

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

TEPLOTNÍ ANALÝZA ASYNCHRONNÍHO STROJE POMOCÍ PROGRAMU ANSYS WORKBENCH

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Petr Kučera

BRNO 2012



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

TEPLOTNÍ ANALÝZA ASYNCHRONNÍHO STROJE POMOCÍ PROGRAMU ANSYS WORKBENCH

THE TERMAL ANALYSIS OF INDUCTION MACHINE USING ANSYS WORKBENCH

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. PETR KUČERA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. MARCEL JANDA, Ph.D.

BRNO 2012



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika

Student: Bc. Petr Kučera

ID: 72946

Ročník: 2

Akademický rok: 2011/2012

NÁZEV TÉMATU:

Teplotní analýza asynchronního stroje pomocí programu Ansys Workbench

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Seznamte se s prostředím programu Ansys Workbench a vytvořte model ASM.
2. Proveďte měření teplotního pole na zvoleném motoru.
3. Porovnejte výsledky simulací pomocí MKP s naměřenými hodnotami a vyhodnoťte.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Dle pokynů vedoucího

Termín zadání: 21.9.2011

Termín odevzdání: 21.5.2012

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

Konzultanti diplomové práce:

Ing. Ondřej Vitek, Ph.D.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Cílem diplomové práce je seznámení se s programem Ansys Workbench a výpočet tepelného pole kolem modelu asynchronního stroje.

Po seznámení s programem ANSYS Workbench, byl sestaven model asynchronního stroje a na něm byly nasimulovány jednotlivé tepelné výpočty při různých provozních stavech. Ty byly poté proměřeny na reálném elektromotoru v laboratořích.

Abstract

The aim of the master thesis is introduction with software Ansys Workbench and calculate the thermal field around the induction machine.

After introduction with the software was built model of induction machine and there were simulated various thermal calculations at operating conditions. They were measured on a real induction machine in laboratories.

Klíčová slova

metoda konečných prvků; ANSYS; teplota; teplotní analýza; asynchronní stroj; měření

Keywords

Finite element method; ANSYS; thermal; thermal analysis; induction machine; measurement

Bibliografická citace

KUČERA, P. *Tepelní analýza asynchronního stroje pomocí programu Ansys Workbench*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 59s. Vedoucí diplomové práce Ing. Marcel Janda, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma **Teplotní analýza asynchronního stroje pomocí programu Ansys Workbench** jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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

V Brně dne

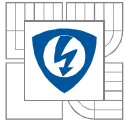
Podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Marcelu Jandovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce a také mojí přítelkyni Kateřině, za trpělivost při psaní této práce.

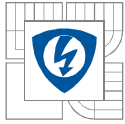
V Brně dne

Podpis autora

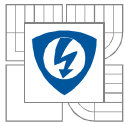


Obsah

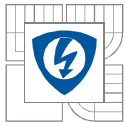
SEZNAM OBRÁZKŮ:	9
SEZNAM TABULEK:	11
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	12
1 ÚVOD	13
2 METODA KONEČNÝCH PRVKŮ	14
2.1 VZNIK MKP	14
2.2 SYSTÉMY VYUŽÍVAJÍCÍ MKP	15
3 ZÁKLADNÍ TEPLOTNÍ VELIČINY	16
3.1 TEPLOTA	16
3.2 TEPLLO	16
3.3 JOULEOVO TEPLLO	16
3.4 EMISIVITA	17
4 ŠÍŘENÍ TEPLA	18
4.1 DRUHY ŠÍŘENÍ TEPLA	18
4.2 TEPELNÉ VLASTNOSTI	18
4.3 VEDENÍ	18
4.4 KONVEKCE – PŘENOS TEPLA PROUDĚNÍM	19
4.5 RADIACE – PŘENOS TEPLA VYZAŘOVÁNÍM, SÁLÁNÍM	20
5 MĚŘENÍ TEPLoty	21
5.1 KONTAKTNÍ MĚŘENÍ	21
5.1.1 ODPOROVÉ SENZORY	21
5.1.2 TERMOELEKTRICKÉ SENZORY	22
5.1.3 VÝHODY KONTAKTNÍHO MĚŘENÍ TEPLoty:	22
5.1.4 NEVÝHODY KONTAKTNÍHO MĚŘENÍ TEPLoty:	22
5.2 BEZKONTAKTNÍ MĚŘENÍ	23
5.2.1 VÝHODY BEZKONTAKTNÍHO MĚŘENÍ TEPLoty	23
5.2.2 NEVÝHODY BEZKONTAKTNÍHO MĚŘENÍ TEPLoty	23
6 ANSYS	24
7 ASYNCHRONNÍ STROJ	25
7.1 KONSTRUKCE	25
7.2 ENERGETICKÁ BILANCE ASYNCHRONNÍHO MOTORU	26
7.2.1 ZTRÁTY ASYNCHRONNÍHO MOTORU.....	26
7.2.2 TOK VÝKONU ASYNCHRONNÍHO STROJE	27
8 TEPLOTNÍ ANALÝZA ASYNCHRONNÍHO STROJE	28



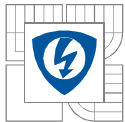
8.1 MODEL MOTORU V PROGRAMU AUTODESK INVENTOR 2011	28
8.2 MODEL STATICKÉ A TRANSIENTNÍ TEPLTNÍ ANALÝZY	30
8.2.1 GEOMETRY.....	31
8.2.2 MODEL.....	32
8.2.3 SETUP.....	32
8.2.4 VÝSLEDKY STATICKÉ TEPLTNÍ ANALÝZY.....	33
8.2.5 VÝSLEDKY TRANSIENTNÍ TEPLTNÍ ANALÝZY.....	36
9 VÝSLEDKY OTEPLOVACÍ A OCHLAZOVACÍ ANALÝZY NA MODELU STROJE.....	40
9.1 VÝSLEDKY LABORATORNÍHO MĚŘENÍ OTEPLOVACÍ A OCHLAZOVACÍ CHARAKTERISTIKY	44
9.2 POROVNÁNÍ TEPLTNÍCH VÝPOČTŮ Z PROGRAMU ANSYS WORKBENCH A VÝSLEDKŮ LABORATORNÍCH MĚŘENÍ.....	48
10 VÝSLEDKY TEPLoty NA MODELU STROJE PŘI PŘERUŠOVANÉM CHODU.....	50
10.1 VÝSLEDKY LABORATORNÍHO MĚŘENÍ PŘERUŠOVANÉHO CHODU STROJE	53
10.2 POROVNÁNÍ TEPLTNÍCH VÝPOČTŮ PŘERUŠOVANÉHO CHODU MOTORU Z PROGRAMU ANSYS WORKBENCH A VÝSLEDKŮ LABORATORNÍCH MĚŘENÍ.....	56
11 ZÁVĚR.....	58
LITERATURA	59

**SEZNAM OBRÁZKŮ:**

<i>Obr. č. 1 Rozsítování spojitě oblasti do trojúhelníkových podoblastí.....</i>	<i>14</i>
<i>Obr. č. 2 Diagram systémů využívající MKP.....</i>	<i>15</i>
<i>Obr. č. 3 Schéma obvodu termoelektrického článku.....</i>	<i>22</i>
<i>Obr. č. 4 Logo programu Ansys.....</i>	<i>24</i>
<i>Obr. č. 5 Řez asynchronním motorem</i>	<i>25</i>
<i>Obr. č. 6 Tok výkonu v ASM</i>	<i>27</i>
<i>Obr. č. 7 Komponenty pro sestavení modelu motoru</i>	<i>28</i>
<i>Obr. č. 8 Model motoru v programu Autodesk Inventor 2011.....</i>	<i>29</i>
<i>Obr. č. 9 Okótovaný model ASM</i>	<i>29</i>
<i>Obr. č. 10 Okótovaný model vinutí statoru</i>	<i>30</i>
<i>Obr. č. 11 Modul statické teplotní analýzy</i>	<i>30</i>
<i>Obr. č. 12 Motor a jeho vzduchový obal</i>	<i>31</i>
<i>Obr. č. 13 Síť na vinutí statoru.....</i>	<i>32</i>
<i>Obr. č. 14 Rozložení teploty na modelu stroje</i>	<i>33</i>
<i>Obr. č. 15 Rozložení teploty na modelu rotoru</i>	<i>34</i>
<i>Obr. č. 16 Rozložení teploty na modelu statoru</i>	<i>34</i>
<i>Obr. č. 17 Rozložení teploty v magnetickém obvodu motoru</i>	<i>35</i>
<i>Obr. č. 18 Rozložení teploty v řezu motoru</i>	<i>35</i>
<i>Obr. č. 19 Rozložení teploty motoru v čase 3600s</i>	<i>36</i>
<i>Obr. č. 20 Rozložení teploty motoru v čase 180s.....</i>	<i>36</i>
<i>Obr. č. 21 Rozložení teploty v řezu motoru v čase 1078,6s.....</i>	<i>37</i>
<i>Obr. č. 22 Rozložení teploty v řezu motoru v čase 2158,6s</i>	<i>37</i>
<i>Obr. č. 23 Rozložení teploty v řezu motoru v čase 2878,6s.....</i>	<i>38</i>
<i>Obr. č. 24 Rozložení teploty v řezu motoru v čase 3600s</i>	<i>38</i>
<i>Obr. č. 25 Oteplovací charakteristika modelu stroje.....</i>	<i>39</i>
<i>Obr. č. 26 Teplotní charakteristika modelu stroje z programu Ansys.....</i>	<i>40</i>
<i>Obr. č. 27 Teplotní charakteristika modelu stroje z programu Excel.....</i>	<i>40</i>
<i>Obr. č. 28 Rozložení teploty motoru v čase 540s.....</i>	<i>41</i>
<i>Obr. č. 29 Rozložení teploty motoru v čase 1640s.....</i>	<i>41</i>
<i>Obr. č. 30 Rozložení teploty motoru v čase 2640s.....</i>	<i>42</i>
<i>Obr. č. 31 Rozložení teploty motoru v čase 3140s.....</i>	<i>42</i>

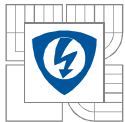


<i>Obr. č. 32 Rozložení teploty motoru v čase 4111,6s.....</i>	<i>43</i>
<i>Obr. č. 33 Teplotní charakteristika modelu stroje z programu Ansys.....</i>	<i>43</i>
<i>Obr. č. 34 Názorné zobrazení měřících bodů.....</i>	<i>44</i>
<i>Obr. č. 35 Oteplovací charakteristika motoru.....</i>	<i>46</i>
<i>Obr. č. 36 Ochlazovací charakteristika motoru.....</i>	<i>47</i>
<i>Obr. č. 37 Zobrazení měřené plochy na povrchu motoru.....</i>	<i>48</i>
<i>Obr. č. 38 Porovnání laboratorního měření a výsledků z Ansysu při oteplování a ochlazování motoru</i>	<i>49</i>
<i>Obr. č. 39 Teplotní charakteristika modelu stroje z programu Ansys</i>	<i>50</i>
<i>Obr. č. 40 Výsledky přerušovaného chodu v čase 640s.....</i>	<i>50</i>
<i>Obr. č. 41 Výsledky přerušovaného chodu v čase 1194,4s</i>	<i>51</i>
<i>Obr. č. 42 Výsledky přerušovaného chodu v čase 1794,4s.....</i>	<i>51</i>
<i>Obr. č. 43 Výsledky přerušovaného chodu v čase 2394,4s</i>	<i>52</i>
<i>Obr. č. 44 Výsledky přerušovaného chodu v čase 2994,4s</i>	<i>52</i>
<i>Obr. č. 45 Teplotní charakteristika motoru při přeruš. chodu.....</i>	<i>54</i>
<i>Obr. č. 46 Snímek z termokamery v čase 600s</i>	<i>54</i>
<i>Obr. č. 47 Snímek z termokamery v čase 1200s</i>	<i>55</i>
<i>Obr. č. 48 Snímek z termokamery v čase 1800s</i>	<i>55</i>
<i>Obr. č. 49 Snímek z termokamery v čase 2400s</i>	<i>55</i>
<i>Obr. č. 50 Snímek z termokamery v čase 3000s.....</i>	<i>56</i>
<i>Obr. č. 51 Porovnání laboratorního měření a výsledků z Ansysu při přerušovaném chodu motoru.....</i>	<i>57</i>



SEZNAM TABULEK:

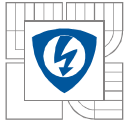
<i>Tabulka č. 1 Příklady součinitelů α</i>	20
<i>Tabulka č. 2 Hodnoty oteplovací charakteristiky</i>	45
<i>Tabulka č. 3 Ochlazovací charakteristika</i>	46
<i>Tabulka č. 4 Porovnání vypočtených a změřených hodnot</i>	48
<i>Tabulka č. 5 Hodnoty z měření přerušovaného chodu motoru</i>	53
<i>Tabulka č. 6 Porovnání výsledků teplot u přerušovaného chodu motoru</i>	56



SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

ASM...asynchronní motor

MKP...metoda konečných prvků



1 ÚVOD

Rozvoj výpočetní techniky a maticových metod analýzy kontinua umožnil vytvoření výpočtových systémů založených na metodě konečných prvků. Tato variační metoda, zejména v její deformační variantě, se stala účinným a univerzálním prostředkem pro analýzu konstrukcí. Umožnila tak řešení i značně rozsáhlých (v minulosti neřešitelných) úloh. [1] Tento pokrok nemalým dílem ovlivňuje konstruktéra, který daný program obsluhuje a tvoří v něm. Také tento trend vede ke snadnějšímu užívání a větší pohodě uživatele, k celkovému urychlení tvorby, větší produktivitě při řešení každodenních problémů a samozřejmě zasahuje do vývoje nových, lepších aplikací. Program ANSYS 13 v sobě zahrnuje spoustu aplikací, které projektantům, ale také konstruktérům podstatně ulehčují práci. Největší výhodou těchto konstrukčních programů je to, že daný prototyp nemusí být zkoušen fyzicky, ale jeho vlastnosti mohou být určeny a vyzkoušeny přímo v programu. Ale i sebelepší program je jenom mocným nástrojem v rukou osoby, které musí být daný úkol srozumitelný a která dané problematice rozumí.

2 METODA KONEČNÝCH PRVKŮ

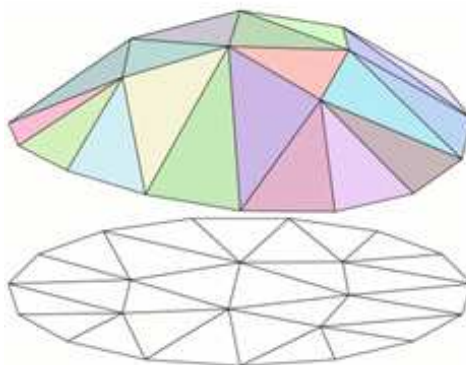
Do nástupu výkonných osobních počítačů bylo využívání metody konečných prvků záležitostí specializovaných výzkumných a vývojových pracovišť a vysokých škol. K řešení nepřiliš rozsáhlých úloh byly tehdy k dispozici zpravidla sálové počítače. Parametry současných osobních počítačů dnes o několik řádů převyšují možnosti sálových počítačů z druhé poloviny 80. let a možnosti jejich grafického uživatelského prostředí byly v tehdejší době nepředstavitelné.

V současné době je proto možné připravovat vstupní data, provádět rozsáhlé výpočty a vyhodnocovat výsledky v interaktivním grafickém prostředí. Proto dnes úlohy, jejichž příprava v minulosti vyžadovala dny či týdny a doba řešení se pohybovala v desítkách hodin, mohou být připraveny během několika minut a vyřešeny ve zlomcích sekundy. Toto tvrzení ovšem platí pouze pro jednodušší úlohy. Vzhledem k vysokým možnostem současné výpočetní techniky roste požadavek na komplexnost řešení a na podrobnost výpočtových modelů konstrukcí. Stále častěji je uvažován vliv nelineárního chování konstrukcí. Místo pseudostatických výpočtů jsou stále častěji prováděny dynamické analýzy.

Vyšší uživatelský komfort současných programových systémů umožňuje jejich využívání i méně zkušeným uživatelům, často i bez hlubších znalostí principů metody konečných prvků a bez podrobnějších znalostí vlastností použitých konečných prvků. To však může často vést k chybnému sestavení výpočtového modelu nebo k nesprávné interpretaci výsledků. Proto je třeba věnovat pozornost i studiu teorie metody konečných prvků a podrobnému seznámení se s vlastnostmi konečných prvků použitých v modelu. [1]

2.1 Vznik MKP

Metoda konečných prvků vzešla z potřeby řešení komplexních úloh statické mechaniky ve stavebním a leteckém inženýrství. Její vývoj může být vysledován až k práci A. Hrennikoffova (1941) a R. Couranta (1942). Ačkoliv byly přístupy použité těmito průkopníky zásadně odlišné, mají jednu společnou charakteristiku: rozsír'ování spojité oblasti do množiny samostatných podoblastí (viz. Obr. č. 1).



Obr. č. 1 Rozsír'ování spojité oblasti do trojúhelníkových podoblastí

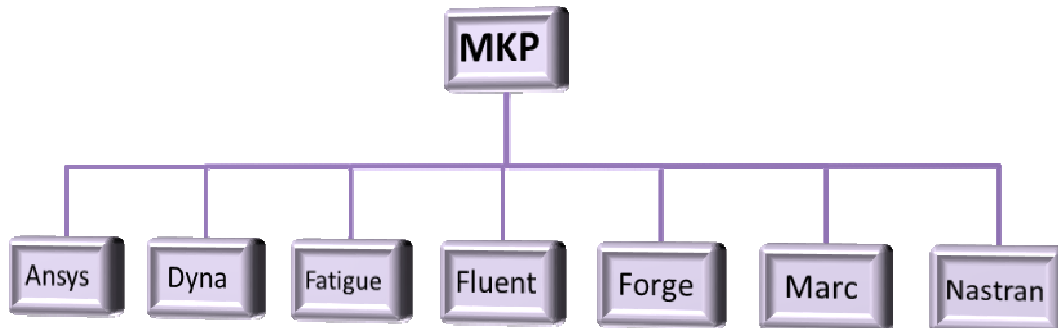
Hrennikoffova práce rozděluje oblast za pomoci mřížky, podobně Courant dělí oblast do konečného počtu trojúhelníkových podoblastí pro řešení eliptických parciálních diferenciálních rovnic druhého stupně, které byly sestaveny z úlohy zabývající se krutem válce. Courantův evoluční přístup byl použitelný na rozměrná tělesa již dříve získaných řešení těchto diferenciálních rovnic odvozených Rayleighem, Ritzem a Galerkinem.

Vývoj metody konečných prvků započal na začátku padesátých let 20. století při řešení konstrukce letadla a úloh statické mechaniky.

Hnacím motorem bylo v letech šedesátých středisko v Berkeley zaměřené na úlohy stavebního inženýrství. Metoda byla propracována spolu s precizním matematickým aparátem v roce 1973 v publikaci Stranga a Fixe, „Analysis of The Finite Element Method“ (Analýza metody konečných prvků), kdy již byla zobecněna do samostatného oboru Aplikované matematiky pro numerické řešení fyzikálních soustav v celé řadě rozmanitých inženýrských disciplín, např. elektromagnetismus, dynamika tekutin. [2]

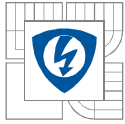
2.2 Systémy využívající MKP

Mezi nejčastější systémy využívající metodu konečných prvků se řadí:



Obr. č. 2 Diagram systémů využívající MKP

a další...



3 ZÁKLADNÍ TEPLITNÍ VELIČINY

3.1 Teplota

Ta udává tepelný stav hmoty. Teplota má souvislost s kinetickou energií částic, konkrétně s její průměrnou hodnotou. U některých látek je teplota úměrná střední kinetické energii molekul a frekvenci jejich srážek. Pokud se teplota snižuje, říkáme, že těleso chladne. Pokud se naopak teplota zvyšuje, říkáme, že se ohřívá. Při chladnutí odevzdává hmota do svého okolí teplo a při ohřevu z okolí teplo přijímá. Nejnižší možnou teplotou je teplota absolutní nuly, ke které se lze libovolně přiblížit, avšak nelze jí dosáhnout. V současné době nejsou známy žádné fyzikální zákony, které by omezovaly horní hranici teploty. Teplota se označuje písmenem T a jeho základní jednotkou je kelvin [K]. Teplota se může udávat pomocí několika teplotních stupnic, které se liší podle své definice. Pro měření teploty se používá závislostí fyzikálních veličin na teplotě. Při známé závislosti některé veličiny na teplotě je možné převést měření teploty na měření jiné fyzikální veličiny. Na teplotě jsou závislé například: délkové rozměry a objem těles, tlak plynů, elektrický odpor, vyzařování elektromagnetických vln apod. [5]

3.2 Teplo

Teplo nebo též tepelná energie je část energie, vnitřní energie, kterou těleso přijme, respektive předá při tepelné výměně druhému tělesu. Podle jedné teorie lze teplo definovat jako celkovou kinetickou energii neuspořádaného pohybu částic, které tvoří látku. Teplo se značí písmenem Q a jeho základní jednotkou je joule [J]. Množství tepla obsažené v určité látce je možné určit ze vztahu:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T$$

kde, Q ... teplo látky [J]

m ... hmotnost látky [kg]

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

ΔT ... rozdíl počáteční a konečné teploty [K] [5]

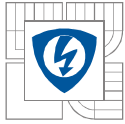
3.3 Jouleovo teplo

Jouleovo teplo Q je teplo, která vzniká ve vodiči při průchodu elektrického proudu.

Zahřívání vodiče lze vysvětlit předáváním části kinetické energie částic způsobujících elektrický proud (nejčastěji elektronů) částicím, které se elektrického proudu neúčastní (nejčastěji kladné ionty v pevných pozicích). Tím se zvyšuje tepelný pohyb těchto částic - vodič se zahřívá.

Velikost Jouleova tepla ve vodiči, kterým prochází elektrický proud I za dobu t a na jehož koncích je napětí U , se vypočte jako:

$$Q = U \cdot I \cdot t \text{ [J]}$$



Je-li znám odpor vodiče R , pak lze Jouleovo teplo vypočítat též takto:

$$Q = R \cdot I^2 \cdot t$$

nebo

$$Q = \frac{U^2}{R} \cdot t$$

3.4 Emisivita

Emisivita ε je bezrozměrná veličina, která charakterizuje schopnost tělesa emitovat infračervené záření. Je definována jako poměr intenzity vyzařování reálného tělesa k intenzitě vyzařování absolutně černého tělesa o stejné teplotě. Emisivita absolutně černého tělesa je rovna 1. Emisivita vyzařování běžných materiálů z povrchu objektů se pohybuje přibližně od 0,80 do 0,98. Mohlo by se zdát, dle tabulkových hodnot, že emisivita je konstantní. Ve skutečnosti však emisivita závisí na níže uvedených parametrech:

- úhlu odklonu od normály povrchu
- teplotě objektu
- vlnové délce
- barvě povrchu
- struktuře povrchu a dalších

Měření intenzity vyzařování z povrchu měřeného objektu je obvykle nejvíce ovlivněno součinitelem emisivity měřeného povrchu, to jest jeho teplotní závislostí a homogenitou. V praxi se používají převážně dva způsoby řešení:

- měřený povrch se pokryje barvou o známé emisivitě (zjištěna dodatečným laboratorním měřením) a dobré prostorové homogenitě záření (použitá barva musí odolávat zvýšené teplotě povrchu během laboratorního měření)
- povrchová teplota se měří lokálně termočlánekem a emisivita se určí tak, aby povrchová teplota měřená termovizním systémem v místě termočláneku souhlasila s jeho teplotou - metoda známé teploty zdroje záření.

4 ŠÍŘENÍ TEPLA

Šíření tepla (někdy též sdílení tepla nebo termokinetika) je jedním ze způsobů přenosu energie.

4.1 Druhy šíření tepla

Teplu se prostředím šíří třemi základními způsoby a jejich kombinací.

- **Vedením** - Při vedení (neboli kondukcii) se tepelná energie postupně šíří v nepohyblivé hmotě.
- **Konvekcí** - Při proudění (neboli konvekci) dochází k přenosu tepla v důsledku proudění a promíchávání různě ohřátých částí hmoty.
- **Radiací** - Při tepelném záření (neboli radiaci) dochází k vyzařování energie ze zdroje ve formě elektromagnetických vln a jeho následnému pohlcování ozařovaným tělesem.

4.2 Tepelné vlastnosti

Teplu se šíří vždy od teplejšího místa k místu s nižší teplotou.

V prostředí, ve kterém se vyskytuje nějaká látka, se může tepelná energie šířit vedením a prouděním, protože příčinou šíření tepelné energie je neustálý pohyb částic hmoty. Částice ve hmotě na sebe navzájem působí (např. srážky) a tím dochází k předávání kinetické energie po takovou dobu, než dojde k vyrovnání teplot.

Rozdílným šířením tepelné energie je záření, které se svoji podstatou odlišuje od vedení a proudění. To se v prostředí šíří ve formě záření a tím pádem nepotřebuje prostor vyplněný látkou. Dokáže se šířit i ve vakuu.

4.3 Vedení

Vedení, neboli kondukcce tepla je základním mechanismem přenosu tepla. Kondukcí se přenáší teplo prakticky ve všech stavech hmoty, tedy v pevné, kapalné i plynné fázi. Množství přeneseného tepla tímto způsobem ovšem závisí na vnitřní atomové resp. molekulární a krystalické struktuře hmoty. Základní podstatou tohoto přenosu je výměna vnitřní energie uvnitř hmoty mezi mikročásticemi. Každá částice hmoty má svoji vnitřní energii. Např. atom má energii danou počtem elektronů v jednotlivých valenčních vrstvách atomového obalu. Energie atomu roste s přibývajícím počtem elektronů na vyšších valenčních drahách. Do tohoto stavu se atom může dostat celou řadou mechanismů. Jedním z nich je buzení dopadajícím zářením nebo pružné srážky atomů nebo jiných částic. Srážka částic mění kinetickou energii pohybující

se hmoty na energii vnitřní, která se projevuje zvýšením teploty. Teplota je indikátorem vnitřní energie hmoty a definuje tak měřítko celkové vnitřní energie v daném objemu látky. Pokud se částice uvnitř hmoty pohybují, mohou prostřednictvím srážek předávat energii uvnitř látky. Velikost takto přeneseného tepla závisí především na množství těchto vnitřních nosičů energie a na pravděpodobnosti vzájemného předání mezi částicemi, tedy z většiny na pravděpodobnosti vzniku srážky. Např. v kovech, kde je velké množství volných elektronů s vysokou pohyblivostí, je přenos tepla vedením (kondukcí) podstatně větší než v izolantech, kde volné elektrony prakticky neexistují. Teplo zde může ovšem vznikat také na molekulární úrovni - třením molekul, molekulových dipólů. Souhrnně by se dalo říci, že přenos tepla vedením je tím snazší, čím více je v dané hmotě zprostředkujících částic, které na sebe mohou vzájemně vnitřní energii přenášet.

V praktických aplikacích uvažujeme přenos tepla vedením v pevných látkách o určitém průřezu a tloušťce, kde známe teplotní rozdíl před a za překážkou. Typickými aplikacemi jsou např. výpočty tepelných ztrát, přestupy tepla přes rozhraní, ohřev materiálů postupem tepla apod. K výpočtu musíme znát hlavní materiálovou konstantu, která určuje schopnost látky vést teplo a to tzv. měrnou tepelnou vodivost λ . Tato tabulková hodnota je charakteristická pro daný materiál.

$$Q = \lambda \cdot \frac{S}{l} \cdot \Delta \vartheta \cdot t,$$

kde	l	je	tloušťka materiálu [m]	
	S		plocha, kterou teplo prochází [m ²]	
	$\Delta \vartheta$		teplotní rozdíl [K, °C]	
	t		čas [s]	
	λ		měrná tepelná vodivost [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	[6]

4.4 Konvekce – přenos tepla prouděním

Konvekce je způsob přenosu tepla, který, reprezentuje přenos hmoty o určité vnitřní energii a to fyzickým přemístěním hmoty z jednoho místa na druhé. V makropohledu tento princip vlastně není přenosem tepla, ale přenosem hmoty, na které je teplo vázané. V principu tedy rovněž může existovat ve všech třech skupenstvích hmoty, ovšem přenos tepla prouděním u pevných látek vyžaduje dodatečnou energii na přesun (proudění) pevné látky. Tento princip by pak ve svém důsledku splňoval i např. rozvoz teplého chleba do obchodu – energie akumulována v pečivu je převezena automobilem na jiné místo – přeneslo se teplo.

V praxi hovoříme o přenosu tepla prouděním obvykle v kontextu plynných a kapalných látek, které mohou opravdu fyzicky proudit – téci. Pohybem z jednoho místa na jiné pak prostřednictvím své hmoty přenášejí tepelnou energii.

Má-li kapalina nebo plyn teplotu ϑ_0 a je-li povrch stěny o ploše S a teplotě ϑ_1 , je množství tepla, které projde z kapaliny do stěny či naopak, určeno Newtonovým vztahem

$$Q = \alpha \cdot S(\vartheta_1 - \vartheta_0) \cdot t,$$

kde α je součinitel přestupu tepla [W.m⁻².K⁻¹].

Součinitel přestupu tepla je velmi složitá funkce více veličin pro danou kapalinu nebo plyn a určitý stav proudění. Součinitel α není materiálovou konstantou, ale závislostí, která může nabývat značně proměnných hodnot. Jako příklad lze uvést orientační hodnoty pro některé známé příklady.

KONVEKCE	α ($\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	
	α min	α max
klidný vzduch	12,5	125
proudící vzduch	40	2100
proudící kapalina	8400	21000
vroucí kapalina	16800	25100
kondenzující páry	29000	50000

Tabulka č. 1 Příklady součinitelů α

Teoretické odvození součinitele přestupu přesahuje rámec tohoto textu a v praxi se volí experimentální postup. Pro standartní konfigurace různě orientovaných ploch a rozdílů teplot je možné pro jednoduché případy součinitele přestupu tepla určit z grafických závislostí.

[6]

4.5 Radiace – přenos tepla vyzařováním, sáláním

Radiace, neboli vyzařování, je způsob šíření tepla bez přítomnosti hmoty. Teplo se šíří prostřednictvím elektromagnetického záření. Ve svém důsledku se nejedná o teplo jako takové, ale o energii elektromagnetických vln, která se může na teplo změnit a nebo může být teplem generována. Fyzicky tedy nemůžeme změřit teplotu elektromagnetického záření, ale můžeme fyzikálně měřit energii tohoto záření. Záření pak po dopadu na hmotu může být absorbováno, odraženo a nebo hmotou prochází.

Každé těleso, jehož teplota je vyšší než 0 K, vyzařuje svým povrchem tepelnou energii. Toto elektromagnetické vlnění se v průzračném prostředí šíří přímočaře a všemi směry. Při průchodu z jednoho průzračného prostředí do druhého se šíří podle zákonů geometrické optiky. Každé těleso vyzařuje, ale také absorbuje energii vyzařovanou jinými tělesy. Při dopadu tepelného záření na částečně průzračné těleso se část energie pohltí, část se odrazí a část projde tělesem. [6]

5 MĚŘENÍ TEPLoty

Pro měření teplot pro sestavení oteplovacích a ochlazovacích charakteristik motoru bylo použito více měřicích zařízení z důvodu přesnosti měření. Dva základní typy způsobu měření teploty jsou kontaktní a bezkontaktní měření.

5.1 Kontaktní měření

Kontaktní měření teploty je založené na přímém přenosu tepla z měřeného povrchu na měřicí sondu. Tato sonda může být realizována různými způsoby. Hlavní typy čidel, které lze použít pro měření v elektrických strojích, lze rozdělit do několika skupin podle provedení.

Specifickým problémem kontaktního měření je uchycení teplotního čidla na měřený povrch. Při použití lepidla nebo speciálních materiálů může dojít k poškození čidla v případě, že je nutné čidlo odstranit. Zvláště náchylné na tento způsob poškození jsou termočlánky.

Při krátkodobém měření je možné použít k uchycení lepicí pásku, ale její plocha brání odvodu tepla a při dlouhodobějších měřeních je patrný rozdíl teploty pod touto páskou. [7]

5.1.1 Odporové senzory

Princip odporových kovových snímačů teploty spočívá ve využití závislosti odporu kovů na teplotě. Konstantou popisu této závislosti je teplotní součinitel odporu α .

$$\alpha = \frac{\Delta R}{R_0 \cdot \Delta \vartheta} \quad [K^{-1}]$$

Při výběru materiálu pro odporové teploměry se přihlíží především ke stálosti hodnoty parametru α v co možná největším teplotním rozsahu. Při malém rozmezí teplotních změn lze závislost činitele α na teplotě zanedbat.

V takovém případě dostáváme pro závislost odporu snímače tento definiční lineární vztah

$$\Delta R = R_0 \cdot \alpha \cdot \Delta \vartheta$$

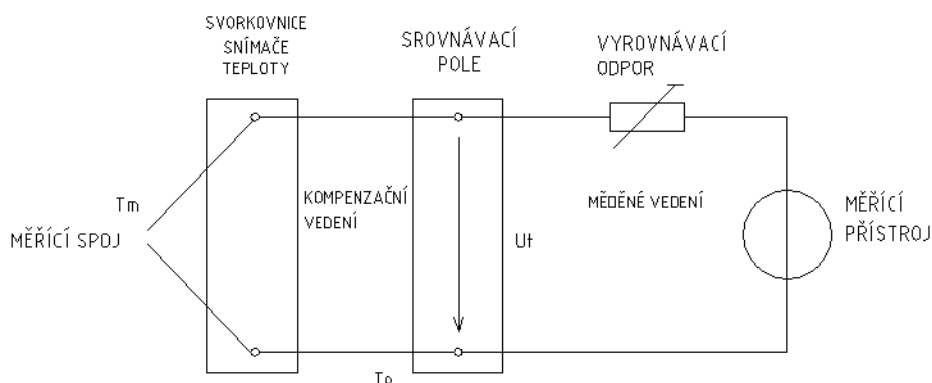
Součinitel α by měl být teplotně nezávislý, časově stálý a pokud možno maximální. Proto se k výrobě odporových snímačů teploty používá především platiny. Snímače se vyrábějí ve dvou tolerančních řadách, a to s třídou přesnosti (A) pro rozsahy $-200 \div 650^\circ\text{C}$ a s třídou přesnosti (B) pro rozsahy $-200 \div 800^\circ\text{C}$. Pro menší rozsahy v mezích $-60 \div 200^\circ\text{C}$ se používá nikl. Výjimečně se ještě používá pro rozsahy do 120°C slitina zlata a stříbra. Obecné kovy jako měď se pro snadnou oxidaci neuvžívají vůbec. Nevýhodou odporových snímačů je poměrně velká časová konstanta, daná umístěním odporového materiálu do ochranných vrstev.

Dvěma základními druhy odporových senzorů jsou negastory a pozistory. Negastory jsou termistory se záporným teplotním součinitelem odporu - NTC a pozistory naopak s kladným součinitelem odporu - PTC. [8]

5.1.2 Termoelektrické senzory

Měření teploty termočlánky je založeno na jevu, že v obvodu, složeném ze dvou na konci spojených kovů z různých materiálů, vzniká elektromotorická síla. Jestliže spojené konce, které se vkládají do měřené teploty nazýváme měřící spoj, volné konce, na kterých měříme

termoelektrické napětí se nazývají srovnávací spoje. Tyto snímače teploty jsou určeny k měření vysokých teplot $-600 \div +2\ 800^{\circ}\text{C}$.



Obr. č. 3 Schéma obvodu termoelektrického článku

Na obr. č. 3. jsou vyznačena jednotlivá funkční místa obvodu. Termoelektrické napětí U_t , jehož hodnota je úměrná rozdílu teploty T_m v místě měřícího spoje (teplý konec) a teploty T_o v místě srovnávacích spojů (studený konec) se přivádí kompenzačním vedením a měděným vedením na měřicí přístroj. Aby bylo možno každé hodnotě termoelektrického napětí přiřadit určitou teplotu, je třeba udržovat srovnávací spoje na známé a konstantní teplotě, tzv. teplotě vztažné. Teplota hlavice může dosahovat značně vysokých teplot, teplota svorkovnice dosahuje někdy až 200°C . Srovnávací spoje se proto posouvají kompenzačním vedením do míst s příznivou teplotou okolí, kde se srovnávací spoje udržují v konstantní teplotě, anebo se provádí kompenzace vlivu teploty okolí na srovnávacích spojích obvodem. [9]

5.1.3 Výhody kontaktního měření teploty:

- Nízká cena
- Možnost snadného umístění uvnitř i vně stroje
- Nezávislost měření na povrchu stroje
- Velká rychlost odezvy – v závislosti na čidle

5.1.4 Nevýhody kontaktního měření teploty:

- Nutnost vyvedení připojovacích vodičů
- Komplikované měření na pohyblivých částech stroje
- Někdy nutnost zasáhnout do konstrukce stroje – vrtání otvoru apod. [7]

5.2 Bezkontaktní měření

Bezkontaktní měření teploty je založeno na sledování povrchové teploty těles na základě elektromagnetického záření. Toto záření je zpracováno pomocí detektoru, který zaznamená záření v rozsahu vlnových délek 0,4mm do 25mm . Tento rozsah pokrývá velkou část infračerveného spektra a umožňuje tedy měřit teploty od -40°C do $+10\,000^{\circ}\text{C}$. Každý materiál vyzařuje jiným způsobem. Proto je pro každý materiál stanovena veličina, která udává míru vyzařování povrchu tělesa. Ačkoliv existují tabulky hodnot emisivity pro jednotlivé materiály, je vhodné na počátku měření ověřit, zda tato hodnota odpovídá právě měřenému materiálu. Důvod k tomu je jednoduchý. Na materiálech (zvláště na kovech) se objevují různé povrchové vrstvy a vlastnosti, které mají vliv právě na míru vyzařování. Povrchovými vrstvami může být například nátěr nebo koroze materiálu. Mezi povrchové vlastnosti patří například odrazivost povrchu, která může zapříčinit, že senzor zaznamená odraz zdroje tepla, který se nachází v blízkosti měřeného elektrického stroje. K řešení tohoto problému je možné použít několik metod.

Základní metodou je nátěr lesklých částí matnou barvou. Tato metoda je velmi levná a jednoduchá, ale zvláště u elektrických strojů může způsobit řadu problémů. Natírání členité konstrukce motorů může být složité a je nutné dávat pozor, aby barva nezpůsobila zkrat v elektrických částech stroje.

Pro bezkontaktní měření teploty se používají mimo jiné dva hlavní typy měřicích přístrojů:

Pyrometry – měřicí přístroj pro rychlá a spíše orientační měření. Pracuje na principu zaostření vyzařované teploty do jednoho detektoru uvnitř měřicího přístroje. Přesnost dosažených výsledků je závislá na velké řadě parametrů (například úhlu naklonění proti měřenému povrchu, apod.). Získání kvalitních výsledků pomocí tohoto přístroje vyžaduje určitou zkušenost. Díky svému jednoduchému ovládní se ale hodí pro přehledová měření, u kterých nezáleží na přesnosti.

Termokamery - využívají při bezkontaktním měření teploty zaznamenání celého povrchu stroje do jednoho digitálního snímku. Tento snímek je pak možné dále analyzovat pomocí speciálních programů. V nich je pak možné měnit všechny parametry měření a tedy provést důkladnou analýzu teplotního pole. Toho lze s úspěchem využít při teplotní analýze elektrického stroje, jehož povrch je tvořen několika různými materiály. Termosnímek se zaznamená v jediný časový okamžik. Následně je tedy možné zjistit teplotu jednotlivých částí stroje v tomto čase bez větších problémů. [7]

5.2.1 Výhody bezkontaktního měření teploty

- Možnost měřit teploty celého povrchu tělesa v jednom okamžiku
- Měření rychlých změn teploty
- Možnost měření na pohybujiících se objektech
- Malý vliv měřicího přístroje na měřený objekt

5.2.2 Nevýhody bezkontaktního měření teploty

- Problém s určením správné emisivity povrchu
- Chyby měření způsobené prostupností prostředí
- Problémy s odrazem teploty na lesklých částech [7]

6 ANSYS

ANSYS je programový balík založený na metodě konečných prvků. Je určen pro řešení rozsáhlých lineárních i nelineárních (fyzikálně i geometricky) úloh mnoha různých kategorií: strukturální, teplotní, teplotně-mechanické, elektromagnetické, akustické atd.



Obr. č. 4 Logo programu Ansys

Velkou předností ANSYSu je přímá podpora importu geometrií a FE modelů z některých CAD systémů - Unigraphics, Pro/Engineer a SAT. Zcela ojedinělou vlastností je možnost volby mezi h-Method a p-Method pro potřeby adaptace sítě a dále pak podpora jak parametrické tak topologické optimalizace.

Program nabízí možnost řešit celou řadu sdružených úloh. Zatímco pro některé typy sdružených úloh je postačující použití adekvátní formulace konečných prvků (např. pro teplotně-mechanické, elektromagnetické a piezoelektrické úlohy), jiné vyžadují umístění speciálních elementů na rozhraní interagujících prostředí - to je obecně případ kontaktních úloh, mezi které lze zahrnout i interakci zvukových vln a chvění pevné konstrukce.

Díky modulu FLOTRAN (který je standardní součástí balíku) je uživatel schopen řešit i úlohy proudění tekutin, opět včetně interakce s okolím. Ačkoliv v možnostech modulu je použití jak ne vazkých a vazkých tekutin, jakož i laminárního a několika turbulentních modelů, není v oblasti proudění plně srovnatelný se speciálními balíky jako např. Fluent.

Systém ANSYS poskytuje bezkonkurenčně nejpřehlednější a nejúplnější dokumentaci v elektronické podobě ze všech významných FE řešičů. [3]

7 ASYNCHRONNÍ STROJ

7.1 Konstrukce

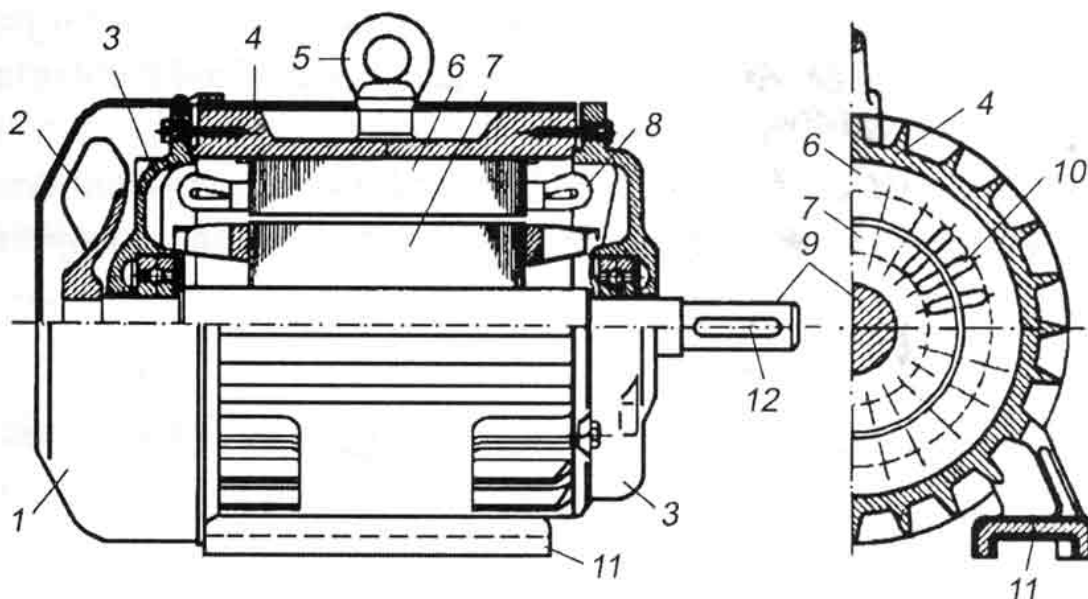
Pro svou konstrukční jednoduchost a provozní spolehlivost je trojfázový motor nejpoužívanějším elektrickým motorem. Snadno se obsluhuje, jeho rychlost otáčení se při proměnlivém zatížení téměř nemění a vyhovuje, pokud se nevyžaduje řízení rychlosti otáčení.

Statorové kostry (4) bývají nejčastěji litinové. Plechy statoru (6) malých motorů drží v kostře pouze třením. Trojfázové vinutí (8) z izolovaných vodičů je uloženo v drážkách (10) na vnitřním obvodu statorových plechů (6). Vinutí je uspořádáno tak, že jakmile je napájeno trojfázovým proudem, vytvoří točivé magnetické pole.

Plechys jsou tlusté 0,5mm a izolované lakem. Vzduchová mezera mezi statorem a rotorem je co nejmenší s ohledem na přesnost výroby a bezpečnost provozu, aby magnetický odpor, a tím i magnetizační proud byly co nejmenší. V dutině statoru se otáčí rotor, který je stejně jako stator z plechů. Rotorové plechy (7) malých motorů se nasazují přímo na hřídel (9), který je buď vroubkován nebo má drážku (12) pro pérový klín. U větších průměrů se plechy nasazují na lité nebo svařované hvězdice, které jsou naklínovány na hřídeli.

Motory s kotvou nakrátko mají drážky rotoru vyplněny měděnými tyčemi. Po obou stranách rotoru jsou tyče spojeny měděnými kruhy. Tyče a kruhy tvoří klec. Dnes se používají lité hliníkové klece. Tyče, kruhy i větrací lopatky na kruzích se odlévají současně. V současnosti se většinou konstruují motory s povrchovým chlazením. Motor je úplně uzavřený, statorový svazek (paket) plechů je nalisován do litinové kostry, na jejímž povrchu jsou přilita chladicí žebra. Větrák je vně na zadní straně motoru a fouká chladicí vzduch na žebra.

Konce cívek statorového vinutí jsou vyvedeny ke svorkám svorkovnice. Statorové vinutí můžeme spojit do hvězdy nebo do trojúhelníka. [4]



Obr. č. 5 Řez asynchronním motorem

7.2 Energetická bilance asynchronního motoru

7.2.1 Ztráty asynchronního motoru

Ztráty v procesu přeměny elektrické energie na mechanickou způsobují oteplování motoru. Účinnost motoru tedy závisí na ztrátách motoru, proto minimalizací ztrát dosáhneme vyšší účinnosti asynchronního motoru. Ztráty dělíme do čtyř základních skupin:

- Jouleovými ztrátami ve vinutí (v mědi)
- Hysterezními ztrátami (v železe)
- Ztrátami způsobenými vířivými proudy
- Ztrátami mechanickými

$$\Delta P_{celk} = \Delta P_{cu} + \Delta P_h + \Delta P_v + \Delta P_{mech}$$

kde,

ΔP_{celk} ...celkové ztráty motoru [W]

ΔP_{cu} ...Jouleovy ztráty ve vinutí [W]

ΔP_h ...hysterezní ztráty v železe [W]

ΔP_v ...ztráty vířivými proudy [W]

ΔP_{mech} ...ventilační a mechanické ztráty [W]

Účinnost stroje se vypočítá jako:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100 \text{ [%]}$$

kde,

P_2 ...výkon na hřídeli [W]

P_1 ...příkon [W]

Mechanické ztráty určíme ze vztahu:

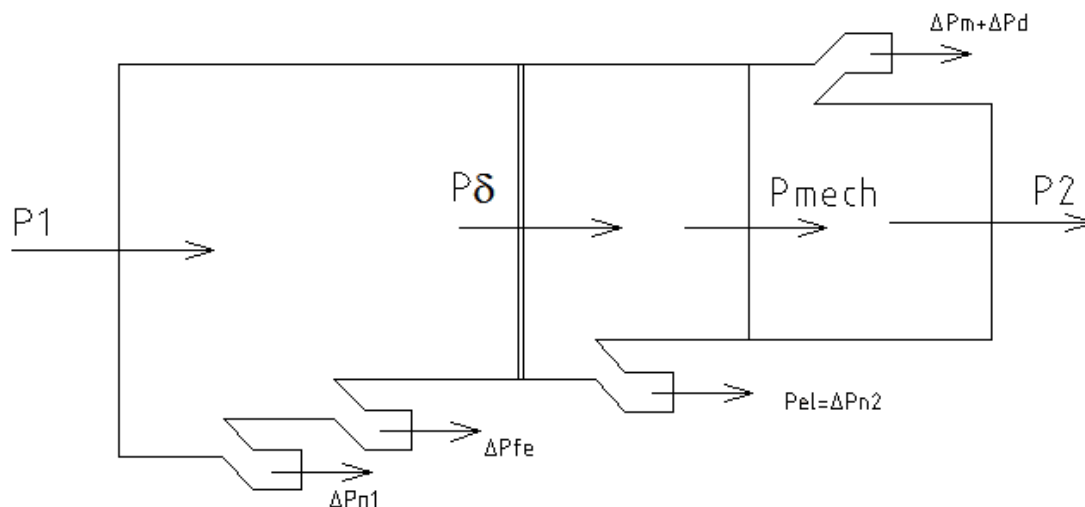
$$\Delta P_{mech} = P_{mech} - P_2 - \Delta P_d$$

kde,

P_{mech} ...mechanický výkon stroje [W]

ΔP_d ...ztráty dodatečné [W]

7.2.2 Tok výkonu asynchronního stroje



Obr. č. 6 Tok výkonu v ASM

kde,

P_1 ...příkon motoru

ΔP_{n1} ...činné ztráty ve vinutí statoru

ΔP_{fe} ...ztráty v magnetickém obvodu motoru

P_δ ...výkon ve vzduchové mezeře

ΔP_{n2} ...činné ztráty ve vinutí rotoru

P_{mech} ...mechanický výkon stroje

$\Delta P_m + \Delta P_d$...mechanické a ventilační ztráty (dodatečné ztráty) ΔP_{mag}

P_2 ...výkon na hřídeli

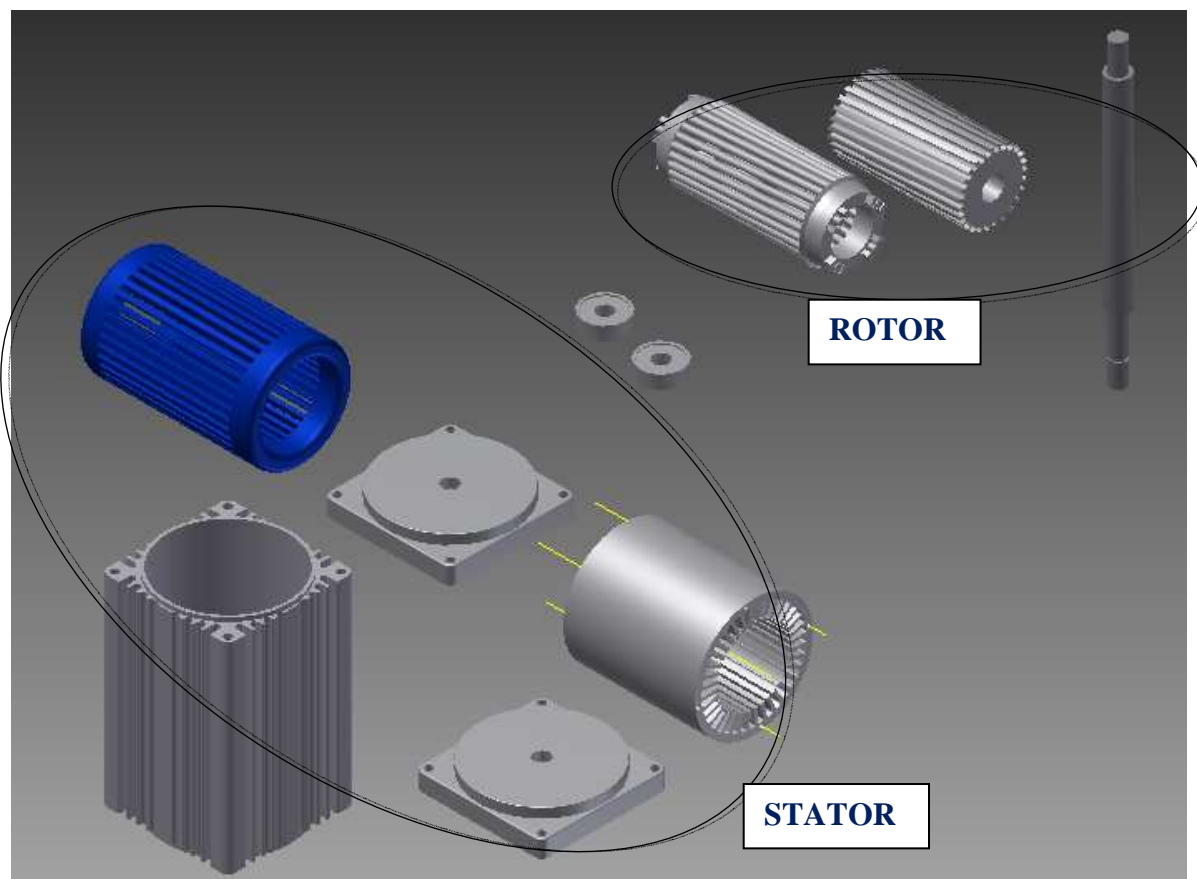
8 TEPLOTNÍ ANALÝZA ASYNCHRONNÍHO STROJE

Teplotní analýzy se využívá ke zjištění teploty kdekoliv v motoru a jeho okolí. Analýza v programu ANSYS je tímto nespornou výhodou. Předcházíme tím komplikovanému měření teplot pomocí termočlánků nebo termistorů a jejich pracnému umístění do vnitřku motoru.

Pro teplotní analýzu byl vybrán trojfázový asynchronní motor s kotvou nakrátko pracující na síťové frekvenci.

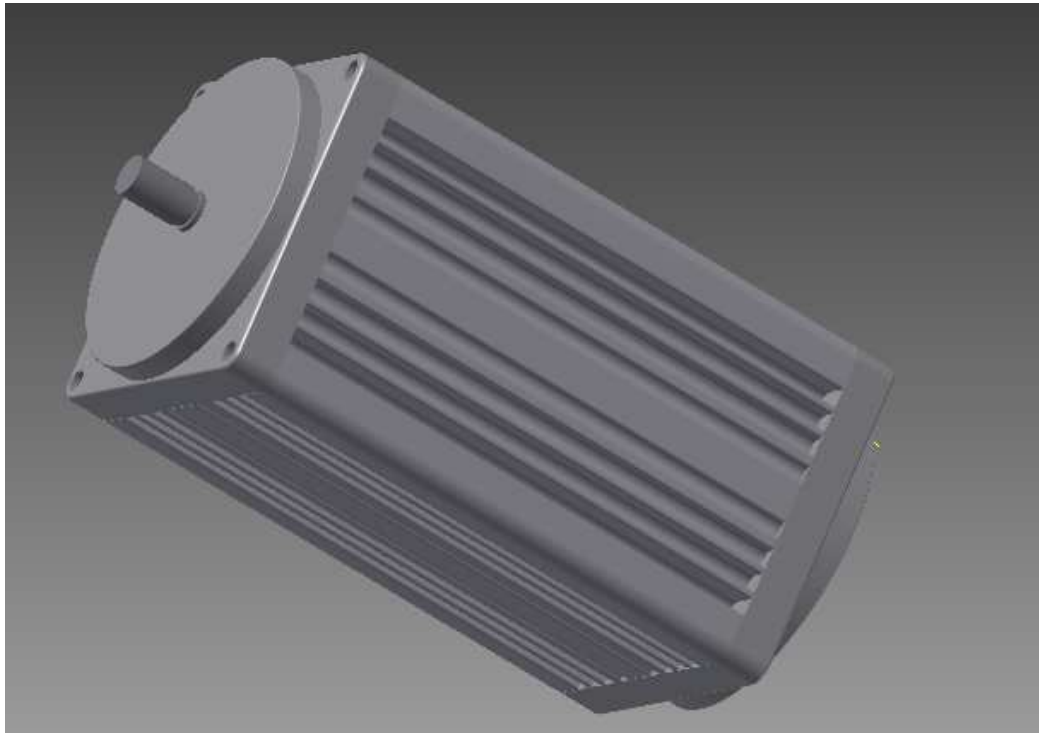
8.1 Model motoru v programu Autodesk Inventor 2011

Pro vytvoření modelu motoru byl použit konstrukční program Autodesk Inventor 2011. Model motoru byl sestaven z několika základních součástí. Obalem se žebrováním, dvěma bočními kryty, dvěma prstenci představujícími ložiska, hřídelí, statorovým vinutím, statorovými a rotorovými drážkami a konečně klecí rotoru.

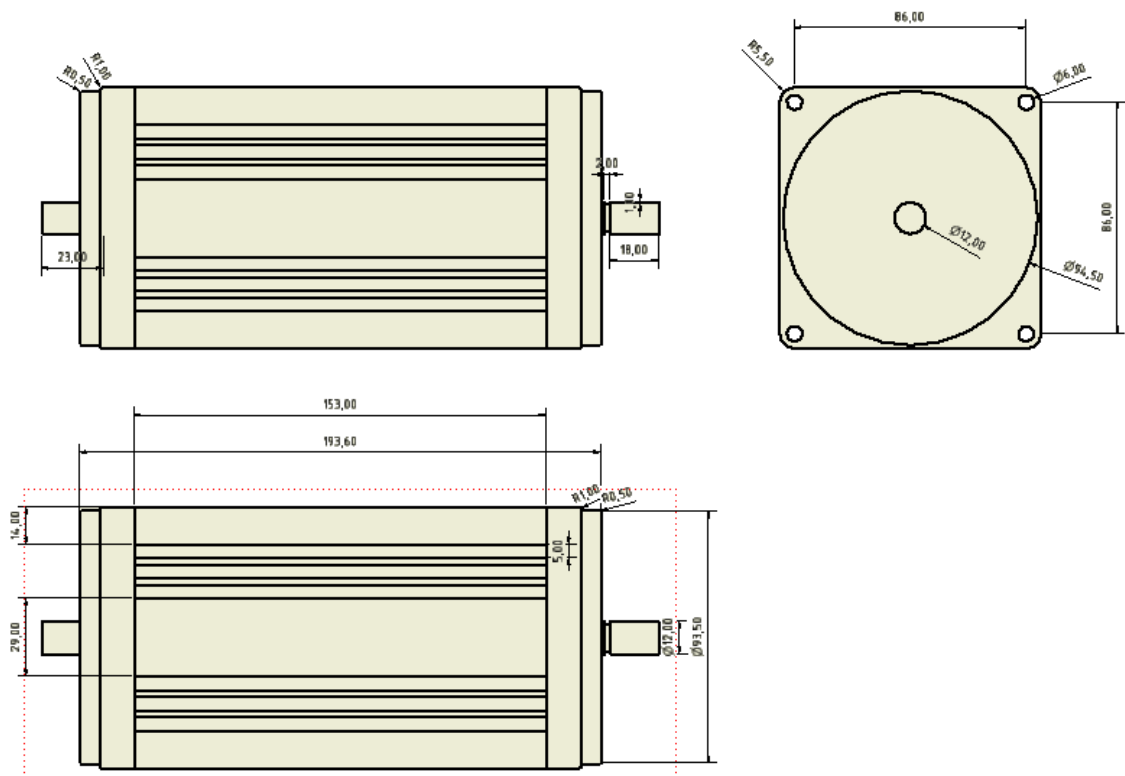


Obr. č. 7 Komponenty pro sestavení modelu motoru

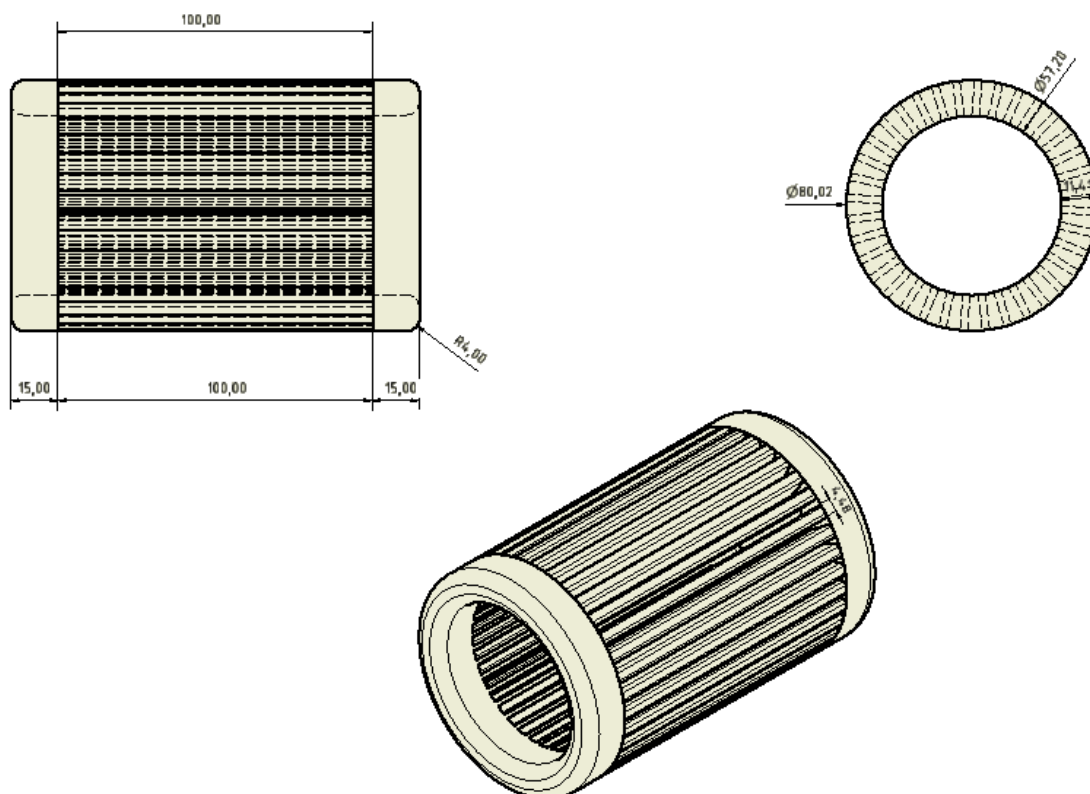
Pomocí vazeb mezi jednotlivými součástmi byl vytvořen model motoru (viz. Obr. č. 7), který byl poté uložen ve formátu .SAT a importován k analýze do programu ANSYS.



Obr. č. 8 Model motoru v programu Autodesk Inventor 2011



Obr. č. 9 Okótovaný model ASM



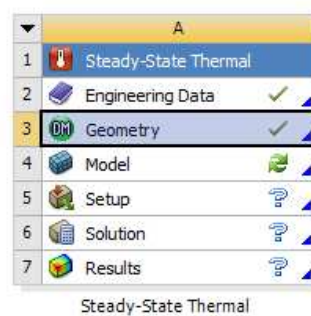
Obr. č. 10 Okótovaný model vinutí statoru

8.2 Model statické a transientní teplotní analýzy

Pomocí modulu statická teplotní analýza, jsme schopni zobrazit ustálené oteplení motoru za danou časovou jednotku za nominálních podmínek.

Prvním krokem pro dosažení výsledků statické teplotní analýzy je zvolení právě modulu statické teplotní analýzy v ANSYS Workbench. Byly zobrazeny 3 kroky, které musíme nadefinovat k získání výsledků. Těmi jsou:

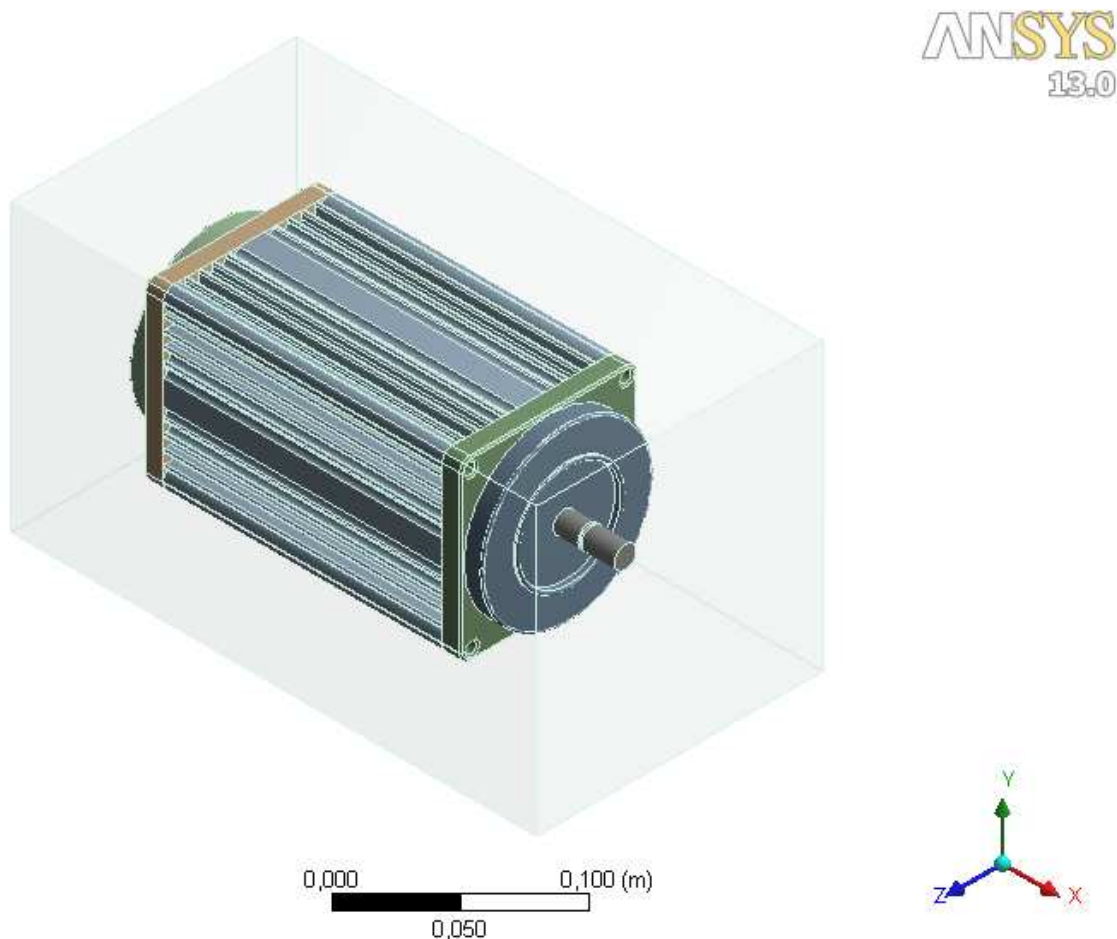
- Geometry
- Model
- Setup



Obr. č. 11 Modul statické teplotní analýzy

8.2.1 Geometry

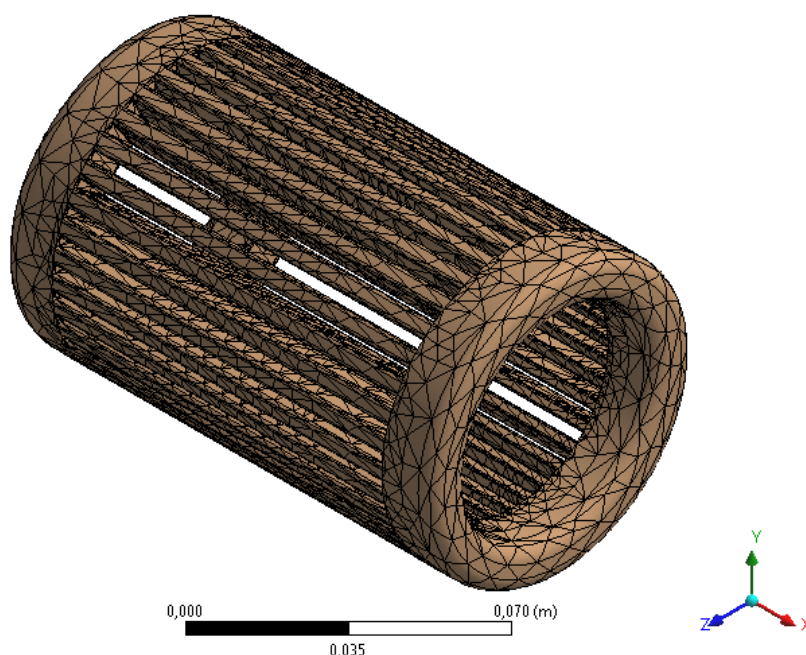
V prvním kroku „Geometry“ bylo otevřeno okno DesignModeler, kam byl importován model motoru vytvořený v Autodesk Inventoru 2011 a uložený s koncovkou *.sat. Zde je také možno geometrii vymodelovat, nicméně modelování nedosahuje takových kvalit jako Autodesk Inventor 2011. Pro teplotní analýzu stroje hraje okolní teplota vzduchu velkou roli, tudíž kolem motoru byl příkazem **enclosure** vytvořen vzduchový obal a zvolen jeho tvar a velikost.



Obr. č. 12. Motor a jeho vzduchový obal

Poté se provedlo meshování, to znamená, že se celý model stroje rozdělil na síť konečných prvků složených z obecných čtyřstěnů (tetraedrů). V nabídce je možno vybrat, jak hustá síť má být. Obecně platí, že čím hustější je síť, tím přesnější výpočet je. Hustotu sítě můžeme změnit nastavením velikosti jednotlivých elementů nebo nadefinováním počtu elementů na danou entitu. V našem případě byla hustota sítě zvolena výchozí.

Příklad konečnoprvkové sítě na statorovém vinutí motoru je na obrázku č. 12. Síť má 50 414 elementů.



Obr. č. 13 Síť na vinutí statoru

8.2.2 Model

Po otevření nabídky „Model“ se otevřelo další nové okno „Mechanical“, kde se nejprve nastavila teplota ve vzduchovém obalu a to 22°C. To znamená, že stěny vzduchového obalu vyzařují teplo 22°C.

V další fázi byly přiřazeny materiály všem komponentám motoru z přednastavené knihovny ANSYS. Byly zvoleny materiály:

- Structural steel (konstrukční ocel)
- Air (vzduch)
- Aluminium alloy (slitina hliníku)
- Copper (měď)

8.2.3 Setup

Dalším důležitým krokem bylo nastavení ztrát v mědi $\Delta P_{cu}=150W$, ztrát v železe $\Delta P_{Fe}=80W$ a ztrát mechanických $\Delta P_{mech}=10W$ v částech modelu a to pomocí příkazu „Internal Heat Generation“ a vybráním příslušné součásti ASM. Zde vyzařují teplo již celé objemy součástí.

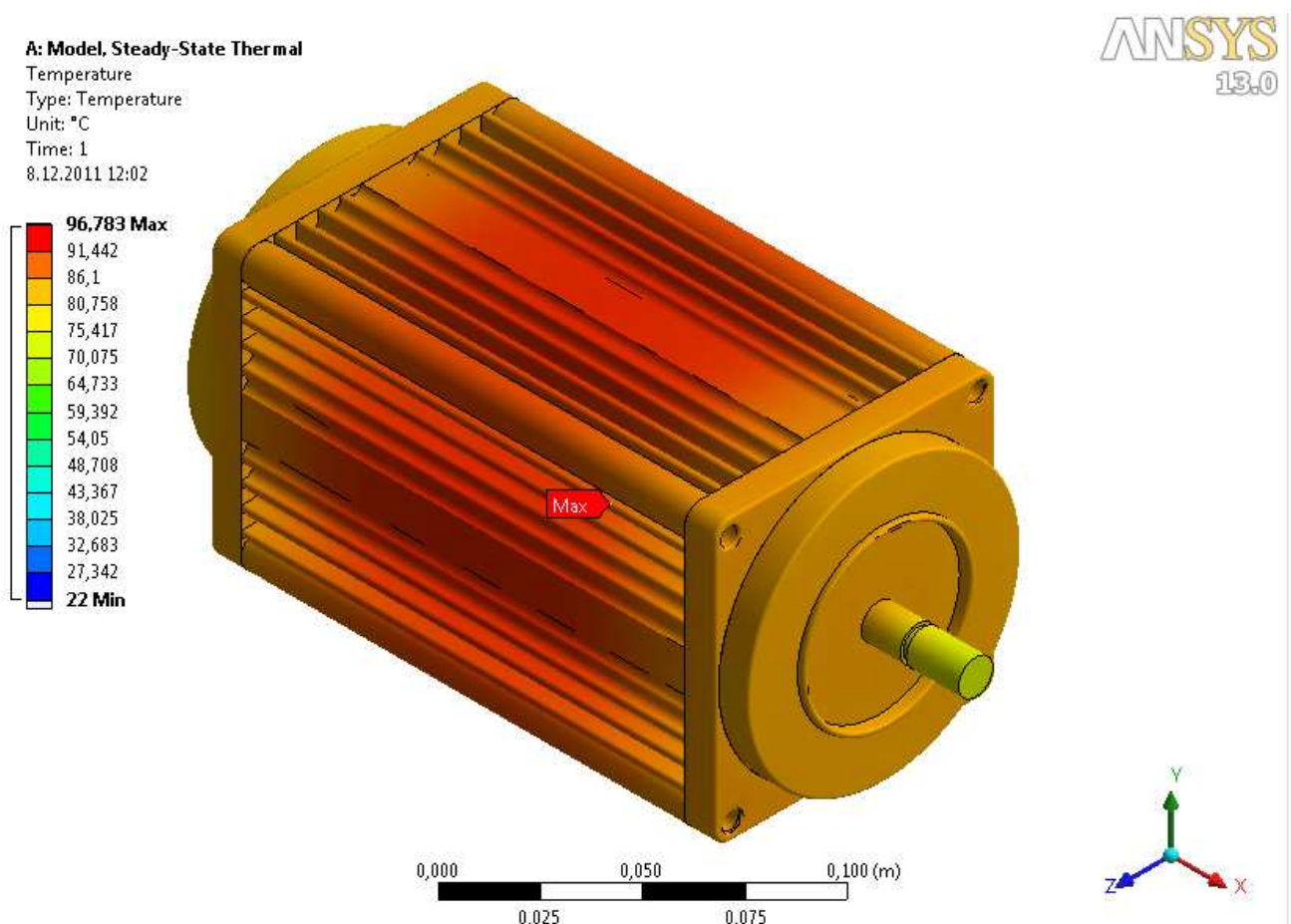
Ztráty se zde ovšem zadávají v jednotce generovaného tepla $\left[\frac{W}{m^3}\right]$, tudíž se ztráty musejí přepočítat podle objemu příslušných součástí.

Například ztráty v mědi jsou definované pro statorové vinutí a klec.

$$V_{stat} = 2,19 \cdot 10^{-4} [m^3]$$
$$V_{klec} = 8,4735 \cdot 10^{-5} [m^3]$$
$$Q_{stat} = \frac{\Delta P_{Cu}}{V_{stat} + V_{klec}}$$
$$Q_{stat} = \frac{150}{2,19 \cdot 10^{-4} + 8,4735 \cdot 10^{-5}} = 493851,5 [W/m^3]$$

Po nadefinování těchto podmínek již bylo možno přistoupit k samotnému teplotnímu výpočtu a to příkazem „Solve“. Po asi třicetiminutovém výpočtu (solution) se zobrazily výsledky (results).

8.2.4 Výsledky statické teplotní analýzy

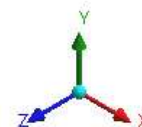
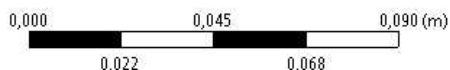
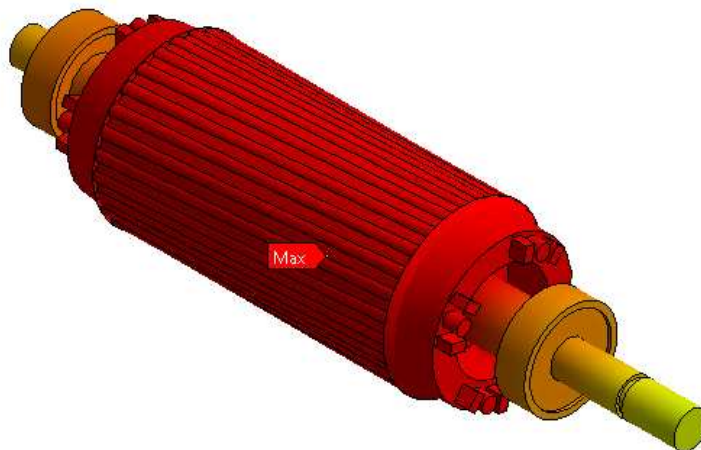
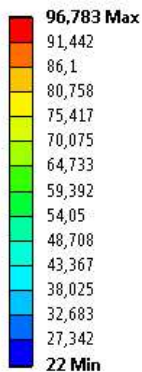


Obr. č. 14 Rozložení teploty na modelu stroje

A: Model, Steady-State Thermal

Temperature
Type: Temperature
Unit: °C
Time: 1
8.12.2011 11:59

ANSYS
13.0

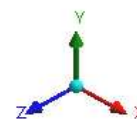
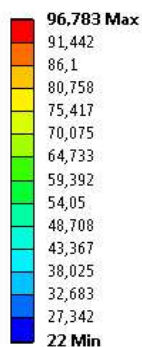


Obr. č. 15 Rozložení teploty na modelu rotoru

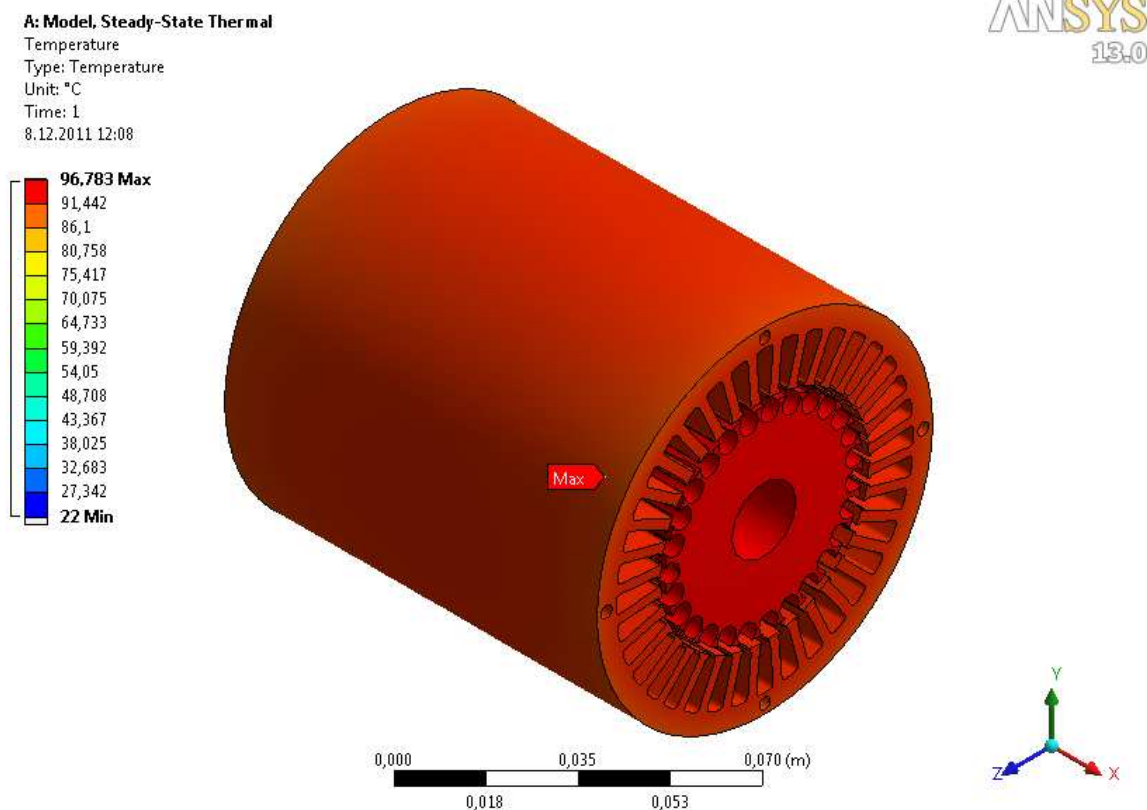
A: Model, Steady-State Thermal

Temperature
Type: Temperature
Unit: °C
Time: 1
8.12.2011 12:04

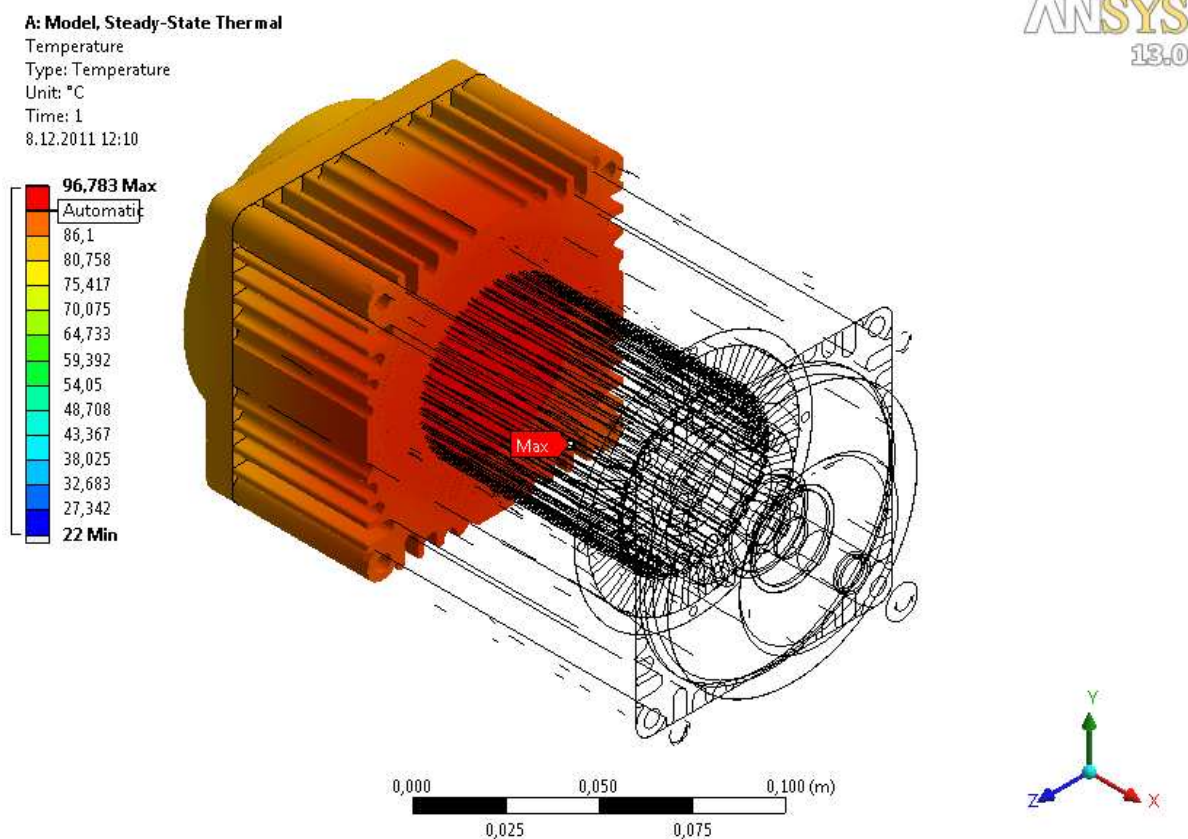
ANSYS
13.0



Obr. č. 16 Rozložení teploty na modelu statoru



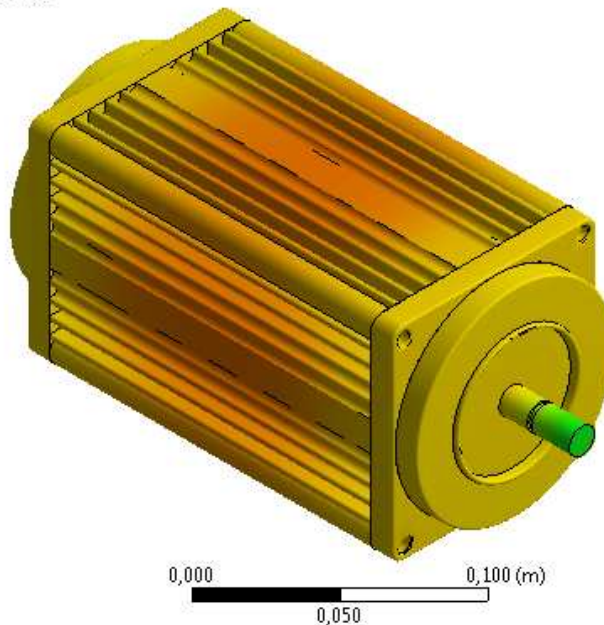
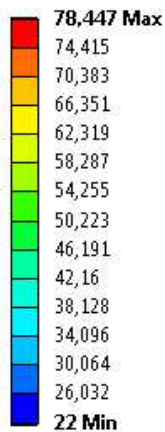
Obr. č. 17 Rozložení teploty v magnetickém obvodu motoru



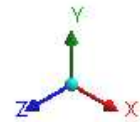
Obr. č. 18 Rozložení teploty v řezu motoru

8.2.5 Výsledky transientní teplotní analýzy

B: Model, Transient Thermal
Temperature
Type: Temperature
Unit: °C
Time: 3600
8.12.2011 10:23

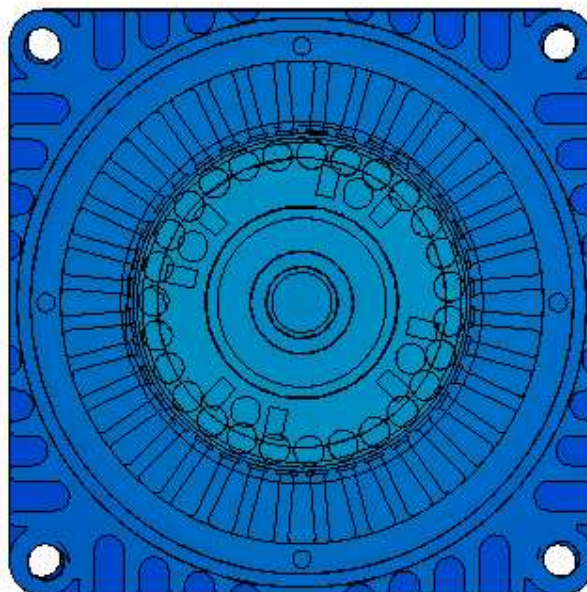
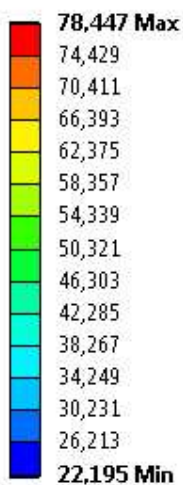


ANSYS
13.0



Obr. č. 19 Rozložení teploty motoru v čase 3600s

B: Model, Transient Thermal
Temperature
Type: Temperature
Unit: °C
Time: 180
8.12.2011 10:19



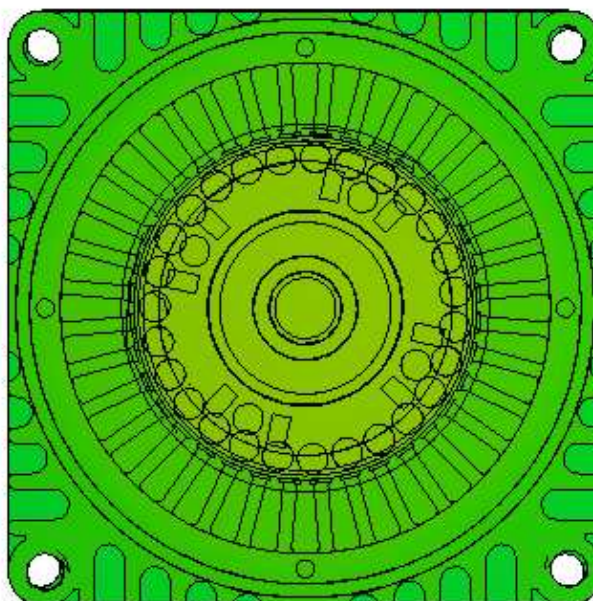
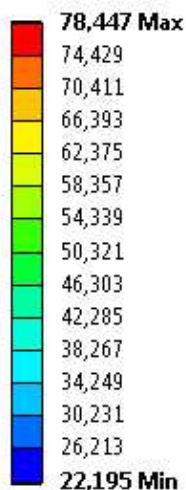
ANSYS
13.0



Obr. č. 20 Rozložení teploty motoru v čase 180s

B: Model, Transient Thermal

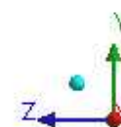
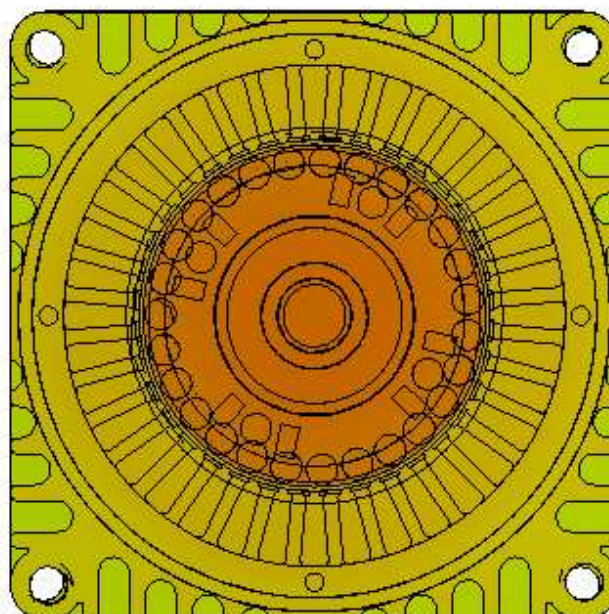
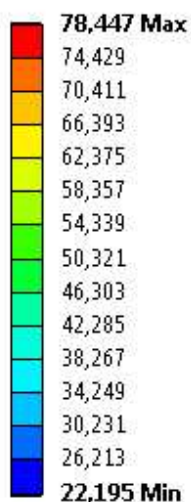
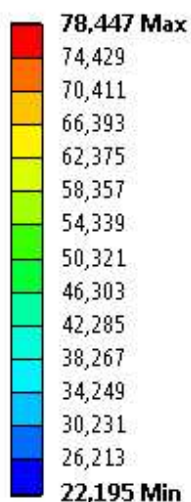
Temperature
Type: Temperature
Unit: °C
Time: 1078,6
8.12.2011 10:06



Obr. č. 21 Rozložení teploty v řezu motoru v čase 1078,6s

B: Model, Transient Thermal

Temperature
Type: Temperature
Unit: °C
Time: 2158,6
8.12.2011 10:09

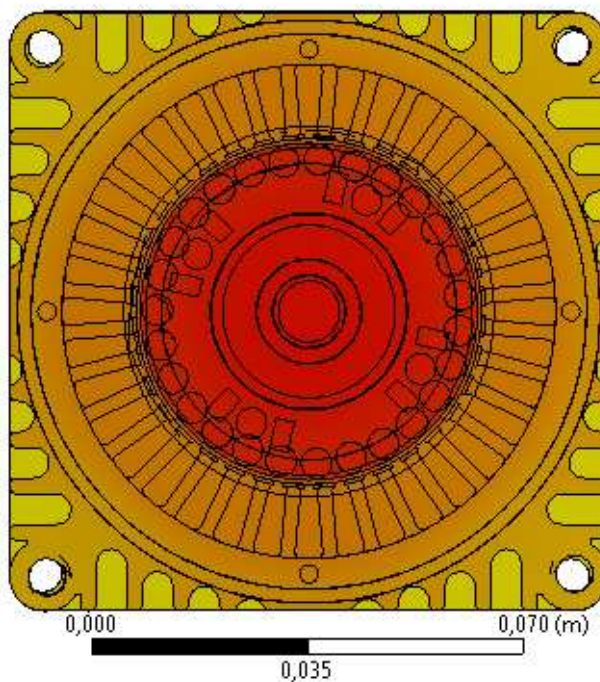
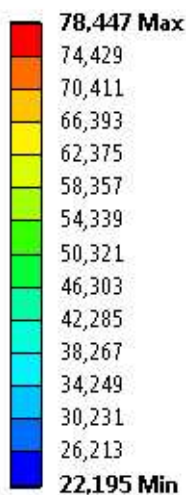


Obr. č. 22 Rozložení teploty v řezu motoru v čase 2158,6s

B: Model, Transient Thermal

Temperature
Type: Temperature
Unit: °C
Time: 2878,6
8.12.2011 10:14

ANSYS
13.0

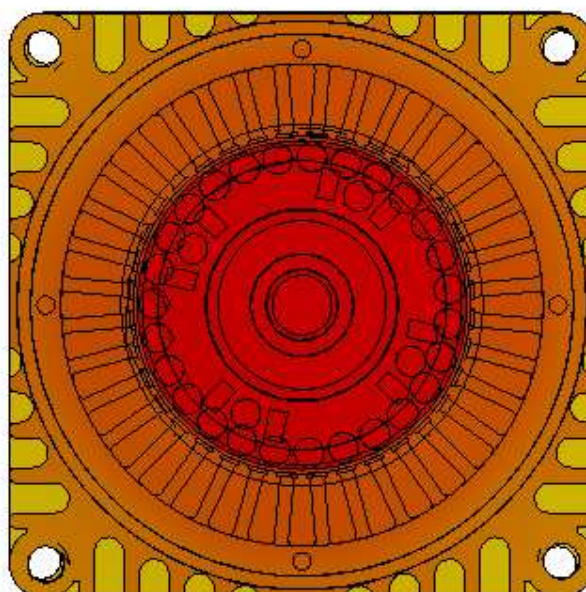
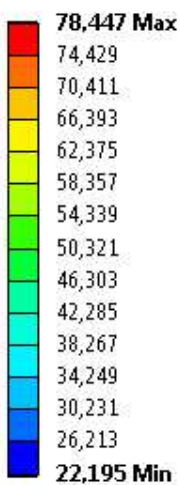


Obr. č. 23 Rozložení teploty v řezu motoru v čase 2878,6s

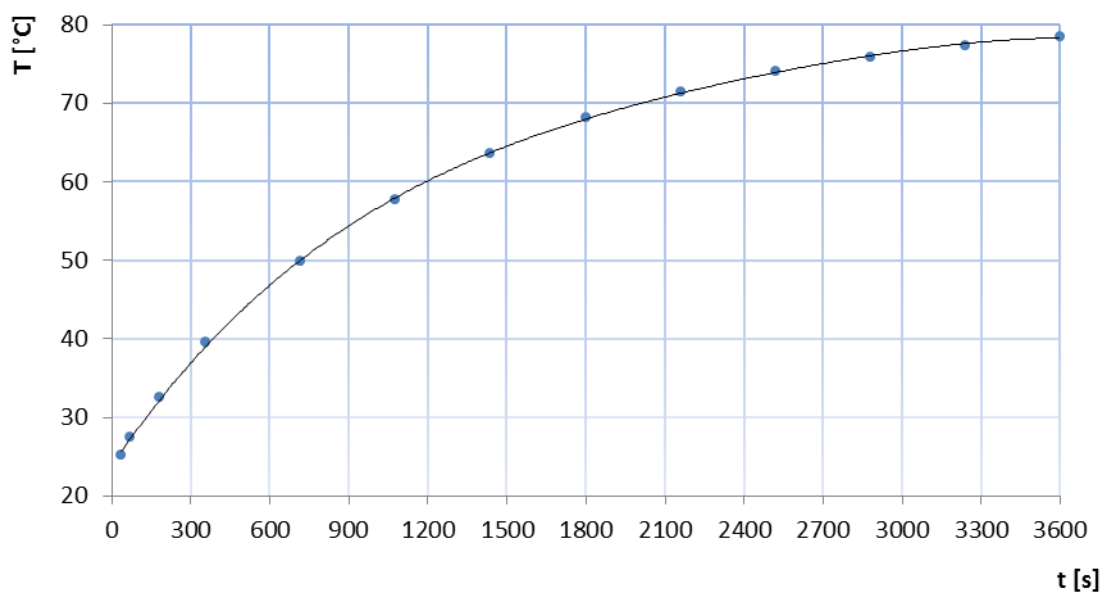
B: Model, Transient Thermal

Temperature
Type: Temperature
Unit: °C
Time: 3600
8.12.2011 10:16

ANSYS
13.0



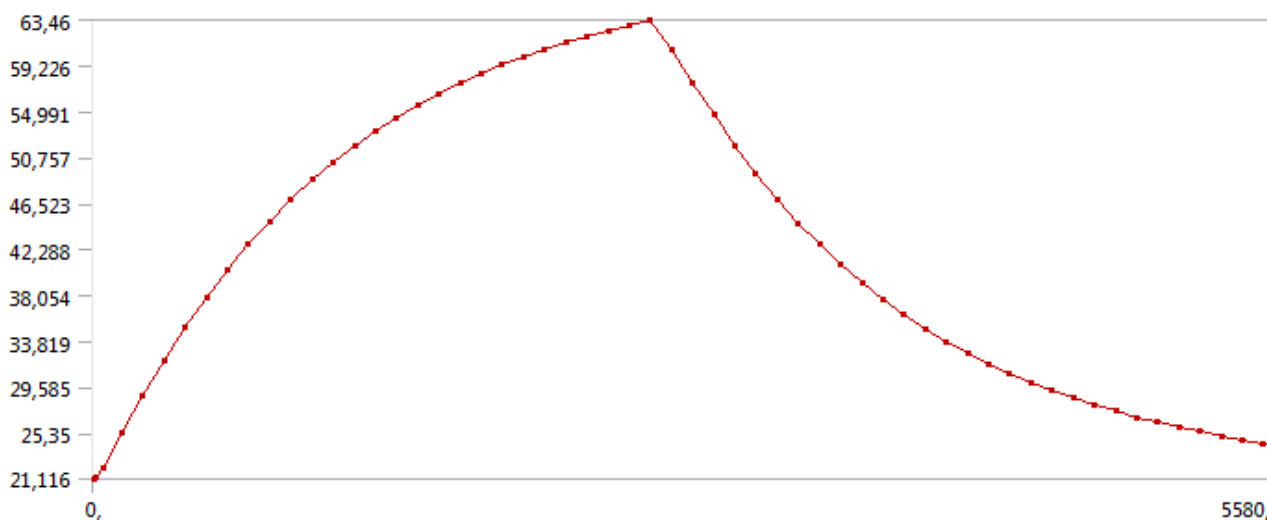
Obr. č. 24 Rozložení teploty v řezu motoru v čase 3600s



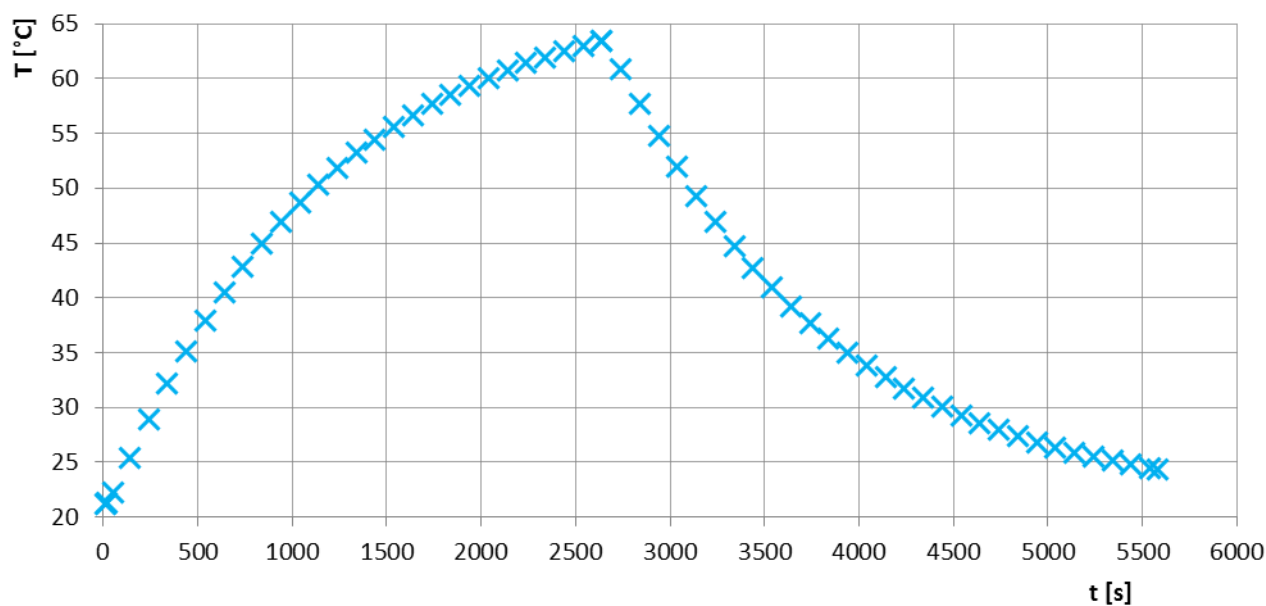
Obr. č. 25 Oteplovací charakteristika modelu stroje

9 VÝSLEDKY OTEPLOVACÍ A OCHLAZOVACÍ ANALÝZY NA MODELU STROJE

Tato analýza byla nasimulována v programu Ansys v celkovém čase 93 minuty, přičemž motor byl v chodu bez zatížení po dobu 45 minut a ve vypnutém stavu po dobu 48 minut. Teplota okolí byla nastavena 21°C. Na obrázku číslo 26 je znázorněna oteplovací charakteristika přímo z programu Ansys, ale pro její časovou nepřehlednost byla v programu Microsoft Excel předělána. Ta je zobrazena na obrázku číslo 27. Teplotní charakteristika je zobrazena pro povrch motoru. Na obrázcích č. 28 až 33 jsou zobrazeny teploty na povrchu motoru při různých časech.



Obr. č. 26 Teplotní charakteristika modelu stroje z programu Ansys

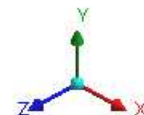
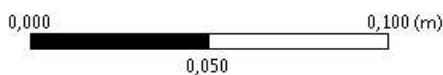
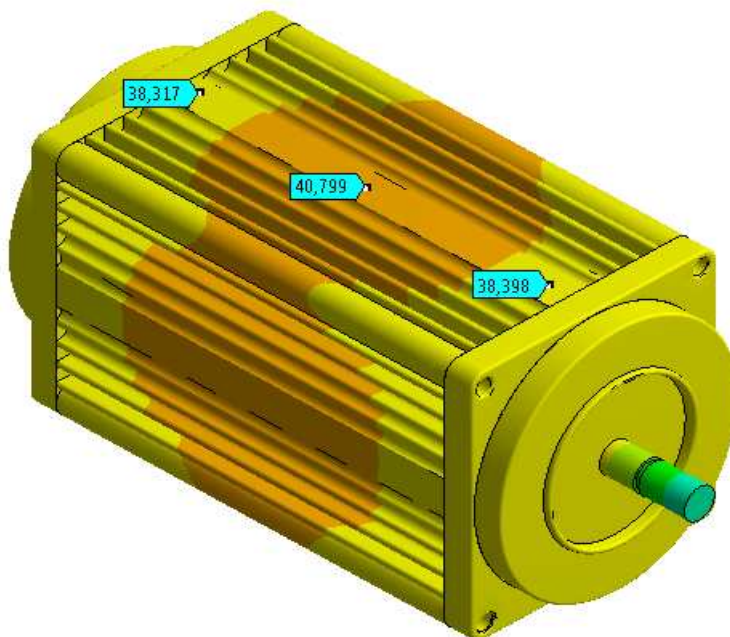
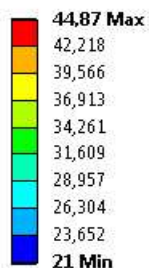


Obr. č. 27 Teplotní charakteristika modelu stroje z programu Excel

B: Model, Transient Thermal

Temperature 2
Type: Temperature
Unit: °C
Time: 540
17.5.2012 12:18

ANSYS
13.0

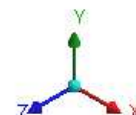
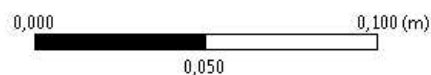
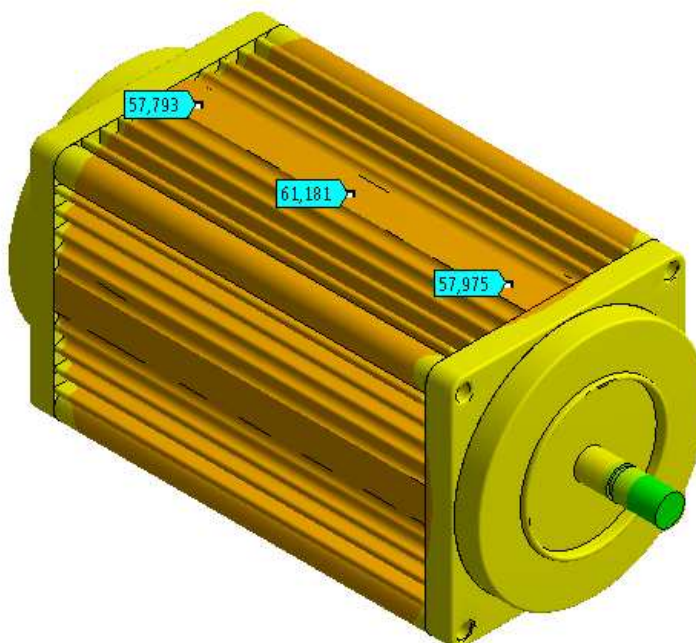
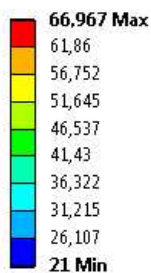


Obr. č. 28 Rozložení teploty motoru v čase 540s

B: Model, Transient Thermal

Temperature 2
Type: Temperature
Unit: °C
Time: 1640
17.5.2012 12:20

ANSYS
13.0

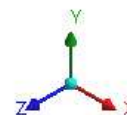
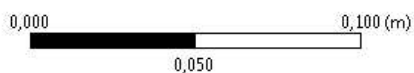
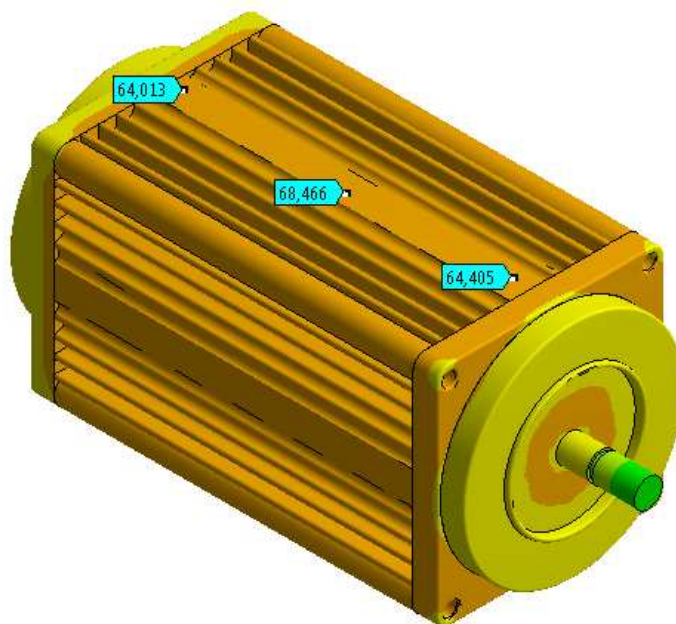
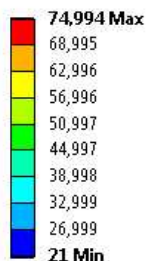


Obr. č. 29 Rozložení teploty motoru v čase 1640s

B: Model, Transient Thermal

Temperature 2
Type: Temperature
Unit: °C
Time: 2640
17.5.2012 12:22

ANSYS
13.0

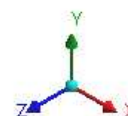
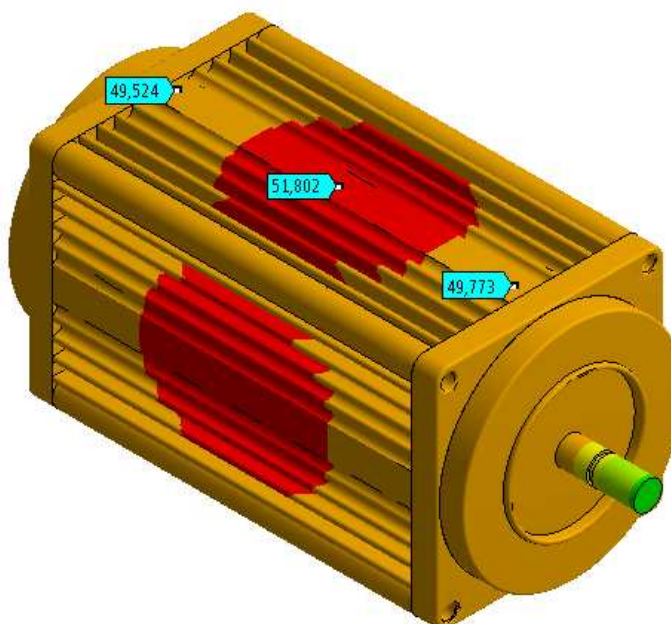
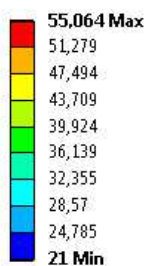


Obr. č. 30 Rozložení teploty motoru v čase 2640s

B: Model, Transient Thermal

Temperature 2
Type: Temperature
Unit: °C
Time: 3140
17.5.2012 12:24

ANSYS
13.0

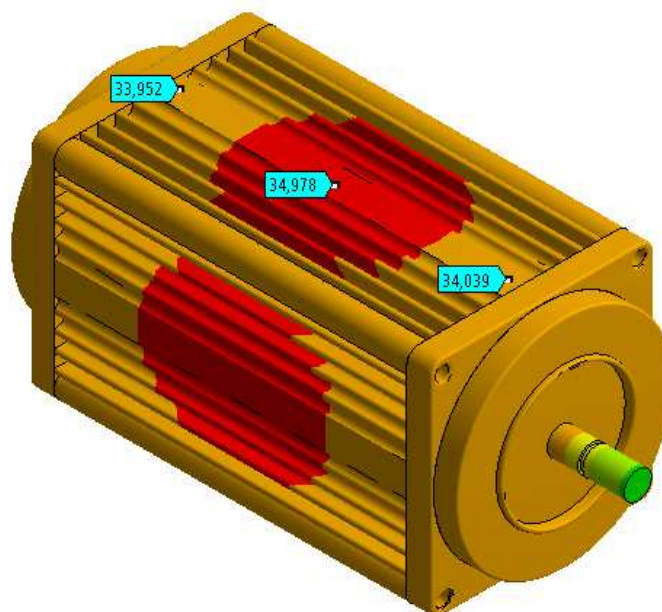
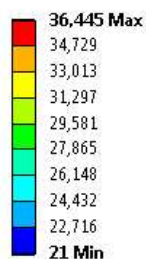


Obr. č. 31 Rozložení teploty motoru v čase 3140s

B: Model, Transient Thermal

Temperature 2
Type: Temperature
Unit: °C
Time: 4040
17.5.2012 12:26

ANSYS
13.0

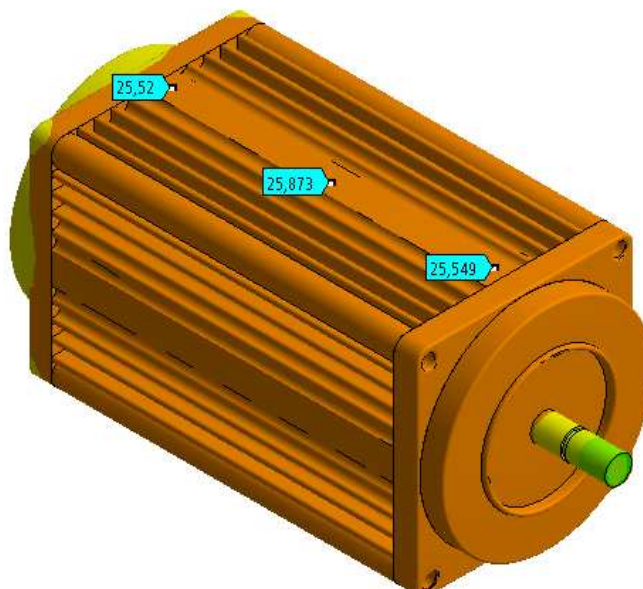
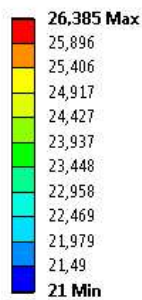


Obr. č. 32 Rozložení teploty motoru v čase 4040s

B: Model, Transient Thermal

Temperature 2
Type: Temperature
Unit: °C
Time: 5240
17.5.2012 12:32

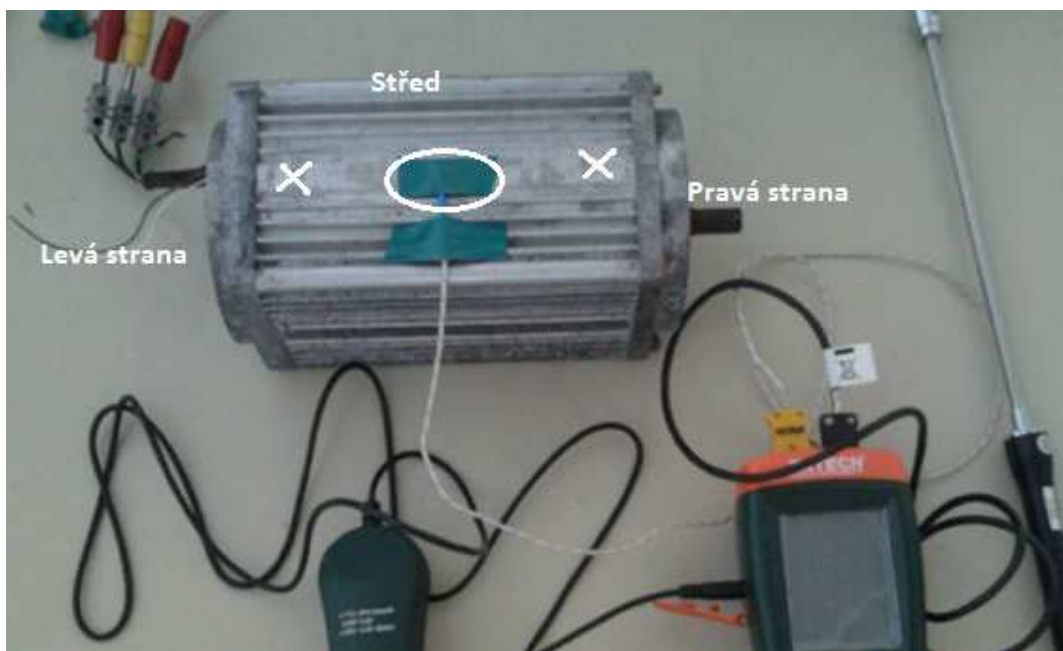
ANSYS
13.0



Obr. č. 33 Rozložení teploty motoru v čase 5240s

9.1 Výsledky laboratorního měření oteplovací a ochlazovací charakteristiky

Laboratorní měření bylo realizováno po dobu rovněž 93 minut. Měření oteplovací a ochlazovací charakteristiky bylo prováděno stejnými měřicími přístroji. Měření bylo uskutečněno na povrchu stroje na třech měřících bodech, jak naznačuje obrázek č. 34. Měření bylo prováděno třemi typy měřících přístrojů. První typ byl kontaktní termočlánek (v tabulce č. 2 a 3 Termočl1), který byl izolační páskou upevněn na střed motoru, jak je patrné z obrázku č. 34.



Obr. č. 34 Názorné zobrazení měřících bodů

Dalším typem měřícího přístroje byl tyčový teploměr (v tabulce č. 2 a 3 Termočl 2), který má v „hlavě“ tyče termočlánek, který díky konstrukci tyče dokonale dosedá na měřenou plochu. To je hlavní výhoda oproti termočlátku přilepeném izolační páskou, která se může v postupu času odlepit a termočlánek ztratí bezprostřední kontakt s měřenou plochou. Tyčovým teploměrem byl motor měřen na pravé a levé straně.

Třetím typem měřicího přístroje byl bezkontaktní teploměr (v tabulce č. 2 a 3 Bezkontakt.), kterým byly měřeny také pravá a levá strana motoru. Měření bylo prováděno ze vzdálenosti asi 40 centimetrů kolmo k povrchu stroje. Tento měřicí přístroj slouží spíše k orientačním měřením. Důvodem je, že se u něho vůbec nenastavovala emisivita měřeného povrchu. V tabulce č. 2 si můžeme povšimnout rozdílných hodnot naměřených předchozími měřicími přístroji a tímto.

OTEPLOVACÍ CHARAKTERISTIKA					
t	Termočl 1 [°C]	Termočl 2 [°C]		Bezkontakt [°C]	
[min]	Střed	Pravá	Levá	Pravá	Levá
0	22,5	21,3	21,3	21,5	21,6
3	24,9	23,5	23,5	24,2	24,2
6	28,5	27,2	27,2	26,3	26,3
9	31,1	30,2	30,5	27,7	26,8
12	32,7	33,1	32,7	28,8	28,7
15	35,7	35,7	35,7	30,2	29,8
18	38,7	38	38,2	31,1	32,3
21	40,2	40,5	40,6	33,6	31,7
24	42,3	42,7	43,3	32,4	34,3
27	45,7	44,8	44,9	35,8	32,3
30	43,5	46,4	46,5	34,1	37,1
33	45	48	48,1	35,2	35,7
36	45,3	48,7	50,4	37,9	39,4
39	46,4	51,5	52,1	36,9	42,3
42	49,3	53,3	53,6	38,2	42,2
45	51,3	53,3	54,2	39,7	43,2

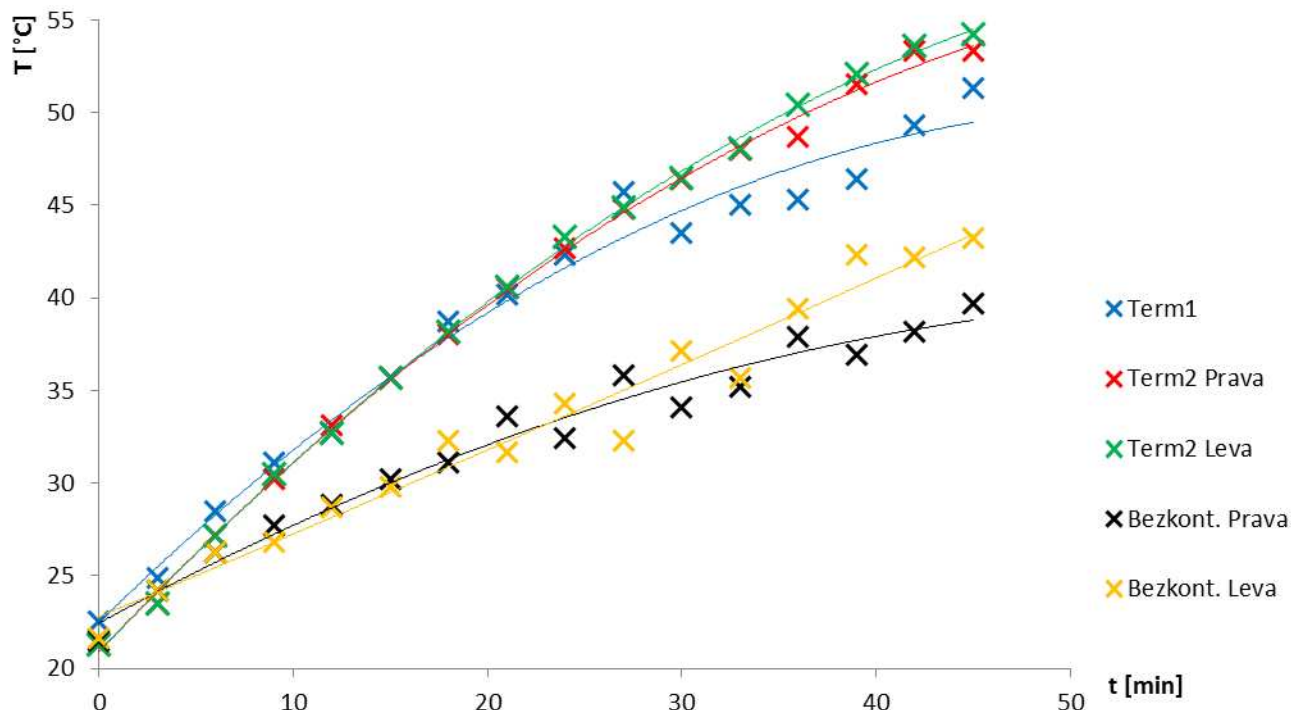
Tabulka č. 2 Hodnoty oteplovací charakteristiky

Výsledky měření všemi měřicími přístroji byly zapsány do tabulky a poté byl sestaven graf oteplovací a ochlazovací charakteristiky. Z grafu oteplovací charakteristiky č. 35 je patrné, že křivky se dělí do pomyslných třech skupin. První skupinu tvoří křivky z měření bezkontaktním infračerveným teploměrem (v grafu černá a žlutá), které říkají, že teplota na pravé a levé straně motoru je menší, než při měření tyčovým teploměrem.

Křivky měření tyčovým teploměrem jsou znázorněny v grafu červeně a zeleně. Je patrné, že tento teploměr ukazuje v celé době měření vyšší hodnoty teploty, než bezkontaktní teploměr a že rozdíl obou křivek není tak patrný, jak u bezkontaktního teploměru. Jak již bylo zmíněno, bezkontaktní teploměr slouží spíše k orientačním měřením, tudíž při tomto měření mu nebude dávana taková váha jako ostatním měřidlům.

Do třetí skupiny je zařazen termočlánek přilepený izolační páskou ke středu motoru znázorněný v grafu modře. Ten zpočátku vykazuje dosti podobné hodnoty jako tyčový teploměr, ale asi od 20. minuty měření nevykazoval tak velkou hodnotu teploty, jako tyčový

teploměr. Důvodů se naskýtá hned několik. Mezi dva základní se nabízí špatný kontakt termočlánku s měřenou plochou díky lepicí pásce a také skutečnost, že ve středu motoru není tak velká teplota jako na krajích z důvodu mechanických ztrát v ložiskách, které jsou umístěny na krajích motoru v ložiskových štítech.

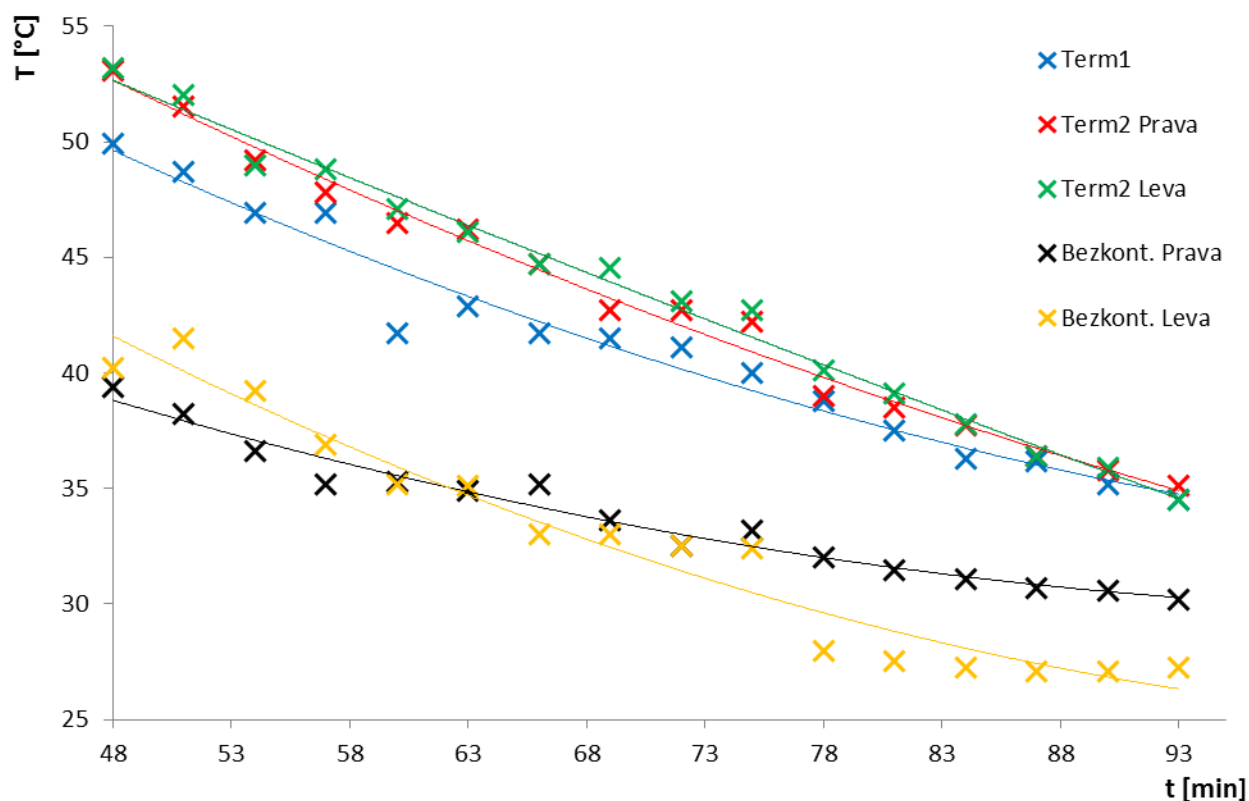


Obr. č. 35 Oteplovací charakteristika motoru

OCHLAZOVACÍ CHARAKTERISTIKA					
t	Termočl 1 [°C]	Termočl 2 [°C]		Bezkontakt [°C]	
[min]	Střed	Pravá	Levá	Pravá	Levá
48	49,9	53,1	53,2	39,4	40,2
51	48,7	51,5	52	38,2	41,5
54	46,9	49,2	49	36,6	39,2
57	46,9	47,8	48,8	35,2	36,9
60	41,7	46,5	47,1	35,3	35,2
63	42,9	46,2	46,1	34,9	35,1
66	41,7	44,7	44,7	35,2	33
69	41,5	42,7	44,55	33,6	33
72	41,1	42,7	43,1	32,5	32,5
75	40	42,2	42,7	33,2	32,4
78	38,8	39,018	40,1	32	27,974
81	37,5	38,505	39,1	31,486	27,542
84	36,3	37,7	37,8	31,1	27,254
87	36,2	36,4	36,4	30,7	27,11
90	35,2	35,8	35,9	30,6	27,11
93	34,5	35,1	34,5	30,2	27,254

Tabulka č. 3 Ochlazovací charakteristika

Jak je patrné z grafu ochlazovací charakteristiky obr. č 36, průběhy měřených hodnot teploty pomocí bezkontaktního infračerveného teploměru mají zcela jiný průběh, než ostatní. Jejich rozdíl je kolem 10°C . Velice podobné hodnoty mají i ochlazovací charakteristiky. Tyčový teploměr, který měřil obě strany motoru a termočlánek, který měřil střed motoru. Jejich rozdíl je cca 3°C . Ochlazovací charakteristiky u těchto dvou měřidel mají dosti lineární charakter, což neodpovídá teoretickým předpokladům. Důvodem může být nepřesnost měřicí metody nebo nepřesné odečítání hodnot z měřicích přístrojů.



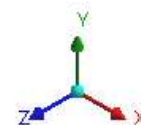
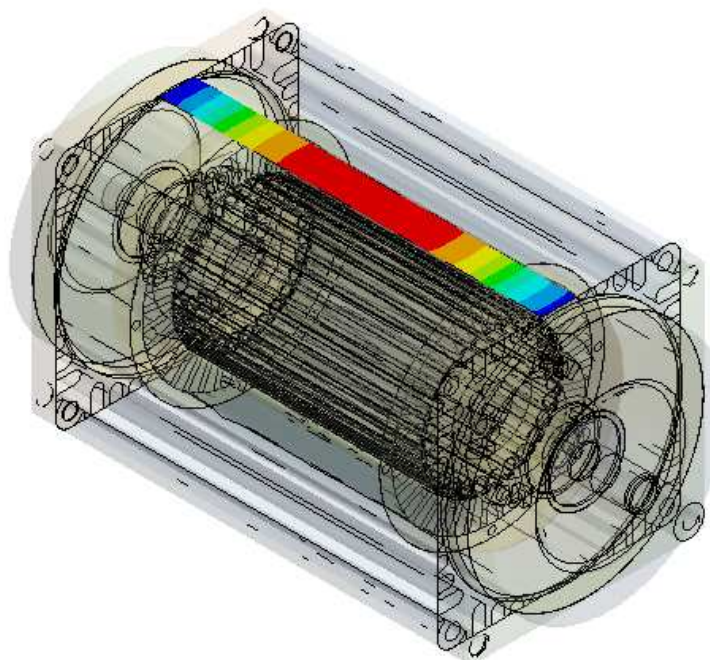
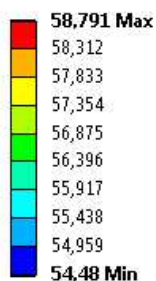
Obr. č. 36 Ochlazovací charakteristika motoru

9.2 Porovnání teplotních výpočtů z programu ANSYS Workbench a výsledků laboratorních měření

Aby bylo patrné, jak přesná byla simulace v programu Ansys Workbench, a o kolik se vypočítané hodnoty liší od naměřených, byla sestavena tabulka č. 4, která nám tyto dvě metody zjištění teploty porovnává. V tabulce jsou uvedeny některé z hodnot oteplovací a ochlazovací charakteristiky modelu stroje v Ansysu a naměřené hodnoty v laboratořích. Teplota zobrazená v tabulce č. 4 u modelu stroje je uvažována jako maximální hodnota teploty z měřené plochy, která je znázorněná na obrázku č 37.

B: Model, Transient Thermal

Temperature 3
 Type: Temperature
 Unit: °C
 Time: 1440
 17.5.2012 13:08

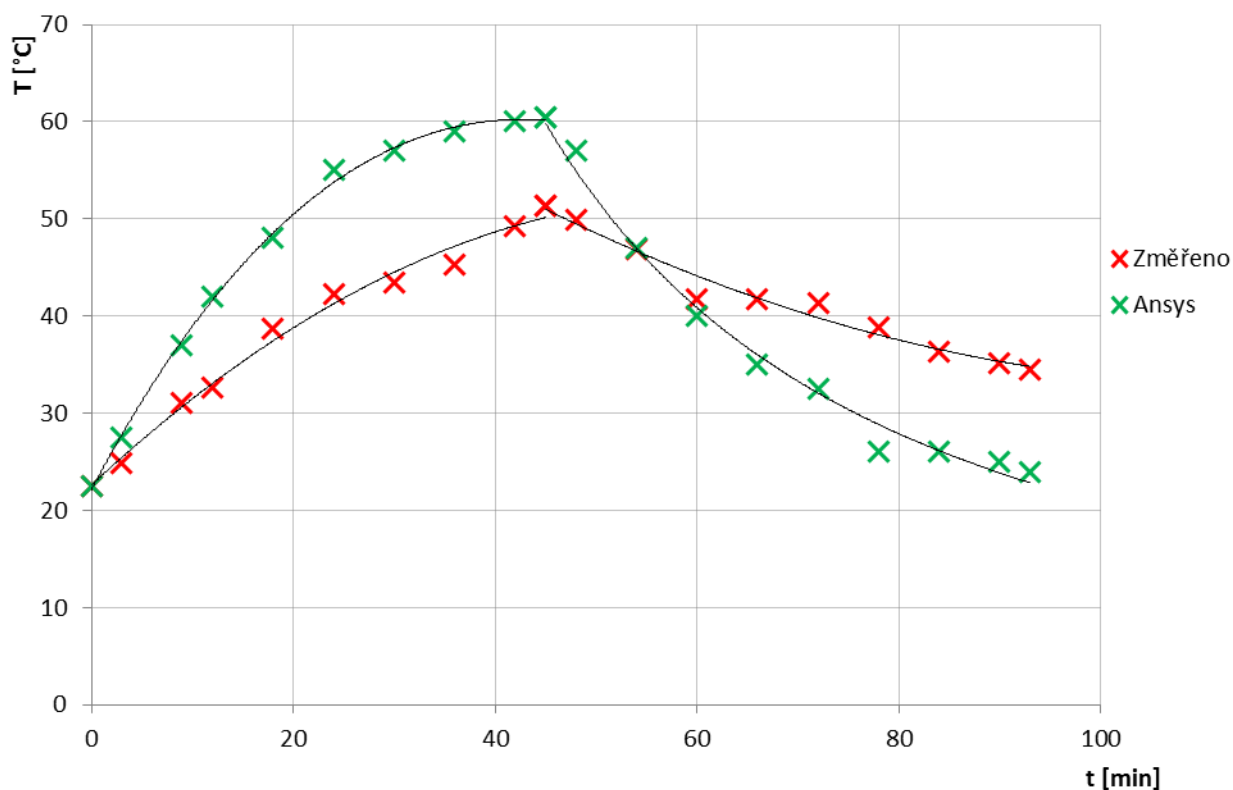


Obr. č. 37 Zobrazení měřené plochy na povrchu motoru

	Model	Stroj
t [min]	T [°C]	T [°C]
6	32,126	28,5
19	50,342	38,7
31	58,455	43,5
42	63,15	49,3
54	46,929	46,9
66	35,009	41,7
77	28,575	39,8
89	25,097	38,8

Tabulka č. 4 Porovnání vypočtených a změřených hodnot

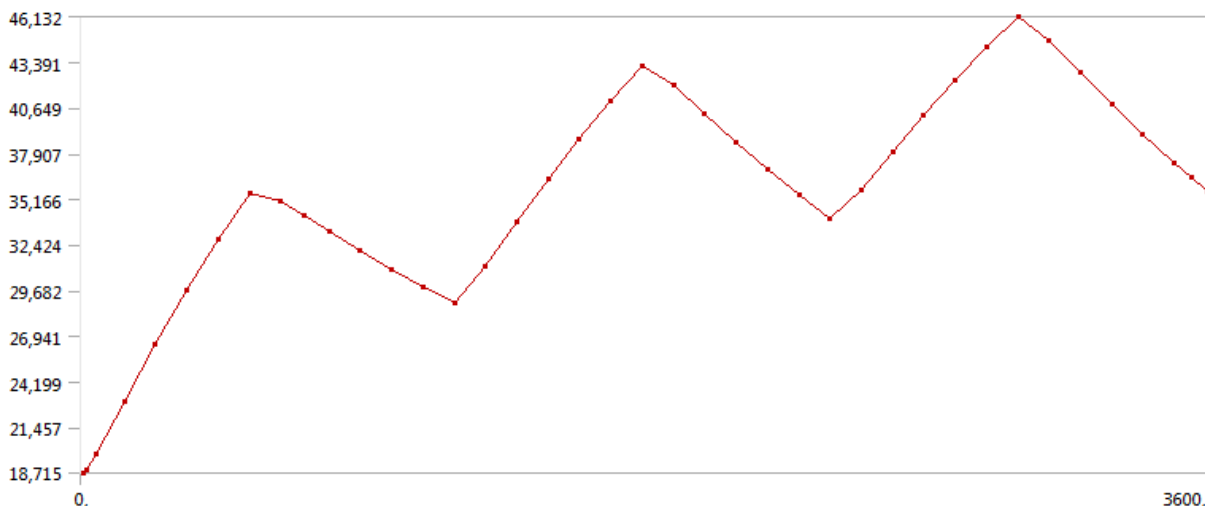
V tabulce č. 4 jsou znázorněny některé z hodnot teplotní charakteristiky u modelu a skutečného stroje. Jak je z tabulky č. 4 a z obrázku č. 38 patrné, po dobu běhu motoru, tj. v čase asi do 55. minuty jsou hodnoty teploty vyšší u modelu motoru, než u skutečného stroje. Naopak při vypnutí motoru v čase asi od 55 minuty jsou hodnoty u modelu stroje nižší, než u skutečného. Zjednodušeně lze tvrdit, že model stroje se dříve zahřívá a dříve chladne, než skutečný motor v laboratoři. Podrobnější výsledky obou metod zjištění výsledků jsou patrné v grafech na obrázcích č. 27, 35 a 36.



Obr. č. 38 Porovnání laboratorního měření a výsledků z Ansysu při oteplování a ochlazování motoru

10 VÝSLEDKY TEPLOTY NA MODELU STROJE PŘI PŘERUŠOVANÉM CHODU

Měření teploty při přerušovaném chodu bylo realizované v celkovém čase 60 minut, přičemž v intervalech 0-10 minut, 20-30 minut, 40-50 minut byl motor v běhu a v intervalech 10-20 minut, 30-40 minut, 50-60 minut motor stál. Teplota okolního vzduchu byla zadána na 18,6°C.



Obr. č. 39 Teplotní charakteristika modelu stroje z programu Ansys

B: Model, Transient Thermal

Temperature

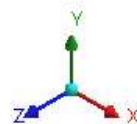
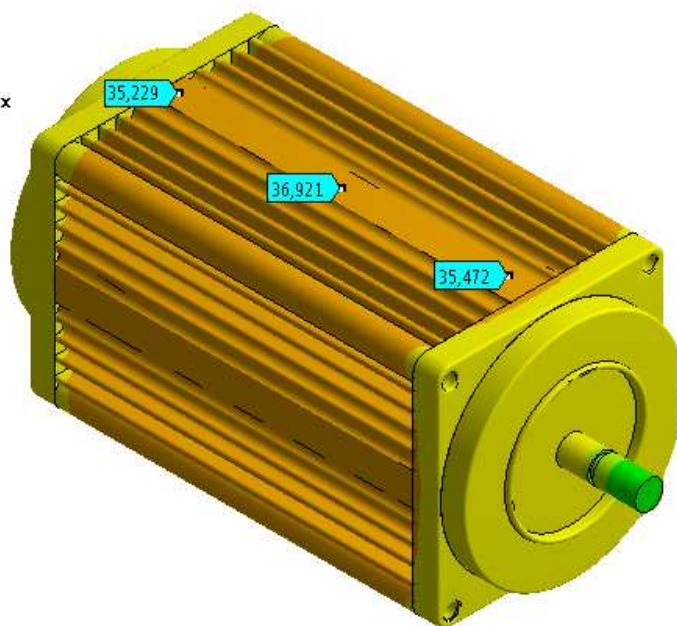
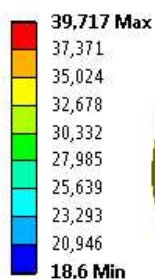
Type: Temperature

Unit: °C

Time: 640

17.5.2012 13:46

ANSYS
13.0

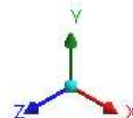
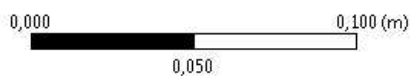
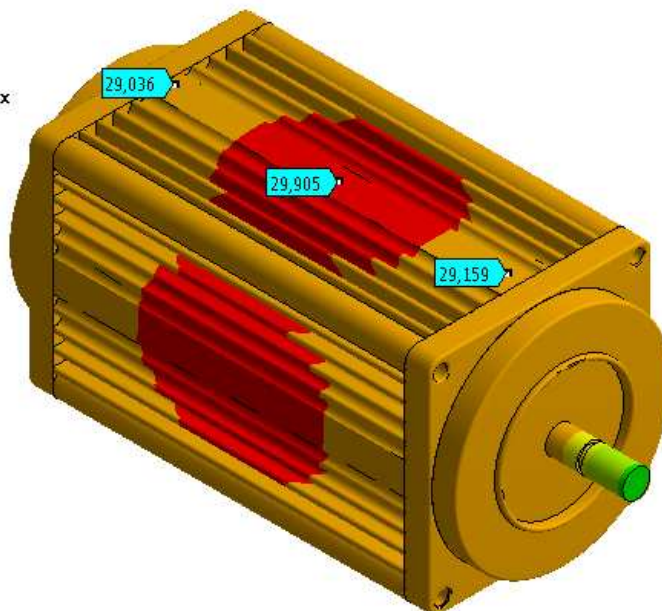
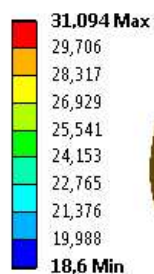


Obr. č. 40 Výsledky přerušovaného chodu v čase 640s.

B: Model, Transient Thermal

Temperature
Type: Temperature
Unit: °C
Time: 1194,4
17.5.2012 13:47

ANSYS
13.0

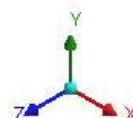
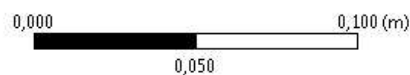
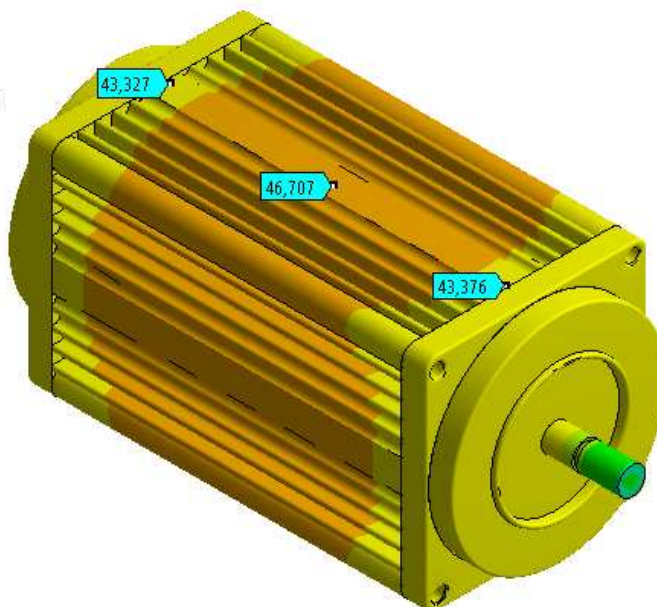
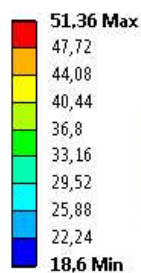


Obr. č. 41 Výsledky přerušovaného chodu v čase 1194,4s

B: Model, Transient Thermal

Temperature
Type: Temperature
Unit: °C
Time: 1794,4
17.5.2012 13:48

ANSYS
13.0

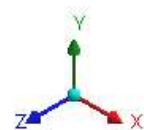
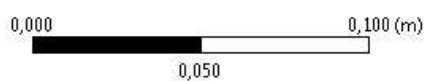
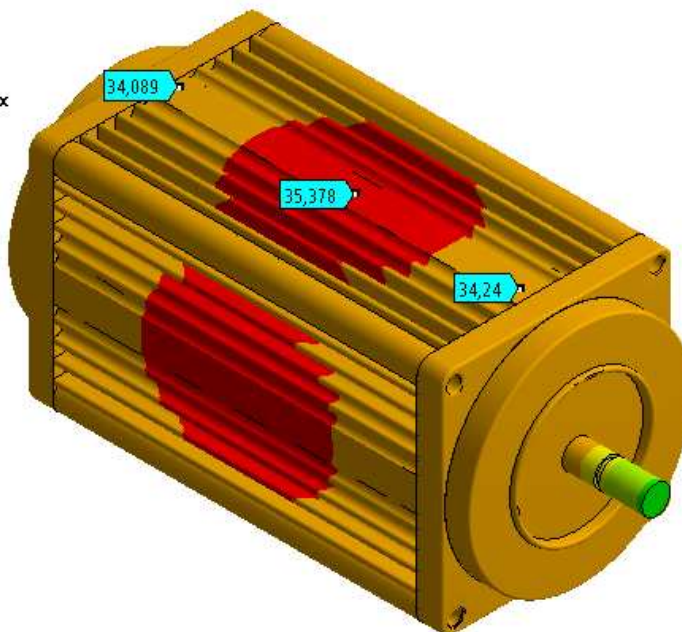
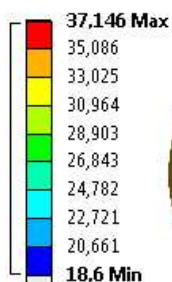


Obr. č. 42 Výsledky přerušovaného chodu v čase 1794,4s.

B: Model, Transient Thermal

Temperature
Type: Temperature
Unit: °C
Time: 2394,4
17.5.2012 13:49

ANSYS
13.0

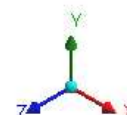
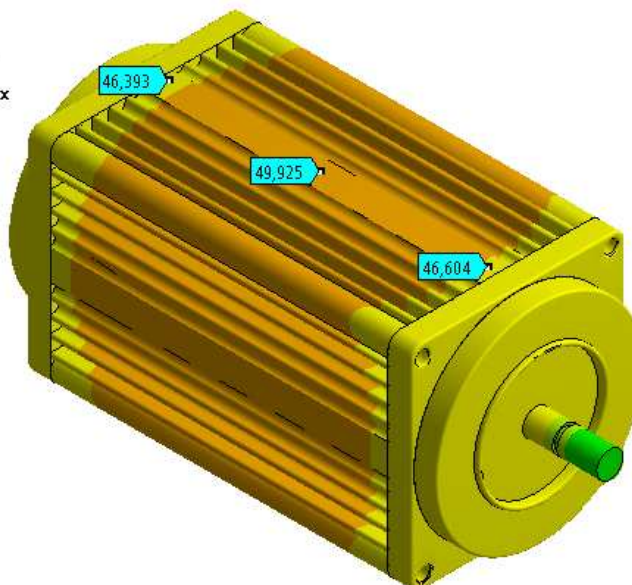
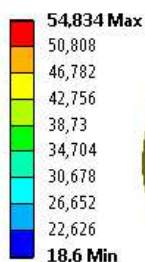


Obr. č. 43 Výsledky přerušovaného chodu v čase 2394,4s.

B: Model, Transient Thermal

Temperature
Type: Temperature
Unit: °C
Time: 2994,4
17.5.2012 13:51

ANSYS
13.0



Obr. č. 44 Výsledky přerušovaného chodu v čase 2994,4s

10.1 Výsledky laboratorního měření přerušovaného chodu stroje

Měření bylo uskutečněno na povrchu stroje na třech měřicích bodech, jak naznačuje obrázek č. 34. Měření bylo prováděno třemi typy měřicích přístrojů. První typ byl jako v měření oteplovací a ochlazovací charakteristiky kontaktní termočlánek, který byl izolační páskou upevněn na střed motoru.

Dalším typem měřicího přístroje byl také tyčový teploměr. Jím byl motor měřen na pravé a levé straně.

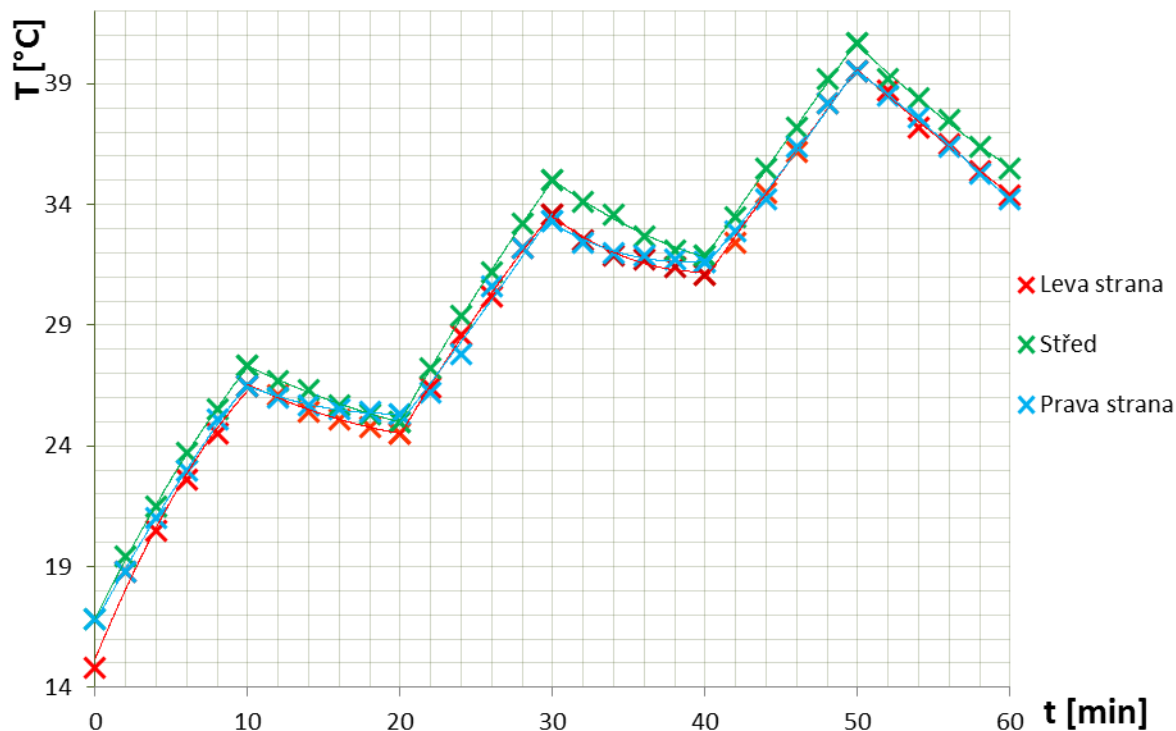
Třetím typem měřicího přístroje byla termokamera, kterou byly vytvářeny snímky motoru jako celku a nebylo jí měřeno jedno místo jako v předešlých případech. Důležitým nastavením v softwaru SatReport, vyhodnocující obrázky z termokamery, je nastavení emisivity měřeného objektu. Bohužel povrch motoru nebyl celý z materiálu o stejné emisivitě (různé materiály, špína, mechanické poškození, apod.), tudíž měření termokamerou jistě nebude tak přesné jako měření předchozími postupy.

PŘERUŠOVANÝ CHOD MOTORU			
t [min]	Leva	Střed	Pravá
0	14,8	16,8	16,8
2	18,8	19,4	18,8
4	20,5	21,5	21
6	22,6	23,7	23
8	24,5	25,5	25,1
10	26,5	27,3	26,5
12	26,1	26,7	26
14	25,4	26,3	25,7
16	25,1	25,7	25,5
18	24,8	25,3	25,4
20	24,5	25	25,3
22	26,4	27,2	26,2
24	28,6	29,4	27,8
26	30,2	31,2	30,6
28	32,2	33,2	32,2
30	33,6	35	33,3

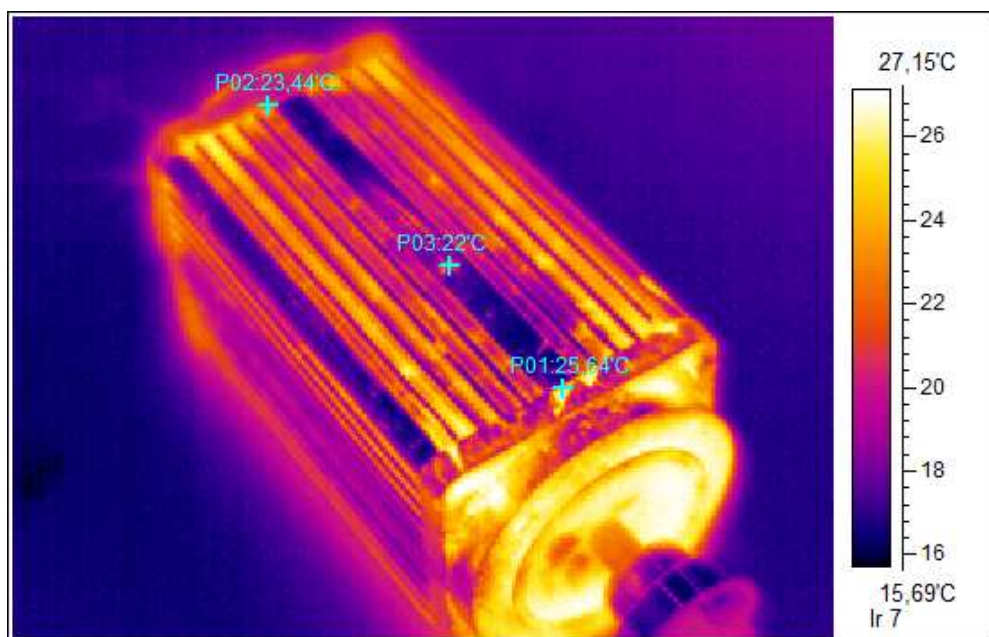
PŘERUŠOVANÝ CHOD MOTORU			
t [min]	Leva	Střed	Pravá
32	32,5	34,1	32,4
34	31,9	33,6	32
36	31,7	32,7	31,9
38	31,4	32,1	31,7
40	31,1	31,9	31,6
42	32,4	33,5	32,9
44	34,5	35,5	34,2
46	36,2	37,2	36,4
48	38,2	39,2	38,2
50	39,5	40,7	39,5
52	38,7	39,2	38,5
54	37,2	38,4	37,6
56	36,5	37,5	36,4
58	35,4	36,4	35,3
60	34,4	35,5	34,2

Tabulka č. 5 Hodnoty z měření přerušovaného chodu motoru

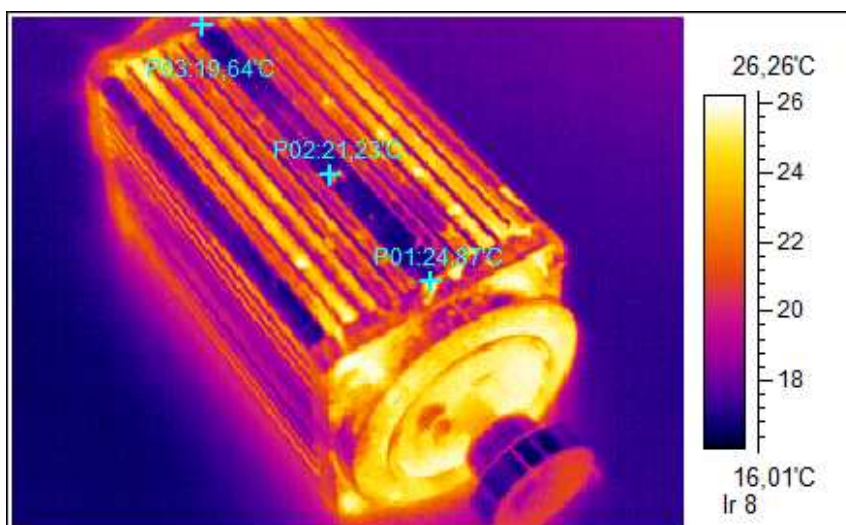
Jak je patrné z grafu na obrázku č. 45, rozdíly teplot měřených různými typy měřicích přístrojů zde nejsou tolik odlišné, jak při prvním měření. Při tomto měření již nebyl použit bezkontaktní infračervený teploměr z důvodu, že v minulém měření vykazoval větší nepřesnosti, než ostatní měřidla. Místo něj byla použita již zmiňovaná termokamera.



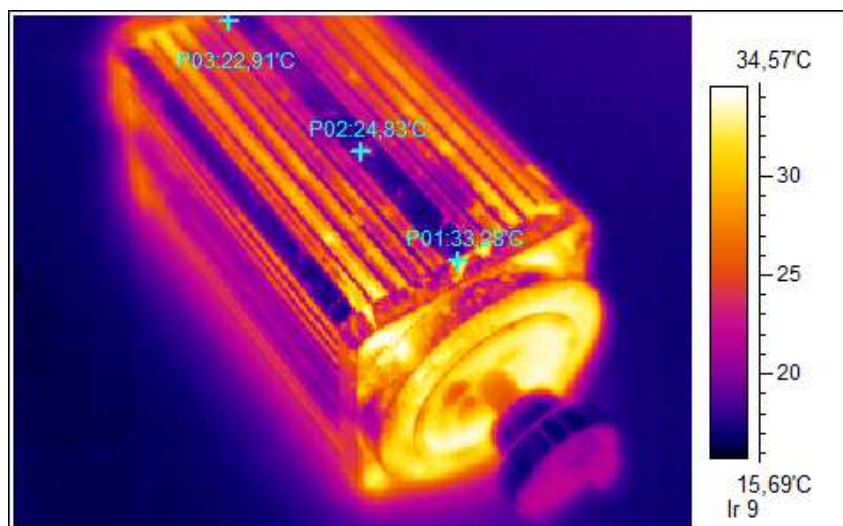
Obr. č. 45 Teplotní charakteristika motoru při přeruš. chodu



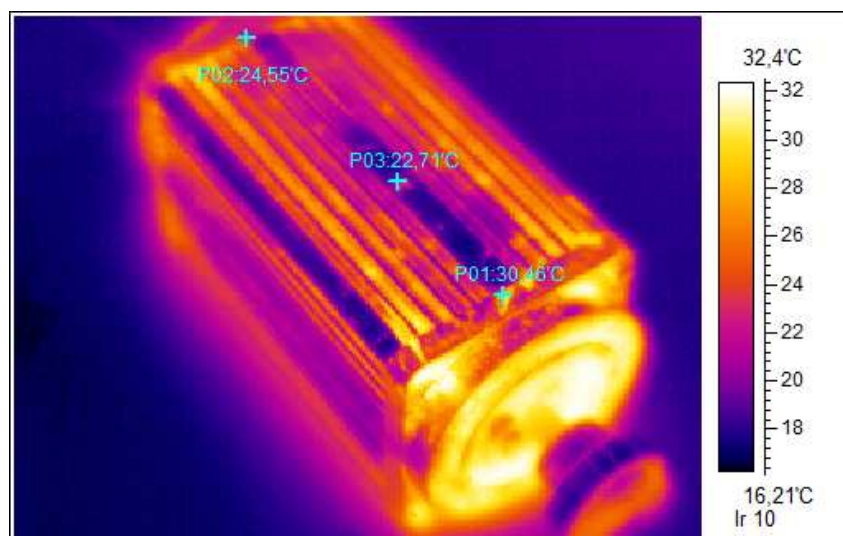
Obr. č. 46 Snímek z termokamery v čase 600s



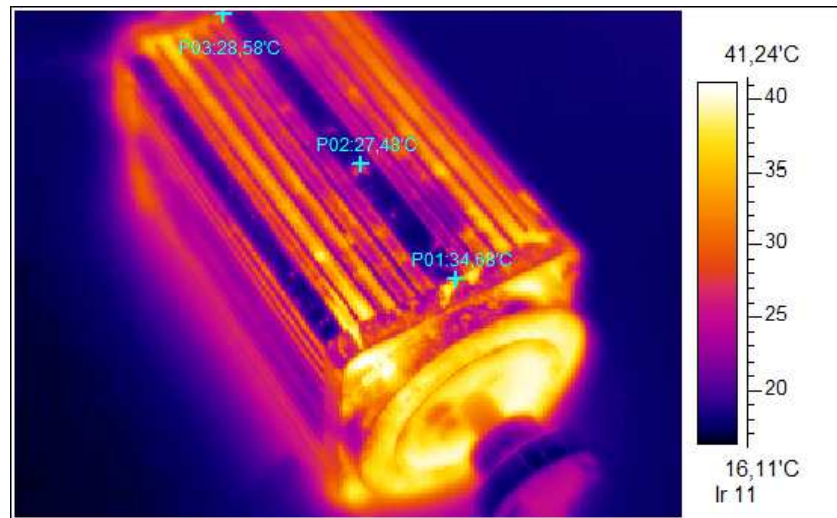
Obr. č. 47 Snímek z termokamery v čase 1200s



Obr. č. 48 Snímek z termokamery v čase 1800s



Obr. č. 49 Snímek z termokamery v čase 2400s



Obr. č. 50 Snímek z termokamery v čase 3000s

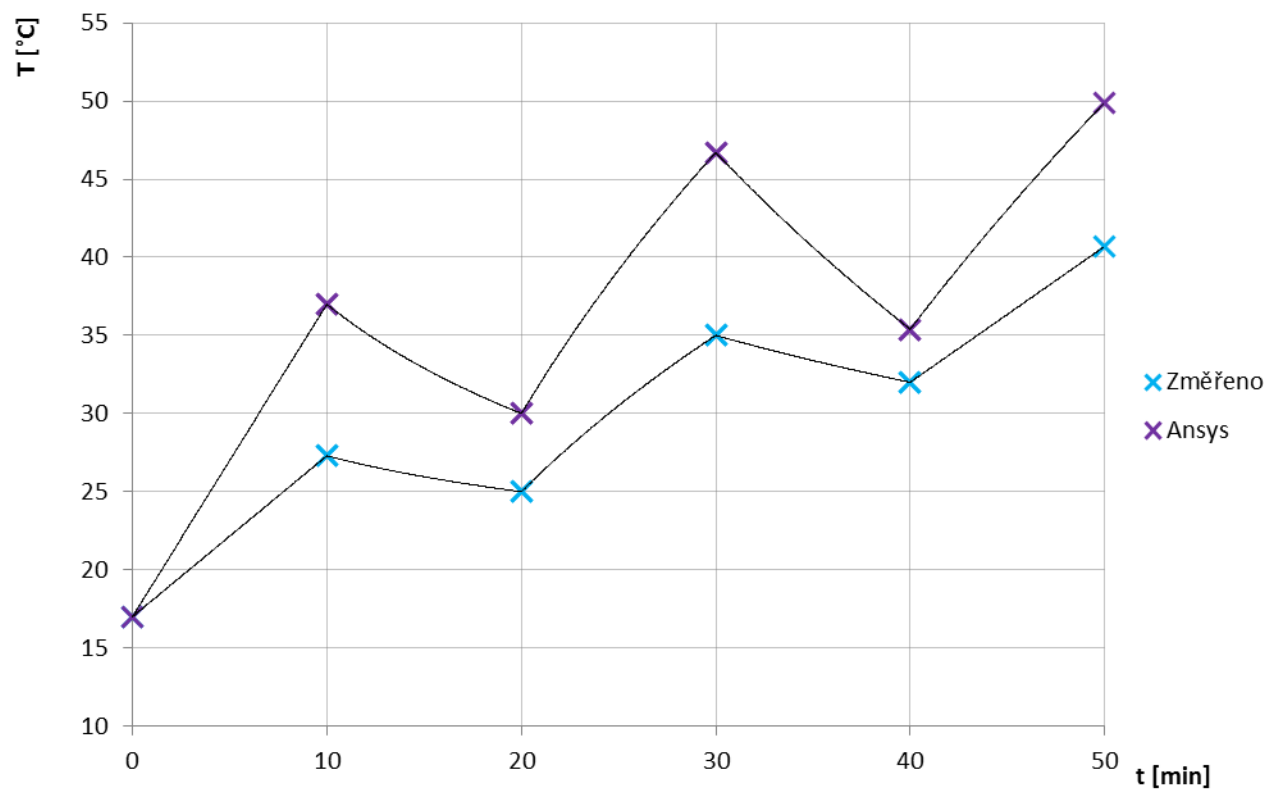
10.2 Porovnání teplotních výpočtů přerušovaného chodu motoru z programu ANSYS Workbench a výsledků laboratorních měření

Porovnání výsledků teploty na modelu stroje a výsledků laboratorních je nastíněno v tabulce č. 6. Tabulka byla rozdělena na výsledky teplot modelu stroje v Ansysu, teplot naměřených kamerou a termočlánky v laboratoři. Obě metody měřily motor stejně jako při měření oteplovací a ochlazovací charakteristiky na levé, středě a pravé straně. Z tabulky je patrné, že nejnižší hodnoty teploty vykazuje termokamera. Teploty měřeny termokamerou se na pravé straně blíží k relevantním hodnotám, nicméně na středě a levé straně jsou hodnoty daleko nižší, než hodnoty teplot měřené ostatními metodami. Jak již bylo napsáno, měření termokamerou je ovlivněno emisivitou a materiálními vlastnostmi motoru. Měření také mohla ovlivnit skutečnost, že víko (štíť) motoru bylo z matného materiálu a na snímku ovlivňuje rozložení teplot.

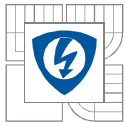
Když pomíneme výsledky z termokamery, tak výsledky z Ansysu a z měření termočlánky se mezi sebou liší maximálně o 10°C. Názorné zobrazení porovnání obou hodnot je patrné na obrázku č. 51.

	Model			Laboratoř					
	Ansys			Kamera			Termočl.	Termočl.	Termočl.
	Levá	Střed	Pravá	Levá	Střed	Pravá	Levá	Střed	Pravá
t [min]	T [°C]	T [°C]	T [°C]	T [°C]	T [°C]	T [°C]	T [°C]	T [°C]	T [°C]
10	35,138	36,922	35,427	23,44	22	25,64	26,5	27,3	26,5
20	29,016	29,905	29,143	19,64	21,23	24,87	24,5	25,3	25,4
30	43,797	46,71	43,666	22,9	24,83	33,28	33,6	35	33,3
40	34,075	35,377	34,296	24,55	22,7	30,46	31,1	31,9	31,6
50	46,335	49,92	46,807	28,58	27,48	34,68	39,5	40,7	39,5

Tabulka č. 6 Porovnání výsledků teplot u přerušovaného chodu motoru



Obr. č. 51 Porovnání laboratorního měření a výsledků z Ansysu při přerušovaném chodu motoru



11 ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo seznámení se s prostředím simulačního programu Ansys Workbench 13, vytvoření modelu asynchronního stroje pro výpočty teplotních polí a tato teplotní pole na modelu stroje nasimulovat. Stroj byl vymodelován v programu Autodesk Inventor Professional 2011 a importován do modulu Design Modeler, kde mu byla přidělena vzduchová kapsa ve tvaru kvádrů, přesahující model na každé straně o 30 centimetrů.

Na modelu se poté pomocí automatického výpočtu vygenerovala síť konečných prvků, která má 579345 prvků a 297430 uzlů. V dalším kroku byly jednotlivým komponentám modelu přiřazeny materiály z přednastavené materiálové knihovny programu Ansys Workbench. Z předem změřených ztrát jouleových, hysterezních a mechanických (150W, 80W a 10W) bylo pomocí objemu příslušných částí stroje vypočteno a přiřazeno generované teplo. Po tomto kroku se již přistoupilo k samotnému výpočtu tepelné analýzy.

Výpočet statické teplotní analýzy trval asi 2 hodiny na počítači se 4GB RAM pamětí a 64 bitové verzi programu Ansys. Výpočet transientní analýzy byl o poznání delší a to asi 5 hodin. Transientní analýza používá k výpočtu přesnější postup než analýza statická, tudíž by se měla více podobat realitě. Statická slouží spíše k orientačním měřením. Výpočet oteplovací a ochlazovací charakteristiky trval cca 6 hodin a výpočet analýzy přerušovaného chodu asi 10 hodin.

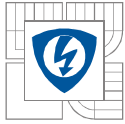
Ve statické analýze vyšla nejvyšší teplota v modelu v kleci rotoru a to 96,7°C. Na povrchu motoru vyšla teplota na okrajích 86,1°C a ve středu 91,4°C. Z obrázku č. 14 je patrné, že teplota se směrem k čelům snižuje.

V transientní analýze, jež představuje oteplování stroje od připojení ke zdroji po čas 3600 sekund, vyšla nejvyšší teplota také v kleci rotoru a to 78,41°C. Na povrchu stroje vyšla teplota 70,4°C a k čelům motoru se mírně snižovala. K ustálení teploty dochází v čase 3500 sekund, jak je vidět na oteplovací charakteristice na obr. 25. Výsledky transientní analýzy jsou zobrazeny převážně v řezu motoru a to z důvodu, aby byly patrné také teploty uvnitř modelu.

Výsledky oteplovací a ochlazovací analýzy u modelu stroje a hodnoty teplot naměřených v laboratořích nejsou totožné, nicméně jejich největší rozdíl je cca 11°C a to na vrcholu oteplovací charakteristiky. Rozdíl může být způsoben řadou věcí. Mezi hlavní se řadí: zjednodušené vymodelování motoru v programu Autodesk Inventor, nepřesně určené ztráty motoru, materiály převzaté z materiálové knihovny programu Ansys, apod.

Hodnoty teplot přerušovaného chodu stroje jak modelu, tak u hmotného motoru vyšly s menší chybou, než v předchozím případě. Rozdíly teplot modelu a skutečného stroje byly nejvýše o 10°C, přičemž teplejší byl model.

Hodnoty měřené bezdotykovým infračerveným teploměrem a termokamerou byly brány jako druhořadé. Nejvyšší význam byl kladen kontaktním způsobem měření.



LITERATURA

- [1] [Www.fast10.vsb.cz](http://www.fast10.vsb.cz) [online]. 2011 [cit. 2011-12-06]. Metoda konečných prvků. Dostupné z WWW: <<http://fast10.vsb.cz/studijni-materialy/metoda-kp/mkp.html>>.
- [2] [Www.wood.mendelu.cz](http://www.wood.mendelu.cz) [online]. 2011 [cit. 2011-12-06]. Numerické simulace. Dostupné z WWW: <<http://wood.mendelu.cz/cz/sections/FEM/?q=node/32>>.
- [3] [Www.zsc.zcu.cz](http://www.zsc.zcu.cz) [online]. 2011 [cit. 2011-12-06]. ANSYS. Dostupné z WWW: <<http://zsc.zcu.cz/sw/ansys.html>>.
- [4] [Www.elektrika.cz](http://www.elektrika.cz) : www.referaty-seminarky.cz [online]. 2011 [cit. 2011-12-06]. Asynchronní elektromotory. Dostupné z WWW: <<http://elektrika.cz/data/clanky/asynchronni-elektromotory>>.
- [5] JANDA, Marcel. *Teplotní optimalizace částí elektrických strojů*. Brno, 2008. Dostupné z: http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=10266. Doktorská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Hana Kuchyňková.
- [6] BAXANT, Petr. *Užití elektrické energie*. Brno, 18.11.2003.
- [7] JANDA, Marcel a Hana KUCHYŇKOVÁ. Teplotní měření v elektrických strojích. *Teplotní měření v elektrických strojích*. 15.6.2009. Dostupné z: <http://elektrorevue.cz/cz/clanky/energetika--vykonova-elektronika--elektrotechnologie/35/teplotni-mereni-v-elektrickyh-strojich/>
- [8] Automatizace - snímače: Dotykové měření teploty – odporové snímače teploty. [Http://www.snimace.xf.cz](http://www.snimace.xf.cz)[online]. [cit. 2012-05-17]. Dostupné z: <http://www.snimace.xf.cz/odporove-snimace-teploty.php>
- [9] Termoelektrické snímače teploty. [Http://www.technotrend.cz](http://www.technotrend.cz) [online]. [cit. 2012-05-17]. Dostupné z: <http://www.technotrend.cz/stranky/teorie/teorie2.htm>