

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

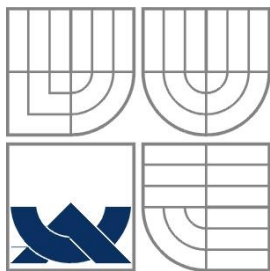
VYUŽITÍ TERMOVIZNÍ KAMERY PRO MĚŘENÍ TEPLOTY ELEKTRICKÝCH STROJŮ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

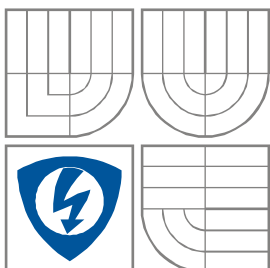
Tomáš Halfar

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

VYUŽITÍ TERMOVIZNÍ KAMERY PRO MĚŘENÍ TEPLOTY ELEKTRICKÝCH STROJŮ

**THE APPLICATION OF INFRARED CAMERA FOR MEASURING THE TEMPERATURE OF
ELECTRICAL MACHINES**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

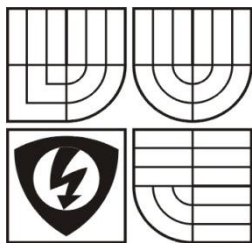
Tomáš Halfar

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Dr. Ing. Hana Kuchyňková

BRNO, 2011



**VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ**
**Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor

Silnoprúdová elektrotechnika a výkonová elektronika

Student: Halfar Tomáš

Ročník: 3

ID: 115174

Akademický rok: 2010/2011

NÁZEV TÉMATU:

Využití termovizní kamery pro měření teploty elektrických strojů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Popište možnosti bezdotykového měření teploty.
2. Zhodnoťte možnosti využití termovizní kamery SAT-HY6800 a vytvořte manuál k programu SAT Report
3. Proveďte měření teploty stejnosměrného stroje s různými kryty termovizní kamerou a měření vyhodnoťte.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Dle pokynů vyučujícího

Termín zadání: 23.9.2010

Termín odevzdání: 26.5.2011

Vedoucí projektu: doc. Dr. Ing. Hana Kuchyňková

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

Bakalářská práce *Využití termovizní kamery pro měření teploty elektrických strojů* seznamuje s problematikou tepla, jeho vznikem, šířením. V této práci jsou uvedeny možnosti měření teploty. Jsou zde uvedeny především metody bezdotykového měření teploty. Hlavní důraz je kladen na problematiku měření s termovizní kamerou SAT HY6800. Práce obsahuje seznámení se základními funkcemi termovizní kamery a návod k obsluze kamery. V souvislosti s termovizní kamerou je připraven krátký návod pro práci v programu SAT Report. Praktickou částí bakalářské práce je měření tří stejnosměrných motorů firmy ATAS Elektromotory Náchod s různými kryty komutátoru a porovnání jejich oteplení.

Abstract

Bachelor's thesis *The Application of Infrared Camera for measuring the temperature of Electrical Machines* acquaints with issues of heat, its creation and transmission. This work includes options of measuring of the temperature. There are given methods of contactless measuring of the temperature especially in this work. Main accent is given to problematic of measuring of the temperature with infrared camera SAT HY6800. The work includes introduction with basic functions of infrared camera and operation manual of the camera. It was created manual for utilization of program SAT report in relation to infrared cameras. In the practical part of bachelor's thesis is measuring the temperature of three DC motors from company ATAS Elektromotory Náchod with different covers and comparing of their warming.

Klíčová slova

Bezdotykové měření teploty; bodová analýza; elektromagnetické záření; emisivita; HY-6800; IGES; izotermická analýza; komutace; oteplovací charakteristika motoru; plošná analýza; profilová analýza; pyrometry; SAT Report; stejnosměrné stroje; teplota; teplotní senzory; teplotní stupnice; termografie; termovizní kamera.

Keywords

Area analysis; commutation; contactless measuring of temperature; DC machines; electromagnetic radiation; emissivity; HY-6800; isothermal analysis; infrared camera; point analysis; profile analysis; pyrometers; SAT Report; temperature; temperature scales; thermal sensors; thermographs; warming characteristic of motor.

Bibliografická citace

HALFAR, T. *Využití termovizní kamery pro měření teploty elektrických strojů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 58 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Dr. Ing. Hana Kuchyňková.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Využití termovizní kamery v oblasti elektrických strojů 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 doc. Dr. Ing. Haně Kuchyňkové za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne

Podpis autora

OBSAH

1 ÚVOD.....	12
2 TEPLOTA	12
3 MĚŘENÍ TEPLOTY	13
4 BEZKONTAKTNÍ MĚŘENÍ TEPLOTY	13
4.1 Úvod	13
4.1.1 VÝHODY BEZKONTAKTNÍHO MĚŘENÍ TEPLOTY	15
4.1.2 NEVÝHODY BEZKONTAKTNÍHO MĚŘENÍ TEPLOTY	15
4.2 URČOVÁNÍ EMISIVITY MĚŘENÉHO OBJEKTU	16
4.3 TEPLOTNÍ SENZORY	17
4.4 KVANTOVÉ DETEKTORY	17
4.4.1 INTRINSICKÉ DETEKTORY	17
4.4.2 EXTRINSICKÉ DETEKTORY	17
4.4.3 QWIP DETEKTORY	17
4.5 TEPELNÉ DETEKTORY.....	17
4.5.1 THERMOPILE DETEKTORY	18
4.5.2 PYROELEKTRICKÉ DETEKTORY	18
4.5.3 BOLOMETRICKÉ DETEKTORY	19
4.5.4 MIKROBOLOMETRICKÉ DETEKTORY	19
4.6 PYROMETRY	20
4.6.1 MONOCHROMATICKÉ PYROMETRY	20
4.6.2 ÚHRNNÉ PYROMETRY	20
4.6.3 PÁSMOVÉ (VÍCEPÁSMOVÉ) PYROMETRY	20
4.6.4 POMĚROVÉ PYROMETRY	20
4.6.5 PYROMETRY AUTOMATICKOU KOREKČÍ EMISIVITY	20
4.7 TERMOGRAFIE	21
4.7.1 KAMERY S OPTICKO-MECHANICKÝM ROZKLADEM OBRAZU	21
4.7.2 KAMERY S MATICOVÝM DETEKTOREM	21
4.7.3 SLOŽENÍ TERMOVIZNÍ KAMERY.....	22
4.7.4 TERMOGRAM.....	22
5 TERMOVIZNÍ KAMERA SAT SH-67 / HY-6800.....	23
5.1 Úvod	23
5.1.1 PŘÍSLUŠENSTVÍ	23
5.1.2 POPIS ČÁSTÍ TERMOVIZNÍ KAMERY	24
5.1.3 FUNKCE TLAČÍTEK OVLÁDACÍHO PANELU	25
5.2 MOŽNOSTI TERMOKAMERY SH-68 / HY-6800	25
5.2.1 BODOVÁ ANALÝZA	25
5.2.2 PLOŠNÁ ANALÝZA.....	25
5.2.3 PROFILOVÁ ANALÝZA	26
5.2.4 IZOTERMICKÁ ANALÝZA	26
6 PROGRAM SAT REPORT.....	26

6.1 IMPORT SNÍMKŮ	26
6.2 MOŽNOSTI ANALÝZ SNÍMKŮ	26
6.2.1 LINEÁRNÍ ANALÝZA	27
6.2.2 BODOVÁ ANALÝZA	27
6.2.3 PLOŠNÁ ANALÝZA.....	28
6.2.4 IZOTERMÁLNÍ ANALÝZA	29
7 STEJNOSMĚRNÉ STROJE	29
7.1 KONSTRUKCE	29
7.2 PRINCIP FUNKCE	30
7.3 VINUTÍ STEJNOSMĚRNÝCH STROJŮ	31
7.4 INDUKOVANÉ NAPĚTÍ A MOMENT STEJNOSMĚRNÉHO STROJE	32
7.5 REAKCE KOTVY.....	34
8 MĚŘENÍ STEJNOSMĚRNÝCH MOTORŮ ATAS	35
8.1 METODA MĚŘENÍ	36
8.2 VYHODNOCENÍ TERMOSNÍMKŮ V PROGRAMU SAT REPORT	37
8.3 POROVNÁNÍ NAMĚŘENÝCH HODNOT TERMOČLÁNKEM A TERMOKAMEROU.....	38
8.4 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ	39
9 ZÁVĚR	44
LITERATURA	45

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1 Znázornění Planckova vyzařovacího zákona v energetickém tvaru [1]</i>	14
<i>Obr. 2 Znázornění zaměření měřené plochy bezdotykovým měřicím přístrojem [1]</i>	16
<i>Obr. 3 Thermopile detektor [10]</i>	18
<i>Obr. 4 Princip pyrometrického detektoru [10]</i>	18
<i>Obr. 5 Bolometrický detektor [11]</i>	19
<i>Obr. 6 Mikrobolometrický detektor [11]</i>	19
<i>Obr. 7 Schéma termovizního systému [11]</i>	22
<i>Obr. 8 Příklad termografů a) paleta zobrazení železa [4] b) paleta zobrazení stupně šedi [6]</i>	22
<i>Obr. 9 Termovizní kamera SAT SH-67 / HY-6800</i>	23
<i>Obr. 10 Příslušenství termovizní kamery SH-67 / HY-6800</i>	24
<i>Obr. 11 Části termovizní kamery</i>	24
<i>Obr. 12 Lineární analýza v SAT Report</i>	27
<i>Obr. 13 Bodová analýza v SAT Report</i>	28
<i>Obr. 14 Plošná analýza v SAT Report</i>	28
<i>Obr. 15 Izotermická analýza v SAT Report</i>	29
<i>Obr. 16 Složení stejnosměrného motoru s permanentními magnety [12]</i>	30
<i>Obr. 17 Vznik síly stejnosměrného motoru a následně jeho otáčení [12]</i>	30
<i>Obr. 18 Průběh komutovaného napětí dynama [13]</i>	31
<i>Obr. 19 Druhy zapojení vinutí kotvy a) smyčkové nekřížené, b) smyčkové křížené, c) vlnové</i>	31
<i>Obr. 20 Průběh indukovaného napětí v kotvě [14]</i>	33
<i>Obr. 21 Působení síly na vodiče kotvy stejnosměrného motoru [14]</i>	34
<i>Obr. 22 Vliv reakce kotvy na magnetické pole statoru [14]</i>	35
<i>Obr. 23 Umístění tlumivky v krytu komutátoru</i>	36
<i>Obr. 24 Rozmístění měřicích bodů na statoru motoru na vzorku 3</i>	36
<i>Obr. 25 Pohled termokamery na motor 3</i>	37
<i>Obr. 26 Příklad nastavení parametrů motoru 1</i>	38

SEZNAM GRAFŮ

<i>Graf 1 Naměřené průběhy oteplení motoru 1</i>	<i>40</i>
<i>Graf 2 Relativní chyba teplotního čidla pro motor 1</i>	<i>40</i>
<i>Graf 3 Naměřené průběhy oteplení motoru 2</i>	<i>41</i>
<i>Graf 4 Relativní chyba teplotního čidla pro motor 2</i>	<i>41</i>
<i>Graf 5 Naměřené hodnoty oteplení pro motor 3</i>	<i>42</i>
<i>Graf 6 Relativní chyba teplotního čidla pro motor 3</i>	<i>42</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1 Přehled teplotních stupnic a převody mezi nimi</i>	<i>12</i>
--	-----------

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Q	teplo
T	Kelvinova (termodynamická) teplota, Rankinova teplota
t, ϑ	Celsiova teplota
t	Fahrenheitova teplota
H	intenzita vyzařování
H_0	intenzita vyzařování dokonale černého tělesa
h	redukována Planckova konstanta
c	rychlost světla
k	Boltzmannova konstanta
σ	Stefan-Boltzmannova konstanta
ε	emisivita tělesa
θ	úhel dopadu zářivého toku
ω	frekvence intenzity záření
u	indukované napětí
B	magnetická indukce
v	rychlost
τ_p	pólová rozteč
y_k	krok komutátoru
n	otáčky
$2p$	počet pólů
k	konstanta stroje
M	zatěžovací moment
RH	relativní vlhkost prostředí

1 ÚVOD

Měření teploty elektrických strojů je velmi důležitou složkou zjišťování technického stavu a správné funkce zařízení. Zjištění místa s nadměrným oteplením usnadňuje určení případné poruchy nebo špatně navrženého konstrukčního prvku.

První část této práce se zabývá teoretickým rozbořem tepla, jeho vznikem, šířením a měřením. Další část je věnována bezkontaktnímu měření. Jsou zde rozebrány metody používané nejen v elektrotechnickém odvětví průmyslu. Zvláštní důraz je kladen na měření termovizními kamerami. Následující oddíl je věnován termovizní kameře SAT SH-67/HY-6800, práci s touto kamerou a následné analýze pořízených termovizních snímků v programu SAT Report.

Další oddíl práce se zabývá seznámením s principy funkce stejnosměrného stroje. Na tuto kapitulu poté navazuje praktická část práce, a to měření tří vybraných stejnosměrných motorů firmy ATAS s různými kryty komutátoru a ventilátory.

2 TEPLOTA

Teplota je stavová veličina. Určuje stav hmoty. Ovlivňuje většinu vlastností látek. Teplotu nelze měřit přímo, ale jen pouze pomocí jiných fyzikálních veličin (např. pomocí termočlánku přeměnou tepla na měřitelné elektrické veličiny). V přírodních a technických vědách je teplota definována jako skalární intenzivní veličina, která je vzhledem ke svému pravděpodobnostnímu charakteru vhodná k popisu stavu ustálených makroskopických systémů. Teplota souvisí s kinetickou energií částic látky.

Pro měření teplot se používá mnoho teplotních stupnic, z nichž nejrozšířenější jsou Celsiova a Kelvinova (termodynamická teplota T s jednotkou kelvin K patří mezi základní jednotky SI). Některé další stupnice a převody mezi nimi jsou uvedeny v tabulce. [1][10]

do/z	Kelvinova $T[K]$	Celsiova $t[^\circ C]$	Fahrenheitova $t[^\circ F]$	Rankinova $T[^\circ Ra]$
Kelvinova $T[K]$	/	$t[^\circ C] + 273,15$	$(t[^\circ F] + 459,67) \cdot 5/9$	$T[^\circ Ra] \cdot 5/9$
Celsiova $t[^\circ C]$	$T[K] - 273,15$	/	$(t[^\circ F] - 32) \cdot 5/9$	$T[^\circ Ra] \cdot 5/9 - 273,15$
Fahrenheitova $t[^\circ F]$	$T[K] \cdot 1,8 - 459,67$	$t[^\circ C] \cdot 1,8 + 32$	/	$T[^\circ Ra] - 459,67$
Rankinova $T[^\circ Ra]$	$T[K] \cdot 1,8$	$t[^\circ C] \cdot 1,8 + 491,67$	$t[^\circ F] + 459,67$	/

Tab. 1 Přehled teplotních stupnic a převody mezi nimi

3 MĚŘENÍ TEPLOTY

Teplotu nelze měřit přímo, ale je možné ji určit podle změny jiné veličiny, na kterou má změna teploty vliv. Teplota se měří pomocí řady snímačů. U všech snímačů se odvozuje teplota z citlivosti na změnu určité fyzikální veličiny. Mezi tyto snímače patří: termočláanky, odporové teploměry a termistory, bimetalové teploměry, snímače s roztažitelnými kapalinami, snímače se změnou stavu a infračervené teploměry.

- **Termočláankové snímače teploty** – Termočláanky se skládají z dvou kovových pásků (vodičů) z různých kovů, spojených v jednom bodě. Změna teploty v tomto bodu způsobí změnu termoelektrické síly mezi konci těchto vodičů.
- **Snímače teploty se změnou odporu** – Využívají změnu elektrického odporu se změnou teploty. Používají se dva typy. Odporové teploměry (odpor s teplotou lineárně roste) a polovodičové (termistorové) teploměry (odpor s rostoucí teplotou nelineárně klesá).
- **Bimetalové měřicí přístroje** – Využívají různé tepelné roztažnosti různých materiálů. Pásky dvou kovů o různé tepelné roztažnosti jsou spojeny k sobě. Vlivem změny teploty se každý z nich roztahuje jinak a pásek se ohýbá. Tento pohyb je potom přes mechanický převod převeden na výchylku ručičky přístroje.
- **Teploměry s roztažitelnými kapalinami** – Mezi tyto přístroje patří například rtuťový, lihový nebo i různé teploměry s plynovou náplní. Tyto přístroje využívají teplotní roztažnosti kapalin (plynů) v baňce se stupnicí a umožňují rychlé odečtení teploty.
- **Teploměry se změnou stavu** – Do této skupiny patří indikační štítky z tekutých krystalů, nálepky apod., u kterých se změna teploty projeví změnou barvy. Jsou používány především jako indikace vysoké teploty.
- **Infračervené snímače** – Jsou to přístroje pro bezdotykové měření teploty, využívající pro měření teploty elektromagnetické vlnění, které zahřátý předmět emituje. [1][2][10]

4 BEZKONTAKTNÍ MĚŘENÍ TEPLOTY

4.1 Úvod

Bezkontaktní měření teploty je jednoduchý, rychlý a přesný způsob zjišťování teploty měřených těles. Ke správnému určení teploty měřeného tělesa je nutné znát základní fyzikální zákony a zásady měření.

Metody bezdotykového měření teploty vychází z poznatku, že každé těleso o povrchové teplotě vyšší než je absolutní nula ($0\text{K} = -273,15^\circ\text{C}$) vysílá elektromagnetické záření (sálání) o vlnové délce odpovídající jeho teplotě. Tento poznatek vychází z Planckova vyzařovacího zákona:

$$dI = \frac{h}{\pi^2 c^2} \frac{\omega^3}{e^{\frac{h\omega}{kT}} - 1} d\omega,$$

kde:

ω je úhlová frekvence záření,

I je intenzita záření,

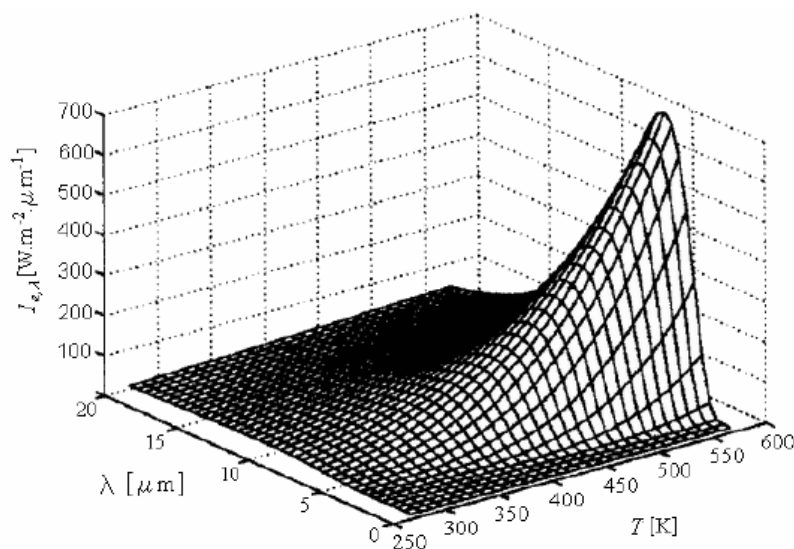
T je teplota absolutně černého tělesa,

h je redukovaná Planckova konstanta ($h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$),

c je rychlost světla ($c = 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}$) ve vakuu a

k je Boltzmannova konstanta ($k = 1,381 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$).

Intenzitu záření I o frekvenci ω je třeba chápat tak, že spektrum vlnových délek je rozděleno na nekonečně malé a stejně velké intervaly frekvencí a intenzita záření I o frekvenci ω pak znamená intenzitu záření o frekvencích z intervalu, který obsahuje frekvenci ω .



Obr. 1 Znáznornění Planckova vyzařovacího zákona v energetickém tvaru [1]

Bezkontaktní měření využívá elektromagnetické spektrum v rozmezí vlnových délek $0,4\mu\text{m}$ až 1mm , viditelné spektrum $0,38\mu\text{m}$ – $0,78\mu\text{m}$ a infračervené spektrum (nebo také tepelné záření) $0,78\mu\text{m}$ – 1mm .

Dalším základním zákonem pro bezdotyková měření je Stefan-Boltzmannův zákon. Stefan-Boltzmannův zákon vyjadřuje celkovou vyzařovanou energii za jednotku času z jednotkové plochy tělesa. Hustota zářivého toku je ve všech vlnových délkách úměrná čtvrté mocnině absolutní teploty tělesa.

$$H_0 = \sigma \cdot T^4,$$

kde:

$H_0 [\text{W m}^{-2}]$ je intenzita vyzařování dokonale černého tělesa,

σ je Stefan-Boltzmannova konstanta $\sigma = 5,670400 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$,

$T [\text{K}]$ je termodynamická teplota.

Reálné těleso není dokonale černé. Pro určení intenzity vyzařování reálného tělesa je do vztahu nutno doplnit emisivitu tělesa ε . Výsledný vztah potom vypadá takto:

$$H = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4$$

Emisivita tělesa je definována jako poměr intenzity vyzařování reálného tělesa a intenzity vyzařování dokonale černého tělesa a může nabývat hodnot v rozsahu od 0 do 1, kdy hodnotu emisivity 1 má dokonale černé těleso a 0 dokonale lesklé zrcadlo:

$$\varepsilon = \frac{H}{H_0}$$

Maximum vyzařování se posouvá ke kratším vlnovým délkám při rostoucí teplotě měřeného předmětu.

Pokud se má vypočítat přenos tepla zářením, je nutné vědět, jak se energie rozdělí vzhledem k prostorovému úhlu. Intenzita vyzařování H vyjadřuje část hustoty zářivého toku E vyzářenou jednotkovým prostorovým úhlem ve směru kolmém k povrchu zářiče. Tuto skutečnost vyjadřuje Lambertův směrový zákon:

$$H = H_0 \cdot \cos\theta,$$

kde:

H je intenzita vyzařování a

θ je úhel dopadu zářivého toku na povrch.

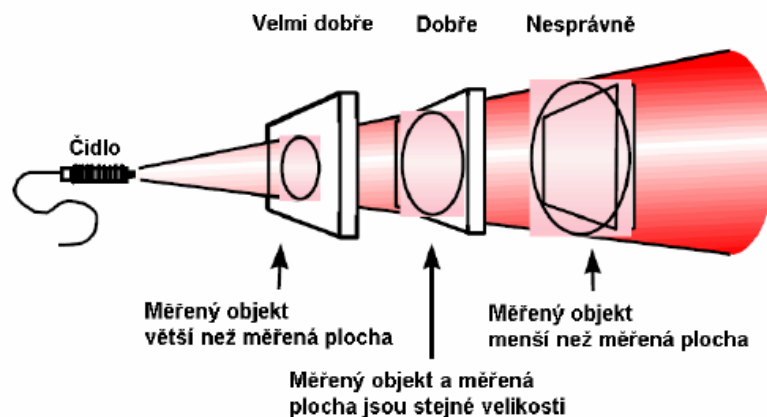
Dalším důležitým zákonem je Wienův posouvací zákon, který konstatuje, že v záření tělesa je maximální energie vyzařovaná na vlnové délce, která se s rostoucí teplotou snižuje (posouvá do pásma kratších vlnových délek). To znamená, že pokud se použije bezdotykový teploměr, který pracuje v rozmezí vlnových délek od 2 μm do 10 μm pro těleso o teplotě 600 K, a teplota měřeného objektu se výrazně změní, tak tuto změnu takto nastavený teploměr nezaznamená, protože se spektrum vyzařování posune ke kratším nebo delším vlnovým délkám (podle toho zda teplota vzroste nebo poklesne). [1][10][12]

4.1.1 Výhody bezkontaktního měření teploty

- Bezkontaktní měření má zanedbatelný vliv na měřený objekt - z měřeného objektu není odebírána žádná tepelná energie jako například u dotykových metod měření.
- Nedochází k poškození povrchu měřeného objektu v důsledku umístění a přichycení měřicích čidel.
- Metody bezdotykových měření umožňují měření velmi rychlých změn teplot.
- Možnost měření na rotujících nebo pohybujících se částech.

4.1.2 Nevýhody bezkontaktního měření teploty

- Chybné určení emisivity měřeného objektu - emisivita je závislá na mnoha skutečnostech, např. na způsobu obrábění kovu nebo lakování; emisivita je také závislá na teplotě měřeného objektu.
- Chyba měření způsobena neznalostí správné propustnosti prostředí mezi čidlem a měřeným objektem.
- Chyby způsobené dopadajícím infračerveným zářením z okolí.
- Chybné měření způsobené špatným zaměřením objektu – optický systém pyrometrů většinou snímá teplotu z kruhové plochy, která by měla být celá vyplněna měřeným objektem, nebo dojde k ovlivnění naměřených výsledků snímáním teploty okolí objektu.



Obr. 2 Znáznornění zaměření měřené plochy bezdotykovým měřicím přístrojem [1]

4.2 Určování emisivity měřeného objektu

Špatné určení a nastavení emisivity měřeného objektu je nejčastější chybou při měření bezdotykovými přístroji pro měření teplot. Proto je velmi důležité emisivitu určit co nejpřesněji, jedině tak lze docílit co nejlepších výsledků při měření. Nejčastěji se používají následující metody:

- *Vyhledání emisivity v tabulkách* – Součástí některých přístrojů pro bezdotykové měření bývají tabulky s emisivitou některých materiálů. Emisivitu je možno vyhledat i na internetu. Takové určení emisivity však není příliš přesné, protože emisivitu ovlivňuje řada faktorů (obrábění, lakování apod.)
- *Zahřátí měřeného vzorku na známou teplotu* – Po zahřátí na známou teplotu je možné v přístroji měnit emisivitu, dokud se nenaměří stejná teplota, na jakou se objekt zahřál. Nastavení však musí probíhat velmi rychle, protože dobře tepelně vodivé materiály mění svou teplotu velmi rychle.
- *Použití dodatečného materiálu nebo speciálního nátěru* – Tuto metodu lze použít při teplotách do 250°C. Na měřený objekt se nalepí speciální černá páska, která se svou emisivitou blíží k emisivitě dokonale černého tělesa (ϵ se blíží k 1). Měřicím přístrojem se změří teplota pásky a ta se považuje stejná jako na měřeném objektu. Poté se může nastavit emisivita materiálu objektu taková, aby se naměřila stejná teplota jako na pásce.
- *Kombinace s další metodou měření teploty* – Pomocí jiné měřicí metody se měří teplota objektu a na bezdotykovém měřicím přístroji se poté nastavuje emisivita tak, aby byla výsledná teplota stejná, jaká se naměřila například termočlánkem. Pro tuto metodu je požadován velmi dobrý kontakt termočlánku s povrchem měřeného objektu, aby byl schopen reagovat na rychlé změny teploty.[1][10]

4.3 Teplotní senzory

Teplotní senzory jsou součástí měřicích přístrojů. Senzory slouží jako vstupní blok do měřicího systému, kterým se měří změna veličiny a ta se poté měřicím systémem převede na hodnotu teploty měřeného objektu.

Teplotní senzory se dělí dle fyzikálního principu na odporové, termoelektrické, polovodičové s PN přechodem, dilatační, optické, radiační, chemické, šumové, akustické, magnetické, kapacitní, aerodynamické a další.

Senzory jsou buď pasivní, nebo aktivní. Aktivní senzory se při působení teploty chovají jako zdroj elektrické energie. Pasivní senzory potřebují pro svou funkci zdroj elektrické energie, aby mohly měnit změřenou veličinu na teplotu, protože měření teploty je vždy nepřímé.

Dále se senzory dělí dle styku s měřeným objektem na dotykové a bezdotykové. Bezdotykové přístroje je možné dále rozlišit na kvantové a tepelné senzory. Kvantové senzory pracují na principu vzniku volných nosičů elektrického náboje nebo na interakci fotonů s vázanými elektrony. U tepelných senzorů dojde při pohlcení fotonu ke změně citlivé části senzoru a tu zaznamená snímač teploty.[1][10][11][12]

4.4 Kvantové detektory

Kvantové detektory se rozdělují na tři typy - intrinsické, extrinsické a QWIP detektory.

4.4.1 Intrinsické detektory

Jsou vyrobeny z čistého polovodiče. Označují se také jako fotorezistory. Pracují na principu změny pohyblivosti nosičů náboje po kontaktu dopadajících fotonů s polovodičovou vrstvou. Vodivost je funkcí toku fotonů. Tyto detektory jsou pasivní, a proto vyžadují vnější elektrické pole pro přenos nosičů náboje a následně průtok elektrického proudu.

4.4.2 Extrinsické detektory

Jejich funkce je založena na polovodičovém přechodu P-N. Počet nosičů náboje ovlivňuje množství příměsí polovodiče. V polovodiči typu N jsou atomy s nadbytkem valenčních elektronů a v polovodiči typu P s nedostatkem. Absorpcí fotonů v této vrstvě dojde ke vzniku páru elektron-díra a pohybu elektronu do oblasti P a díry do oblasti N. Na základě tohoto jevu vznikne napětí.

4.4.3 QWIP detektory

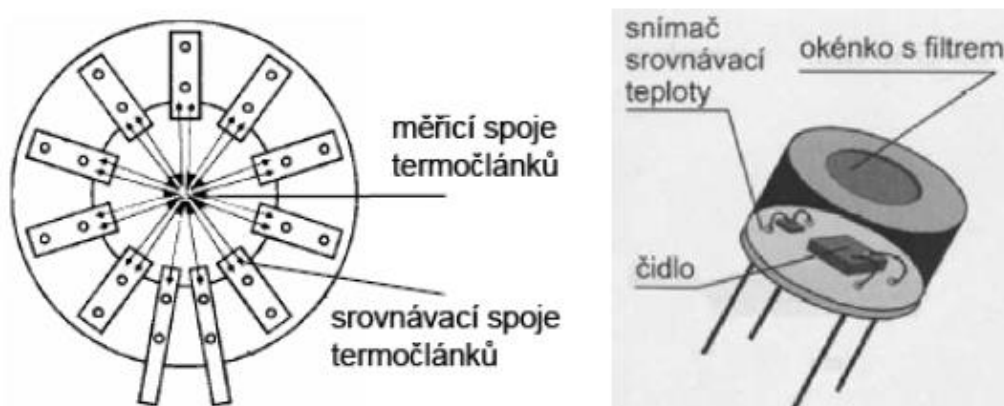
Pracují na stejném principu jako extrinsické detektory. Jsou založeny na využití kvantových jam. Jde o nepatrně tenké struktury naskládané těsně na sebe (více než 100 vrstev polovodiče GaAs o tloušťce 10-700 atomů), ve kterých se uplatňují zákony kvantové mechaniky. K tomu, aby foton vyrazil elektron z kvantové jámy, je zapotřebí přesně dané energie. Díky tomuto jevu lze vyrobit detektor na potřebnou vlnovou délku záření.

4.5 Tepelné detektory

Tepelné detektory rozdělujeme na čtyři typy - thermopile, pyroelektrické, bolometrické a mikrobolometrické detektory.

4.5.1 Thermopile detektory

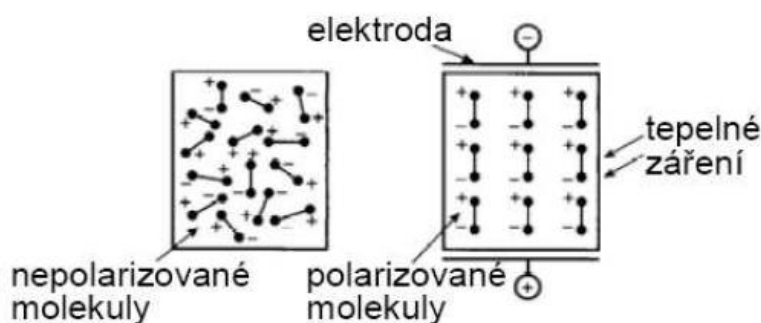
Jsou založeny na principu připojeného termočlánek na černý (infračervené záření absorbující) materiál. Záření je soustředěno na termočlánek a jeho teplota se mění podle změny toku infračerveného záření. Tento jev ohřeje spoj dvou kovů termočlánek a vzniká elektrické napětí, které se vyhodnotí pomocí dalších obvodů. Tyto detektory reagují přímo na tepelné záření ve směru, na který jsou namířeny. Thermopile detektory nepotřebují žádné chlazení, proto patří mezi levné detektory.



Obr. 3 Thermopile detektor [10]

4.5.2 Pyroelektrické detektory

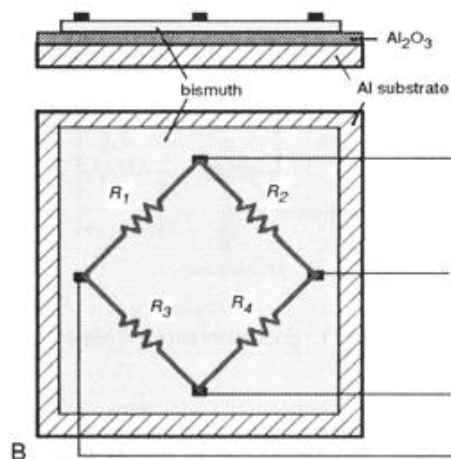
Jsou vyrobeny z polarizovaného materiálu a fungují na principu pyroelektrického jevu. Při pyroelektrickém jevu dochází ke změně spontánní polarizace při změně teploty. Fungují na principu kolísání polarizace při změně ozáření. Tímto jevem vzniká střídavý proud, který dále zpracovávají elektronické obvody.



Obr. 4 Princip pyrometrického detektoru [10]

4.5.3 Bolometrické detektory

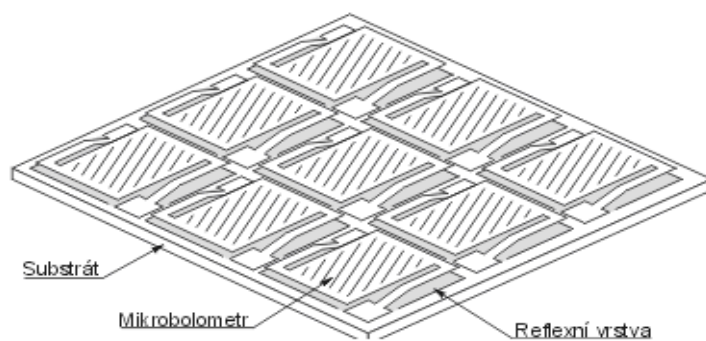
Odpor bolometrů se mění se změnou teploty. Tato změna odpovídá množství pohlceného infračerveného záření. Infračervené záření dopadá na absorpční vrstvu senzoru tvořeného zlatou fólií. Ta ohřívá tepelně vodivý povrch a nosník, na jehož spodní vrstvě je napařený meandr odporové dráhy, která mění odpor lineárně s teplotou.



Obr. 5 Bolometrický detektor [11]

4.5.4 Mikrobolometrické detektory

Princip funkce je stejný jako u bolometrických detektorů. Mikrobolometrické detektory obsahují více odporových plošek na jednom senzoru. Celý senzor je vyroben jako celistvý křemíkový obvod. Tyto senzory se nejčastěji používají v termovizních kamerách.



Obr. 6 Mikrobolometrický detektor [11]

4.6 Pyrometry

Pyrometry jsou bezdotykové přístroje určené k měření teploty. Určují teplotu měřeného předmětu z teplotního záření, které vyzařuje měřený objekt. V praxi se používají pro měření teplot v rozsahu -50°C až $+3500^{\circ}\text{C}$.

Princip funkce pyrometrů je založen na Stefan-Boltzmannově zákonu, který vyjadřuje celkovou vyzářenou energii za jednotku času z jednotkové plochy absolutně černého tělesa.

Vyzařovaná energie se mění se čtvrtou mocninou teploty T . Maximum vyzařování se posunuje ke kratším vlnovým délkám při rostoucí teplotě měřeného předmětu. Pokud je třeba ovlivnit rozsah měřených teplot, je nutné před senzor umístit filtr, který bude propouštět pouze určité vlnové spektrum. [1][7][10][11][12]

4.6.1 Monochromatické pyrometry

Monochromatické pyrometry jsou spektrálně selektivní pyrometry, pracující na principu závislosti spektrálního vyzařování tělesa při určité vlnové délce na jeho teplotě. Tento druh pyrometrů dokáže přesně měřit pouze v úzkém rozsahu vlnových délek.

4.6.2 Úhrnné pyrometry

Úhrnné pyrometry pracují na principu Stefan-Boltzmannova zákona. To znamená, že dovedou vyhodnocovat tepelné záření v celém rozsahu vlnových délek. Jsou opatřeny možností nastavení emisivity měřeného povrchu.

4.6.3 Pásmové (vícepásmové) pyrometry

Pásmové pyrometry jsou spektrálně selektivní pyrometry s možností nastavení šíře pásma vlnových délek. Využívá určitou část spektra, které je podstatně širší než u monochromatického pyrometru. Mezi jejich výhody patří rychlá reakce přístroje na změnu teploty.

4.6.4 Poměrové pyrometry

Poměrové pyrometry vyhodnocují naměřenou teplotu z porovnání měření dvou různých míst při dvou vlnových délkách. Jsou kalibrovány na emisivitu absolutně černého tělesa pro dvě vlnové délky. Z Planckova zákona lze dokázat, že poměr dvou intenzit vyzařování je zcela jednoznačný a pro každou teplotu jiný. Tento princip měření je nezávislý na hodnotě emisivity povrchu tělesa a mohou měřit v širokém rozsahu vlnových délek.

4.6.5 Pyrometry automatickou korekcí emisivity

Pyrometry s automatickou korekcí emisivity umožňují měřit povrchovou teplotu tělesa, bez toho aniž by byla známa emisivita jeho povrchu. Pracují na principu měření monochromatickým pyrometrem. Střídavě měří intenzitu vyzařování měřeného tělesa a intenzitu vyzařování měřeného tělesa ozářeného laserem s přesně definovanou intenzitou vyzařování.

4.7 Termografie

Termografie je soubor bezdotykovým měřících metod založených na zviditelnění tepelného (infračerveného) záření, které lidské oko nerozezná.

Termografické metody jsou schopny zobrazit rozložení teploty na povrchu měřeného objektu. Mezi termografické metody měření patří měření termovizní kamerou (termokamerou).

Termokamery jsou zařízení, která umožní zobrazit neviditelné infračervené záření charakteristické pro různé teploty tělesa, a tento vizuální obraz lze dále upravovat v softwarových programech k tomu určených. [10][11]

Měření termovizní kamerou se nepoužívá pouze v elektrotechnice ale i v jiných oborech. Těchto metod se využívá například pro:

- Hledání úniků tepla z budov.
- Sledování elektrických vedení a jejich poškození.
- Určení poruchy vyhledáním nehomogenit teplotního pole.
- Neinvazní detekci zánětů pod kůží.
- Automatizaci procesů.
- Měření rozložení teploty pro účely vědy a výzkumu.
- Detekci pohybu osob v zabezpečeném prostoru.
- Noční vidění apod.

Existují dva základní typy termovizních systémů:

Kamery s opticko-mechanickým rozkladem obrazu

Kamery s maticovým detektorem

4.7.1 Kamery s opticko-mechanickým rozkladem obrazu

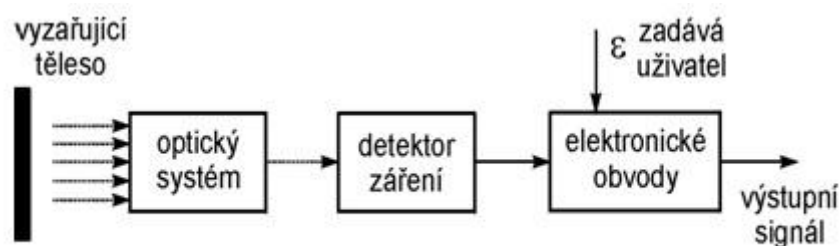
Tyto kamery postupně snímají jednotlivé body po řádcích nebo sloupích pomocí rychle se pohybující optické soustavy, která postupně přivádí na malý detektor tok fotonů z různých míst měřeného objektu. Rozklad na body představuje postupné zobrazení bodů podobně jako na televizní obrazovce. Dráhy rozkladu infračerveného obrazu mohou být různé. Záleží na způsobu pohybu optické soustavy (zrcadla nebo hranolu). Obraz lze pomocí kývajících se zrcadel rozložit na řádky nebo pomocí rotačních reflexních krystalů na body. Rozhodující je také způsob použití detektoru. Je možné použít jeden bodový, více detektorů umístěných lineárně vedle sebe nebo mozaiku detektorů.

4.7.2 Kamery s maticovým detektorem

Využívají chlazené a nechlazené mikrobolometrické a kvantové FPA (Focal Plane Arrays) detektory. Jsou podobné CCD čipům používaným v klasických kamerách. Každý pixel tvořící infračervený obraz odpovídá jednomu detektoru. Matice je umístěna v ohniskové rovině optického systému a je na ni zaostřena snímaná oblast měřeného objektu.

4.7.3 Složení termovizní kamery

Termovizní kamery se skládají ze tří hlavních částí - optického systému, detektoru záření a elektronických obvodů (viz obr. 7). Optický systém snímá záření vyzařované nebo odražené z povrchu měřeného objektu. Systém čoček dále předává signál detektoru, který převede vstupní signál na elektrický signál a předá jej elektronickým obvodům pro korekci emisivity a odraženého záření.



Obr. 7 Schéma termovizního systému [11]

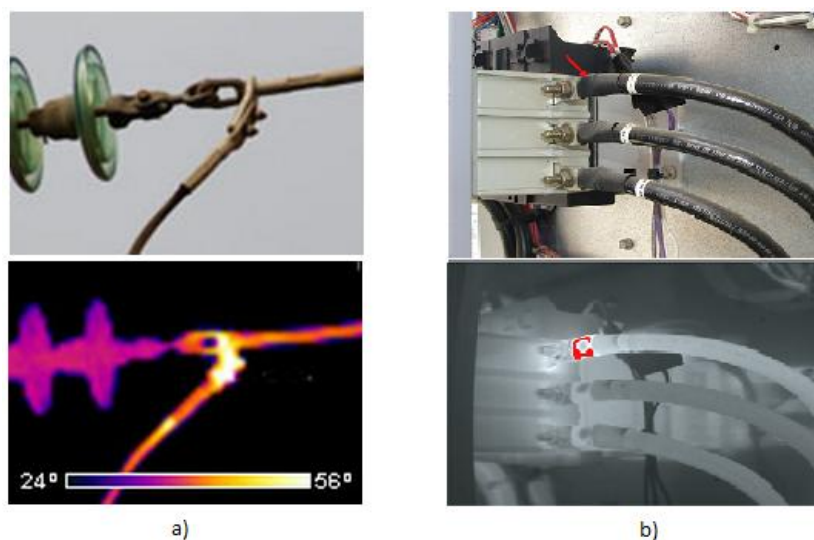
Výstupem z termovizní kamery je infračervený snímek rozložení teplot na povrchu měřeného objektu. Tento snímek se nazývá termogram.

4.7.4 Termogram

Rozložení infračerveného záření lze pozorovat lidským okem. Aby bylo možné rozlišit jednotlivé teploty na povrchu tělesa, musí se v počítačovém programu tomu určeném přiřadit jednotlivým vlnovým délkám infračerveného záření různá barevná paleta.

Pro termogramy se používají standardní palety jako např.:

- Železo
- Duha
- Stupně šedi



Obr. 8 Příklad termografů a) paleta zobrazení železa [4] b) paleta zobrazení stupně šedi [6]

Termogramy mohou být zobrazeny jako radiometrické a neradiometrické. Na radiometrických snímcích je vidět i stupnice barev s přiřazenými teplotami. V plně radiometrickém snímku lze provádět měření teplot a upravovat parametry (emisivita, zdánlivá odražená teplota, vzdálenost od měřeného objektu, údaje o okolní atmosféře apod.) snímku i po jeho uložení.

5 TERMovIZNÍ KAMERA SAT SH-67 / HY-6800



Obr. 9 Termovizní kamera SAT SH-67 / HY-6800

5.1 Úvod

Termovizní kameru SH-67 / HY-6800 vyrábí firma Guangzhou SAT Infrared Technology Co. LTD (SATIR).

Model SH-67 / HY-6800 je moderní přenosná IR kamera určená především pro průmyslové využití. Umožňuje zobrazit současně až 4 snímky s přesným určením hodnot teploty dle tepelného záření v rozsahu -40°C až 2000°C . Dokáže zobrazit nejen infračervený obraz měřeného objektu, ale také bodovou, lineární a zónovou analýzu. K pořízeným snímkům umožňuje nahrát až 16ti vteřinový komentář.

Tato kamera umožňuje jednoduše a přesně určit místa potencionálních rizik a problémových oblastí. K tomuto účelu je vybavena vestavěným hledáčkem nebo volitelně přídavným 3,5“ LCD panelem.

Kamera je chráněna před nežádoucími vlivy okolí hliníkovým pouzdem s hodnotou IP54. Toto pouzdro zajišťuje kameře odolnost především proti prachu a vlhku.

Jako detektor je použit nechlazený FPA bolometrický detektor.

5.1.1 Příslušenství

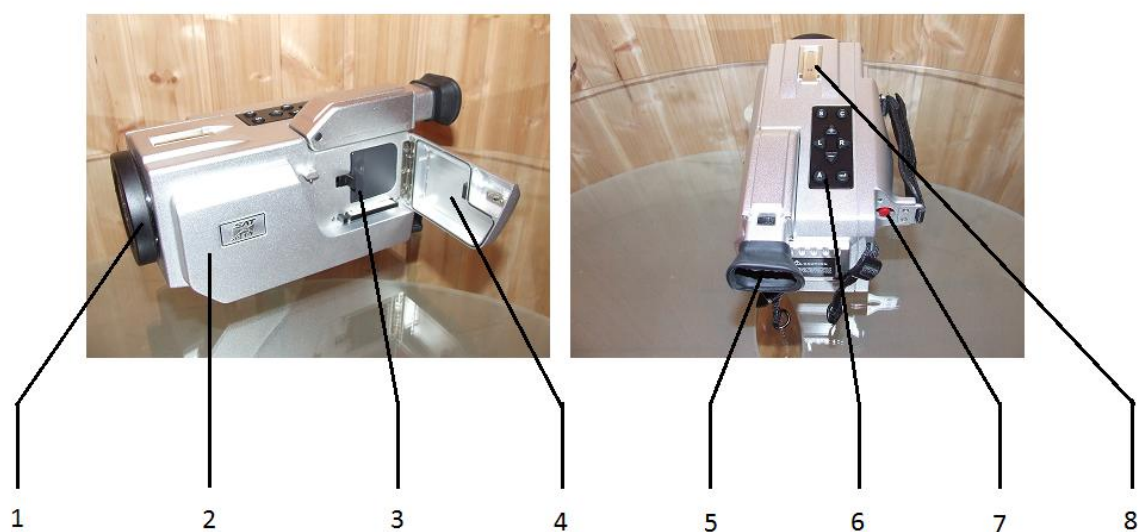
Kamera SH-68 / HY-6800 se standardně dodává s příslušenstvím obsahující:

- CF paměťovou kartu 128M s PCMCIA adaptérem
- Video konektor
- Audio sadu – sluchátka s mikrofonem
- 2ks Li-Ion Baterií
- Nabíječka baterií s adaptérem
- CD se softwarem (program SAT Report, Manuál)



Obr. 10 Příslušenství termovizní kamery SH-67 / HY-6800

5.1.2 Popis částí termovizní kamery



Obr. 11 Části termovizní kamery

1. IR objektiv 24°x18°/0.5m s možností digitálního přiblížení až 18x a mechanickým ostřením krytý ochranou krytkou
2. Hliníkové ochranné pouzdro termovizní kamery s IP54
3. Prostor pro Li-Ion baterii a CF paměťovou kartu
4. Kryt prostoru pro baterii a paměťovou kartu
5. Hledáček s barevnou obrazovkou s rozlišením 640x480 pixelů
6. Ovládací panel
7. Tlačítko pro zapnutí / vypnutí přístroje
8. Kolečko pro umístění přídatného 3,5“ LCD displeje

5.1.3 Funkce tlačítek ovládacího panelu

 - Stiskem tlačítka ENTER se vyvolá hlavní menu. Hlavní menu obsahuje položky FILE, ANALYSIS, IMAGE, SETUP a pohybuje se v něm pomocí tlačítek L a R. Označenou volbu lze potvrdit opětovným stisknutím tlačítka ENTER nebo tlačítkem -. V menu označené položky se pohybuje pomocí tlačítek + a -. Pro návrat do hlavní nabídky a pro ukončení prohlížení hlavní nabídky slouží tlačítko C.

A – Tlačítko A slouží pro automatické nastavení rozsahu měřených teplot, úrovně jasu a kontrastu pro měřenou scénu.

+, - – Tato tlačítka jsou určena pro zaostření čočky na měřené místo objektu. Také slouží pro pohyb v hlavní nabídce přístroje.

L, R – Tato tlačítka slouží pro přibližování digitálním zoomem a bez přiblížení slouží tlačítko L k zachycení až čtyřech rozdílných snímků na jedné obrazovce. Dále slouží k navigaci v hlavní nabídce přístroje.

S – Tlačítko S se používá k pozastavení živého obrazu nebo ke zrušení pozastavení a navrácení se k živému obrazu. Pomocí přidržení tlačítka se uloží právě zobrazená scéna na paměťovou kartu.

C – Tlačítko C slouží pro opuštění hlavní nabídky nebo pro návrat z podnabídek do hlavní nabídky. Použitím tohoto tlačítka se neukládají předešlé výběry v menu. Toto tlačítko má i další funkce při přidržení a použití dalších tlačítek:

C + L / R Tato kombinace slouží pro manuální nastavení hodnoty maximální zobrazené teploty na obrazovce.

C + + / - Tato kombinace umožňuje nastavit manuálně rozsah zobrazených hodnot teplot na obrazovce. Upravuje tedy mimo jiné i jas a kontrast.

5.2 Možnosti termokamery SH-68 / HY-6800

Tato termokamera má několik módů, vhodných pro přesné měření teploty nebo pro teplotní analýzy měřených objektů.

5.2.1 Bodová analýza

(Menu - Analysis – Spot 1-4)

Tato funkce termokamery umožňuje zobrazit na displeji až 4 body, u kterých zobrazí teplotu zaměřeného místa měřeného objektu. Tato funkce má několik možností. Umožňuje automaticky najít místo s nejnižší nebo nejvyšší teplotou, u které umožňuje nastavit maximální možnou přípustnou hranici teploty. Pokud místo tuto hranici přesáhne, objeví se varovný nápis. Dále umožňuje manuálně zaměřit místa na měřeném objektu (pomocí tlačítek +, -, L, R).

5.2.2 Plošná analýza

(Menu - Analysis - Area)

Pomocí této funkce měří kamera teplotu v obdélníkové oblasti, se kterou je možné zaměřit požadovanou oblast měřeného objektu. Kamera umožňuje změřit maximální teplotu v oblasti,

minimální teplotu v oblasti a průměrnou teplotu oblasti. Oblast je možné zaměřit pomocí tlačítek +, -, L, R a nebo změnit její rozměry současným stlačením kombinací tlačítek +, - a L, R.

5.2.3 Profilová analýza

(Menu - Analysis - Profile)

Termokamera je schopná měřit teplotu v bodě zobrazeném uprostřed obrazovky a zároveň zobrazit grafickou křivku teplot změřených pomocí přímky horizontálně nebo vertikálně.

5.2.4 Izotermická analýza

(Menu – Analysis - Isotherm)

Tato funkce umožňuje nastavit na teplotní stupnici požadovaný rozsah teploty a zobrazit všechny místa měřeného objektu s teplotou v tomto rozsahu. Spodní hranice intervalu se nastavuje pomocí tlačítek L a R a posouvání celého intervalu po teplotní stupnici umožňují tlačítka + a -.

6 PROGRAM SAT REPORT

Program SAT Report slouží k vyhodnocování snímků pořízených termokamerou SH-67 / HY-6800. Program umožňuje vytvářet analýzy pořízených snímků, měnit parametry měřeného objektu, měnit barevné spektrum a teplotní rozsah a vytvářet komplexní teplotní vyhodnocování snímků.

Poznámka: *Všechny hodnoty zobrazené na termosnímčích jsou pouze orientační. Pro přesné určení teploty je nutné znát emisivitu povrchu měřeného objektu.*

6.1 Import snímků

Aby bylo možné v programu SAT Report vytvářet analýzy snímků, je nejprve nutné importovat snímky přímo do programu.

1. Označit na levém panelu položku „Ir Image“ a pomocí táhnutí kurzoru na pracovní ploše vytvořit plochu pro snímek.
2. Kliknout pravým tlačítkem na vytvořenou plochu a vybrat položku „Connect...“.
3. Vybrat v průzkumníku uložený snímek (ACIS text s příponou .SAT) a zvolit „Otevřít“.

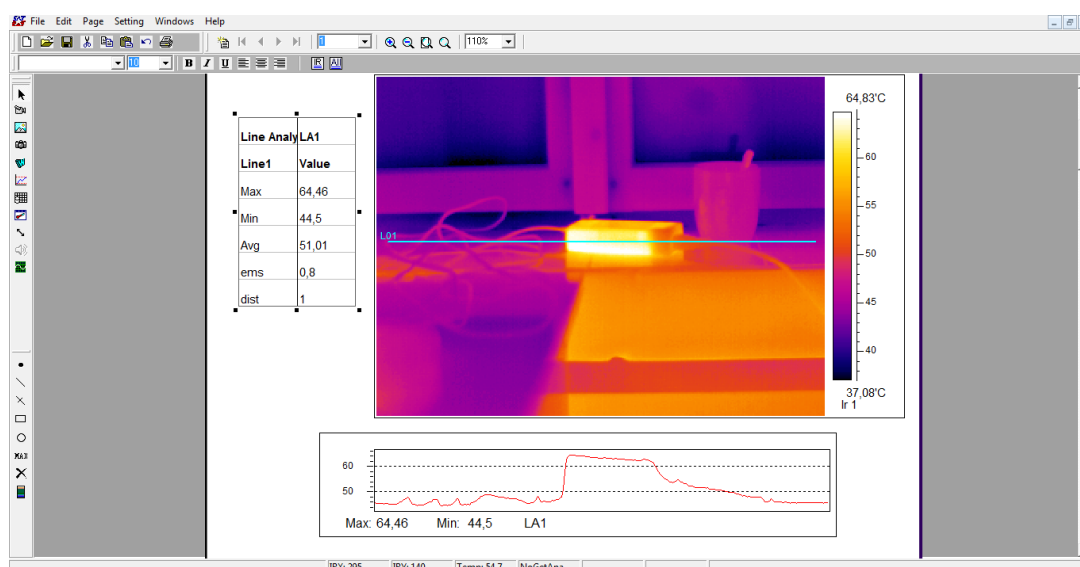
6.2 Možnosti analýz snímků

Program umožňuje velké množství voleb pro analýzy snímků. Panel nabídky vlevo nabízí vytvoření lineární analýzy, zobrazení parametrů lineární analýzy, vytvoření oblasti, izotermální analýzu, vytvoření tabulky s výsledky analýz a automatické zvolení rozsahu a barevného spektra. Před vytvořením požadované analýzy je nutné vytvořit vstupy pro analýzu (body, přímky, úsečky, oblasti).

6.2.1 Lineární analýza

Nejprve je nutné vytvořit přímku nebo úsečku požadované délky, směru a natočení (levý panel – položka Line). Pro vytvoření analýzy se zvolí položka „Line Analysis Tool“ a tahem kurzoru se vytvoří místo pro zobrazení grafu lineární analýzy. Dále je nutné analýzu připojit k přímce na snímku. Tohoto se docílí pravým kliknutím myši na prostor grafu a zvolením položky „Connect...“. Zobrazí se dialogové okno, kde je nutné přiřadit jednotlivé úsečky jednotlivým křivkám grafu.

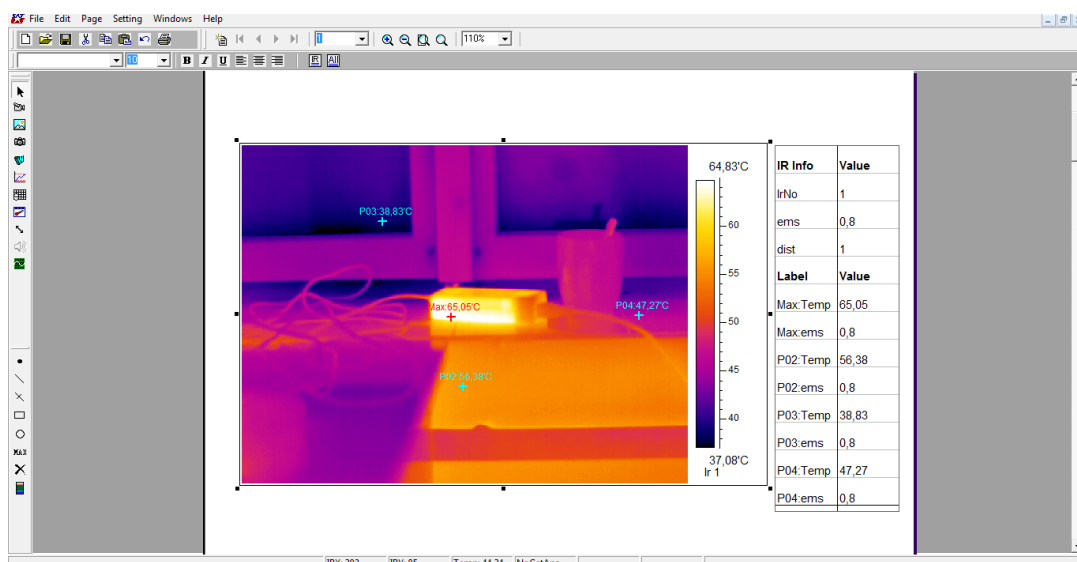
Je možné ještě přidat tabulky s naměřenými hodnotami a s parametry měřeného objektu (emisivita). Tohoto lze docílit zvolením položky „Line Analysis Parameters“ nebo „Result Table“. Po vložení tabulky je nutné tabulku spojit s vytvořenou analýzou (pravé kliknutí – „Connect...“) a vybrat požadovanou přímku nebo úsečku. Je možné si vybrat jednotlivé parametry, které je potřeba zobrazit (např.: maximální teplota, minimální teplota, průměrná teplota, emisivita, vzdálenost objektu aj.)



Obr. 12 Lineární analýza v SAT Report

6.2.2 Bodová analýza

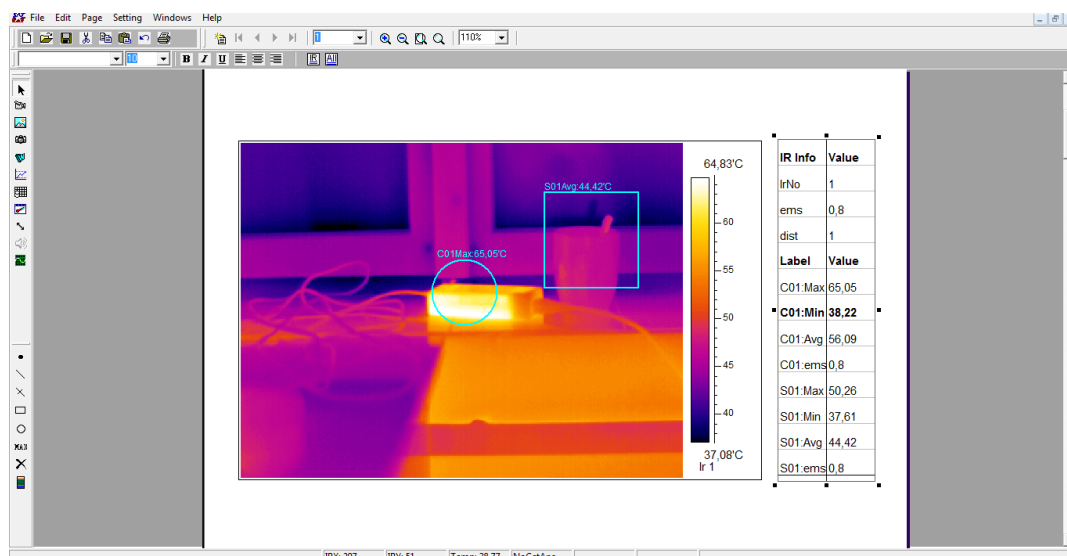
Pro bodovou analýzu jsou na levém panelu připraveny položky „Point“ a „MaxPoint“. Položka „Point“ umožňuje umístit body kamkoliv na zobrazený demosnímek. Položka „MaxPoint“ je připravena pro zobrazení místa termosnímku s nejvyšší naměřenou teplotou. Hodnotu teploty je možno zobrazit buď přímo na termosnímku u bodu, nebo v tabulce hodnot. Pro zobrazení hodnoty u bodu je nutné kliknout na bod pravým tlačítkem a zvolit možnost „Setting...“. V záložce „Analysis“ je možnost „Analysis Label“ a volba „Type“, kde je možné zvolit „Blank“, kdy se zobrazí pouze označení bodu, nebo „Temperature“, kdy se zobrazí i hodnota teploty v místě umístění bodu. Pro zobrazení naměřených hodnot v tabulce je nutné vytvořit tabulku zvolením položky „Result Table“ a spojením tabulky pomocí pravého kliknutí a položky „Connect...“ s bodovou analýzou. Opět tabulka umožňuje zobrazení vybraných informací.



Obr. 13 Bodová analýza v SAT Report

6.2.3 Plošná analýza

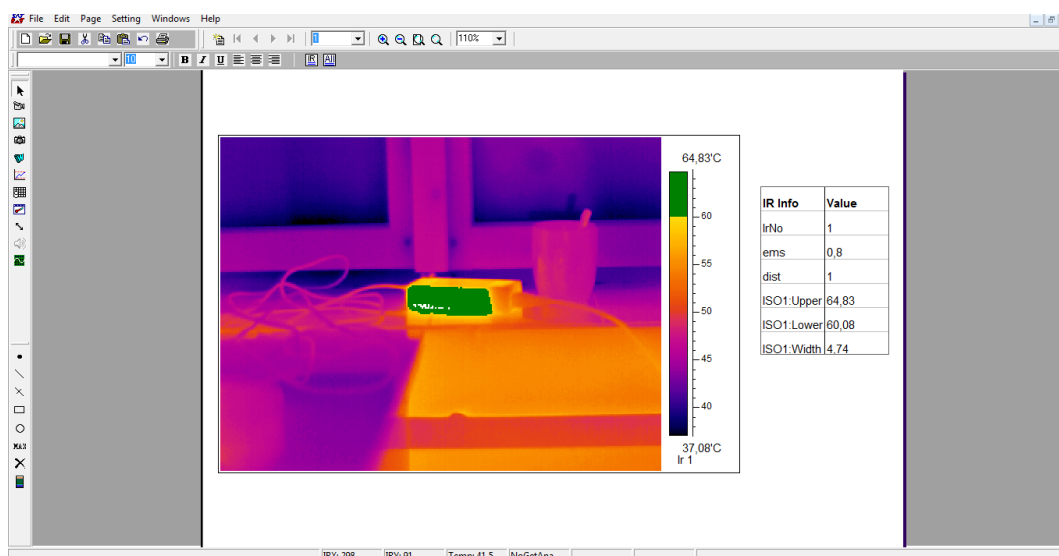
Program umožňuje vytvářet plošné analýzy z předem připravených ploch, jako je čtverec, obdélník (položka „Square“) a kruh (položka „Circle“). Před zobrazením hodnot je nejdříve nutné vytvořit plochy na zobrazeném termosnímku. Naměřené hodnoty je možné zobrazit přímo na snímku (pravé tlačítko - zvolení nabídky „Setting...“ – záložka „Analysis“ – „Analysis Label“ – „Type“), kde je možno zvolit, zda je třeba zobrazit maximální, minimální nebo průměrnou hodnotu teploty. Dále je možné zobrazit hodnoty v tabulce (položka „Table Results“ – „Connect...“). Zde je možné zobrazit maximální, minimální a průměrnou teplotu, emisivitu, vzdálenost měřeného objektu a další.



Obr. 14 Plošná analýza v SAT Report

6.2.4 Izotermální analýza

SAT Report umožňuje zvolit užší tepelné pásmo, které se zobrazí na snímku jednou barvou. Tato volba je přístupná zvolením položky „Isotherm“. Je možné nastavit horní a spodní hranici až dvou teplených intervalů. Dále je možné v tabulce zobrazit horní a spodní hranici a šířku teplotního intervalu (pravé tlačítko – „Connect...“).



Obr. 15 Izotermická analýza v SAT Report

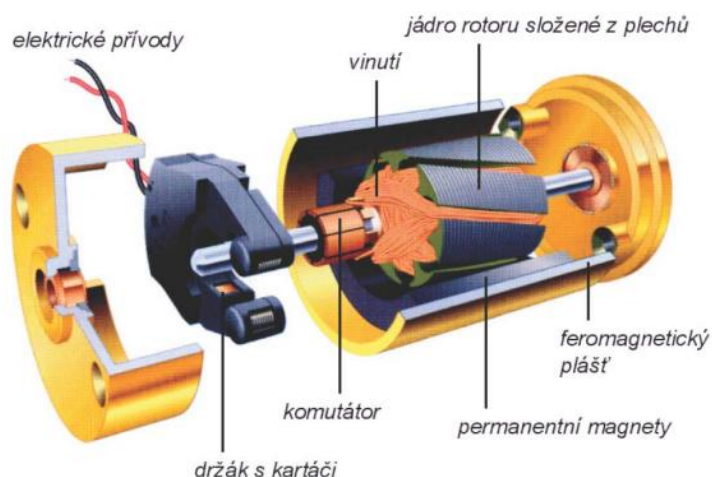
7 STEJNOSMĚRNÉ STROJE

Stejnoseměrné stroje jsou jedny z nejstarších elektrických strojů. Stejnoseměrné generátory (dynama) byly používány jako první k výrobě elektrické energie a stejnosměrné motory jako první k pohánění strojních zařízení. Jsou používány i nadále, zvláště pro jejich výhodné regulační schopnosti. Jejich mechanické a regulační charakteristiky mají lineární tvar. Mezi jejich další výhody patří velký záběrný moment a malá časová konstanta. Velmi často se používají v letectví a vojenské technice pro jejich malé rozměry a nízkou hmotnost oproti ostatním motorům. Jejich největší nevýhoda je v nutnosti použití komutátoru pro napájení rotoru motoru. Dochází k opotřebení kluzných uhlíkových kartáčů. Tím je dána nutná častější údržba, popřípadě výměna kartáčů. Na styku kartáčů s komutátorovými plochami dochází ke vzniku elektromagnetického rušení. Vývoj v této oblasti dal vzniknout elektronické komutaci a tím zrušení nutnosti použití uhlíkových kartáčů. [10][11][12][13][14]

7.1 Konstrukce

Základní části stejnosměrného motoru jsou rotor a stator. Ve statoru jsou vytvořeny vyniklé hlavní póly, na nichž je umístěno budicí vinutí napájené stejnosměrným proudem nebo permanentní magnety a vyniklé pomocné komutační póly napomáhající komutaci rotorového vinutí. V rotoru jsou vytvořeny drážky a v nich je umístěno vinutí kotvy. Za hlavním pólem dané polarity je vždy umístěn ve směru otáčení pomocný pól téže polarity. Cívky kotvy jsou vyvedeny ke komutátoru přes uhlíkové kartáče. Na komutátor je přivedeno stejnosměrné napětí a pomocí komutátoru je mechanicky převedeno na střídavé napětí (u dynam se zase usměrňuje střídavý proud rotoru přes komutátor na stejnosměrný) a zajišťuje tak přivádění správně orientovaného proudu do cívek vinutí kotvy tak, aby se v magnetickém poli hlavních pólů vytvářel točivý moment souhlasného smyslu. Uhlíkové kartáče komutátoru se umísťují do magneticky

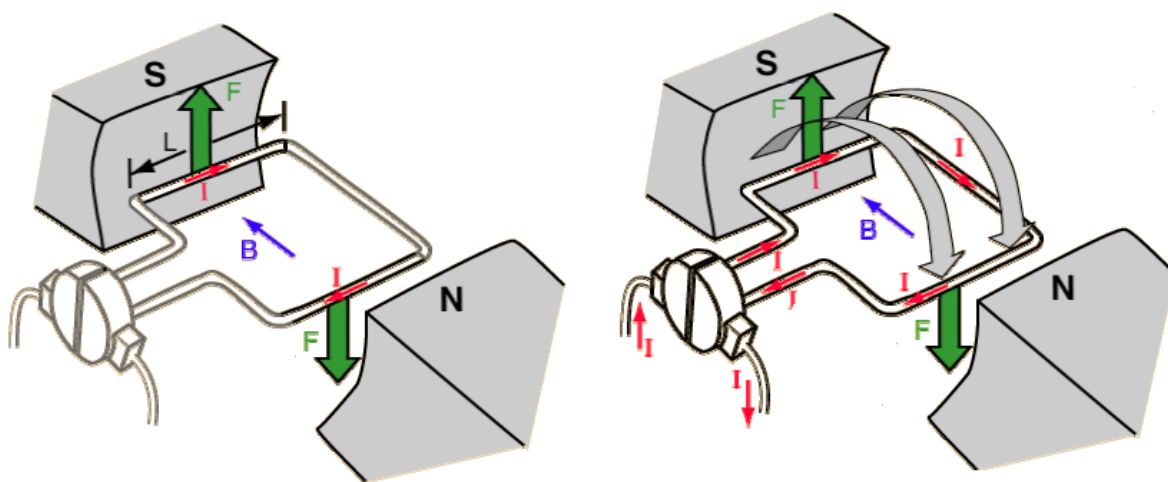
neutrálního místa mezi sousedními hlavními póly. Jejich počet se odvíjí od počtu pólů (vždy sudý počet). [10][11][12][13][14]



Obr. 16 Složení stejnosměrného motoru s permanentními magnety [12]

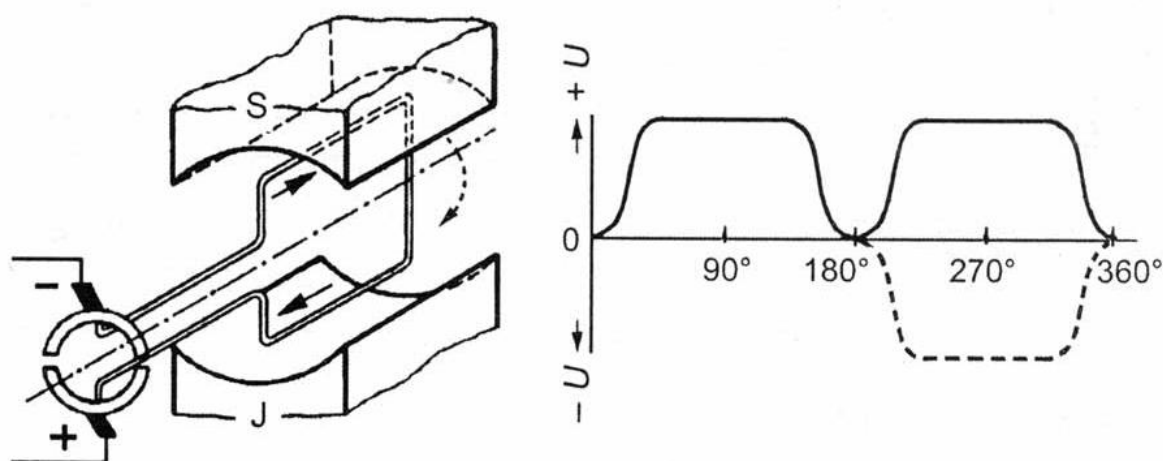
7.2 Princip funkce

Na uhlíkové kartáče přivádíme stejnosměrný proud a to převedeme pomocí lamel komutátoru do vinutí kotvy rotoru. Průchod proudu vinutím kotvy vytváří reakční magnetické pole. Vinutí se nachází v magnetickém poli statoru a začne na něj působit síla. Rotor se začne otáčet (směr můžeme určit pravidlem levé ruky). Pokud bychom neměli na rotor přivedený proud přes komutátor a napájeli jej tak pouze stejnosměrným proudem, rotor by se pouze pootočil a zastavil by se. Komutátor ale pracuje jako mechanický střídač a při pootočení rotoru se změnil smysl průchodu proudu vinutím kotvy a motor se tedy otáčí dál. Princip je znázorněn na Obr. 17.



Obr. 17 Vznik síly stejnosměrného motoru a následně jeho otáčení [12]

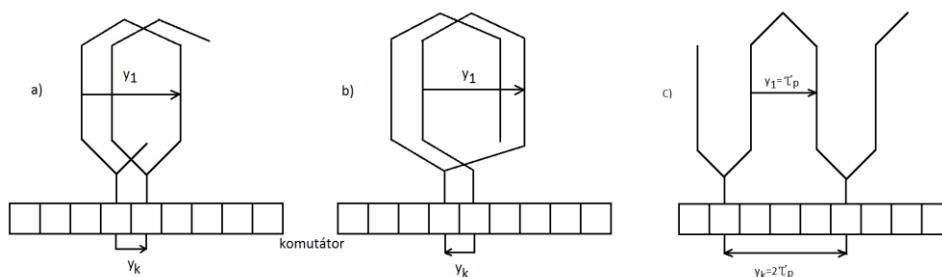
Smysl proudu ve vodičích kotvy rotoru je měněn komutátorem a vzniká tak trvalé otáčení jedním směrem. Vznikající tažná síla má pulzující charakter. Plynulost otáčení je ovlivněna počtem cívek rotoru (čím více cívek, tím plynulejší otáčení) a jejich vhodné zapojení. Protože v rotoru teče střídavý proud, je nutné, aby byl jeho magnetický obvod tvořen z plechů pro omezení ztrát vířivými proudy. Jho statoru a statorové pólové nástavce mohou být tvořeny z lité oceli. Často se ovšem také tvoří z plechů, protože na něm mohou vznikat ztráty způsobené například pulzováním pole vlivem drážkování kotvy. Průběh pulzujícího komutovaného (usměrněného) napětí dynama je zřetelný na Obr. 18, kdy čárkovaný průběh znázorňuje průběh proudu rotorem a průběh znázorněný plnou čarou průběh usměrněného napětí na uhlíkových kartáčích. [10][11][12][13][14]



Obr. 18 Průběh komutovaného napětí dynama [13]

7.3 Vinutí stejnosměrných strojů

Budící statorové vinutí je ve tvaru soustředných křivek rozmístěno na statorových vyniklých pólech. Jeho funkcí je vytvoření magnetického pole, ve kterém se bude otáčet rotor. Pro práci stejnosměrného motoru má základní význam rotorové vinutí kotvy. Vinutí kotvy velkým dílem ovlivňuje výsledný průběh napětí a proudu, což je důležité pro výstupní napětí z dynam nebo rovnoměrný chod motorů. Proto musí mít kotva co největší počet cívek a jim odpovídajících lamel. Vinutí se uzavírá lamelami komutátoru do kruhu a pomocí uhlíkových kartáčů je rozděleno na paralelní větve. Podle způsobu připojení cívek ke komutátoru se vinutí kotvy dělí na smyčkové (paralelní) a vlnové (sériové).



Obr. 19 Druhy zapojení vinutí kotvy a) smyčkové nekřížené, b) smyčkové křížené, c) vlnové

Jednotlivé cívky jsou posunuty o tzv. krok, který značíme y_1 (viz

Obr. 19). Tento krok je přibližně stejný jako pólová rozteč značená τ_p . Takto volíme krok proto, aby nikdy neležely aktivní cívkové strany jedné cívky pod stejnými póly.

Smyčkové vinutí je charakteristické tím, že krok komutátoru, měřený počtem lamel je $y_k = \pm 1$. Protože u větších strojů je třeba umístit na kotvu větší počet cívek, umísťují se cívky tak, aby na jednu drážku připadlo více cívek. Drážky nebudou tak úzké, jako kdyby byly cívky uloženy samostatně. U smyčkového vinutí je vždy počet paralelních větví $2a$ stejný jako počet pólů $2p$. Proto je vinutí vhodné především pro použití u strojů s nižším napětím ale s velkými proudy. Platí tedy

$$2a = 2p$$

Vlnové vinutí se od smyčkového liší především tím, že cívky vinutí jsou připojeny k lamelám o vzdálenosti $2\tau_p$. Kartáče komutátoru rozdělí vlnové vinutí vždy na 2 paralelní větve, bez ohledu na počet pólů. Proto se vlnové vinutí používá u strojů na větší napětí s nižšími proudy. Platí tedy

$$2a = 2$$

[10][11][12][13][14]

7.4 Indukované napětí a moment stejnosměrného stroje

V aktivních vodičích vinutí kotvy se indukuje napětí. Okamžitá hodnota indukovaného napětí je dána vztahem

$$u = B \cdot l \cdot v,$$

kde

B je magnetická indukce ve vzduchové mezeře,

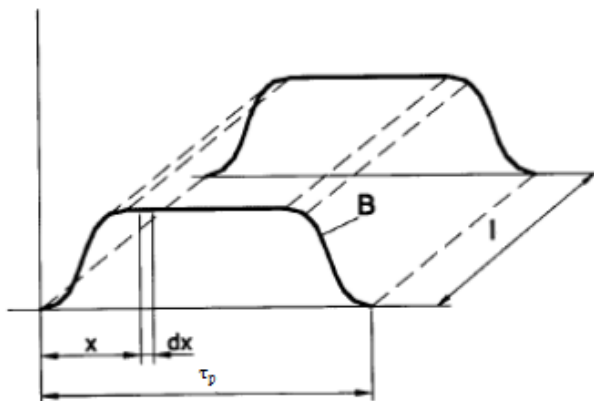
l je rychlost otáčení vodiče,

v je aktivní délka vodiče stejná jako délka aktivního železa.

Na kotvě je celkový počet vinutí N . Ty jsou rovnoměrně rozloženy do $2a$ paralelních větví. Vodiče paralelních větví jsou rozděleny na dvě poloviny. Na přední a zadní cívkové strany. V každé paralelní větvi je $N/4a$ předních cívkových stran a $N/4a$ zadních cívkových stran. Při plném cívkovém kroku je výsledné napětí dáno součtem indukovaných napětí obou cívkových stran.

Předpokládejme plynulé rozložení vinutí kotvy po obvodu kotvy. Potom je-li pólová rozteč τ_p , pak na jednotku délky připadne $N/2a\tau_p$ vodičů. Střední hodnota indukovaného napětí v kotvě je dána vzorcem:

$$U_{stř} = \frac{N}{2a \cdot \tau_p} \int_{x=0}^{\tau_p} u \, dx = \frac{N}{2a \cdot \tau_p} \cdot v \int_{x=0}^{\tau_p} B \cdot l \, dx$$



Obr. 20 Průběh indukovaného napětí v kotvě [14]

Magnetický tok jednoho pólu vstupujícího do kotvy je dán:

$$\phi = \int_0^{\tau_p} B \cdot l \, dx$$

Obvodová rychlost:

$$v = 2p \cdot \tau_p \cdot n,$$

kde:

n jsou otáčky [s^{-1}]

τ_p je pólová rozteč

2p je počet pólů.

Potom můžeme napsat:

$$U_i = \frac{N}{2a \cdot \tau_p} 2p \cdot \tau_p \cdot n \cdot \phi = N \cdot n \cdot \frac{p}{a} \cdot \phi$$

Magnetický tok ϕ můžeme zjednodušit na obdélníkový průběh a poté napsat:

$$\phi = B_{stř} \cdot l \cdot \tau_p$$

$$B_{stř} = \frac{\phi}{l \cdot \tau_p} = \frac{\phi \cdot 2p}{\pi \cdot D \cdot l}$$

Pro obvodovou rychlost platí:

$$v = \omega \cdot \frac{D}{2}$$

Potom má vztah pro indukované napětí konečný tvar:

$$U_i = \frac{\phi \cdot 2p}{\pi \cdot D \cdot l} \cdot l \cdot \omega \cdot \frac{D}{2} \cdot \frac{N}{2a} = \frac{p \cdot N}{2a \cdot \pi} \cdot \phi \cdot \omega = k \cdot \phi \cdot \omega$$

Kde **k** je konstanta stroje

$$k = \frac{p \cdot N}{2a \cdot \pi}$$

Pro definici momentu stejnosměrného stroje musíme znát sílu působící na vodič, jímž protéká proud i , v homogenním magnetickém poli s indukcí B , která je kolmá na směr vodiče.

$$F = B \cdot l \cdot i$$

Proud je rozložen do paralelních větví. Každým vodičem tedy protéká proud:

$$i = \frac{I}{2a}$$

Střední hodnota magnetické indukce je dána vztahem:

$$B_{stř} = \frac{\phi}{l \cdot \tau_p}$$

Síla F působí na poloměru $\frac{D}{2}$ (viz Obr. 21). Pólovou rozteč τ_p můžeme vyjádřit vztahem:

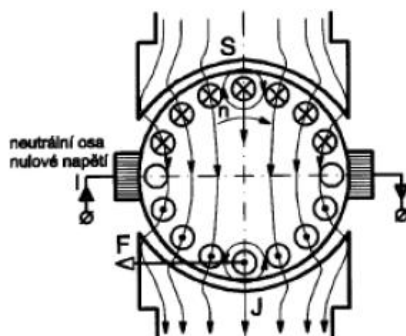
$$\tau_p = \frac{\pi \cdot D}{2p}$$

Výsledný vztah pro točivý moment má tedy tvar:

$$M = F \cdot \frac{D}{2} \cdot N = \frac{\phi \cdot 2p}{l \cdot \pi \cdot D} \cdot l \cdot \frac{I}{2a} \cdot N \cdot \frac{D}{2} = \frac{1}{2\pi} \cdot N \cdot \frac{p}{a} \cdot \phi \cdot I = k \cdot \phi \cdot I,$$

kde k je konstanta stroje:

$$k = \frac{p \cdot N}{2a \cdot \pi}$$

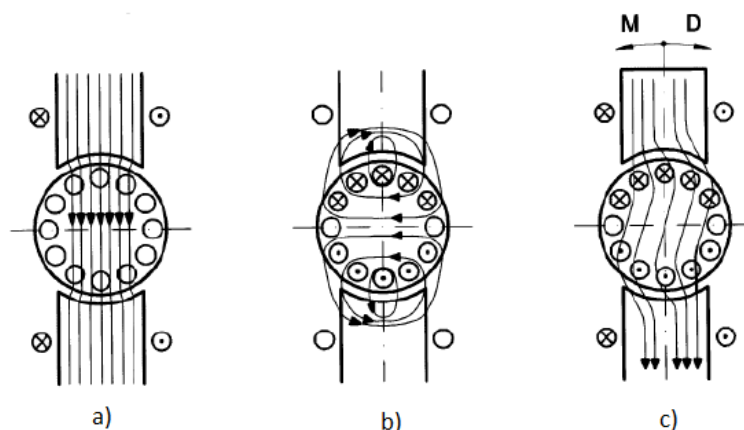


Obr. 21 Působení síly na vodiče kotvy stejnosměrného motoru [14]

[10][11][12][13][14]

7.5 Reakce kotvy

Otáčením rotoru v magnetickém poli statoru se v jeho vinutí indukuje proud. Tok tohoto proudu v rotoru zase vyvolává magnetické pole kotvy. Tomuto magnetickému poli kotvy se říká reakce kotvy. Magnetické pole statoru a reakce kotvy se spolu skládají ve výsledné magnetické pole. Na Obr. 22 je znázorněno skládání magnetických polí. Magnetické pole statoru a se skládá se statickým polem rotoru b (reakce kotvy - vinutí se sice otáčí, ale kartáče komutátoru jsou stále na stejném místě) ve výsledné magnetické pole c .



Obr. 22 Vliv reakce kotvy na magnetické pole statoru [14]

Pole kotvy je statické. Vzniká jenom pod pólovými nástavci statoru. Mezera mezi póly totiž představuje velký magnetický odpor. Výsledné magnetické pole se sčítá z obou polí a je vlivem reakce kotvy deformováno, zeslabeno a má posunutou magnetickou neutrálu vůči geometrické ve směru otáčení (generátor) nebo proti směru otáčení (motor). V pravé polovině dochází k přesycení části magnetického obvodu, což způsobí zvýšení magnetického odporu. Deformace výsledného magnetického toku ve vzduchové mezeře a posunutí magnetické neutrály má nepříznivý vliv na komutaci. Je vhodné tedy pole kotvy kompenzovat vhodně umístěným kompenzačním vinutím. Kompenzační vinutí se umísťuje do drážek pólových nástavců a zapojuje se do série s kotvou. Vinutí je navrženo tak, aby se protékajícím proudem vytvořilo pole stejně velké, ale opačného směru než je reakce kotvy. Nepříznivý vliv reakce kotvy se tímto vyruší. Výroba kompenzačních vinutí je drahá a vyplatí se až u velkých strojů.

[10][11][12][13][14]

8 MĚŘENÍ STEJNOSMĚRNÝCH MOTORŮ ATAS

Cílem praktické části této bakalářské práce bylo změřit termovizní kamerou oteplení jednotlivých částí tří stejnosměrných motorů firmy ATAS. Tyto motory byly vybrány na základě žádosti firmy ATAS. Hlavním cílem bylo porovnat oteplení komutátorů a maximální hodnotu teploty komutátoru za chodu motoru, což není klasickými dotykovými teplotními čidly možné (motor by se musel při každé sérii měření zastavit a hodnota teploty změřit, čímž by vznikaly chyby ochlazováním komutátoru při zastaveném motoru). Dalším požadavkem bylo změřit oteplení tlumivky, která je umístěna v krytu komutátoru. Tlumivka slouží ke stínění elektromagnetického rušení, způsobeného vlivem komutace. Tlumivka ale nebyla dostatečně dobře viditelná z měřeného pohledu, proto naměřené hodnoty teploty jsou spíše informativního charakteru a jejich přesnost nebude dostatečná. Byla schovaná v krytu a při zvoleném úhlu pohledu kamery na motor byla viditelná jenom její část.

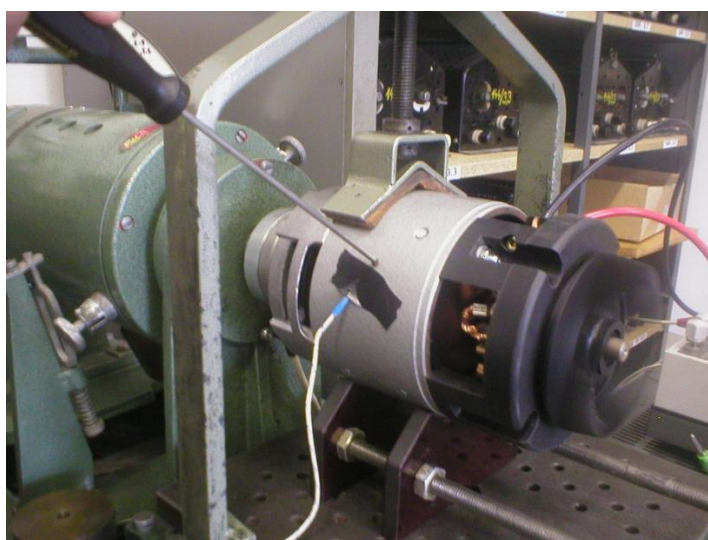


Obr. 23 Umístění tlumivky v krytu komutátoru

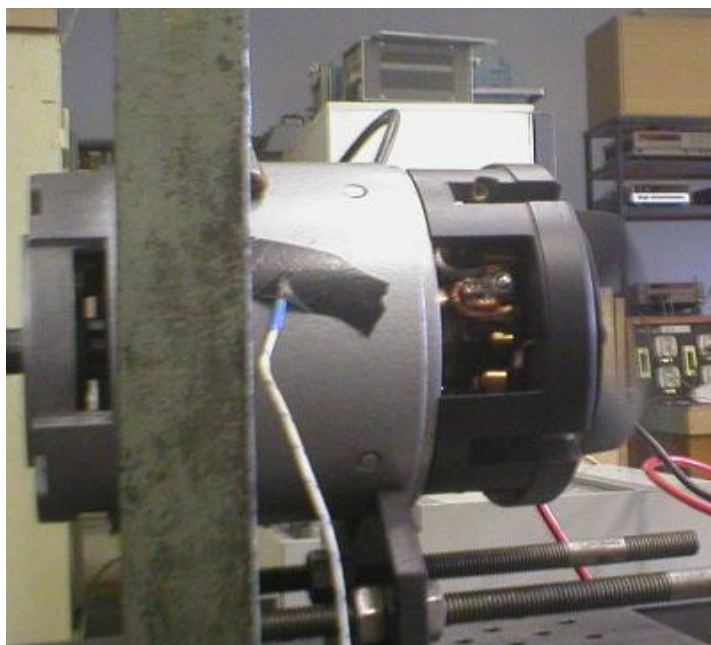
Měření tří konstrukčně odlišných stejnosměrných motorů probíhalo v prototypové laboratoři firmy ATAS elektromotory Náchod a.s. Stejnosměrné motory se lišily především materiálem použitým na komutátorový kryt a materiálem použitým na ventilátor.

8.1 Metoda měření

Měření bylo provedeno jako hodinová zkouška stejnosměrného motoru při zatěžovacím momentu $M=1,6 \text{ Nm}$. Termosnímkami byly pořizovány ve dvouminutových intervalech a pokaždé byla změřena teplota statoru termočlánkem. První snímek a měření teploty bylo provedeno ještě před spuštěním motoru. Na statoru byla umístěna černá páska se známou emisivitou $\varepsilon=0,95$. Tato páska byla použita proto, aby bylo možné v následném vyhodnocování snímků v programu SAT Report srovnat hodnotu teploty pásky a statoru a zjistit tak emisivitu povrchu statoru.



Obr. 24 Rozmístění měřicích bodů na statoru motoru na vzorku 3



Obr. 25 Pohled termokamery na motor 3

8.2 Vyhodnocení termosnímků v programu SAT Report

Jednotlivé pořízené termosnímký byly naimportovány do programu SAT Report standardně dodávaného k termokameře SH-67/HY-6800.

Na snímcích byly umístěny oblasti, ve kterých probíhalo měření. Ve většině případů byly zvoleny obdélníkové oblasti a byla brána jejich průměrná teplota. Měření čidlem nebylo možné provádět při všech měřeních na stejném místě. Pokud by byly použity pro měření body, bylo by měření ovlivněno velkou chybou. Teplota se totiž na povrchu statoru mění. Proto bylo místo bodů použito oblastí, které ohraničovaly měřicí body termočládku a zvolena průměrná teplota. Pouze při měření oteplení tlumivky bylo zvoleno bodové měření, z důvodu velmi malé viditelné části této tlumivky. Měření teploty tlumivky je proto více ovlivněno chybami, ale postačí pro představu průběhu jejího oteplení v čase.

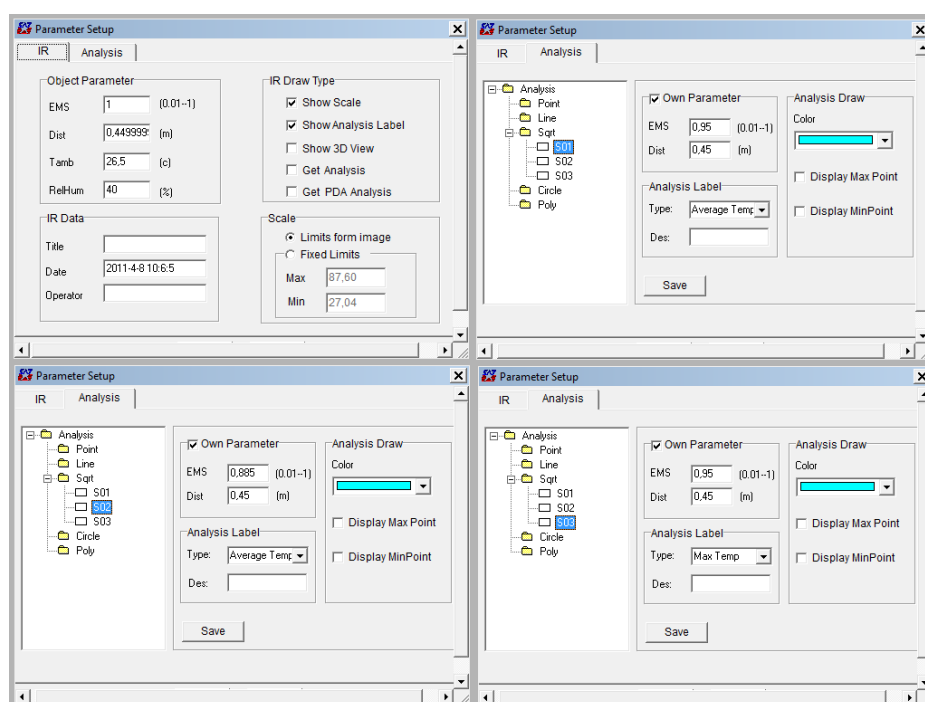
Ve zvoleném termosnímku je nutné nastavit parametry prostředí. Teplota prostředí byla měřena rtuťovým teploměrem v laboratoři a dosahovala hodnoty $\vartheta_0=26,5^\circ\text{C}$. Teplota byla stejná po celou dobu měření. Zjištěná relativní vlhkost prostředí $\text{RH}=40\%$. Dále bylo nutné změřit vzdálenost, ve které ležela optická čočka kamery od měřeného motoru. Tato vzdálenost byla 0,45 m.

Pro správné stanovení teploty měřených míst je nutné správně zvolit emisivitu materiálu měřeného bodu. Pro stanovení emisivity statoru byla na něj umístěna černá elektrotechnická páska se známou emisivitou (uváděná emisivita $\varepsilon_1=0,95$). Emisivita materiálu statoru potom byla nastavena tak, aby se teploty statoru a černé pásky lišily co nejméně. Výsledná emisivita materiálu statoru je $\varepsilon_2=0,885$. Pro stanovení emisivity komutátorových sběracích uhlíků byly použity tabulky. Sběrací uhlíky jsou z černého uhlíku a v tabulkách je uváděna hodnota emisivity $\varepsilon_3=0,95$. Materiál tlumivky stejnosměrného motoru je lakovaná měď. Ta má odlišnou emisivitu než měď čistá. Laky používané na vinutí cívek jsou vyráběny tak, aby se jejich emisivita co nejvíce blížila k hodnotě 1. Měděný drát je ale navinut a povrch tedy není dokonale rovný.

Emisivita lakované mědi tlumivky se tedy pohybuje v intervalu 0,9-1. Hodnota emisivity tlumivky byla stanovena $\epsilon_4=0,95$. [9][17][18]

Stanovené hodnoty emisivity lze brát za správné. Emisivita je vlastnost materiálu, která se mění s teplotou. Tato změna ale není tak velká a může být zanedbána. Uvažují se tedy hodnoty emisivity pro všechny teploty stejné.

Stator motoru byl také měřen teplotním čidlem. Při porovnání hodnot teplot naměřených čidlem a termokamerou je patrné, že hodnoty se pro stejný okamžik a stejné místo měření podstatně liší. Měření teplotním čidlem totiž bylo ovlivněno prouděním vzduchu ventilátoru a nedokonalým stykem s měřeným objektem (na čidlo byla použita vazelína, která zlepšuje přestup tepla z jednoho materiálu do druhého). Při měření čidlem je také třeba počkat na ustálení měřené teploty. Toto může trvat několik vteřin. Není ale možné čekat do úplně ustálení, protože teplota statoru se také s časem mění (tento efekt je zejména patrný na začátku měření, kdy se motor teprve zahřívá na pracovní teplotu).



Obr. 26 Příklad nastavení parametrů motoru 1

8.3 Porovnání naměřených hodnot termočlánkem a termokamerou

Měření termokamerou také není bez chyby. Na výsledné hodnoty má vliv parazitní záření z okolních předmětů, které se může odrážet od měřeného objektu. Tento vliv ale nebude tak silný jako ochlazování čidla proudem vzduchu. Poblíž měřených částí motorů se totiž nevyskytovaly žádné předměty s vyšší teplotou. Focení termosnímků probíhalo pouze pokud se u motoru nevyskytovala žádná osoba (teplota lidského těla by ovlivnila měření).

Na základě těchto poznatků je brána za přesnější metodu metoda bezdotykového měření termokamerou. Absolutní a relativní chyba teplotního čidla je uvedena v tabulce. Rovněž jsou přiloženy grafy relativních chyb čidla.

Absolutní $\Delta\vartheta$ a relativní $\delta\vartheta$ chyby byly spočítány dle následujících vztahů:

$$\Delta\vartheta = \vartheta_{termokamera} - \vartheta_{\check{c}idlo}$$

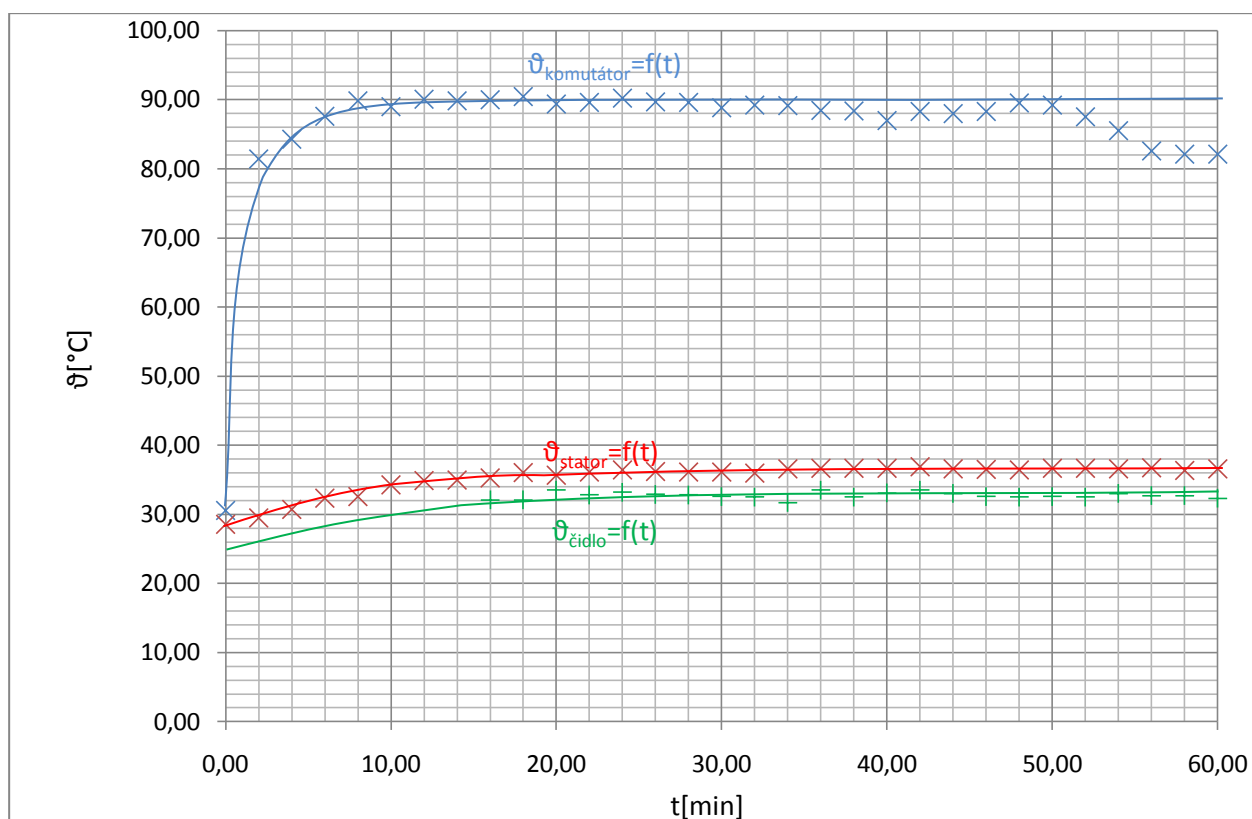
$$\delta\vartheta = \frac{\Delta\vartheta}{\vartheta_{termokamera}} \cdot 100$$

Jednotlivé průběhy oteplení částí tří vzorků (konstrukčně se lišících motorů) jsou vyobrazeny na grafech.

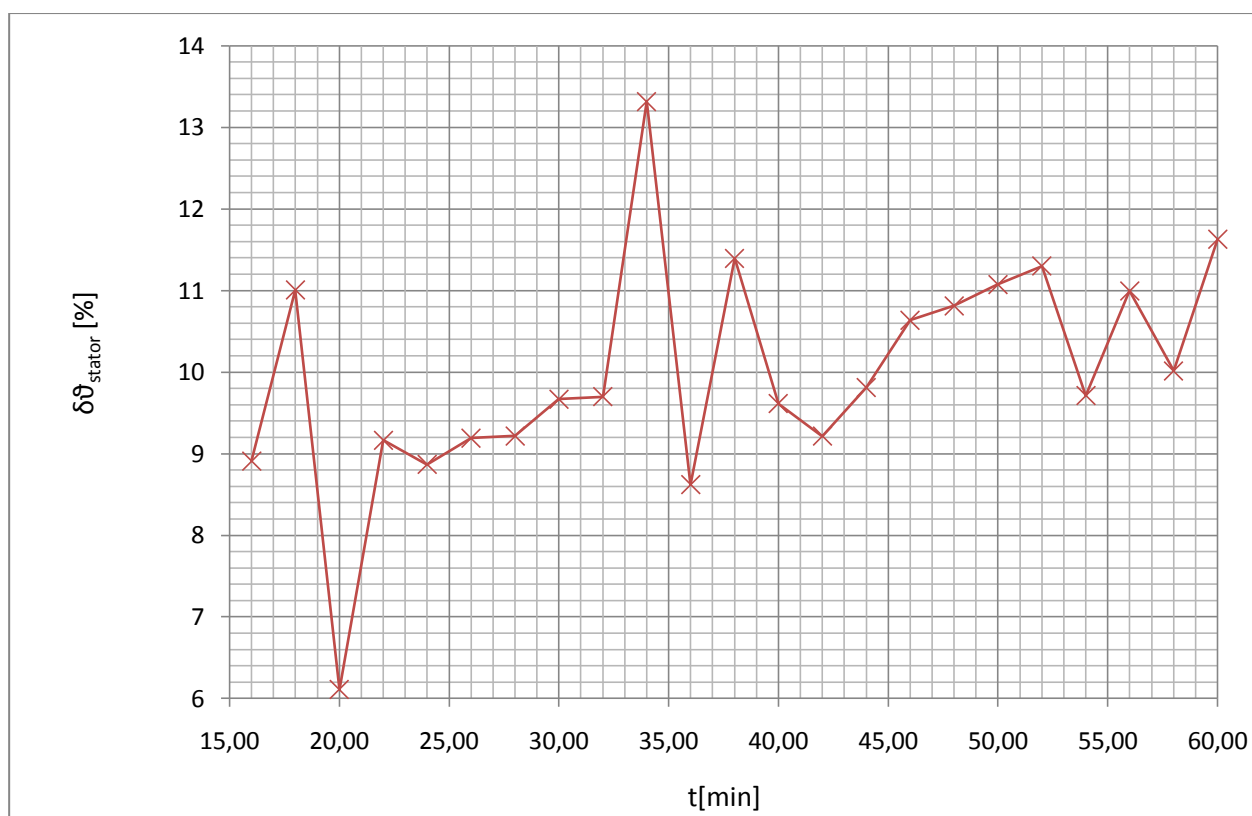
8.4 Vyhodnocení výsledků

Naměřené hodnoty teplot čidlem a termokamerou jsou uvedeny v tabulkách pro jednotlivé vzorky motorů. Dále jsou vytvořeny oteplovací charakteristiky pro jednotlivá měřená místa a metody. Oteplovací charakteristika má logaritmický tvar. Na některých průbězích je možné ke konci měření pozorovat snížení teploty. Tento jev není zahrnut do logaritmického proložení naměřených hodnot. Toto snížení teploty mohlo být způsobeno chybou při měření a výsledná oteplovací charakteristika by tak byla zkreslená.

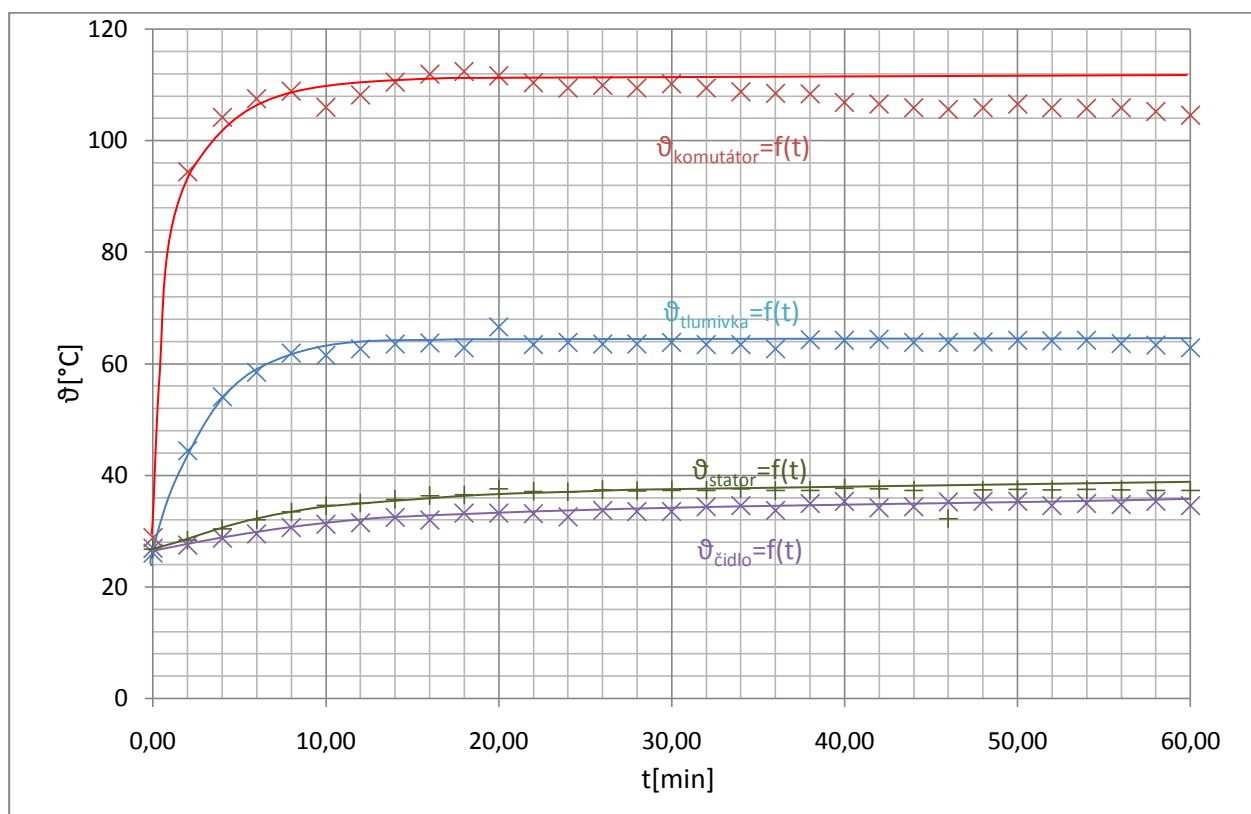
Dále byly vytvořeny grafy relativních chyb měření teplotním čidlem.



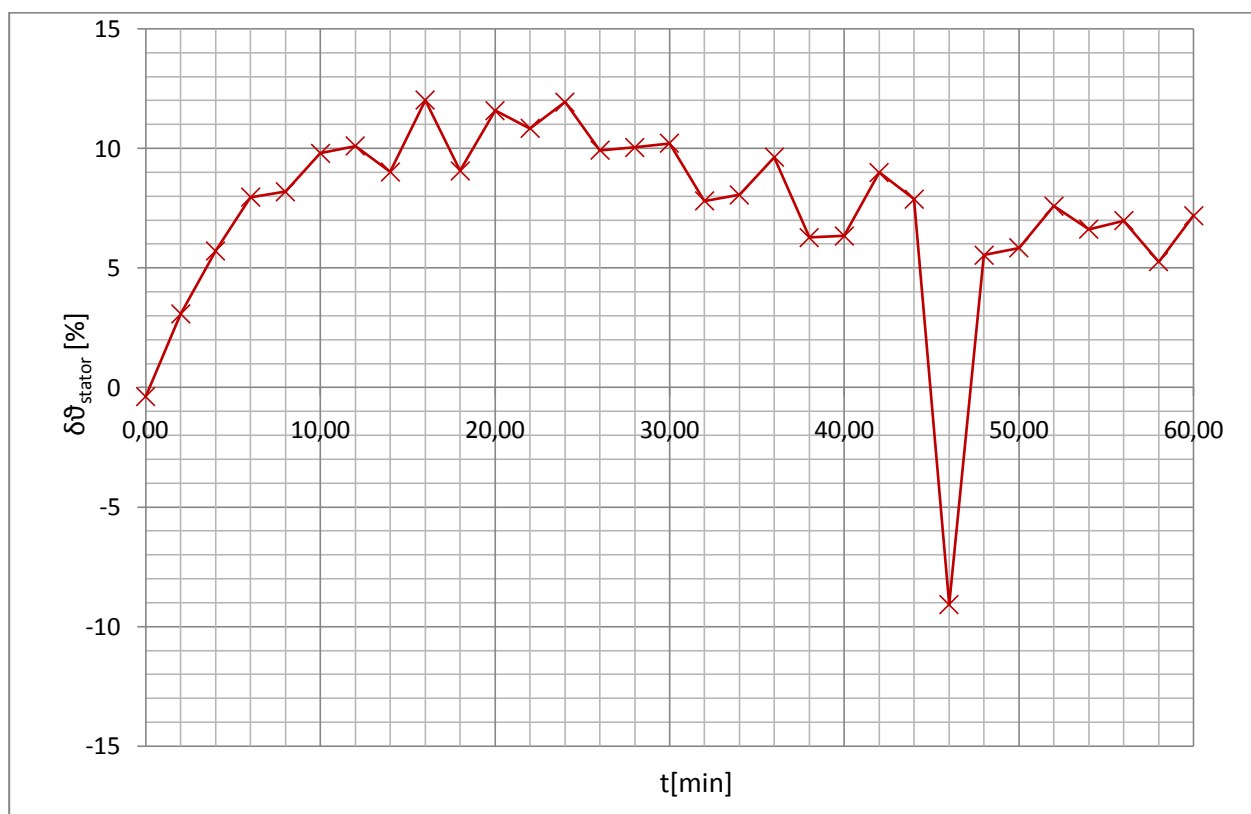
Graf 1 Naměřené průběhy oteplení motoru 1



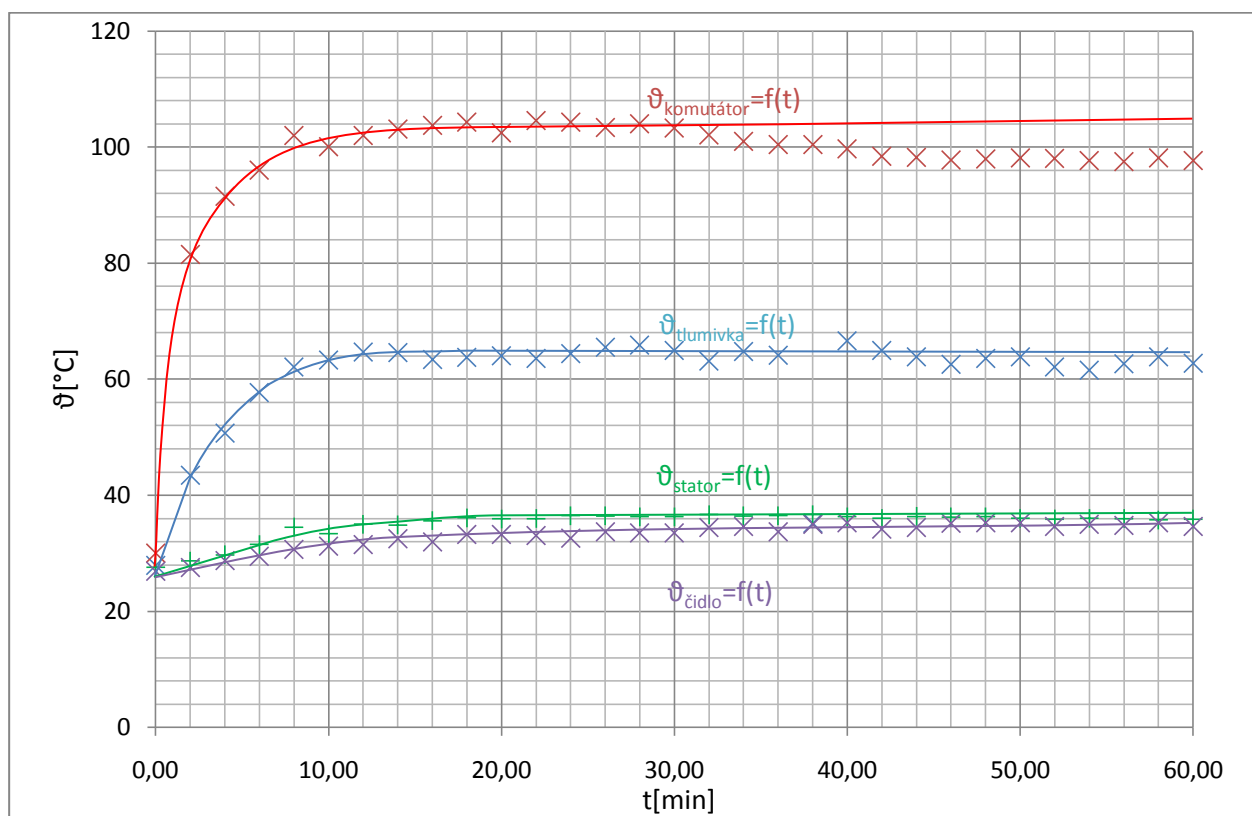
Graf 2 Relativní chyba teplotního čidla pro motor 1



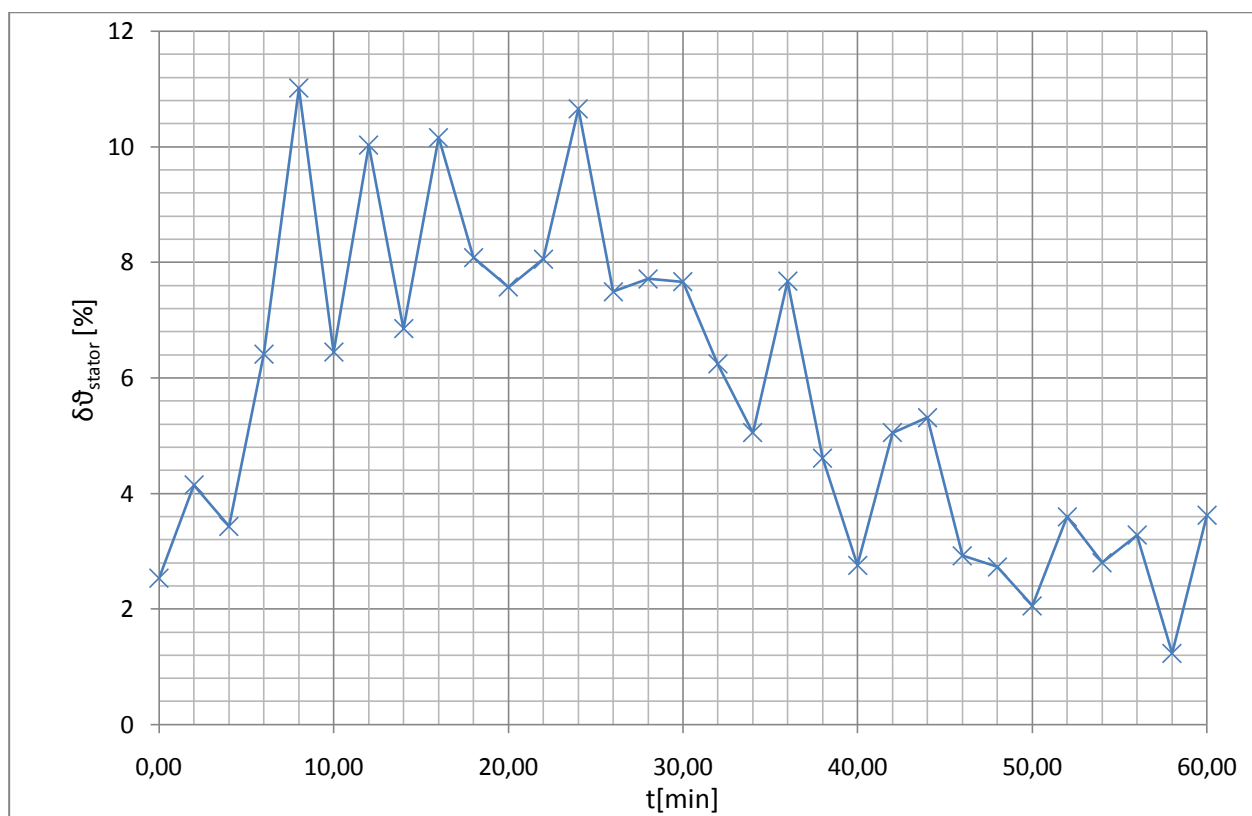
Graf 3 Naměřené průběhy oteplení motoru 2



Graf 4 Relativní chyba teplotního čidla pro motor 2



Graf 5 Naměřené hodnoty oteplení pro motor 3



Graf 6 Relativní chyba teplotního čidla pro motor 3

Měření teploty statoru teplotním čidlem u vzorku 1 bylo zaznamenáváno až od 16 minut od spuštění motoru. Teplota statoru od počátku zkoušky byla totiž měřena jiným teplotním čidlem, které se ukázalo jako velmi nepřesné a následně bylo vyměněno za jiné. Proto nejsou ani tyto špatné hodnoty teplot brány v úvahu při sestavování oteplovací charakteristiky (Graf 1). Relativní chyba čidla (Graf 2) je rovněž sestavena pouze pro přesnější teplotní čidlo, použité pro zbytek měření.

Jednotlivé naměřené hodnoty teploty vynesené v grafech jsou proloženy exponenciálou. Změřené teploty komutátoru k závěru hodinové zkoušky poklesly. Tento pokles ale není zahrnut do proložení hodnot. Proložení odpovídá pouze oteplovací charakteristice exponenciálního průběhu. Snížení teploty na závěr zkoušky mohlo být způsobeno řadou vlivů. Největší vliv na pokles teploty měl fakt, že uhlíkové kartáče komutátoru nedoléhaly na lamely dostatečně přesně a mezi lamelami a kartáči vznikalo při komutaci množství oblouků, které zahřívaly komutátor. Během chodu se kartáče obrušovaly a dosedaly na lamely přesněji, přestalo vznikat takové množství elektrických oblouků a teplota komutátoru poklesla.

Z výsledků je jednoznačně patrné, že plastový kryt komutátoru v kombinaci, použitý u vzorku 2, výrazně zhoršuje ochlazování komutátoru. Plasty totiž nevedou teplo tak dobře jako kovy. Maximální teplota komutátoru běžného motoru (vzorek 1) byla naměřena $\vartheta_1=90,44^{\circ}\text{C}$, u motoru s plastovým krytem (vzorek 2) $\vartheta_2=112,36^{\circ}\text{C}$. Třetí měřený motor měl také plastový kryt komutátoru, ale ventilátor, upevněný na hřídeli motoru, byl z hliníku. Hliník je oproti plastu velmi dobrý tepelný vodič, dobře tedy odebíral teplo z komutátoru a tím jej ochlazoval. Maximální teplota komutátoru (vzorek 3) byla $\vartheta_3=104,56^{\circ}\text{C}$.

Tabulky naměřených hodnot pro jednotlivé motory jsou uvedeny v příloze bakalářské práce. Dále jsou zde uvedeny termosnímky z počátku oteplovací charakteristiky (po dvou minutách od 0 do 12 minut), snímek s maximální teplotou komutátoru a závěrečný snímek (po 60 minutách zkoušky).

9 ZÁVĚR

V této bakalářské práci byly přiblíženy základní tepelné zákony. Práce obsahuje seznámení s typy bezkontaktním měřicích přístrojů a manuál pro práci s termovizní kamerou SAT SH-67/HY-6800. Tato termovizní kamera je vhodná pro měření oteplení elektrických strojů. Její provedení zaručuje dlouhou životnost i v prašném a vlhkém prostředí, což bývá případ právě elektrotechnického průmyslu. S termovizní kamerou je možné zjistit technický stav zařízení již na místě a umožňuje tak obsluhu zvolení dalších kroků. Bez nutnosti využití dalšího softwaru můžeme měřit oteplení na různých místech zařízení, vytvářet analýzy a odhalovat případné poruchy technického stavu. Po zjištění místa poruchy můžeme pořízené termosnímký dále upravovat v programu SAT Report.

V programu SAT Report byly vyzkoušeny možnosti analýz pořízených termovizních snímků. Dle získaných zkušeností je ovládání tohoto programu nepříliš uživatelsky příjemné a trvá delší dobu, než se člověk seznámí alespoň se základními funkcemi. Na druhou stranu po získání určitých zkušeností je práce v tomto prostředí poměrně efektivní a zjišťování míst s nadměrným oteplením, nebo vytvoření komplexnější analýzy je poté otázkou několika minut. Tento program je vhodný k vytváření technických zpráv a rozboru termosnímků, na které už nestačí pouhý snímek v kameře. Podrobnější analýzou je možné zjistit i místa možného budoucího defektu, která se neodlišují teplotou oproti okolí nijak výrazně a v kameře je nemusíme rozeznat. K tomuto slouží nástroje jako dodatečná změna teplotního rozsahu, zaostření, bodová, lineární, plošná a izotermická analýza.

Hlavní náplní bakalářské práce bylo změřit oteplení komutátorů tří stejnosměrných motorů firmy ATAS elektromotory Náchod a.s. Důvodem bylo ověření nadměrného zahřívání prototypového motoru s plastovým krytem komutátoru. U něj byla naměřena maximální teplota komutátoru $\vartheta_2=112,36^{\circ}\text{C}$. Komutátor běžného motoru se zahřál na maximální teplotu $\vartheta_1=90,44^{\circ}\text{C}$. Lze pozorovat, že plastový kryt zhoršil chlazení komutátoru natolik, že se zahřál na teplotu mnohem vyšší (rozdíl teplot je $21,92^{\circ}\text{C}$). Třetí měřený motor, taktéž s plastovým krytem komutátoru, byl navržen s hliníkovým ventilátorem, aby zlepšil odvod tepla z komutátoru. U něj byla naměřena maximální teplota $\vartheta_3=104,56^{\circ}\text{C}$. Tato teplota je o $7,8^{\circ}\text{C}$ nižší než u motoru 2. Jeho teplota ke konci zkoušky klesla pod hranici 100°C . Dalším požadavkem bylo změření teploty tlumivky. Bohužel při zvoleném úhlu kamery byla viditelná jenom její malá část, takže hodnoty teplot nejsou přesné. Pro informativnost ale mohou posloužit. Změřené hodnoty jsou uvedeny v jednotlivých tabulkách a vyobrazeny v grafech.

LITERATURA

- [1] VAVŘIČKA, Roman. Bezdotykové měření teploty. In *Bezdotykové měření teploty* [online]. Praha : [s.n.], [200?] [cit. 2010-12-06]. Dostupné z WWW: <<http://utp.fs.cvut.cz/vz/clanky/104.pdf>>.
- [2] Omega: *Váš zdroj informací o měření a regulaci* [online]. Copyright 1995-2005 [cit. 2010-12-06]. [Http://www.omegaeng.cz](http://www.omegaeng.cz). Dostupné z WWW: <<http://www.omegaeng.cz/kontakty.html>>.
- [3] *Adambenda.net : výzkum a vývoj nových energetických zdrojů, vědecké aktivity pro globální přínos, zkušenosti a praktické informace* [online]. 23. února 2008, 14. září 2009 [cit. 2010-12-06]. adambenda.net. Dostupné z WWW: <<http://adambenda.net/index.php?id=10030>>.
- [4] FLIR [online]. 2010 [cit. 2010-12-06]. www.flir.com. Dostupné z WWW: <<http://www.flir.com/thermography/eurasia/en/content/?id=11430>>.
- [5] Termovize [online]. c2010 [cit. 2010-12-06]. www.termovize.com. Dostupné z WWW: <<http://www.termovize.com/ukazky-kontrola-rozvadecu/>>.
- [6] Stockton : *Infrared Thermographic Services* [online]. 2005 [cit. 2010-12-06]. www.stocktoninfrared.com. Dostupné z WWW: <<http://www.stocktoninfrared.com/PUBLISHED/HTML/Beyond%20the%20Usual%20Applications%20for%20Infrared%20Thermography.htm>>.
- [7] *Automa : časopis pro automatizační techniku* [online]. 2010 [cit. 2010-12-06]. www.odbornecasopisy.cz. Dostupné z WWW: <http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=28673>.
- [8] ČEVELA, Lubomír. *Root.cz* [online]. 4. 5. 2000 [cit. 2010-12-06]. www.root.cz. Dostupné z WWW: <<http://www.root.cz/clanky/vymena-dat-mezí-cad-systemy/>>.
- [9] LÍBAL, Jan. *Využití termovizní kamery pro měření teploty elektrických strojů*. Brno, 2009. 68 s. FEKT VUT v Brně. Vedoucí diplomové práce doc. Dr. Ing. Hana Kuchyňková.
- [10] NOVÁČEK, Jiří. *Kalibrace termovizního systému (kamery) Fluke Ti30*. Brno, 2007. 41 s. Masarykova univerzita, Přírodovědecká fakulta. Vedoucí bakalářské práce MUDr. Věra Maryšková.
- [11] KADLEC, K. *Přednáška z měřicí techniky. Elektronický učební text*. Praha, 2009. 22s. VŠCHT Praha. Dostupné z WWW: <<http://www.vscht.cz/ufmt/kadleck.html>>.
- [12] Stejnoseměrné stroje: Motory. In *Stejnoseměrné stroje (motory)* [online]. [s.l.] : [s.n.], 2011 [cit. 2011-05-04]. Dostupné z WWW: <<http://feil.vsb.cz/kat430/old/Studium/Materialy/VS/kap22.pdf>>.
- [13] *Elektrika.cz* [online]. 10.02.2010 [cit. 2011-05-04]. Popis a působení stejnosměrného stroje. Dostupné z WWW: <<http://elektrika.cz/data/clanky/stejnosmerne-stroje>>.
- [14] Stejnoseměrné stroje. In *Stejnoseměrné stroje* [online]. Ostrava : VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2003 [cit. 2011-05-04]. Dostupné z WWW: <http://home.zcu.cz/~tvystein/downloads/+ES/ss_stroje%5B1%5D.pdf>. ISBN 80-247-0314-3.
- [15] *DC Electric Motors* [online]. 2010 [cit. 2011-05-05]. Hyperphysics. Dostupné z WWW: <<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/magnetic/motdc.html#c1>>.
- [16] HALFAR, T. *Využití termovizní kamery pro měření teploty elektrických strojů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 36 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Dr. Ing. Hana Kuchyňková
- [17] *Newport.cz* [online]. 2005 [cit. 2011-05-19]. Tabulka emsivity nekovových materiálů. Dostupné z WWW: <<http://www.newport.cz/techinfo/emisnekovy.html>>.
- [18] *Newport.cz* [online]. 2005 [cit. 2011-05-19]. Tabulka emsivity kovových materiálů. Dostupné z WWW: <<http://www.newport.cz/techinfo/emiskovy.html>>.

Seznam příloh

<i>Příloha 1</i> Tabulka naměřených a vypočtených hodnot teplot vzorku 1	47
<i>Příloha 2</i> Tabulka naměřených a vypočtených hodnot teplot vzorku 2	48
<i>Příloha 3</i> Tabulka naměřených a vypočtených hodnot teplot pro vzorek 3	49
<i>Příloha 4</i> Motor 1; $t=0\text{min}$	50
<i>Příloha 5</i> Motor 1; $t=2\text{min}$	50
<i>Příloha 6</i> Motor 1; $t=4\text{min}$	50
<i>Příloha 7</i> Motor 1; $t=6\text{min}$	51
<i>Příloha 8</i> Motor 1; $t=8\text{min}$	51
<i>Příloha 9</i> Motor 1; $t=10\text{min}$	51
<i>Příloha 10</i> Motor 1; $t=12\text{min}$	52
<i>Příloha 11</i> Motor 1; $t=18\text{min}$; $\vartheta_{\text{komutátor, max}}=90,44^{\circ}\text{C}$	52
<i>Příloha 12</i> Motor 1; $t=60\text{min}$	52
<i>Příloha 13</i> Motor 2; $t=0\text{min}$	53
<i>Příloha 14</i> Motor 2; $t=2\text{min}$	53
<i>Příloha 15</i> Motor 2; $t=4\text{min}$	53
<i>Příloha 16</i> Motor 2; $t=6\text{min}$	54
<i>Příloha 17</i> Motor 2; $t=8\text{min}$	54
<i>Příloha 18</i> Motor 2; $t=10\text{min}$	54
<i>Příloha 19</i> Motor 2; $t=12\text{min}$	55
<i>Příloha 20</i> Motor 2; $t=18\text{min}$; $\vartheta_{\text{komutátor, max}}=112,36^{\circ}\text{C}$	55
<i>Příloha 21</i> Motor 2; $t=60\text{min}$	55
<i>Příloha 22</i> Motor 3; $t=0\text{min}$	56
<i>Příloha 23</i> Motor 3; $t=2\text{min}$	56
<i>Příloha 24</i> Motor 3; $t=4\text{min}$	56
<i>Příloha 25</i> Motor 3; $t=6\text{min}$	57
<i>Příloha 26</i> Motor 3; $t=8\text{min}$	57
<i>Příloha 27</i> Motor 3; $t=10\text{min}$	57
<i>Příloha 28</i> Motor 3; $t=12\text{min}$	58
<i>Příloha 29</i> Motor 3; $t=22\text{min}$; $\vartheta_{\text{komutátor, max}}=104,56^{\circ}\text{C}$	58
<i>Příloha 30</i> Motor 3; $t=60\text{min}$	58

t	$\vartheta_{\text{čidla}}$	$\vartheta_{\text{páska}}$	$\vartheta_{\text{stator}}$	$\vartheta_{\text{komutátor}}$	$\Delta\vartheta_{\text{stator}}$	$\delta\vartheta_{\text{stator}}$
[min]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[%]
0,00		28,45	28,59	30,58		
2,00		28,70	29,44	81,44		
4,00		30,77	30,72	84,28		
6,00		32,32	32,30	87,62		
8,00		32,67	32,56	89,86		
10,00		34,31	34,26	88,99		
12,00		34,95	34,86	90,05		
14,00		35,15	34,95	89,86		
16,00	32,10	35,49	35,24	89,98	3,14	8,91
18,00	32,10	36,10	36,07	90,44	3,97	11,01
20,00	33,50	35,72	35,68	89,41	2,18	6,11
22,00	32,80	36,25	36,11	89,58	3,31	9,17
24,00	33,20	36,43	36,43	90,19	3,23	8,87
26,00	32,90	36,25	36,23	89,68	3,33	9,19
28,00	32,80	36,27	36,13	89,64	3,33	9,22
30,00	32,60	36,13	36,09	88,80	3,49	9,67
32,00	32,50	36,02	35,99	89,19	3,49	9,70
34,00	31,70	36,48	36,57	89,16	4,87	13,32
36,00	33,50	36,65	36,66	88,48	3,16	8,62
38,00	32,50	36,62	36,68	88,40	4,18	11,40
40,00	33,10	36,55	36,62	86,95	3,52	9,61
42,00	33,50	36,81	36,90	88,33	3,40	9,21
44,00	33,00	36,50	36,59	87,98	3,59	9,81
46,00	32,60	36,40	36,48	88,26	3,88	10,64
48,00	32,50	36,31	36,44	89,52	3,94	10,81
50,00	32,60	36,68	36,66	89,21	4,06	11,07
52,00	32,50	36,64	36,64	87,51	4,14	11,30
54,00	33,00	36,52	36,55	85,52	3,55	9,71
56,00	32,70	36,73	36,74	82,60	4,04	11,00
58,00	32,70	36,41	36,34	82,13	3,64	10,02
60,00	32,30	36,51	36,55	82,11	4,25	11,63

Příloha 1 Tabulka naměřených a vypočtených hodnot teplot vzorku 1

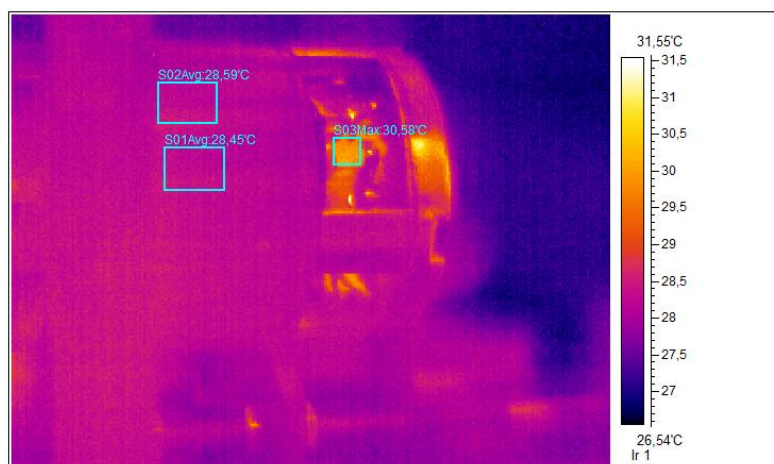
t	$\vartheta_{\text{čidla}}$	$\vartheta_{\text{páska}}$	$\vartheta_{\text{stator}}$	$\vartheta_{\text{komutátor}}$	$\vartheta_{\text{tlumivka}}$	$\Delta\vartheta_{\text{stator}}$	$\delta\vartheta_{\text{stator}}$
[min]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[%]
0,00	26,90	25,56	26,80	28,87	26,06	-0,10	-0,37
2,00	27,50	28,15	28,37	94,40	44,40	0,87	3,07
4,00	28,70	29,82	30,44	104,22	54,06	1,74	5,72
6,00	29,50	31,57	32,05	107,57	58,51	2,55	7,96
8,00	30,70	53,05	33,44	108,82	61,94	2,74	8,19
10,00	31,20	54,25	34,59	105,98	61,53	3,39	9,80
12,00	31,50	54,97	35,04	108,21	62,69	3,54	10,10
14,00	32,50	35,58	35,72	110,47	63,52	3,22	9,01
16,00	32,00	36,28	36,37	111,96	63,72	4,37	12,02
18,00	33,20	36,49	36,51	112,36	62,89	3,31	9,07
20,00	33,20	37,45	37,55	111,61	66,59	4,35	11,58
22,00	33,10	37,13	37,12	110,44	63,41	4,02	10,83
24,00	32,60	37,01	37,02	109,48	63,85	4,42	11,94
26,00	33,70	37,41	37,41	109,93	63,59	3,71	9,92
28,00	33,50	37,26	37,24	109,42	63,54	3,74	10,04
30,00	33,50	37,32	37,31	110,17	63,79	3,81	10,21
32,00	34,40	37,31	37,31	109,46	63,44	2,91	7,80
34,00	34,60	37,60	37,63	108,81	63,43	3,03	8,05
36,00	33,70	37,28	37,29	108,49	62,67	3,59	9,63
38,00	35,00	37,35	37,34	108,36	64,32	2,34	6,27
40,00	35,30	37,70	37,69	106,83	64,22	2,39	6,34
42,00	34,20	37,56	37,58	106,53	64,38	3,38	8,99
44,00	34,40	37,33	37,34	105,93	63,80	2,94	7,87
46,00	35,20	37,23	32,27	105,60	63,80	-2,93	-9,08
48,00	35,30	37,37	37,37	105,88	63,95	2,07	5,54
50,00	35,30	37,43	37,49	106,58	64,19	2,19	5,84
52,00	34,60	37,39	37,44	105,89	64,08	2,84	7,59
54,00	35,00	37,43	37,48	105,78	64,26	2,48	6,62
56,00	34,80	37,37	37,41	105,86	63,68	2,61	6,98
58,00	35,30	37,21	37,26	105,23	63,40	1,96	5,26
60,00	34,60	37,17	37,28	104,53	62,89	2,68	7,19

Příloha 2 Tabulka naměřených a vypočtených hodnot teplot vzorku 2

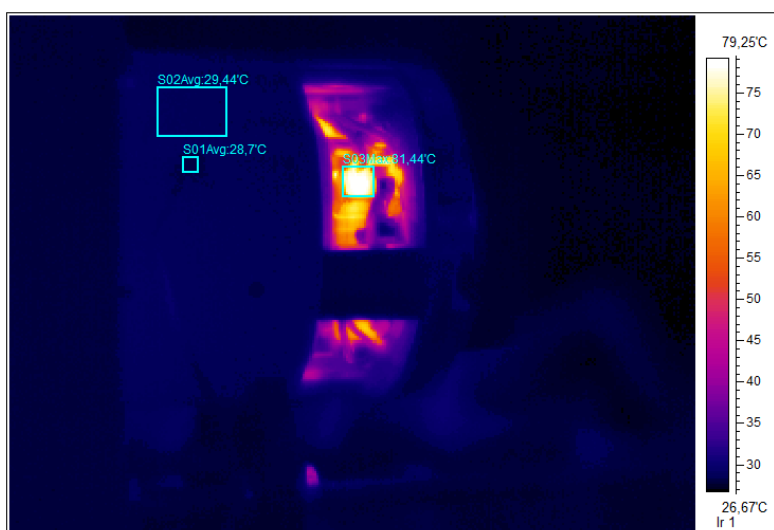
t	$\vartheta_{\text{čidlo}}$	$\vartheta_{\text{páska}}$	$\vartheta_{\text{stator}}$	$\vartheta_{\text{komutátor}}$	$\vartheta_{\text{tlumivka}}$	$\Delta\vartheta_{\text{stator}}$	$\delta\vartheta_{\text{stator}}$
[min]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[%]
0,00	26,90	27,41	27,60	30,02	27,87	0,70	2,54
2,00	27,50	28,32	28,69	81,47	43,45	1,19	4,15
4,00	28,70	29,55	29,72	91,57	50,67	1,02	3,43
6,00	29,50	31,29	31,52	96,05	57,66	2,02	6,41
8,00	30,70	34,47	34,50	102,02	62,09	3,80	11,01
10,00	31,20	33,39	33,35	100,09	63,30	2,15	6,45
12,00	31,50	34,77	35,01	102,03	64,67	3,51	10,03
14,00	32,50	35,03	34,89	103,10	64,55	2,39	6,85
16,00	32,00	35,35	35,62	103,72	63,41	3,62	10,16
18,00	33,20	35,90	36,12	104,29	63,73	2,92	8,08
20,00	33,20	35,84	35,92	102,45	64,06	2,72	7,57
22,00	33,10	35,90	36,00	104,56	63,60	2,90	8,06
24,00	32,60	36,40	36,49	104,33	64,45	3,89	10,66
26,00	33,70	36,38	36,43	103,44	65,50	2,73	7,49
28,00	33,50	34,49	36,30	104,07	65,84	2,80	7,71
30,00	33,50	36,25	36,28	103,29	64,93	2,78	7,66
32,00	34,40	36,67	36,69	102,09	63,15	2,29	6,24
34,00	34,60	36,42	36,44	101,05	64,74	1,84	5,05
36,00	33,70	36,40	36,50	100,47	64,15	2,80	7,67
38,00	35,00	36,77	36,69	100,42	35,15	1,69	4,61
40,00	35,30	36,20	36,30	99,69	66,61	1,00	2,75
42,00	34,20	35,96	36,02	98,39	64,92	1,82	5,05
44,00	34,40	36,22	36,33	98,23	63,87	1,93	5,31
46,00	35,20	36,13	36,26	97,75	62,53	1,06	2,92
48,00	35,30	36,21	36,29	97,99	63,57	0,99	2,73
50,00	35,30	35,94	36,04	98,13	63,83	0,74	2,05
52,00	34,60	35,85	35,89	98,08	62,11	1,29	3,59
54,00	35,00	35,96	36,01	97,69	61,57	1,01	2,80
56,00	34,80	35,78	35,98	97,50	62,66	1,18	3,28
58,00	35,30	35,78	35,74	98,15	63,87	0,44	1,23
60,00	34,60	35,71	35,90	97,71	62,73	1,30	3,62

Příloha 3 Tabulka naměřených a vypočtených hodnot teplot pro vzorek 3

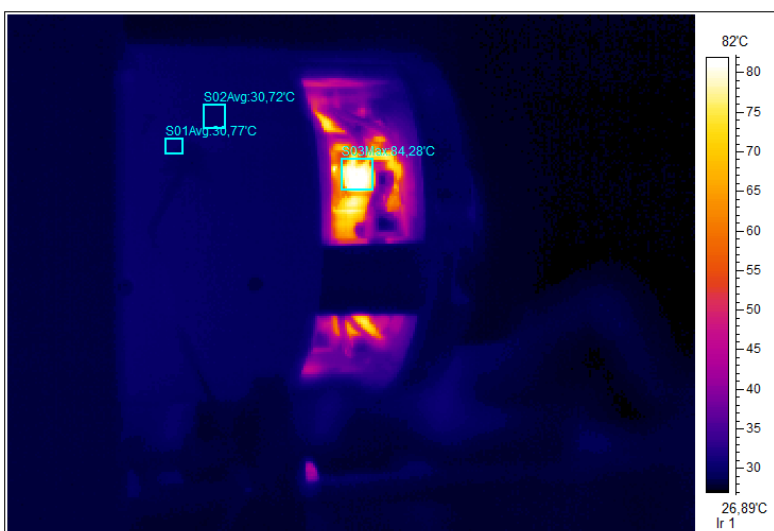
Termosnímký vzorku 1



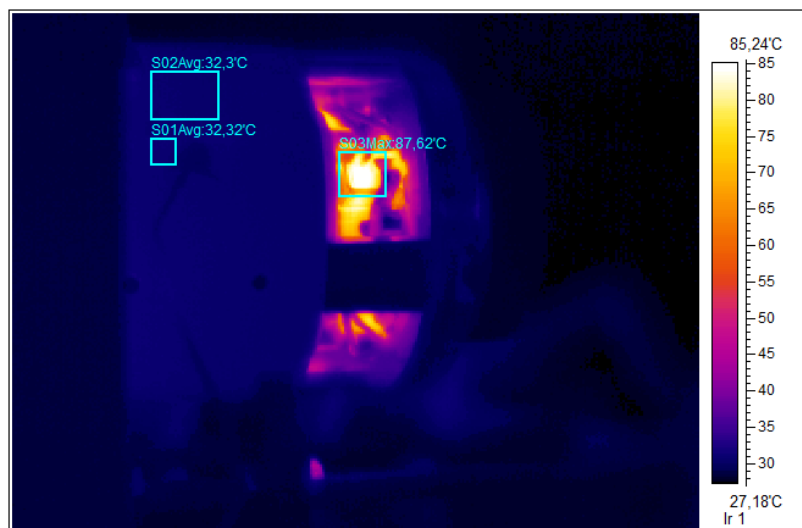
Příloha 4 Motor 1; $t=0\text{min}$



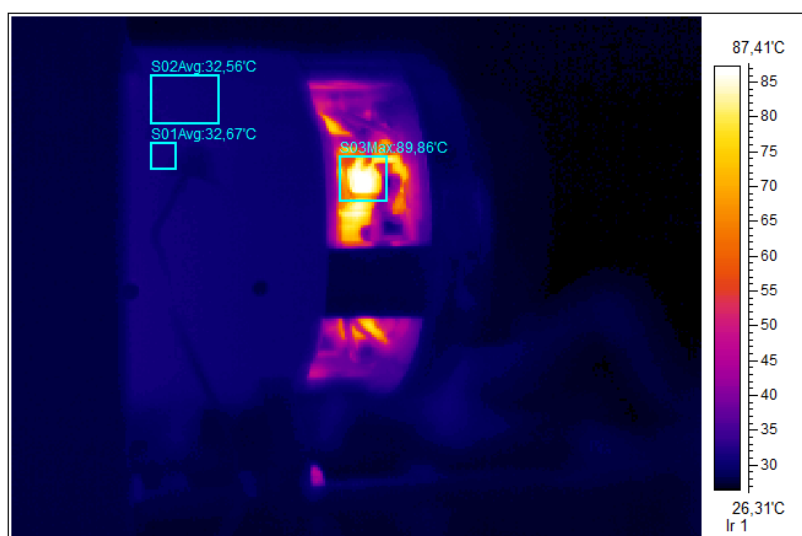
Příloha 5 Motor 1; $t=2\text{min}$



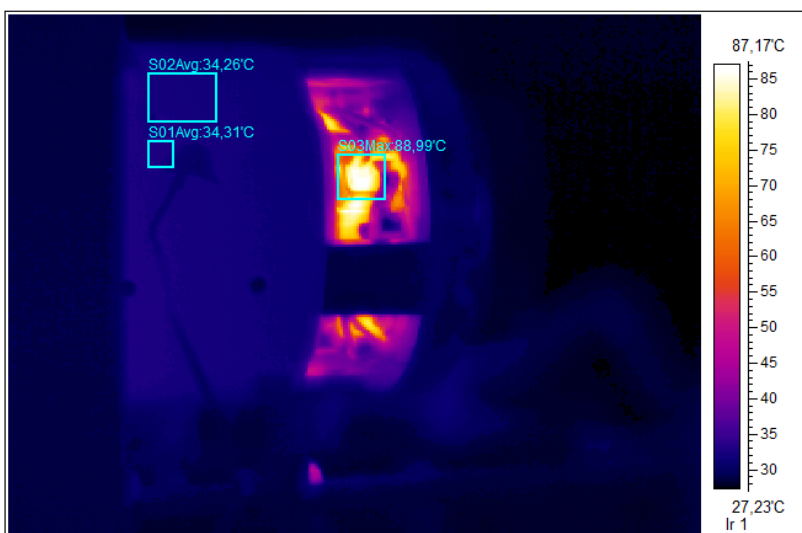
Příloha 6 Motor 1; $t=4\text{min}$



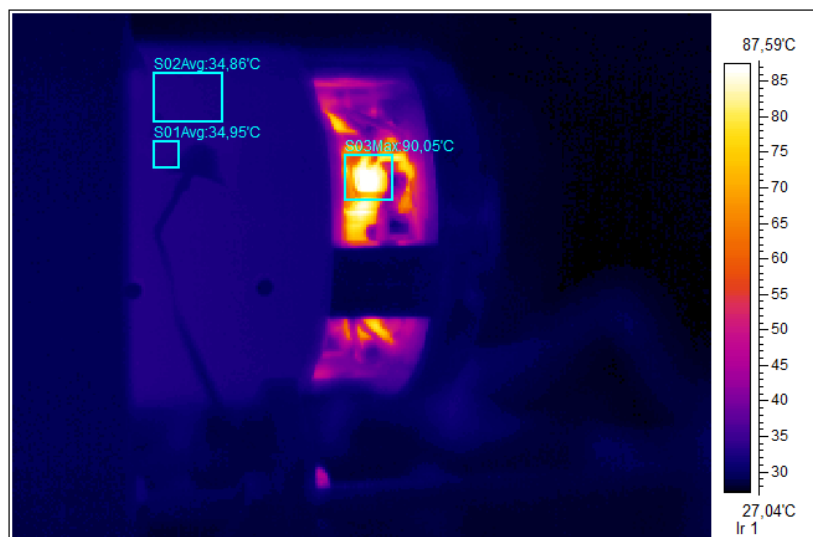
Příloha 7 Motor 1; t=6min



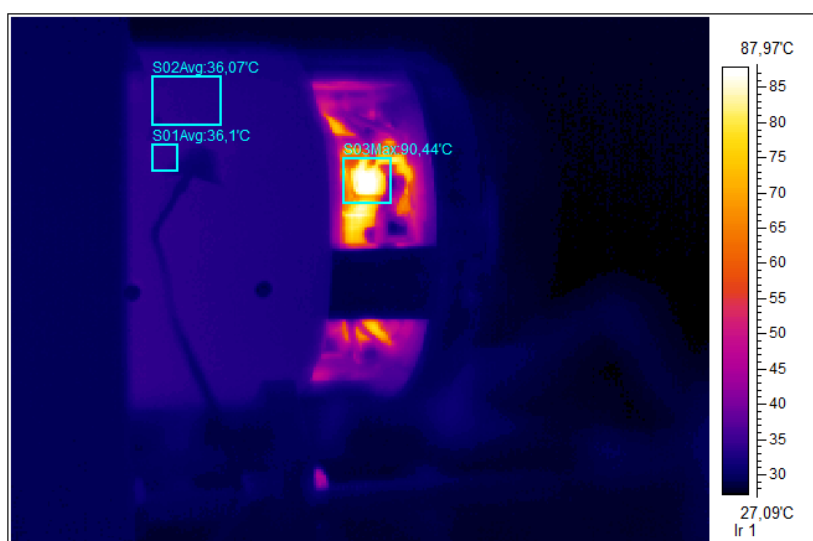
Příloha 8 Motor 1; t=8min



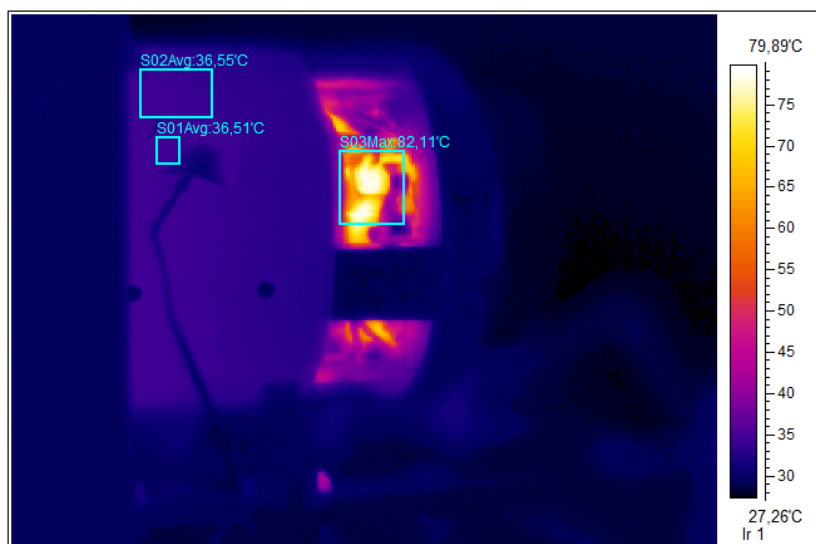
Příloha 9 Motor 1; t=10min



Příloha 10 Motor 1; t=12min

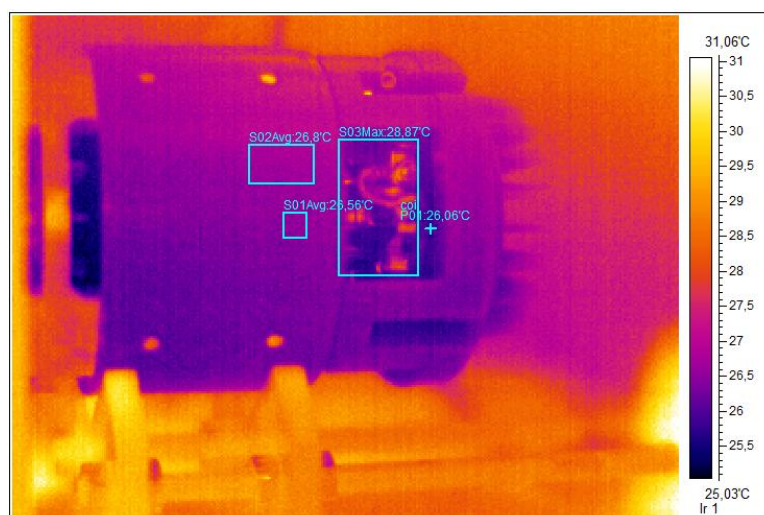


Příloha 11 Motor 1; t=18min; $\vartheta_{\text{komutátor, max}}=90,44^{\circ}\text{C}$

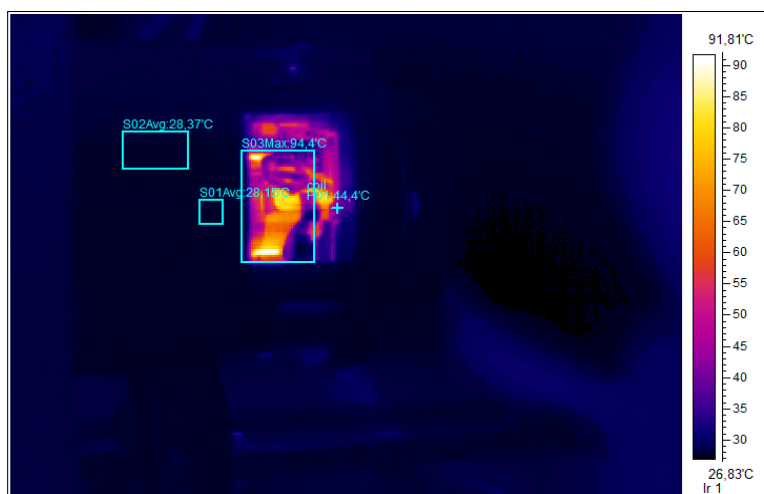


Příloha 12 Motor 1; t=60min

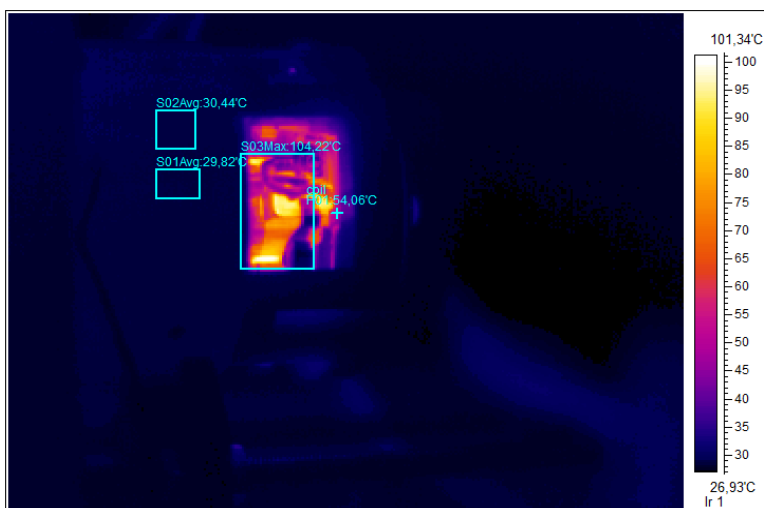
Termosnímký vzorku 2



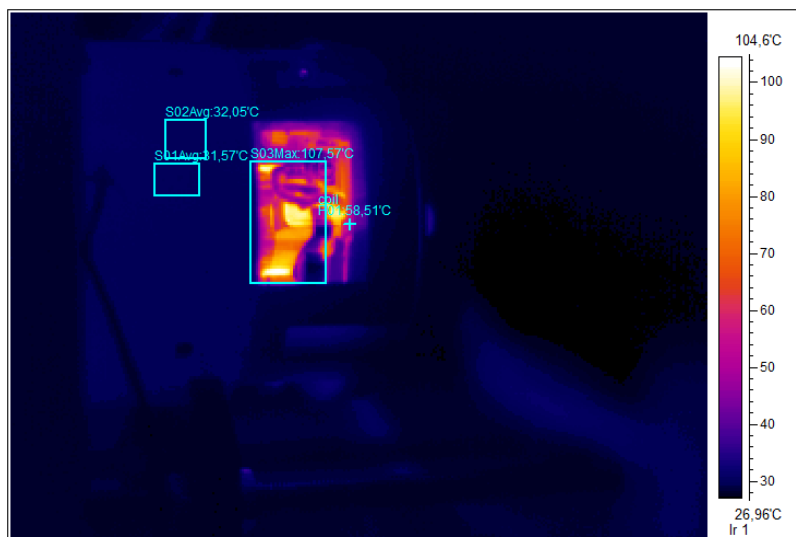
Příloha 13 Motor 2; $t=0\text{min}$



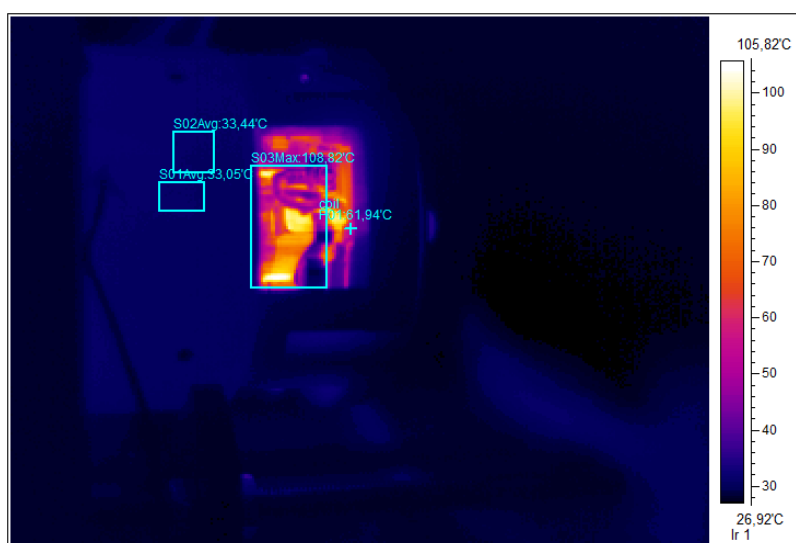
Příloha 14 Motor 2; $t=2\text{min}$



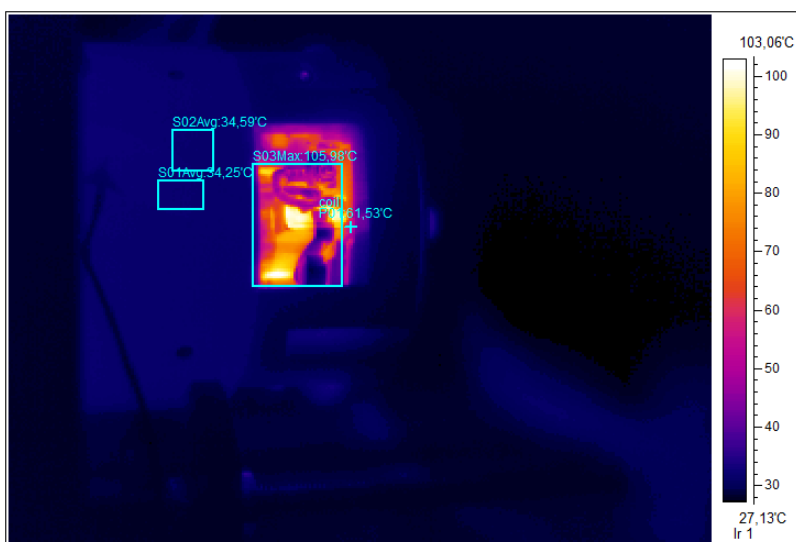
Příloha 15 Motor 2; $t=4\text{min}$



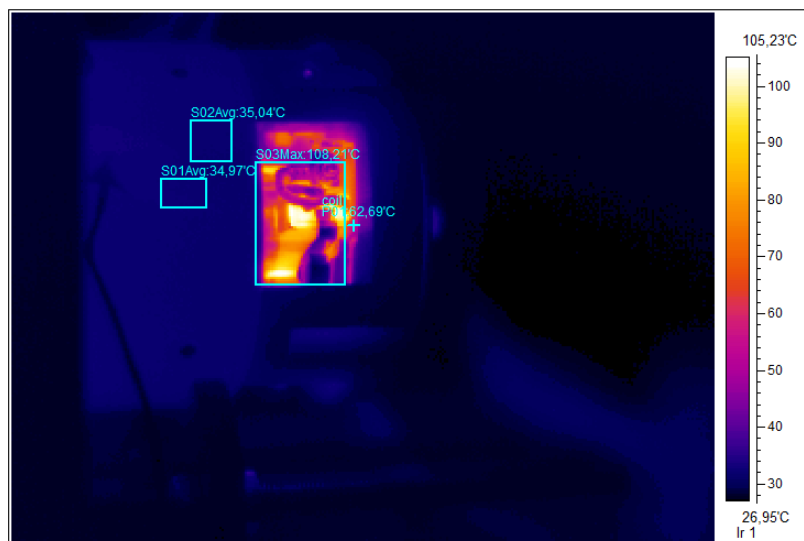
Příloha 16 Motor 2; $t=6\text{min}$



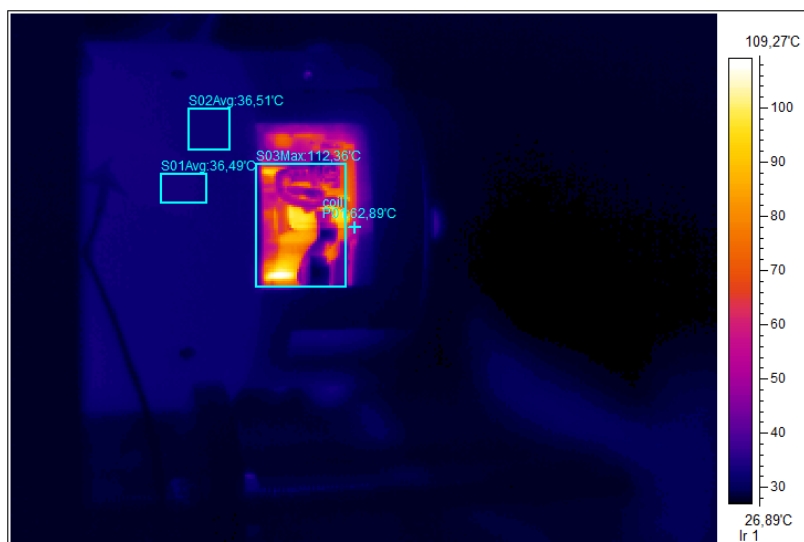
Příloha 17 Motor 2; $t=8\text{min}$



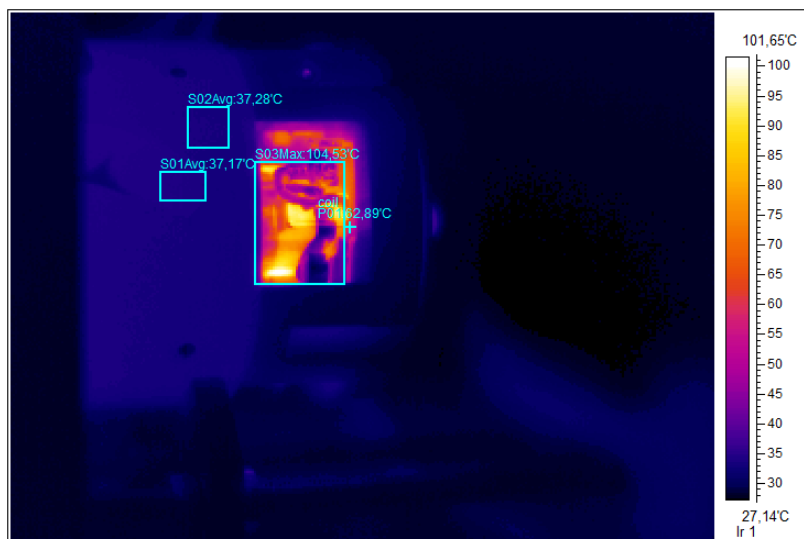
Příloha 18 Motor 2; $t=10\text{min}$



Příloha 19 Motor 2; $t=12\text{min}$



Příloha 20 Motor 2; $t=18\text{min}$; $\vartheta_{\text{komutátor, max}}=112,36^{\circ}\text{C}$

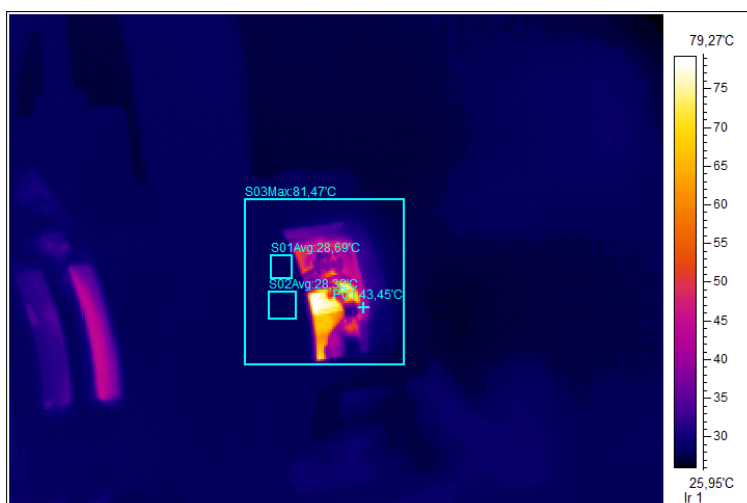


Příloha 21 Motor 2; $t=60\text{min}$

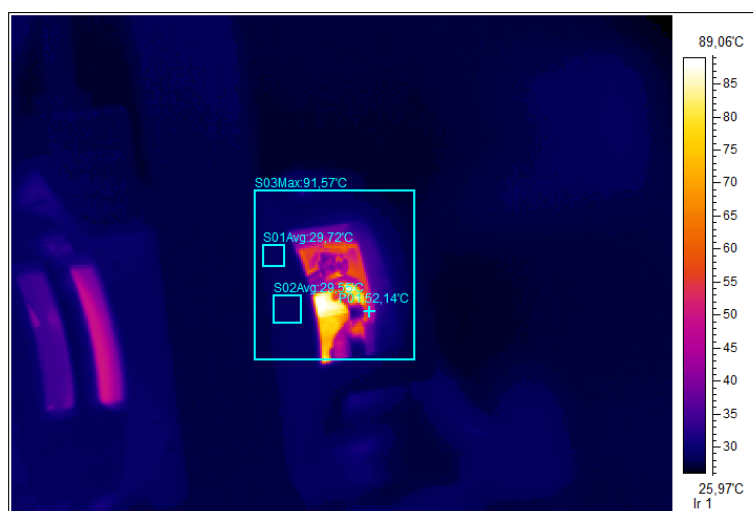
Termosnímký vzorku 3



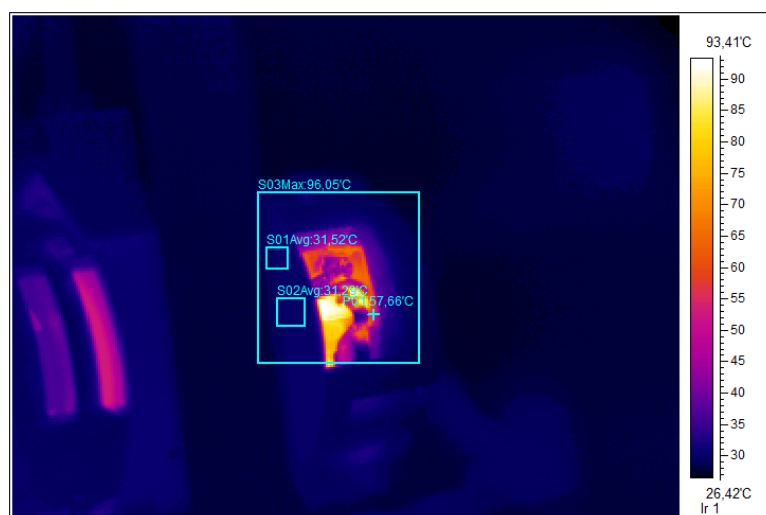
Příloha 22 Motor 3; $t=0\text{min}$



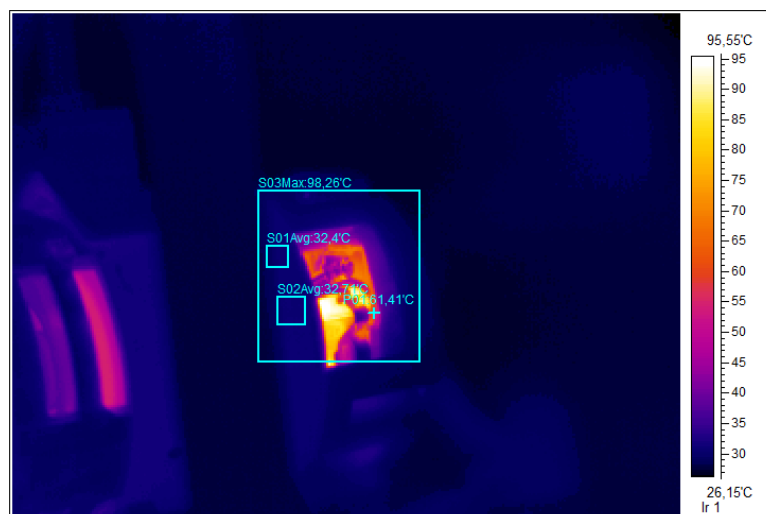
Příloha 23 Motor 3; $t=2\text{min}$



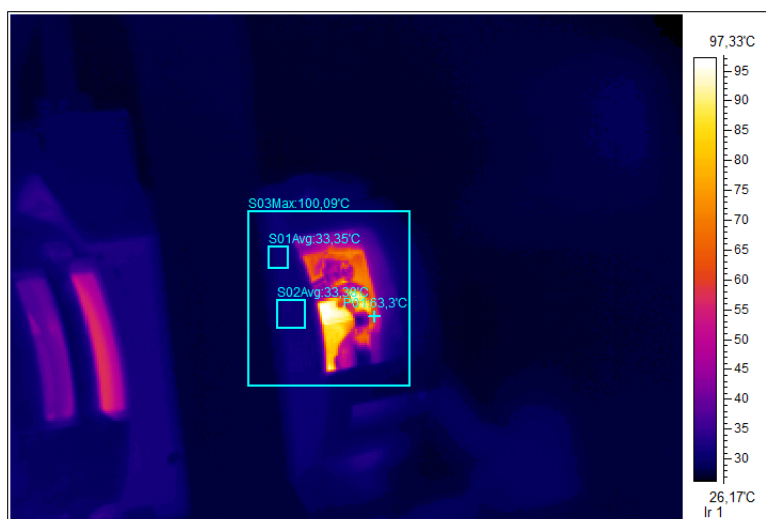
Příloha 24 Motor 3; $t=4\text{min}$



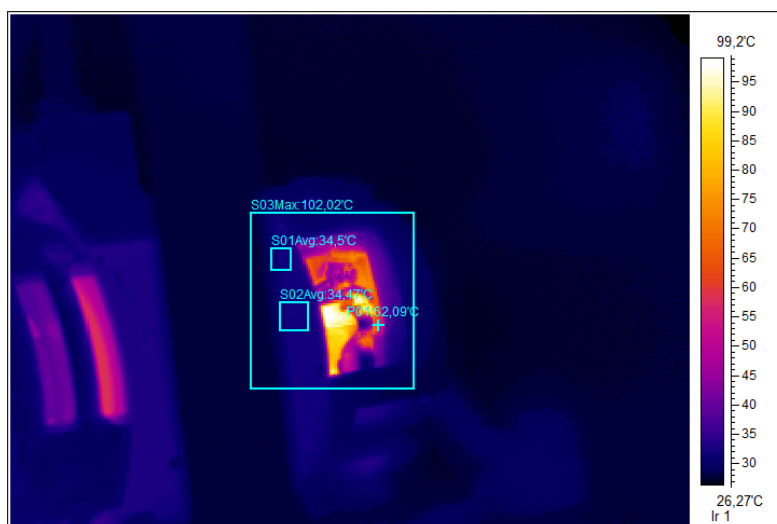
Příloha 25 Motor 3; $t=6\text{min}$



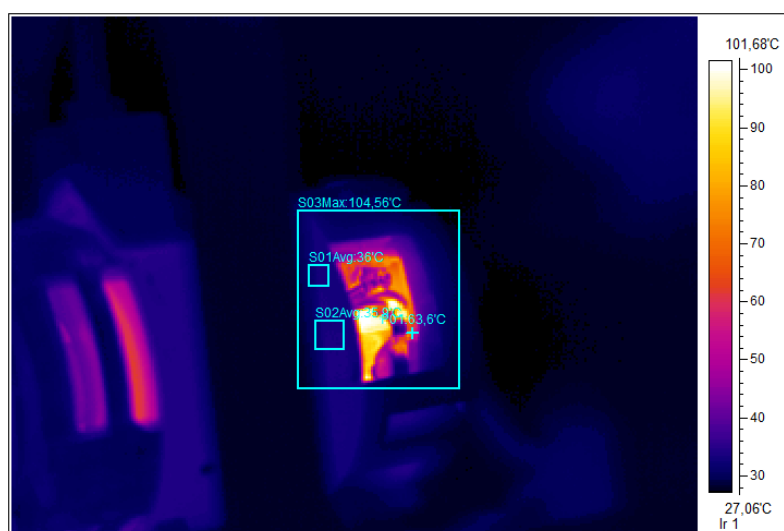
Příloha 26 Motor 3; $t=8\text{min}$



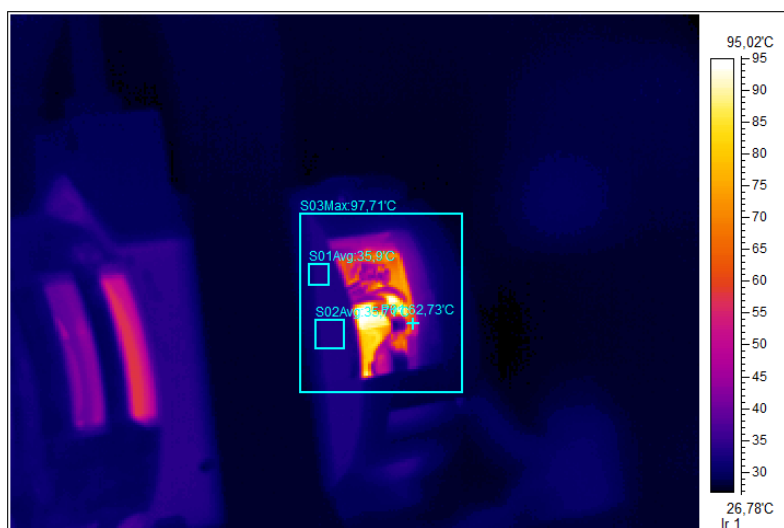
Příloha 27 Motor 3; $t=10\text{min}$



Příloha 28 Motor 3; $t=12\text{min}$



Příloha 29 Motor 3; $t=22\text{min}$; $\vartheta_{\text{komutátor, max}}=104,56^{\circ}\text{C}$



Příloha 30 Motor 3; $t=60\text{min}$