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 TEPLOTY NA ASYNCHRONNÍM MOTORU

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE PETR BARTOŇ

AUTHOR

BRNO 2011

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 TEPLOTY NA ASYNCHRONNÍM MOTORU

TEMPERATURE MEASUREMENT OF AN ASYNCHRONOUS MOTOR

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE PETR BARTOŇ

AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE Ing. MARCEL JANDA, Ph.D.

SUPERVISOR

BRNO 2011

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika

Student:	Petr Bartoň	***ID:***	106367
Ročník:	3	***Akademický rok:***	2010/2011

NÁZEV TÉMATU:

Měření teploty na asynchronním motoru

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Na zvoleném asynchronním motoru proveďte měření oteplení při různých zatíženích
2. Porovnejte jednotlivé měřicí metody pro měření teploty
3. Vyhodnoťte výsledky měření a srovnejte je s teoreticky určenými hodnotami oteplení

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Dle pokynů vedoucího

Termín zadání:	23.9.2010	***Termín odevzdání:***	30.5.2011

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

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.
Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

Abstrakt

V této práci jsou popsány metody měření teploty v elektrických strojích. Vzhledem k tomu, že v asynchronních motorech působí magnetická pole a mechanické vlivy, lze použít jen omezené množství metod pro měření teploty. Tyto metody lze rozdělit do dvou základních skupin, měření kontaktní a měření bezkontaktní. Kontaktní měření jsou prováděna užitím odporových čidel nebo termočlánků. Bezkontaktní měření jsou prováděna pyrometry a termokamerami. Teoretické hodnoty oteplení jsou odvozeny pomocí programu FEMM, který pracuje na základě metody konečných prvků. V praktické části je porovnáno několik metod, jimiž byl proměřen asynchronní motor při různých zatíženích. Naměřené hodnoty jsou porovnány s hodnotami teoretickými.

Abstract

In this thesis there are described methods which are used in order to measure a temperature in electric machines. Whereas there is an influence of magnetic field and mechanical effects in the electric machines it is possible to use only limited number of methods for measuring temperature. These methods can be divided into two basic groups. The first group is being called "contact measurement" and while the second one is "non-contact measurement". Contact measurements are performed by usage of resistant sensors or thermocouples. On the other hand, non-contact measurements are performed by pyrometers and thermal imager cameras. Theoretical values of warming are determined by the FEMM which operates on the basis of the finite element method. In the practical part there are compared several methods whereby asynchronous engine was measured at various loads. Measured values are compared with theoretical values.

Klíčová slova

Asynchronní motor; měření; metoda konečných prvků; teplota; termistor; termočlánek; termokamera; pyrometr; ztráty.

Keywords

Asynchronous engine; finite element method; loss; measurement; temperature; thermal imaging camera; thermistor; thermocouple; pyrometer.

Bibliografická citace

BARTOŇ, P. *Měření teploty na asynchronním motoru.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 60 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Marcel Janda, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Měření teploty na asynchronním motoru jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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

V Brně dne …… Podpis autora ……..

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Marcel Janda, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne …… Podpis autora ……..

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ 9
SEZNAM TABULEK 11
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK 12
ÚVOD 14
1 ZÁKLADNÍ POJMY: 15
1.1 TEPELNÁ VÝMĚNA V ELEKTRICKÝCH STROJÍCH 15
1.2 METODA KONEČNÝCH PRVKŮ 17
1.3 PŘERUŠOVANÝ CHOD 18
2 KONSTRUKCE ASYNCHRONNÍHO MOTORU 20
3 ZTRÁTY V ASYNCHRONNÍM MOTORU 21
4 MĚŘENÍ TEPLOTY V ELEKTRICKÝCH STROJÍCH 24
4.1 KONTAKTNÍ MĚŘENÍ 24
4.1.1 ODPOROVÉ SENZORY 24
4.1.2 TERMOELEKTRICKÉ ČLÁNKY 25
4.1.3 INDIKÁTORY TEPLOTY 28
4.2 BEZKONTAKTNÍ MĚŘENÍ 28
4.2.1 PYROMETRY 29
4.2.2 TERMOVIZE 29
5 TEPLOTNÍ CHARAKTERISTIKY 31
5.1 OTEPLOVACÍ CHARAKTERISTIKA 31
5.2 OCHLAZOVACÍ CHARAKTERISTIKA 32
6 TEORETICKÉ URČENÍ HODNOT OTEPLENÍ 33
6.1 TEPLOTNÍ TOK 33
6.2 OPERACE V FEMM: 35
7 VLASTNÍ MĚŘENÍ 36
7.1 MĚŘENÍ MOTORU BEZ ZATÍŽENÍ 36
7.1.1 TABULKY A GRAFY NAMĚŘENÝCH HODNOT 36
7.1.2 ZHODNOCENÍ MĚŘENÍ MOTORU BEZ ZATÍŽENÍ 39
7.2 MĚŘENÍ PŘERUŠOVANÉHO CHODU MOTORU BEZ ZATÍŽENÍ 40
7.2.1 TABULKY A GRAFY NAMĚŘENÝCH HODNOT 41
7.2.2 ZHODNOCENÍ MĚŘENÍ PŘERUŠOVANÉHO CHODU MOTORU 44
8 VYPOČÍTANÉ HODNOTY 45
8.1 VÝPOČET MOTORU BEZ ZATÍŽENÍ 46
8.2 VÝPOČET PŘERUŠOVANÉHO CHODU 52
9 ZÁVĚR 57

LITERATURA **58**

PŘÍLOHY **59**

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1: *Rozložení oblasti na konečný počet trojúhelníků* 18

Obr. 1.2: *Charakteristika přerušovaného chodu* 19

Obr. 3.1:Tok výkonu v asynchronním motoru..... 19

Obr. 4.1:*NTC termistor* 25

Obr. 4.2: *Seebecků v jev u termoelektrického článku* 25

Obr 4.3: *Termoelektrické napětí* 26

Obr. 5.1: *Oteplovací charakteristika.* 31

Obr. 5.2: *0chlazovací charakteristika.* 32

Obr. 7.1*: Naměřená oteplovací charakteristika.* 37

Obr. 7.2*: Naměřená ochlazovací charakteristika* 38

Obr. 7.3: *Software pro měření teploty* 40

Obr. 7.4: *Charakteristika pro přerušovaný chod* 42

Obr. 7.5: *Snímek termokamerou v čase 0* 43

Obr. 7.6: *Snímek termokamerou v čase 2* 43

Obr. 7.7: *Snímek termokamerou v čase 4* 44

Obr. 8.1: *Model pro výpočet teplot na povrchu motoru* 45

Obr. 8.2: *Grafické zobrazení výsledků v čase měření t=0 min.* 46

Obr. 8.3: *Zobrazení oblasti vyjádření grafu vypočítané teploty v režimu zobrazení teplot ve stupních šedi.* 47

Obr. 8.4: *Graf pro teplotu na povrchu nezatíženého motoru v čase měření t=0 min* 47

Obr. 8.5: *Graf pro teplotu na povrchu nezatíženého motoru v čase měření t=6 min* 48

Obr. 8.6: *Graf pro teplotu na povrchu nezatíženého motoru v čase měření t=12 min* 48

Obr. 8.7: *Graf pro teplotu na povrchu nezatíženého motoru v čase měření t=26 min* 48

Obr. 8.8: *Graf pro teplotu na povrchu nezatíženého motoru v čase měření t=32 min* 49

Obr. 8.9: *Graf pro teplotu na povrchu nezatíženého motoru v čase měření t=46 min* 49

Obr. 8.10: *Průběh teoretických hodnot na povrchu motoru při chodu bez zatížení* 50

Obr. 8.11: *Porovnání teoretických hodnot s naměřenými hodnotami* 51

Obr. 8.12: *Teplota na povrchu motoru pracujícím v přerušovaném chodu v čase t=0 min* 52

Obr. 8 13: *Teplota na povrchu motoru pracujícím v přerušovaném chodu v čase t=10 min* 52

Obr. 8.14: *Teplota na povrchu motoru pracujícím v přerušovaném chodu v čase t=20 min* 53

Obr. 8.15: *Teplota na povrchu motoru pracujícím v přerušovaném chodu v čase t=30 min* 53

Obr. 8.16: *Teplota na povrchu motoru pracujícím v přerušovaném chodu v čase t=40 min.....53*

Obr. 8.17: *Teplota na povrchu motoru pracujícím v přerušovaném chodu v čase t=50 min.....54*

Obr. 8.18: *Teplota na povrchu motoru pracujícím v přerušovaném chodu v čase t=60 min.....54*

Obr. 8.19: *Průběh teoretických hodnot na povrchu motoru při přerušovaném chodu.....55*

Obr. 8.20: *Porovnání teoretických hodnot s naměřenými hodnotami 56*

Obr. P.1: *Charakteristika termistoru pro odečtení teploty termistoru 60*

SEZNAM TABULEK

***Tabulka 7.1**: Oteplovací charakteristika. 36*

***Tabulka 7.2**: Ochlazovací charakteristika 38*

***Tabulka 7.3**: Naměřené hodnoty pro přerušovaný chod 41*

***Tabulka 8.1**: Předpokládané hodnoty teploty statorového vinutí v daném čase 46*

***Tabulka 8.2**: Porovnání teoretických hodnot s naměřenými hodnotami 50*

***Tabulka 8.3:** Předpokládané hodnoty teploty statorového vinutí v daném čase 52*

***Tabulka 8.4:** Porovnání teoretických hodnot s naměřenými hodnotami 55*

***Tabulka P.1**: Tabulka termistoru pro přepočet odporu na teplotu[10] 59*

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

B_m	maximální hodnota magnetické indukce
E	činitel emisivity
f	frekvence
f	tepelný tok
h	koeficient přestupu tepla
I	proud vinutím
k	Boltzmanova konstanta
k	koeficient tepelné vodivosti
k_{sb}	Stefan-Boltzmannova konstanta
l	tloušťka izolace
m	počet fází
N	efektivní stavová hustota
n	koncentrace nosičů náboje
n	směr normály ke hranici
P_1	příkon motoru
P_2	výkon na hřídeli
P_δ	příkon ve vzduchové mezeře
R	odpor vynutí
R_t	tepelný odpor
S	průřez
S	Seebeckův koeficient
Q	Teplo
$\bar{q}$	hustota tepelného toku
T	termodynamická teplota
T_0	teplota vnější chladicí kapaliny
T_{max}	ustálená teplota stroje
t	čas
t_z	doba zapnutí
t_v	doba vypnutí
W_f	Fermiho hladina
W_0	maximální energetická hladina pro teplotu T

α_k	součinitel přestupu tepla
β	emisivita povrchu
ΔP	tepelný tok
ΔP_Σ	celkové ztráty
ΔP_{Fe}	ztráty v magnetickém obvodu
ΔP_{N1}	ztráty vinutí statoru
ΔP_{N2}	ztráty ve vinutí rotoru
ΔP_{mech}	mechanické ztráty
ΔP_d	dodatečné ztráty
$\Delta \upsilon_{dov}$	dovolené oteplení
$\Delta \upsilon_{max}$	maximální oteplení
$\Delta \upsilon_{min}$	oteplení na počátku cyklu
δ	tloušťka vzduchové spáry
λ	tepelná měrná vodivost
σ	Thomsonův koeficient
τ	časová konstanta stroje
υ	teplota chladicího povrchu

ÚVOD

Měření teploty je důležitou součástí diagnostiky elektrických strojů zejména z toho důvodu, že v elektrických strojích působí velké množství fyzikálních jevů, které způsobují nepřesnosti měření teploty, nebo mohou zavinit poškození teplotního čidla. V elektrickém motoru jsou těmito jevy mechanické síly způsobené otáčením rotoru, magnetické síly ve vinutích a působení teplotních polí. Díky těmto okolnostem je měření teplotních polí v elektrických strojích problematické.

Dosažením vysokých hodnot teploty motoru může dojít k poškození izolace, tudíž ke zničení stroje. Při dosažení Curieho teploty ve strojích s permanentními magnety, může dojít k demagnetizaci a tedy ke zničení motoru.

Hlavním problémem u elektrických motorů je měření teplotních polí na rotujících částech. Teplotní čidlo musí být umístěno na pohyblivé části tak, aby rotačním pohybem nedocházelo k uvolnění senzoru. Uvnitř elektrického stroje působí na čidlo také relativně velké magnetické pole, které může znamenat zanesení chyby do měření např. u termočlánků. Vyvedení teplotního senzoru z rotující části k měřicímu přístroji je také obtížné.

Problematické měření teploty na pohyblivých částech dalo vzniknout mnoha výpočetním metodám k určení oteplovacích a ochlazovacích charakteristik elektrického stroje. Výpočetní metody jsou ale značně omezené. Relativní přesnost výpočtů je hlavní nevýhodou. Při návrhu elektrických strojů jsou tyto metody pro základní výpočty dostačující, ale je nemožné nahradit měření teploty při teplotních optimalizacích. [6]

1 ZÁKLADNÍ POJMY:

Teplo Q, jehož jednotkou je Joule (J), je fyzikální veličina, která je mírou změny vnitřní energie tělesa při tepelné výměně s jiným tělesem (míra změny mezi systémem a okolím).

Teplota je stavová veličina, která charakterizuje stav tepelné (termodynamické) rovnováhy systému. Stav termodynamické rovnováhy je stav, při kterém v izolované soustavě neprobíhají žádné makroskopické změny a všechny fyzikální veličiny, které slouží k popisu tohoto stavu, jsou nezávislé na čase. Tento stav bývá popsán termodynamickou teplotou. [9]

Nejrozšířenější jsou tyto tři druhy stupnic: 1) Termodynamická teplotní stupnice. 2) Celsiova teplotní stupnice. 3) Fahrenheitova teplotní stupnice.

Termodynamická teplotní stupnice: Počátek této stupnice je určen termodynamickou absolutní nulou. Jednotkou termodynamická teploty T je Kelvin (K).

Celsiova teplotní stupnice: Tato stupnice je odvozena od termodynamické stupnice. Jednotkou Celsiovi teploty t je stupeň Celsia (°C). [6]

Pro převod z termodynamické teploty na celsiovu teplotu platí:

$$t(°C) = T - T_0 = T - 273{,}15K \tag{1.1}$$

1.1 Tepelná výměna v elektrických strojích

Z elektrického stroje je převod tepla do okolí vedením zanedbatelný. Možné cesty jsou přes hřídel a spojku do poháněného stroje a přes patky do základů. Tímto způsobem přechází jen velmi malé množství tepla. Šíření tepla vedením má velký význam uvnitř stroje.

Do okolí se většina tepla převádí prouděním a sáláním. U strojů s umělou ventilací a u strojů otevřených s přirozenou ventilací se většina tepla odvádí prouděním chladiva. U strojů uzavřených bez vnější umělé ventilace se teplo přivádí do okolí sáláním a přirozeným prouděním.[8]

Jednorozměrné vedení tepla

Vedením tepla vznikají teplotní spády. Přechází-li teplotní tok z místa vzniku (např. vinutí) přes izolaci do chladiva vzniká teplotní spád. Tento teplotní spád určuje oteplení vinutí. To vede ke snaze, aby byly tepelné odpory co nejmenší. Části, které vedou teplo, se vyrábějí z materiálů s vysokou tepelnou vodivostí. Pro přechod tepelného toku izolací se volí nejkratší cesta. V tělesech je vedení tepla trojrozměrné, ale lze v praktických případech dva směry vedení zanedbat. To platí i pro elektrické stroje, pro tepelný výpočet tedy vycházíme z jednorozměrného vedení tepla.[8]

Pro teplotní spád v homogenním poli platí:

$$\Delta \upsilon = \Delta P \cdot R_t = \frac{\Delta P \cdot l}{\lambda S} \tag{1.2}$$

Kde ΔP….telelný tok [W] pro který platí

$$\Delta P = \int_S \overline{q} \cdot d\overline{S} = \int_S -\lambda gradT \cdot d\overline{S} \tag{1.3}$$

S …průřez kterým tepelný tok prochází [m^2],

λ …měrná teplená vodivost [$Wm^{-1}\kappa^{-1}$],

l ...tloušťka izolace [m].

Teplotní spád zvyšují vrstvy se špatnou měrnou tepelnou vodivostí. V elektrických strojích to například mohou být spáry mezi plechy statorových a rotorových plechů, vzduchové vrstvičky v izolaci. Spáry a vrstvičky mají velký tepelný odpor a proto je nelze zanedbat.

Pro teplotní spád pak platí:

$$\Delta \upsilon = \frac{\Delta P}{S_i}\left(\frac{l_i}{\lambda_i} + \frac{\delta}{\lambda_v}\right) \tag{1.4}$$

Kde λ_v …měrná teplená vodivost pro vzduch [$Wm^{-1}K^{-1}$],

δ ... velikost vzduchové mezery [m].

Proudění tepla

Teplo se sdílí prouděním plynného nebo kapalného chladiva.

Pro ustálený stav platí:

$$\Delta P = \alpha_K \cdot S \cdot \Delta \vartheta \tag{1.5}$$

Kde ΔP… teplo vyvinuté v uvažované části stroje,

S ... chladící povrch [m^2],

α_K … součinitel přestupu tepla (není ani při určitém chladivu konstantní) [$Wm^{-2}K^{-1}$]

Pro $\Delta\vartheta$ platí

$$\Delta\vartheta = \vartheta - \vartheta_0 \tag{1.6}$$

Kde ϑ … teplota chladícího povrchu [°C],

ϑ_0 … teplota proudícího chladiva [°C].

Přirozené proudění vzniká vlivem vztlaku blízko teplých ploch. Chladivo proudí přirozeně důsledkem různé hustoty.

Při **umělém proudění** se do pohybu uvádí chladivo nuceně, tak aby tělesem protékalo, nebo ho obtékalo. Rozeznáváme proudění v kanálech, na předmětech ležící napříč proudu chladiva a na podélně obtékaných stěnách.[8]

Radiace (sálání tepla)

Těleso, které má teplotu vyšší než 0 K, vyzařuje svým povrchem tepelnou energii. V průzračném prostředí přímočaře všemi směry, jde totiž o elektromagnetické záření. Pro sálání je účinnou plochou pouze projekce chladící plochy směrem sálání. Tepelný tok sálání je dán Stefan-Boltzmannovým zákonem (více viz [8]).

$$\Delta P = 5{,}78 \cdot 10^{-8}\, E(T^4 - T_0^4)\, S \tag{1.7}$$

Kde: T… teplota plochy [K],

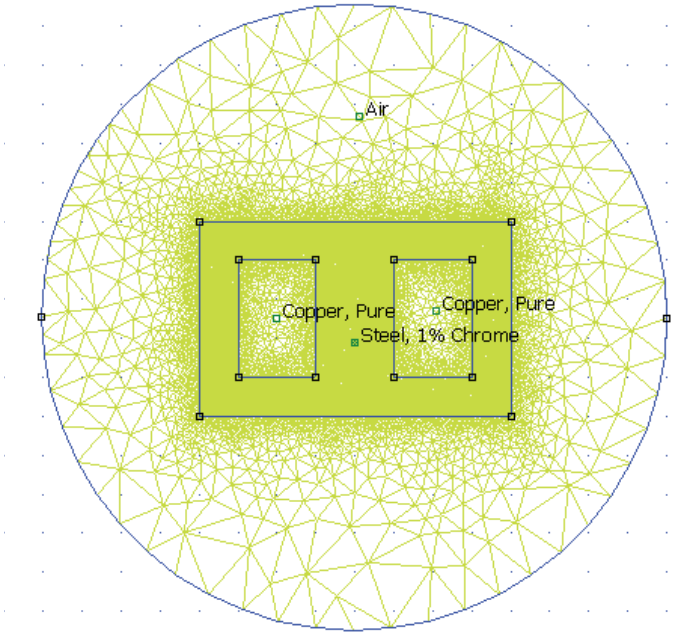
T_0...teplota vzdáleného okolí [K],

$5{,}78*10^{-8}$.. Stefan-Boltzmannova konstanta [$W.m^{-2}.K^{-4}$],

E … činitel emisivity.

1.2 Metoda konečných prvků

Metoda konečných prvků spočívá ve vytvoření sítě ve spojité oblasti, která se rozdělí do množiny samostatných podoblastí. A.Hrennikoff dělí oblast pomocí mřížky, R.Courant rozdělil řešenou oblast na konečný počet podoblastí, kde je hlavním tvarem trojúhelník. To umožňuje řešit eliptické parciální diferenciální rovnice druhého stupně, sestavené z úlohy zabývající se krutem válce.[5]

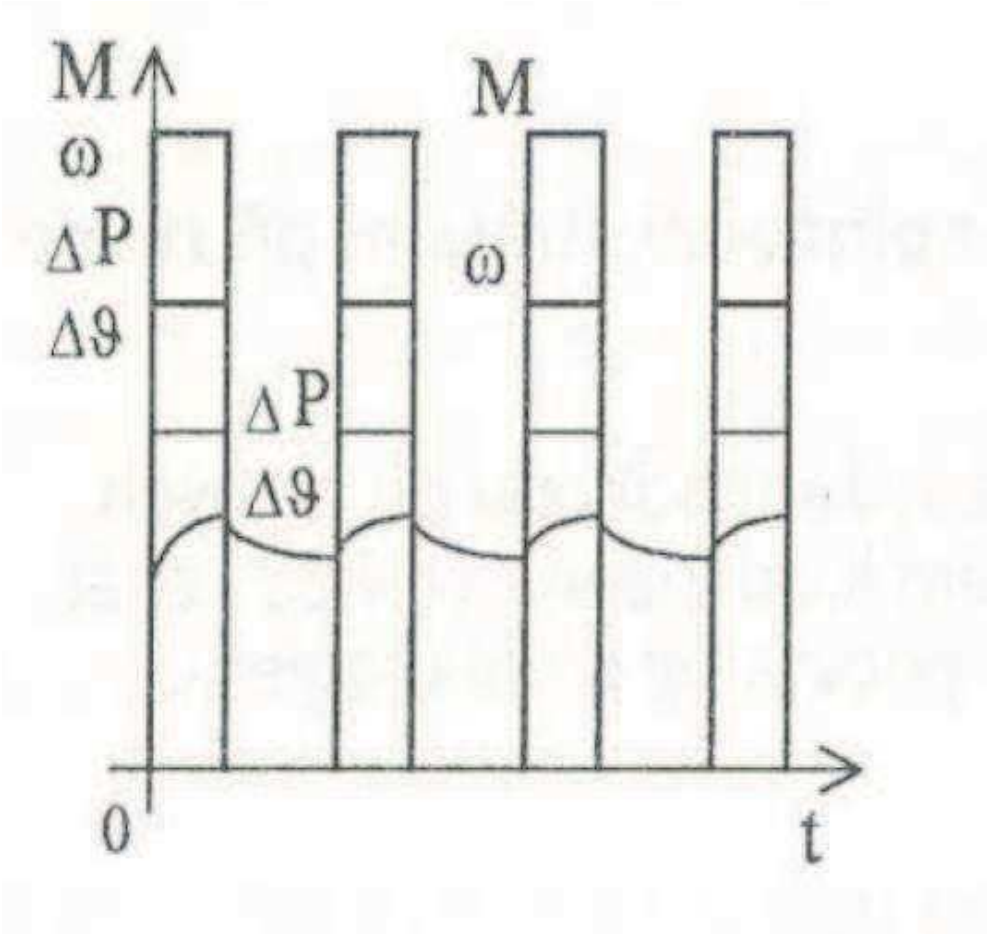


Obr. 1.1: *Rozložení oblasti na konečný počet trojúhelníků*

Metoda konečných prvků je využívána pro nalezení aproximovaného řešení parciálních diferenciálních rovnic. Používá se také pro řešení integrálních rovnic, což jsou například rovnice vedení tepla. Řešení je založeno na úplné eliminaci diferenciální rovnice, nebo na převodu parciální diferenciální rovnice na ekvivalentní obyčejnou diferenciální rovnici, která je řešena běžnými postupy. Metoda konečných prvků se uplatňuje při řešení parciálních diferenciálních rovnic ve složitých oblastech, nebo také v případech kdy se mění požadovaná přesnost po celé oblasti řešení. [5]

1.3 Přerušovaný chod

Nastává při periodickém zatěžování a vypínání motoru. Oteplení motoru nesmí rozběhový proud podstatně ovlivnit, proto se jeho účinek zanedbává. Motor se neochladí na teplotu okolí během vypnutí. Oteplení motorových komponentů kolísá mezi maximální a minimální hodnotou lišících se od teploty okolí a maximálního oteplení při trvalém chodu motoru. Zatěžovatel udává poměr doby zapnutí k celkové době cyklu a udává se v procentech. Zatěžovatel má typické hodnoty: 15, 25, 40 a 60 %.[15]



Obr. 1.2: *Charakteristika přerušovaného chodu [10]*

Dobu cyklu T_C rozdělujeme na dobu zapnutí t_z a na dobu vypnutí t_v. Střední oteplení motoru na počátku práce motoru vzrůstá až do dosažení ustáleného režimu, při němž je střední hodnota oteplení stálá v každém cyklu. Oteplení na počátku cyklu $\Delta\upsilon_{min}$ je stejné jako oteplení na konci cyklu. Doba zapnutí t_z i doba vypnutí t_v jsou kratší než trojnásobek tepelné časové konstanty τ_{υ}. Motor tedy nedosáhne ustáleného oteplení, ani jeho teplota neklesne na teplotu okolí. Motor můžeme přetěžovat takovým způsobem, že bude jeho maximální oteplení $\Delta\upsilon_{max}$ menší nebo rovno dovolenému oteplení $\Delta\upsilon_{dov}$. Na začátku pracovního cyklu má motor počáteční oteplení $\Delta\upsilon_{min}$. [15]

$$\Delta\vartheta_{dov} \geq \Delta\vartheta_{\max} = \Delta\vartheta v_{\infty} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_z}{\tau_\vartheta}}\right) + \Delta\vartheta_{\min} \cdot e^{-\frac{t_z}{\tau_\vartheta}} \tag{1.8}$$

2 KONSTRUKCE ASYNCHRONNÍHO MOTORU

V dnešní době jsou asynchronní stroje nejpoužívanější, nejjednodušší, nejlevnější a provozně nejspolehlivější. Jsou také nenáročné na údržbu. Protože otáčivá rychlost asynchronních strojů úzce souvisí s rychlostí točivého pole, používají se asynchronní stroje jako pohony, u nichž nejsou zapotřebí rychlostní změny. Asynchronní stroje jsou magnetizovány ze statoru připojeného na síť, jelikož nemají budiče, proto se konstruují s co nejmenší vzduchovou mezerou.

Vyrábějí se pro výkony u dvoupólových strojů s kroužkovou kotvou do 5 MW a u dvoupólových strojů s kotvou nakrátko do 6 MW. U strojů s kroužkovou kotvou jsou problémy s oteplováním kroužků a opotřebením kartáčů. U strojů s kotvou na krátko nastává problém v okamžiku záběru, při kterém dochází k jiskření mezi tyčemi klece a plechy rotoru. Větších výkonů dosahujeme u vícepólových strojů, např. 22 MW. [2]

Hlavními částmi asynchronního motoru jsou stator a rotor. Statorové plechy, které jsou od sebe izolovány a tvoří část magnetického obvodu, mají na vnitřním obvodu drážky, do kterých se ukládá obvykle trojfázové vinutí. Polohu rotoru ve statoru vymezují ložiskové štíty. V ložiskových štítech jsou upevněna ložiska, v kterých se otáčí hřídel, na které jsou nalisovány rotorové plechy. Vzduchová mezera mezi rotorem a statorem umožňuje pohyb rotoru.

U motorů s kotvou nakrátko jsou v drážkách rotoru neizolované spojovací nejčastěji hliníkové kruhy na krátko, které můžou být i měděné nebo mosazné.

U motorů s kotvou kroužkovou je v drážkách rotoru uloženo vynutí z izolovaných vodičů, konce fází jsou připojeny ke třem sběracím kroužkům, ke kterým přiléhají kartáče. Začátky fází jsou spojeny do uzlu. Takové to rotorové vinutí umožňuje připojení zařízení k regulaci otáček.

U motorů menších výkonů, kde se vinutí odlévá metodou tlakového lití spolu s větracími lopatkami z hliníku. Toto vinutí se nazývá klec. [13]

3 ZTRÁTY V ASYNCHRONNÍM MOTORU

Účinnost asynchronního motoru je ovlivněna ztrátami. Ztráty představuje nevyužitá přiváděná energie, která se mění v energii tepelnou. To vede k oteplování motoru.

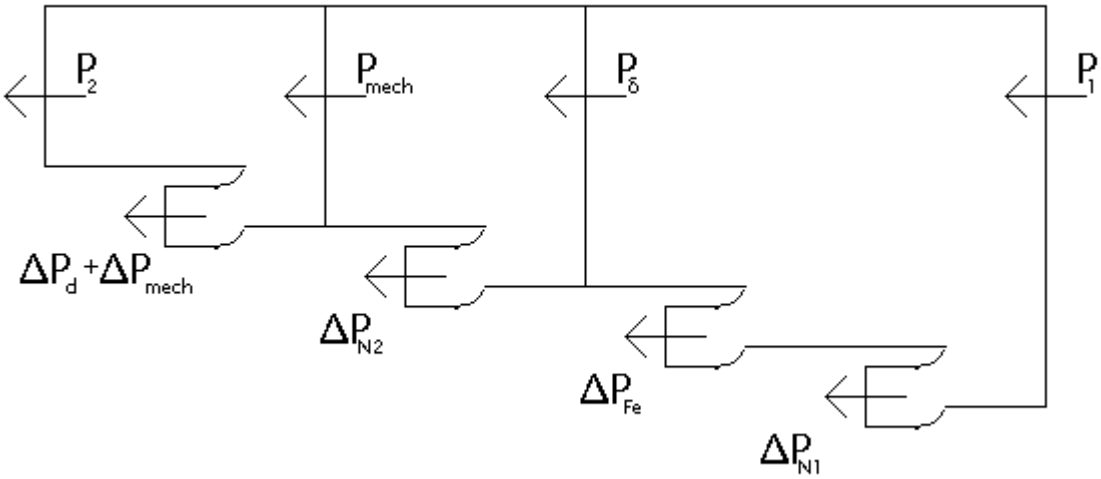
Od příkonu P_1 dodávaného do motoru ze sítě se odečítají ztráty vinutí statoru ΔP_{N1}a a ztráty v magnetickém obvodu ΔP_{Fe}. Vzduchovou mezerou mezi statorem a rotorem prochází hlavní část příkonu P_δ, od které při odečtení ztrát ve vinutí rotoru ΔP_{N2} dostaneme mechanický výkon stroje $P_{mech.}$. Ovšem celý mechanický výkon stroje na hřídel nedostaneme, zmenší se o mechanické ztráty stroje ΔP_{mech} a o ztráty dodatečné ΔP_d. Na hřídeli bude tedy výkon P_2 který je o tyto ztráty zmenšený. [13]

Celkové ztráty ΔP_Σ jsou dány součtem všech ztrát v motoru.

$$\Delta P_\Sigma = \Delta P_{Fe} + \Delta P_{N1} + \Delta P_{N2} + \Delta P_{mech} + \Delta P_d \tag{3.1}$$

Příkon motoru P_1:

$$P_1 = P_2 + \Delta P_{mech} + \Delta P_d + \Delta P_{N1} + \Delta P_{N2} + \Delta P_{Fe} \tag{3.2}$$



***Obr. 3.1:** Tok výkonu v asynchronním motoru* [13]

Ztráty v magnetickém obvodu ΔP_{FE}, jsou tvořeny ze dvou složek a to z hysterezních ΔP_{Feh} ztrát a ztrát vířivými proudy ΔP_{Fev}. Hysterezí ztráty závisejí na kmitočtu lineárně, vířivé ztráty jsou závislé na druhé mocnině kmitočtu. V praxi se při návrhu stroje počítá se součtovými ztrátami ΔP_{Fe}.

$$\Delta P_{Fe} = \Delta P_{Feh} + \Delta P_{Fev} \tag{3.3}$$

kde

$$\Delta P_{Feh} = k_h \cdot f \cdot B_m^2 \cdot m \tag{3.4}$$

$$\Delta P_{Fev} = k_v \cdot f \cdot B_m^2 \cdot m \tag{3.5}$$

kde, k_h a k_v koeficienty závisející na tloušťce a materiálu plechů, m hmotnost magnetického materiálu [kg], f frekvence [Hz] a B_m maximální hodnota magnetické indukce [T].

Použitý materiál na takzvané dynamové plechy má podstatný vliv na velikost ztrát v železe. Pokud mají plechy malé ztrátové číslo, tak jsou málo mechanicky pevné a naopak. Proto se musí při volbě plechů dělat kompromis mezi mechanickými a elektrickými vlastnostmi. Velikost ztrát v železe je závislá na magnetickém využití stroje, bývá 1 % až 3 % jmenovitého výkonu.[2]

Ztráty ve vinutí statoru (joulovy ztráty) ΔP_{N1} a ve vinutí rotoru ΔP_{N2}, jsou dány odporem vinutí. Při oteplení tyto ztráty rostou asi o 0,4 % s každým stupněm oteplení.

Ztráty ve vinutí statoru ΔP_{N1}

$$\Delta P_{N1} = m_1 \cdot R_1 \cdot I_1^2 \tag{3.6}$$

Kde m … počet fází,

R …odpor vinutí [Ω],

I …proud vinutím [A].

Ztráty ve vinutí rotoru ΔP_{N2}

$$\Delta P_{N2} = m_2 \cdot R_2 \cdot I_2^2 \tag{3.7}$$

Platí i pro vinutí klecové (kotva na krátko)

Proud I_2 se odečítá z proudového diagramu. Joulovy ztráty mají velikost 1,6 % -8 % jmenovitého výkonu podle výkonu stroje. [1], [2]

Ztráty mechanické ΔP_{mech} vznikají třením rotující části o vzduch (ventilační ztráty) a třením v ložiskách. Tyto ztráty jsou závislé na rychlosti, ne na zatížení stroje. Ztráty třením v ložiskách stroje jsou téměř úměrné rychlosti. Ventilační ztráty se zvětšují třetí mocninou rychlosti. U rychloběžných strojů je poměr ztrát ventilačních ke ztrátám třením velký. U pomaluběžných strojů je tento poměr malý. U středních a velkých strojů jsou mechanické ztráty obvykle 0,5 % až 1 % jmenovitého výkonů.[2]

Ztráty dodatečné ΔP_d jsou to například ztráty vířivými proudy v materiálech blízko vinutí a vyššími harmonickými. [13]

4 MĚŘENÍ TEPLOTY V ELEKTRICKÝCH STROJÍCH

4.1 Kontaktní měření

U kontaktního měření teploty je měřící sonda v přímém kontaktu s měřeným povrchem. Tyto čidla mohou pracovat na různém principu. U elektrických strojů se užívají odporové senzory, termočlánky a indikátory teploty. Uchycení čidla na měřený povrch je typickým problémem kontaktního měření. Použijeme- li k uchycení lepidlo, nebo speciální materiály, může v případě, kdy chceme čidlo odstranit dojít zejména u termočlánků k poškození. Pro krátkodobé měření lze použít lepicí pásku, při dlouhodobějším měření je pod páskou patrný rozdíl teploty což je způsobeno tím, že plocha lepicí pásky brání odvodu tepla.[6]

Výhody kontaktního měření teploty:

- Snadné umístění čidla zvenčí i uvnitř stroje.
- Nízká cena.
- Velká rychlost odezvy – závisí na použitém čidle.

Nevýhody kontaktního měření teploty:

- Na pohyblivých částech je měření komplikované.
- Nutné vyvedení připojovacích vodičů.
- Někdy je nutné zasáhnout do konstrukce stroje.

4.1.1 Odporové senzory

Kovové odporové senzory teploty

Principem odporových kovových senzorů teploty je závislost odporu kovu na teplotě. U kovů většinou s teplotou roste i odpor. Pro odporové kovové senzory teploty se jako výrobní materiály používají platina, nikl, měď.[11]

Polovodičové odporové senzory teploty

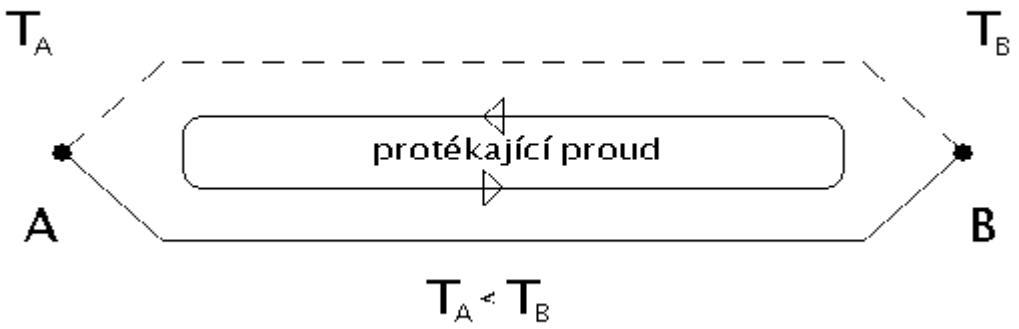
Stejně jako kovové odporové senzory využívají polovodičové odporové senzory teplotní závislost odporu. Na rozdíl od kovů se u polovodičů při zvýšení teploty odpor snižuje. U polovodičových odporových senzorů koncentrace nosičů náboje n je dominantní závislostí.

Polovodičové odporové senzory lze rozdělit na termistory (negastory, pozistory), monokrystalické senzory (monokrystalické Si senzory, senzory SiC). [11]

Obr. 4.1: *NTC termistor* [14]

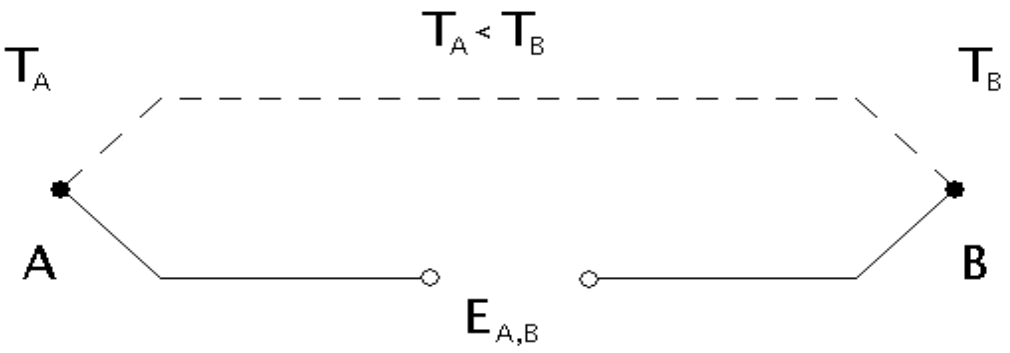
4.1.2 Termoelektrické články

Princip termoelektrických článků je založen na Seebeckově jevu, což je jev převodu tepelné energie na elektrickou. Seebeckův jev vzniká tím, že nositelé náboje v teplejší části vodiče mají větší energii, v polovodičích i větší koncentraci, a proto difundují do chladnějších míst ve větším množství než nositelé z chladnějších míst do teplejších. Vznikne tím jednostranná převaha nábojů kladných, nebo záporných. Znaménka absolutních Seebeckových koeficientů souhlasí se znaménkem nositelů nábojů, kterých je ve vodiči víc.[11]



Obr. 4.2: *Seebeckův jev u termoelektrického článku [11]*

Termoelektrický článek se skládá ze dvou vodičů, nebo polovodičů z různých materiálů, které jsou na koncích spojeny (spoje A a B). Mají-li oba spoje rozdílnou teplotu, protéká tímto uzavřeným obvodem elektrický proud. Pokud tento obvod na libovolném místě rozpojíme, na vniklých svorkách bude elektrické napětí.[11]



Obr. 4.3: *Termoelektrické napětí [11]*

Pro vzniklé elektrické napětí lze psát Seebeckovy vztahy:

$$dE_{A,B} = S_{A.B}dT\ , \quad E_{A,B} = \int_{T_B}^{T_A} S_{A,B}\,dT \tag{4.1}$$

kde E je elektromotorické napětí, veličina která se používá pro termoelektrické napětí.

S je Seebeckův koeficient pro který platí:

$$S_{A,B} = S_A - S_B \tag{4.2}$$

Seebeckovy koeficienty S_A a S_B se spočítají jako:

$$S_A = \int_0^T \frac{\sigma_A}{T}dT\ , \quad S_B = \int_0^T \frac{\sigma_B}{T}dT \tag{4.3}$$

Kde σ_A, σ_B jsou Thomsonovy koeficienty.

Thomsonův termoelektrický jev definuje Thomsonův koeficient. Protéká-li vodičem elektrický proud, dochází ke vzrůstu nebo poklesu teploty podél vodiče.

Pro tepelný výkon P při malém teplotním rozdílu platí:

$$P = \sigma(T) I \frac{dT}{dx} \tag{4.4}$$

kde σ(T) Thomsonův koeficient

$\frac{dT}{dx}$ teplotní gradient podél vodiče

Pro kovy dále platí

$$S = -\frac{\pi^2 k^2 T}{2eW_f} \quad [\mu V \cdot K^{-1}] \tag{4.5}$$

pro polovodiče

$$S = -\frac{\pi^2 k^2 T}{6e(W_0 - W_f)} \quad [\mu V \cdot K^{-1}] \tag{4.6}$$

kde W_f Fermiho hladina,

W_0 maximální energetická hladina pro teplotu T,

k Boltzmanova konstanta [$J.K^{-1}$].

Seebeckovy koeficienty jsou u polovodičů dány

$$S = -\frac{k}{e}\left(2{,}5 + \ln\frac{N}{n}\right) \tag{4.7}$$

kde: N efektivní stavová hustota,

n koncentrace nosičů náboje.

4.1.3 Indikátory teploty

Slouží k přibližnému stanovení teploty těles. Na základě znalosti kritické teploty, což je teplota, při níž nastává definovaná změna vzhledu indikátoru, je stanovena teplota tělesa.

Změnou vzhledu může být změna barvy, nebo tvaru indikátoru. Nejistota měření teploty závisí na tom, nakolik se liší prostředí pro kalibraci indikátorů od prostředí měřeného. Na vliv odchylky teploty má i tlak. Rychlost ohřevu je důležitým parametrem pro používání indikátorů. Barevné indikátory se člení na vratné, nevratné a s jedním, nebo s více barevnými zvraty. Indikátory teploty mohou být keramické žároměrky, tavné indikátory teploty a barevné indikátory teploty.[11]

4.2 Bezkontaktní měření

Bezkontaktním měřením teploty měříme povrchové teploty těles. Těleso vysílá elektromagnetické záření, které přijímá senzor záření vlnové délky od 0,4 μm do 25 μm.

Tento rozsah pokrývá oblast viditelného spektra, blízkého infračerveného spektra, krátkovlnného infračerveného spektra, středovlnného infračerveného spektra a dlouhovlnného infračerveného spektra. Jako tepelné záření se označuje elektromagnetické záření s vlnovou délkou od 2 μm do 25 μm. Tento rozsah umožňuje měřit teploty od -40˚C do +10000˚C.[11]

Mezi nevýhody bezkontaktního měření teploty patří nejistota způsobená neznalostí správné hodnoty emisivity. Emisivita je funkcí teploty, vlnové délky a mnoha vlastností povrchu materiálu, který měříme. Přestože existují pro určení emisivity pro jednotlivé materiály tabulky, ne vždy je tato hodnota správná. Na povrchu materiálu mohou být různé povrchové vrstvy, které ovlivňují vyzařování materiálu. Povrchovou vrstvou může být koroze, nebo nátěr. Povrchovou vlastností je například odrazivost materiálu, která může způsobit v přítomnosti zdroje tepla blízko u měřeného elektrického stroje, že senzor snímá i odraz zdroje tepla. Tento problém lze řešit několika způsoby. Jedním z nich je natření lesklých částí matnou barvou. Je to jednoduchá a levná metoda, ale i elektrických strojů může být natírání členité konstrukce složité. Také je nutné se ujistit, aby barva nezpůsobila zkrat v elektrickém stroji. Dalším problémem je změna teplotních vlastností stroje, ovšem může být zanedbatelná. Nátěr znamená změnu vlastností proti původnímu provedení zdroje.

Jiná metoda je použití křídového spreje. Tato metoda nanese na povrch elektrického stroje velmi tenkou vrstvu křídového prášku, která má minimální vliv na teplotní pole. Nevýhodou je, že se prášek velmi lehce setře.

Protože každá změna povrchu má vliv na emisivitu materiálu, je nutné na začátku každého měření určit emisivitu všech měřených materiálů elektrického stroje. Při měření termokamerou je jednodušší způsob určení emisivity tím, že část stroje měříme dotykovým teploměrem. Poté je softwarem provedena analýza, uživatel mění hodnoty emisivity, dokud není teplota změřená termokamerou stejná jako teplota změřená dotykovým teploměrem. Tímto způsobem můžeme určit emisivitu všech viditelných částí. [6]

Výhody bezkontaktního měření teploty:

- Zanedbatelný vliv měřicího přístroje na měřený objekt.
- Možnost měření teploty na pohybujících se objektech.
- Měření teploty z bezpečné vzdálenosti.

Nevýhody bezkontaktního měření teploty:

- Nejistoty měření způsobené neznalostí správné hodnoty emisivity povrchu.
- Nejistoty měření způsobené prostupností prostředí.
- Na lesklých částech problémy s odrazem teploty.

4.2.1 Pyrometry

Měřicí přístroje vhodné spíše pro orientační měření, protože přesnost měření je závislá na velkém množství parametrů. Například na úhlu naklonění k měřenému povrchu a podobně.

Pracují na principu zaostření vyzařované teploty do jednoho detektoru uvnitř měřicího přístroje. Jsou vhodné pro přehledová měření, u kterých nezáleží na přesnosti.

Úhrnné pyrometry

Jsou to měřicí přístroje, pro vyhodnocování tepelného záření v celém spektru vlnových délek. V celém spektru jsou schopné měřit jen tepelné detektory. Soustavou čoček vyrobených z materiálů se širokým spektrem prostupnosti, nebo zrcadlem se širokým spektrem odrazivosti se zářivý tok zaostřuje na detektor. Detektor nemá ideální spektrální pohltivost, a proto je v technické praxi spektrum omezené.

Dále rozeznáváme pyrometry monochromatické, pásmové, poměrové, více pásmové, pyrometry s automatickou korekcí emisivity a pyrometry s optickými vlnovody v infračervené oblasti. [11]

4.2.2 Termovize

V dnešní době se pro termovizní kamery používají chlazené a nechlazené maticové mikrobolometrické a kvantové FPA detektory (1D-řádové a 2D- plošné). Chladí se Stirlingovým chladičem (hermeticky uzavřený chladicí systém pracující na principu kompresorové mikrochladičky, se dvěma písty s plynným héliem), nebo termoelektrickým chladičem pracujícím na principu Peltrierova jevu. Signál je zpracován přímo na čipu pomocí multiplexerů a 14bitových A/D převodníků v každé maticové řádce. Podle programového vybavení termokamery, které umožňuje měnit nastavení základních parametrů, mohou být různé způsoby zpracování signálu. Například vykreslení teplotního profilu v libovolném místě obrazu, vyhodnocení střední a maximální hodnoty teploty ve zvolené oblasti obrazu, vyhodnocení teploty v libovolném místě na obraze a další. [11]

Jsou používány dvě hlavní pásma vlnových délek, krátkovlnné (2 μm až 5 μm) a dlouhovlnné (7 μm až 13 μm). Pro libovolné teplotní rozmezí lze pomocí amplitudového diskriminátoru videosignálu nastavit libovolnou barvu, nebo zvolit některou z barevných palet. Jelikož termovize pracuje v neviditelném spektru záření, kde neexistují žádné barvy, je přiřazení barev umělé.

Pro infračervenou diagnostiku je termovize základním měřícím zařízením. Známe-li rozložení teplotního pole diagnostikovaného objektu, můžeme kontrolovat funkce zařízení, jejichž činnost vytváří nebo absorbuje teplo. Tímto lze lokalizovat materiálové vady vnitřních dílu objektu způsobené například třením, které mají vliv na rozložení povrchové teploty.[11]

5 TEPLOTNÍ CHARAKTERISTIKY

5.1 Oteplovací charakteristika

Nejvyšší ustálená teplota stroje závisí na celkových ztrátách, ochlazovací konstantě a chladícím povrchu. Je-li dán způsob chlazení stroje a chladící povrch, potom je nejvyšší hodnota oteplení úměrná okamžitým ztrátám. Oteplení se zvyšuje s rostoucím zatížením. Oteplovací charakteristika má logaritmický průběh a lze ji aproximovat vztahem:

$$T = T_{\max}.(1 - e^{-\frac{1}{\tau}}) \tag{5.1}$$

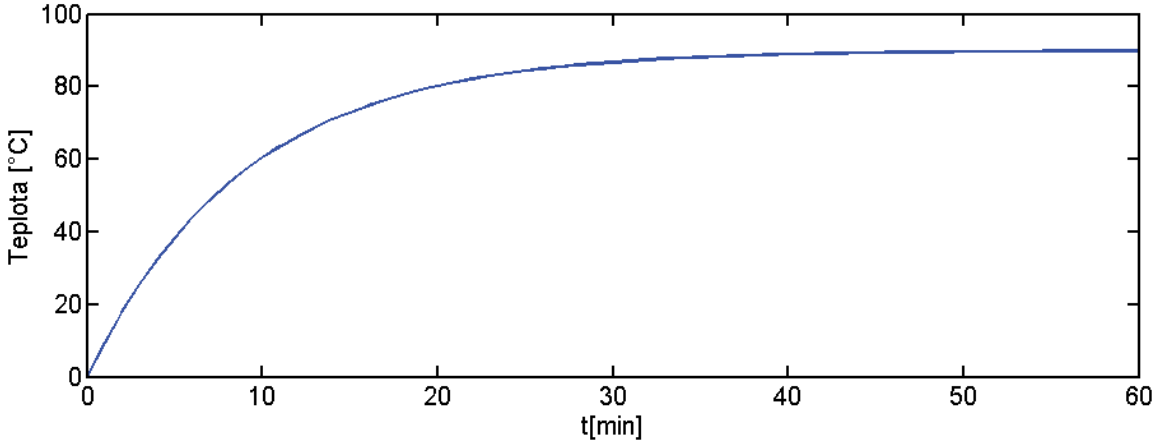
Kde T…. je teplota v čase t[˚C],

T_{max}… ustálená teplota stroje [˚C],

t …. Čas, ve kterém se určuje teplota[s],

τ…. Časová konstanta stroje [s].

Tento vztah je založen na znalosti ustálené tepoty časové konstanty elektrického stroje. Doba, za kterou dosáhne elektrický stroj ustálené teploty v případě, že nedochází k sekundárním výměnám tepla, se nazývá časová konstanta. Stroj dosahuje ustálené teploty vždy stejně rychle, protože časová konstanta je nezávislá na ztrátách. Charakteristika by pak byla lineární. [6]



Obr. 5.1: *Oteplovací charakteristika.*

5.2 Ochlazovací charakteristika

Průběh ochlazovací charakteristiky v elektrických strojích bývá ve většině případů exponenciální. Speciální provozní stavy, jako např. přerušovaný chod elektrických strojů tvoří výjimky. Vztahem 5.2 lze základní průběh ochlazovací charakteristiky aproximovat.[6]

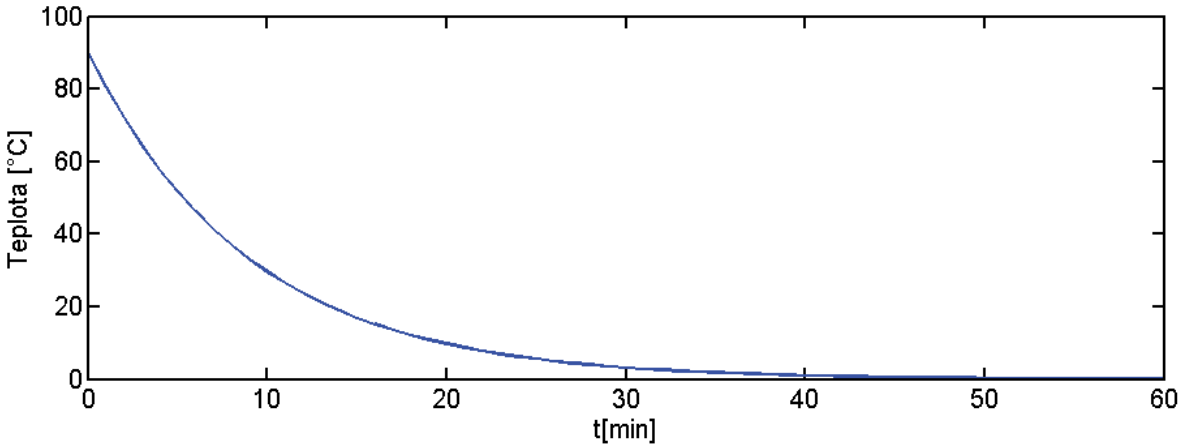
$$T = T_{\max} . e^{-\frac{t}{\tau}} \tag{5.2}$$

Kde T…. je teplota v čase t[˚C],

T_{max}… ustálená teplota stroje [˚C],

t …. Čas, ve kterém se určuje teplota[s],

τ…. Časová konstanta stroje [s].



Obr. 5.2: *Ochlazovací charakteristika.*

6 TEORETICKÉ URČENÍ HODNOT OTEPLENÍ

Program FEMM – Finite Element Method Magnetics (magnetická metoda konečných prvků)

Tento program je vhodný pro řešení nízkofrekvenčních elektromagnetických problémů v 2D planárních a axisymetrických oblastech. Program se současně zaměřuje na lineární/nelineární magnetostatické problémy, lineární a nelineární časově harmonické magnetické problémy, lineárních elektrostatické problémy a problémy v rovnovážném stavu tepelného toku.[12]

FEMM je rozdělen na 3 části:

- Interaktivní příkazová řádka (femm.exe). Tento program je vícenásobné dokumentární rozhraní preprocesor a postprocesor pro různé typy problémů řešené v FEMM. To zahrnuje CAD- jako rozhraní pro řešení problémů konfigurace a definování materiálních vlastností a mezích podmínek. Složky AutoCADu DFX mohou být vloženy k usnadnění analýzy již existujících konfigurací. Oblast řešení může být zobrazena ve formě obrysu a hustoty podoblastí. Program také dovoluje uživateli kontrolovat pole v libovolných bodech, stejně jako posoudit počet různých integrálů a oblastí různých množství zájmů podle uživatelsky definovaných obrysů.

- Triangle.exe. V řešené oblasti se vytvoří síť, kde hlavním prvkem je trojúhelník. To je zásadní součástí procesu konečných prvků.

- Řešení problému tepelného toku (hsolv) a problému průtoku proud (csolv). Každé řešení má soubor dat, které popisuje problém a řeší relevantní parciální diferenciální rovnice, ze kterých se dostane hodnota pro požadované oblasti skrz řešení domény.[12]

6.1 Teplotní tok

Pro problematiku teplotního toku rozlišujeme šest typů okrajových podmínek:

1. Pevná teplota – Teplota podél hranice je nastavena na předepsanou hodnotu.

2. Tepelný tok – Tepelný tok f procházející přes hranici je předepsán. Tato okrajová podmínka může být popsána matematicky jako:

$$k\frac{\partial T}{\partial n} + f = 0 \tag{6.1}$$

Kde n …směr normály ke hranici,

f …tepelný tok,

T …teplota,

k… koeficient tepelné vodivosti.

3. Proudění – K proudění dochází, když je hranice chlazena tokem chladícího média. Tato okrajová podmínka může být popsána jako:

$$k\frac{\partial T}{\partial n} + h(T - T_0) = 0 \tag{6.2}$$

Kde h… koeficient přestupu tepla,

T_0…teplota vnější chladicí kapaliny.

4. Radiace (sálání) – teplotní tok radiací může být matematicky popsán jako:

$$k\frac{\partial T}{\partial n} + \beta k_{sb}(T^4 - T_0^4) = 0 \tag{6.3}$$

Kde β …emisivita povrchu (hodnota mezi 0 a 1),

k_{sb}... Stefan-Boltzmannova konstanta.

5. Periodické – Periodické okrajové podmínky spojují dohromady dvě hranice. V tomto typu okrajové podmínky jsou si hraniční hodnoty na odpovídajících bodech ze dvou hranic navzájem rovny.

6. Neperiodické – neperiodické okrajové podmínky také spojují dohromady dvě hranice. Avšak hraniční hodnoty jsou stejné velikost, ale opačného znaménka.

Jestliže nejsou okrajové podmínky výslovně definované, každá hranice vychází z izolované podmínky (přes hranici neprochází tepelný tok). Avšak nederivované okrajové podmínky musí být někde definované (nebo potenciál musí být definován v referenčním bodě domény), tento problém má specifické řešení. [12]

6.2 Operace v FEMM:

- Při vytváření nového výpočtu lze vybrat mezi magnetickým problémem, elektrostatickým problémem, teplotním tokem a průtokem proudu.
- Do programu je možné importovat 2D model nakreslený v AutoCADu s příponou Dxf.
- Je možné nastavení viditelnosti mřížky a její velikosti.
- Kreslení čar a oblouků (bývá nepřesné).
- Z materiálové knihovny je možné vybrat potřebný materiál, nastavit hodnotu tepelné objemové kapacity a tepelné objemové generace a přiřadit vybraný materiál k bloku.
- Lze vytvořit a nastavit meze. Při vytváření meze můžeme vybrat a pak nastavit jeden z těchto parametrů: pevnou teplotu, tepelný tok, proudění, radiaci, periodičnost, neperiodičnost.
- Pro bod lze nastavit specifickou teplotu, nebo teplotní generaci.
- Pro blok lze zadat velikost buněk.
- Vytvoření mřížky.

Operace v zanalyzovaném problému:

- Tvorba grafu pro vybraný úsek – mohou být vytvořeny různé typy grafu: teplotní, velikost hustoty tepelného toku, kolmice hustoty tepelného toku, tengenciální hustota tepelného toku, velikost pole gradientu, teplotní gradient, tangenciální teplotní gradient.
- Lze integrovat – rozdíl teplot, tepelný tok, obrysovou délku a plochu, průměrnou teplotu.

7 VLASTNÍ MĚŘENÍ

7.1 Měření motoru bez zatížení

Měření bylo provedeno na trojfázovém motoru, napájeného sdruženým napětím 200 V.

Motor byl měřen třemi metodami:

- Dvěma termočlánky typu K. Jeden termočlánek byl přiložen na povrch motoru ke kraji s hřídelí, druhý termočlánek byl umístěn na povrch v prostředku motoru.
- Termistorem K164N-10K umístěným vedle druhého termočlánku uprostřed motoru.
- Pyrometrem, kde bod měření byl zvolen v blízkosti termistoru.

Měření probíhalo v laboratoři, kde byla teplota okolí:

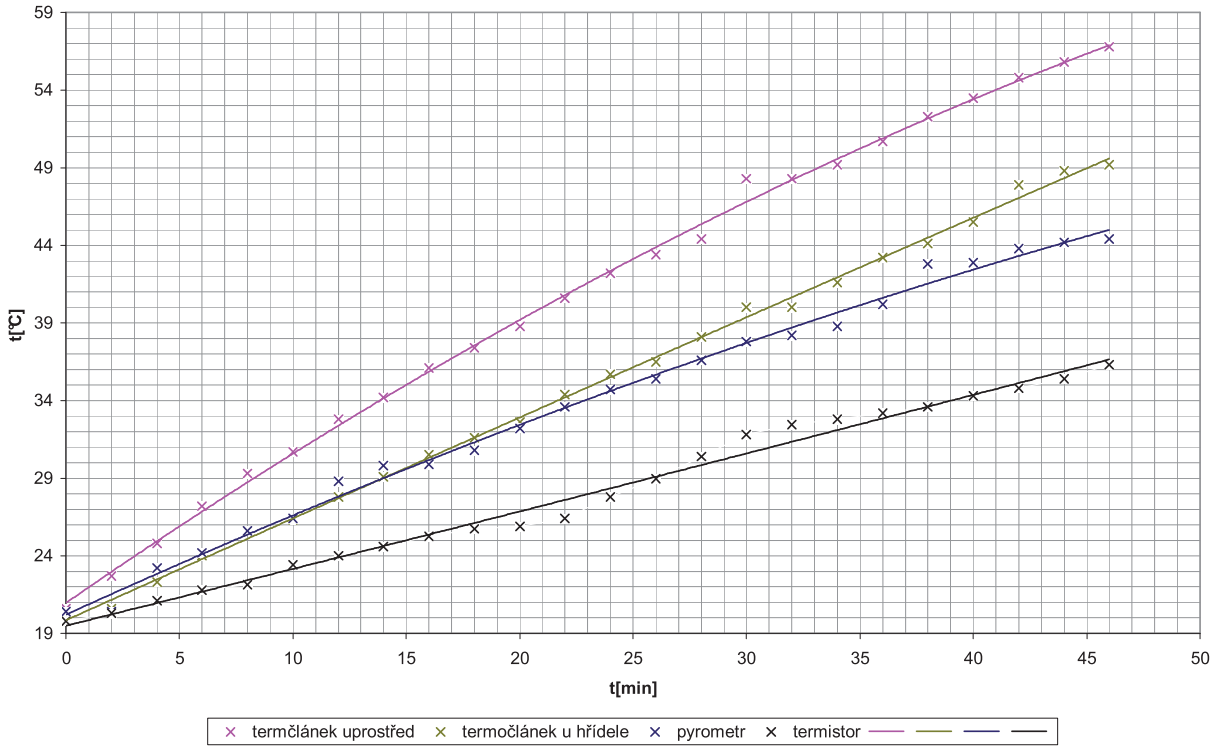
- před začátkem měření 20,6 °C,
- po ukončení měření 21,9 °C.

Byla naměřena oteplovací a ochlazovací charakteristika. Doba měření obou charakteristik byla 46 minut s odečítáním teploty po dvou minutách.

7.1.1 Tabulky a grafy naměřených hodnot

	Termistor	Termočlánek uprostřed	Termočlánek u hřídele	Pyrometr	Přepočtený odpor termistoru na teplotu
t[min]	R[kΩ]	t[°C]	t[°C]	t[°C]	t[°C]
0	12,83	20,6	20	20,4	19,8
2	12,5	22,7	20,6	20,4	20,3
4	12,07	24,8	22,3	23,2	21,1
6	11,7	27,2	24	24,2	21,8
8	11,42	29,3	25,6	25,6	22,15
10	10,77	30,7	26,3	26,4	23,42
12	10,5	32,8	27,8	28,8	24
14	10,17	34,2	29,1	29,8	24,6
16	9,88	36,1	30,5	29,9	25,25
18	9,65	37,4	31,6	30,8	25,75
20	9,57	38,8	32,6	32,2	25,9
22	9,35	40,6	34,4	33,6	26,4
24	8,78	42,2	35,7	34,7	27,8
26	8,32	43,4	36,5	35,4	28,95
28	7,8	44,4	38,1	36,6	30,4
30	7,3	48,3	40	37,8	31,8
32	7,1	48,3	40	38,2	32,45
34	6,97	49,2	41,6	38,8	32,8
36	6,86	50,7	43,2	40,2	33,2
38	6,74	52,3	44,1	42,8	33,6
40	6,53	53,5	45,5	42,9	34,3
42	6,38	54,8	47,9	43,8	34,8
44	6,22	55,8	48,8	44,2	35,4
46	5,97	56,8	49,2	44,4	36,3

***Tabulka 7.1**: Oteplovací charakteristika.*



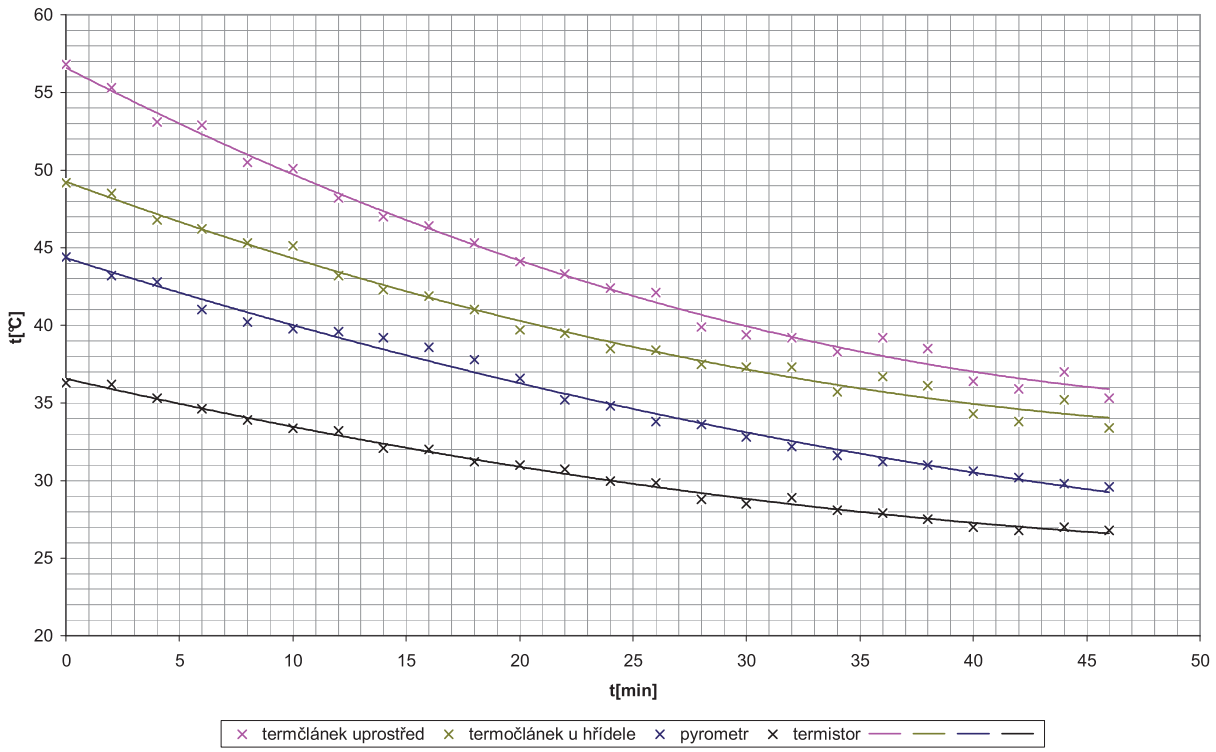
***Obr. 7.1**: Naměřená oteplovací charakteristika.*

Charakteristika začíná v ustálené teplotě okolí naměřené různými čidly okolo 20 °C. Největší nárůst teploty zaznamenal termočlánek připevněný uprostřed motoru. Nejpozvolněji narůstá teplota naměřená termistorem. Hodnoty naměřené pyrometrem a termočlánkem u hřídele jsou do času 10 min skoro totožné, potom začínají být hodnoty naměřené termočlánkem vyšší.

Nebylo dosaženo ustálené teploty z toho důvodu, že motor nebyl chlazen ventilátorem. Delší provoz by měl tedy za následek porušení izolace a tím by došlo ke zničení motoru.

	Termistor	Termočlánek uprostřed	Termočlánek u hřídele	Pyrometr	Přepočtený odpor termistoru na teplotu
t[min]	R[kΩ]	t[°C]	t[°C]	t[°C]	t[°C]
0	5,97	56,8	49,2	44,4	36,3
2	6,07	55,3	48,5	43,2	36,2
4	6,25	53,1	46,8	42,8	35,3
6	6,44	52,9	46,2	41	34,63
8	6,65	50,5	45,3	40,2	33,9
10	6,82	50,1	45,1	39,8	33,38
12	6,87	48,2	43,2	39,6	33,2
14	7,22	47	42,3	39,2	32,1
16	7,26	46,4	41,9	38,6	32
18	7,52	45,3	41	37,8	31,2
20	7,58	44,1	39,7	36,6	31
22	7,67	43,3	39,5	35,2	30,73
24	7,96	42,4	38,5	34,8	29,95
26	8,03	42,1	38,4	33,8	29,85
28	8,4	39,9	37,5	33,6	28,8
30	8,5	39,4	37,3	32,8	28,5
32	8,57	39,2	37,3	32,2	28,9
34	8,66	38,3	35,7	31,6	28,1
36	8,76	39,2	36,7	31,2	27,9
38	8,92	38,5	36,1	31	27,5
40	9,1	36,4	34,3	30,6	27
42	9,2	35,9	33,8	30,2	26,8
44	9,1	37	35,2	29,8	27
46	9,23	35,3	33,4	29,6	26,78

***Tabulka 7. 2**: Ochlazovací charakteristika*



***Obr. 7.2**: Naměřená ochlazovací charakteristika*

Charakteristiky čidel pozvolně klesají k výchozí ustálené teplotě. Za čas měření 46 min se motor na výchozí teplotu neochladil.

7.1.2 Zhodnocení měření motoru bez zatížení

Při měření oteplovací charakteristiky došlo k uvolnění termočlánků mezi 30 a 32 minutou měření. Proto jsou tyto hodnoty totožné. U měření ochlazovací charakteristiky dochází od 36. minuty měření k teplotním výkyvům, což je způsobeno postupným uvolňováním tepla z vinutí na povrch motoru.

Měření prováděné pyrometrem je velmi nepřesné. To je způsobeno tím, že u použitého pyrometru nelze nastavit hodnotu emisivity. Rozdíl teplot pyrometru a termočlánku, u kterého se měřila teplota pyrometrem, je u nižších teplot 0,2 °C, se zvyšováním teploty se rozdíl zvětšoval až na 12,4 °C. Tento rozdíl je způsoben mimo hodnoty emisivity i lidským faktorem. Proto se tento způsob používá pouze k orientačnímu měření.

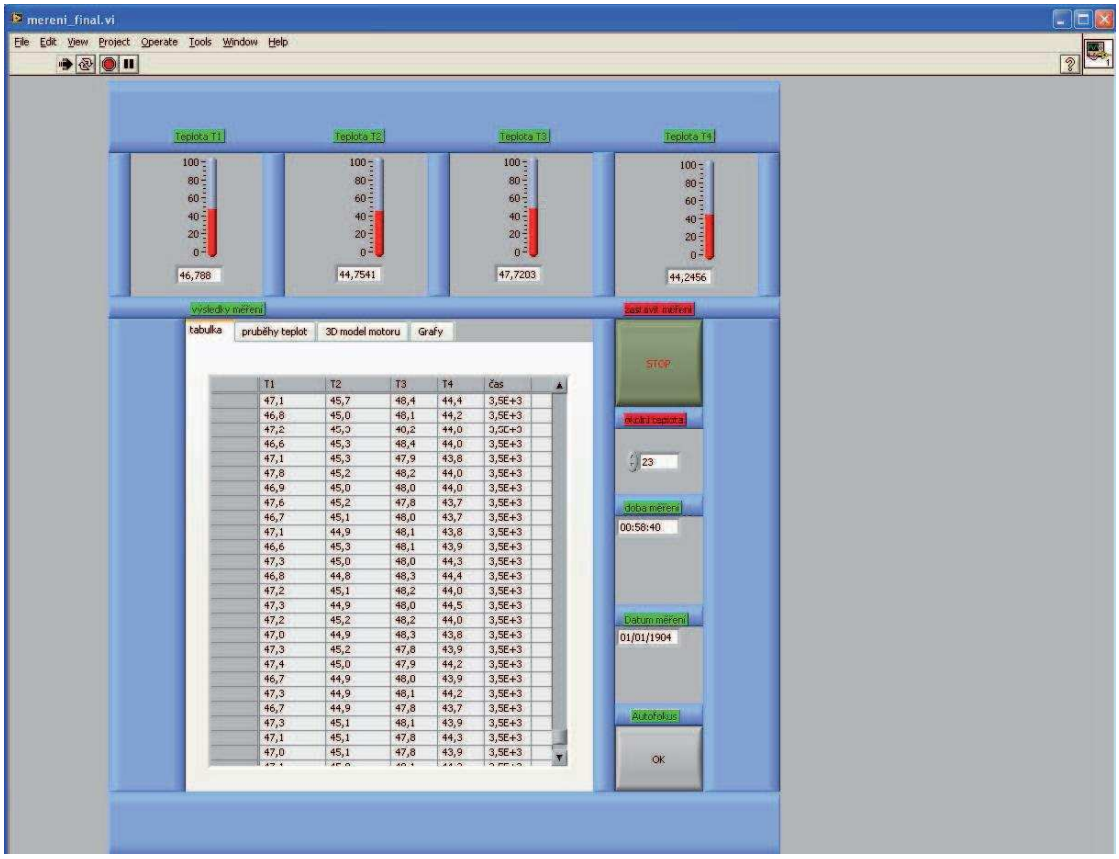
Termočlánky použité při měření byly typu K, které mají složení NiCr-NiAl. Doba odezvy termočlánků byla cca 3 s. Termočlánek uchycený na středu motoru má na počátku měření o 0,6°C vyšší teplotu než termočlánek připevněný na povrchu u hřídele. Pro vyšší hodnoty teploty motoru se tento rozdíl zvětšuje a pohybuje se od 5,6 °C do 8,3 °C. To je dáno tím, že povrch u hřídele je efektivněji chlazen.

Termistor měl dobu odezvy delší než termočlánky. Rozdíl naměřených teplot se mezi termistorem, pyrometrem a termočlánkem uchyceným uprostřed s rostoucí teplotou na motoru zvyšuje. Nejvyšší rozdíl mezi teplotou termistoru a termočlánku je 20,5 °C. Tento rozdíl mohl být způsoben nedoléháním termistoru k povrchu, chybou převodu naměřené hodnoty odporu na teplotu, a také vlivem toho, že připevňovací materiál termočlánku zhoršoval odvod tepla do okolí. Mezi termistorem a pyrometrem je nejvyšší rozdíl 9,2 °C.

7.2 Měření přerušovaného chodu motoru bez zatížení

Měření probíhalo na trojfázovém motoru, napájeném sdruženým napětím 200 V.

Měření bylo provedeno pomocí karty NI USB 6251 firmy National Instruments, ke které byly připojeny čtyři termočlánky typu K a hodnoty naměřené termočlánky byly zpracovány pomocí softwaru. Pro počáteční hodnoty teploty povrchu motoru byly pořízeny snímky z termokamery.



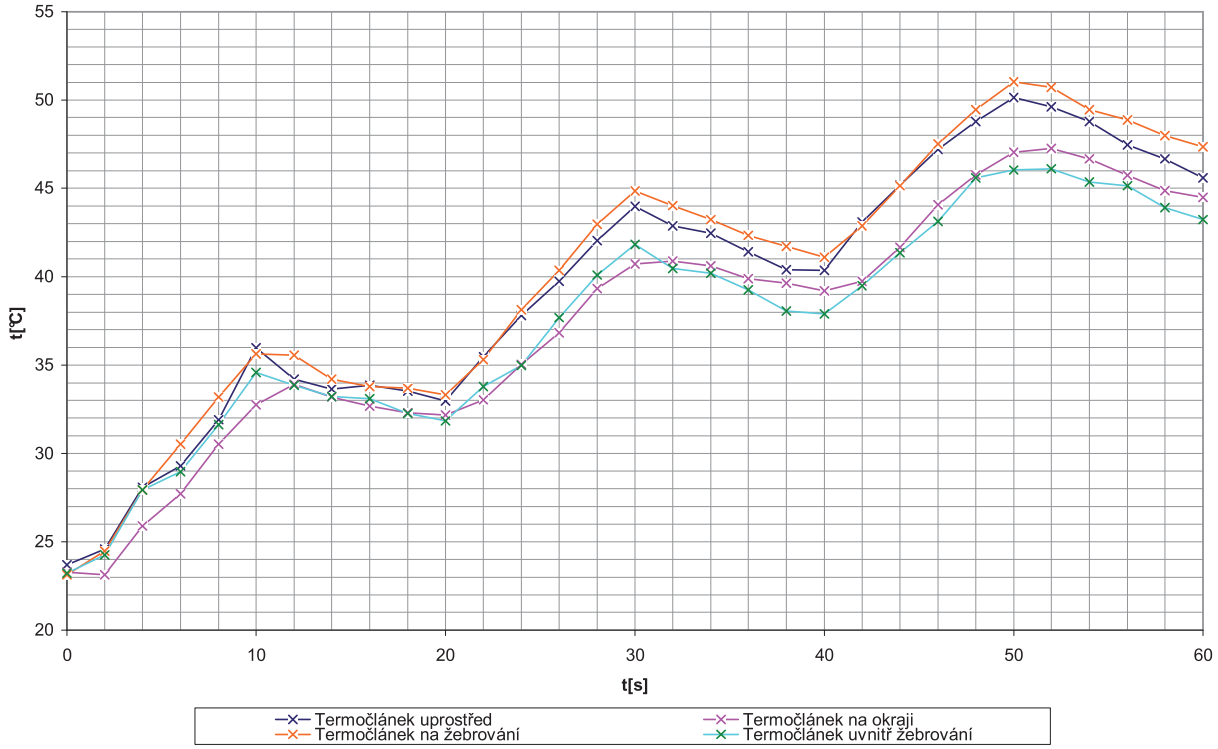
Obr. 7.3: Software pro měření teploty

Byla naměřena oteplovací charakteristika. Zapnutí a vypnutí motoru provedeno vždy po deseti minutách. Celková doba měření 60 minut.

7.2.1 Tabulky a grafy naměřených hodnot

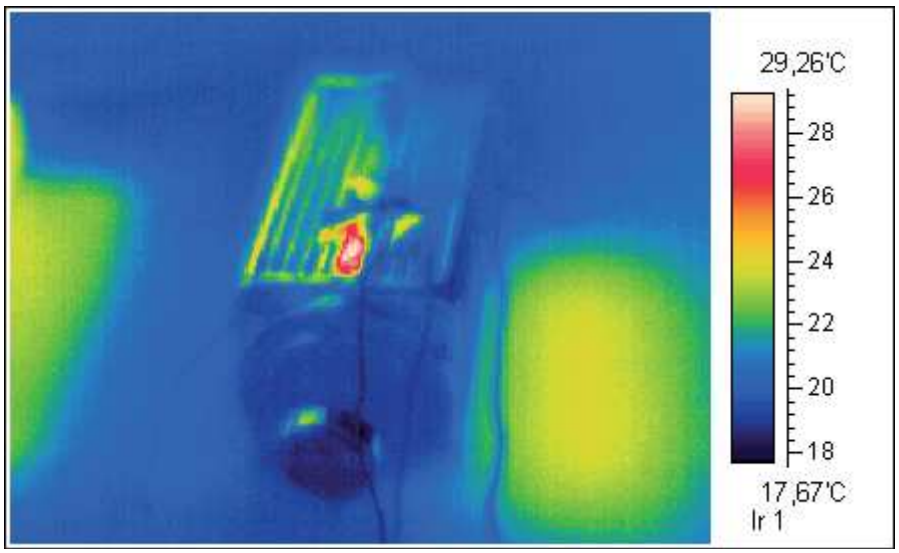
čas měření	termočlánek uprostřed	termočlánek na okraji	termočlánek na žebrování	termočlánek v žebrování
[s]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
0	23,69	23,27	23,14	23,23
2	24,58	23,14	24,46	24,25
4	28,06	25,9	27,93	27,93
6	29,29	27,72	30,52	28,95
8	31,91	30,52	33,19	31,62
10	35,98	32,76	35,64	34,58
12	34,2	33,91	35,56	33,86
14	33,65	33,19	34,2	33,23
16	33,86	32,68	33,78	33,1
18	33,53	32,3	33,69	32,25
20	32,97	32,17	33,31	31,83
22	35,47	33,02	35,3	33,78
24	37,8	35,05	38,14	34,97
26	39,75	36,83	40,35	37,68
28	42,04	39,33	42,97	40,09
30	43,99	40,73	44,84	41,83
32	42,89	40,9	44,03	40,47
34	42,47	40,6	43,23	40,18
36	41,41	39,88	42,34	39,25
38	40,39	39,63	41,7	38,06
40	40,35	39,2	41,11	37,89
42	43,1	39,75	42,89	39,5
44	45,18	41,66	45,14	41,36
46	47,21	44,08	47,51	43,14
48	48,78	45,77	49,46	45,6
50	50,14	47,04	51,03	46,03
52	49,63	47,25	50,73	46,11
54	48,78	46,66	49,46	45,35
56	47,47	45,73	48,86	45,14
58	46,66	44,88	47,97	43,91
60	45,6	44,5	47,34	43,23

***Tabulka 7.3**: Naměřené hodnoty pro přerušovaný chod*



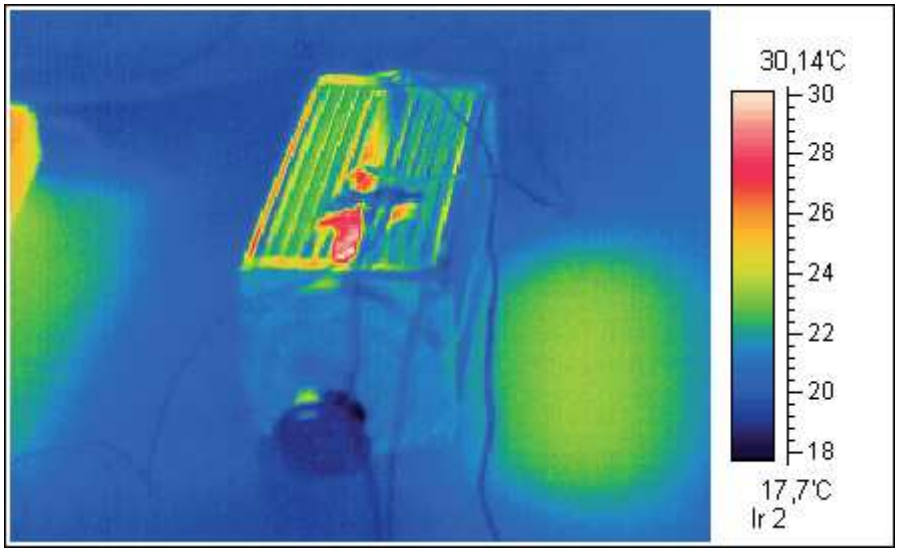
Obr. 7.4: *Charakteristika pro přerušovaný chod*

Při prvním odpojení motoru je naměřena nejvyšší teplota termočlánkem umístěným uprostřed motoru, konkrétně 35,98 °C; nejnižší hodnota je naměřena termočlánkem u kraje motoru 32,76 °C. Při ochlazování motoru nejvíce poklesne teplota měřená termočlánkem uprostřed motoru a to o 3,01°C, nejméně – o 0,59 °C – poklesne hodnota měřená na žebrování. Při druhém odpojení motoru je nejvyšší naměřená teplota na žebrování motoru 44,84 °C, nejnižší hodnota je na okraji motoru 40,73 °C. Při ochlazování na motoru nejvíce poklesne teplota měřená termočlánkem uvnitř žebrování motoru, a to o 3,94°C. Nejméně poklesne hodnota měřená na okraji motoru – o 1,53 °C. Při třetím odpojení motoru je nejvyšší naměřená teplota žebrování motoru 51,03 °C. Nejnižší hodnota je uvnitř žebrování motoru 46,03 °C. Při ochlazování na motoru nejvíce poklesne teplota měřená uprostřed motoru, konkrétně o 4,54 °C, nejméně poklesne hodnota měřená na okraji motoru o 2,54 °C.



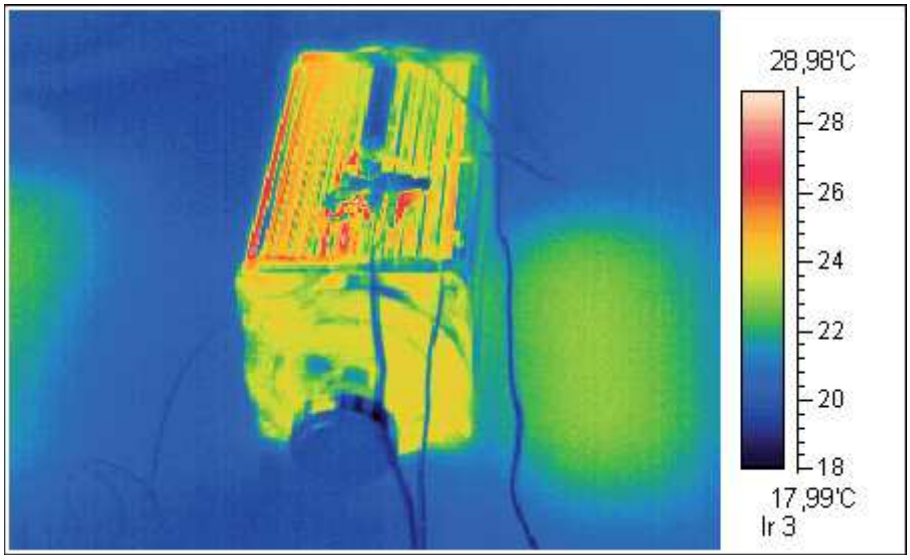
Obr. 7.5: *Snímek termokamerou v čase t=0 min*

Hodnota teploty motoru se pohybuje mezi 20–24 °C. Teplota 26–28 °C je způsobena odleskem od přichycení termočlánků.



Obr. 7.6: *Snímek termokamerou v čase t=2 min*

Teplota motoru se pohybuje od 22 °C do 28 °C. V oblasti měření termočlánky dochází ke zkreslení způsobené přichycením termočlánků. V oblasti přichycení je změřená teplota nižší než na okolním povrchu. Na měřeném povrchu se teplota pohybuje okolo 24 °C. Teplota 27–30 °C je způsobena odleskem od přichycení termočlánků.



Obr. 7.7: *Snímek termokamerou v čase t=4 min*

Teplota motoru se pohybuje od 22 °C do 28 °C. Přichycení termočlánků způsobuje, že v měřené oblasti je teplota změřená termokamerou nižší než na okolním povrchu.

7.2.2 Zhodnocení měření přerušovaného chodu motoru

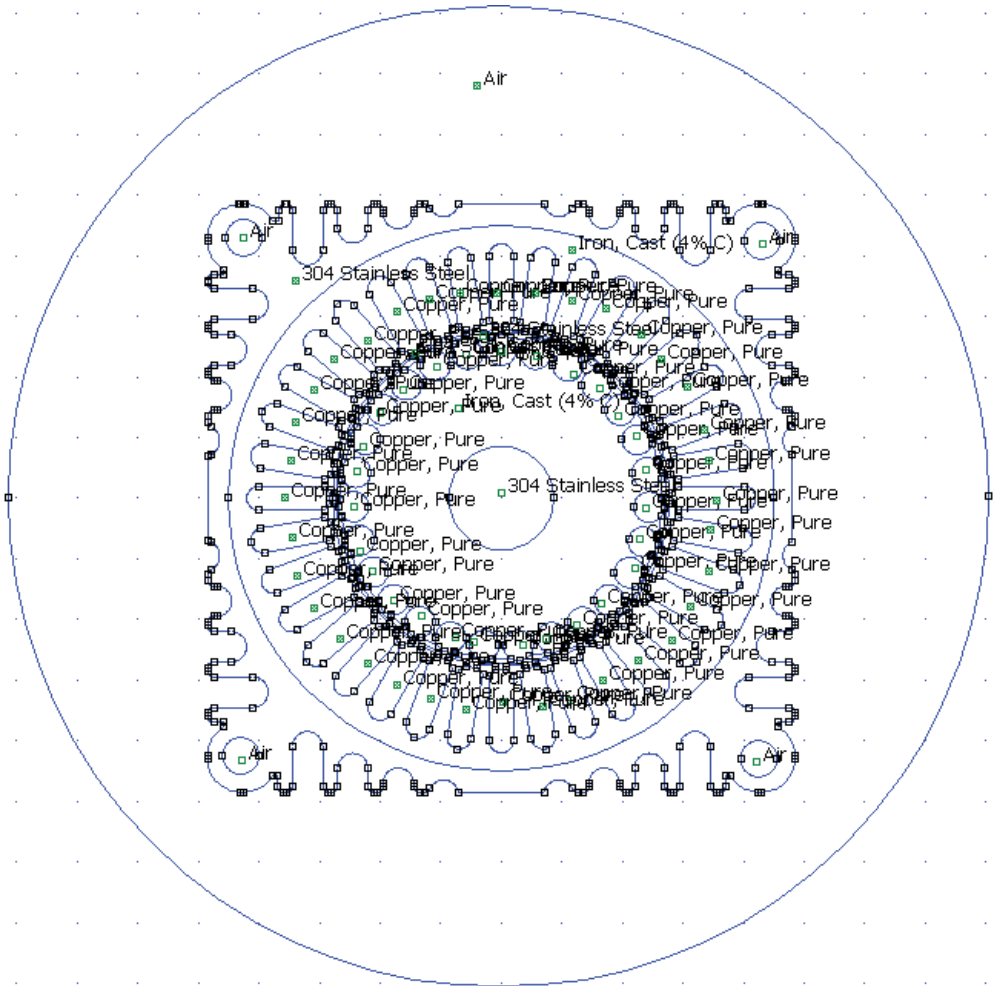
Nejvyšší hodnota byla změřena termočlánkem umístěným na žebrování motoru, nejnižší hodnota termočlánkem umístěným v žebrování motoru. Teplota měřená termočlánkem na okraji motoru po vypnutí dále stoupala po dobu dvou minut. Poté se začal povrch ochlazovat. Příčinou je postupné uvolňování tepla z vinutí na povrch motoru.

Na měření termokamerou mělo velký vliv uchycení termočlánků na povrch motoru. V místě uchycení je ztížený prostup tepla, a proto je tato oblast zobrazena jako chladnější než okolní povrch. Teploty povrchu motoru naměřené termokamerou se pohybují od 20 °C do 30 °C. Teploty naměřené termokamerou se od teplot naměřených termočlánky liší v rozmezí ±2 °C

8 VYPOČÍTANÉ HODNOTY

Do programu FEMM byl importován řez měřeným motorem. Do 2D modelu byly doplněny bloky pro určení materiálu dané části a materiály vybrané z materiálové knihovny. Pro tento model jsou použity tyto materiály: vzduch, čistá měď, nerezová ocel, litina.

V modelu jsou nastaveny dvě hranice, a to Statorové vinutí a Okolí. Hranici okolí tvoří dva oblouky okolo modelu motoru.



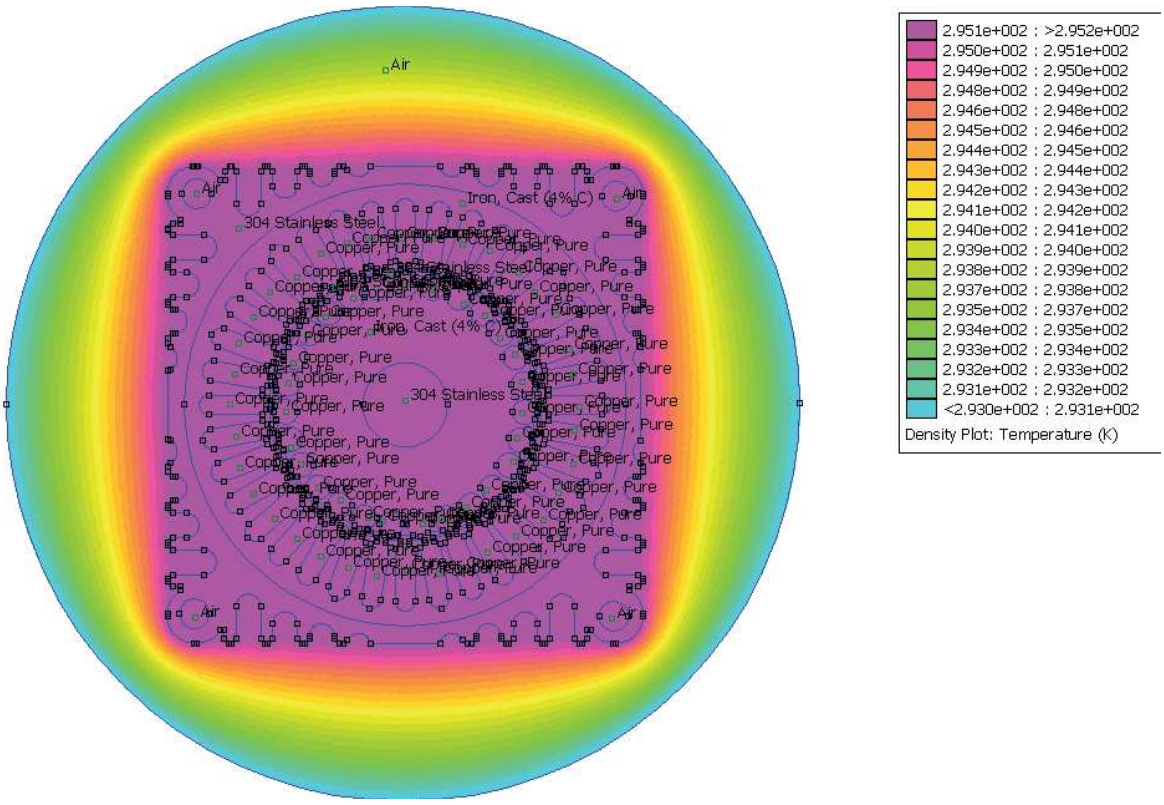
Obr. 8.1: *Model pro výpočet teplot na povrchu motoru*

8.1 Výpočet motoru bez zatížení

čas	Předpokládané teploty statorového vinutí
t[min]	t[°C]
0	22,05
6	26,76
12	31,67
26	41,36
32	46,15
46	55,60

***Tabulka 8.1**: Předpokládané hodnoty teploty statorového vinutí v daném čase [4]*

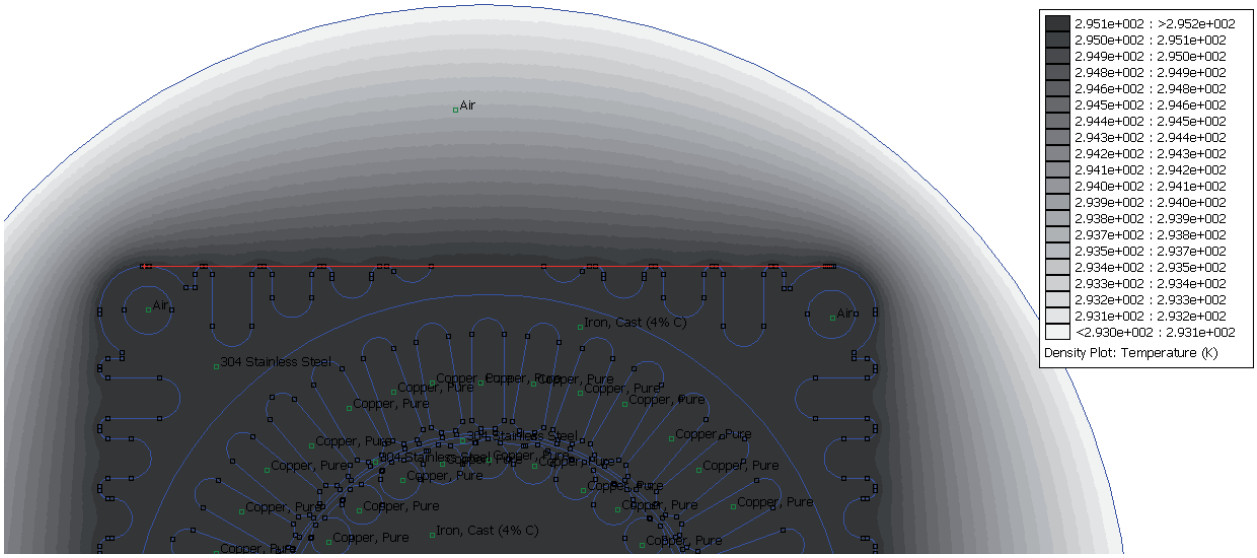
Pro analýzu byla vytvořena síť o 99 906 uzlech. Po spuštění analýzy je vytvořen soubor s grafickým vyjádřením výsledků.



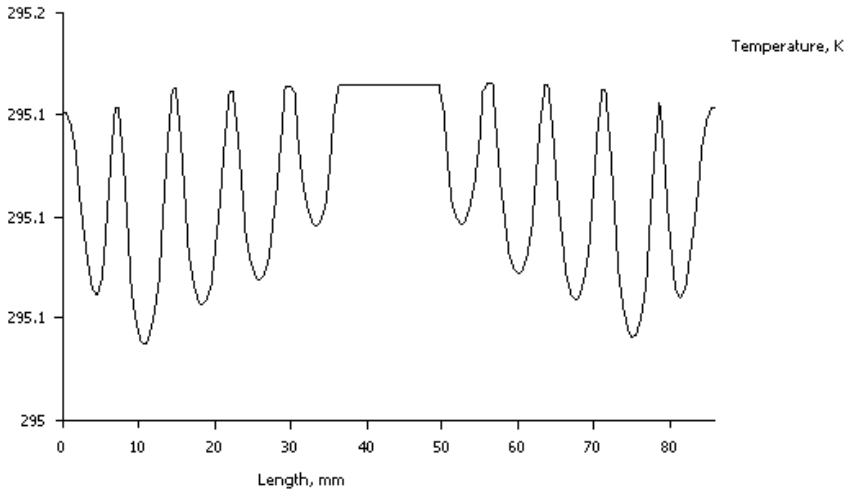
***Obr. 8.2:** Grafické zobrazení výsledků v čase měření t=0 min.*

V grafickém vyjádření je nejvyšší teplota 295 K reprezentována fialovou barvou. Nejnižší hodnota 293 K je reprezentována barvou modrou.

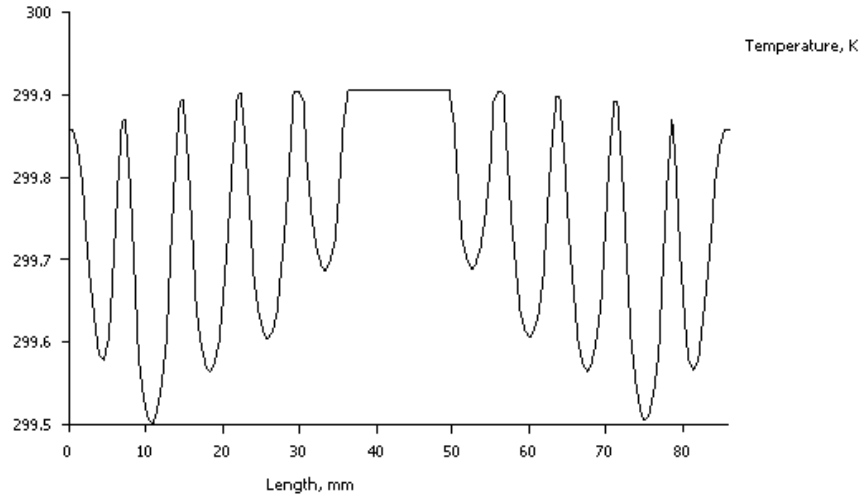
Pro lepší zobrazení teploty na povrchu modelu motoru je možné použít vyjádření ve stupních šedi. K vytvoření grafu teploty je nutné vybrat oblast (na obr. demonstrováno červenou čarou), která bude v grafu vyjádřena.



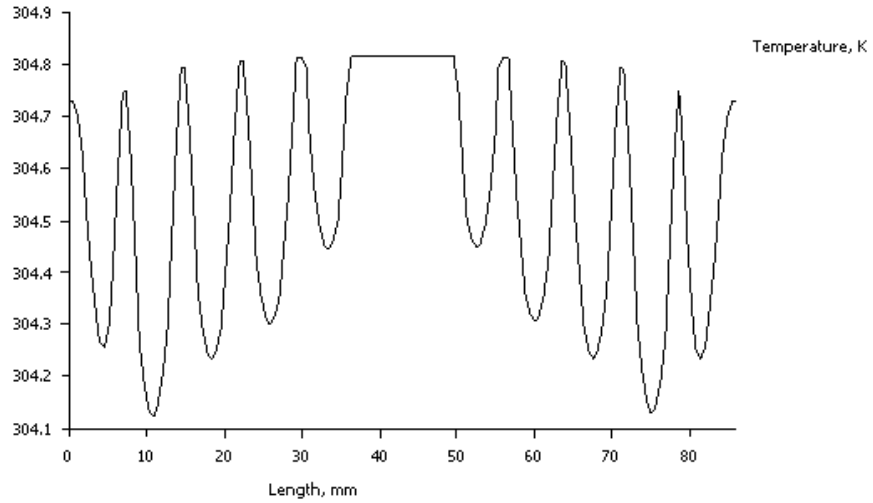
Obr. 8.3: *Zobrazení oblasti vyjádření grafu vypočítané teploty v režimu zobrazení teplot ve stupních šedi.*



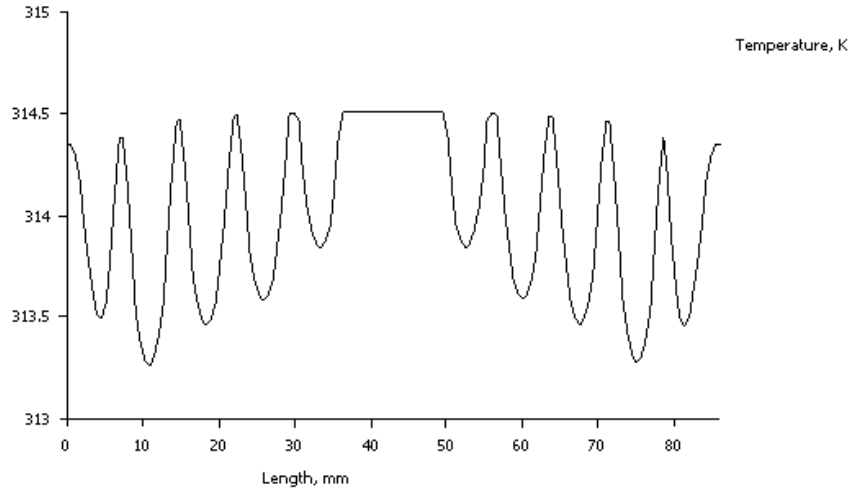
Obr. 8.4: *Graf pro teplotu na povrchu nezatíženého motoru v čase měření t=0 min*



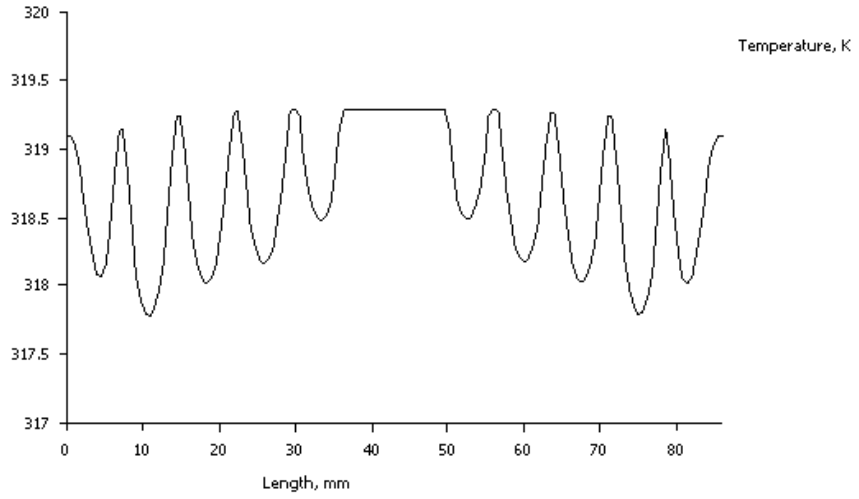
Obr. 8.5: *Graf pro teplotu na povrchu nezatíženého motoru v čase měření t=6 min*



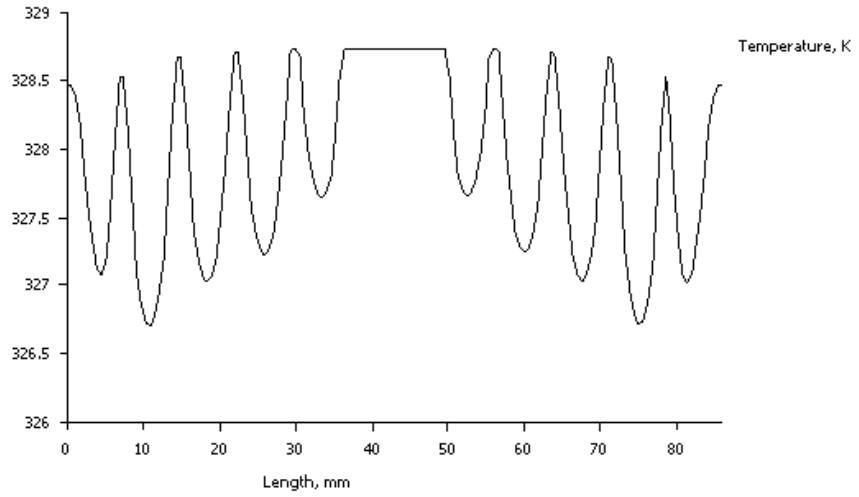
Obr. 8.6: *Graf pro teplotu na povrchu nezatíženého motoru v čase měření t=12 min*



Obr. 8.7: *Graf pro teplotu na povrchu nezatíženého motoru v čase měření t=26 min*



Obr. 8.8: *Graf pro teplotu na povrchu nezatíženého motoru v čase měření t=32 min*



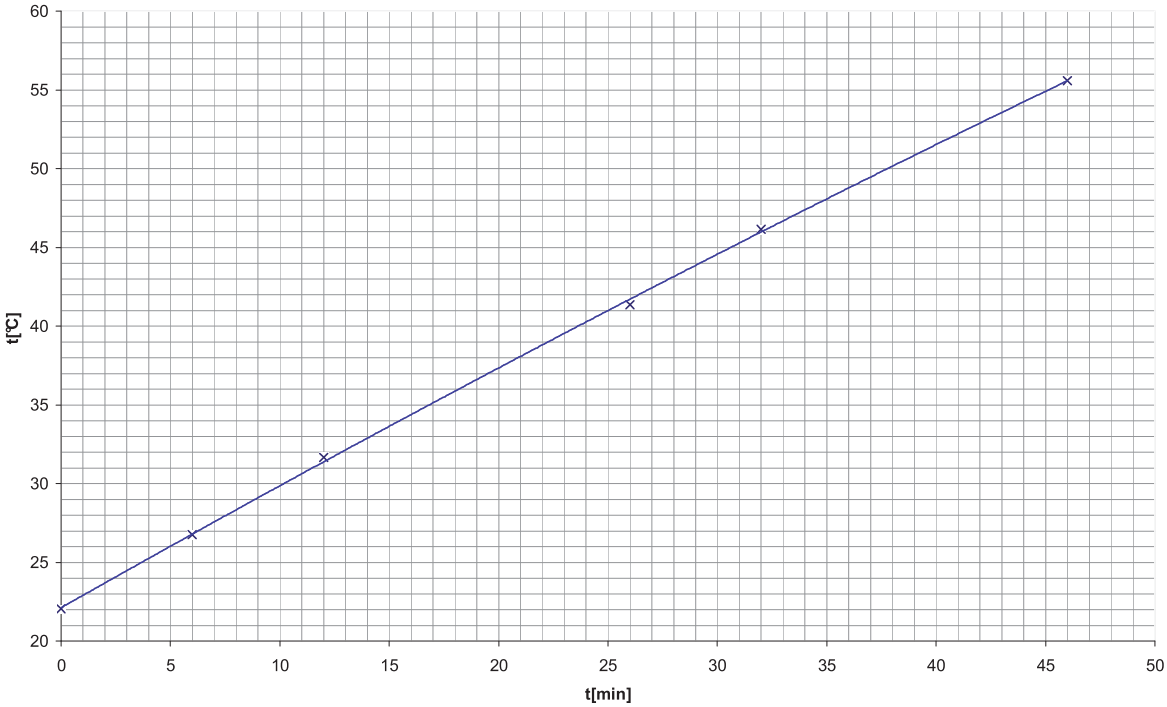
Obr. 8.9: *Graf pro teplotu na povrchu nezatíženého motoru v čase měření t=46 min*

Pro porovnání s naměřenými hodnotami přepočítáme termodynamickou teplotu na teplotu udanou ve stupních Celsia. Teplota je odečítána z grafu pro délku 40 mm. Tato délka odpovídá umístění termočlánku uprostřed, pyrometru a termistoru na povrchu motoru. Model neumožňuje porovnat hodnoty s termočlánkem umístěným na okraji motoru.

Pro přepočet použijeme vztah 1.1.

Příklad výpočtu:

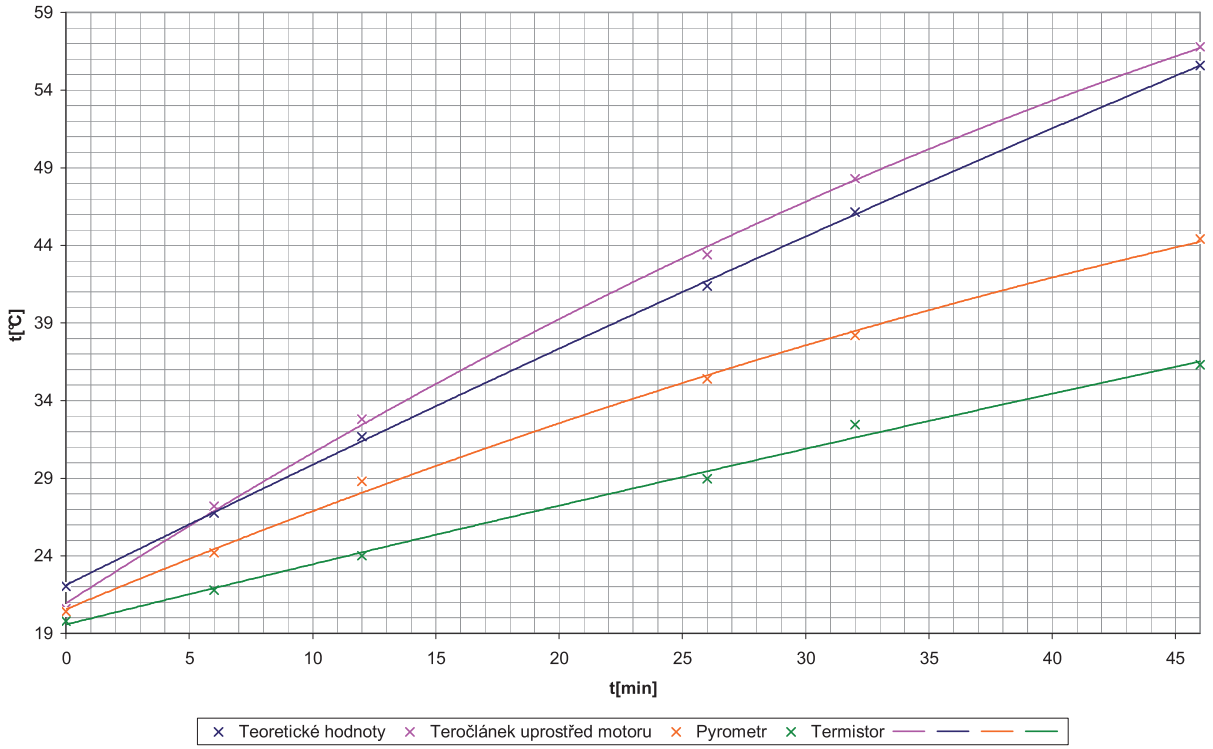
$$t = T - T_0 = 295{,}15 - 273{,}15 = 22°C$$



Obr. 8.10: *Průběh teoretických hodnot na povrchu motoru při chodu bez zatížení*

čas měření	termistor	termočlánek uprostřed	pyrometr	přepočtené hodnoty termistoru	teoretické hodnoty
t[min]	R[kΩ]	t[˚C]	t[˚C]	t[˚C]	t[˚C]
0	12,83	20,6	20,4	19,8	22
6	11,7	27,2	24,2	21,8	26,8
12	10,5	32,8	28,8	24	31,7
26	8,32	43,4	35,4	28,95	41,4
32	7,1	48,3	38,2	32,45	46,15
46	5,97	56,8	44,4	36,3	55,6

Tabulka 8.2*: Porovnání teoretických hodnot s naměřenými hodnotami*



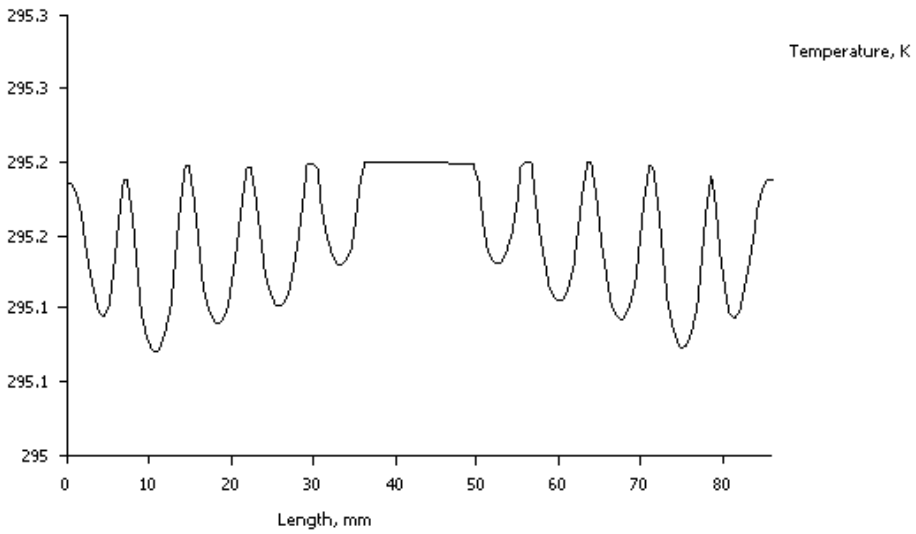
Obr. 8.11: *Porovnání teoretických hodnot s naměřenými hodnotami*

Naměřené hodnoty termočlánkem umístěným na povrchu uprostřed motoru odpovídají teoretickým hodnotám s odchylkou max. 2,15 °C. Měření pyrometrem je nepřesné, a proto se hodnoty jím naměřené od teoretických hodnot liší až o 11,2 °C. Z důvodu uvolnění termistoru od měřeného povrchu je rozdíl mezi teoretickými hodnotami a hodnotami naměřenými termistorem až 19,3 °C.

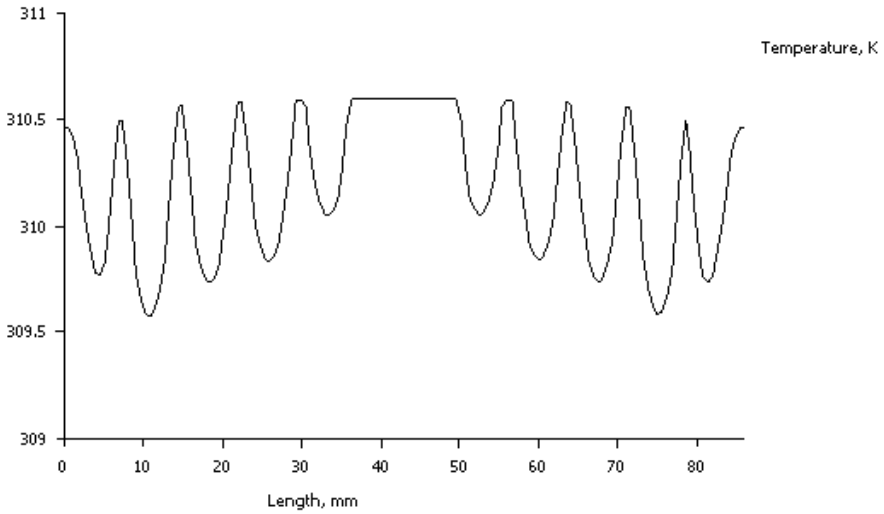
8.2 Výpočet přerušovaného chodu

čas	Předpokládané teploty statorového vinutí
t[min]	t[°C]
0	22,05
10	37,41
20	34,01
30	50,9
40	46,8
50	60,76
60	54,33

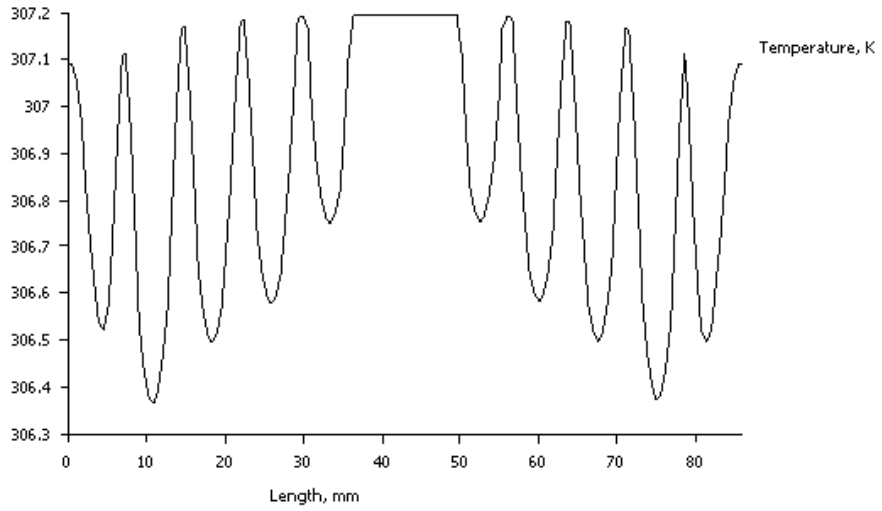
Tabulka 8.3: *Předpokládané hodnoty teploty statorového vinutí v daném čase[3]*



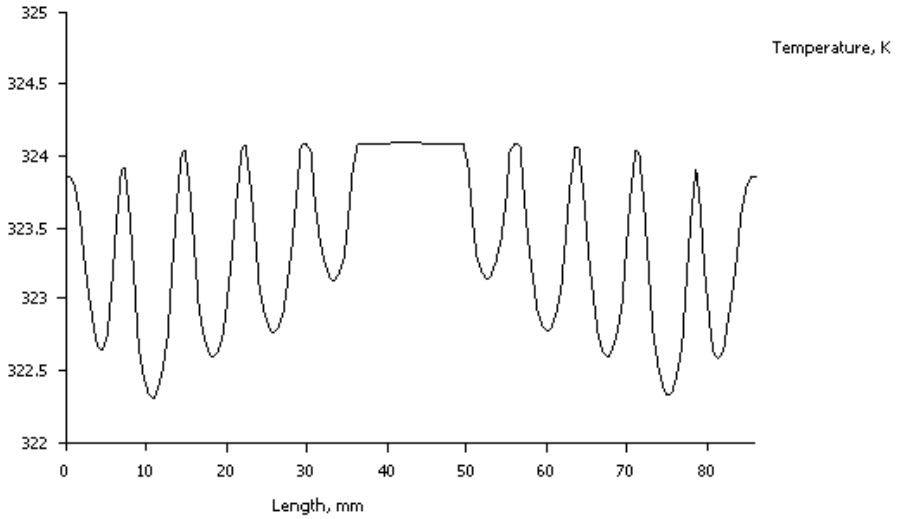
Obr. 8.12: *Teplota na povrchu motoru pracujícím v přerušovaném chodu v čase t=0 min*



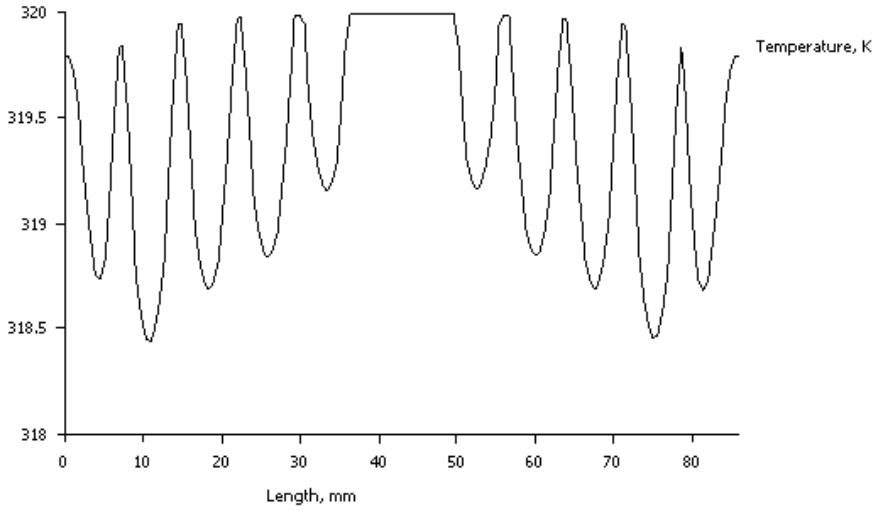
Obr. 8.13: *Teplota na povrchu motoru pracujícím v přerušovaném chodu v čase t=10 min*



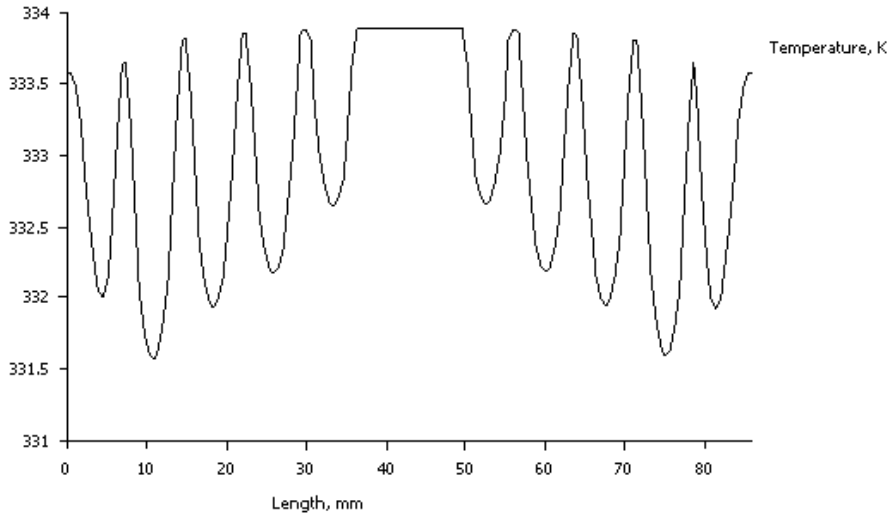
Obr. 8.14: *Teplota na povrchu motoru pracujícím v přerušovaném chodu v čase t=20 min*



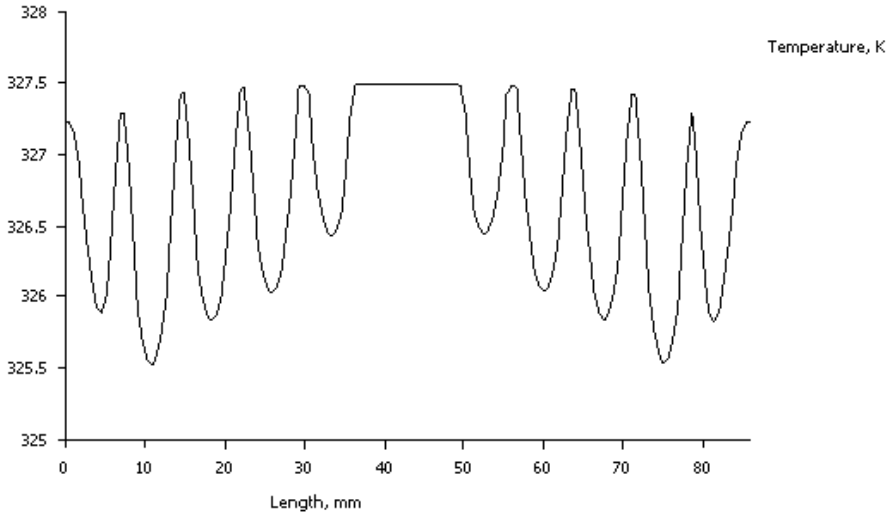
Obr. 8.15: *Teplota na povrchu motoru pracujícím v přerušovaném chodu v čase t=30 min*



Obr. 8.16: *Teplota na povrchu motoru pracujícím v přerušovaném chodu v čase t=40 min*

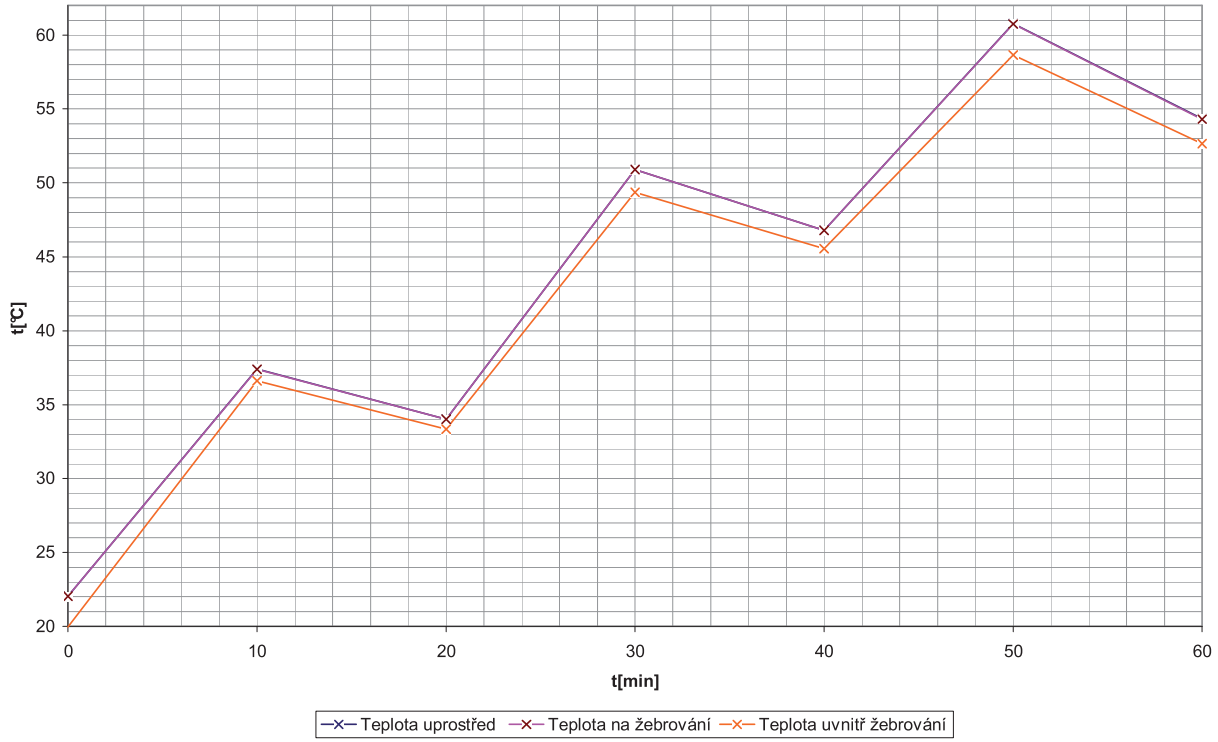


Obr. 8.17 *Teplota na povrchu motoru pracujícím v přerušovaném chodu v čase t=50 min*



Obr. 8.18: *Teplota na povrchu motoru pracujícím v přerušovaném chodu v čase t=60 min*

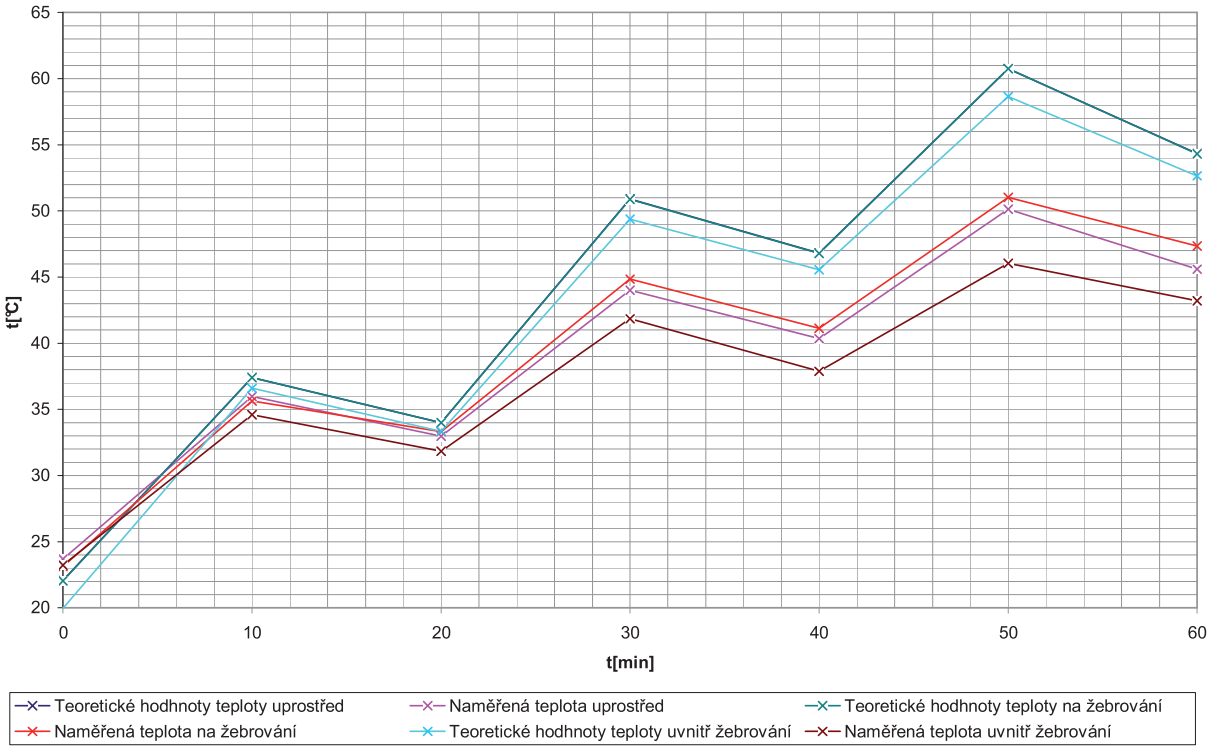
Teplota je odečítána z grafu v délce 40 mm pro termočlánek umístěný uprostřed motoru, v délce 23 mm pro termočlánek na žebrování a v délce 18 mm pro termočlánek uvnitř žebrování.



Obr. 8.19: *Průběh teoretických hodnot na povrchu motoru při přerušovaném chodu*

čas měření	Naměřené hodnoty				Teoretické hodnoty		
	termočlánek uprostřed	**termočlánek na okraji**	**termočlánek na žebrování**	**termočlánek uvnitř žebrování**	**teplota uprostřed**	**teplota na žebrování**	**teplota uvnitř žebrování**
[s]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
0	23,69	23,27	23,14	23,23	22,05	22,04	19,98
10	35,98	32,76	35,64	34,58	37,41	37,4	36,6
20	32,97	32,17	33,31	31,83	34,01	34	33,34
30	43,99	40,73	44,84	41,83	50,9	50,89	49,37
40	40,35	39,2	41,11	37,89	46,8	46,79	45,55
50	50,14	47,04	51,03	46,03	60,76	60,75	58,65
60	45,6	44,5	47,34	43,23	54,33	54,32	52,65

Tabulka 8.4: Porovnání teoretických hodnot s naměřenými hodnotami



Obr. 8.20: *Porovnání teoretických hodnot s naměřenými hodnotami*

Podle teoretických hodnot by měla být nejvyšší teplota uprostřed motoru, to je splněno pouze v čase t=0 min. V dalších časech měření byla naměřena nejvyšší hodnota termočlánkem na žebrování. Naměřené hodnoty jsou nižší než teoretické hodnoty. Pouze v čase t=0 min je to naopak. Nejvíce se hodnoty liší v 50 minutě měření. Uprostřed motoru je naměřená teplota o 10,62 °C nižší, na žebrování o 9,72 °C nižší a uvnitř žebrování o 12,62 °C nižší.

9 ZÁVĚR

Účelem bakalářské práce bylo stanovení a porovnání metod měření teploty v elektrických strojích. Tyto metody lze rozdělit na kontaktní měření, která jsou realizována termočlánky nebo odporovými čidly, mezi které patří termistory. Výhodou této metody je nízká cena čidel, avšak při měření pohyblivých částí nastává problém s jejich uchycením. Další metodou je bezkontaktní měření, které se provádí pyrometry a termokamerami. Výhodou této metody je skutečnost, že měřicí přístroj negativně neovlivňuje měřený objekt. Nevýhodou je, že termokamery a pyrometry jsou drahá zařízení a dále u nich nastává problém nastavení správné emisivity měřeného objektu. Pyrometry slouží spíše k orientačnímu měření teploty.

Prakticky byl proměřen asynchronní motor bez zatížení, a to termistorem, dvěmi termočlánky a pyrometrem. Dále bylo provedeno měření průběhu teplot asynchronního motoru v přerušovaném chodu čtyřmi termočlánky a termokamerou.

Při chodu bez zatížení u měření pomocí termistoru se projevila chyba spočívající v narušení kontaktu mezi termistorem a měřeným povrchem. Proto hodnoty naměřené termistorem neodpovídají hodnotám naměřeným termočlánkem, který byl umístěn v bezprostřední blízkosti termistoru. Teoretické hodnoty získané z programu FEMM mají největší odchylku od hodnot naměřených v čase měření t=46 min. Z výsledků měření vyplývá, že povrch u hřídele je lépe chlazen než povrch uprostřed motoru, a tedy jeho teplota je nižší.

Při přerušovaném chodu po vypnutí motoru docházelo u termočlánku umístěného na okraji motoru k nárůstu teploty. To bylo způsobeno postupným uvolňováním tepla z vinutí statoru. Teoretické hodnoty byly určeny z řezu motoru odpovídajícímu umístění termočlánků, tj. uprostřed motoru, na žebrování a uvnitř žebrování motoru. Podle teoretických hodnot měl dosahovat největšího oteplení prostředek motoru, to bylo splněno pouze do času měření t=10min. Největší odchylka měřených hodnot od teoretických nastává v čase měření t=50min.

LITERATURA

[1] BARTOŠ, V. a kol. *Elektrické stroje*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská universita, 2006. 139 s. ISBN 80-7043-444-9.

[2] BAŠTA, J.; CHLÁDEK, J.; MAYER, I. *Teorie elektrických strojů*. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1968. 582 s.

[3] CHLUP, J. *Simulování modelů teplotních polí v elektrických strojích*. Bakalářská práce, Brno, 2008. Vysoké učení technické v Brně.

[4] DEEB, R. et al. *Thermal transient analysis of an Electric Machine Using ANSYS Worbench. In Low Voltage Electrical Machines.* 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2010. 10-12 s. ISBN 978-80-214-4178-1.

[5] *Finite element method* [online]. Wikipedia [cit. 2011-04-09] Dostupný z WWW: < http://en.wikipedia.org/wiki/Finite_element_method>.

[6] JANDA M.; KUCHYŇKOVÁ, H. *Teplotní měření v elektrických strojích* [online]. Elektrorevue 2007 [cit. 2010-10-09] Dostupný z WWW: < http://www.elektrorevue.cz/cz/clanky/energetika--vykonova-elektronika--elektrotechnologie/0/teplotni-mereni-v-elektrickych-strojich/>.

[7] Katalogový list [online]. Gme [cit. 2010-12-06] Dostupný z WWW: <http://www.gme.cz/_dokumentace/dokumenty/988/988-001/kgm.988- 001.1.pdf>.

[8] KEPPERT, S. *Projektování elektrických strojů*. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská, 1990. 188 s. ISBN 80-7078-010-X.

[9] KHEILOVÁ, M. *Termodynamika*, Brno: Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologii, 2003. 66 s.

[10] KOLÁČNÝ, J. *Elektrické pohony*. Brno: Fakulta elektrotechniky a komunikačních Technologii, 2006. 127 s.

[11] KREIDL, M. *Měření teploty, senzory a měřící obvody*. 1. vyd. Praha: BEN, 2005. 239 s. ISBN 80-7300-145-4.

[12] MEEKER, D. *Finite element method magnetics*, user´s manual. 2010.

[13] MĚŘIČKA, J; HAMATA, V; VOŽENÍLEK, P. *Elektrické stroje.* Praha: Vydavatelství ČVUT, 1994. 79 s. ISBN 80-01-01020-1.

[14] NTC Disc Termistor [online]. Katalogový list Electronics123 [cit. 2010-11-01] Dostupný z WWW: <http://www.electronics123.com/s.nl/it.A/id.569/.f>.

[15] PAVELKA, J. *Elektrické pohony*. 1. vyd. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2007. 222 s. ISBN 978-80-01-03588-7.

PŘÍLOHY

°C	100R	220R	470R	1k	2k2	4k7	10k	22k	47k
-50	3,1129k	6,8484k	17,221k	49,906k	120,86k	289,76k	844,39k	1,3698M	3,4642M
-45	2,3273k	5,1201k	12,775k	36,015k	86,915k	205,52k	592,43k	986,79k	2,4779M
-40	1,7592k	3,8702k	9,5739k	26,296k	63,188k	147,56k	419,38k	717,18k	1,7854M
-35	1,3438k	2,9564k	7,2455k	19,411k	46,418k	107,17k	299,47k	525,65k	1,2955M
-30	1,0366k	2,2805k	5,5343k	14,479k	34,434k	78,687k	215,67k	388,39k	946,67k
-25	810,05	1,7821k	4,2628k	10,903k	25,773k	58,125k	156,41k	288,16k	695,65k
-20	638,56	1,4048k	3,3134k	8,2923k	19,479k	43,406k	114,66k	215,73k	515,87k
-15	503,64	1,1080k	2,5938k	6,3591k	14,835k	32,937k	84,510k	163,39k	384,20k
-10	400,67	881,47	2,0472k	4,9204k	11,399k	25,217k	62,927k	124,69k	288,61k
-5	322,17	708,77	1,6266k	3,8279k	8,8218k	19,392k	47,077k	95,069k	217,76k
0	260,97	574,13	1,3021k	3,0029k	6,8823k	15,040k	35,563k	73,058k	165,64k
5	212,60	467,72	1,0487	2,3773k	5,4052k	11,743k	27,119k	56,852k	126,88k
10	174,39	383,66	850,61	1,8959k	4,2764k	9,2411k	20,860k	44,524k	97,906k
15	144,15	317,13	693,81	1,5207k	3,4045k	7,3301k	16,204k	34,888k	76,088k
20	119,87	263,71	569,45	1,2280k	2,7287k	5,8548k	12,683k	27,515k	59,530k
25	100,00	220,00	470,00	1,0000k	2,2000k	4,7000k	10,000k	22,000k	47,000k
30	84,185	185,21	390,02	817,79	1,7843k	3,7767k	7,9420k	17,521k	36,825k
35	71,080	156,38	325,33	673,41	1,4552k	3,0713k	6,3268k	14,092k	29,315k
40	60,317	132,70	272,80	557,47	1,1936k	2,5124k	5,0740k	11,390k	23,470k
45	51,419	113,12	229,83	463,57	983,99	2,0664k	4,1026k	9,2308k	18,902k
50	44,037	96,881	194,56	387,40	815,47	1,7088k	3,3363k	7,5178k	15,302k
55	37,824	83,213	165,43	323,68	679,03	1,4186k	2,7243k	6,1329k	12,409k
60	32,636	71,799	141,28	272,00	568,15	1,1839k	2,2370k	5,0294k	10,118k
65	28,333	62,333	121,17	230,41	477,55	993,39	1,8459k	4,1518k	8,3157k
70	24,697	54,333	104,33	196,04	403,11	837,49	1,5305k	3,4419k	6,8552k
75	21,573	47,461	90,188	167,35	341,77	709,18	1,2755k	2,8626k	5,6856k
80	18,908	41,598	78,246	143,42	290,91	603,15	1,0677k	2,3899k	4,7249k
85	16,649	36,628	68,141	123,47	248,64	514,56	899,28	2,0045k	3,9368k
90	14,709	32,360	59,544	106,68	213,29	440,62	760,68	1,6874k	3,2918k
95	13,021	28,646	52,212	92,734	183,67	379,59	645,24	1,4271k	2,7700k
100	11,560	25,432	45,927	80,903	158,71	328,26	549,41	1,2110k	2,3395k
105	10,301	22,662	40,530	70,616	137,63	284,14	470,03	1,0295k	1,9809k
110	9,2038	20,248	35,873	61,826	119,74	246,74	403,58	877,89	1,6827k
115	8,2442	18,137	31,847	54,282	104,52	214,98	347,43	753,61	1,4337k
120	7,4035	16,288	28,350	47,793	91,507	187,87	300,07	648,96	1,2251k
125	6,6701	14,674	25,310	42,249	80,370	164,42	260,01	559,86	1,0496k
130	-	-	-	-	-	-	226,09	-	901,74
135	-	-	-	-	-	-	197,20	-	776,21

***Tabulka P.1**: Tabulka termistoru pro přepočet odporu na teplotu[7]*

Termistoru K164N-10K odpovídají hodnoty ve zvýrazněném sloupci.

Obr. P.1: *Charakteristika termistoru pro odečtení teploty termistoru*