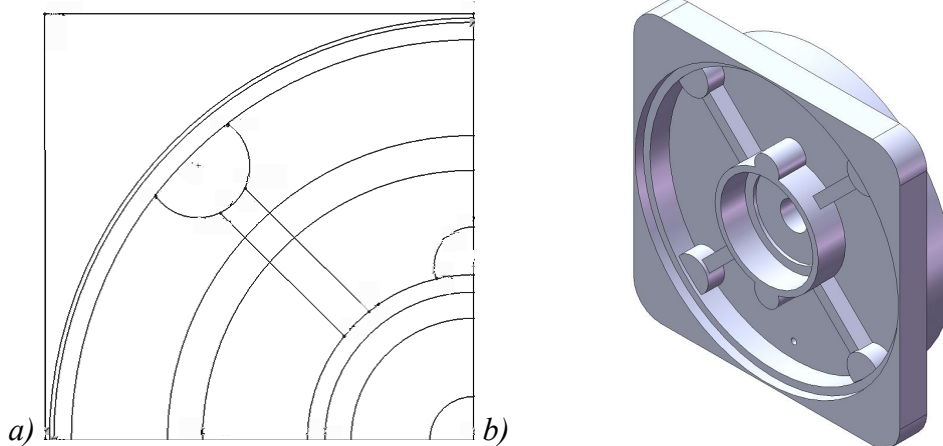
Obrázek 8-1: Tělo motoru s charakteristickým mřížkováním

Jednotlivé díly pečlivě přeměříme a vytvoříme jejich geometrický model. Prvním krokem je náčrt součásti neboli náčrt.

V roletovém menu programu si zvolíme modelování součásti. Inventor nám umožní vytvořit skicu náčrtu s názvem Náčrt1. Zde nakreslíme profil součásti. Na obr. 8-1 je vidět, že mřížkový chladicí systém je poměrně složitý, a jeho celkový náčrt by byl zdlouhavý, proto si vytvoříme pouze čtvrtinu náčrtu (Obrázek 8-2), kterou následně použijeme k vytvoření kompletního náčrtu.



Obrázek 8-2: Klecové vinutí a stator



Obrázek 8-3: a) Nákres čtvrtiny čela motoru b) Kompletní čelo motoru

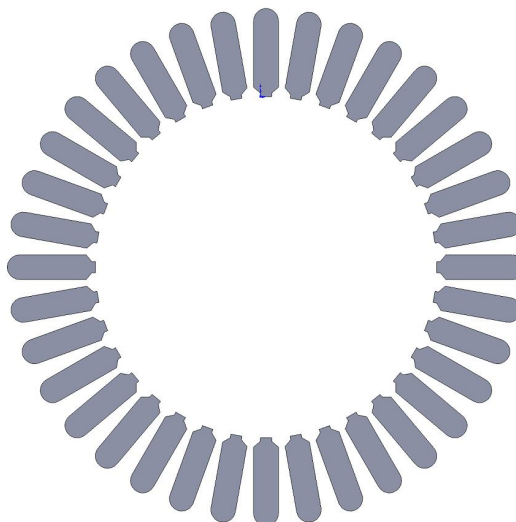
Vysunutí:

Po pečlivém zhotovení náčrtu přichází na řadu fáze “vysunutí“. V tomto kroku vytvoříme z 2D náčrtu kompletní 3D model příslušné komponenty.

Náčrt ukončíme tlačítkem Náčrt nebo Dokončit náčrt. Pro vznik 3D modelu tedy použijeme funkci Vysunout. Tuto funkci můžeme aplikovat na jednotlivé ohraničené plochy náčrtu. Je zde možnost široké škály nastavení. Je možnost vytvořit objemový díl nebo pouze plochy součástí. Ze třech tlačítek si můžeme vybrat možnost vysunutí, odřezání a průniku. Během nastavování požadovaných vlastností vysunutí Inventor zobrazuje, jak bude výsledný model vypadat. Pomocí této funkce je vytvořena většina tvarů a součástí výsledné geometrie modelu.

Zrcadlení prvku:

Funkci Zrcadlit prvek nalezneme v panelu Prvky – součásti. Zvolíme si požadovanou část objektu pro zrcadlení. Následně určíme rovinu pro zrcadlení a provedeme příkaz.

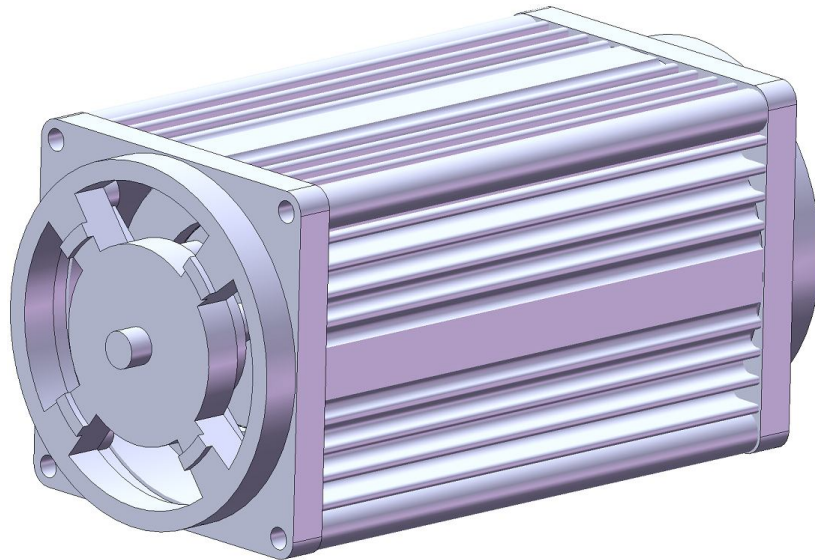


Obrázek 8-4: Kruhové pole prvků (statorové vinutí)

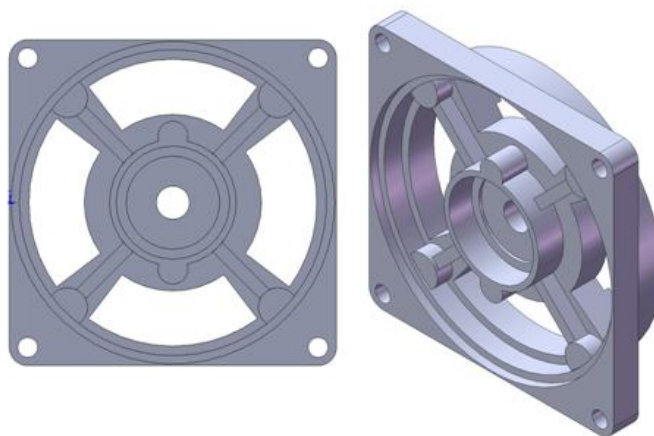
8.1 Návrh chlazení stroje

Asynchronní motor, který byl zvolen pro měření teplotních polí a simulaci oteplení, využívá k chlazení svých součástí přirozeného proudění vzduchu. Tělo motoru je pravidelně drážkované, čímž je dosaženo větší plochy pro odvod tepla z povrchu stroje. Motor je celkově uzavřen. Výhodou původního řešení je ochrana před případnou vlhkostí nebo usazováním prachu na vnitřních součástech stroje. Hermetické uzavření stroje má tu nevýhodu, že vzduch obsažený ve vnitřním prostoru stroje neslouží k odvodu tepla mimo tělo stroje. Slouží k přenosu tepla mezi vnitřními součástmi motoru, ale na chlazení se podílí jen malým dílem.

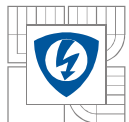
Zdroj vznikajícího tepla je tam, kde vznikají elektrické ztráty. V tomto případě je hlavním zdrojem ztrát satorové vinutí. V původním řešení je teplo odváděno pouze kovovým tělem motoru. Po vytvoření průduchů v čelech stroje bude umožněna cirkulace vzduchu mezi vnitřními částmi motoru.



Obrázek 8-5: Model stroje s modifikovaným chlazením



Obrázek 8-6: Upravená čela motoru



9 TEPLOTNÍ SIMULACE V PROGRAMU ANSYS WORKBENCH

Teplotní analýza, kterou při simulaci využijeme, slouží k určování teploty při ustálených nebo časově proměnných dějích. Možnosti nastavení jsou například tepelné ztráty, oteplení, gradient a tepelný tok. Teplotní analýzou je možné řešit tuhnutí nebo tavení materiálu, vnitřní zdroje tepla. Například Jouleovo teplo, které vzniká v důsledku průchodu elektrického proudu. Je zde řada nastavení možností šíření tepla (vedení-kondukcce, proudění-konvekce, záření-radiace).

9.1 Meshování - Metoda konečných prvků (MKP)

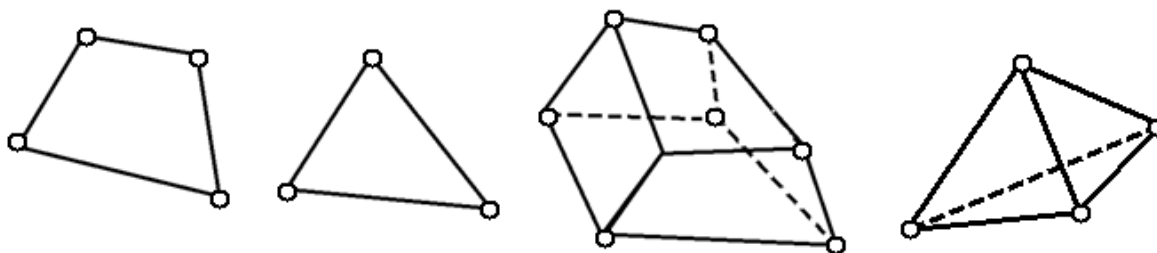
FEM – Finite Element Method. Jedná se o metodu, jejíž vznik se datuje od roku 1906. Šlo o nahrazení tělesa soustavou elastických prutů. Tento model se postupem času rozvinul do metody analýzy struktur. V roce 1953 byla rovnice tuhosti vyjádřena v maticovém tvaru. To umožnilo řešení problému na počítači. Největší rozvoj FEM zaznamenala v leteckém průmyslu. Během 60. a 70. let začaly nastupovat širší aplikace v různých průmyslových odvětvích.

Metoda konečných prvků je numerická metoda, která neúspěšně využívá pro řešení analýzy struktur a těles. FEM zahrnuje široký rozsah fyzikálních aplikací, které nelze řešit jinými klasickými postupy. Metoda slouží například k simulacím, které spadají do fyzikálních odvětví, jako jsou: statika, dynamika, akustika, teplo, elektromagnetické pole, elektrostatika a proudění. Simulace průběhů různých deformací, napětí, proudění tepla a tekutin, magnetismu a jiných jevů. K řešení se využívá výpočetní techniky.

Diskretizace

Princip, na kterém je metoda FEM založena, je diskretizace nebo také rozdělení řešeného tělesa a malé prvky. Tyto části tělesa jsou matematicky snadněji popsatelné. Základní prvky jsou rozděleny podle tvaru do následujících skupin:

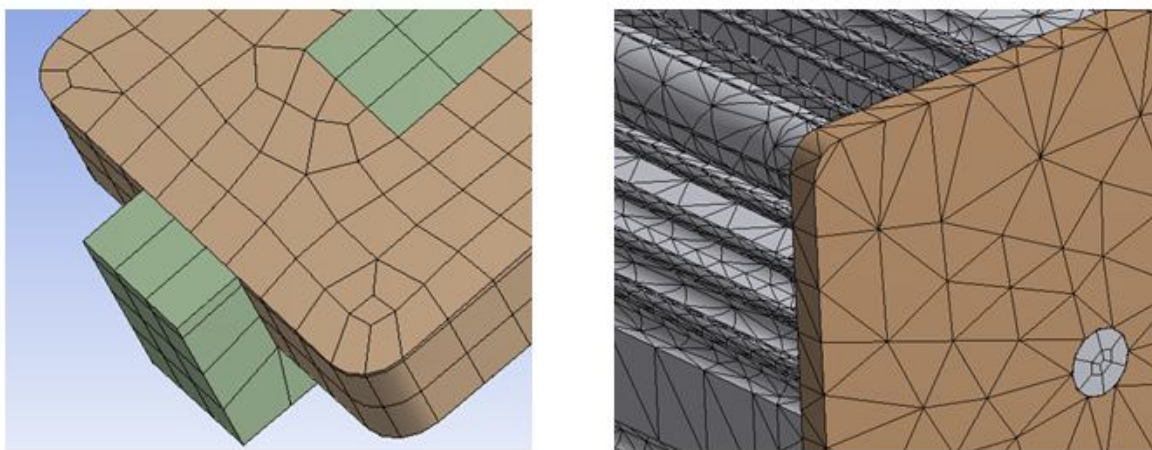
- 2D prvky (trojúhelník, čtyřúhelník)
- 3D prvky (čtyřstěn, šestistěn)
- Prutové
- Skořepinové
- Deskostěnové



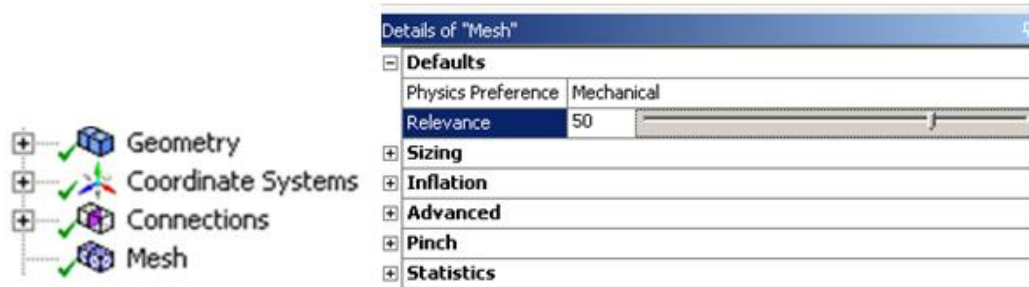
Obrázek 9-1: Příklad rovinných a prostorových elementů

V počítačovém programu se vytvoří geometrický model řešeného tělesa, který je rozdělen do sítě prvků konečných rozměrů. Celkový model je složen z jednotlivých elementů. Tyto elementy jsou definovány několika uzly a v celku tvoří část řešené části modelu. V rovině je základním prvkem čtyřúhelník, naopak v prostoru je to šestistěn. V některých případech je nutné použít i trojúhelník, čtyřstěn nebo pětistěn. Rohy elementů se nazývají uzlovými body. V těchto bodech jsou určovány neznámé požadované hodnoty. Hrany těchto prvků jsou ve většině případů rovné, ale v jistých řešeních je možné realizovat jejich zakřivení. Tím dostaneme větší počet uzlových bodů a přesnější výsledek simulace.

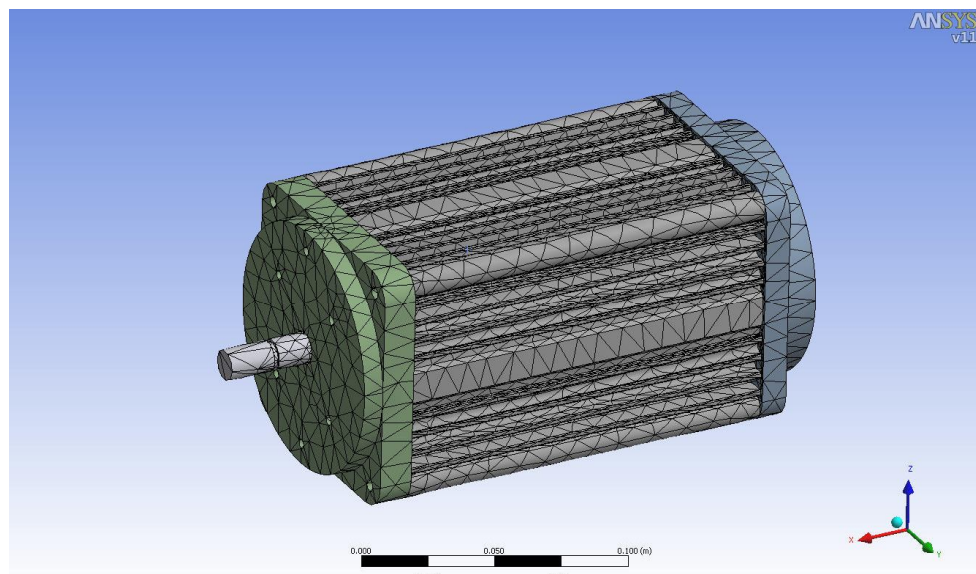
Elementy a jim přiřazené uzly bývají v členitých oblastech rozloženy rovnoměrně, ale v případě záhybů a prudkých změn geometrie sledují její tvar a tím pádem se zvýší i hustota počítaných elementů.



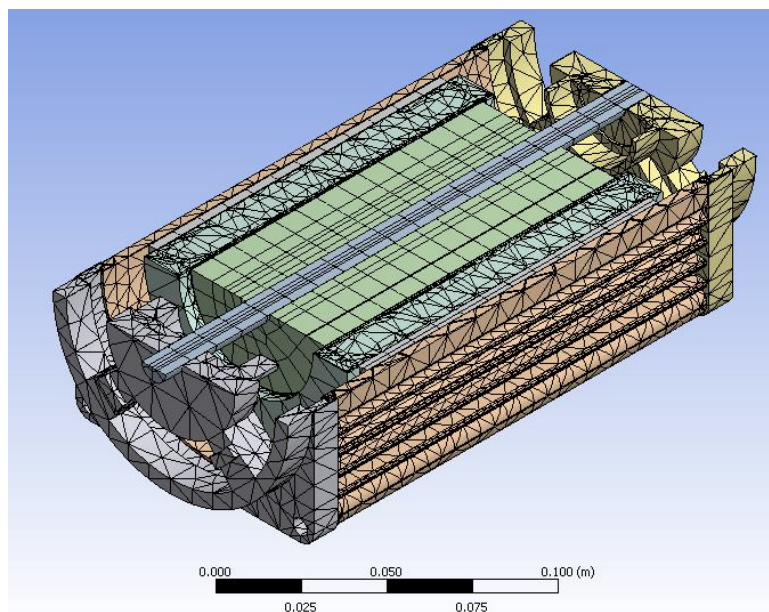
Obrázek 9-2: Síť elementů po meshování



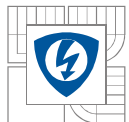
Obrázek 9-3: Nastavení vlastností meshování



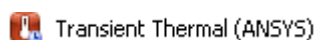
Obrázek 9-4: Síť prvků původního modelu



Obrázek 9-5: Síť prvků po úpravě čel stroje



9.2 Přejchodová teplotní analýza



Analýzu tohoto typu je využívána při určení teploty a tepelného množství, jenž se mění v čase. Změna teploty v čase a její rozložení v simulovaném objektu je důležitá pro návrh chlazení důležitých součástí strojů. Získáváme tím poznatky o teplotním namáhání jednotlivých součástí v reálném čase. V těchto případech je teplotní analýza a její výsledky využita jako důležitý údaj pro strukturální analýzu tepelného namáhání. Přejchodová teplotní analýza zahrnuje veškeré materiálové vlastnosti jako je tepelná vodivost, tepelná kapacita, hustota materiálu. Zahrnuty jsou i koeficienty vedení tepla a tepelné záření.

Parametry asynchronního motoru:

$P=1,1\text{kW}$	$I=2,4\text{A}$
$U=400\text{V}$	$\cos \varphi=0,87$
$n=2845\text{ ot. min}^{-1}$	$\mu=0,77$

Ztráty:

$\Delta P_{\text{mech}}=53\text{W}$	$\Delta P_{\text{Fe}}=105\text{W}$
$\Delta P_{j1}=160$	$\Delta P_d=16\text{W}$
$\Delta P_{j2}=65\text{W}$	

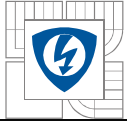
Každé součásti je přiřazen materiál s určitými vlastnostmi. Materiály použité při analýze jsou: Vzduch, Měď, Ocel, Železo, Hliník, Šedá litina


Při tepelné simulaci jsou pro nás důležité tyto veličiny: Měrná vodivost, Měrná tepelná kapacita, Hustota

Hodnoty doplníme do vlastností materiálu v položce: Engineering Data

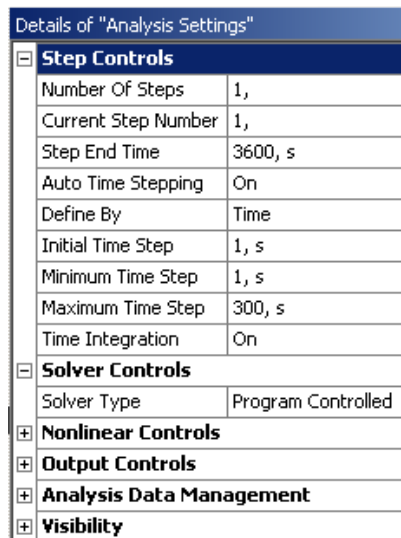
Vlastnosti materiálů	Měrná vodivost	Měrná tepelná kapacita	Hustota
	$k [\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$	$c [\text{J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}]$	$\rho [\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}]$
Vzduch	1	1	1,127
Šedá litina	52	447	7200
Měď	401	385	8300
Ocel	60,5	434	7850
Hliník -100°C; 0°C; 100°C	114; 144; 165	875	2770

Tabulka 5: Vlastnosti materiálů



Ztráty vznikající v jednotlivých součástech přiřadím funkcí  Internal Heat Generation. Tato funkce vyžaduje zadání hodnoty ztrát udávanou na jednotku objemu [$\text{W}\cdot\text{m}^{-3}$].

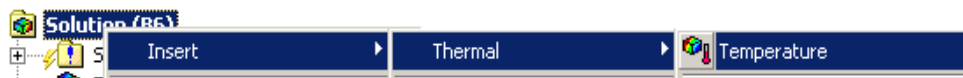
Simulace bude nastavena pro oteplování motoru po dobu 3600s, což je doba, která stačí pro ustálení teploty ve všech částech motoru. Auto Time Stepping nastavíme na On a tím si sami můžeme definovat dobu minimálního a maximálního kroku. Tím můžeme ušetřit při simulaci čas v krocích, kdy není potřeba propočítávat krátké časové úseky.



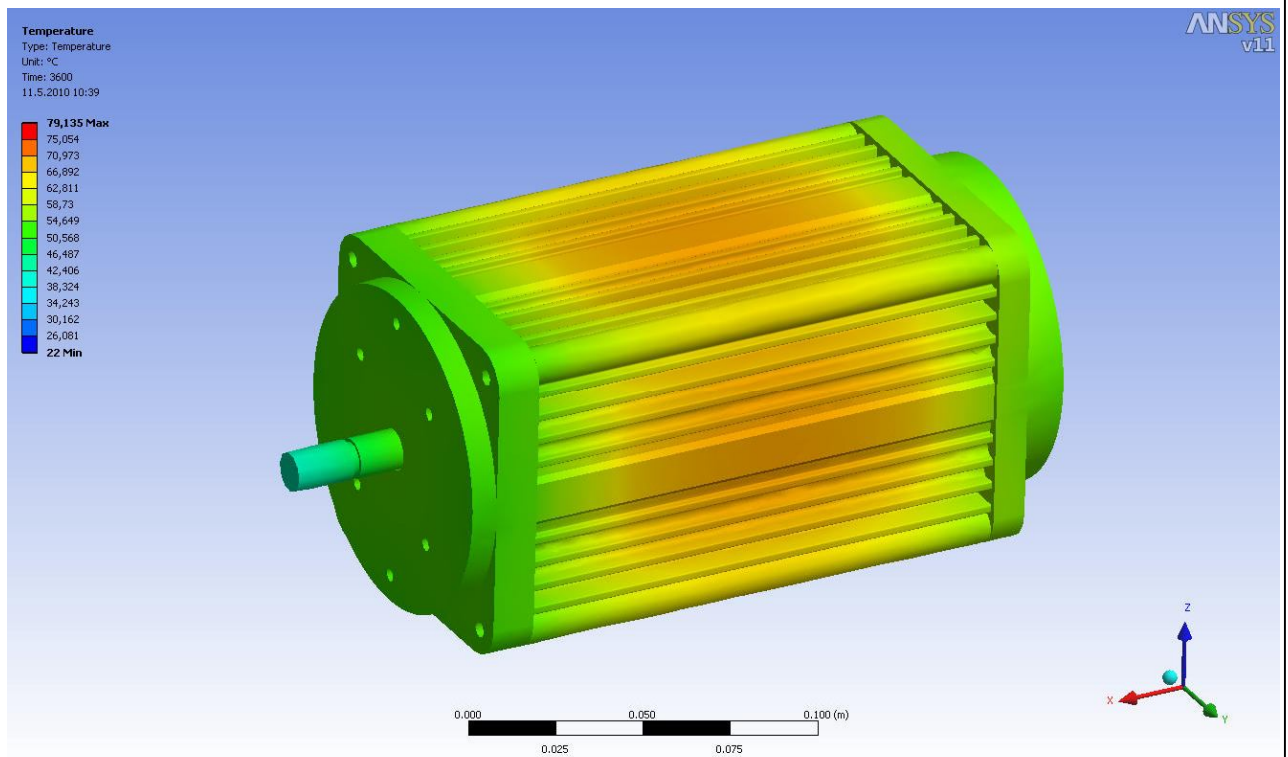
Details of "Analysis Settings"	
Step Controls	
Number Of Steps	1,
Current Step Number	1,
Step End Time	3600, s
Auto Time Stepping	On
Define By	Time
Initial Time Step	1, s
Minimum Time Step	1, s
Maximum Time Step	300, s
Time Integration	On
Solver Controls	
Solver Type	Program Controlled
Nonlinear Controls	
Output Controls	
Analysis Data Management	
Visibility	

Obrázek 9-6: Nastavení simulace

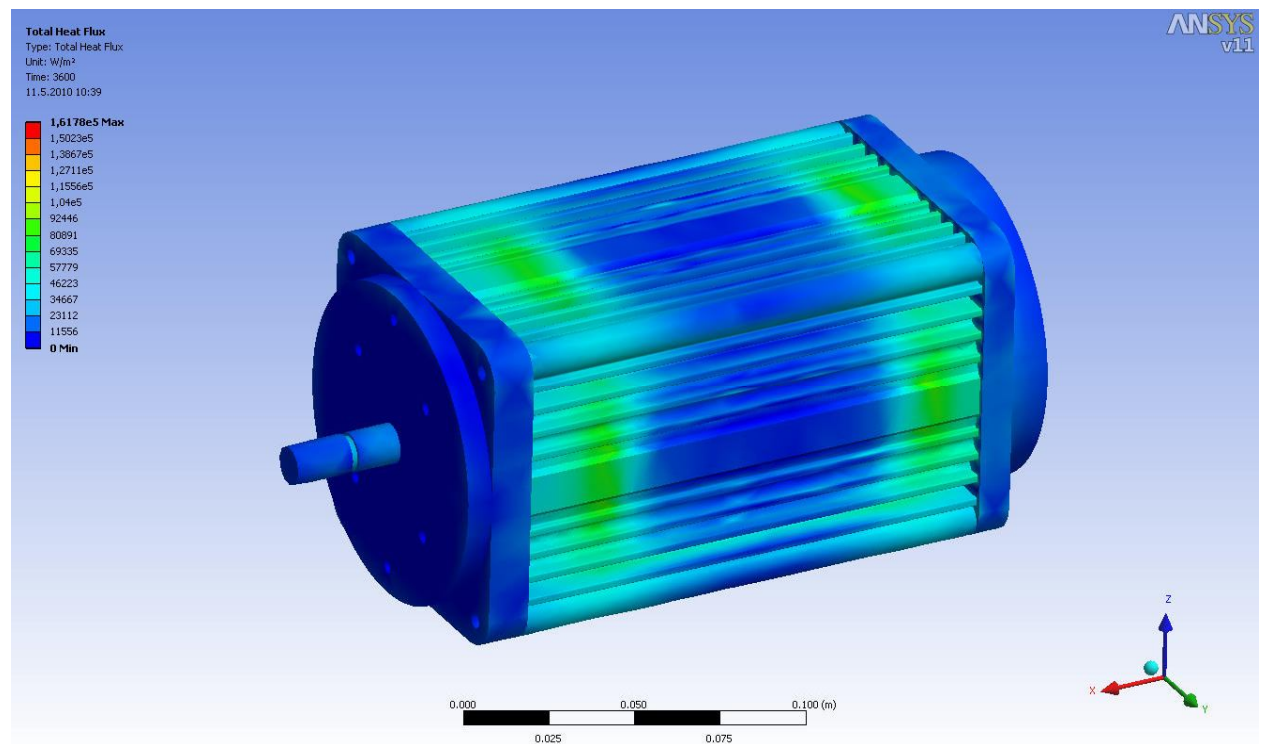
Na konci je nutné vybrat, jakým způsobem chceme řešit danou úlohu. Pro grafické řešení simulace vybereme:



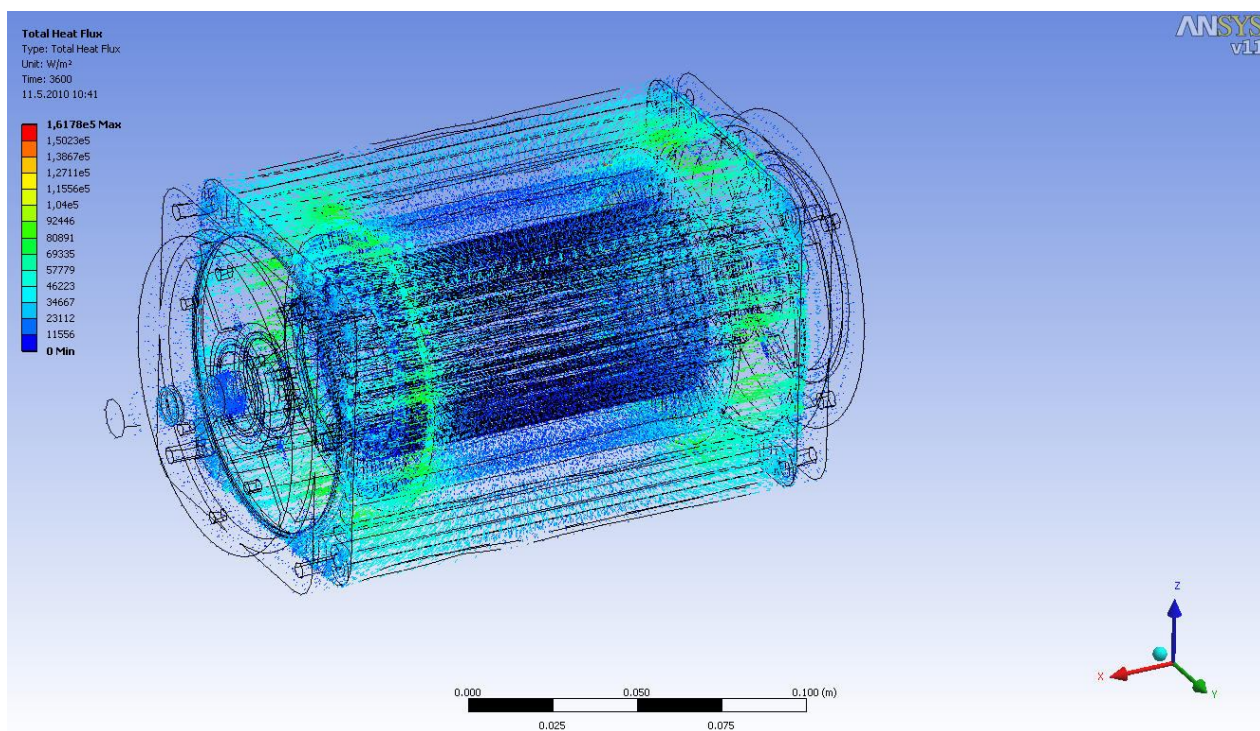
Po nastavení všech částí simulace stiskneme tlačítko Solve.



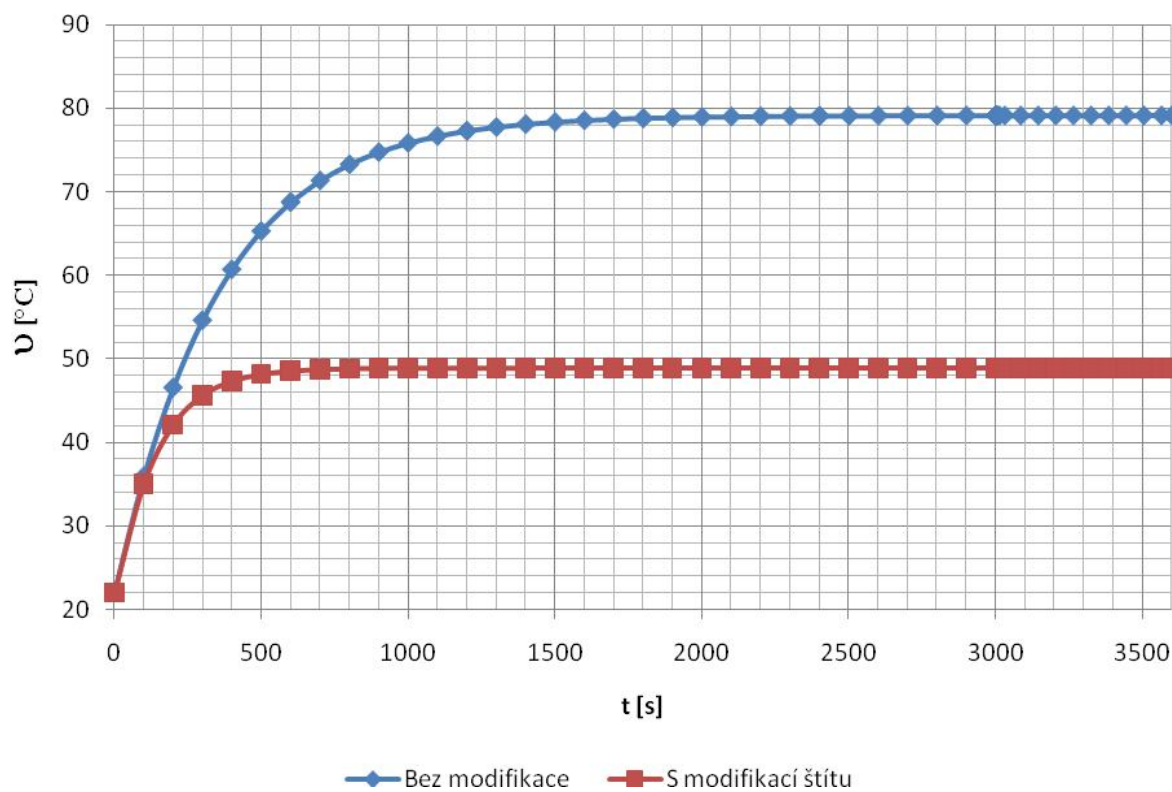
Obrázek 9-7: Rozložení tepelného pole motoru



Obrázek 9-8: Znáznornění tepelného toku



Obrázek 9-9: Vektorové zobrazení tepelného toku



Obrázek 9-10: Teplota statoru po dobu 60min



10 ZÁVĚR

Záměrem diplomové práce bylo praktické měření teplotního pole v asynchronním motoru v různých provozních stavech. Dále vytvořit geometrický model motoru a jeho součástí. Navrhnout modifikaci chlazení měřeného stroje a zanést tuto změnu do geometrického modelu stroje. V příslušném softwaru (Ansys Workbench) simulovat oteplení stroje s navrženou modifikací odvodu tepla.

Část práce je zaměřena na dotykové měření teploty pomocí odporových a polovodičových termistorů. Měření těmito senzory patří mezi nejpřesnější metody. Senzory jsou velmi citlivé na změnu teploty, teplotní rozsahy jsou ve většině případů dostačující. Důležité pro přesné měření je umístění a správné připevnění k měřenému objektu. Tady se projeví nevýhoda termistorů. Většinou je problém umístit je správně na pohybující se nebo rotující objekty. V tomto případě může dobře posloužit bezkontaktní měření pyrometry nebo termokamery. Jejich naměřená hodnota se dá považovat spíše za informační, protože při měření nám konečný výsledek ovlivňuje spousta faktorů a správné nastavení emisivity pro rozdílné povrchy a materiály.

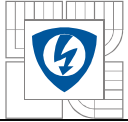
V případě měření teploty na asynchronním motoru, které bylo v rámci práce provedeno, byly zjištěny určité výchylky naměřených hodnot. Měření bylo provedeno dvěma termočládky, jedním NTC termistorem a celkový obraz teplotního pole byl snímán termokamerou. Měřený motorek je celý hermeticky uzavřen, a proto je zabráněno odvodu tepla prouděním vzduchu. Plášť motoru je vyroben z matného hliníku. Tím bylo v podstatě zajištěno dobré vedení tepla pláštěm motoru a následné vyzařování do okolního prostoru. Jelikož se jedná o asynchronní motor, předpokládají se největší ztráty ve statorovém vinutí motoru. Proto přestup tepla k povrchu pláště není obzvlášť problematický.

V prvních minutách po zapnutí napájení motoru je vidět, že teplota nijak nenarůstá. Je to zapříčiněno teplotním zpožděním, než dojde k prostupu tepla na povrch pláště. Dále je patrný strmý nárůst teploty, který trvá až do ustáleného stavu. Jak je vidět na snímcích termokamery, tepelně namáhány jsou také části čel kde je umístěna hřídel rotoru. Z naměřených hodnot se nejvíce liší hodnoty získané z NTC termistoru. Není to způsobeno tím, že by se jednalo o špatnou volbu senzoru, ale spíš o problematickou přilnavost k povrchu stroje, která způsobovala určitou chybu v měření. Měření termočládky se zde ukázalo být dobrou volbou, už z důvodu jejich přesnosti a okamžité zobrazení teploty. Použití termokamery, pro měření teplotního pole, slouží v tomto případě spíše jako informativní a poslouží ke srovnání s ostatními druhy měření. Motor se skládá z různých materiálů. Členitý povrch z leštěného hliníku je pro měření termovizní zvláště nevhodný. Na snímcích je patrný rozdíl teplot mezi tělem motoru a oběma čely. Čela stroje mají matný povrch, a proto vykazují na snímcích vyšší teplotu.

Pro simulaci teplotního pole jsem vytvořil model motoru v programu Autodesk Inventor. Motor jako takový není opatřen vzduchovou ventilací. Chlazení spočívá v proudění vzduchu podél těla motoru a vyzařováním tepla do okolí.

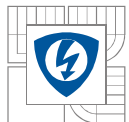
Modifikace systému chlazení je založena na možnosti přívodu vzduchu, který bude proudit do vnitřních částí stroje a přebytečné teplo odvede do okolí. Proudění vzduchu je vyvoláno nejen samovolně, ale také otáčkami rotoru. Tyto faktory přispějí k dostatečné cirkulaci vzduchu.

Pro porovnání a zhodnocení výsledku byl původní a navržený model importován do simulačního prostředí Ansys Workbench. Zde jsem oba modely podrobil teplotní analýze. Cílem bylo zjištění a porovnání tepelného namáhání části statorového vinutí. Jak vidíme na obr. 9-10 je rozdíl v oteplení velmi značný. V ustáleném stavu činí rozdíl teplot až 30°C. Průběh oteplení



získaný simulací vyneseny v grafu (obr.9-10) ukazuje hodnotu nejvíce tepelně namáhaného místa v motoru, což je v našem případě statorové vinutí. V uzavřeném motoru je teplo šířeno vedením kovovými součástmi stroje a pláštěm šířeno do svého okolí. Po úpravě čel motoru je umožněno proudění vzduchu a tím i lepší chlazení. Teplota je při tomto způsobu chlazení snížena až o 30°C.

Největším problémem simulace se stává časová náročnost výpočtů a nároky na dostatečné hardwarové vybavení počítače.



LITERATURA

- [1] KREIDL, Marcel. *Měření teploty : senzory a měřící obvody*. Praha : BEN, 2005. 240 s.
- [2] PETROV, G.N. *Elektrické stroje 2 : Asynchronní stroje - Synchronní stroje*. Marie Moravcová; Břetislav Benda. Praha : Československá akademie věd, 1982. 732 s.
- [3] *Htest* [online]. 2008 [cit. 2009-11-15]. Dostupný z WWW: <<http://www.htest.cz/index.php?produkt=460>>.
- [4] KOLÁČNÝ, Josef; HNÍZDIL, Jiří. *Elektrické pohony - Laboratoře*. Brno : VUT, 2000. 87 s.
- [5] *Industrial Pressure Blower* [online]. 2008 [cit. 2009-12-01]. Dostupný z WWW: <<http://www.tenderall.com/index.html>>.
- [6] KADLEC, K. *Měřící technika*. [s.l.] : [s.n.], 2007. 20 s.
- [7] *Asynchronní elektromotor třífázový* [online]. 2008 [cit. 2009-03-05]. Dostupný z WWW: <<http://www.emotor.cz/asynchronni-elektromotor-trifazovy.htm>>
- [8] ONDRŮŠEK, Čestmír. *Elektrické stroje*. 107 s. Vysoké učení technické v Brně. Skripta.
- [9] PATOČKA, Miroslav. *Vybrané statě z výkonové elektrotechniky: Tepelné jevy, činný výkon*. Brno, 2005. 61 s. Vysoké učení technické v Brně. Skripta.



11 PŘÍLOHY:

t	Termočlánek		NTC		
	v ₁	v ₂	R	T	v _{NTC}
[min]	[°C]	[°C]	[Ω]	[K]	[°C]
0	17,6	18,4	14,03	288,16	15,01
1	20,8	20,4	13,87	288,49	15,34
2	20,0	18,9	13,77	288,70	15,55
3	20,8	20,7	13,68	288,89	15,74
4	21,6	20,5	13,54	289,18	16,03
5	22,8	21,4	13,42	289,44	16,29
6	23,4	22,3	13,33	289,64	16,49
7	24,3	23,2	13,28	289,74	16,59
8	25,9	24,4	13,11	290,12	16,97
9	27,9	25,9	11,20	294,74	21,59
10	28,1	26,5	10,89	295,58	22,43
11	28,9	27,1	10,72	296,05	22,90
12	29,4	27,6	10,42	296,91	23,76
13	30,0	27,9	10,17	297,64	24,49
14	30,6	29,0	9,87	298,55	25,40
15	32,2	29,7	9,54	299,59	26,44
16	32,8	31,0	9,30	300,37	27,22
17	33,4	32,2	9,10	301,04	27,89
18	34,9	33,0	8,80	302,08	28,93
19	35,4	33,5	8,58	302,86	29,71
20	35,9	34,6	8,23	304,17	31,02
21	37,1	35,1	8,07	304,79	31,64
22	37,6	35,7	7,89	305,50	32,35
23	38,5	36,3	7,68	308,06	34,91
24	38,9	37,7	7,43	307,41	34,26
25	39,6	37,8	7,22	308,33	35,18
26	40,6	38,9	7,04	309,14	35,99
27	41,5	39,1	6,89	309,84	36,69
28	41,9	40,0	6,75	310,51	37,36
29	43,0	40,5	6,59	311,29	38,14
30	43,8	41,2	6,42	312,15	39,00
31	44,0	41,9	6,33	312,62	39,47
32	44,5	43,3	6,10	313,84	40,69
33	45,2	43,4	5,96	314,61	41,46
34	46,2	43,4	5,81	315,46	42,31
35	48,1	45,4	5,60	316,70	43,55
36	47,9	45,9	5,53	317,13	43,98
37	48,2	46,0	5,47	317,49	44,34
38	48,9	47,1	5,35	318,25	45,10
39	49,0	47,8	5,25	318,89	45,74
40	49,3	48,2	5,16	319,48	46,33

Tabulka 6: Naměřené hodnoty termistorem NTC a termočláanky