

# 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

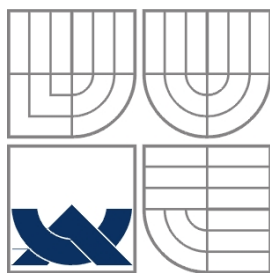
## MĚŘENÍ TEPLOT NA ELEKTRICKÝCH STROJÍCH

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

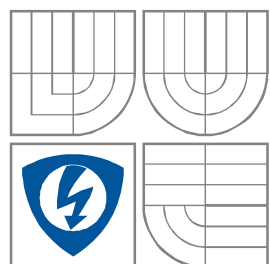
Martin Prezbruchý

BRNO 2009



**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 TEPLOT NA ELEKTRICKÝCH STROJÍCH**

**TEMPERATURE MEASUREMENT ON ELEKTRIC MACHINES**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

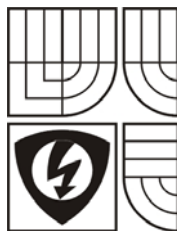
Martin Prezbruchý

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

Ing. Aleš Mikulčík

BRNO, 2009



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:** Prezbruchý Martin

**Ročník:** 3

**ID:** 102403

**Akademický rok:** 2008/09

**NÁZEV TÉMATU:**

## Měření teplot na elektrických strojích

**POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

1. Navrhněte princip řešení pro měření rozložení teploty na daném elektrickém stroji.
2. Sestavte měřicí aparaturu pro měření rozložení teploty na zadaném elektrickém stroji
3. Vytvořte teplotní model elektrického stroje
4. Zhodnoťte výsledky měření a použitou metodu

**DOPORUČENÁ LITERATURA:**

**Termín zadání:** 1.10.2008

**Termín odevzdání:** 29.5.2009

**Vedoucí projektu:** Ing. Aleš Mikulčík

**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

Táto práca sa snaží popísať princíp rozloženia teploty na elektrických strojoch. V prvej časti sa zaoberá meraním teploty, princípmi merania, termočlánkami a bezdotykovým meraním teploty. V druhej časti teoreticky rozoberá druhy motorov a vznik tepla na nich. V tretej časti práca popisuje modelovanie v programe Autodesk Inventor a Ansys Workbench. V ďalšej časti práca uvádza popísanie tvorby modelu elektrického stroja v týchto programoch a praktické merania rozloženia teploty v laboratóriu. V závere sa snaží zhodnotiť výsledky merania a porovnanie výsledkov oboma metódami.

## Abstract

This work is trying to describe the temperature allocation on the electric machines. In the first part it is describing the temperature measurement, principals of measuring, thermocouples and a contactless measurement. In the second part, it is theoretically proceeding with engine types and a heat generation on them. In the third part, the work is describing simulation in the programs Autodesk Inventor and Ansys Workbench. In the next part, a work is showing the creation of an electric machine model in already mentioned programs and practical measurements of temperature allocation in the laboratory. In the conclusion, it is evaluating the measurement achievements and comparing the results of both used methods.

## Kľúčové slová

teplota; rozloženie teploty; motor; asynchrónny motor; Inventor; Ansys; termočlánok; termokamera

## Keywords

temperature; temperature allocation; engine; asynchronous engine; Inventor; Ansys; thermocouple, thermocamera

## Bibliografická citácia

Bibliografická citácia – Prezbruchý, M., Měření teplot na elektrických strojích , Brno: FEKT VUT v Brně, 2009. 52s.

## Prehlásenie

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Měření teplot na elektrických 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 .....

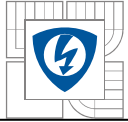
Podpis autora .....

## Pod'akovanie

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Alešovi Mikulčíkovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne .....

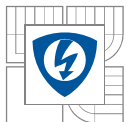
Podpis autora .....



## Obsah

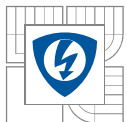
Zoznam obrázkov.....	8
Zoznam tabuliek.....	9
Zoznam symbolov a skratiek.....	10
<b>1. Úvod.....</b>	<b>11</b>
<b>2. Teplota.....</b>	<b>12</b>
<b>2.1 Definícia.....</b>	<b>12</b>
<b>2.2 Meranie.....</b>	<b>12</b>
<b>2.2.1 Meranie teploty.....</b>	<b>12</b>
<b>2.3 Vznik tepla.....</b>	<b>13</b>
<b>2.4 Princípy merania teploty.....</b>	<b>14</b>
<b>3. Dotykové meranie teploty.....</b>	<b>16</b>
<b>3.1 Termoelektrické snímače teploty – termočlánky.....</b>	<b>16</b>
<b>3.1.1 Popis termočlánku.....</b>	<b>17</b>
<b>3.1.2 Rozdelenie termočlánkov.....</b>	<b>18</b>
<b>3.1.3 Presnosť termoelektrických prístrojov.....</b>	<b>18</b>
<b>3.1.4 Zapojenie termočlánku do meracieho obvodu.....</b>	<b>19</b>
<b>4. Bezdotykové meranie teploty – pyrometria.....</b>	<b>20</b>
<b>4.0.1 Výhody bezdotykového merania.....</b>	<b>21</b>
<b>4.0.2 Nevýhody bezdotykového merania.....</b>	<b>21</b>
<b>4.2 Termovízne prístroje.....</b>	<b>22</b>
<b>5. Vznik tepla na elektrických strojoch.....</b>	<b>22</b>
<b>5.1 Úvod do problematiky elektrických motorov.....</b>	<b>22</b>
<b>5.2 Jednosmerné motory.....</b>	<b>23</b>
<b>5.3 Striedavé motory.....</b>	<b>24</b>
<b>5.3.1 Synchronne motory.....</b>	<b>25</b>
<b>5.3.2 Asynchronne motory.....</b>	<b>26</b>
<b>5.4 Zaťažovanie elektrického stroja.....</b>	<b>27</b>
<b>5.5 Vznik tepla v točivých elektrických strojoch.....</b>	<b>27</b>
<b>5.5.1 Vznik tepla stratami.....</b>	<b>28</b>
<b>5.6 Oteplenie elektrických prístrojov.....</b>	<b>30</b>
<b>6. Modelovanie elektrických prístrojov.....</b>	<b>32</b>
<b>6.1 Autodesk Inventor.....</b>	<b>32</b>
<b>6.2 Ansys Workbench.....</b>	<b>34</b>
<b>7. Modelovanie zadaného elektrického prístroja.....</b>	<b>35</b>
<b>8. Meranie rozloženia teploty v laboratóriu.....</b>	<b>37</b>
<b>9. Rozloženie teploty elektrického prístroja pomocou programu Ansys v.11.....</b>	<b>44</b>
<b>10. Zhodnotenie výsledkov merania.....</b>	<b>47</b>
<b>11. Záver.....</b>	<b>49</b>
Literatúra.....	50
Prílohy.....	51





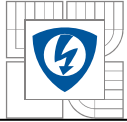
## Zoznam obrázkov

Obr.č.1 - Rozdelenie teplomerov podľa meracích rozsahov .....	13
Obr.č.2 - Seebeckov jav .....	16
Obr.č.3 - Peltierov článok .....	17
Obr.č.4 - Thomsonov jav .....	17
Obr.č.5 - Obvody zložené z termočlánkov .....	20
Obr.č.6 - Termovízia s opticko-mechanickým rozkladom obrazu .....	23
Obr.č.7 - ukážka jednosmerného motoru HPI Saturn 20T .....	25
Obr.č.8 – ukážka synchronného motoru .....	25
Obr.č.9 – ukážka asynchronného motoru .....	26
Obr.č.10 – vplyv teploty na menovitý moment .....	28
Obr.č.11 – graf oteplenia vodiča v elektrickom prístroji .....	30
Obr.č.12 – pracovné prostredie programu Autodesk Inventor 2009 .....	33
Obr.č.13 – príklad Meshu prednej časti motora v programe Ansys .....	35
Obr.č.14 – fotka motoru Muster .....	36
Obr.č.15 – namodelovaný motor Muster v Inventore 2009 .....	37
Obr.č.16 – schéma zapojenia motoru .....	38
Obr.č.17 – fotografia zapojenia motora Muster .....	39
Obr.č.18 – prvý snímok z merania číslo jedna vytvorený termokamerou SAT .....	40
Obr.č.19 – druhý snímok z merania číslo jedna vytvorený termokamerou SAT .....	40
Obr.č.20 – tretí snímok z merania číslo jedna vytvorený termokamerou SAT .....	41
Obr.č.21 – prvý snímok z merania číslo dva vytvorený termokamerou SAT .....	42
Obr.č.22 – druhý snímok z merania číslo dva vytvorený termokamerou SAT .....	42
Obr.č.23 – prvý snímok z merania číslo tri vytvorený termokamerou SAT .....	43
Obr.č.24 – druhý snímok z merania číslo tri vytvorený termokamerou SAT .....	44
Obr.č.25 – celkový Mesh motoru Muster .....	45
Obr.č.26 – životnosť častí namodelovaného motora Muster v programe Ansys 2009 .....	45
Obr.č.27 – rozloženie teploty na elektrickom motore Muster pomocou programu Ansys .....	46
Obr.č.28 – spojka motoru a vírivej brzdy .....	51



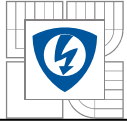
## Zoznam tabuliek

Tab. č. 1 - Hlavné snímače teploty.....	15
Tab. č. 2 - Rozdelenie snímačov teploty.....	16
Tab. č. 3 - Rozdelenie termočlánkov podľa noriem IEC A DIN.....	18
Tab. č. 4 - Prípustné odchýlky termočlánkov.....	18
Tab. č. 5 - Základné vlastnosti najpoužívanejších termočlánkov.....	19
Tab.č.6 - Koefficienty polynomiálneho vyjadrenia závislosti teploty a termoelektrického napätia.....	21
Tab. č. 7 - Hodnoty emisivity pre rôzne druhy materiálov.....	22
Tab.č.8 – dovoľené oteplenia motoru.....	28
Tab. č. 9 – štítkové hodnoty vírivej brzdy VUES Brno.....	37
Tab. č. 10 – použité prístroje pri meraní.....	38
Tab.č.11 – namerané hodnoty rozloženia teploty pomocou termočlánku pri prvom meraní....	39
Tab.č.12 – namerané hodnoty rozloženia teploty pomocou termočlánku pri druhom meraní...41	
Tab. č.13 – namerané hodnoty rozloženia teploty pomocou termočlánku pri treťom meraní...43	
Tab.č.14 – špecifikácie termokamery SAT (v angličtine).....	51
Tab.č.15 – špecifikácia termočlánkového prístroja Extech HD 200 (v angličtine).....	52



## Zoznam skratiek a symbolov

- $\eta$  - účinnosť Carnotovho cyklu  
 $Q_2$  – teplo odobrané teplomernou látkou z kúpeľa s teplotou  $T_2$   
 $Q_3$  – teplo odovzdané teplomernou látkou do kúpeľa s teplotou  $T_1$   
 $T_1$  – teplota 1  
 $T_2$  – teplota 2  
 $t$  – neznáma teplota  
 $a_i$  – príslušné koeficienty, odvodené pre daný typ termočlánku  
 $U_{te}$  – termoelektrické napätie, namerané na termočlánku  
 $n$  – rád polynómu  
 $E$  – hustota žiarivého toku  
 $\varepsilon$  – emisivita  
 $z$  – zaťaženie  
 $t_c$  – doba cyklu  
 $\eta_w$  - energetická účinnosť  
 $\Delta W$  – celkové straty v danej sústave pohonu  
 $W_1$  – vstupujúca energia  
 $W_2$  – vystupujúca energia  
 $\Delta P$  - celkové straty  
 $R$  – ohmický odpor  
 $I$  – pretekajúci prúd  
 $\Delta P_j$  - Straty vo vinutí  
 $\Delta P_f$  - straty na budiacom vinutí  
 $\Delta P_{kl}$  - straty na komutátore a zberacích krúžkoch  
 $\Delta P_{mech,t}$  - mechanické straty: trením  
 $\Delta P_{mech,v}$  - ventilačné straty  
 $\Delta P_{Fe,v}$  - vírivé straty  
 $\Delta P_{Fe,h}$  - hysterézne straty  
 $P_{Fe}$  - celkové približné straty  
 $\tau$  - časová konštanta  
 $\Delta P_{dt}$  – straty motoru  
 $C$  – tepelná kapacita motoru ( $J \cdot K^{-1}$ )  
 $A$  – súčiniteľ prestupu tepla do chladiva ( $W \cdot K^{-1}$ )  
 $\Delta \vartheta$  - oteplenie (K)  
 $\Delta \vartheta_{max}$  - maximálne oteplenie  
 $A$  – ampérmeter  
 $V$  – voltmeter  
 $M$  – Motor  
 $VB$  – vírivá brzda



## 1. Úvod

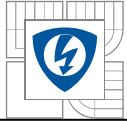
Zmyslom tejto bakalárskej práce je zistenie rozloženia teploty na zadanom elektrickom prístroji. Problematiku rozloženia teploty najskôr rozoberiem teoretickým úvodom v ktorom popíšem čo to vlastne teplota je, ako sa meria, ako prakticky vzniká a aké sú princípy merania teploty.

V druhej časti sa budem venovať meracím prístrojom ktoré použijem v praktickej časti bakalárskej práce, ako sú napríklad dotykové meracie prístroje, medzi ktorými spomeniem termočlánky, a bezdotykové meracie systémy.

V tretej časti rozoberiem problematiku vzniku tepla na točivých elektrických strojoch, medzi ktoré patria jednosmerné motory a striedavé motory. Taktiež uvediem asynchrónne motory, s ktorými sa oboznámim aj v praktickej časti práce. Ďalej sa budem zaoberať zaťažovaním elektrických strojov a vzniku tepla stratami. Posledným teoretickým textom tretej časti bude oteplenie elektrických prístrojov.

Vo štvrtej časti práce sa budem venovať modelovaniu strojov v grafickom rozhraní osobného počítača a priblížim úvodom prostredie Inventor a Ansys. Ďalším krokom bude popis zhotovenia zadaného elektrického prístroja.. Bude nasledovať praktická časť ktorou bude meranie rozloženia teploty na zadanom elektrickom prístroji v laboratóriu elektrických strojov na fakulte Elektrotechniky a komunikačných technológií, VUT, Brno. Týmto prístrojom bude asynchrónny motor Muster. Po praktickej časti bude nasledovať rozloženie teploty pomocou metódy konečných prvkov v programe Ansys Workbench.

Poslednou časťou práce bude zhodnotenie merania v laboratóriu a porovnanie výsledkov skutočných nameraných hodnôt so simulovaným rozložením teploty na matematickom modeli vytvorenom v programe Ansys. Táto časť bude taktiež obsahovať porovnanie použitých metód a porovnanie oteplenia prístroja z hľadiska normy ČSN.



## 2. Teplota

### 2.1 Definícia

Teplota je termodynamická stavová veličina, ktorá opisuje strednú kinetickú energiu častíc. Definuje sa na základe účinnosti vratného Carnotovho cyklu. Účinnosť vratného Carnotovho cyklu, pracujúceho medzi rovnakými kúpeľmi s určitými teplotami, závisí len od týchto teplôt a nezávisí od použitej teplomernej látky. Platí vzťah:

$$\eta = \frac{Q_2 - Q_1}{Q_2} = \frac{T_2 - T_1}{T_2} \quad 1.1$$

kde  $\eta$  je účinnosť Carnotovho cyklu

$Q_2$  je teplo odobrané teplomernou látkou z kúpeľa s teplotou  $T_2$

$Q_1$  je teplo odovzdané teplomernou látkou do kúpeľa s teplotou  $T_1$

V prípade ideálneho Carnotovho cyklu ( $\eta = 1$ ) zo vzťahu vyplýva

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{Q_2}{Q_1} \quad 1.2$$

### 2.2 Meranie

Meranie je neoddeliteľnou súčasťou vedy, techniky i mnohých ďalších oblastí ľudskej činnosti. Poskytuje informácie nevyhnutné pre normálny chod výrobných i nevýrobných odvetví hospodárstva každého technicky vyspelého štátu, pre riadenie strojov a optimalizáciu procesov, ako aj pre porovnávanie vlastností výrobkov a hodnotenie ich kvality. Je nevyhnutnou podmienkou technického rozvoja a medzinárodnej spolupráce.

#### 2.2.1 Meranie teploty

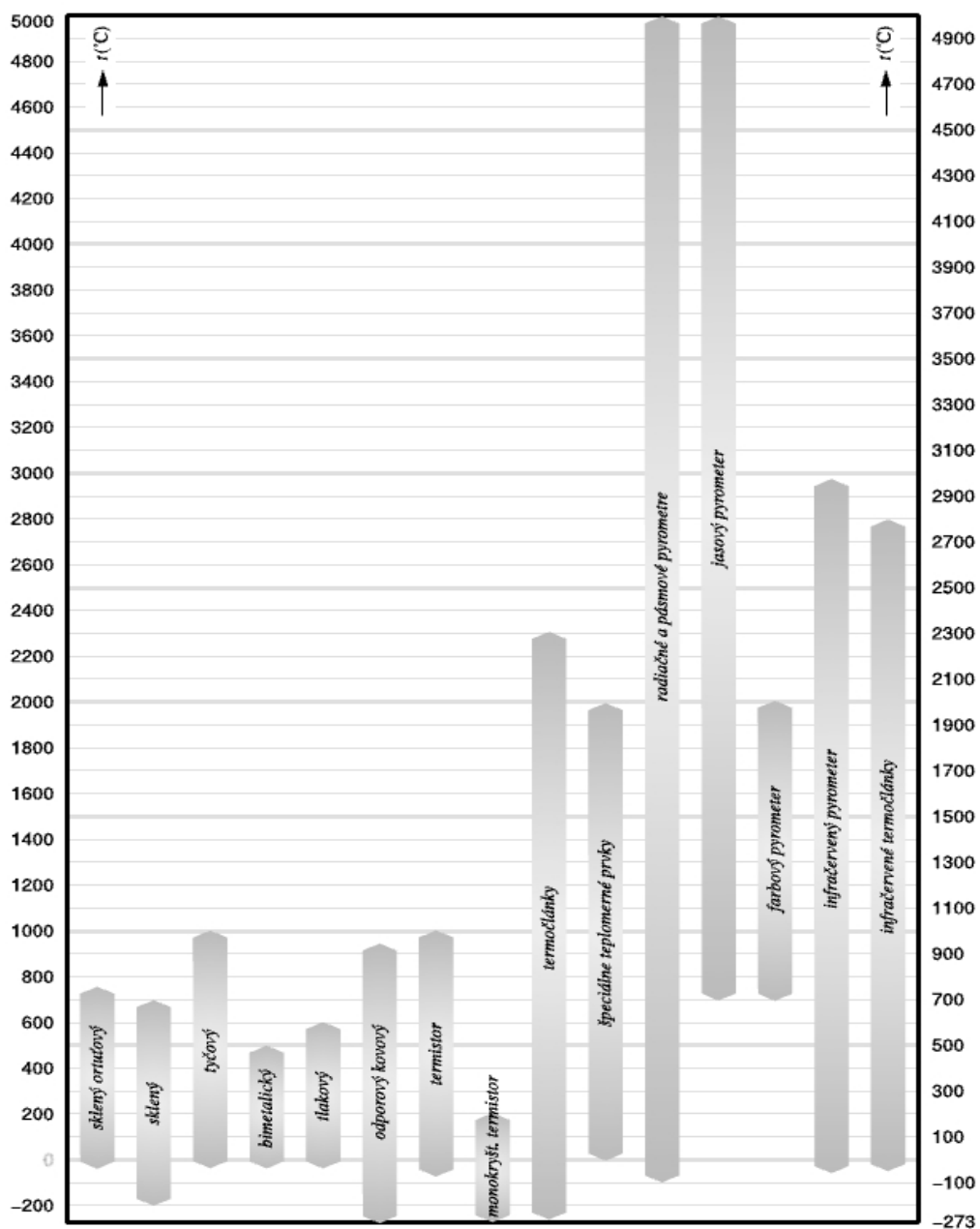
Meranie teploty patrí k najzákladnejším fyzikálnym meraniam. V oblasti merania teploty zaznamenal veľký pokrok vynález skleného teplomera, ktorý v roku 1592 skonštruoval Galileo Galilei. Bola to sklená guľa v spodnej časti predĺžená do rúrkovitého tvaru a otvorená, pričom spodný otvor bol kolmo ponorený do vody. Pri ochladení vzduchu v guli vodný stĺpec v rúrke stúpil nahor. Tento teplomer nebol dostatočne vhodný na meranie teploty, pretože nameraná hodnota závisela aj od atmosférického tlaku. Okrem toho nebola ešte známa teplotná stupnica, takže ukazoval len rozdiel teplôt. Na tento teplomer nadviazali ďalší vynálezovia, ktorí vytvorili rúrkovité teplomery s uzavretými koncami, ktoré využívali tepelnú rozťažnosť kvapalín (etylalkoholu alebo ortute).

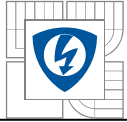
Zariadenia na meranie teploty sa nazývajú teplomery. Všeobecne využívajú rôzne meracie princípy a existujú v množstve konštrukčných vyhotovení. Podľa umiestnenia snímačej časti v meranom prostredí sa delia do dvoch skupín na *dotykové* a *bezdotykové*. Dotykové teplomery majú snímaciu časť umiestnenú priamo v meranom prostredí, resp. dotýkajú sa meraného objektu. Bezdotykové teplomery merajú teplotu na diaľku, teda majú snímaciu časť umiestnenú mimo meraného prostredia, resp. sa nedotýkajú meraného objektu. Rozdelenie podľa ich meracích rozsahov graficky znázorňuje obrázok č.1 [2]

## 2.3 Vznik tepla

Tepló je forma energie ktorá vzniká premenou elektrickej energie. Vzniká viacerými spôsobmi z ktorých najdôležitejšími sú: a, *priechod elektrického prúdu ohmickým odporom* (napríklad pretekanie elektrického prúdu vodičmi, nedokonalé spojenie vodičov v spojoch, poddimenzovaním vodičov, vyšším odberom prúdu z batérie a pod.) . b, *elektrickým oblúkom* (napríklad premenou elektrického prúdu na svetlo, zváraním, pri spínaní elektrocekého obvodu). c, *elektrickou indukciou* (napríklad striedavý prúd sa indukuje – motory, transformátory, generátory, dynama). d, *vysokofrekvenčným ohrevom* (vznik tepla priechodom prúdu v izolačných materiáloch). e, *infračerveným žiarením* (ohrev vzduchu infračerveným žiaričom). Najväčšie teplo vzniká pri poruchových stavoch, takzvaných skratoch. Teplo vzniká na ohmickom odpore priamým spojením živých častí elektrického zariadenia alebo porušením izolácie. Dôsledky vzniku tepla môžu byť zanedbateľné ale častokrát dochádza k prehriatiu elektrického zariadenia a následne jeho zlyhaniu alebo dokonca ku vzniku požiaru. Preto je nezbytnou súčasťou prevádzky elektrického prístroja jeho monitorovanie a meranie teplôt. [1]

Obr. č.1 - Rozdelenie teplomerov podľa meracích rozsahov





## 2.4 Princípy merania teploty

Vo všeobecnosti meradlá teploty využívajú niekoľko základných princípov:

1) *teplotnú rozťažnosť* tuhých, kvapalných alebo plyných teplomerných látok. Teplotná rozťažnosť teplomernej látky, resp. rozdiel teplotných rozťažností dvoch látok potom predstavuje mieru teploty.

- Meria sa zmena objemu teplomernej látky pri konštantnom tlaku (dilatačné teplomery), alebo zmena tlaku teplomernej látky pri konštantnom objeme (tlakové teplomery)

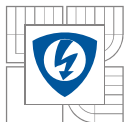
2) *zmenu elektrických vlastností* snímača v závislosti od zmeny teploty. Využíva sa:

a) závislosť elektrického odporu vodičov alebo polovodičov od teploty. Takéto snímače teploty sa nazývajú odporové teplomery, resp. termistory,

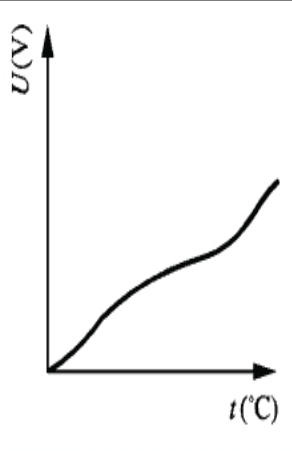
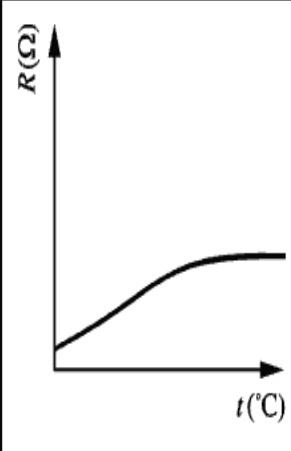
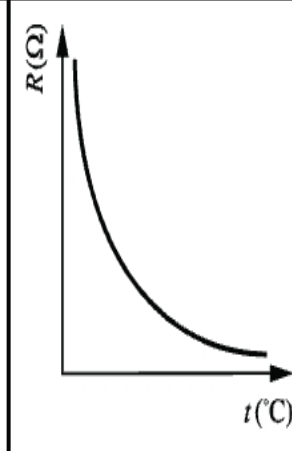
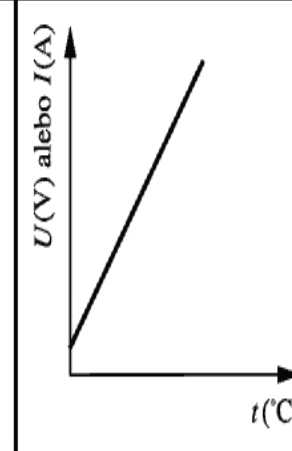
b) vznik termoelektrického napätia v obvode tvorenom dvoma rôznymi kovovými vodičmi, ktorých konce sú spojené a vystavujú sa dvom rôznym teplotám (Seebeckov jav). Takéto snímače teploty sa nazývajú termočlánky,

3) snímanie *celkovej energie žiarenia*. Tuhé a kvapalné látky vysielajú pri každej teplote  $T > 0$  K tepelné žiarenie. Na určenie teploty sa využíva tepelná závislosť žiary, ktorú merajú tepelné detektory,

4) využitie *spektrálnej žiarivosti* meraného objektu. S rastom teploty meraného objektu rastie aj jeho spektrálna žiarivosť. [3]



Tab. č. 1 - Hlavné snímače teploty

Termočlánky	Kovové odporové snímače	Polovodičové odporové snímače (termistory)	Infračervené snímače
<b>Statická charakteristika</b>			
			
<b>Vyhodnocuje sa</b>			
• napätový výstupný signál	• zmena odporu snímača	• zmena odporu snímača	• napätový alebo prúdový výstupný signál
<b>Výhody</b>			
<ul style="list-style-type: none"> <li>• vlastné napájanie</li> <li>• jednoduché</li> <li>• robustné</li> <li>• lacné</li> <li>• široká paleta vyhotovení</li> <li>• veľký teplotný rozsah</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• najstabilnejšie</li> <li>• najpresnejšie</li> <li>• lineárnejšie ako termočlánky</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• veľký výstupný signál</li> <li>• rýchle</li> <li>• dvojvodičové meranie odporu</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• najlineárnejšie</li> <li>• najväčší výstupný signál</li> <li>• lacné</li> </ul>
<b>Nevýhody</b>			
<ul style="list-style-type: none"> <li>• nelineárne</li> <li>• nízke napätie</li> <li>• vyžaduje sa referenčná hodnota teploty</li> <li>• najmenej stabilné</li> <li>• najmenej citlivé</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• drahé</li> <li>• vyžaduje sa prúdový zdroj</li> <li>• malá zmena odporu v závislosti od teploty</li> <li>• malý merný odpor</li> <li>• zohrievajú sa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• nelineárne</li> <li>• obmedzený teplotný rozsah</li> <li>• krehké</li> <li>• vyžaduje sa prúdový zdroj</li> <li>• zohrievajú sa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• vyžaduje sa zdroj napätia</li> <li>• pomalé</li> <li>• zohrievajú sa</li> <li>• obmedzené množstvo vyhotovení</li> </ul>



### 3. Dotykové meranie teploty

Cez rastúci význam bezdotykového merania teploty na bázi infračerveného žiarenia, sa teplota v priemysle meria dotykovými metódami. Medzi najstaršie typy kontaktného merania patria ortuťové alebo kovové teplomery. Z nich najpoužívanejšími sú dilatačné teplomery, ktoré využívajú princíp objemovej rozťažnosti plyných, kvapalných alebo tuhých teplomerných látok pri konštantnom tlaku, kvapalinové teplomery ktoré patria podľa konštrukcie ako i spôsobu merania medzi najjednoduchšie teplomery a nachádzajú široké uplatnenie v praxi. Pri svojej činnosti využívajú objemovú rozťažnosť kvapalín. Ďalšími druhmi teplomerov sú: kovový, bimetalový, plynový a tlakový. V dnešnej pokročilej dobe sa prevažne uplatňujú meracie reťazce zostavené zo snímača, prevodníka a vyhodnocovacej jednotky. Meranie teploty tu zaisťuje snímač, ktorého signál sa v prevodníku zosiluje, upravuje a väčšinou digitalizuje a vyhodnocovacia jednotka ho vo vhodnom tvare zobrazuje a dokumentuje. Medzi najpoužívanejšie prístroje pri dotykovom meraní patria: odporové teplomery, termoelektrické senzory: termočlánky, termistory, meracie sondy. [10]

Tab. č. 2 – Rozdelenie snímačov teploty

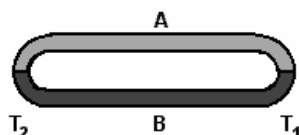
<b>Elektrické</b>	<i>odporové kovové</i>		
	<i>odporové polovodičové</i>	termistory	amorfné (negastory)
		polykryštalické	
	<i>polovodičové s PN prechodom</i>		monokryštalické bez PN prechodu
	<i>termoelektrické</i>		diódové
	<i>kryštalové</i>		tranzistorové
<b>Dilatačné (kovové a kvapalinové)</b>			
<b>Tlakové (kvapalinové, plynové, parné)</b>			
<b>Špeciálne</b>			

#### 3.1 Termoelektrické snímače teploty – termočlánky

Termoelektrické snímače teploty patria medzi kontaktné snímače (snímač je v priamom styku s meraným prostredím - médiom) používané na diaľkové meranie teploty. Ich senzor (termočlánok) prevádza teplotnú zmenu okolia na zmenu elektrického napätia. Termočlánok je teda elektrický teplomer, využívajúci vznik termoelektrického napätia vplyvom teploty. Tento vzťah popisujú termoelektrické javy:

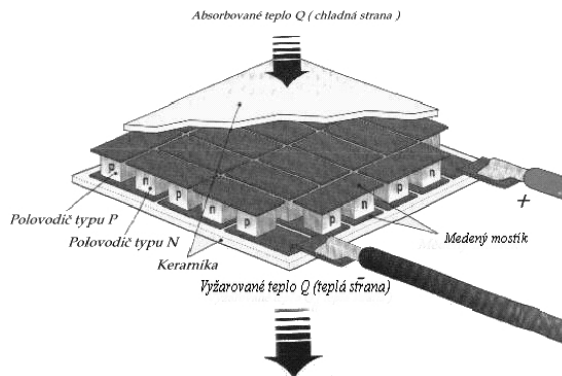
- A. Seebeckov jav – v obvode z dvoch vodičov, vyrobených z rôznych materiálov, ktoré sú na obidvoch koncoch spojené, spôsobí rozdiel teplôt na koncoch týchto vodičov vznik elektromotorického napätia. V obvode sa objaví napätie a začne ním pretekať prúd. Seebeckov jav sa prejaví vznikom termoelektrického napätia

Obr. č. 2 – Seebeckov jav



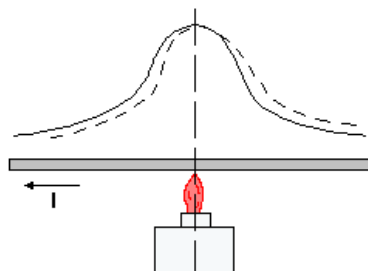
- B. Peltierov jav** – elektrický prúd tečúci obvodom z dvoch rôznych materiálov spôsobí, že obidva spoje týchto materiálov majú rozdielnu teplotu.

Obr. č. 3 - Peltierov článok



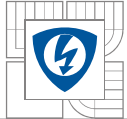
- C. Thomsonov jav** – v obvode z jedného materiálu nepôsobí pretekánie elektrického prúdu zmenu teploty. V kovových materiáloch nespozorovali vznik napätia v jednom vodiči, na ktorých miestach pôsobili rozličné teplotné gradienty. [4]

Obr. č. 4 - Thomsonov jav. Zahriatie kovovej tyče, ktorou netečie elektrický prúd. V mieste zahriatia vznikne symetrické teplotné maximum



### 3.1.1 Popis termočlánku

Termočlánok využíva na svoju činnosť jeden z popísaných javov. Skladá sa z dvoch elektricky vodivých kovových vodičov rôzneho chemického zloženia, ktoré sú na obidvoch koncoch vodivo spojené do uzavretého obvodu. Keď sa obidva konce článku umiestnia do miest s rozdielnymi teplotami, v obvode vzniká termoelektrické napätie. Jeho veľkosť a polarita závisí od materiálu obidvoch kovov termočlánku. Termočlánok teda predstavuje generátor napätia, ktoré sa dá merať citlivým voltmetrom. Z hľadiska merania, je potrebné aby generované termoelektrické napätie bolo čo najväčšie a aby obidva kovy boli čo najodolnejšie proti vplyvom okolitého prostredia, teda aby sa ich vlastnosti časom menili čo najmenej. Tomu vyhovuje len niekoľko dvojíc materiálov, ktorých presné zloženie je normované, takže vlastnosti rovnako označených termočlánkov vyrobených rôznymi výrobcami sú zhodné. [6]



### 3.1.2 Rozdelenie termočlánkov

V súčasnosti sa používajú termočlánky podľa normy IEC 584-1 alebo STN EN 60584-1. Táto norma obsahuje tabuľky základných hodnôt termoelektrického napätia jednotlivých termočlánkov a polynómy pre výpočet ich charakteristík. Menej sa už používajú termočlánky podľa normy DIN 43710. Zloženie termočlánkov podľa normy IEC a DIN 4370 uvádza tabuľka 3. V normách sú uvedené základné hodnoty termoelektrického napätia pre referenčnú teplotu 0 °C. V praxi sa bežne používajú iné porovnávacie teploty (napr. +20, +50, +70 °C) podľa týchto porovnávacích teplôt je potrebné namerané hodnoty termoelektrického napätia korigovať. [6]

Tabuľka č. 3 - Rozdelenie termočlánkov podľa noriem IEC A DIN

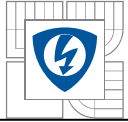
Označenie termočlánkov podľa IEC 584	Zloženie	Merací rozsah °C
T	Cu-CuNi	-200 až +350
J	Fe-CuNi	-200 až +750
E	NiCr-CuNi	-100 až +900
K	NiCr-NiAl	-200 až +1200
N	NiCrSi-NiSi	-200 až +1200
S	PtRh10-Pt	0 až +1600
R	PtRh13-Pt	0 až +1600
B	PtRh30-	0 až +1700
Označenie termočlánkov podľa DIN 43710	Zloženie	Merací rozsah °C
L	Fe-CuNi	-200 až +900
U	Cu-CuNi	-200 až +600

### 3.1.3 Presnosť termoelektrických snímačov

Presnosť termočlánkov je jednou ich z najdôležitejších vlastností. Prípustné odchýlky termočlánkov podľa normy IEC 584-2 uvádza tabuľka č. 3 V európskej únii sa najčastejšie používajú pre nižšie teploty termočlánky „J“ a „K“ a pre vyššie teploty typ „S“ a „B“ čím je pokrytý rozsah teplôt cca -200 až +1700 °C. Vyššie teploty môžeme merať špeciálnymi termočlámkami na báze volfrámu a rénia (WRh5-WRh20, W-ERh26) a to dokonca do teplôt +2300°C.

Tab. č.4 - Prípustné odchýlky termočlánkov

Typ	T.P	Tolerancia °C	Rozsah
J	1	$\pm 0,004 \cdot  t $ alebo $\pm 1,5^\circ\text{C}$	v rozsahu (-40 až +
	2	$\pm 0,0075 \cdot  t $ alebo $\pm 2,5^\circ\text{C}$	v rozsahu (-40 až +
K,	1	$\pm 0,004 \cdot  t $ alebo $\pm 1,5^\circ\text{C}$	v rozsahu (-40 až +
	2	$\pm 0,0075 \cdot  t $ alebo $\pm 2,5^\circ\text{C}$	v rozsahu (-40 až +
	3	$\pm 0,015 \cdot  t $ alebo $\pm 2,5^\circ\text{C}$	v rozsahu (-200 až +
S,R	1	$\pm [1+( t -1000) \cdot 0,003]$ alebo $\pm 1^\circ\text{C}$	v rozsahu (0 až +
	2	$\pm 0,025 \cdot  t $ alebo $\pm 1,5^\circ\text{C}$	v rozsahu (-40 až +
B	2	$\pm 0,0025 \cdot  t $ alebo $\pm 1,5^\circ\text{C}$	v rozsahu (+600 až
	3	$\pm 0,005 \cdot  t $ alebo $\pm 4^\circ\text{C}$	v rozsahu (+600 až
L		$\pm 3^\circ\text{C}$	v rozsahu (+100 až +
		$\pm 0,75^\circ\text{C}$	v rozsahu (+400 až +



$|t|$  - absolútna hodnota v °C

Tab.č. 5 – Základné vlastnosti najpoužívanejších termočlánkov

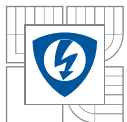
Typ	Označenie	Popis
J	<i>Fe-CuNi</i>	najlacnejší termočlánok používaný najmä v aplikáciách, kde nie je dôležitá vysoká presnosť a spoľahlivosť. Niekedy sa používa ako náhrada za termočlánky Fe-Ko
L	<i>Fe-CuNi</i>	má podobné vlastnosti ako termočlánok „J“ a vo vyhotovení podľa normy DIN 43710 je adekvátnou náhradou za starší termočlánok Fe-Ko
K	<i>NiCr-NiAl</i>	je to najlineárnejší a najpoužívanejší
N	<i>NiCrSi-NiSi</i>	má všetky výhody termočlánku „K“, je však dlhodobu stabilnejší.
S	<i>PtRh10-Pt</i>	je vhodný na meranie vysokých teplôt, trvalo do +1300 °C, obmedzene až do +1600 °C. Pretože je zložený z drahých kovov, jeho cena je vysoká
R	<i>PtRh13-Pt</i>	je zložením a vlastnosťami podobný ako termočlánok „S“, ale je dlhodobu stabilnejší a vo svete viac používaný
B	<i>PtRh30- PtRh6</i>	je vhodný na meranie veľmi vysokých teplôt, trvalo do +1600 °C, obmedzene až do +1800 °C. Oproti termočlánkom „S“ a „R“ je stabilnejší, pretože nemení časom pomer zloženia vetví, ale má najnižšie výstupné napätie, preto je málo citlivý. Jeho cena je ešte vyššia ako pri termočlánkoch „S“ a „R“

[8]

### 3.1.4 Zapojenie termočlánku do meracieho obvodu

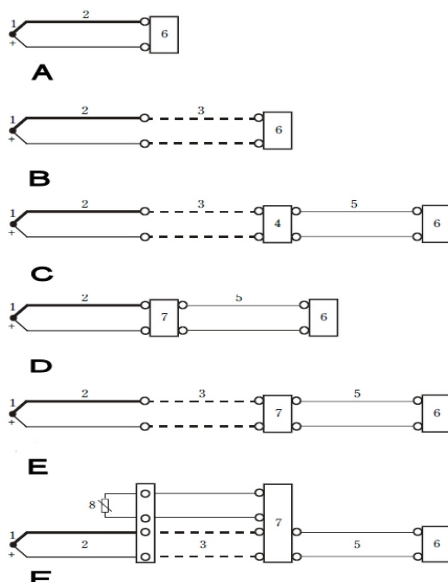
Zapojenie termočlánku do obvodu nie tak jednoduché ako napríklad zapojenie odporových senzorov, a merací obvod môže tvoriť viacej súčastí. Niekoľko príkladov zapojenia termočlánku do meracieho obvodu (obr.č.5):

- **Obvod zložený z termočlánku a meracieho prístroja** - takéto zapojenie sa používa najčastejšie v prípadoch, keď môže byť merací prístroj veľmi blízko meracieho miesta. Napríklad v malých peciach (laboratórne, vypaľovacie atd.) alebo pri priamej kalibrácii termočlánku. Nakoľko je merací prístroj pripojený priamo na studené konce termočlánku, musí byť vo vnútri prístroja obvod pre vnútornú kompenzáciu studeného konca termočlánku (A).
- **Obvod zložený z termočlánku, kompenzačného (predlžovacieho) vedenia a meracieho prístroja** - má obdobné riešenie ako predchádzajúce zapojenie, ale merací prístroj je vo väčšej vzdialenosti. Z cenového dôvodu sa nepoužíva dlhší termočlánok, ale napája sa predlžovacím vedením s rovnakými termoelektrickými vlastnosťami (B).



- **Obvod zložený z termočlánku, kompenzačného (predlžovacieho) vedenia, kompenzačnej krabice, spojovacieho vedenia a meracieho prístroja** - používa sa v prípade potreby prenášať signál z termočlánku ešte na väčšie vzdialenosti Aby nebolo potrebné ťahať na veľké vzdialenosti relatívne drahé kompenzačné (predlžovacie) vedenie, ukončí sa kompenzačné (predlžovacie) vedenie tzv. kompenzačnou krabicou s kompenzáciou studeného konca termočlánku a ďalej sa využíva štandardné spojovacie vedenie (medený kábel)š Nevýhodou tohto riešenia je možnosť naindukovania napätia v spojovacom vedení a ďalšie možnosti vonkajšieho rušenia (C).
- **Obvod zložený z termočlánku, kompenzačného (predlžovacieho) vedenia, prevodníka teploty, spojovacieho vedenia a meracieho prístroja** - zapojenie je podobné ako v predchádzajúcom prípade, ale miesto kompenzačnej krabice je v obvode prevodník teploty vo vyhotovení na DIN lištu alebo stenu, ktorý prevádza nízkonapäťový termoelektrický signál na unifikovaný (najčastejšie 4.20 mA) a je odolnejší voči vonkajšiemu rušeniu pri využití vnútornej kompenzácie studeného konca termočlánku (D).
- **Obvod zložený z termočlánku, kompenzačného (predlžovacieho) vedenia, kompenzačného obvodu, prevodníka teploty, spojovacieho vedenia a meracieho prístroja** - je podobný predchádzajúcemu obvodu, ale využíva možnosť presného merania teploty studeného konca termočlánku pomocou odporového senzora a následne možnosť presnej kompenzácie teploty studeného konca termočlánku (E).
- **Obvod zložený z termočlánku, prevodníka teploty, spojovacieho vedenia a meracieho prístroja** - oproti predchádzajúcemu zapojeniu je prevodník vložený do hlavice snímača a priamo pripojený na studené konce termočlánku. Pretože sa v obvode nenachádza kompenzačné (predlžovacie) vedenie, nevzniká možnosť vonkajšieho ovplyvňovania nameranej hodnoty. Cena tohto riešenia je nižšia ako pri obvodoch s kompenzačným (predlžovacím) vedením. Toto zapojenie sa využíva stále častejšie. Treba však sledovať maximálnu teplotu v okolí hlavice snímača, aby nedošlo k prehriatiu a následne k zničeniu prevodníka (F). [6]

Obr. č. 5 – obvody zložené z termočlánkov



Popis obázku:

1. merací spoj
2. termočlánok
3. kompenzačné vedenie
4. kompenzačná krabica
5. spojovacie vedenie
6. merací prístroj
7. prevodník teploty
8. svorkovnica



Ak si uvedomíme, že termoelektrické napätie je úmerné rozdielu teplôt na obidvoch koncoch obvodu, táto závislosť nie je lineárna. V menšom teplotnom rozsahu sa dá termoelektrické napätie linearizovať a vyjadriť vzťahom:

$$U_{te} = \alpha \cdot \Delta T \quad 1.3$$

kde

$U_{te}$  je termoelektrické napätie generované termočlánkom,  $A$  je koeficient úmernosti (tzv. Seebeckov koeficient),  $\Delta T$  je rozdiel teplôt na obidvoch koncoch obvodu

Vo všeobecnosti sa na presné určenie závislosti termoelektrického napätia a teploty používajú normované tabuľky, osobitné pre každý typ termočlánku (tab. č 6). V určitom intervale sa dá meraná teplota odvodiť od nameraného termoelektrického napätia podľa polynomiálnej rovnice

$$t = \sum_{i=0}^n a_i \cdot U_{te} \quad 1.4$$

kde  $t$  je neznáma teplota

$a_i$  sú príslušné koeficienty, odvodené pre daný typ termočlánku

$U_{te}$  je termoelektrické napätie, namerané na termočlánku

$n$  je rád polynómu

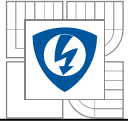
Tab. č. 6 - Koeficienty polynomiálneho vyjadrenia závislosti teploty a termoelektrického napätia

Typ	J	K	T	E	R	S
Roz.	0°C až 760°C	0°C až	-160°C až	-100°C až	0°C až	0°C až
a0	-0,048868252	0,226584602	0,10086091	0,104967248	0,263632917	0,927763167
a1	19873,14503	24152,109	2572,94369	17189,45282	179075,491	169526,515
a2	-21864,5353	67233,4248	-767345,83	-282639,085	-48840341,37	-31568363,94
a3	11569199,78	2210340,683	78025595,81	12695339,5	1,90002.10 <sup>10</sup>	8990730663
a4	-264917531,4	-860963914,9	-9247486589	-448703084,6	-4,82704.10 <sup>12</sup>	-1,63565.10 <sup>12</sup>
a5	2018441314	4,83506.10 <sup>10</sup>	6,97688.10 <sup>11</sup>	1,10866.10 <sup>10</sup>	7,62091.10 <sup>14</sup>	1,88027.10 <sup>14</sup>
a6		-1,18452.10 <sup>12</sup>	-2,66192.10 <sup>13</sup>	-1,76807.10 <sup>11</sup>	-7,20026.10 <sup>16</sup>	-1,37241.10 <sup>16</sup>
a7		1,38690.10 <sup>13</sup>	3,94078.10 <sup>14</sup>	1,71842.10 <sup>12</sup>	3,71496.10 <sup>18</sup>	6,17501.10 <sup>17</sup>
a8		-6,33708.10 <sup>13</sup>		-9,19278.10 <sup>12</sup>	-8,03104.10 <sup>19</sup>	-1,56105.10 <sup>17</sup>
a9				2,06132.10 <sup>13</sup>		1,69535.10 <sup>20</sup>

[6]

## 4. Bezdotykové meranie teploty - pyrometria

Bezdotykové meranie teploty je veľmi jednoduchý, rýchly a presný spôsob merania teploty. Každé teleso, ktoré má povrchovú teplotu vyššiu ako je absolútna nula, vysiela elektromagnetické žiarenie, odpovedajúce jeho teplote. Bezkontaktné meranie teploty využíva časť



elektromagnetického spektra v rozmedzí vlnových dĺžok 0,4 $\mu$ m až 1mm. Tento rozsah zahŕňa oblasť viditeľného svetla a taktiež oblasť infračerveného spektra. Základným vzťahom pre bezdotykové meranie teploty je Stefan-Boltzmanov zákon, ktorý hovorí že hustota žiarivého toku  $E$  [ $W \cdot m^{-2}$ ] vyžarovaného z jednotky plochy zdroja je na všetkých vlnových dĺžkach úmerná štvrtej mocnine absolútnej teploty telesa. Tento zákon bol odvodený pre tzv. absolútne čierne teleso, ktoré je definované ako ideálne teleso, ktoré pohlcuje celú radiáciu ktorá na neho dopadá, bez ohľadu na vlnovú dĺžku a uhol, pod ktorým je povrch telesa ožiarený. Pomer celkového žiarivého toku  $q$  vyžiarený daným telesom k žiarivému toku  $q_0$  ktoré by vyžiarilo absolútne čierne teleso sa nazýva *emisivita*  $\varepsilon$  [-]. Nadobúda hodnôt od 0 po 1, pričom číselne vyjadruje zhoršenie vyžarovacích vlastností zdroja v porovnaní s absolútne čiernym telesom a závisí na vlnovej dĺžke vyžarovania s teplotou telesa. [13]

Tab. č. 7 - Hodnoty emisivity pre rôzne druhy materiálov

Čierne teleso	1,00
Čierny lak	0,99
Voda	0,95
Tehla	0,85
Oceľový plech	0,75
Hliník	0,55
Lesklý oceľový	0,25

#### 4.0.1 Výhody bezdotykového merania

- priamy spôsob merania teploty
- nedochádza k namáhaniu snímača
- možnosť spojitého merania teploty
- rýchle sledovanie zmeny teploty
- meranie teploty pohybujúcich sa objektov
- zanedbateľný vplyv meracej techniky na meraný objekt
- možnosť merania teploty v korozívnom prostredí
- prostredníctvom optiky a prípadnej mechaniky možnosť realizovať riadkové alebo plošné zobrazenie povrchovej teploty telesa (napr. termovízia)

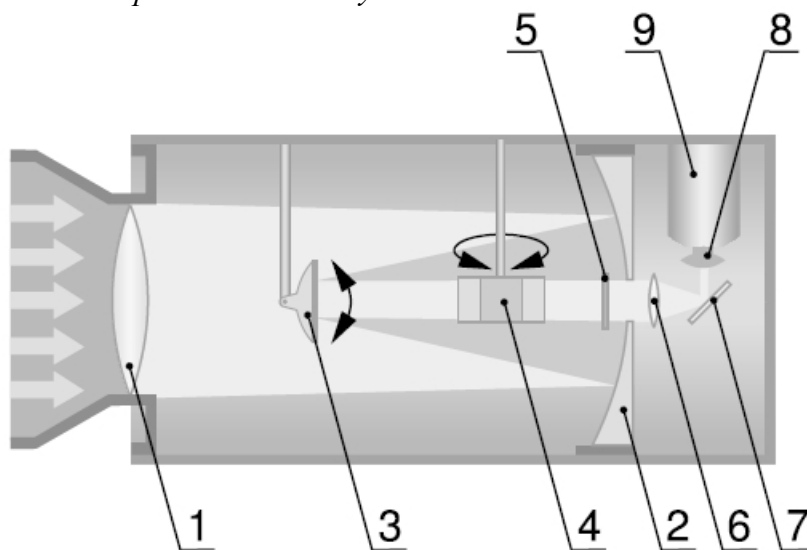
#### 4.0.2 Nevýhody bezdotykového merania

- možnosť merať len povrchovú teplotu telesa
- chyby merania spôsobené optickou priepustnosťou prostredia
- pre správne meranie teploty, musíme poznať emisivitu meraného telesa
- veľký vplyv na meranie majú dážď, prach, para a plyny [11]

## 4.1 Termovízne prístroje

Termovízne prístroje slúžia na zobrazenie teplotného poľa na povrchu meraného povrchu. Využívajú vyžarovanie objektov v infračervenej oblasti spektra. Teplotné pole je snímané špeciálnou kamerou s teplotným snímačom a zobrazuje sa na obrazovke. Pole sa zobrazuje ako termogram v rôznych farebných odtieňoch. Základ termovízneho systému predstavuje prvok citlivý na dopadajúce infračervené žiarenie. Najpoužívanejšie prvky sú kvantové alebo pyroelektrické detektory. Kvantový detektor pri dopade infračerveného žiarenia zvýši svoju elektrickú vodivosť. Kvôli tomuto faktoru sa musí chladiť na nízku teplotu. Pyroelektrický detektor sa pri dopade infračerveného žiarenia ohreje a vznikne v ňom elektrický náboj. Na rozdiel od kvantových detektorov, nevyžadujú chladienie. Termovízne prístroje sa konštruujú ako systémy s postupným opticko-mechanickým rozkladom obrazu (obr. 10). Tepelné lúče ktoré vyžaruje meraný objekt, prechádzajú cez objektív kamery (1) a dopadajú na duté zrkadlo (2). Od neho sa odrážajú na ploché zrkadlo (3) a ďalej sa lúče odrážajú a sústreďujú na osemboký hranol (4). Rozkmitaný lúč pozdĺž riadka prechádza clonou (5), šošovkou (6) a zrkadlo (7) ho odráža na fotočlen (8). Fotočlen sa nachádza na dne Dewarovej nádoby (9) naplnenej tekutým dusíkom, čím sa zabezpečuje chladienie fotočlena. [2]

Obr. 6 - Termovízia s opticko-mechanickým rozkladom obrazu

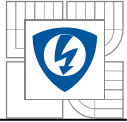


## 5. Vznik tepla na elektrických strojoch

### 5.1 Úvod do problematiky elektrických motorov

Elektrický motor je konštrukčne veľmi zložitý stroj, ktorý je zložený z rady rôznych obvodov a materiálov. Je to točivý stroj, ktorý mení elektrickú energiu na mechanickú prácu, na základe elektromagnetického princípu. Základom tohto princípu je vzájomné silové pôsobenie elektromagnetických polí, vytváraných elektrickými obvodmi motoru, ktorými preteká elektrický prúd. Túto silu popisuje Lorentzov zákon sily. V rotačnom motore je umiestnený rotor tak, aby magnetické pole vytvárané vo vodičoch rotora a magnetické pole statoru vyvíjali krútiaci moment prenášaný na rotor stroja. Tento krútiaci moment spôsobuje rotáciu rotora, motor sa točí a vykonáva mechanickú prácu. Z elektrických motorov sú najvýznamnejšie a najvyužívanejšie motory asynchrónne a synchronne.





## 5.2 Jednosmerné motory

Jednosmerný stroj (obr.č.7) je druh točivého elektrického stroja na jednosmerný prúd, pri ktorom os magnetického poľa budiaceho systému vinutí nemení v priestore svoj smer. Konštrukcia tohto stroja pozostáva zo statoru z masívnej konštrukcie, ktorý má vyjadrené póly, tzv. pólové nástavce, z rotoru, inak nazývaného kotva, ktorý je zložený z plechov a drážok, v ktorých je uložené rotorové vinutie. [19]Rotor je napájaný jednosmeným prúdom, cez kefový zberací systém na komutátore. Princíp činnosti je v podstate jednoduchý. Budiace vinutie statora vytvára statické magnetické pole. Rotor je napájaný jednosmerným prúdom, ale komutátor vytvorí striedanie polarít napätia na jednotlivých cievkach vinutia, to znamená, že rotorovým vinutím preteká striedavé napätie. Charakter poľa rotora je taký, aby zabezpečoval v interakcii s poľom statora, otáčanie rotora v určitom smere. V generátorickej prevádzke je napájané len budiace vinutie, rotor je mechanicky poháňaný, pričom sa v cievkach vinutia indukuje striedavé napätie, ktoré je komutátorom usmernené a na svorkách stroja sa objaví jednosmerné napätie. Najpoužívanejšie jednosmerné stroje sú: [6]

- Cudzobudený stroj – obvod budenia je napájaný nezávisle od obvodu rotora.
- Derivačný stroj – obvod budenia je napájaný z toho istého zdroja ako obvod rotora.
- Sériový stroj – obvod budenia je v sérii s obvodom rotora (jeden napájací zdroj).
- Kompoundný stroj – má dva obvody budenia, pričom jeden je zapojený ako derivačný a druhý ako sériový.

Rýchlosť jednosmerného motora je priamo úmerná veľkosti napájacieho napätia a záťaži na výstupnom hriadeľi (brzdny moment). Rýchlosť motora pri danom brzdnom momente je úmerná napätiu a točivý moment je úmerný prúdu. Rýchlosť motora je možné regulovať zmenou vstupného napätia. [7]

Výhodou jednosmerného motora je jeho jednoduchosť a univerzálnosť. Sériový a derivačný motor môžu pracovať aj na striedavý prúd nízkych frekvencií. Ďalšou výhodou oproti striedavým motorom je možnosť dosiahnuť ľubovoľné otáčky (motory na striedavý prúd majú obvykle otáčky obmedzené frekvenciou elektrorozvodnej siete, napr. pri dvojpólovom asynchrónnom motore  $50\text{Hz} = 3000\text{ ot/min}$ ). Preto sa tieto motory používajú napr. vo vítačkách, mixéroch, pohone automobilov a dopravných zariadení (napr. lokomotívy, trolejbusy, električky a pod.) [7]

Najväčšou nevýhodou jednosmerných motorov je existencia komutátora. Je to mechanický prepínač, ktorý spína veľké prúdy a je preto náročný na údržbu a zoradenie. Zároveň je mechanicky a elektricky (iskrenie) veľmi namáhaný, a po čase je nutná výmena zberačov (uhlíkov), neskôr i celého komutátora (resp. rotora). Iskrenie je zdrojom elektromagnetického rušenia, ktoré sa musí tlmiť dodatočnými elektrickými obvodmi. S rozvojom silnoprúdej elektroniky (výkonové tyristory, triaky, tranzistory) sú jednosmerné motory postupne vytlačované motorami s rotujúcim magnetickým poľom budeným elektronicky. [7]

Obr. č.7 – ukážka jednosmerného motoru HPI Saturn 20T



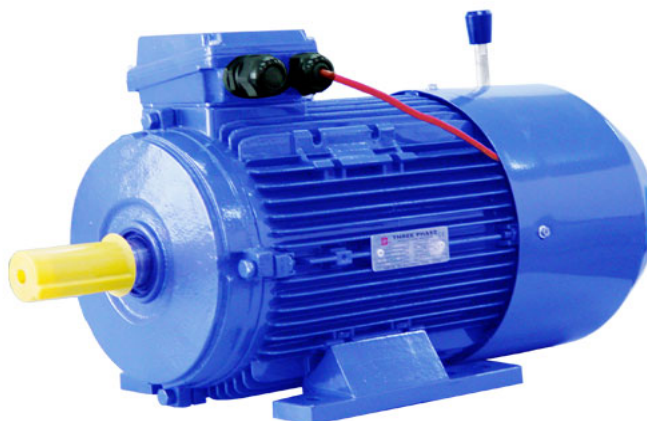
## 5.3 Striedavé motory

### 5.3.1 Synchronne motory

Synchronný stroj (obr. č.8) je v princípe obrátený generátor striedavého prúdu. Tvorí základnu pre výrobu elektrickej energie a svoj názov majú odvodený od toho, že ich rotor sa otáča rovnakou (synchronnou) rýchlosťou ako točivé magnetické pole statoru. Ich výkony v dnešnej dobe dosahujú hodnôt až 1500 MVA. Používajú sa ako zdroje elektrickej energie pre pohon zariadení bez rázu a s ľahkým rozbehom. Sú výhodné pre pohon veľkých kompresorov, čerpadiel, ventilátorov, automobilov, lietadiel, žeriavov a elektrocentrál. Vyrábajú sa ako trojfázové a jednofázové. Ich hlavnou nevýhodou je, že sa samy z kľudu nerozbehnú, teda je potrebné ich roztočiť na pracovné otáčky pomocou iného stroja alebo pomocným asynchrónym vinutím.[18]

Synchronný motor sa skladá z rotoru, ktorý je tvorený magnetom alebo elektromagnetom, a statorom ktorý vytvára pulzné alebo častejšie rotujúce magnetické pole. Magnet umiestnený v rotore sa snaží uchovať si svoju konštantnú polohu voči otáčavému magnetickému poli vytváraného priechodom striedavého prúdu v statore. [8]

Obrázok č. 8 – Ukážka synchronneho motoru



Špeciálnym druhom viacpólového synchronného motora je krokový motor. Využíva sa predovšetkým tam, kde je potrebné presne riadiť nie len otáčky, ale aj konkrétnu polohu rotora. Používajú sa v presnej mechanike, regulačnej technike, robotike a pod. Základný princíp krokového motora je - prúd prechádzajúci cievkou statora vytvorí magnetické pole, ktoré pritiahne opačný pól magnetu rotora. Motor je schopný v tejto polohe presne stáť. Vhodnou kombináciou zapojenia cievok vznikne rotujúce krokové magnetické pole, ktoré nielen otáča rotorom, ale zabezpečuje aj jeho presnú polohu voči statoru. Kvôli prechodovým javom je rýchlosť otáčania motora limitovaná. Pri jej prekročení motor začne strácať kroky. [7]

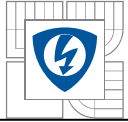
Podľa spôsobu riadenia krokových motorov rozoznávame unipolárne a bipolárne motory. Pri unipolárnom riadení prechádza prúd v jednom okamihu práve jednou cievkou. Výhodou je malý odber, nevýhodou malý krútiaci moment. Pri bipolárnom riadení prechádza prúd vždy dvoma protiahlými cievkami s navzájom opačne orientovanými magnetickými pólami. Výhodou je väčší krútiaci moment, väčšia stabilita kroku, nevýhodou vyššia spotreba. [8]

### 5.3.2 Asynchrónne motory

Asynchrónny motor (obr.č.9) je v praxi najbežnejší v oblastiach priemyslu, dopravy ale aj v domácnostiach. Jeho výkon sa pohybuje od niekoľko wattov až po niekoľko sto kilowattov. Najrozšírenejším typom asynchrónneho stroja je trojfázový asynchrónny motor, ktorého statorové vinutie je pripojené na troj fázovú sieť a vytvára točivé magnetické pole, ktoré pretína vodiče rotora, indukuje v nich napätie a v prípade, že vinutie rotora je uzatvorené, preteká nimi prúd, ktor vytvára magnetické pole rotora. Vzájomným pôsobením magnetických polí vzniká sila, pôsobiaca na vodiče v smere pohybu magnetického pola statoru. Asynchrónny motor má oproti synchronnému inú konštrukciu rotora. [18] Rotor sa obvykle skladá zo sady vodivých tyčí, usporiadaných do tvaru valcovej klieťky. Tyče sú na koncoch vodivo spojené a rotor sa potom nazýva „kotva nakrátko“. Rotujúce magnetické pole statoru indukuje v tyčiach rotora elektrické prúdy, ktoré vytvára svoje vlastné elektromagnetické pole. Obe magnetické polia spolu navzájom reagujú a vzniká tak elektromotorická sila. Otáčky rotora vzrastajú a ako sa približujú otáčkam magnetického poľa, klesajú indukované prúdy. Ak je motor minimálne zaťažený, nikdy nedosiahne otáčok daných frekvencií napájacieho prúdu. [7]

Obr č.9 – Ukážka asynchrónneho motoru





## 5.4 Zaťažovanie elektrického stroja

Zaťažovanie elektrických strojov je dané spracovateľskou technológiou pracovných strojov a zariadení. Zvlášť elektrické pohony je možné zaťažovať podľa vopred danej časovej funkcie alebo v uzavretom regulačnom obvode, adaptívne k danej spracovateľskej technológii. [12]

Z hľadiska vyšetrovania zaťaženia ich môžeme rozdeliť do troch základných skupín, ktorým sa skutočné rozloženie viac alebo menej približuje:

- Trvalé zaťaženie – je to zaťaženie, pri ktorom motor dosiahne ustálené oteplenie, pri práci motora bez prestávok. Oteplenie a zaťaženie nemusia mať menovitú hodnotu
- Krátkodobé zaťaženie (krátkodobý chod) – predstavuje chod pohonu, kde doba zaťaženia je kratšia ako doba potrebná na ustálené oteplenie. Doba chodu naprázdno (prestávky) je tak dlhá, že stroj dosiahne teploty okolia (doby zaťaženia sú v rozsahu 5, 10, 15, 30, 45, 60, 90, 120 minút).
- Prerušované zaťaženie (prerušovaný chod) – počas tohto zaťaženia sa strieda zaťažovanie počas doby  $t_z$  a chodu naprázdno (prestávky) po dobu  $t_0$ . Zaťaženie je charakterizované zaťažovateľom:

$$z = \frac{t_z}{t_c} \cdot 100 = \frac{t_z}{t_z - t_0} \cdot 100 [\%] \quad 1.5$$

$t_c$  – doba cyklu (predpokladá sa 10 minút) [15]

Elektrické pohony sa vyrábajú zo zaťažovateľom 15, 25, 40, 60% (napr. žeriavové motory). V praxi sa vyskytujú ešte ďalšie spôsoby zaťaženia a to najmä:

- Hodinové zaťaženie – je také zaťaženie (výkon, prúd), pri ktorom dosiahne stroj menovité oteplenie za doby 60 minút (1 hodina). Vyskytuje sa hlavne v oblasti elektrickej trakcie najmä pre trakčné motory. Na jeho základe sa zaviedli odvodené údaje ako hodinový výkon a hodinový prúd.
- Zaťažovanie podľa zaťažovacieho diagramu (zaťažovacieho cyklu) – zaťažovací diagram je vopred známy alebo sa stanovuje odborným odhadom ako typový pracovný cyklus.

[12]

## 5.5 Vznik tepla v točivých elektrických strojoch

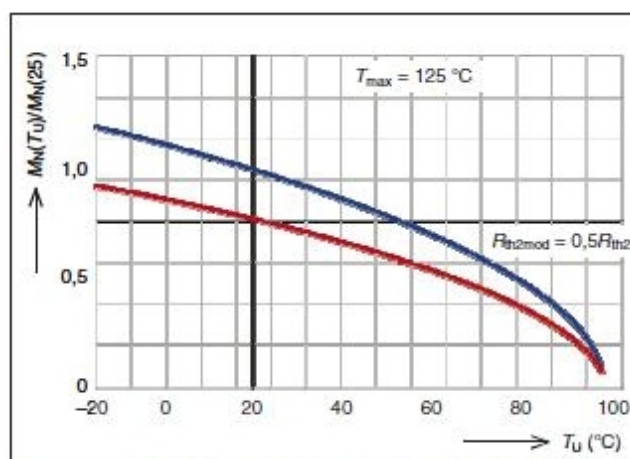
Z tepelného hľadiska predstavuje elektromotor nehomogénne teleso s rôznou tepelnou vodivosťou použitých materiálov. Zdrojom tepla v točivom elektrickom stroji je viacero, no prevažne sú to časti ktorými prechádza elektrický prúd, alebo časti v ktorých vznikajú straty v železe a mechanické straty. Tieto straty nie sú v elektrickom stroji rozložené rovnomerne. Teplota a oteplenie motora, je veľmi dôležité z hľadiska dimenzovania motora. Typovú veľkosť motora určujeme z podmienky prevádzkového a dovoleného oteplenia motora, ktorého hodnota je daná tepelnou triedou použitej izolácie vinutia. Výrobca garantuje, že izolácia vinutia bude mať zaručenú životnosť, pokiaľ neprestúpi oteplenie motora hodnoty ktoré podrobne určuje norma ČSN 350 000.

Tabuľka č.8 – *dovolené oteplenia motoru*

Teplotná trieda	Oteplenie statoru	Oteplenie rotoru
A	60°C-65°C	60°C
E	75°C	75°C
B	80°C-85°C	80°C
F	100°C-110°C	105°C
H	125°C-130°C	125°C

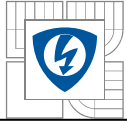
Po prekročení hodnôt udaných v tabuľke 8, izolácia stárne a jej životnosť sa skraca. Merný odpor medi vo vinutí s teplotou rastie o 0,392% na kelvin, čo znamená, že vinutie má pri 75°C o 20% väčší odpor než pri 25 °C. Ak chceme teda dosiahnuť rovnaký moment pri zvýšenej teplote, musíme zvýšiť napätie. Teplota taktiež ovplyvňuje tvar hysteréznej sľučky materiálu permanentného materiálu. Zjednodušene, pri rastúcej teplote, sa pohyby atómov permanentného magnetu zintenzívňujú. Tím dochádza k narušeniu orientovaného usporiadania magnetických domén, ktorého sme dosiahli magnetovaním. Rastom teploty sa znižuje remanencia magnetu a z tohto dôsledku klesá aj magnetická indukcia  $B_{\delta}$  vo vzduchovej medzere. Rovnaký prúd vo vinutí preto vytvorí menší moment. Koercivita  $H_c$  sa s teplotou zvišuje a magnet je odolnejší proti odmagnetovaniu pôsobením rekacie kotvy alebo zväčšovaním vzduchovej medzere. Vplyv teploty na menovitý moment motoru je graficky znázornený na obr. 10 červenou krivkou. Modrá krivka ukazuje, jak sa situácia môže zlepšiť zabudovaním motoru do rámu stroja. Vodorovná os je teplota v °C a zvislá os predstavuje menovitý moment. Z grafu je zrejmé, že so vzrastajúcou teplotou klesá moment motoru. Pri teplote 100°C, klesá moment k nule, čo nepriaznivo ovplyvňuje výkon stroja. [9]

Obr č. 10 – *vplyv teploty na menovitý moment*



### 5.5.1 Vznik tepla stratami

Pojem straty a stratová energia zahrňuje všeobecne rozdiel medzi vstupujúcou energiou a energiou na výstupe zariadenia. Energetická účinnosť je pomer výstupnej energie k energii odoberanej na vstupe. Vypočítame ju:



$$\eta_w = \frac{W_2}{W_1} = \frac{W_2}{W_2 + \Delta W} = \frac{W_1 - \Delta W}{W_1} \quad 1.6$$

kde  $\Delta W$  sú celkové straty v danej sústave pohonu. (elektrické pohony)

Počas práce elektrického pohonu vznikajú v jeho jednotlivých častiach straty, ktoré sa menia na teplo. Vznikajú prúdom ktorý prechádza vinutím elektrického stroja, vírivými prúdmi a hystereziou v magnetických obvodoch. Straty a stratové teplo vznikajúce v elektrickom stroji závisí od jeho zaťaženia. Straty môžeme rozdeliť na:

- *Straty závislé na zaťažení* - tieto straty sú závislé na ohmických odporoch vinutí elektrických strojov a sú úmerné štvorcu zaťažovacieho prúdu:

$$\Delta P = RI^2 \quad 1.7$$

Jedná sa väčšinou o straty vo vinutí kotvy a pomocných pólov cudzobudovaných jednosmerných strojov, vrtátane strát vo vinutí asynchrónnych motorov, transformátorov, v kotve synchrónnych strojov, tlmiviek a podobne.

- *Konštantné straty:*

- *Straty vo vinutí  $\Delta P_j$ :* u točivých elektrických strojoch tvoria až 35 – 60% celkových strát
- *Straty na budiacom vinutí  $\Delta P_f$ :* tvoria menšiu časť strát – 6-15% a u synchrónnych motoroch ich považujeme za konštantné.
- *Straty na komutátore a zberacích krúžkoch  $\Delta P_{kl}$ :* u synchrónnych a asynchrónnych strojoch tvoria 4-6% celkových strát.
- *Mechanické straty: trením ( $\Delta P_{\text{mech,t}}$ )* - Keďže je elektrický pohon točivý stroj, obsahuje časti v ktorých nastáva trenie. Rotor motoru obsahuje klzné ložiská v ktorých nastáva teplo a so zvyšujúcimi otáčkami motora sa toto teplo zvyšuje. Dnešné motory majú ložiská s trvalou náplňou maziva, takže by teoreticky nebolo potrebné po celú dobu životnosti motora, ložiská domazávať. Skutočnosť je ale iná, a ak chceme teplo vzniknuté v tejto časti motoru znížiť, je potrebné časom staré mazivo vymyť a nahradiť novým, alebo hlučné problémové ložisko vymeniť.  
Ventilačné straty ( $\Delta P_{\text{mech,v}}$ )
- *Straty v magnetickom obvode: vírivé ( $\Delta P_{\text{Fe,v}}$ ):* vírivý prúd je elektrický prúd vznikajúci v plošných alebo objemových vodičoch, keď sa v ich okolo mení magnetický indukčný tok. Indukované prúdy majú v tomto prípade charakter prúdových slučiek. Straty vzniknuté vírivými prúdmi sú závislé na frekvencii a môžeme ich vyjadriť vzťahom:

$$P_v \approx f^2 \cdot B^2 \quad 1.8$$

Tieto straty môžeme obmedziť napríklad použitím navzájom izolovaných plechov, použitím materiálu s veľkým odporom alebo znížením indukovaného napätia. (wiki)

hysterézne ( $\Delta P_{\text{Fe,h}}$ ): predstavujú energiu spotrebovanú na jeden magnetizačný cyklus ktorá je úmerná ploche hysteréznej slučky. Hysterézna slučka magnetického materiálu je uzatvorená krivka, ktorá vyjadruje závislosť  $B = f(H)$  pri pomalej, plynulej zmene intenzity magnetického poľa od  $+H_s$  do  $-H_s$ .

celkové približné ( $P_{Fe}$ )

- Straty v meničoch: straty v prúdových obvodoch, straty v polovodičových súčiastkach, straty konštantné v riadiacich a pomocných obvodov a straty komutačné. [9]

## 5.6 Oteplenie elektrických prístrojov

Hlavným zdrojom tepla v elektrických prístrojoch, ale aj rozvádzačoch elektrickej energie, sú spomínané straty vo vodičoch ktorými prechádza elektrický prúd. Toto teplo sa z časti odvedie povrchom  $A$  vodiča do okolia a z časti zostáva vo vodiči a zvyšuje jeho teplotu. Matematicky to môžeme zapísať nasledovne:

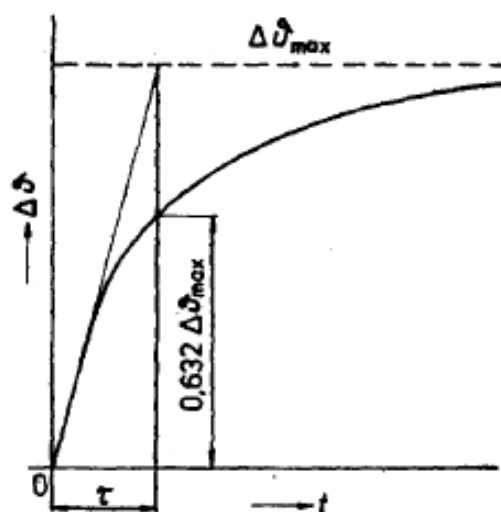
$$R.I^2 dt = \alpha_0 \cdot A \cdot \Delta \vartheta dt + cVd \quad 1.9$$

Riešením tejto rovnice dostaneme vzťah pre okamžitú hodnotu oteplenia:

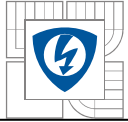
$$\Delta \vartheta = \frac{R.I^2}{\alpha_0 \cdot A} \left[ 1 - \exp - \frac{\alpha_0 \cdot A}{cV} \cdot t \right] = \Delta \vartheta_{\max} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad 2$$

Jeho grafom je exponenciála blížiac sa veľkosti ustáleného oteplenia  $\Delta \vartheta_{\max} = R.I^2 / (\alpha_0 \cdot A)$  s časovou konštantou  $\tau = \frac{cV}{\alpha_0 \cdot A}$ . Graficky to znázorňuje obr. 11, kde vodorovná os znázorňuje čas a zvislá os oteplenie vodiča. Časová konštanta vyjadruje dobu, za ktorú by teleso dosiahlo ustáleného oteplenia v prípade, že by sa z povrchu telesa neodvádzalo žiadne teplo. [14]

Obr. č.11– graf oteplenia vodiča v elektrickom prístroji



Podrobné vyšetrenie tepelných dejov a oteplenia prístroja sa prevádza na matematických modeloch a neskôr overuje na reálnych elektrických strojoch. Stratové teplo sa odvádza buď do okolného vzduchu alebo do rôznych chladiacich systémov. Predávanie tepla medzi jednotlivými



časťami motoru a medzi motorom a chladiacim systémom sa deje všetkými druhmi šírenia tepla a to: sálaním, vedením a prúdením. Ak chceme porozumieť tejto problematike, musíme zaviesť zjednodušujúce teoretické predpoklady. [9] V tejto časti predpokladáme že motor je homogénne telesom s nekonečne veľkou tepelnou vodivosťou, alebo s rovnomerne rozloženými zdrojmi tepla, čo v praxi znamená, že teplota motoru je vo všetkých častiach rovnaká. Ďalej predpokladáme, že teplo predávané okoliu je úmerné iba rozdielu teplôt. Za týchto predpokladov môžeme zapísať rovnicu tepelnej rovnováhy motoru, ktorá hovorí že množstvo tepla vzniknuté v motore za jednotku času je rovná súčtu tepla spotrebovaného k otepleniu telesa motoru a tepla odvedeného do okolia. Preto platí rovnica:

$$\Delta P dt = Cd(\Delta \vartheta) + A\Delta \vartheta dt \quad 2.1$$

Kde  $\Delta P dt$  sú straty motoru vo Wattoch,  $C$  je tepelná kapacita motoru ( $J.K^{-1}$ ),  $\Delta \vartheta$  je oteplenie v Kelvinoch a  $A$  je súčiniteľ prestupu tepla do chladiča ( $W.K^{-1}$ ). [9]

Ľavá strana uvedenej rovnice predstavuje straty (energiu), ktorá sa počas  $dt$  mení na teplo. Prvý člen pravej strany predstavuje množstvo tepla, ktorým sa stroj otepluje a druhý člen pravej strany predstavuje množstvo tepla, ktoré sa odvádza do okolia.

Po úpravách:

$$(P_z - S_V \vartheta) dt = Mcd\vartheta \Rightarrow dt = Mc \frac{d\vartheta}{P_z - S_V \vartheta} \quad 2.2$$

Ak zavedieme označenie:

$$P_z - S_V \vartheta = u \quad 2.3$$

A deriváciou:

$$-S_V d\vartheta = du \Rightarrow d\vartheta = -\frac{du}{S_V} \quad 2.4$$

Dosadením tohto výrazu do základnej rovnice dostaneme:

$$dt = -\frac{Mc du}{S_V u} \quad 2.5$$

Následnou integráciou:

$$t = -\frac{Mc}{S_V} (\ln u - \ln k) = -\frac{Mc}{S_V} \ln \frac{u}{k} \quad 2.6$$

Po úprave a dosadení

$$-t \frac{S_V}{Mc} = \ln \frac{P_z - S_V \vartheta}{k} \Rightarrow e^{-t \frac{S_V}{Mc}} = \frac{P_z - S_V \vartheta}{k} \Rightarrow P_z - S_V \vartheta = k e^{-t \frac{S_V}{Mc}} \Rightarrow S_V \vartheta = P_z - k e^{-t \frac{S_V}{Mc}} \quad 2.7$$
$$\vartheta = \frac{P_z}{S_V} - \frac{k}{S_V} e^{-t \frac{S_V}{Mc}}$$

Integračnú konštantu určíme z počiatočných podmienok pre:  $t = 0, J = 0$

$$0 = \frac{P_z}{S_V} - \frac{k}{S_V} e^0 \Rightarrow \frac{k}{S_V} = \frac{P_z}{S_V} \Rightarrow k = P_z \quad 2.8$$

Dosadením do pôvodnej rovnice pre  $J$  dostaneme rovnicu exponenciály, ktorá charakterizuje priebeh otepľovania a je pomocou nej možné určiť ustálenú teplotu a časovú konštantu:

$$\vartheta = \frac{P_z}{S_V} - \frac{P_z}{S_V} e^{-t \frac{S_V}{Mc}} \Rightarrow \vartheta = \frac{P_z}{S_V} \left( 1 - e^{-t \frac{S_V}{Mc}} \right) \quad 2.9$$





Na určenie ustálenej teploty použijeme čas  $t = \infty$  kedy platí  $J = J_k$  a dosadením dostaneme:

$$g_k = \frac{P_z}{S_V} \quad 3$$

Z uvedenej rovnice vyplíva, že pri ustálenom oteplení sa všetky straty odvádzajú do okolia.  
Časová konštanta  $t$ :

$$\tau = \frac{Mc}{S_V} = \frac{Mc g}{S_V g} \Rightarrow \frac{\text{nahronadené teplo}}{\text{vyžiarené teplo}} \quad 3.1$$

Zavedením a dosadením dostaneme:

$$g = g_k \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad 3.2$$

Ak dosadíme do rovnice za  $t = t$ :

$$g = g_k (1 - e^{-1}) = g_k \left( 1 - \frac{1}{e} \right) = 0,63 g_k \quad 3.3$$

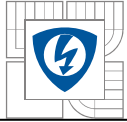
To znamená, že za dobu časovej konštanty sa zariadenie ohreje na 63% ustálenej konštanty.  
[15]

## 6. Modelovanie elektrických prístrojov v grafickom rozhraní

### 6.1 Autodesk Inventor

Program Inventor 2009 (obr.č.14) pochádza od firmy Autodesk. Spoločnosť Autodesk už od roku 1982 uvádza na trh špičkové 2D a 3D technológie, ktoré umožňujú návrhárom vizualizovať, simulovať a analyzovať praktické fungovanie ich nápadov. Behom 26 rokov pôsobenia firmy na trhu, vyvynuli pracovníci globálny ekosystém. Komunita, ktorá vznikla zahŕňa: 6 miliónov užívateľov, 1700 partnerov po celom svete a cez 1100 školiacich stredísk. Program Inventor patrí ku špičke softwaru vytvoreného v Autodesku. Medzi inými v zozname ponúkaných produktov nájdeme AutoCAD, Autodesk 3ds Max, Autodesk ImageStudio či DWG TrueView. Produktová rada Autodesk Inventor poskytuje komplexné riešenie 3D strojárnských návrhov, simuláciu výrobkov, tvorbu nástrojov, ktoré overujú formu, prispôsobenie a funkciu návrhu skôr ako je daný výrobok vyrobený. Taktiež umožňuje integráciu dát AutoCADU a 3D návrhu do jediného digitálneho modelu, z ktorého je jednoduché vytvorenie digitálneho prototypu výsledného výrobku. Model nakreslený v Inventore je presným 3D digitálnym prototypom, tzn. že návrhy je jednoduché optimalizovať a overovať v digitálnej podobe skôr, ako sa začne so sériovou výrobou prototypu. Inventor je súčasťou produktovej rady AutoCAD Inventor Suite. Jeho hlavné funkcie sú:

- 3D strojárnské navrhovanie
  - Konceptia projektu a systémový návrh
  - Návrh plastových častí
  - Návrh plechových častí
  - Návrh sústav
- Komunikácia návrhu a správa dat



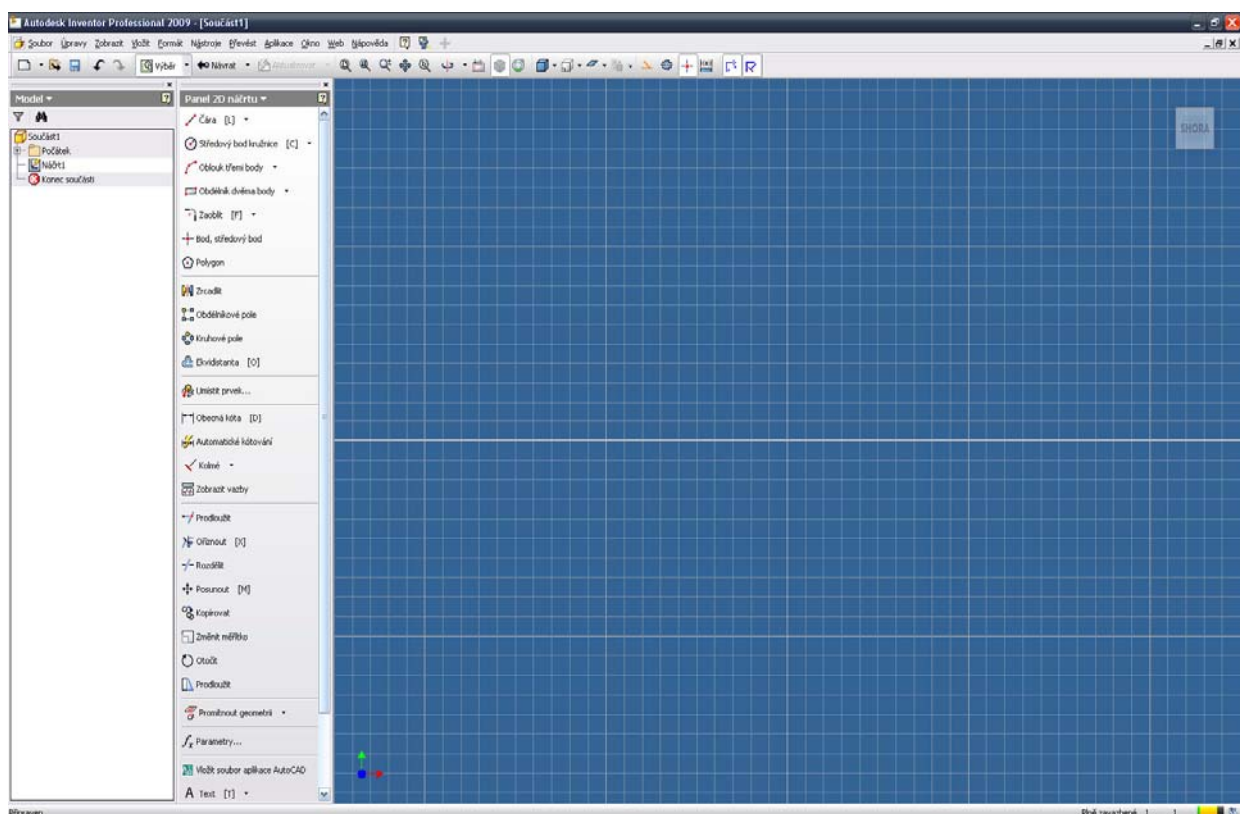
- 
- Projektová a výrobná dokumentácia
- 3D vizualizácia a komunikácia návrhu
- Správa dát
- CAD nástroje pre produktívnejšiu prácu
- Integrácia s aplikáciou AutoCAD
- Natívny prekladač a výmena dát
- Výukové materiály
- Prispôsobenie a automatizácia

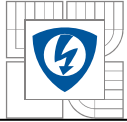
[16]

Inventor je parametrický, adaptívny 3D modelár, ktorý je aplikáciou operačného systému Windows. Aktuálna verzia programu je Inventor 2010 a to v 32 bitovej alebo 64 bitovej verzii. Obsahuje funkcie pre adaptívne 3D navrhovanie, tvorbu 2D výkresovej dokumentácie, prezentácie a fotorealistickej vizualizácie a animácie. Pôvodná česká aplikácia s názvom Mechsoft Profi tvorí základ pre Inventorom podporované modelovanie riadené fyzikálnymi vlastnosťami konštruovaného výrobku.

Základ konštruovania tvoria súčasti, ktorých geometria môže byť odvodená od parametrických 2D náčrtov. Tieto časti potom môžu byť kombinované a viazané rôznymi typmi väzieb do sústav. Výhodou Inventoru je, že pri zmene kóty alebo parametru geometrie, je pregenerovaná automaticky celá sústava, vrátane výkresovej dokumentácie. Pre tvorbu výkresovej dokumentácie ponúka Inventor 2D funkcie veľmi podobné systému AutoCAD a výkresy spracováva vo formáte DWG. [16]

Obr. č.12 – pracovné prostredie programu Autodesk Inventor 2009





## 6.2. Ansys Workbench

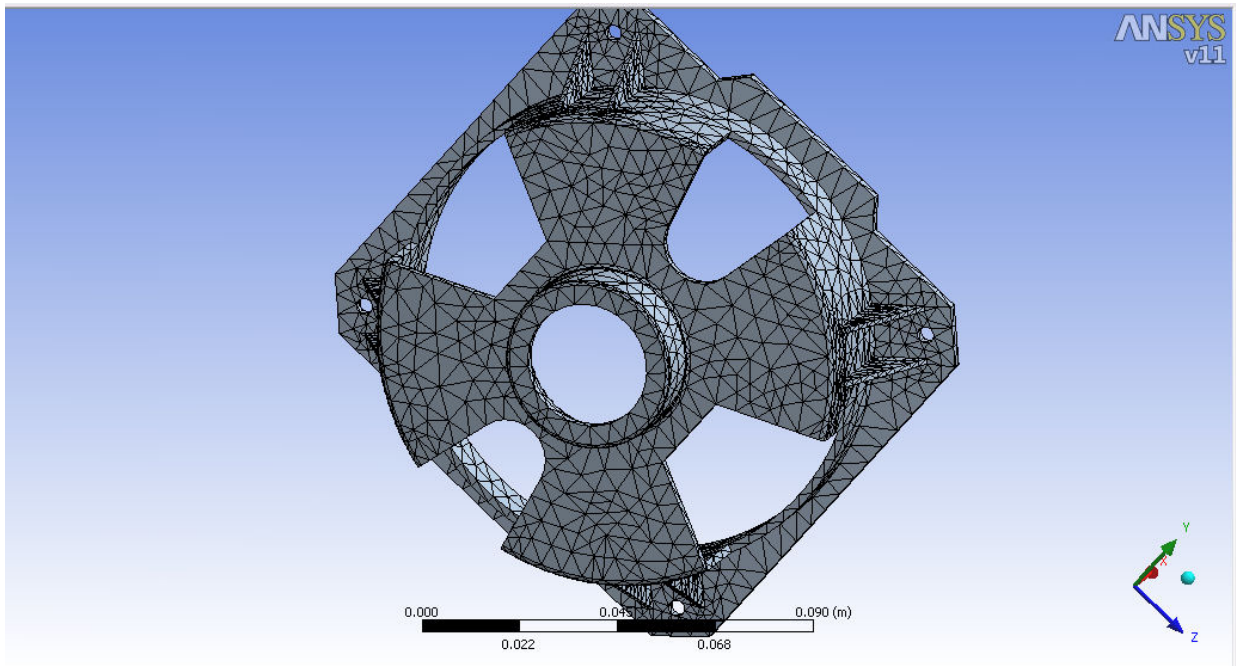
Ansys je programový balík založený na metóde konečných prvkov, ktorý je určený pre riešenie rozsiahlych lineárnych ale aj nelineárnych úloh mnoho rôznych kategórií: štrukturálnych, teplotných, teplotne-mechanických, elektromagnetických, akustických atd. Základnou vlastnosťou Ansysu je priama podpora importu geometrií a modelov z CAD systémov.

Ansys je súčasťou balíka Ansys Workbench, ktorý je moderným prostredím združujúcim radu programov Ansys a to ako na výpočty pevnosti, dynamiky, teplotných polí, elektromagnetizmu a akustiky, tak aj na analýzy prúdením a ich interakciu. Toto prostredie obsahuje pre a post procesory pre jednotlivé typy analýz a zároveň zabezpečuje výmenu dát medzi jednotlivými programami pre modelovanie multifyzikálnych problémov. Ansys Workbench obsahuje nástroje:

- Ansys DesignSpace – moderný nástroj umožňujúci rýchle a jednoduché analýzy. Je plne integrovaný do prostredia Workbench. Program je predovšetkým určený pre konštruktérov a má priamu náväznosť na CAD programy. Je obojsmerne asociatívny s programami Autodesk Inventor, Autodesk Mechanical Desktop, Pro/Engineer, Solidworks, Solid Edge a Unigraphics. Z ostatných programov môže importovať geometriu vo formátoch Parasolid, Acis (SAT) a STEP.
- Ansys Professional – je plne integrovaný do prostredia Workbench. K základným možnostiam programu DesignSpace ponúka rozšírenia ako sú napríklad: výpočty harmonického budenia a lineárne dynamické analýzy na základe rozvoja vlastných tvarov kmitania, nelineárne statické výpočty, viac druhov kontaktných prvkov, väčší výber riešičov, možnosť analýzy prúdenia Ansys CFX a rada ďalších.
- Ansys Fatigue – umožňuje simulovať chovanie konštrukcie behom nízko alebo vysoko cyklického zaťažovania a hodnotenie únavy materiálu. Tento program je nutné dokúpiť ku programu Ansys Professional
- Ansys DesignXplorer – umožňuje optimalizáciu v prostredí Workbench. Môžeme ho použiť ako pre výpočty štrukturálne, tak aj pre výpočty prúdenia. [17]

Dôležitou časťou programu Ansys je tzv. Ansys Mesher. Mesh je vnútornou časťou počítačového inžinierskeho simulujúceho procesu. Mesh ovplyvňuje presnosť, konvergenciu a rýchlosť simulácie. Čas ktorý je venovaný „meshovaniu“ geometrie objektu, je často totožný s časom vytvárania výsledku. Je to v podstate univerzálny generátor mriežky pre všetky typy analýzy. Ansys predstavuje rýchly generátor siete pre konštruktérov, vytvára kvalitnú mriežku. Obsahuje najrôznejšie nástroje na riadenie kvality generácie mriežky. Podmnožinou Ansys Mesheru je Ansys CFX-Mesh. Je to generátor mriežky pre CFD analýzy. Obsahuje nástroje pre generáciu tetra mriežky s prizmatyckými vrstvami na definovaných 2D lokáciách. Užívateľ si teda môže vybrať medzi rôznymi druhmi Meshu. Ak je potreba vytvoriť zložitý model mriežky, alebo ak je zadaná geometria nekvalitná, užívateľ si navolí ICEM-CFD Mesh a riadi vytváraný model do posledného detailu. [17]

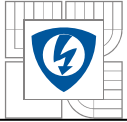
Obr. č. 13 – príklad Meshu prednej časti motora v programe Ansys



## 7. Modelovanie zadaného elektrického prístroja

Zadaným elektrickým prístrojom bol asynchrónny motor značky Muster (orb.č.14). Označenie motoru je Muster Nr. U-2336. Motor je jednofázový, pracuje s napätím 230V a frekvenciou 50Hz , menovité otáčky sú 17 654 ot/min, počet pólov je 18 a pochádza z práčky. Modelovanie motoru pozostávalo zo štyroch častí:

1. *časť predného krytu* – kryt má valcový charakter s rôznymi skoseniami, otvormi, rebrami a hranami. Taktiež obsahuje v prednej časti otvor pre uchytenie ložiska rotoru. Materiál predného krytu je hliník.
2. *statorová časť* – stator pozostáva z 84. pospájaných plechov o celkovej výške 55 mm. Materiál statoru je oceľ.
3. *časť zadného krytu* – z konštrukčného hľadiska veľmi komplikovaný komponent s rôznymi výklenkami, otvormi, skoseniami a rebrovaním. Má valcový charakter a materiál z ktorého je vyrobená je taktiež hliník. V zadnej časti sa nachádza otvor pre vloženie ložiska a taktiež svorkovnica pre prívod napätia.
4. *rotorová časť* – rotor motoru valcového charakteru ktorý má celkovú dĺžku 201 mm. Obsahuje predné a zadné ložisko, komutátor a rotorové vinutie. Materiál statoru je opäť oceľ.

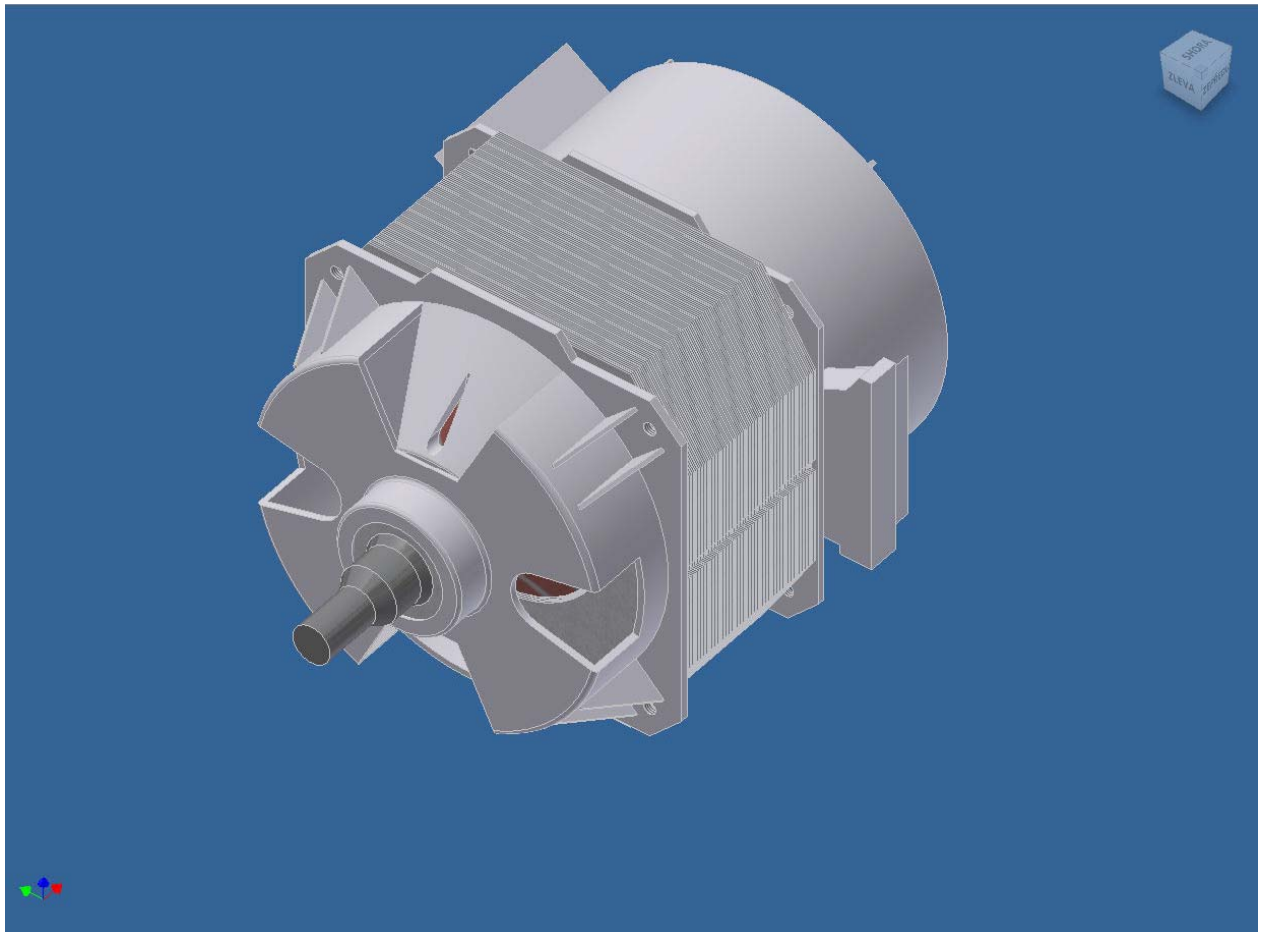


Obr. č. 14 – fotka motoru Muster



Každú časť motora som starostlivo zmeral, tak aby som dodržal vernú kópiu motora. Časti som vytváral v súboroch s príponou .ipt. Po vytvorení každej z častí motora v prostredí „Norma.ipt“ v Inventore, ktoré slúži na vytváranie 2D parametrického modelu a následne prevedenie do 3D, nastalo spojenie častí do jedného celku. Realizoval som ho v prostredí „Zvarenc“, ktorá má príponu súboru .iam. Prostredie „zvarenc“ slúži na vytváranie a umiestňovanie komponent. Po umiestnení komponenty do pracovného prostredia, môže užívateľ umiestnený objekt zrkadliť, vytvárať pole, vytvárať zväzok či kopírovať komponenty. Spájanie jednotlivých častí bolo v celku jednoduché. Používal som príkaz „Väzba“. Väzba obsahuje 4 základné druhy príkazov: väzba proti sebe, väzba pomocou uhlu, dotyková väzba a väzba pomocou vloženia jedného objektu do druhého. Vzniknutý model motora je rozmerovo verná kópia zadaného motora a je na obrázku č.15.

Obr.č.15 – namodelovaný motor Muster v Inventore 2009



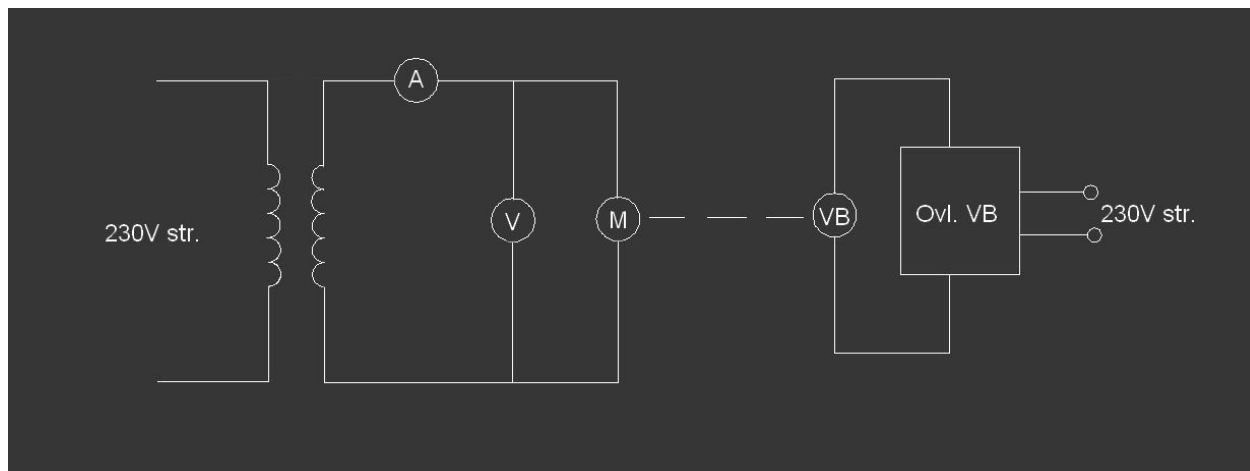
## 8. Meranie rozloženia teploty v laboratóriu

Meranie rozloženia teploty na zadanom elektrickom stroji prebiehalo v laboratóriu elektrických strojov na fakulte Elektrotechniky a komunikačných technológií, VUT, Brno. Podmienky pre meranie rozloženia teploty boli výborné a pod dohľadom vedúceho bakalárskej práce som meral na zadanom motore značky Muster. Schéma zapojenia motora do elektrického obvodu sa nachádza na obr. č. 16. Ako je z daného obrázku vidieť, motor je zapojený na striedavú sieť 230V. V meracom obvode máme pripojený ampérmeter a paralelne k motoru voltmeter na sledovanie priebehu napätia na motore. Pomocou spojky máme na motor pripojenú vírivú brzdu s ovládaním. Brzda je pripojená na striedavú sieť napätia o veľkosti 230V. Vírivá brzda pochádza od firmy VUES Brno s.r.o. Štítkové hodnoty brzdy (tab. č. 9):

Tab. č. 9 – štítkové hodnoty vírivej brzdy VUES Brno

<i>Výrobné číslo</i>	017223
<i>Typ</i>	R278C
<i>Menovité napätie a prúd</i>	230V a 6A
<i>Pracovná frekvencia</i>	50Hz
<i>Príkion</i>	1400 W
<i>Rok výroby</i>	1995

Obr. č. 16 – schéma zapojenia motoru



Popis obrázku č. 16 : A – ampérmeter, V – voltmeter, M – Motor, VB – vírivá brzda, Ovl.VB – ovládanie vírivej brzdy

Meranie rozloženia teploty na motore prebehlo celkom tri krát. Každé meranie bolo charakteristické iným priebehom zaťažovania motora, čo nám prinieslo rôznorodé výsledky ohľadom vzniknutej teploty na motore.

Použité prístroje pri meraní teploty:

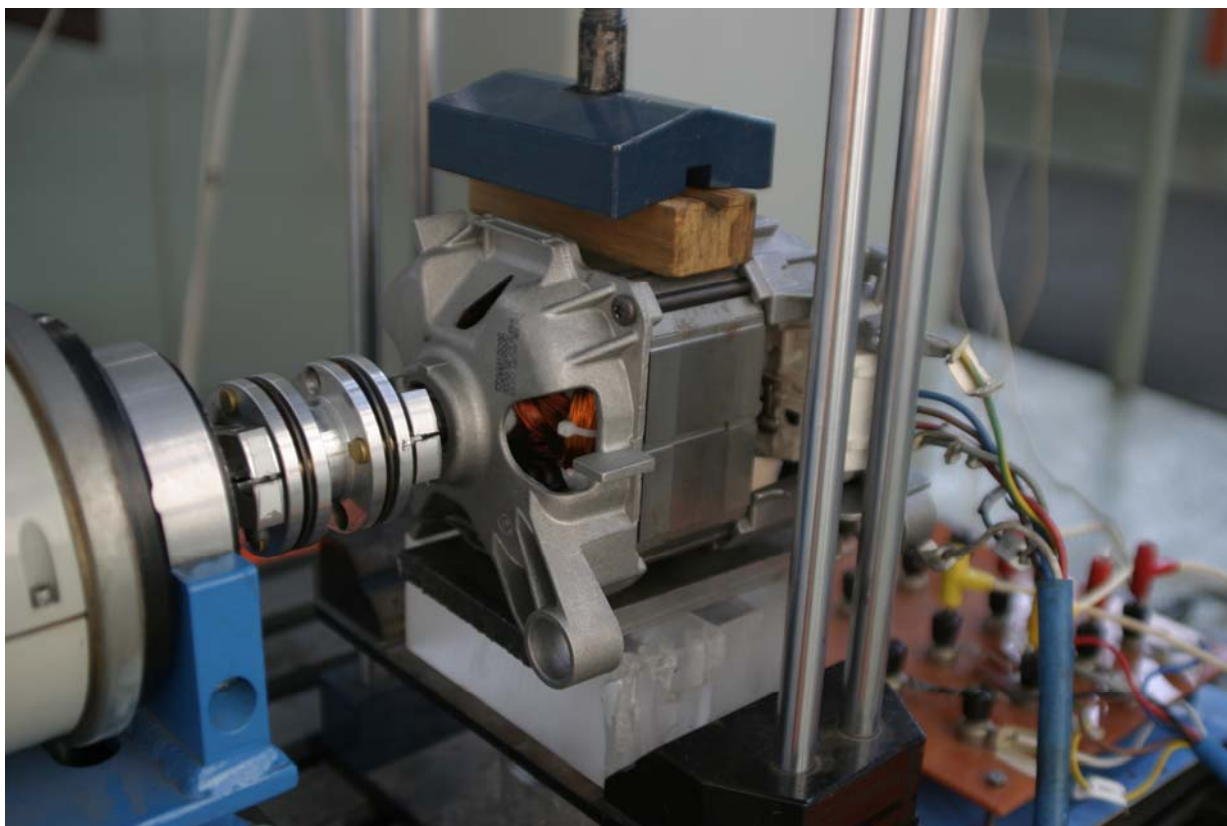
Tab. č. 10 – použité prístroje pri meraní

Prístroj	Typ
Motor Muster	Asynchrónny motor
Vírivá brzda	R278C
Voltmeter	240V, 5000Ω/V
Ampérmeter	DKP 1609/304
Termočlánok	Typ K
Termovízna kamera	SAT Infared HY6800
Extech termočlánkový prístroj	HD 200

#### Meranie rozloženia teploty číslo 1:

Prvé meranie rozloženia teploty bolo poznamenané komplikáciami vírivej brzdy. Brzda sa po určitom čase začala prehrievať, takže sme ju museli odľahčovať a zaťažovať po určitých časových intervaloch, aby nedošlo ku poškodeniu brzdy. Po zapnutí motora sme nastavili menovité napätie na 230V a motor dosiahol svojich menovitých otáčok. Ihneď sme ho zaťažili a to nastavením momentu vírivej brzdy na hodnotu 1,54 Nm. Otáčky motora klesli na 10 000 ot/min. Po piatich minútach sme brzdou odľahčili a nastavili moment na hodnotu  $M = 0,5$  Nm. Otáčky motora vzrástli na 10 200 ot/min. Po ďalších dvoch minútach sme nastavili moment vírivej brzdy na hodnotu 0,2 Nm a otáčky motora vzrástli na hodnotu 14 500 ot/min. Motor bežal naprázdno 29 minút, teplota na motore vzrastala, čo bolo dané priechodom prúdu vinutím statoru a veľkým odporom v klzných ložiskách, keďže sa nám rotor točil rýchlosťou 17650 ot/min.

Obr. č. 17 – fotografia zapojenia motora Muster pri meraní rozloženia teploty (všetky 3 merania)



Nasledovalo vypnutie motoru a za jednu minútu, zapnutie motoru pričom sme nastavili opäť menovité otáčky motoru. Po ďalších 9. minútach sme motor vypli a ukončili meranie. Namerané hodnoty z merania číslo jedna sú zaznamenané v tabuľke č. 11.

Tab. č. 11 – namerané hodnoty rozloženia teploty pomocou termočlánku pri prvom meraní

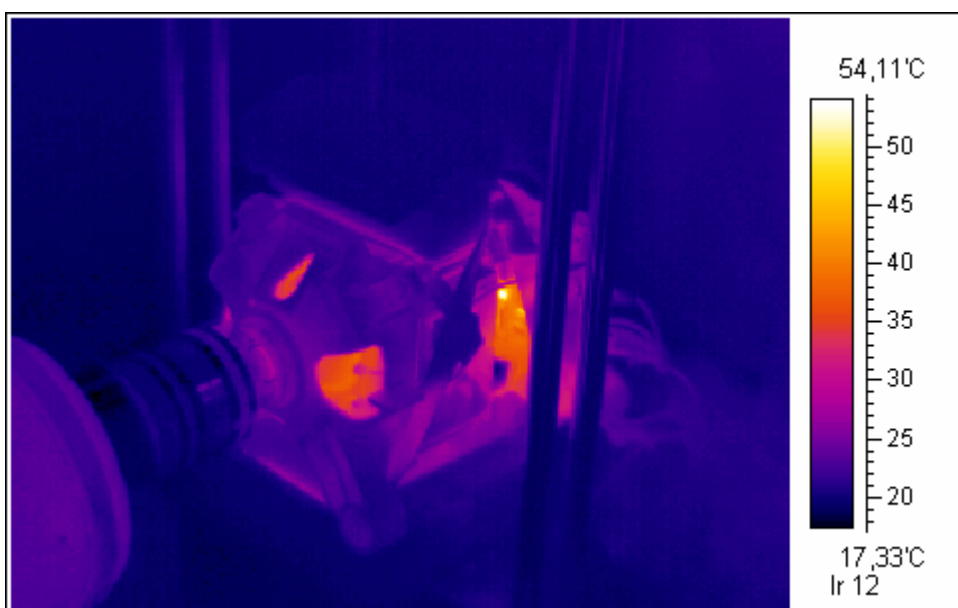
Poradové číslo	Umiestenie termočlánku	Teplota (°C)
T1	Predný kryt motoru	33,1
T2	Stator	33,8
T3	Zadný kryt motoru	33,9
T4	Stator z druhej strany	33,7
T5	Vinutie rotoru	39,1
T6	Vinutie statoru zpredu	38,9
T7	Kryt motoru zospodu	30,5
T8	Kryt motoru vnútri	31,3

Hodnoty namerané v tabuľke 11 boli zmerané pomocou dotykového termočlánkového prístroja. Presnosť merania v tomto prípade je veľmi dobrá a odčítané hodnoty sa zobrazujú priamo na veľkom grafickom displeji. K dispozícii sme taktiež mali termokameru značky SAT,



ktorá zobrazuje rozloženie teploty priamo v hľadáči kamery a dokáže priamo ukladať vyfotené zábery do vnútornej pamäti prístroja. Tieto zábery sa ľahko dajú preniesť do osobného počítača s ktorými môžeme ďalej pracovať. Zábery z prvého merania sa nachádzajú na obrázkoch č. 17 až 20. Termokamera mala základné nastavenia: vzdialenosť od objektu: 1m, emisivita meraného materiálu: 0,67, teplota okolia: 20°C. V termokamere sme mali umiestnené 4 merané body. T1 – na statore vinutia, T2 – vo vzduchovej medzere, T3 – krytie motoru zpredu a T4 – na statore v zadnej časti.

Obr. č. 18 – prvý snímok z merania číslo jedna vytvorený termokamerou SAT (po 20 minútach prevádzky)



Na obrázku č. 18 je zrejmé že, teplota vinutia na motore dosahuje miestami 40 až 45°C. Bieložlté miesto vpravo je svorkovnica motoru.

Obr. č. 19 druhý snímok z merania číslo jedna vytvorený termokamerou SAT (po 30 minútach prevádzky)



Na obr. č. 19 vidíme, že teplota motora mierne vzrastá a teplota vinutia dosahuje cez 45°C. Taktiež vidíme, že teplota vírivej brzdy stúpa a dosahuje okolo 35 °C.

Obr. č. 20 - *tretí snímok z merania číslo jedna vytvorený termokamerou SAT (po 50 minútach prevádzky)*



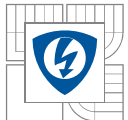
Z obr. č. 20 je patrné, že teplota na motore už len mierne vzrástla, no teplota vírivej brzdy presahuje 50°C

#### Meranie rozloženia teploty číslo: 2

Meranie číslo dva prebiehalo v podobnom princípe ako prvom prípade. Použili sme rovnaké prístroje a termokamera SAT mala rovnaké nastavenia. Tentokrát sme sa vysporiadali s prehrievaním vírivej brzdy a preto sme mohli motor zaťažovať oveľa vyšším momentom ako v prvom prípade. Po pripojení motoru na regulovateľný transformátor sme nastavili napätie na hodnotu 230V. Motor bežal na menovitých otáčkach. Začali sme ho po 11. minútach zaťažovať momentom  $M = 0,3 \text{ Nm}$  a otáčky motora dosiahli hodnotu 14 600 ot/min. Za 15 minút sme motor zaťažili momentom 0,5 Nm a otáčky motora boli 10 200 ot/min. Po 26. minútach od okamžiku zaťažovania posledným momentom, sme nastavili vírivú brzdú na 0,8 Nm. Otáčky motora nám klesli na 8462 ot/min.

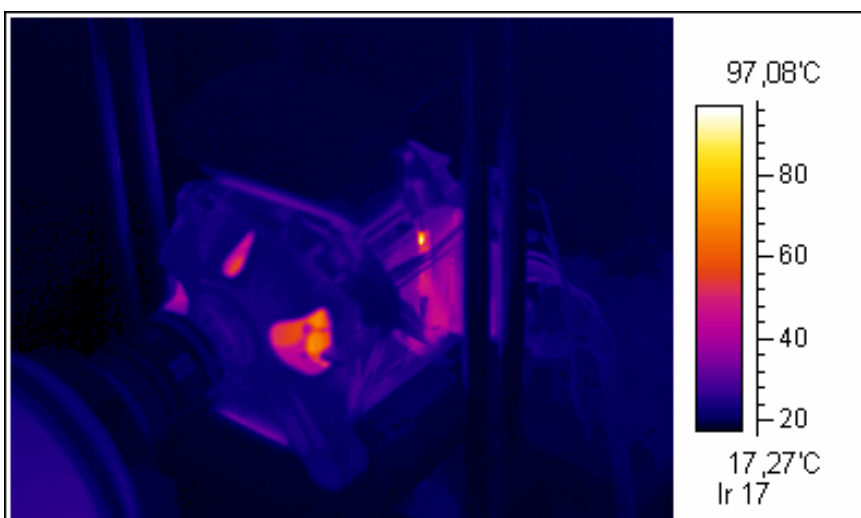
Tab. č. 12 - *namerané hodnoty rozloženia teploty pomocou termočlánku pri druhom meraní*

Poradové číslo	Umiestenie termočlánku	Teplota (°C)
T1	Predný kryt motora	45,5
T2	Stator	53,1
T3	Zadný kryt motora	44,1
T4	Stator z druhej strany	53,1
T5	Vinutie rotoru	60,2
T6	Vinutie statoru zpredu	38,9
T7	Kryt motora zospodu	40,1
T8	Kryt motora vnútri	39,9



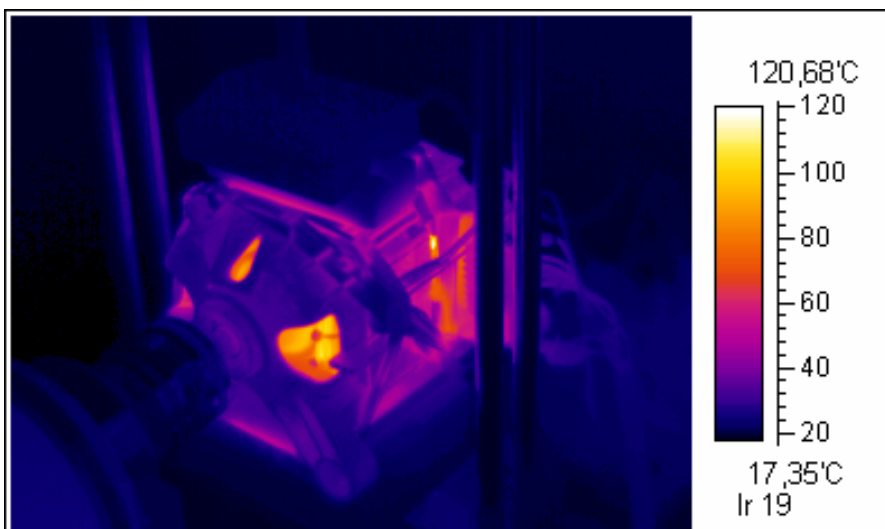
Meranie č. 2 prebiehalo 4 dni po prvom meraní. Pri meraní s pomocou použitej termokamery SAT sme priebežne zisťovali dosiahnutú teplotu motoru. Merané body v kamere boli nastavené tak ako pri prvom meraní. Vygenerované obrázky z termokamery sú vyobrazené na obrázkoch č. 21 a 22.

Obr. č. 21 - prvý snímok z merania číslo dva vytvorený termokamerou SAT (po 30 minútach prevádzky)



Z obrázku je jasne vidieť, že teplota na povrchu motoru dosiahla okolo 30°C, pričom teplota vinutia stroja dosiahla cez 80°C, čo je dané vyššou hodnotou pretekaného prúdu cez vinutie, ktorá bola spôsobená veľkosťou momentu vírivkej brzdy.

Obr. č. 22- druhý snímok z merania číslo dva vytvorený termokamerou SAT (po 40 minútach prevádzky)



Na obrázku zreteľne vidíme teplo na povrchu motoru, ktoré sa rozkladá rovnomerne. Teplota na statore dosahuje 50°C a teplota vinutia a vo vzduchovej medzere je cez 100°C. Teplota na vrchu motoru je vyššia preto, lebo je na ňom uchytenie motoru, kde sa teplo akumuluje z dôvodu pritlačenia motoru.

Meranie rozloženia teploty číslo: 3

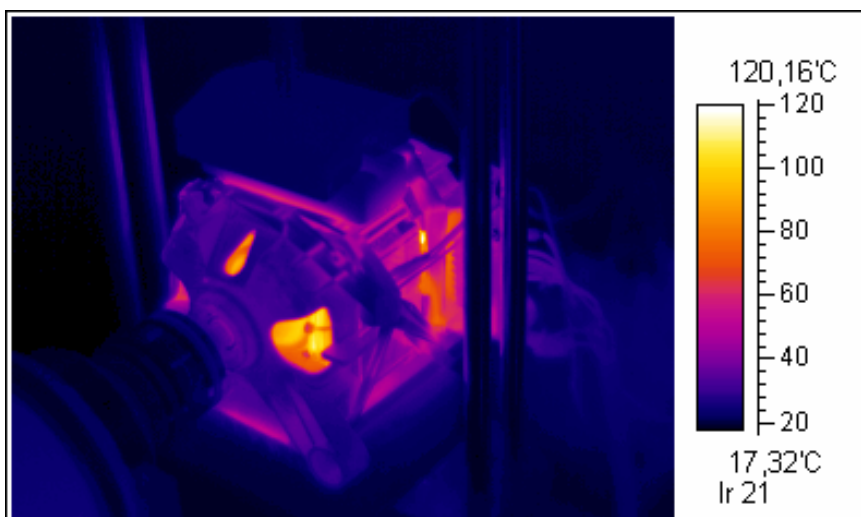
Meranie číslo tri prebiehalo 2 dni po druhom meraní. Zapojenie a nastavenia termokamery boli totožné s predošlými meraniami. Po pripojení motora na zdroj napätia, sme ho roztočili na menovité otáčky a ihneď začali zaťažovať momentom o hodnote  $M=0,8$  Nm. Budiaci prúd vírivej brzdy bol  $0,67$ A. Napätie na pripojenom voltmetri ukazovalo hodnotu  $U=230$ V a prúd na ampérmetri bol  $I = 4,75$ A. Otáčky motora sa ustálili na hodnote  $8552$  ot/min.

Tab. č. 13 - namerané hodnoty rozloženia teploty pomocou termočlánku pri treťom meraní

Poradové číslo	Umiestenie termočlánku	Teplota (°C)
T1	Predný kryt motora	45,8
T2	Stator	54,9
T3	Zadný kryt motora	48,6
T4	Stator z druhej strany	49,5
T5	Vinutie rotoru	67
T6	Vinutie statoru zpredu	42,3
T7	Kryt motora zospodu	40,2
T8	Kryt motora vnútri	40,4

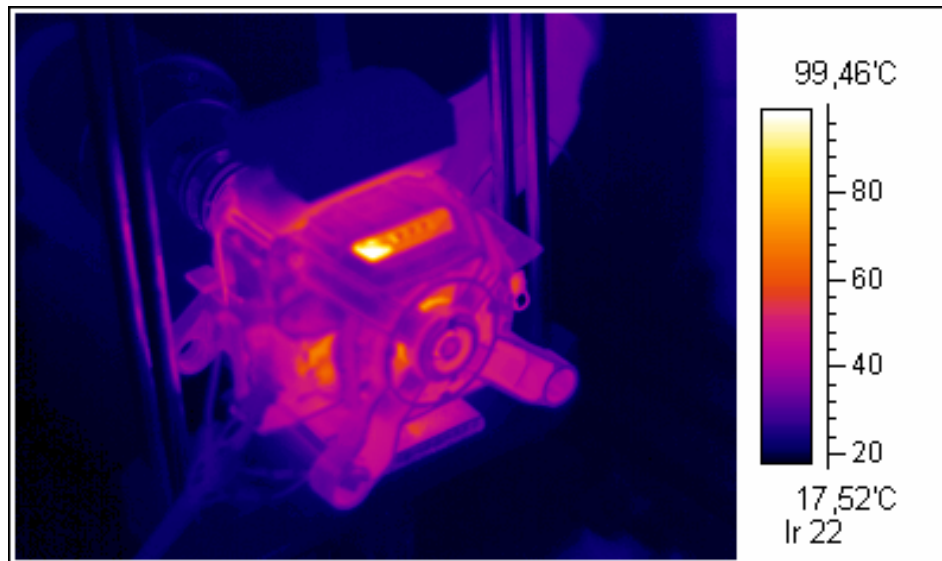
Z tabuľky je jasne vidieť nárast teploty oproti meraniu číslo dva. Pri tomto type zaťažovania motora, dosiahla teplota najvyššie hodnoty, čo je spôsobené veľkou hodnotou pretekaného prúdu cez vinutia statora a rotoru. Vzniknuté straty motora sú priamo úmerné vylučovanému teplu. Obrázky z termokamery sú vyobrazené na obrázkoch č. 23 a 24

Obr. č. 23- prvý snímok z merania číslo tri vytvorený termokamerou SAT (po 20 minútach prevádzky)



Obrázok nám jasne ukazuje že, pri krátkom čase nám vzniklo vysoké teplo, ktoré sa rozkladá po celej kostre stroja. Teplota prednej časti motora dosahuje hodnoty okolo  $35^{\circ}\text{C}$  a teploty vinutia je cez  $100^{\circ}\text{C}$ .

Obr. č. 24- druhý snímok z merania číslo tri vytvorený termokamerou SAT (po 40 minútach prevádzky)

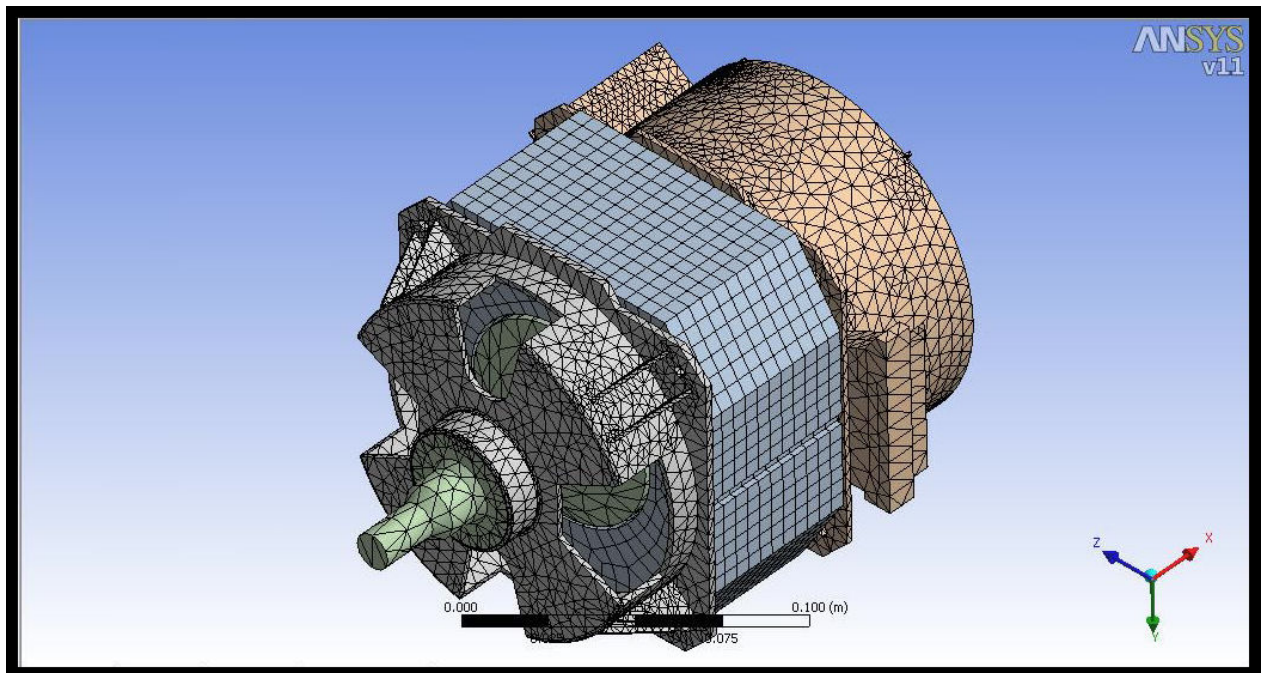


Obrázok zadnej časti motora kde je vidieť že teplota stúpla na 45°C. Teplota svorkovnice pri pretekanom prúde 4,75A dosahuje teploty cez 70°C.

## 9. Rozloženie teploty elektrického prístroja pomocou programu Ansys v.11

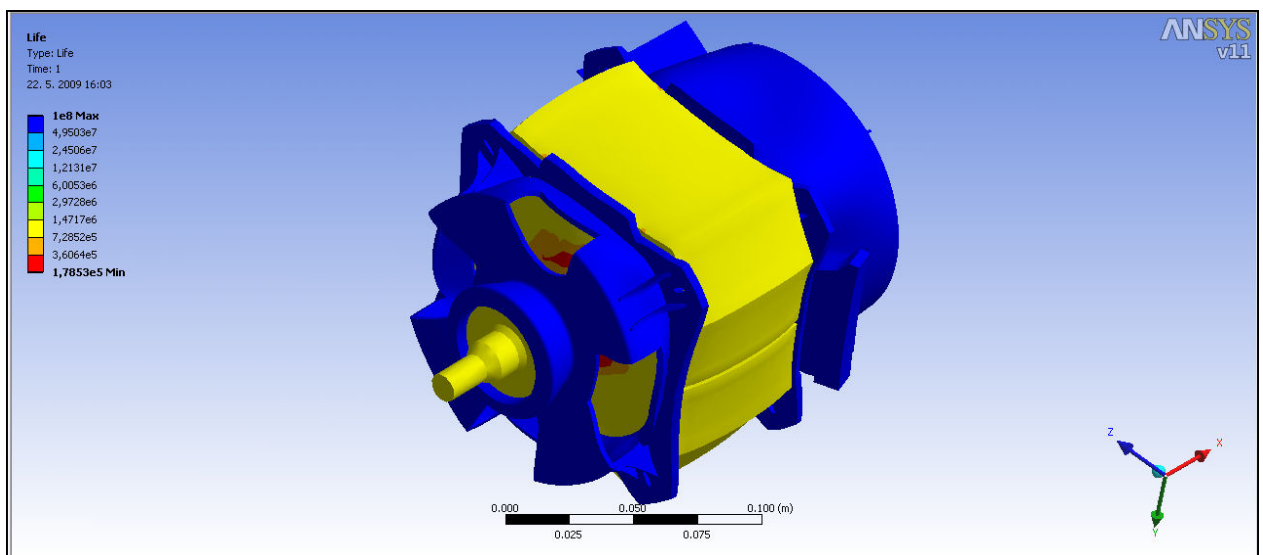
Program Ansys Workbench nám umožňuje rozložiť teplotu na zadanom objekte pomocou metódy konečných prvkov. Po vložení geometrie z programu Autodesk Inventor s príponou súboru .iam, nám program Ansys dovoľuje vybrať si niektorú z ponúkaných analýz. Rozloženie teploty na našom motore zahrňovala analýza typu „Transient Thermal“. Pre vykonanie analýzy je ale najskôr potrebný Mesh modelu (obr. č. 25). Mesh modelu najskôr nebol možný, pretože zadaná geometria bola veľmi komplikovaná a program si s ňou nevedel poradiť. Boli nutné nejaké úpravy na pôvodnom modeli. Upravil som prednú časť krytu motora, a to tak, že som odstránil skosenie vo vrchnej časti, takže nám vznikol jednoduchý otvor, čo ale na výslednú analýzu teploty nemá žiaden vplyv. Ďalšou úpravou bol stator. Program si nevedel poradiť s 84 plechmi navarenými na seba a spočiatku mi model rozdelil na 967 častí. Z hľadiska výpočtu analýzy to bolo neúnosné, preto som zvolil jeden oceľový plech z dĺžkou 55mm a nahradil ho pôvodnými 84. plechmi. Z hľadiska rozloženia teploty nám teplota na statore v modeli trochu vzrástla, čo je dané nižším prechodovým odporom jedného väčšieho plechu. Pretože sa teplota s nižším odporom zvyšuje, výsledné rozloženie teploty nie je úplne identické s rozložením teploty nameranom v laboratóriu. Mesh takto zhotoveného modelu zabral zhruba 10 min a vykonanú operáciu mriežky môžeme vidieť na obr. č. 25

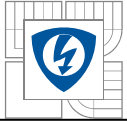
Obr. č. 25 – Celkový Mesh motoru Muster



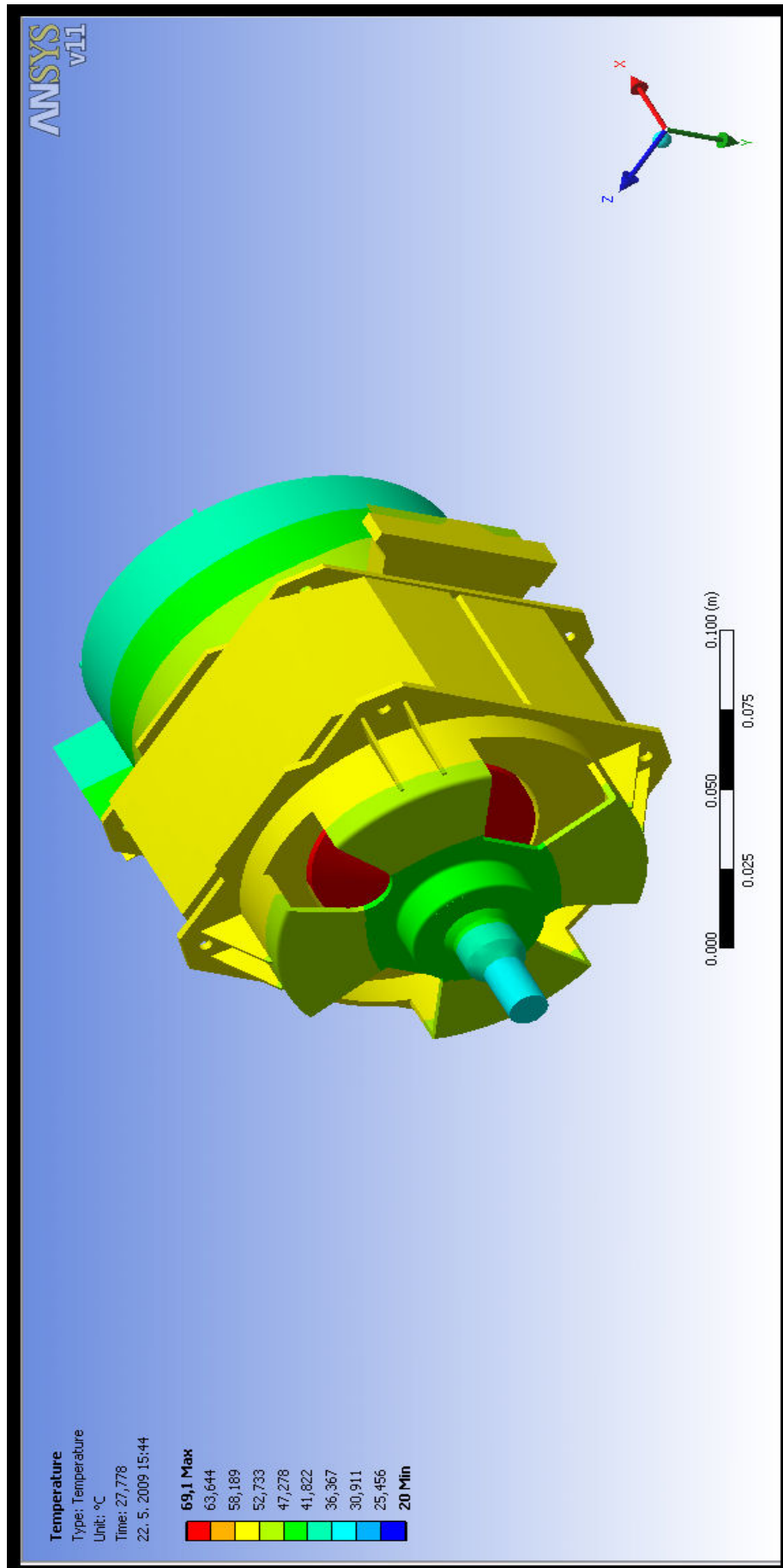
Ďalším krokom v modelovaní teploty bolo vytvorenie tzv. „Transient Thermal“ analýzy. V preklade z angličtiny, znamená tento druh analýzy „dočasná“ alebo „krátkodobá“ analýza. Po zadaní vstupných podmienok a šírenie tepla do programu, som dal vypočítať rozloženie teploty motora Muster. Výpočet trval zhruba čas ktorý bol potrebný na Mesh súčiastky, čiže 10 minút. Po ukončení riešenia nám vzniklo na motore teplotné pole, ktoré je charakteristické inými farbami. Modrá farba označuje teplotu 20°C a červená 69°C. Škála medzi týmito hodnotami, odpovedá teplotám motora. Rozloženie teploty sa nachádza na obrázku č. 27. Medzi inými analýzami, dokáže program Ansys a vyriešiť otázku životnosti alebo namáhania súčiastky, čo sú veľmi dôležité faktory pri navrhovaní geometrie. Zobrazenie životností častí nášho motora je na obr. č. 26

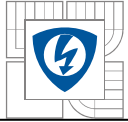
Obr. č. 26 – životnosť častí namodelovaného motora Muster v programe Ansys 2009





Obr. 27 – rozloženie teploty na elektrickom motore Muster pomocou programu Ansys



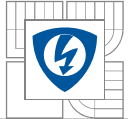


Pri pohľade na obr. č. 26 vidíme, že najdlhšie by mali vydržať časti predného a zadného krytu, pričom najviac namáhanou časťou a teda riziko najnižšej životnosti sa nachádza na rotore, kde vidíme červenú farbu. Časti zobrazené modrou farbou, nedosahujú skoro žiadne namáhanie materiálu. Pri rozložení teploty na obr. č. 27 vidíme, že teplota sa rozkladá rovnomerne od zdroja tepla. V našom prípade to bol stator, klzné ložiská a vinutia rotoru. Z týchto častí sa teplo šíri do ostatných častí motora, pričom je časť z neho odvádzaná do okolia a teda sú ochladzované.

## 10. Zhodnotenie výsledkov merania

Meranie rozloženia teploty na elektrickom prístroji prebiehalo v dvoch etapách. V prvej sme zistili reálne rozloženie teploty na zadanom elektrickom stroji, ktorým bol asynchrónny motor od značky Muster. Meranie prebiehalo v laboratóriu elektrických strojov a bolo realizované pod odborným dohľadom Ing. Aleša Mikulčíka, vedúceho bakalárskej práce. Merali sme pomocou dotykového termočlánkového prístroja značky Extech HD200, ktorý dokáže pomocou pripojených termočlánkou snímať a zachytávať dve hodnoty naraz. Obsahuje USB port na prenos a sledovanie priebehu merania priamo v počítači, pomocou priloženého softwaru. Dokáže pomocou vnútornej pamäti zaznamenať až 18 000 nameraných hodnôt. Meranie prebehlo celkom trikrát, pričom sme motor zaťažovali troma rôznymi spôsobmi. Najvyššej teploty dosiahol motor pri v poradí treťom meraní, keď sme motor zaťažili veľkým momentom o hodnote  $M = 0,8 \text{ Nm}$ . Vinutím motoru pretekal veľký prúd a preto vzniknutá teplota bola vyššia ako pri predchádzajúcich meraniach. Vzniknuté teplo sa postupom času a zaťažovaním rozkladalo do okolitých častí stroja, pričom sa teplo zmenšovalo ochladzovaním stroja okolitým vzduchom. Teplota okolia bola  $19,6^\circ\text{C}$ , čo veľmi dobre prispievalo k ochladzovaniu motora. Vzniknuté teplo by bolo určite vyššej hodnoty, keby sa merania uskutočnili v letných mesiacoch. Výrazným spôsobom taktiež k ochladzovaniu prednej a bočnej strany stroja prispievala spojka motora, na ktorej bolo spojenie Motor – Vírivá brzda. Toto spojenie (obr. č. 28 v prílohe bakalárskej práce) vytváralo prúd vzduchu, ktorý bol hnaný na predný kryt motora a na bočnicu, na ktorej sa nachádza stator stroja, a tým k ochladzovaniu celého stroja. Čím vyššia bola rýchlosť otáčania motora, tým rýchlejšie sa točila spojka a tým viac vzduchu prúdilo na ochladzovaný motor. Zamedzeniu vzniku vzduchu v spojke, nebolo možné, preto som tento fakt započítal do výsledkov merania. Všetky výsledky merania som spracoval do tabuliek, aby bola docielená prehľadnosť a porovnanie s druhou metódou merania rozloženia teploty na motore. Touto druhou metódou bolo meranie rozloženia teploty pomocou termovíznej kamery SAT HY6800. Táto kamera disponuje optickým rozlíšením  $320 \times 240$  pixelou a medzi jej hlavné vlastnosti patrí, že kamera nie je ovplyvňovaná počasím, dopadajúcim slnkom na objekt a dokáže snímaný objekt zachytávať na priloženú pamäťovú kartu. Termokamera bola vždy umiestnená 1m od meraného objektu, emisivita snímaného materiálu bola vždy nastavená na rovnakú hodnotu a nastavenie okolitej teploty bolo taktiež totožné na každom meraní. Zábery získané z kamery nám ukazujú presné rozloženie teploty na motore Muster. Hodnoty z kamery a z použitého termočlánku sa len veľmi málo navzájom líšia. Hodnoty získané z dotykového termočlánku typu K, sú presnejšie ako hodnoty z použitej termokamery SAT, pretože kamera je veľmi závislá od nastavenej emisivity materiálu, ktorá sa môže od použitého materiálu trochu líšiť. Materiál vinutia rotoru je odlišného charakteru ako materiál statoru, či materiál predného alebo zadného krytu. Na kamere sa tento fakt nedá nastaviť, preto sú výsledky z nej trochu odlišné ako v skutočnosti. Tento fakt nám hovorí, že pre najpresnejšie meranie teploty na elektrickom zariadení, je nutné použitie dotykového snímača teploty, ktorým môže byť spomínaný termočlánok. V neprístupných priestoroch, kde sa termočlánok použiť nedá, je výhodné použitie termovízneho

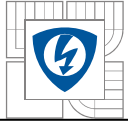




prístroja, pretože nám dokáže veľmi presne zmerať teplotu, poprípade rozloženie teploty na meranom objekte. Musíme však pred tým poznať vlastnosti materiálu a okolitú teplotu pre dosiahnutie správnych výsledkov merania.

V druhej etape merania rozloženia teploty, som daný elektrický stroj namodeloval pomocou osobného počítača. Využil som k tomu programy Inventor 2009 a Ansys Workbench verziu 11. V prvom programe som vytvoril model prístroja a v druhom som tento model využil na rozloženie teploty. Pomocou krátkodobej analýze v programe Ansys, som zistil rozloženie teploty. Toto rozloženie, je skoro totožné s rozložením zisteným v laboratóriu. Teplota sa vo vygenerovanom modeli rozkladá rovnako ako na meranom modeli v laboratóriu, no hodnota teploty vygenerovaná skutočným modelom je o niečo nižšia ako na modeli. Je to spôsobené spomínanými úpravami na modeli, z dôvodu Meshu v programe Ansys. Teplota sa na modeli líši v priemere o dva stupne Celzia od skutočného elektrického prístroja. Rozloženie teploty je však rovnaké.

Teplo nám na motore vzniká stratami vo vinutí motora a mechanickými stratami v klzných ložiskách. Toto teplo sa ďalej rozmiestňuje do ostatných častí motoru, ktorými sú: predný a zadný kryt motora, hriadeľ motora, spoje a ostatné časti. Vzniknuté teplo je v súlade s normou ČSN EN 60694, keďže dovolené oteplenie na častiach vedúcich prúd v motore je 100°C. Zistil som, že motor je plne prevádzkyschopný a počas meraní nevykazoval žiadne známky poškodenia alebo porušenia.



## Záver

Prácou na bakalárskej práci som si mal možnosť zistiť a overiť si poznatky z merania teploty na elektrických prístrojoch. Mal som možnosť nahliadnuť do problematiky vzniku tepla, merania tepla, či už dotykového, alebo bezdotykového, objasnil som si teóriu točivých elektrických prístrojov, ako sú: jednosmerné a striedavé motory, oteplenie a vznik tepla na nich. Vysvetlil som a rozdelil problematiku vzniku tepla stratami a oteplenie prístroja.

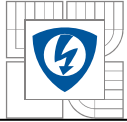
Po teoretickom úvode, som nahliadol do problematiky skutočného merania rozloženia teploty. Toto meranie som absolvoval v laboratóriu elektrických strojov na fakulte elektrotechniky a komunikačných technológií patriacej pod Vysoké Učenie Technické v Brne, pod vedením a spoluprácou vedúceho bakalárskej práce, pánom Ing. Alešom Mikulčíkom. Merania prebiehali za pomoci použitia termočlánkov typu K a termokamery SAT. Výsledky z meraní a zistené údaje a fakty som prehľadne spracoval do tabuliek a textu.

Po troch praktických meraniach som začal s modelovaním zadaného točivého elektrického prístroja, konkrétne jednofázového asynchrónneho motoru značky Muster. Využil som pri tom parametrické prostredie programu Autodesk Inventor 2009, ktoré mi umožnilo do podrobných detailov namodelovať a nakresliť zadaný motor. Model motoru som vložil do programového balíka spoločnosti Ansys, ktorý využíva na riešenie analýzy metódu konečných prvkov. Analýzu modelu motoru Muster som zvolil krátkodobú a program mi vykreslil rozloženie teploty. Toto rozloženie teploty je skoro identické s rozložením teploty skutočného motoru v laboratóriu elektrických strojov, čo dokazuje, že merania na elektrickom stroji boli správne.

Na záver som podrobne porovnal obidve použité metódy. V tejto časti som uviedol zistenia a naznačil dôvody, prečo sa použité metódy od seba líšia.

Nakoľko problematika rozloženia teploty na elektrickom zariadení je dosť zložitá, existuje ešte rada meraní ktorými sme mohli rozloženie teploty merať a tým porovnať použité metódy a spresniť rozloženie teploty. Medzi metódami ktoré sme mohli použiť mohli byť kovové odporové snímače, termistory, infračervené snímače teploty alebo pyrometer.

Verím, že som danú problematiku merania rozloženia teploty na zadanom elektrickom prístroji zvládol a dal tým dobrý základ pre moju diplomovú prácu v inžinierskom štúdiu. Problematika elektrických strojov je veľmi zaujímavá a môj záujem vďaka tejto bakalárskej práci výrazne vzrástol.

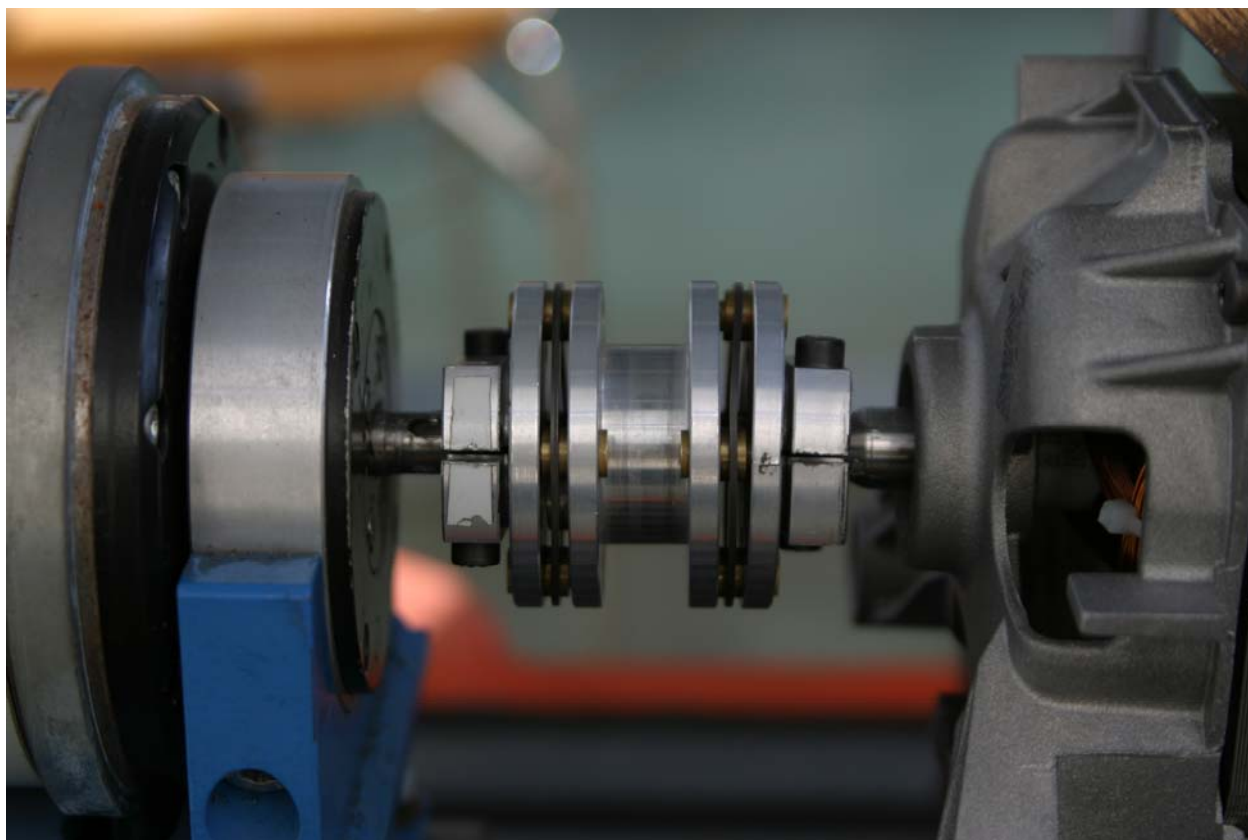


## Literatúra

- [1] L. Bejček: Měření neelektrických veličin, VUT Brno 1992
- [2] prof. Ing. Vladimír Chudý, CSc., doc. Ing. Rudolf Palenčár, CSc., Ing. Eva Kureková, CSc., Ing. Martin Halaj: Meranie technických veličín, STUBA 1999
- [3] K. Zehnula: Snímače neelektrických veličín, SNTL Praha
- [4] G. Dunay: Elektrické meranie mechanických veličín, TU Košice, 1985
- [5] Časopis AT&T Journal, 1/2002
- [6] [http://sk.wikipedia.org/wiki/Jednosmern%C3%BD\\_stroj](http://sk.wikipedia.org/wiki/Jednosmern%C3%BD_stroj)
- [7] <http://cs.wikipedia.org/wiki/Elektromotor>
- [8] [http://cs.wikipedia.org/wiki/Elektromotor#Synchronn.C3.AD\\_motor](http://cs.wikipedia.org/wiki/Elektromotor#Synchronn.C3.AD_motor)
- [9] časopis Automa 8/2008
- [10] [www.utc.sk](http://www.utc.sk), snímač teploty
- [11] [www.kris.uniza.sk](http://www.kris.uniza.sk), Katedra riadiacich a informačných systémov, Žilinská Univerzita
- [12] Doc. Ing. Josef Koláčny, Csc : Elektrické pohony
- [13] Ing. Roman Vavrička, Bezdotykové měření veličin
- [14] Doc. Ing. Zdeněk Vávra, Csc : Vysoké napětí a elektrické přístroje, část II: elektrické přístroje
- [15] prof. Ing. Vladimír Ráček, DrSc, Automatizované Elektrické Pohony, Trenčianska univerzita Alexandra Dubčeka v Trenčíne, Fakulta mechatroniky, 2008
- [16] <http://usa.autodesk.com/adsk/servlet/index?siteID=123112&id=4246282>.
- [17] <http://www.ansys.com/products/default.asp>
- [18] doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc. : Elektrické stroje
- [19] <http://hgf.vsb.cz/neu10/studium/pohony/SMOTOR.PDF>

## Prílohy

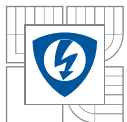
Obr.č.28 – spojka motoru a vírivej brzdy



Tab.č.14 – špecifikácie termokamery SAT (v angličtine)

### HY6800 SPECIFICATIONS

Description	Characteristics	Performance
Detector	Type	Monolithic Resistive bolometer UFPA
	Spectral range	8 ~ 14 $\mu\text{m}$
	Resolution	320x240
	Fill Factor	>80%
Imaging Performance	NETD	0.08°C @ 30°C
	Lens / Focusing	50mm; electronic focus
	Spectral resolution	1.3 mrad
	Frame rate	50 Hz
Image presentation	Video output	Pal / NTSC (optional)
	BW and pseudocolor image display	256 level, Yes
Features	Image freeze	Run or Freeze
	Image storage	128 MB Flash card
Measurement	Temperature range	-40 to 600°C, Standard, -10 to 1000°C -40 to 2000°C, Optional
	Accuracy	$\pm 2^\circ\text{C}$ or $\pm 2\%$
Analysis Function	Multi Spot	4 points simultaneously
	Temperature Capture	Highest or Lowest Temperature
	Line Analysis	Analyse Temperature distribution on the line
	Areas Analysis	Analyse Temperature distribution in the area
	Isothermal	Display the same temperature area in sharp colour
	Temperature Alarm	When the max or min temperature is higher or lower than the preset value
	Voice Annotation	16 sec of voice annotation can be saved with each image
Software	Four Image Display	Display FOUR images simultaneously
	Image Zooming	Zoom in or out 8x Times
Environmental Specification	Software	Report Generation
	Operating temperature range	-25°C ~ 50°C
	Storage temperature range	-40°C ~ 70°C
	Vibration	20g
Shock	2g	



Tab.č.15 – špecifikácia dotykového termočlánkového prístroja Extech HD 200 (v angličtine)

Specifications	Range	Basic Accuracy
Temperature (Type K)	-328 to 2501°F (-200 to 1372°C)	±0.15%
Temperature (IR)	-22 to 1022°F (-30 to 550°C)	±2%
Resolution	0.1°/1°	
Distance to Spot ratio	8:1	
Datalogging	18,000 readings (continuous)	
Dimensions	7.9 x 2.9 x 1.9" (201 x 75 x 50mm)	
Weight	9.8oz (280g)	