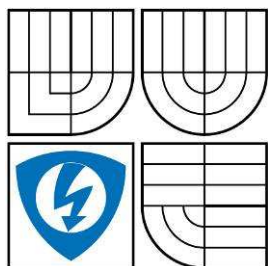


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



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

UTILIZATION OF INFRARED CAMERA FOR TEMPERATURE MEASUREMENT OF ELECTRICAL
MACHINES

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

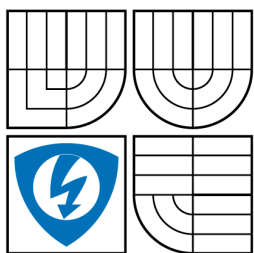
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. JAN LÍBAL

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Dr. Ing. HANA KUCHYŇKOVÁ

BRNO 2009



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika

Student: Líbal Jan, Bc.
Ročník: 2

ID: 83519
Akademický rok: 2008/09

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. Vytvořte animaci jednofázového asynchronního motoru firmy ATAS a proveďte měření teploty termovizní kamerou.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Termín zadání: 1.10.2008

Termín odevzdání: 22.5.2009

Vedoucí práce: doc. Dr. Ing. Hana Kuchyňková

Konzultanti diplomové práce:

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

UPOZORNĚNÍ:

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

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá využitím termovizní kamery pro měření teploty elektrických strojů. V první části je nastíněno bezdotykové měření teploty, ve druhé části je popsán princip senzorů, které vyhodnocují množství dopadajícího infračerveného záření. V další části je představena termovizní kamera SAT-HY 6800 a vytvořen manuál k programu SAT Report, který slouží k vyhodnocování termosnímků z této termokamery. V kapitole 7 je popsáno měření oteplení jednotlivých částí jednofázového asynchronního motoru typu J22TO484 s trvale připojeným kondenzátorem. V kapitole 8 je zmíněno měření oteplení polovodičových součástek na EC motoru řady G6. Oba motory vyrábí firma ATAS elektromotory Náchod a.s. V poslední části je popsáno vytváření animace jednofázového asynchronního motoru typu J22TO455 v programu 3ds Max. Animace slouží jako ukázka procesu sestavení základních částí motoru při výrobě v jeden celek a naznačuje způsob chlazení tohoto motoru.

Abstract

The master's thesis deals with utilization of infrared camera for temperature measurement of electrical machines. The first part describes non-contact temperature measuring, the second part describes principle of sensors that evaluate quantity of incident infrared radiation. In the next part there is termovision camera SAT-HY 6800 presented and the instructional manual for SAT Report computer programme created. This computer programme is used for analyzing of termovision pictures from the SAT-HY 6800 termovision camera. The chapter 7 describes temperature measuring of one-phase asynchronous motor type J22TO484. The chapter 8 describes temperature measuring of semiconductor components of EC motor G6 series. Both of these motors are produced by ATAS elektromotory Náchod a.s. The last part of the thesis describes creation of animation of one-phase asynchronous motor type J22TO455. The animation was created in 3ds Max computer programme.

Klíčová slova

Bezdotykové měření teploty, pyrometrie, emisivita, termovize, termovizní kamera, senzor teploty, termoelektrické detektory, bolometrické detektory, mikrobolometry, pyroelektrické detektory, kvantové detektory, SAT – HY 6800, SAT Report, jednofázový asynchronní motor, animace, 3ds max, rendering.

Keywords

Non contact temperature measuring, pyrometry, emisivity, termovision, termovision camera, temperature sensor, thermopile sensors, infra-red bolometers, microbolometers, pyroelectric detectors, quantic detectors, SAT – HY 6800, SAT Report, one-phase asynchronous motor, animation, 3ds max, rendering.

Bibliografická citace VŠKP dle ČSN ISO 690:

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.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Využití termovizní kamery pro měření teploty elektrických strojů jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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

V Brně dne 22.5.2009

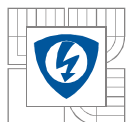
Podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucí diplomové práce paní doc. Dr. Ing. Haně Kuchyňkové za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

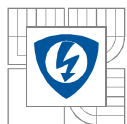
V Brně dne 22.5.2009

Podpis autora



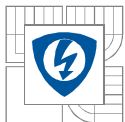
OBSAH

1 ÚVOD	10
2 TEPLOTA	11
2.1 MĚŘENÍ TEPLoty	11
2.2 TEPLOTNÍ STUPNICE	11
2.3 PŘENOS TEPLA	12
3 BEZDOTYKOVÉ MĚŘENÍ TEPLoty	14
3.1 ZÁKLADNÍ POJMY A ZÁKONY INFRAČERVENÉ PYROMETRIE	15
3.2 URČOVÁNÍ NEZNÁMÉ HODNOTY EMISIVITY POVRCHU MATERIÁLU	17
3.3 TERMOVIZNÍ SYSTÉM	17
3.4 STRUČNÁ HISTORIE VÝVOJE TERMOVIZNÍCH KAMER	18
4 SENZOR TEPLoty	20
4.1 TEPELNÉ DETEKTORY INFRAČERVENÉHO ZÁŘENÍ	20
4.1.1 Termoelektrické detektory (Thermopile sensors)	20
4.1.2 Bolometrické detektory, mikrobolometry	22
4.1.3 Princip mikrobolometru	23
4.1.4 Pyroelektrické detektory	26
4.2 KVANTOVÉ DETEKTORY INFRAČERVENÉHO ZÁŘENÍ	27
5 TERMOVIZNÍ KAMERA SAT - HY 6800	31
5.1 ZÁKLADNÍ TECHNICKÉ PARAMETRY TERMOKAMERY	31
6 MOŽNOSTI PROGRAMU SAT REPORT	32
6.1 VYHODNOCOVÁNÍ POŘÍZENÝCH SNÍMKŮ	32
6.1.1 Zobrazení a uložení infračerveného snímku	32
6.1.2 Analýza infračervených snímků	33
7 MĚŘENÍ JEDNOFÁZOVÉHO MOTORU J22TO484	37
7.1 JEDNOFÁZOVÝ ASYNCHRONNÍ MOTOR J22TO484	37
7.2 POSTUP MĚŘENÍ MOTORU J22TO484	38
7.2.1 Vyhodnocování teplotních snímků	38
8 MĚŘENÍ EC MOTORU	46
9 VYTVOŘENÍ ANIMACE ASYNCHRONNÍHO MOTORU	48
9.1 ANIMACE ELEKTRICKÉHO TOČIVÉHO STROJE	48
9.1.1 Osvětlení	51
9.1.2 Rendering	52
10 ZÁVĚR	53
11 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	55
SEZNAM PŘÍLOH	57



SEZNAM OBRÁZKŮ

OBRÁZEK 1 – SROVNÁNÍ TEPLOTNÍCH STUPNIC PRO VODU [17].....	12
OBRÁZEK 2 – ROZDĚLENÍ ELEKTROMAGNETICKÉHO SPEKTRA [24].....	14
OBRÁZEK 3 – JINÉ ČLENĚNÍ ELEKTROMAGNETICKÉHO SPEKTRA [30].....	14
OBRÁZEK 4 – VYZAŘOVÁNÍ DOKONALÉ ČERNÉHO TĚLESA [14]	16
OBRÁZEK 5 - MĚŘENÍ TEPLoty OBJEKTU TERMoeLEKTRICKÝM SENZOREM - VLEVO [10] POUZDRO SENZORU – VPRAVO [11]	21
OBRÁZEK 6 - PŘÍKLAD STRUKTURY ČÁSTI ČIPU TERMoeLEKTRICKÉHO SENZORU – VLEVO [10] PROVEDENÍ SENZORU S TERMOČLÁNKOVOU BATERIÍ – VPRAVO [24]	21
OBRÁZEK 7 – PŘÍKLAD TERMoeLEKTRICKÝCH SENZORŮ OD FIRMY PERKINELMER OPTOELECTRONICS [10]	22
OBRÁZEK 8 - PROVEDENÍ JEDNODUCHÉHO BOLOMETRU [5]	22
OBRÁZEK 9 - STRUKTURA INTEGROVANÉHO MŮSTKU Z BOLOMETRŮ [5]	23
OBRÁZEK 10 - PŘÍKLAD STRUKTURY MIKROBOLOMETRU [5]	23
OBRÁZEK 11 - DETAILNÍ POHLED NA STRUKTURU JEDNÉ PLOŠKY MIKROBOLOMETRU [5].....	24
OBRÁZEK 12 – BLOKOVÉ SCHÉMA MIKROBOLOMETRICKÉHO SNÍMAČE [9]	25
OBRÁZEK 13 – PRINCIPÁLNÍ SCHÉMA ZAPOJENÍ JEDNOHO SLOUPCE [9].....	25
OBRÁZEK 14 - FOTOGRAFIE REÁLNÉHO PROVEDENÍ MIKROBOLOMETRU;.....	26
OBRÁZEK 15 - PRINCIP PYROELEKTRICKÉHO SENZORU [11]	26
OBRÁZEK 16 – PYROELEKTRICKÝ ČIP S PŘEDZESILOVAČEM [24]	27
OBRÁZEK 17 – NÁHRADNÍ ZAPOJENÍ PYROELEKTRICKÉHO SNÍMAČE [12]	27
OBRÁZEK 18 – ENERGETICKÝ PÁSOVÝ MODEL [26].....	28
OBRÁZEK 19 – PRINCIP KVANTOVÝCH DETEKTORŮ – FOTOREZISTOR VLEVO; FOTODIODOVÝ DETEKTOR VPRAVO [2] .	29
OBRÁZEK 20 – USPOŘÁDÁNÍ QWIP FPA MATICE – VLEVO [2]; STRUKTURA DETEKTORU S PLOŠNOU MŘÍŽKOU – UPROSTŘED A FOTOGRAFIE QWIP SENZORU - VPRAVO [29].....	30
OBRÁZEK 21 – TERMovIZNÍ KAMERA SAT – HY 6800	31
OBRÁZEK 22 – ZÁKLADNÍ UŽIVATELSKÉ PROSTŘEDÍ PROGRAMU SAT REPORT	32
OBRÁZEK 23 – OBLAST PRO VLOŽENÍ SNÍMKU (VLEVO) A PŘIPOJENÝ SNÍMEK (VPRAVO)	33
OBRÁZEK 24 – UKÁZKA NASTAVENÍ BAREVNÉ PALETY SNÍMKU A ROZSAHU TEPLOT	33
OBRÁZEK 25 – TEPLOTNÍ ANALÝZA SNÍMKU A EXPORTOVANÁ DATA V TABULCE	34
OBRÁZEK 26 – IZOTERMICKÁ ANALÝZA	35
OBRÁZEK 27 – LINEÁRNÍ ANALÝZA A EXPORTOVANÁ DATA V TABULCE	35
OBRÁZEK 28 - 3D ZOBRAZENÍ INFRAČERVENÉHO SNÍMKU	35
OBRÁZEK 29 – SCHÉMA SKUTEČNÉHO ZAPOJENÍ MOTORU J22TO484 V PROVOZU – VLEVO; ZAPOJENÍ S MOŽNOSTÍ PŘEPÍNÁNÍ SMĚRU OTÁČEK - VPRAVO.....	38
OBRÁZEK 30 – SCHÉMA ZAPOJENÍ PŘI MĚŘENÍ TEPLOTNÍHO NAMÁHÁNÍ MOTORU	38
OBRÁZEK 31 – MÍSTA MĚŘENÁ TERMOČLÁNKEM	39
OBRÁZEK 32 – ROZDÍLNÁ TEPLota BLÍZKO SEBE UMÍSTĚNÝCH BODŮ – VLEVO; OHRANIČENÉ OBLASTI PRO URČENÍ TEPLoty - VPRAVO.....	39
OBRÁZEK 33 – VÝHODNOCOVANÉ ČÁSTI MOTORU	40
OBRÁZEK 34 – UMÍSTĚNÍ MĚŘENÝCH SOUČÁSTEK	46
OBRÁZEK 35 – PRAVDĚPODOBNÉ MÍSTO PORUCHY NA STEJNOSMĚRNÉM EC MOTORU	47
OBRÁZEK 36 – A) UPRAVENÉ VINUTÍ (VLEVO), B) KOTVA NAKRÁTKO (VPRAVO)	48
OBRÁZEK 37 – A) MODEL ROTORU (VLEVO), B) VLISOVANÁ HŘÍDEL (VPRAVO)	49
OBRÁZEK 38 – A) NASTŘELOVÁNÍ DRÁŽKOVÉ IZOLACE (VLEVO), B) UZAVŘENÍ DRÁŽKOVÉ IZOLACE (VPRAVO).....	49
OBRÁZEK 39 - NASUNUTÍ LOŽISEK	50
OBRÁZEK 40 - ZASUNUTÍ ROTORU DO STATORU	50
OBRÁZEK 41 – A) LOŽISKOVÉ ŠTÍTY (VLEVO), B) ZAJIŠTĚNÍ POMOCÍ ŠROUBŮ (VPRAVO).....	50
OBRÁZEK 42 – A) UMÍSTĚNÍ VENTILÁTORU (VLEVO), B) EFEKT ZPRŮHLEDNĚNÍ (VPRAVO)	51
OBRÁZEK 43 – SIMULACE CHLAZENÍ MOTORU (VLEVO I VPRAVO)	51

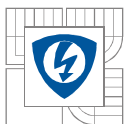


SEZNAM TABULEK

TABULKA 1 – ZÁKLADNÍ TECHNICKÉ PARAMETRY TERMOKAMERY [22, 23]	31
TABULKA 2 - PARAMETRY JEDNOFÁZOVÉHO ASYNCHRONNÍHO MOTORU TYPU J22TO484	37
TABULKA 3 – NAMĚŘENÉ TEPLoty HLAV VINUTÍ A SVAZKU ROTOROVÝCH PLECHŮ	65
TABULKA 4 – NAMĚŘENÉ TEPLoty LOŽISKOVÝCH ŠTÍTŮ A VENTILÁTORU.....	66
TABULKA 5 – TERMOKAMEROU NAMĚŘENÉ TEPLoty POLOVODIČOVÝCH SOUČÁSTEK	67

SEZNAM GRAFŮ

GRAF 1 – PRŮBĚH OTEPLENÍ SVAZKU ROTOROVÝCH PLECHŮ	41
GRAF 2 – PRŮBĚH OTEPLENÍ LOŽISKOVÝCH ŠTÍTŮ.....	42
GRAF 3 – PRŮBĚH OTEPLENÍ HLAV VINUTÍ	43
GRAF 4 – PRŮBĚH OTEPLENÍ VENTILÁTORU.....	45
GRAF 5 – OTEPLENÍ VÝKONOVÝCH/POLOVODIČOVÝCH SOUČÁSTEK EC MOTORU	47



1 ÚVOD

Teplota je jedna z nejvýznamnějších termodynamických vlastností, které určují stav hmoty. Vyskytuje se v mnoha fyzikálních zákonech. Existuje jen málo vlastností látek, které nejsou teplotně závislé. Teplota je také jednou z mála fyzikálních veličin, kterou nelze měřit přímo, ale prostřednictvím jiné fyzikální veličiny. Jedná se tedy o měření nepřímé. V dnešní době se stále více rozvíjí bezdotykové měření teploty využívající snímání tepelného záření, které vyzařují všechna tělesa s teplotou větší než absolutní nula. Teplotu lze bezdotykově měřit jak bodově, tak i plošně. Plošné bezdotykové měření teploty se nazývá termovize. Principů detekce infračerveného záření existuje několik, každý způsob má své přednosti ale také stinné stránky. Vzhledem ke klesajícím cenám některých termovizních systémů se v současnosti právě plošné měření teploty dostává i do běžné komerční sféry.

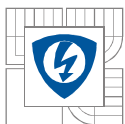
Tato diplomová práce se zabývá měřením teploty, především bezdotykovým, pomocí termovizních kamer. V druhé kapitole je popsán obecný princip měření teploty, dále jsou zmíněny dnes nejvíce používané teplotní stupnice, jejich dělení a vzájemný přepočet stupňů mezi jednotlivými stupnicemi. V poslední části druhé kapitoly jsou popsány tři základní způsoby přestupu tepla z jednoho tělesa na druhé – vedení, proudění a záření.

Zářením se zabývá třetí kapitola. Ta nastiňuje problematiku rozdělení infračerveného záření do spekter, které v současnosti není nijak standardizované, a lze se tak setkat s různým dělením. V dalším textu jsou popsány základní zákony a pojmy, které jsou nezbytné k popisu bezdotykové pyrometrie. Mezi nejdůležitějšími je definován například model černého tělesa a veličina zvaná emisivita. Bez znalosti emisivity, která je specifická pro každý materiál, by nebylo možné bezkontaktně přesně zjistit teplotu daného povrchu. Proto další podkapitola uvádí, jakými způsoby lze emisivitu materiálu zjistit.

Protože se termovize vyvíjí již více než čtyřicet let, je v další kapitole diplomové práce zmíněn stručný historický vývoj termovizních systémů a naznačen princip jejich funkce. Celá čtvrtá kapitola podává ucelený přehled o současných senzorech infračerveného záření, které se využívají v termovizních kamerách. Postupně je popsán fyzikální princip činnosti tepelných, termoelektrických, bolometrických, pyroelektrických a kvantových detektorů infračerveného záření.

Pátá kapitola představuje základní technické parametry termovizní kamery SAT-HY 6800, kterou vlastní Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky. Pomocí této termokamery bylo provedeno měření teplotního namáhání jednotlivých částí při běhu jednofázového asynchronního motoru typu J22TO484 s trvale připojeným kondenzátorem. Tento typ motoru byl zvolen z toho důvodu, protože při praktické části semestrálního projektu v zimním semestru byla vytvářena animace motoru typu J22TO455. Animace slouží jako ukázka procesu sestavení základních částí motoru při výrobě v jeden celek a naznačuje způsob chlazení tohoto motoru. Postup vytváření animace v CAD programu 3ds Max je popsán v deváté kapitole. Provedení obou motorů je shodné, typ J22TO484 se liší pouze průměrem hřídele. Oba motory vyrábí firma ATAS elektromotory Náchod a.s.

Při vyhodnocování pořízených termovizních snímků je nutné použít program SAT Report dodávaný s výše zmíněnou termokamerou. Možnosti a funkce tohoto programu jsou zpracovány ve formě stručného manuálu v kapitole šest. Postup měření motoru a jeho výsledky jsou obsahem šesté kapitoly.



2 TEPLOTA

Teplota je stavová veličina určující stav termodynamické rovnováhy, tj. stav, kdy v izolované soustavě těles od okolního prostředí neprobíhají žádné makroskopické změny a všechny fyzikální veličiny, jimiž je stav soustavy popsán, nezávisí na čase. Stav termodynamické rovnováhy bývá charakterizován termodynamickou teplotou, která musí být stejná pro všechny části izolované soustavy. Fyzikální veličina teplota se nesmí zaměňovat za fyzikální veličinu teplo, protože teplo je forma energie související s pohybem částic dané soustavy těles, ale není stavovou veličinou, neboť nezávisí na přítomném stavu soustavy, ale na celé minulosti vývoje této soustavy.

2.1 Měření teploty

Teplota je jedna z mála veličin, která se nedá měřit přímo, ale pouze prostřednictvím jiných fyzikálních veličin. Měření teploty je tedy měření nepřímé. [2] Stanovovat teplotu přímo podle definice termodynamické teploty je nepřesné. Neexistuje ani žádný vhodný fyzikální jev, kterého by bylo možno využít pro celý rozsah měřených teplot. Řešením je proto mezinárodní teplotní stupnice, založená na přesně definovaných a prakticky realizovatelných referenčních bodech teploty a na přesné metodice použité pro interpolaci mezi těmito referenčními body. Referenčními body mohou být teploty tuhnutí, teploty kondenzace nebo teploty trojných bodů vhodných látek. Interpolace se provádí pomocí etalonových odporových teploměrů a termoelektrických článků, u vysokých teplot pomocí spektrální hustoty zářivé energie nebo spektrální hustoty zářivosti černého tělesa. [18]

V současnosti se používá Mezinárodní teplotní stupnice z roku 1990 (ITS-90), která je schopna obsáhnout rozsah teplot již od 0,65 K. [18]

2.2 Teplotní stupnice

Celsiova stupnice

Jestliže chceme teplotu měřit, musí se zvolit pro její měření poměrová stupnice. Mezinárodní stupnicí byla zvolena Celsiova stupnice, která má za základ teplotu bodu varu (100°C) a bod tuhnutí (0°C) „čisté“ vody (za normálních podmínek, tj. při tlaku $101,325\text{ kPa}$). Tyto referenční vztahy jsou rozděleny na 100 dílků – stupňů.

Protože pro kalibraci teploměrů je dodržení teploty přesně 0°C obtížné, realizuje se v praxi k těmto účelům tzv. trojný bod. Je to stav, při kterém existuje voda ve všech třech skupenstvích – plynném, kapalném a pevném. Trojný bod se realizuje ve skleněné válcové nádobě s dvojími stěnami. Prostor mezi stěnami, ze kterého byl vyčerpán vzduch, se naplní zčásti vodou, která za vyšší teploty než 0°C je v rovnováze se svou parou. Po zmrazení vody v nádobce a vložení nádoby do obyčejné ledové lázně se vytvoří po určité době rovnovážný stav mezi všemi třemi fázemi vody. Tato ledová lázeň udržuje velmi přesně a poměrně dlouho konstantní teplotu. Trojný bod je dán teplotou $0,01^{\circ}\text{C}$ a tlakem 610 kPa . [17]

Termodynamická stupnice

Z fyzikálního hlediska je důležitější než Celsiova stupnice tzv. termodynamická (absolutní) stupnice. Její jednotka Kelvin (K) je jednou ze základních jednotek soustavy SI. Má stejné dělení, jako stupnice Celsiova ($1^{\circ}\text{C} = 1\text{ K}$). Počátek termodynamické stupnice

představuje nejnižší možnou teplotu, při které teoreticky přestává pohyb atomů v látce. Tento počátek se označuje jako termodynamická absolutní nula (0 K a odpovídá $-273,15^\circ\text{C}$). [17]
Pro převod z Celsiovy na termodynamickou teplotu platí:

$$T(\text{K}) = t + 273,15^\circ\text{C}$$

kde T je termodynamická teplota, t je Celsiova teplota.

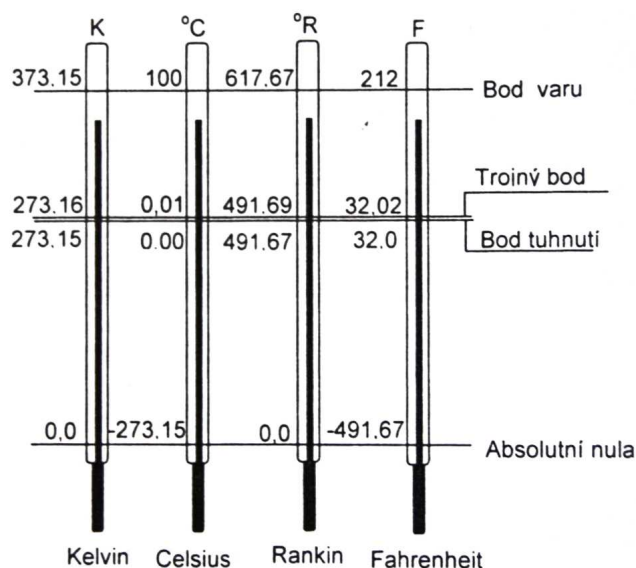
Fahrenheitova stupnice

Tato stupnice se dosud používá v některých anglosaských státech. Pro převod na Fahrenheitovu stupnici platí:

$$t(^{\circ}\text{F}) = \frac{9}{5}T(\text{K}) - 459,67 = \frac{9}{5}t(^{\circ}\text{C}) - 32$$

Rankinova stupnice

Stejně jako u Celsiovy stupnice je absolutní stupnicí Kelvinova stupnice, platí pro Fahrenheitovu stupnici absolutní stupnice Rankinova. Dílky na Rankinově stupnici odpovídají Fahrenheitově stupnici ($1^{\circ}\text{R} = 1^{\circ}\text{F}$). Počátek pro Rankinovu a Kelvinovu stupnici je stejný, tedy $0^{\circ}\text{R} = 0\text{ K}$. [17]

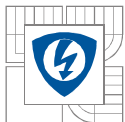


Obrázek 1 – Srovnání teplotních stupnic pro vodu [17]

2.3 Přenos tepla

Přestup tepla mezi dvěma různě teplými tělesy může probíhat třemi základními způsoby - vedením (kondukcí), prouděním (konvekci) a zářením (radiací). Veškeré teplo je přenášeno jedním z těchto tří typů přenosů, obvykle ale kombinací dvou nebo všech tří typů přenosů.

Přenos tepla **vedením** se uskutečňuje ve statickém i pohyblivém prostředí pevném, kapalném i plynném. Jde vlastně o přenos vibrací (kmitáním) atomů pevných těles nebo srážky molekul kapalin a plynů, čímž dochází k pohybu energie od teplejší molekuly směrem ke studenější. [15]



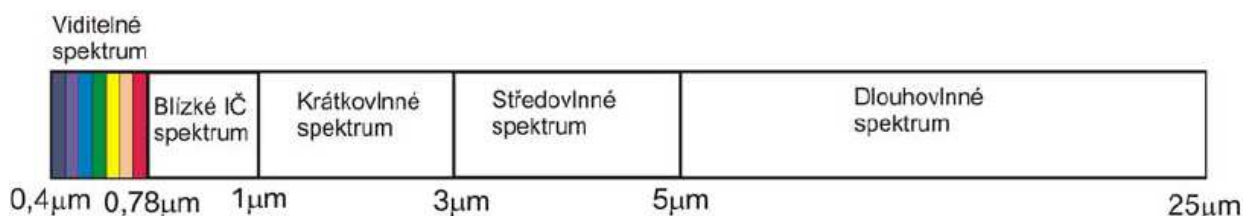
Přenos tepla **prouděním** se uplatňuje u pohybujících se skupenství a většinou vždy se odehrává u přenosu tepla mezi pevným a kapalným (plynným) skupenstvím. Volné proudění se uplatňuje, pokud přenos tepla způsobuje změnu hustoty kapaliny a teplejší část stoupá vzhůru jako výsledek vzrůstajícího vztlaku. Nucené proudění se uplatňuje i tehdy, kdy vnější zdroj, jako např. ventilátor chlazení, uvádí kapalinu (plyn) do pohybu. [15]

Přenos tepla **zářením** (radiací) se od předcházejících dvou typů liší v několika aspektech. Záření se uskutečňuje elektromagnetickou emisí a absorpcí, probíhá rychlostí světla, chová se jako světlo a může procházet vakuem. [4]

3 BEZDOTYKOVÉ MĚŘENÍ TEPLOTY

Bezdotykově se teplota měří pomocí pyrometrů nebo termovizních systémů (viz kapitola 3). Princip bezdotykového měření teplot (označovaného také jako infračervená pyrometrie) spočívá v měření povrchové teploty těles. Využívá se toho, že každé uskupení hmoty o teplotě nad absolutní nulou ($0\text{ K} = -273,15^\circ\text{C}$) vysílá infračervené záření, odpovídající jeho teplotě. Toto záření se nazývá charakteristické. Jeho příčinou je vnitřní mechanický pohyb molekul. Intenzita tohoto pohybu závisí na teplotě objektu. Protože pohyb molekul představuje přemísťování náboje, je vyzařováno elektromagnetické záření (fotonové částice). Zatímco přenos energie světla se děje ve viditelné oblasti spektra přibližně od $0,4\mu\text{m}$ do $0,78\mu\text{m}$, přenos tepla radiací zabírá oblast spektra mezi $0,78\mu\text{m}$ a asi $100\mu\text{m}$. [16]

Zajímavé je, že dělení spektrálního rozsahu infračerveného záření není nijak standardizováno. [20] V různých zdrojích lze najít odlišné rozdělení spektrálního pásma infračerveného záření.



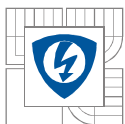
Obrázek 2 – Rozdělení elektromagnetického spektra [24]

Např. [2] uvádí, že blízké infračervené spektrum leží od $0,78\mu\text{m}$ do $1\mu\text{m}$, oblast krátkovlnného infračerveného spektra od $1\mu\text{m}$ do $3\mu\text{m}$, oblast středovlnného infračerveného spektra od $3\mu\text{m}$ do $5\mu\text{m}$ a oblast dlouhovlnného infračerveného spektra od $5\mu\text{m}$ do $25\mu\text{m}$ (viz obrázek 2). Elektromagnetické záření s vlnovou délkou od $2\mu\text{m}$ do $25\mu\text{m}$ se označuje jako tepelné záření. Uvedené rozsahy pokrývají měření teplot v rozmezí od -40°C do $+10000^\circ\text{C}$. Jiné členění infračerveného pásma je na obrázku 3, jak lze nalézt např. v [30].

infračervený obor	rozsah vlnových délek
blízký	$0,76\mu\text{m} - 2,5\mu\text{m}$
střední	$2,5\mu\text{m} - 25\mu\text{m}$
vzdálený	$25\mu\text{m} - 300\mu\text{m}$

Obrázek 3 – Jiné členění elektromagnetického spektra [30]

Výhody bezdotykového měření teploty oproti kontaktnímu způsobu měření jsou následující. Je možné měřit velmi rychlé změny teplot. Lze měřit teploty na rotujících nebo pohybujících se předmětech. Je možné měřit z bezpečné vzdálenosti (od elektrických zařízení, hutních objektů, ...). Měřicí technika má zanedbatelný vliv na měřený objekt. Lze měřit a dále digitálně zpracovávat teploty celých povrchů těles (termovize). [2] Měření je komfortní a relativně jednoduché.



Bezdotykové měření má však také řadu nevýhod. Nejistoty měření především způsobuje neznalost správné hodnoty emisivity povrchu tělesa, neznalost správné hodnoty prostupnosti prostředí mezi čidlem a měřeným objektem nebo nepřesná korekce parazitního odraženého záření z okolního prostředí na měřený objekt.

3.1 Základní pojmy a zákony infračervené pyrometrie

Energie vyzařená jednotkou plochy za jednotku času je tzv. intenzita vyzařování H [$W \cdot m^{-2}$] (hustota zářivého toku). Je dána vztahem

$$H = \frac{d\Phi}{dS} [W \cdot m^{-2}]$$

kde Φ [W] je zářivý tok a S [m^2] plocha povrchu zdroje záření. Zářivý tok Φ vyjadřuje energii vyzařenou (nebo pohlcenou) na všech vlnových délkách.

Dokonale černé těleso maximálně vyzařuje i maximálně pohlcuje záření. Intenzita vyzařování a pohltivost jsou si úměrné podle tzv. Kirchhoffova zákona. Je-li teplota tělesa větší než teplota okolí, převažuje intenzita vyzařování nad pohltivostí. Intenzita vyzařování dokonale černého tělesa H_0 [$W \cdot m^{-2}$] závisí jen na jeho absolutní teplotě T [K] a podle Stefan-Boltzmannova zákona platí

$$H_0 = \sigma \cdot T^4 [W \cdot m^{-2}]$$

kde $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$ je Stefan-Boltzmannova konstanta. Indexem 0 je označeno dokonale černé těleso. Intenzita vyzařování má integrální charakter a skládá se z příspěvků při jednotlivých vlnových délkách podle vztahu

$$H_0 = \int_0^{\infty} H_{0\lambda} d\lambda [W \cdot m^{-2}]$$

kde $H_{0\lambda}$ je spektrální hustota intenzity vyzařování [$W \cdot m^{-3}$], λ vlnová délka záření [m]. Vlnová délka je definována $\lambda = c / f$ [m], kde c je rychlost světla a f je kmitočet záření.

Závislost spektrální hustoty intenzity vyzařování na vlnové délce a teplotě je dána Planckovým vyzařovacím zákonem

$$H_{0\lambda} = \frac{2 \cdot \pi \cdot h \cdot c^2}{\lambda^5 \cdot \left(e^{\frac{h \cdot c}{k \cdot \lambda \cdot T}} \right)} = \frac{c_1}{\lambda^5 \cdot \left(e^{\frac{c_2}{\lambda \cdot T}} - 1 \right)} [W \cdot m^{-3}]$$

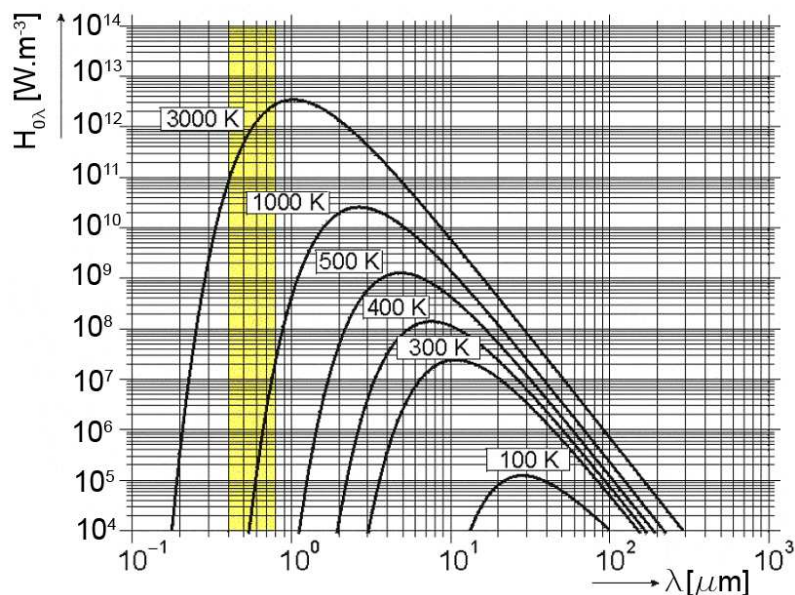
kde $h \doteq 6,626 \cdot 10^{-34} J \cdot s$ je Planckova konstanta, $k \doteq 1,381 \cdot 10^{-23} J \cdot K^{-1}$ Boltzmannova konstanta, $c \doteq 3 \cdot 10^8 m \cdot s^{-1}$ rychlost světla ve vakuu, T teplota povrchu tělesa, konstanta $c_1 = 3,7413 \cdot 10^{-16} W \cdot m^2$, $c_2 = 1,4388 \cdot 10^{-2} K \cdot m$.

Závislost je graficky znázorněna na obrázku 4. Plocha pod křivkou pro danou teplotu je rovna intenzitě vyzařování H_0 při této teplotě. Maximum spektrální hustoty intenzity vyzařování se posouvá se vzrůstající teplotou ke kratším vlnovým délkám podle Wienova

zákona posuvu. Pro hodnotu vlnové délky s maximální radiací $\lambda_{\max}$ [m] na povrchu tělesa tedy platí:

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T} \text{ [m]}$$

kde $\lambda_{\max}$ je vlnová délka s maximální hodnotou radiace, $b = 2,898 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$ je Wienova konstanta.



Obrázek 4 – Vyzářování dokonale černého tělesa [14]

Skutečné těleso vyzářuje (i pohlcuje) méně než černé těleso. Jeho spektrální hustota intenzity vyzářování H_λ je dána vztahem

$$H_\lambda = \varepsilon_\lambda \cdot H_{0\lambda} \text{ [W} \cdot \text{m}^{-3}]$$

kde ε_λ je emisivita, resp. pohltivost pro vlnovou délku λ , $\varepsilon_\lambda < 1$.

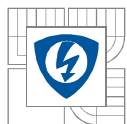
Látky, které mají pro různou vlnovou délku různou emisivitu ε_λ , vykazují také různé velké odchylky od záření černého tělesa, jsou to tzv. selektivní zářiče. Existují však tělesa, jejichž emisivitu lze považovat za konstantní ve značném rozsahu vlnových délek. Takové zářiče označujeme jako šedá tělesa s emisivitou ε .

Emisivita je definována jako poměr energie vyzářované objektem při dané teplotě k energii ideálně černého tělesa při stejné teplotě. Emisivita černého tělesa je rovna 1. Emisivita je velmi důležitým faktorem infračervené termometrie a její vliv není možno zanedbávat. Emisivita závisí na materiálu, úpravě povrchu, oxidaci povrchu a obecně platí

$$\varepsilon = f(\lambda, T)$$

Ve vztahu k emisivitě ε resp. ε_λ je i odrazivost (reflektance) ρ , ρ_λ , což je míra schopnosti odrážet záření a prostupnost (transmitance) τ , τ_λ , jako míra schopnosti propustit záření. Platí:

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



Je-li objekt ve stavu tepelné rovnováhy, nedochází k žádnému ohřívání ani ochlazování. Vyzařovaná energie musí být rovna energii pohlcované, takže emisivita ε se rovná pohltivosti (absorbtanci) α . [13]

3.2 Určování neznámé hodnoty emisivity povrchu materiálu

Při bezdotykovém měření teploty patří k nejčastějším nejistotám měření nepřesné nastavení emisivity měřeného povrchu materiálu. Zjistit emisivitu měřeného předmětu lze více metodami. V textu níže jsou popsány čtyři nejběžnější metody zjišťování emisivity.

Vyhledání emisivity v tabulkách vlastností materiálů

Hodnoty emisivit některých materiálů lze vyhledat v tabulkách. Ty mohou být součástí dokumentace termokamer, pyrometrů nebo se dají vyhledat na internetu (viz např. [31], [33]). Takto určenou emisivitu je nutné uvažovat jako orientační, protože skutečnou emisivitu povrchu může ovlivnit celá řada dalších skutečností. Např. jakým způsobem byl materiál obráběn a byl-li nějakým způsobem povrchově upravován, jak je odolný vůči povrchové korozi, atd.

Zahřátí měřeného vzorku na známou teplotu

Pokud se zahřeje měřené těleso nebo jeho vzorek na předem známou teplotu, lze poté v termokameře měnit hodnotu emisivity dokud naměřená teplota neodpovídá teplotě, na kterou byl předmět zahřátý. Pokud je ale měřené těleso vyrobeno z nějakého velmi dobře vodivého materiálu (např. měď, hliník, mosaz, atd.), může dojít k ochlazení povrchu během doby, kdy je termokamera nastavována a ohřátí a nastavení je tak nutno znovu opakovat. [32]

Použití dodatečného materiálu nebo speciálního nátěru

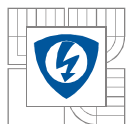
Při relativně nízkých teplotách (do 250 °C) lze nalepit na měřený objekt speciální černou pásku o známé emisivitě ($\varepsilon \rightarrow 1$). Termokamerou s nastavenou známou emisivitou se poté změří teplota pásky a následně se nastaví emisivita povrchu měřeného objektu tak, aby změřená teplota odpovídala teplotě pásky. Takto zjištěnou emisivitu lze poté použít na měření objektů se stejným povrchem. Povrch materiálu je možno také nastříkat černým sprejem nebo natřít speciální matnou tepelně odolnou černou barvou o známé emisivitě.

Kombinace dalších metod měření povrchové teploty

Nejužívanější metoda určování emisivity v provozních podmínkách je založena na současném měření teploty povrchu měřeného materiálu termočlánkem a termokamerou (nebo pyrometrem). Teplota měřená termokamerou se korekcí emisivity nastaví tak, aby se rovnala teplotě měřené kontaktním teploměrem. Tato metoda v praxi často představuje jedinou možnost správného nastavení a objektivizace měření, protože postihuje skutečně reálnou situaci při měření. Je však nutno zajistit, aby měl termočlánek s měřeným povrchem dobrý kontakt, aby byl schopen dostatečně rychle reagovat na změny měřené teploty a neodváděl z měřeného povrchu teplo. [32]

3.3 Termovizní systém

Termovizní systém (termokamera) zobrazuje rozdělení teplot na povrchu pozorovaného objektu. Rozložení teplot je znázorněno pomocí termogramů (termosnímků), na kterých je měřený předmět zobrazen různými odstíny barev nebo stupni šedi. Existují dva



základní typy termovizních systémů - systémy s opticko-mechanickým rozkladem obrazu (skenovací systémy) a systémy s maticovým detektorem.

Kamery s opticko-mechanickým rozkladem obrazu, nazývané také jako systémy s postupným zaváděním vstupní informace, postupně snímají (skenují) celé zorné pole po řádcích nebo sloupcích pomocí rychle se pohybující optické soustavy. Ta postupně přivádí na malý detektor záření z různých míst prostoru. Fotonový tok reprezentující snímané teplotní pole vyzařované měřeným objektem může být rozkládán různými způsoby. Nejčastěji pomocí kývavících se zrcadel (rozklad na řádky) a rotačních reflexních hranolů (rozklad na body). Detekční část může tvořit jeden elementární (bodový) detektor, více detektorů umístěných lineárně vedle sebe nebo malá mozaika detektorů. Kamery s opticko-mechanickým rozkladem nacházejí v současnosti využití ve vojenských aplikacích.

Kamery s maticovým detektorem, označované také jako FPA (*Focal Plane Arrays*), využívají velké matice malých separátních detektorů (např. chlazených i nechlazených mikrobolometrů, kvantových detektorů). Detektory jsou podobné CCD snímačům používaných v klasických kamerách. Celá snímaná oblast je optikou zaostřena na matici umístěnou v ohniskové rovině optického systému. Každý pixel výsledného termosnímku poté odpovídá jednomu detektoru v matici. Tyto systémy se proto také označují jako systémy se současným zaváděním vstupní informace. Z důvodu nižší výrobní ceny těchto termokamer jsou využívány především v komerční sféře.

Převážná většina termovizních systémů se skládá z následujících tří modulů.

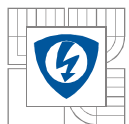
modul optiky –	zaměřuje záření na infračervený detektor případně provádí optický rozklad (vodorovný a svislý) obsahuje referenci teploty
modul detektoru -	převádí záření na elektrický signál
elektronika a software –	převádí analogový signál detektoru na digitální převádí signál na teplotu vytváří obraz a umožňuje jeho zpracování. [1]

3.4 Stručná historie vývoje termovizních kamer

Termovizní systémy mají více než čtyřicetiletou tradici. Podle historického vývoje a dle stupně vývoje infračervených detektorů lze termovizní kamery rozdělit zhruba do tří generací.

První generace zahrnuje termokamery vznikající v 70. a 80. letech, které byly převážně vyvíjeny a určeny pro vojenské účely. Tyto kamery využívaly jednoduché diskrétní detektory, ty tvořily fotovodivé lineární matice s maximálně 100 elementy typicky vyráběné z materiálu InSb, PbSe a později i HgCdTe.

První vyráběný průmyslový termovizní systém představila v roce 1965 švédská firma AGA pod názvem AGA Thermovision 665, což byl vlastně začátek používání termografické techniky mimo vojenské aplikace. Bylo to poměrně velké a těžké zařízení, které sestávalo z kamery, vyhodnocovací jednotky a vyžadovalo střídavé napájení 220V. Kamera pracovala



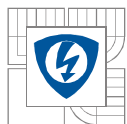
na principu opticko-mechanického rozkladu s jedním bodovým detektorem chlazeným kapalným dusíkem.

Výrazný posun v kvalitě termokamer v 80. letech pak přineslo vynalezení SPRITE detektoru (speciální typ skenovacího detektoru) a nasazení skenovací technologie. Typicky tyto kamery pracovaly v pásmu $8-12\ \mu\text{m}$ a s typickým teplotním rozlišením $0,2\ \text{K}$. Některé termokamery 1. generace stále ještě slouží v armádách. [19]

Druhá generace termokamer se vyznačuje použitím skenovacího systému ve spojení s lineárními nebo 2D FPA detektory s počtem 100 až 10000 elementů nebo případně ještě multiprvkovými SPRITE detektory. Teplotní rozlišení tím kleslo na typických $0,1\ \text{K}$. Tyto kamery se již vyznačovaly přijatelně malými rozměry a hmotností a začaly být prodávány i v komerčním provedení. Toho bylo docíleno díky integraci snímacích elementů a základní čtecí logiky na jeden společný čip. Nasazení těchto termokamer ve vojenství začalo již v druhé polovině 80. let a trvalo přibližně až do poloviny 90. let a i v současnosti stále představují hlavní podíl těchto zařízení ve výzbroji armád. Termokamery využívající vylepšené multilineární FPA jsou někdy označovány jako generace 2+ s vylepšeným teplotním rozlišením až $0,05\ \text{K}$. Typickým příkladem jsou HgCdTe detektory s 288×4 elementy pro pásma $3-5\ \mu\text{m}$ a $8-10,5\ \mu\text{m}$ s integrovaným plným signálovým zpracováním (integrace fotoproudu, rychlé čtení, výstupní předzesílení apod.).

Třetí generace obsahuje neskenovací termokamery využívající buď 2D chlazené FPA detektory z materiálu HgCdTe, InSb nebo nejnověji technologii QWIP (viz kapitola 4.1.6) nebo nechlazené FPA založené na mikrobolometrech nebo feroelektrické technologii. Počet elementů dosahuje jeden a více milionů. Tyto staring arrays, jak se také označují, již obsahují plné digitální zpracování signálu na společném čipu, rychlé integrované vyčítací obvody ROIC, volbu pixelů, antiblooming každého pixelu, předzesílení, úpravu a filtraci v blocích apod. Vyřazení skenovací mechaniky velmi zjednodušilo optiku, která má nyní za úkol jen zaostřit infračervený obraz na FPA. První kamery třetí generace byly k dispozici již v 90. letech a od počátku 21. století jsou volně na trhu i chlazené kamery s QWIP technologií nebo nechlazené kamery s detektorem s mikrobolometri (viz kapitola 4.1.3 a 4.1.4). Ty se sice vyznačují výrazně horší kvalitou obrazu než chlazené typy, jsou ale 2x až 4x levnější. [19]

Číslo generace není pevně svázáno s obrazovou kvalitou, ale spíše s hmotností, rozměry, výrobními náklady a spolehlivostí termokamer a zejména také s použitými detektory. Znatelný rozdíl v kvalitě obrazu je mezi 1. a 2. generací, ale již často minimální nebo žádný mezi 2. a 3. generací. Dobře vytvořená termokamera se skenovacím systémem má kvalitu obrazu srovnatelnou nebo i lepší než kamera s neskenovacím systémem s chlazeným FPA detektorem 320×240 pixelů. Zde je hlavní rozdíl v ceně, velikosti a hmotnosti, protože skenovací optika i s menším detektorem je výrazně dražší, větší a těžší než jednoduchá pevná optika s maticovým detektorem. Významný kvalitativní rozdíl 3. generace se objeví až při použití detektoru 640×512 pixelů a větších. V porovnání s nechlazenými typy detektorů pak kvalitou obrazu 2. generace jasně vítězí. Rozdíl ceny je však i více než pěti násobný ve prospěch nechlazených typů, nemluvě o životnosti a nižší energetické náročnosti. Proto doménou mikrobolometrických či nejnověji feroelektrických infračervených detektorů je méně náročnější komerční sféra. [19] [20]



4 SENZOR TEPLOTY

Senzor teploty je funkční prvek tvořící vstupní blok měřicího řetězce, tj. blok, který je v přímém styku s měřeným prostředím. Pojem senzor teploty je ekvivalentní pojmu snímač teploty (samostatná konstrukční součást teploměrového zařízení, která obsahuje teplotní čidlo) a také pojmu čidlo teploty (část snímače převádějící teplotu na jinou vhodnou fyzikální veličinu). Jako senzor se také označuje detektor tepelného zařízení nebo teploměr (zařízení k měření teploty).

Dle fyzikálního principu se senzory teploty dělí na odporové, termoelektrické, polovodičové s PN přechodem, dilatační, optické, radiační, chemické, šumové, akustické, magnetické, a na další jako jsou např. kapacitní a aerodynamické.

Dle transformace signálu se senzory dělí na aktivní a pasivní. Aktivní se působením teploty chovají jako zdroj elektrické energie (termoelektrické články). U pasivních, s výjimkou chemických indikátorů teplot, je nutné elektrické napájení pro transformaci teploty na jinou fyzikální veličinu, protože měření teploty je vždy měřením nepřímým. [2]

Dle styku s měřeným prostředím se senzory teploty dělí na dotykové a bezdotykové.

Bezdotykové senzory se dle interakce fotonů s materiálem rozdělují na dvě základní skupiny, a to kvantové a tepelné senzory. V kvantových detektorech dochází ke vzniku volných nosičů elektrického náboje interakcí fotonů s vázanými elektrony. U tepelných detektorů dochází k vyhodnocení pohlcené energie nepřímo - absorpcí fotonů dojde ke změně teploty citlivé části detektoru, která je zaznamenána snímači teploty. [25] V následujícím textu bude podrobněji pojednáno o bezdotykových senzorech.

4.1 Tepelné detektory infračerveného záření

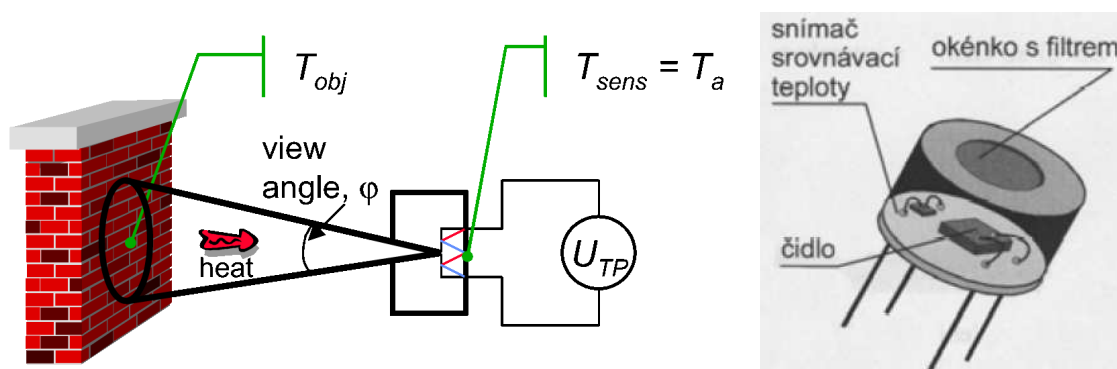
U tepelných detektorů dochází při absorpci fotonů k oteplení citlivé části detektoru a pohlcená energie se vyhodnocuje nepřímo prostřednictvím snímačů teploty. [2] Jako absorpční materiál se zpravidla využívá černý pohlcovač, který je nanesen na povrchu senzoru. Tepelné detektory se dělí na bolometrické, termoelektrické a pyroelektrické.

4.1.1 Termoelektrické detektory (Thermopile sensors)

Termoelektrické detektory, označované také jako infratermočlánky nebo termoelektrické baterie záření, využívají tepelných jevů, jako např. Seebeckova, Peltierova a Thomsonova, z nichž většinou jeden bývá dominantní. [3] Jak napovídá vcelku výstižný název infratermočlánky, jde o zahřívání termočlánků infračerveným zářením, které vysílá každý objekt o určité teplotě. Fyzikální podstatou je existence kontaktního potenciálu na povrchu každého kovu.

Termoelektrické senzory přímo reagují na tepelné vyzařování části objektu ve směru, na který jsou namířeny. Protože senzor nepotřebuje chlazení, lze tyto detektory využít v levných systémech. Dosahují běžně rozlišení 1°C v širokém měřicím rozsahu a až $0,1^{\circ}\text{C}$ v rozsahu úzkém. Základ senzoru tvoří skupina termočlánků, jejichž aktivní konce jsou umístěny do jednoho místa a jsou pokryty černě zbarveným materiálem. Černý materiál pohlcuje dopadající infračervené záření a vznikající teplo je měřené termočlánky. Záření navíc prochází okénkem v pouzdru senzoru, které zároveň pracuje jako optický filtr

a vymezuje i snímanou oblast (*view angle* viz obrázek 5). Výstupem senzoru je pak napětí U_{TP} úměrné dopadající intenzitě záření a tím i teplotě T_{obj} měřeného objektu. [10]

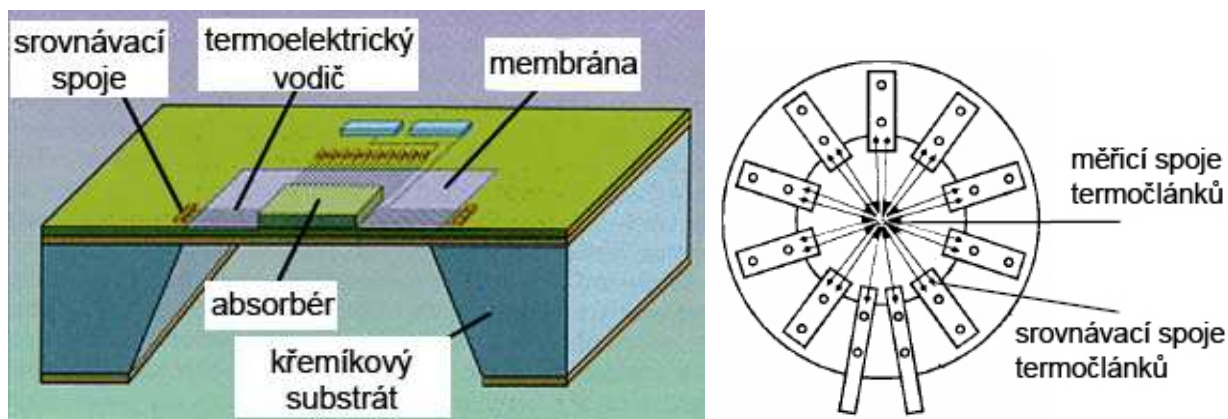


Obrázek 5 - Měření teploty objektu termoelektrickým senzorem - vlevo [10]

Pouzdro senzoru – vpravo [11]

Obvykle je součástí termoelektrického senzoru i klasický referenční termistor (typu NTC – s negativním teplotním koeficientem, tzn. se zahřátím součástky odpor klesá) pro měření teploty pouzdra senzoru. Je totiž nutné, stejně jako u klasických termočlánků, i zde provádět kompenzaci vlivu okolní teploty T_a (teploty studených konců termočlánků) na měřenou teplotu T_{obj} . Tato kompenzace již může být implementovaná na křemíkovém substrátu společně s termočlánky uvnitř pouzdra senzoru nebo se provádí vně senzoru. [10]

Z pohledu konstrukce termoelektrického senzoru jako součástky, jde obvykle o sériově řazené termočlánky, které jsou konstruovány jako tenké kovové pásky tloušťky cca $0,03\text{ mm}$ [2] nebo jako pásky zhotovené technologií tenkých vrstev nebo Si technologií (viz obrázek 6). Monolitické senzory se kvůli dobré tepelné vodivosti křemíku realizují na velmi tenké membráně - $5\text{ až }10\text{ }\mu\text{m}$, aby se zabránilo tepelnému toku mezi měřicími a srovnávacími spoji termočlánků. Měřicí spoje jsou umístěny ve středu membrány pod absorbujícím materiálem (absorbér) a srovnávací spoje na okraji na podložce. Pro termoelektrické vodiče se využívá spojení materiálů Bi - Sb, Si (typ P) - Al, Si (typ N) - Au, Si (typ P) - Au. [10]

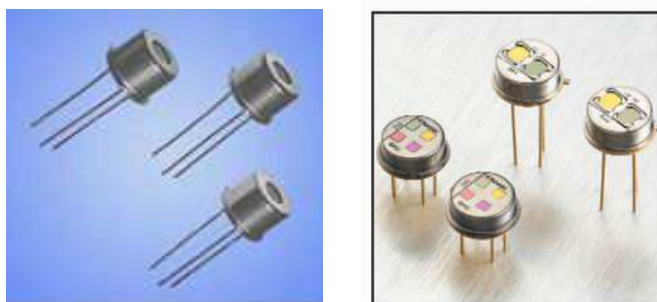


Obrázek 6 - Příklad struktury části čipu termoelektrického senzoru – vlevo [10]

Provedení senzoru s termočlánkovou baterií – vpravo [24]

Charakteristické parametry senzoru

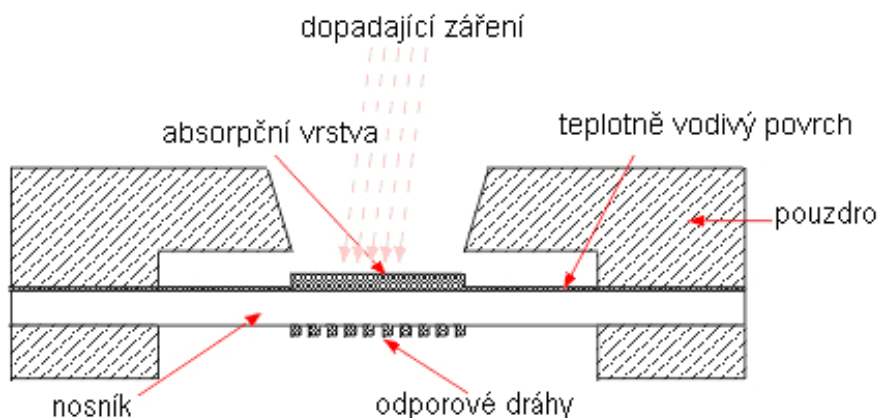
- *Sensitivity* (citlivost, převodní konstanta) - udává velikost výstupního napětí na intenzitě dopadajícího záření.
- *Noise equivalent power* (NEP) - udává minimální intenzitu záření, kterou je schopen senzor detekovat.
- *Detectivity* (D) – je rovna hodnotě $1/NEP$.
- *Response time* (časová konstanta, rychlost odezvy, frekvenční odezva) - minimální doba, kterou potřebuje senzor na změření změny teploty (maximální frekvence, se kterou se může měnit teplota měřeného objektu, aby ještě byly všechny změny senzorem zaznamenány). [10]



Obrázek 7 – Příklad termoelektrických senzorů od firmy PerkinElmer optoelectronics [10]

4.1.2 Bolometrické detektory, mikrobolometry

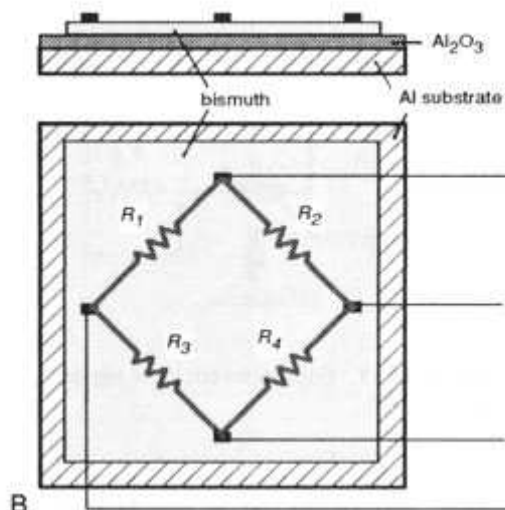
Princip bolometrického detektoru infračerveného záření je známý již od osmdesátých let devatenáctého století. Elektrický odpor bolometru se mění v závislosti na jeho teplotě, která závisí na množství absorbovaného dopadajícího infračerveného záření. Množství dopadajícího záření tedy může být určené ze změny odporu bolometru. Aby však byla změna teploty bolometru úměrná jen absorbovanému infračervenému záření, musí být samotný bolometr tepelně izolovaný od svého okolí. [1]



Obrázek 8 - Provedení jednoduchého bolometru [5]

Struktura jednoduchého bolometru je na obrázku 8. Infračervené záření dopadá na absorpční vrstvu senzoru tvořenou zlatou fólií, která pohlcuje až 95% záření. To ohřívá teplotně vodivý povrch i nosník. Na spodní straně nosníku je napařený meandr odporové dráhy, jejíž odpor se mění lineárně s teplotou. Na obrázku 9 je příklad dnes běžnější realizace

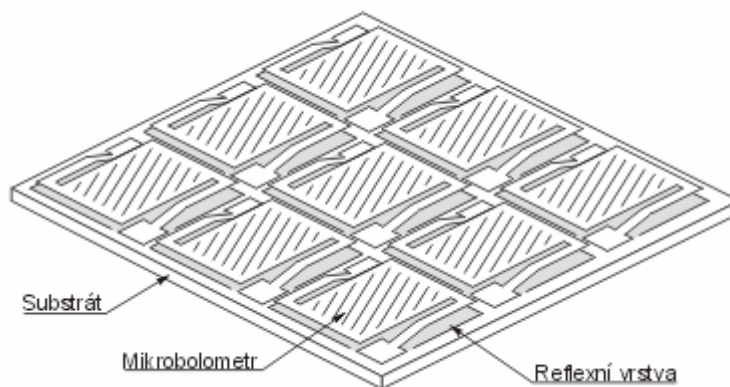
v integrovaných bolometrech, tzn. na hliníkovém substrátu (desce) odizolované oxidem hliníku Al_2O_3 , jsou na tepelně vodivé podložce z bismutu napařené odporové dráhy z kysličníků MgO , MnO , NiO , TiO_2 (tzv. termistorové bolometry) nebo chalkogenidové sklo $Tl_2SeAs_2Te_3$ (tzv. vrstevné bolometry). V případě jednoduchých bolometrů jsou použity obvykle čtyři vzájemně propojené do klasického Wheatstonova můstku (R_1 až R_4), z nichž se některé používají jako kompenzační nebo referenční (zastíněné proti záření). [4]



Obrázek 9 - Struktura integrovaného můstku z bolometrů [5]

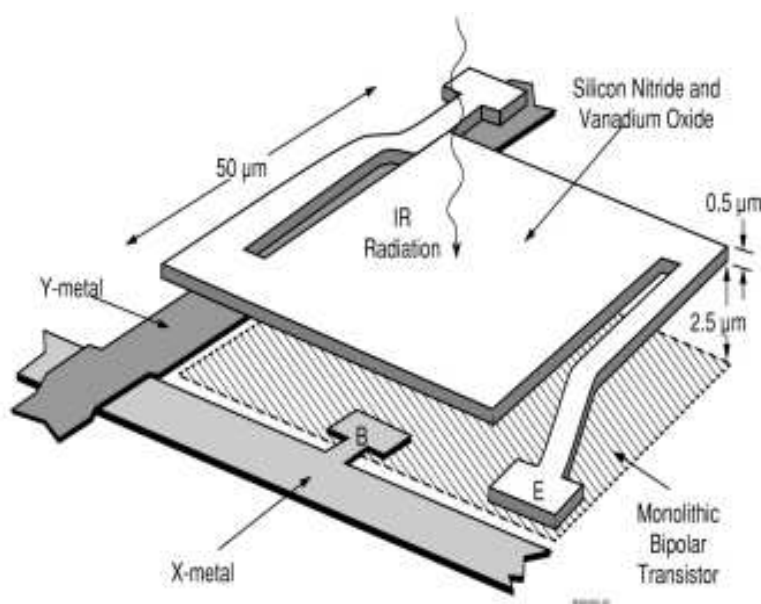
4.1.3 Princip mikrobolometru

Dnešní mikrobolometry jsou obvykle vyráběny na monolitických křemíkových substrátech jako běžné integrované obvody. Mikrobolometr (označovaný také jako mikrobolometrické pole) se od jednoduchého bolometru liší počtem odporových plošek na jednom senzoru. Vlastní snímač je tvořen dvourozměrným polem pokrytým teplotně citlivým odporovým materiálem ve formě plošek, který absorbuje infračervené záření (viz obrázek 10). Čipy kromě vlastního snímače ještě obsahují čítací elektroniku a další pomocné obvody. Celý čip je umístěn ve vakuovém obalu. [4]



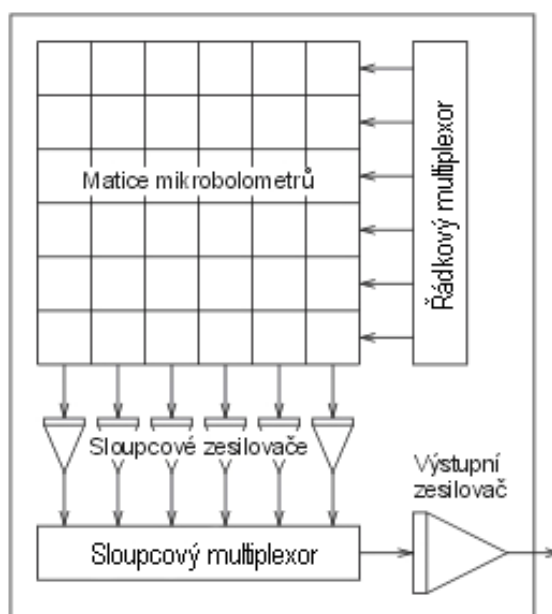
Obrázek 10 - Příklad struktury mikrobolometru [5]

Na obrázku 11 je detailní pohled na strukturu jedné plošky, která sama funguje jako klasický bolometr popsany výše. Jak je patrné z obrázku jako odporový materiál plošky, veliké řádově desítky μm a tlusté desetiny μm , se v současné době využívá oxid vanadičitý nebo nitrid křemíku. Ploška je z důvodu tepelné izolace od křemíkového substrátu vyvýšena o $2,5\mu\text{m}$ pomocí „nožiček“, které zároveň tvoří i přírodní kontakty. Izolant tvoří vzduch. Novější mikrobolometrické snímače mají pro zlepšení vlastností na substrátu pod jednotlivými mikrobolometry nanesenu reflexní vrstvu, která neabsorbované záření odráží zpět. Tím se zvyšuje účinnost. Dalším důsledkem reflexní vrstvy je potlačení vlivu teploty substrátu, protože jím emitované infračervené záření se odráží zpět. K vzájemnému propojení jednotlivých mikrobolometrů slouží propojovací síť obvykle hliníkových vodičů (X-metal, Y-metal na obrázku 11). Dále je pod každou ploškou implementován spínací tranzistor (*Monolithic Bipolar Transistor*), který umožňuje adresovat jednotlivé mikrobolometry řídicí logikou, a tak z každého postupně přečíst změnu velikosti odporu (resp. změnu úbytku napětí) způsobenou ohřevem z dopadajícího infračerveného záření. Mikrobolometrické snímače, založené na oxidech vanadu, bývají v reálných aplikacích umístěné na Peltierově elementu, kterým se udržuje poměrně přesná konstantní teplota čipu (až v rozmezí $\pm 0,1^\circ\text{C}$). Tím se alespoň částečně zabrání změnám vlastností snímače v souvislosti se změnami teploty a zpřesňuje se měření. Např. firma Sofradir vyrábí snímače založené na amorfním křemíku, které není třeba udržovat na konstantní teplotě, odpadá tedy nutnost použití Peltierova elementu. [5, 1]



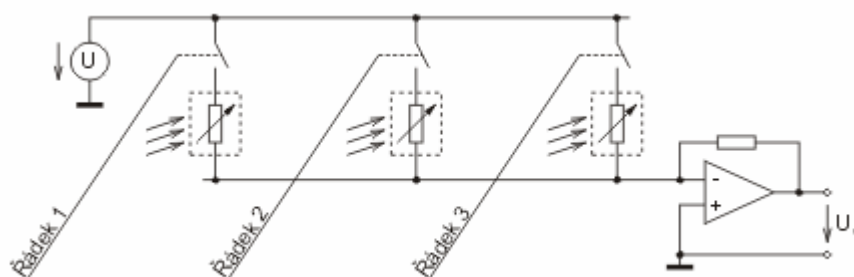
Obrázek 11 - Detailní pohled na strukturu jedné plošky mikrobolometru [5]

Jak již bylo uvedeno výše, celý obrazový snímač obsahuje kromě vlastního pole mikrobolometrů ještě další pomocné obvody. Obrázek 12 ukazuje zjednodušené blokové uspořádání čipu snímače. Na obrázku nejsou zakresleny bloky časování a řízení. [1] Řídicí logika senzoru je podobná té, která se využívá ve známých CCD obrazových snímačích nebo dynamických pamětech DRAM, kde se také postupně adresují a čtou jednotlivé elementy po řádcích (viz obrázek 13). Moderní mikrobolometry však navíc obsahují již na čipu přímo integrované signálové obvody pro analogovou nebo digitální úpravu signálu včetně například standardizovaného video signálu na jednom z výstupů obvodu. [9]



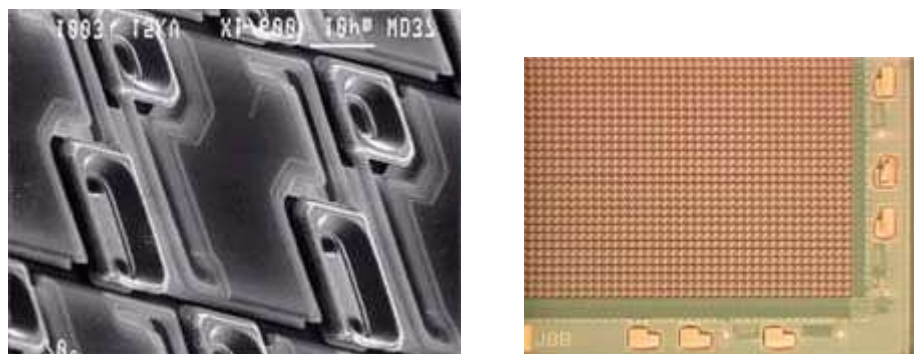
Obrázek 12 – Blokové schéma mikrobolometrického snímače [9]

Zjednodušené elektrické schéma zapojení jednoho sloupce mikrobolometrického pole je na obrázku 13. Signály označené jako řádek n jsou výběrové signály řádkového multiplexoru. Aktivní může být vždy pouze jediný z nich. Výstupní signál mikrobolometrického obrazového snímače je tvořen sekvenční posloupností složenou ze signálů jednotlivých elementů. Čtení informací probíhá klasickým způsobem - řádkovým multiplexorem se vybere jeden aktivní řádek, sloupcovým multiplexorem se postupně vybírají výstupy jednotlivých elementů z aktivního řádku. Po přečtení všech pixelů daného řádku se vybere následující řádek. Tento postup se opakuje pro všechny řádky mikrobolometrického pole. [9]



Obrázek 13 – Principiální schéma zapojení jednoho sloupce [9]

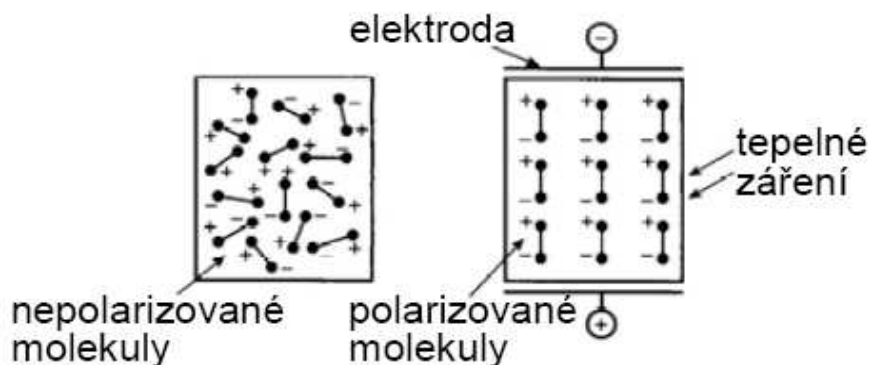
Na obrázku 14 je reálná fotografie jedné plošky a výřez čtvrtiny čipu mikrobolometrického pole o rozlišení 320x240 pixelů. Tomu dominuje matice snímačů s bloky řídicí logiky po stranách okolo matice. Z pohledu současných možností velikostí mikrobolometrických obrazových infračervených snímačů je možné implementovat na jeden křemíkový substrát více než 300 tisíc plošek mikrobolometrů a vytvořit rozlišení 640x480 pixelů. Dnes jsou již běžná rozlišení 320x240 pixelů. Vyrábí se však, z důvodu nižší ceny, například i rozlišení 160x120 pixelů. Na ceny kompletních termovizních systémů má obvykle větší vliv zaostřovací optika než samotný senzor. Ovšem čím větší je senzor, tím větší a dražší je i optika. [5]



Obrázek 14 - Fotografie reálného provedení mikrobolometru;
vlevo - detail jedné plošky; vpravo - čtvrtina čipu mikrobolometru [5]

4.1.4 Pyroelektrické detektory

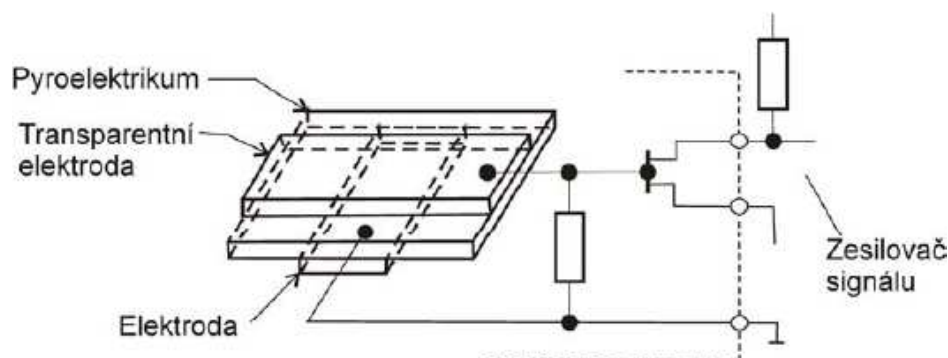
Pyroelektrické detektory jsou vytvořeny z krystalického materiálu, který při osvětlení infračerveným zářením generuje elektrický povrchový náboj. Jestliže se změní hodnota dopadajícího záření, změní se i hodnota elektrického náboje. Detektory jsou založeny na pyroelektrickém jevu, tj. změně spontánní polarizace pyroelektrika při změně teploty (viz obrázek 15). Při tomto jevu dochází ke změně orientace polarizovaných krystalů. Pyroelektrický jev se vyskytuje u pyroelektrik s trvalou polarizací nebo u některých feroelektrik, u nichž se orientace domén vytvoří silným elektrickým polem. Doba odezvy je velmi rychlá, řádově v milisekundách.



Obrázek 15 - Princip pyroelektrického senzoru [11]

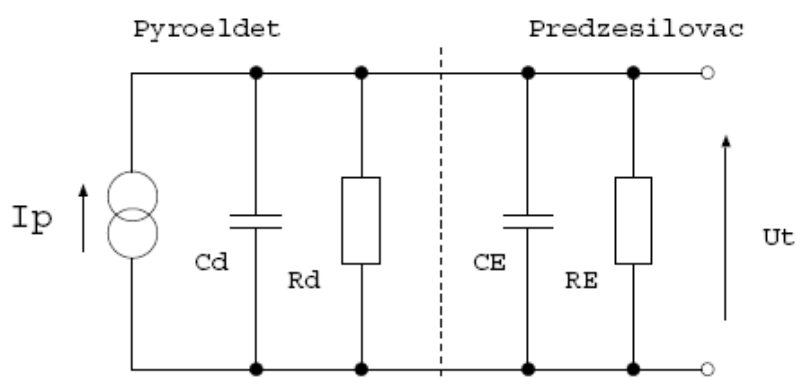
Pyroelektrické snímače mohou být vyrobeny z různých druhů materiálu. Některé z nich jsou jednoduté krystaly (LiTaO_3 , NaNO_2 , triglycin-sulfát TGS) nebo keramické materiály (na bázi titaničitanu a zirkoničitanu olovnatého, PbTiO_3). Úroveň signálu v těchto snímačích může být velmi nízká, proto je nutné umístit zesilovač co nejbližší zdroji signálu. Pyroelektrickou vrstvu lze nastřelováním nanést na čip, který v sobě obsahuje potřebné zesilovače a multiplexory (pro adresaci velkých snímacích polí). Toto řešení je však relativně drahé. Pro jednodušší a levnější aplikace se tedy pyroelektrická vrstva nanáší na levnější materiály, jako je např. keramika. Existuje mnoho pyroelektrických materiálů a to jak povlaků (filmů), tak jednodutých krystalů, které mohou být nanášeny na podklad bez komplikací vzniklých použitím nastřelovacích technik. Jednoduté krystaly se nanášejí obtížně, ale jejich odezva na infračervené záření je velmi dobrá. Naopak nanést tenký pyroelektrický film je velmi jednoduché, nicméně vlastnosti těchto filmů jsou horší. [12]

Na obrázku 16 je uspořádání pyroelektrického čipu s předzesilovačem. Čelní elektroda musí být transparentní pro infračervené záření.



Obrázek 16 – Pyroelektrický čip s předzesilovačem [24]

Pyroelektrický senzor si je tedy možné představit jako kondenzátor vytvořený nanesením kovových elektrod na obě strany tenké vrstvy pyroelektrického materiálu. Absorpce infračerveného záření o výkonu $P(t)$ pyroelektrickým materiálem má za následek změnu jeho teploty za čas ΔT . Tato změna teploty se projeví změnou polarizace, která vyvolá změnu elektrického náboje v pyroelektrickém materiálu, což se projeví průchodem proudu $I_p(t)$. Lze si to představit tak, že kondenzátor, tvořený pyroelektrickým materiálem, je nabíjen ze zdroje proudu $I_p(t)$, který vzniká absorpcí tepelného toku senzorem. [12] Náhradní zapojení pyroelektrického snímače je na obrázku 17. Náhradní schéma zahrnuje zdroj proudu $I_p(t)$, kapacitu snímače C_d a odpor R_d dielektrika snímače. Ve schématu jsou také zakresleny náhradní prvky zesilovacího obvodu – kapacita C_E a odpor R_E . [12]



Obrázek 17 – Náhradní zapojení pyroelektrického snímače [12]

4.2 Kvantové detektory infračerveného záření

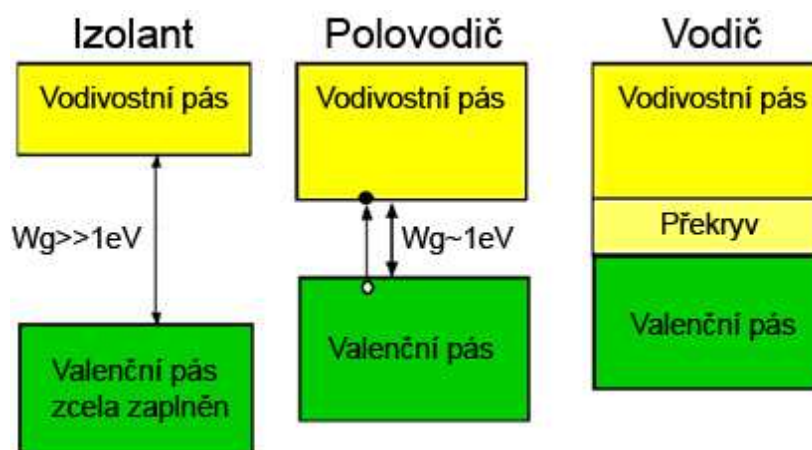
Kvantové detektory jsou polovodičové systémy využívající k detekci infračerveného záření vnitřní fotoelektrický jev. Ten je založen na schopnosti dopadajících fotonů na materiál detektoru excitovat nosiče elektrického náboje - elektrony z valenčního pásu, či z hladin uvnitř zakázaného pásu do vodivostního pásu polovodiče (viz obrázek 18). Tím dochází ke generaci párů elektron – díra a mění se elektronová, resp. děrová vodivost detektoru. Počet elektronů a tedy i velikost výstupního elektrického signálu je úměrný intenzitě záření.

Při teplotě vyšší než je absolutní nula a při splnění podmínky $W_f \geq W_g$, kde W_f je energie fotonů a energie W_g udává šířku zakázaného pásu polovodiče, dochází k uvolnění elektronu a jeho přechodu na vyšší energetickou hladinu. Pro energii W_f absorbovaných fotonů platí

$$W_f = \frac{h \cdot c}{\lambda \cdot e} \text{ [eV]}$$

kde $e \doteq 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ je náboj elektronu, c je rychlost světla, λ je vlnová délka dopadajících fotonů, h je Planckova konstanta.

Elektron se dostane z valenčního pásu do vodivostního pásu v energetickém pásovém modelu polovodiče (viz obrázek 18 uprostřed). Po uvolnění elektronu zůstane v elektronovém obalu ionizovaného atomu prázdné místo, které se nazývá díra. Ionizovaný atom se pak chová jako elementární kladný náboj. Uvolněný elektron se může v polovodiči volně pohybovat. Rovněž tak díra se pohybuje a to tak, že ionizovaný atom převezme do elektronového obalu chybějící elektron ze sousedního neutrálního atomu. Tento atom se tak ionizuje a stává se tak dírou a nositelem kladného náboje. Tepelný pohyb elektronů a děr je v polovodiči náhodný. [2]



Obrázek 18 – Energetický pásový model [26]

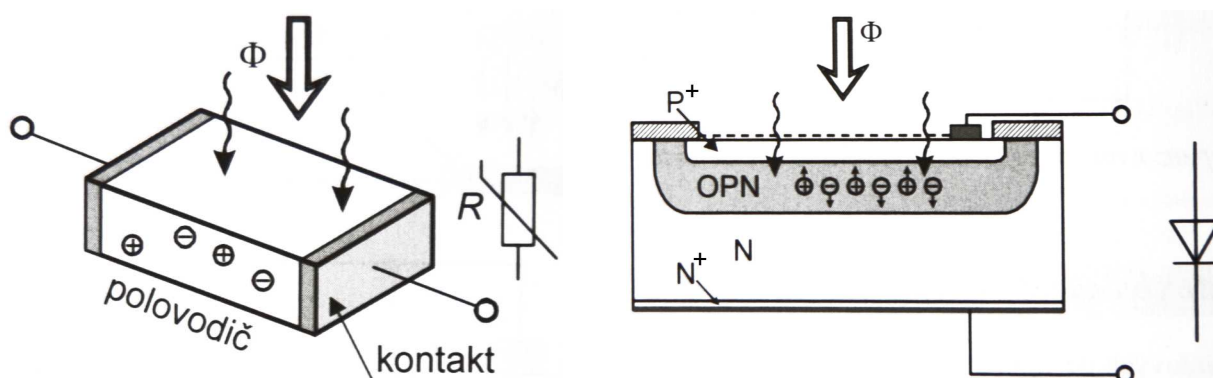
Kvantové detektory jsou polovodičové detektory (Si, Ge, PbS, Te, InSb, PbSe, GaAs, CdHgTe, PbSnTe [2]) a dle typu polovodiče se dělí na intrinsické (fotorezistory) a extrinsické (fotodiody). Novější typ kvantového detektoru se označuje jako QWIP (*Quantum Well Infrared Photodetector*). [27]

Intrinsické kvantové detektory (fotorezistory)

Intrinsické detektory infračerveného záření, jsou vyrobeny z čistého (vlastního) polovodiče. Intristický detektor se také označuje jako fotorezistor. Mechanismus funkce spočívá ve změně pohyblivosti nosičů náboje při dopadu fotonů na polovodičovou vrstvu (viz obrázek 19 vlevo). Jeho vodivost je funkcí fotonového toku, neboli detektor pracuje v tzv. fotovodivostním módu a vyžaduje elektrické pole přivedením vnějšího napětí. Elektrické pole způsobí unášení nosičů náboje a vnějším obvodem následně prochází elektrický proud.

Extrinsické kvantové detektory (fotodiody)

Mechanismus funkce extrinsických (nevládních) detektorů je založen na polovodičovém PN přechodu. Počet nosičů náboje je v tomto případě dán počtem příměsí. V polovodiči typu N se vyskytují příměsové atomy s nadbytkem valenčních elektronů. U polovodiče typu P vzniká opačná situace - příměsové atomy se vyznačují nedostatkem valenčních elektronů. Spojením těchto dvou typů polovodičů vzniká PN přechod, ve kterém se difúzí děr z oblasti P do oblasti N a elektronů opačným směrem ustaluje dynamická rovnováha a vyrovnávají se koncentrace elektronů a děr na obou stranách přechodu. Vzniká tak elektrická dvojvrstva nábojů označovaná jako oblast prostorového náboje (OPN viz obrázek 19 vpravo), kde se nenacházejí v rovnovážném stavu volné nosiče. Absorpcí fotonu v této dvojvrstvě dojde ke vzniku páru elektron-díra a následnému pohybu elektronu do oblasti N a díry do oblasti P. Tak vzniká na fotodiodě napětí. Rozlišujeme fotovodivostní a fotovoltaiické fotodiody. [25]



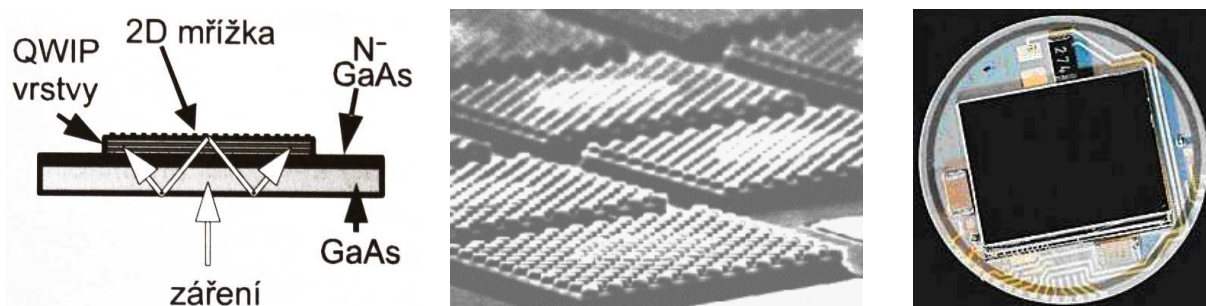
Obrázek 19 – Princip kvantových detektorů – fotorezistor vlevo; fotodiodový detektor vpravo [2]

QWIP detektory

Tento typ kvantového detektoru vyvinul tým kosmické agentury NASA. Pracovní princip senzoru QWIP (*Quantum Well Infrared Photodetector*) je stejný jako u extrinsického detektoru. QWIP je založen na využití tzv. kvantových jam (*quantum wells* - někdy bývá též překládáno jako kvantová studna). Jedná se o struktury z různě vodivých vrstev nepatrné tloušťky, takže se v nich uplatňují zákony kvantové mechaniky. Detektor je složen z více než 100 vrstev polovodiče GaAs, z nichž každá vrstva má šířku 10–700 atomů. Jednotlivé vrstvy pracují jako kvantové jámy, což znamená, že uvolní elektron pouze když na ně dopadne světelné záření o přesně definované energii. Každá z vrstev je „vyladěna“ na dopadající fotony s jinou energií, čímž lze dosáhnout větší citlivosti senzoru v širokém pásmu dopadajícího záření. [28]

Elektrická složka elektromagnetického pole musí mít pro maximální citlivost detektoru směr normály k vrstvám QWIP. Vzhledem k tomu, že toto nelze jednoduše zajistit, je použita plošná mřížka, na níž se tok fotonů po průchodu tenkou strukturou odrazí a rozptýlí do všech směrů, přičemž vektorové složky záření se ve vrstvách částečně pohltí a částečně odrazí. Pro odraženou část toku se děj opakuje [2]. Uvolněné elektrony detekuje speciální čip, který informaci předává počítači. Ten pak na základě získaných údajů vytvoří výsledný obraz. [28] Na obrázku 20 vlevo je zobrazeno uspořádání QWIP FPA matice, uprostřed je vidět struktura detektoru s plošnou mřížkou na povrchu. Vpravo je fotografie QWIP senzoru

umístěná na keramickém substrátu. Senzor má rozlišení 320x240 pixelů a jeho rozměry jsou 11x14mm.



Obrázek 20 – Uspořádání QWIP FPA matice – vlevo [2];
struktura detektoru s plošnou mřížkou – uprostřed a fotografie QWIP senzoru - vpravo [29]

V dnešní době nejčastěji využívaný polovodičový materiál pro kvantové detektory je HgCdTe (tellurid rtuťnokademnatý), často také označovaný jako CMT (*Cadmium Mercury Telluride*). Jeho výhodou je možnost nastavení maximální citlivosti v rozmezí $3\text{--}5\mu\text{m}$ nebo $8\text{--}14\mu\text{m}$ pouze složením sloučeniny. Nevýhodou je jeho „nekompatibilita“ s křemíkem a tedy složitější implementace na křemíkový čip. Signálový výstup kvantového detektoru je však malý a v normálním stavu při pokojové teplotě je „zaplavený šumem“ generovaným uvnitř součástky. Protože šum polovodiče je závislý na teplotě, je možné a nutné jej eliminovat chlazením detektorů na velmi nízké teploty (např. kapalným dusíkem). Pro detekční pásmo $3\text{--}5\mu\text{m}$ na -80°C a pro pásmo $8\text{--}14\mu\text{m}$ na -193°C . Chlazení je tedy hlavní nevýhoda kvantových detektorů, ale protože jinak dosahují výborných elektrických vlastností (vysoká detektivita, rychlá odezva), jsou voleny pro aplikace plošného termálního zobrazování, tedy pro účely termovize. [19]

5 TERMORIZNÍ KAMERA SAT - HY 6800

Při praktické části diplomové práce byla využívána termovizní kamera SAT-HY 6800 (viz obrázek 21), kterou vlastní Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky. Termokamera měří vyzařované infračervené záření a zobrazuje ho ve formě teplotního pole povrchu měřeného objektu. Kamera je vybavena zabudovaným 24° objektivem, vyjímatelnou baterií a řadou příslušenství. Je to ruční přenosná kamera odolná proti prachu a stříkající vodě, je vhodná k použití v terénu. Obraz (termogram) je možné sledovat v reálném čase v integrovaném hledáčku.



Obrázek 21 – Termovizní kamera SAT – HY 6800

5.1 Základní technické parametry termokamery

I když se, jak z názvu vyplývá, jedná o termovizní kameru, neumí ukládat videosekvence, ale pouze statické snímky. Jde tedy spíše o „fotoaparát“, který ukládá na paměťovou kartu infračervené snímky v nepravých barvách. Snímky jsou ukládány ve speciálním formátu .SAT. Pro jejich otevření a následné zpracování je nutný program SAT Report – popsáný v kapitole 6. Základním prvkem termokamery je nechlazený FPA mikrobolometr, popsáný v kapitole 4.1.3 a 4.1.4.

Detektor	typ	nechlazený FPA mikrobolometr
	spektrální rozsah	8–14 μm
	rozlišení	320 x 240 bodů
Pracovní prostředí	provozní teplota	–20 až +50 °C
	krytí	IP54
	vibrace	2,5G
Měření	teplotní rozsah	–10 až +600 °C
	teplotní citlivost	0,08 °C
	přesnost	$\pm 2^\circ\text{C}$ nebo $\pm 2\%$ z měřeného rozsahu
	minimální zaostřovací vzdálenost	0,3 m
Provedení	paměťová karta	Compact Flash 128MB, 500 snímků
	rozměry	200 x 105 x 110 mm
	hmotnost	< 1,75 kg
Napájení	baterie	Li-ion nabíjecí, vyjímatelná
	výdrž	více než 2,5 h souvislého provozu
	nabíjení	pomocí inteligentní externí nabíječky

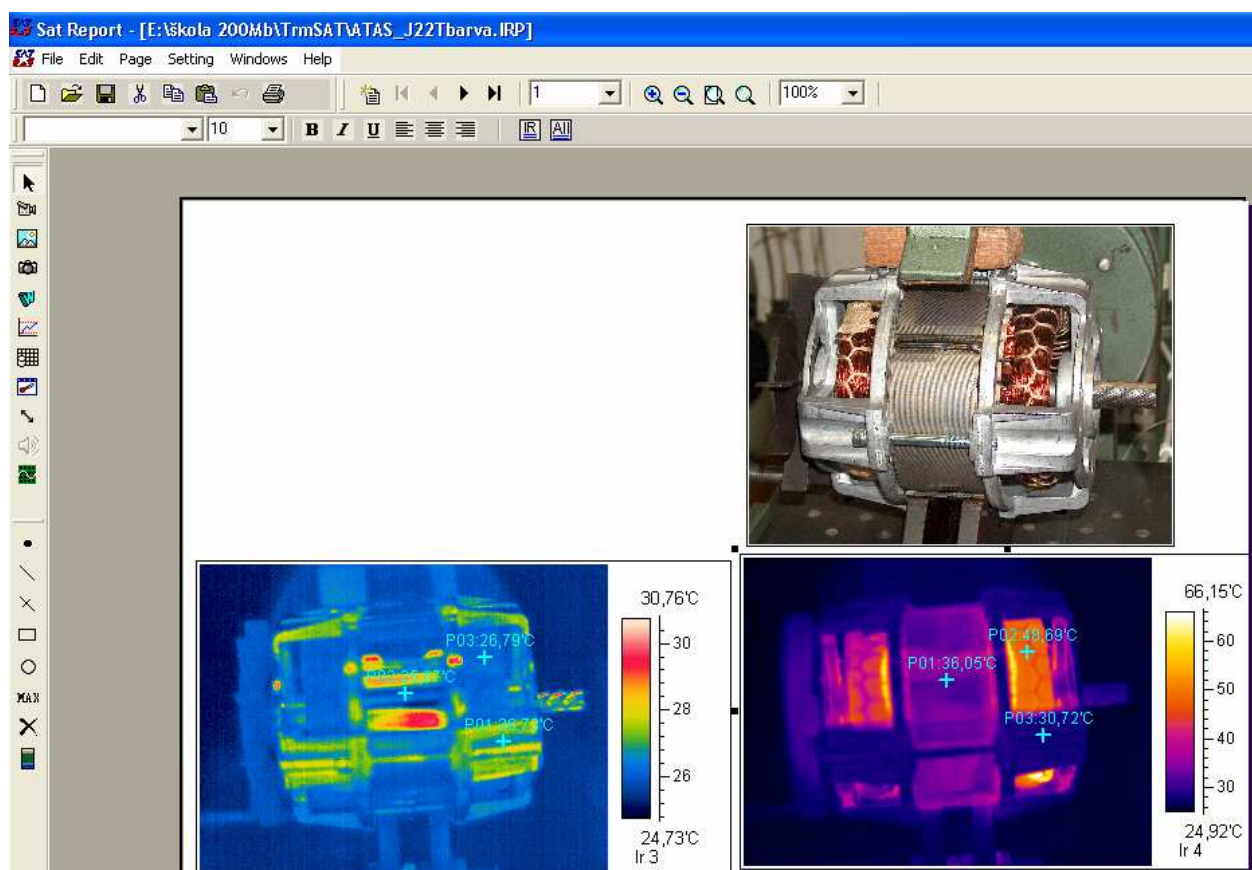
Tabulka 1 – Základní technické parametry termokamery [22, 23]

6 MOŽNOSTI PROGRAMU SAT REPORT

Program SAT Report slouží k vyhodnocování infračervených obrázků z termovizní kamery SAT HY-6800. Protože se jedná o programovou verzi už z roku 2003, není uživatelské prostředí „nejpřívětivější“. Novější verze nebo alespoň aktualizace programu není na internetových stránkách výrobce k dispozici [21]. Program je přizpůsobený pro vytváření výsledných revizních zpráv z měření, důkladnější teplotní vyhodnocování snímků je těžkopádné a časově náročnější. Např. pro pouhé zjištění teploty určitého bodu ve snímku je nutné nastavit relativně mnoho údajů v různých dialogových oknech.

6.1 Vyhodnocování pořízených snímků

Na obrázku 22 je zobrazeno uživatelské prostředí programu. V horní části se nachází hlavní menu a menu s nástroji pro ovládání textu a orientaci ve zprávě. V levé části je umístěn sloupec nástrojů sloužících k vyhodnocování infračervených snímků.



Obrázek 22 – Základní uživatelské prostředí programu SAT Report

6.1.1 Zobrazení a uložení infračerveného snímku

K zobrazení infračerveného snímku (*infrared chart object*) je nutné kliknout na ikonu

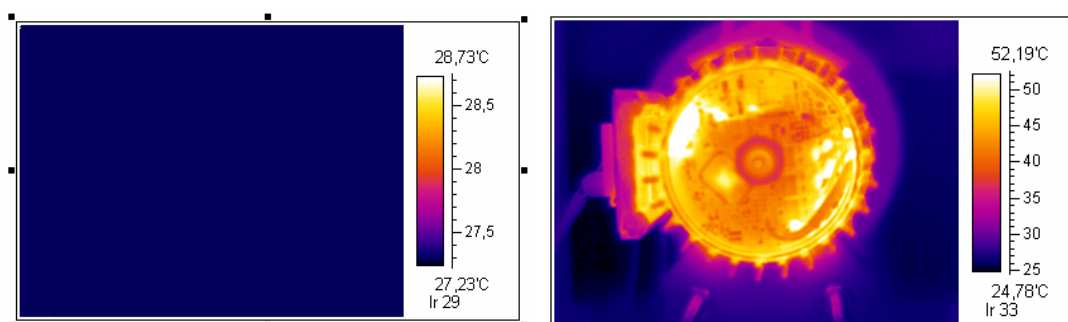


(*Ir Image*) a na prázdném místě ve stránce tažením myši vytvořit oblast (viz obrázek 23). Dále kliknutím pravým tlačítkem myši do vytvořené oblasti a zvolením příkazu *Connect* se otevře dialogové okno, pomocí něhož je teprve možné otevřít uložený snímek s příponou .SAT. Toto je názorný příklad, kolik úkonů je nutné provést k dosažení

jednoduché operace a jak neefektivně se s programem pracuje. Ve vytvářené zprávě je možné takto postupně otevřít více snímků. Do zprávy lze dále vložit fotografii nebo obrázek s příponou .JPG nebo .BMP. Postup je shodný viz výše až na první krok, kdy je nutné kliknout na ikonu  (Photo).

Celou zprávu lze uložit do souboru s příponou .IRP. Pro opětovné otevření souboru je však nutné mít na počítači nainstalovaný program SAT Report. Druhou a zároveň poslední možností je exportovat zprávu do souboru s příponou .DOC, ten je možné otevřít v běžně rozšířeném programu MS Word.

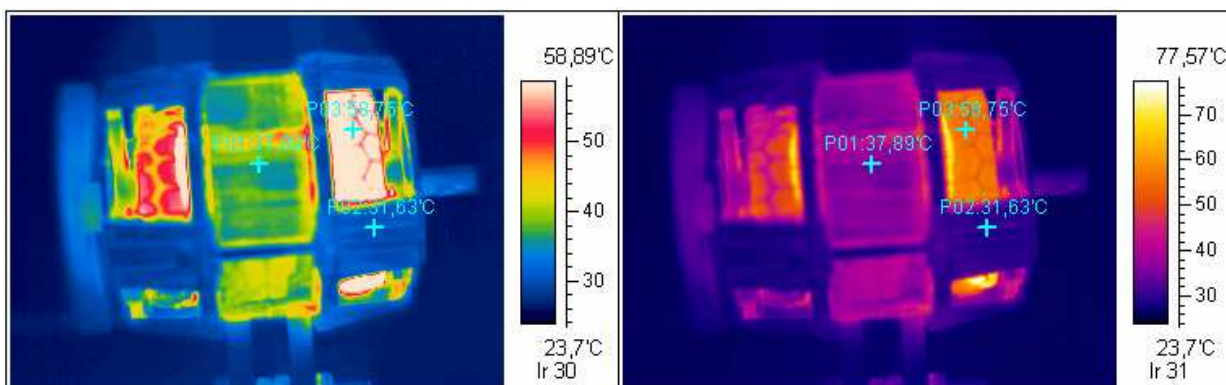
Jsou-li potřeba snímky pořízené kamerou v jiném, než .SAT formátu (např. .JPG), je nutné je nejdříve pomocí programu SAT Report otevřít, poté je pomocí schránky ve Windows přenést do nějakého externího programu (např. Malování, Photoshop, ...) a pomocí něj je do požadovaného formátu uložit.



Obrázek 23 – Oblast pro vložení snímku (vlevo) a připojený snímek (vpravo)

6.1.2 Analýza infračervených snímků

Program zobrazuje infračervené snímky v nepravých barvách na základě uložených teplotních dat ve snímku. Je možné vybrat jednu ze šesti barevných palet, aby se dosáhlo vhodného barevného zobrazení snímku dle konkrétních požadavků (z nabídky *Setting* → *Palette*). Vedle každého snímku je zobrazena stupnice teplot, které se ve snímku nacházejí. Teplotní rozsah a jemu odpovídající barevnou škálu lze nastavit kliknutím pravým tlačítkem myši na snímek a zvolit příkaz *Scale Limits*. Zobrazené dialogové okno nabízí buď ruční nebo automatické nastavení rozsahu. Na obrázku 24 je otevřen jeden a tentýž snímek. Je vidět, jaký vliv má různé nastavení barevné palety a rozsahu teplot na vzhled snímku – vlevo barevná paleta *Feather* a menší rozsah teplot, vpravo barevná paleta *Iron* a větší rozsah teplot.

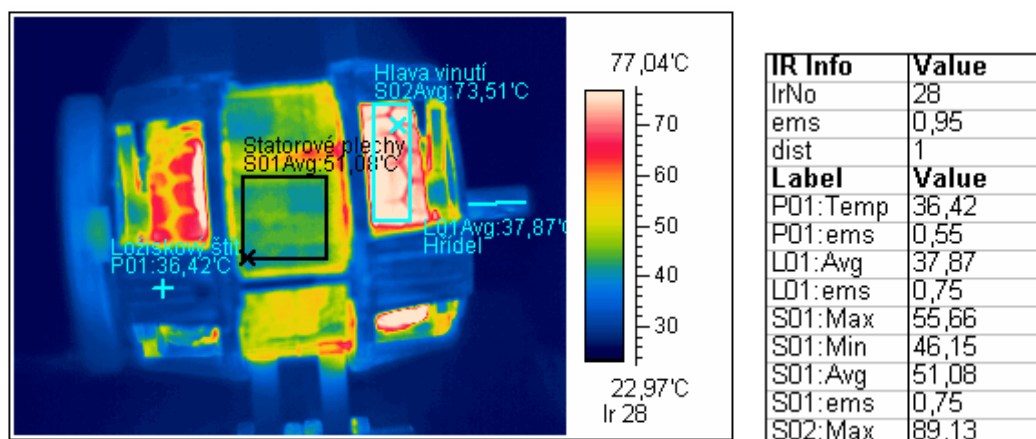


Obrázek 24 – Ukázka nastavení barevné palety snímku a rozsahu teplot

Každému snímku je možné v programu nastavit čtyři základní parametry (podmínky při měření) – emisivitu, vzdálenost měřeného objektu od termovizní kamery, teplotu okolí a relativní vlhkost. Při změně kteréhokoli parametru se automaticky přepočítají i teplotní data uložená ve snímku. Toho lze využít ke zjištění, jak tyto parametry ovlivňují prováděné měření. Parametry lze samozřejmě nastavit přímo v termokameře při samotném měření.

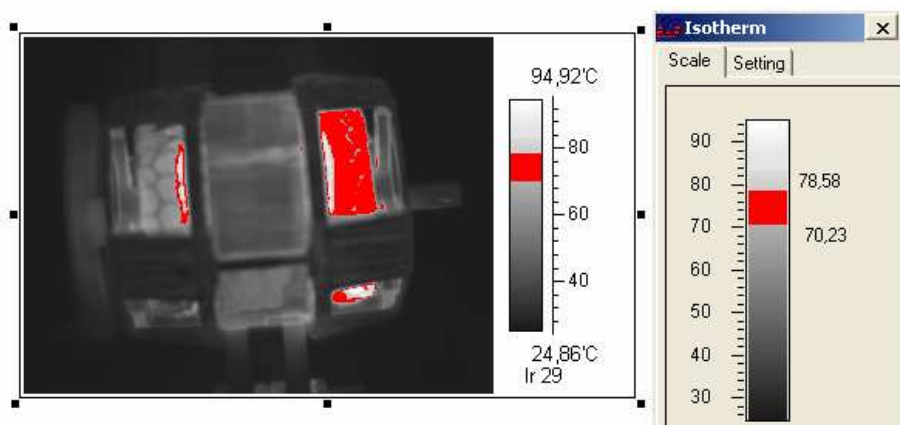
Připravené snímky lze z teplotního hlediska analyzovat pomocí nástrojů umístěných v levém sloupci uživatelského prostředí. Do části snímku, ve které se zjišťuje teplota, se musí vložit určitý geometrický útvar – bod, úsečka, obdélník nebo kružnice. Poté je možné v podmenu nastavit, aby se v obrázku zobrazovala maximální, minimální nebo průměrná teplota této, geometrickým tvarem určené, části snímku (viz obrázek 25). Kliknutím pravým tlačítkem myši do snímku a zvolením příkazu *Setting* se otevře dialogové okno. V záložce *Analysis* je možné jednotlivým geometrickým útvarům přidat popisek a nastavit následující parametry – emisivitu, vzdálenost, min./max./prům. teplotu a barvu. Důležitá je zejména emisivita. Vyhodnocují-li se v jednom snímku dvě nebo více částí (nebo objekty) s různou emisivitou, je nutné emisivitu nastavovat ve zmíněném dialogovém okně, teplota uvažované části se automaticky přizpůsobí.

Zjištěná data (teploty, emisivity, datum a čas pořízení snímku, vzdálenosti objektů, ...) z analyzovaných oblastí snímku lze exportovat do tabulky (viz obrázek 25). Kliknutím na ikonu  (*Result Table*) a na prázdném místě ve stránce se tažením myši vytvoří prázdná tabulka. Poté se kliknutím pravým tlačítkem myši na tuto tabulku a zvolením příkazu *Connect* otevře dialogové okno, ve kterém je možné nastavit, jaká data (a z jakého snímku) se do tabulky exportují.



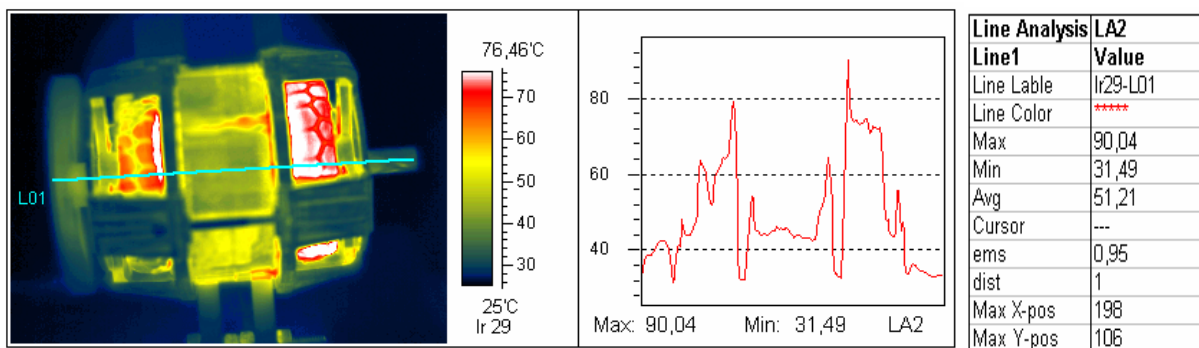
Obrázek 25 – Teplotní analýza snímku a exportovaná data v tabulce

Dalším užitečným nástrojem je izotermická analýza. Tato analýza označí jednou barvou všechny body ze zadaného teplotního rozsahu. Lze tak například zjistit, jaká část objektu je teplejší než maximální povolená teplota nebo naopak jaká část objektu se zahřívá v dovolených mezích teplot. Z obrázku 26, ve kterém je použita izotermická analýza, je vidět, že povrch pravé hlavy vinutí motoru je zahřátý na teploty v rozmezí 70 až 78 °C. V jednom snímku je možné použít najednou maximálně dvě izotermické analýzy. Rozsah teplot se nastavuje v dialogovém okně *Scale*, které se zobrazí po kliknutí pravým tlačítkem myši do snímku a zvolením příkazu *Isotherm* (viz obrázek 26). Barvu označených bodů lze v tomto okně rovněž změnit. Ve snímku na obrázku 26 byla použita paleta barev *Grey*.



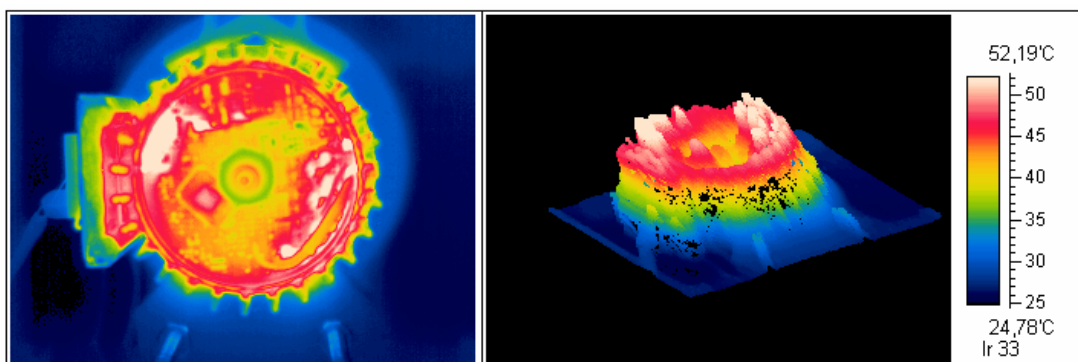
Obrázek 26 – Izotermická analýza

Je-li ve snímku umístěn alespoň jeden geometrický útvar – úsečka, lze provést lineární analýzu. Kliknutím na ikonu (Line Analysis Tool) a na prázdném místě ve stránce se tažením myši vytvoří ohraničená oblast. Poté se kliknutím pravým tlačítkem myši na oblast a zvolením příkazu *Connect* otevře dialogové okno, ve kterém se zvolí analyzovaná úsečka. V připravené oblasti se vytvoří graf, který znázorňuje škálu teplot po celé délce úsečky (viz obrázek 27). Zaznamenaná se také minimální a maximální teplota, analyzovaná data je opět možné exportovat do tabulky. V jednom grafu mohou být maximálně čtyři křivky. Tuto teplotní lineární analýzu lze mimo jiné s výhodou využít u podélných objektů, jako jsou například přípojnice v rozváděcích.

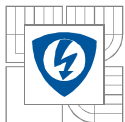


Obrázek 27 – Lineární analýza a exportovaná data v tabulce

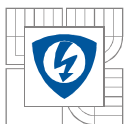
Dalším nástrojem programu je možné snímek na základě teplot zobrazit ve třech rozměrech - 3D (viz obrázek 28). Toto zobrazení je, dle mého názoru, spíše ilustrativní.



Obrázek 28 - 3D zobrazení infračerveného snímku



Poslední funkce programu umožňuje do zprávy vložit blok textu (kliknutím na ikonu  a vytvořením textové oblasti na prázdném místě ve stránce). Protože jsou ale výsledné soubory ukládány většinou ve formátu .DOC (pro větší kompatibilitu mezi počítači), je vhodnější popisný text psát až v programu MS Word.



7 MĚŘENÍ JEDNOFÁZOVÉHO MOTORU J22TO484

Cílem praktické části diplomové práce bylo teplotní proměření jednofázového asynchronního motoru typu J22TO484 s trvale připojeným kondenzátorem. Tento typ motoru byl zvolen z toho důvodu, protože naplní praktické části semestrálního projektu v zimním semestru bylo vytvořit animaci motoru J22TO455. Animace slouží jako ukázka procesu sestavení základních částí motoru při výrobě v jeden celek a naznačuje způsob chlazení tohoto motoru (popsána je v kapitole 9). Provedení motoru typu J22TO484 je stejné jako u typu J22TO455, liší se pouze průměrem hřídele. Sestava motoru J22TO484 je zobrazena v příloze 1.

Měření asynchronního motoru J22TO484 probíhalo v laboratoři prototypů v sídle firmy výrobce tohoto motoru – ATAS elektromotory Náchod a.s. Tato firma, založená již v roce 1928 v městě Náchod, vyrábí elektrické točivé stroje jak pro všeobecné použití, tak i pro specifické účely. Jsou to například asynchronní, komutátorové, elektronicky komutované, převodové elektromotory, dále axiální a radiální ventilátory, tachodynamy, tachogenerátory a převodovky. ATAS nabízí také výrobu střížných nástrojů pro výrobu elektrotechnických plechů do průměru 150 mm, výrobu forem pro tlakové lití hliníku a jeho slitin a výrobu forem pro lisování dílů z plastických hmot. [7]

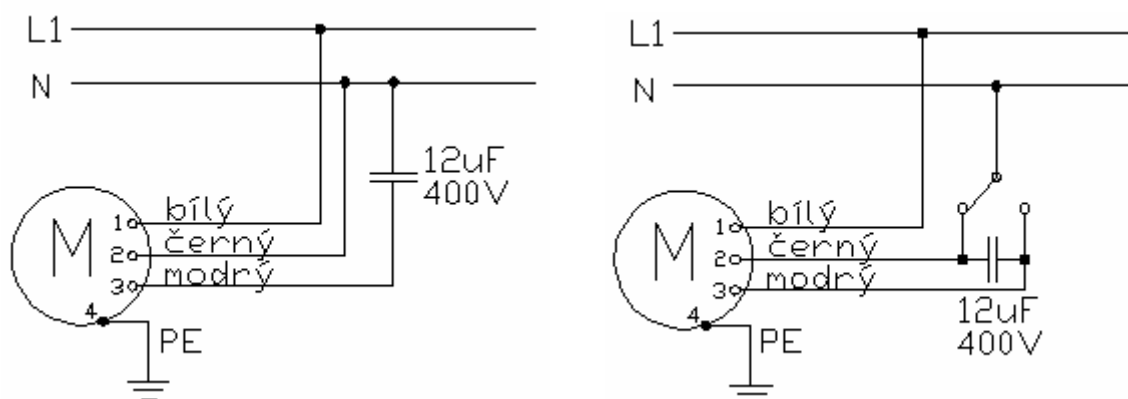
Měřením se mělo zjistit, jaký vliv má na chlazení motoru proud vzduchu vytvářený ventilátorem umístěným na hřídeli motoru a jak se motor zahřívá bez ventilátoru. Sledovalo se také, kdy zareaguje tepelná ochrana, není-li motor chlazen ventilátorem. Dalším cílem bylo zjistit, jak přesné a rychlé je měření termovizní kamerou a jestli je vůbec vhodné pro měření tohoto typu.

7.1 Jednofázový asynchronní motor J22TO484

Jednofázový asynchronní motor typu J22TO484 s trvale připojeným kondenzátorem se používá výhradně ve skartovacích strojích. Parametry měřeného motoru jsou uvedeny v tabulce 2, sestava a fotografie motoru jsou v příloze 1 a 2. Velikost tohoto motoru je 126 mm x 180 mm, krytí má IP 00 (motor tedy není chráněn před vniknutím cizích pevných předmětů a vody) a smysl točení je možný na obě strany. Skutečné zapojení motoru v provozu je znázorněno na obrázku 29 vlevo, vpravo je zapojení motoru s možností přepínání směru otáček.

Napětí ~ [V]	Frekvence [Hz]	Výkon [W]	Proud [A]	Otáčky [1/min]	Kondenzátor	Provoz	Hmotnost [kg]
230-240	50	250	1,7	2600	12 μ F / 400V	S1	3,7

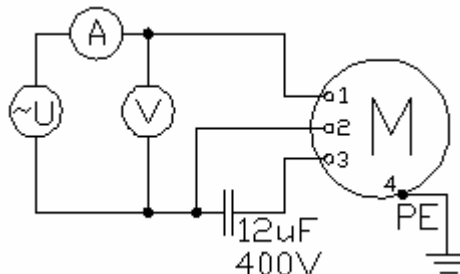
Tabulka 2 - Parametry jednofázového asynchronního motoru typu J22TO484



Obrázek 29 – Schéma skutečného zapojení motoru J22TO484 v provozu – vlevo; zapojení s možností přepínání směru otáček - vpravo

7.2 Postup měření motoru J22TO484

Byl měřen motor s výrobním číslem – Art. Nr. 1 840 500 000 (7-0484). Motor byl zajištěn v upevňovací přípravku, zapojen dle schématu na obrázku 30 a snímán v pravidelných intervalech termovizní kamerou upevněnou na stativu. Motor byl měřen ve stavu naprázdno a napájen síťovým napětím zvýšeným o 10 %. Uvažoval se tedy nejnejpříznivější případ největší povolené odchylky síťového napětí $U = 230 \cdot 1,1 = 253V$ (vzhledem k zahřívání motoru).



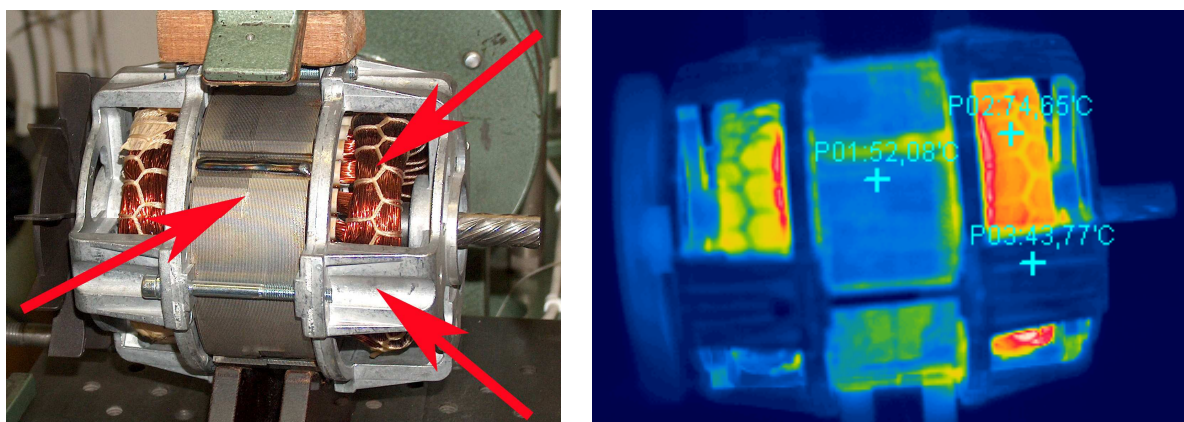
Obrázek 30 – Schéma zapojení při měření teplotního namáhání motoru

7.2.1 Vyhodnocování teplotních snímků

Na začátku měření měl motor teplotu okolí $T_0 = 25^\circ C$ - změřeno laboratorním rtuťovým teploměrem. Po připojení napětí se motor začal zahřívat. Po určité době se teplota jednotlivých částí motoru ustálila na určité hodnotě. V tom okamžiku bylo teplo vznikající ztrátami motoru a teplo odváděné proudícím vzduchem (vytvářeným rotujícím ventilátorem a lopatkami na rotoru) do okolního prostředí v rovnováze. Od začátku měření až do ustálení teploty bylo termokamerou pořízeno 14 snímků (viz příloha 5). Současně se teplota měřila termočlánkem (typu K) na třech místech – na rotorovém svazku plechů, na hlavě vinutí a na ložiskovém štítu (viz obrázek 31). Poté se motor zastavil, z hřídele byl sundán ventilátor, opět se motor roztočil a sledovalo se, při jaké teplotě vybaví tepelná ochrana motoru. Než ochrana zareagovala, pořídily se další čtyři termovizní snímky (viz příloha 5).

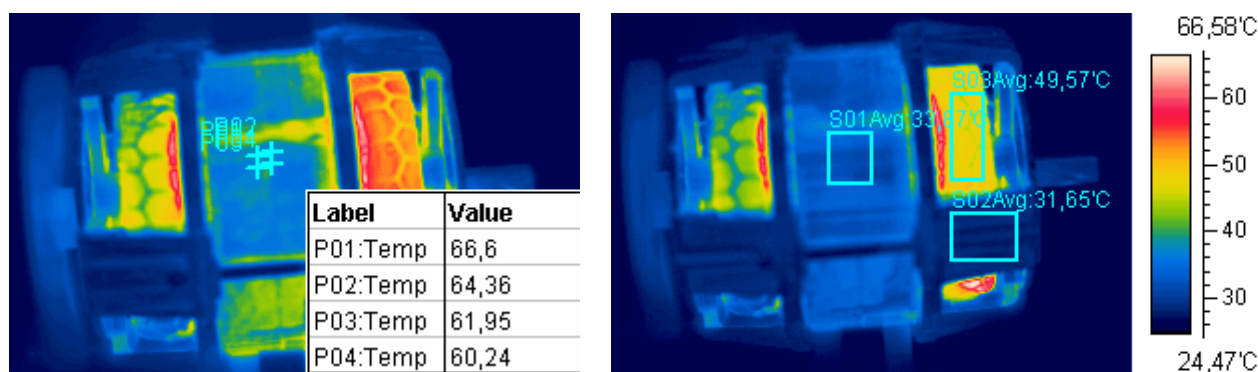
Podle teplot naměřených termočlánkem lze při vyhodnocování snímků zjistit emisivity částí motoru. Teplota změřená termočlánkem se pokládá za referenční, v programu SAT Report se poté nastaví emisivita vybrané části infračerveného snímku o takové hodnotě,

aby teplota vyhodnocená programem byla shodná se změřenou teplotou. V celé kapitole je pro teplotu použit symbol T , pro čas symbol t .



Obrázek 31 – Místa měřená termočlánkem

Při vyhodnocování teploty určitého bodu snímku však vyvstává problém, chceme-li tento bod vyhodnotit ve všech čtrnácti snímcích. V programu SAT Report totiž nelze určit stejný bod (pixel) ve více snímcích najednou. Při postupném určování bodu v každém snímku zvlášť se nikdy nepodaří vybrat stejný pixel v každé fotce (body se vybírají kliknutím myši ve snímku), ale pouze body ležící blízko sebe. Jak je však vidět na obrázku 32 vlevo, teplota bodů zvolených velmi blízko u sebe se liší, v tomto případě až o 6°C . Při vyhodnocování teploty z určité části snímku tedy byla vždy vybrána přibližně stejně velká oblast a z ní byla určena průměrná teplota (viz obrázek 32 vpravo). Tím se minimalizoval problém nemožnosti vybrání stejného pixelu ve snímku.

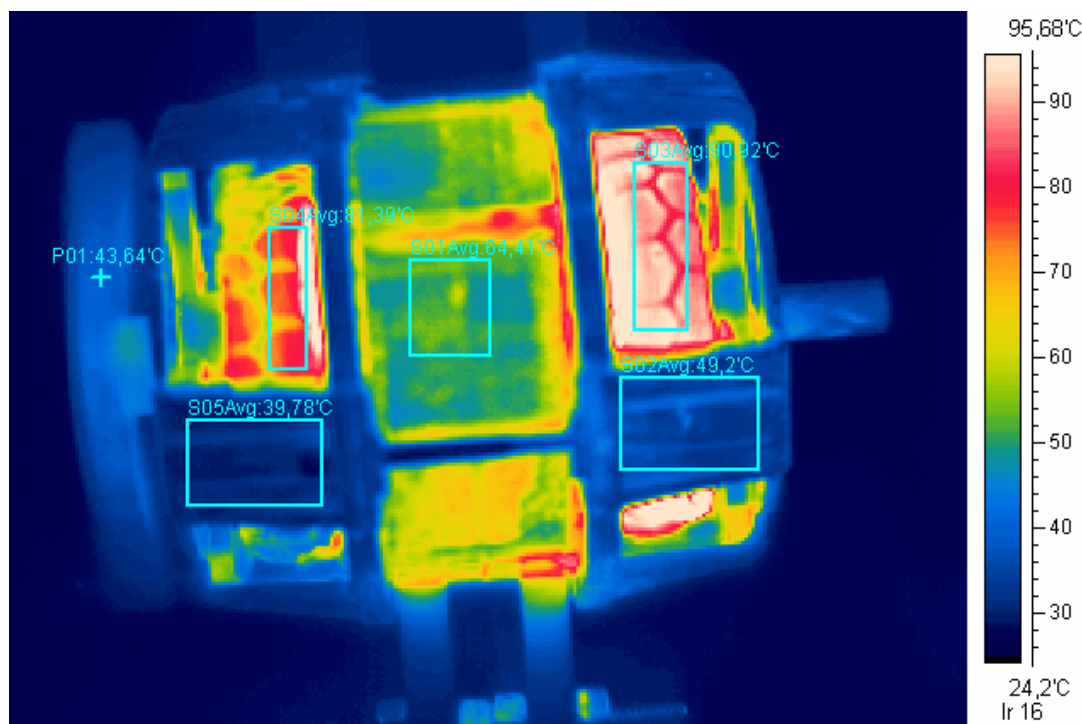


Obrázek 32 – Rozdílná teplota blízko sebe umístěných bodů – vlevo; ohraničené oblasti pro určení teploty - vpravo

Vyhodnocoval se průběh oteplení šesti částí motoru – levé a pravé hlavy vinutí, levého a pravého ložiskového štítu, svazku rotorových plechů a ventilátoru. Ohraničené části jsou vidět na obrázku 33, který zároveň zachycuje stav motoru po ustálení teploty jednotlivých částí. Levá a pravá strana motoru je uvažována z pohledu termokamery (ventilátor vlevo, šneková hřídel vpravo).

Každý termosnímek se vyhodnocoval zvlášť. Nejdříve byla celému snímku nastavena základní emisivita $\varepsilon_z = 0,95$, vzdálenost termokamery od měřeného motoru $l = 1\text{m}$, teplota okolí $T_0 = 25^{\circ}\text{C}$ a relativní vlhkost 70 %. Dále se podle teploty motoru nastavil teplotní rozsah snímku (u většiny snímků přibližně 24 až 95°C) a kontrastní barevná paleta - Feather.

Poté se ve snímku vyznačily oblasti, ze kterých se odečetla průměrná teplota povrchu. Získané teploty jsou vyneseny v tabulkách 3 a 4 v příloze 6. Každé oblasti byly nejdříve nastaveny odhadnuté hodnoty emisivity. Křivky oteplení každé měřené části motoru byly vyneseny do grafu společně s křivkami oteplení naměřenými termočlánkem. Následně se hodnoty emisivity zpřesňovaly tak, aby si teploty zjištěné termokamerou a termočlánkem odpovídaly.

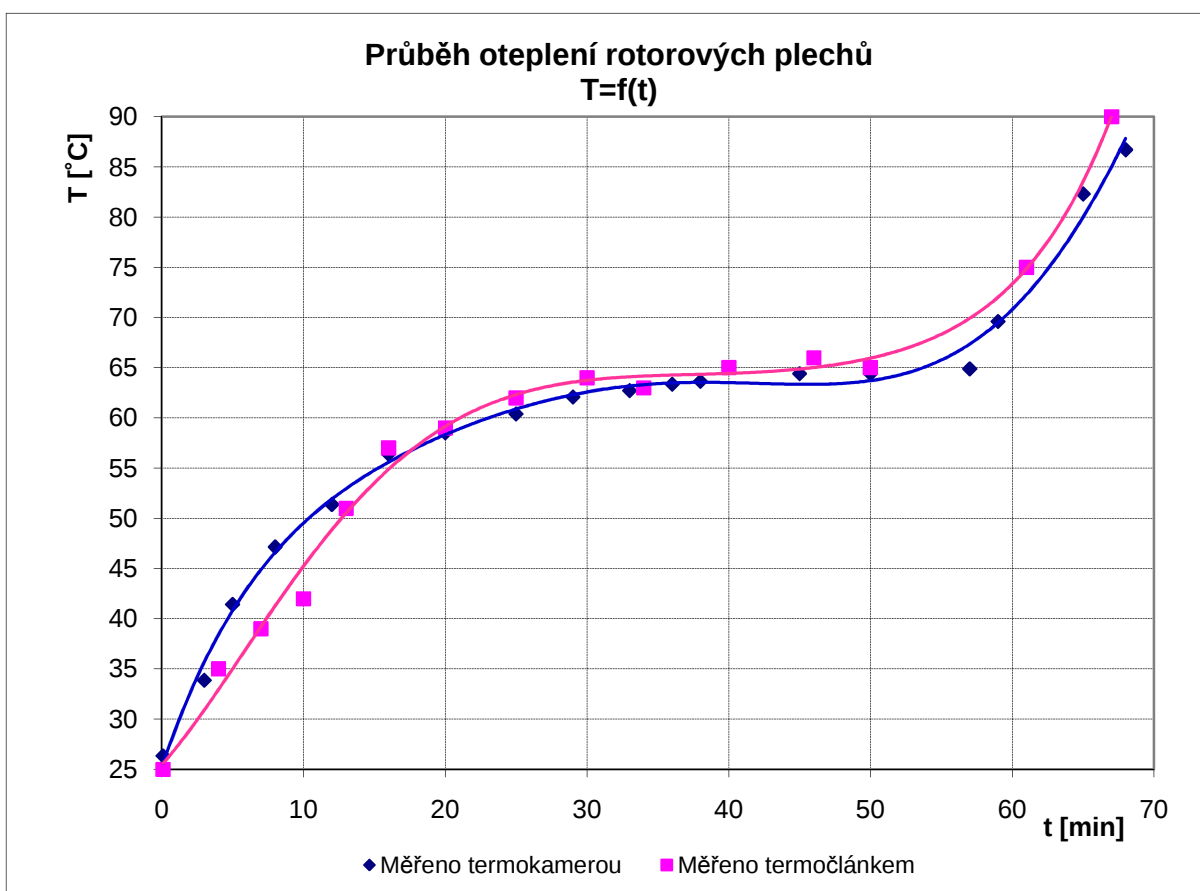


Obrázek 33 – Vyhodnocované části motoru

Emisivita se obecně může měnit v závislosti na konečné úpravě povrchu měřeného materiálu, např. oxidací nebo přítomností znečišťujících látek. U některých materiálů se mění v závislosti na vlnové délce a teplotě. Při tomto měření však nebyla změna emisivity s teplotou uvažována, protože při rozsahu měřených teplot v intervalu přibližně 25 až 120 °C, se změna emisivity neprojeví a na konečné výsledky nemůže mít vliv.

Jako první bylo vyhodnocováno oteplení svazku rotorových plechů. V grafu 1 jsou vyneseny křivky oteplení změřené termočlánkem a termokamerou. Křivky si nejvíce odpovídají při nastavené emisivitě $\varepsilon_1 = 0,75$. Zdroje [2] a [31] uvádějí při teplotě $T = 93\text{ °C}$ a pro vlnové délky 8–14 μm hodnotu emisivity oceli válcované za studena $e = 0,7$ až 0,9. Protože rotorové plechy jsou vyrobeny z křemíkové válcované oceli a detektor termokamery pracuje ve spektrálním rozsahu právě 8–14 μm , lze zjištěnou emisivitu považovat za správnou.

Z grafu 1 je patrné, že se svazek rotorových plechů ohřeje za 30 až 35 minut o $\Delta T_1 = 40\text{ °C}$ na teplotu $T_1 = 65\text{ °C}$. Po ustálení teploty na hodnotě $T_1 = 65\text{ °C}$, byl v čase $t = 55\text{ min}$ motor zastaven, z hřídele sundán ventilátor a opět byl motor roztočen. Teplota začala strmě stoupat, motor se přehříval a přibližně po jedenácti minutách zareagovala tepelná ochrana a motor odpojila. Za tuto dobu se svazek rotorových plechů ohřál o dalších $\Delta T_2 = 22\text{ °C}$ na teplotu $T_2 = 87\text{ °C}$.



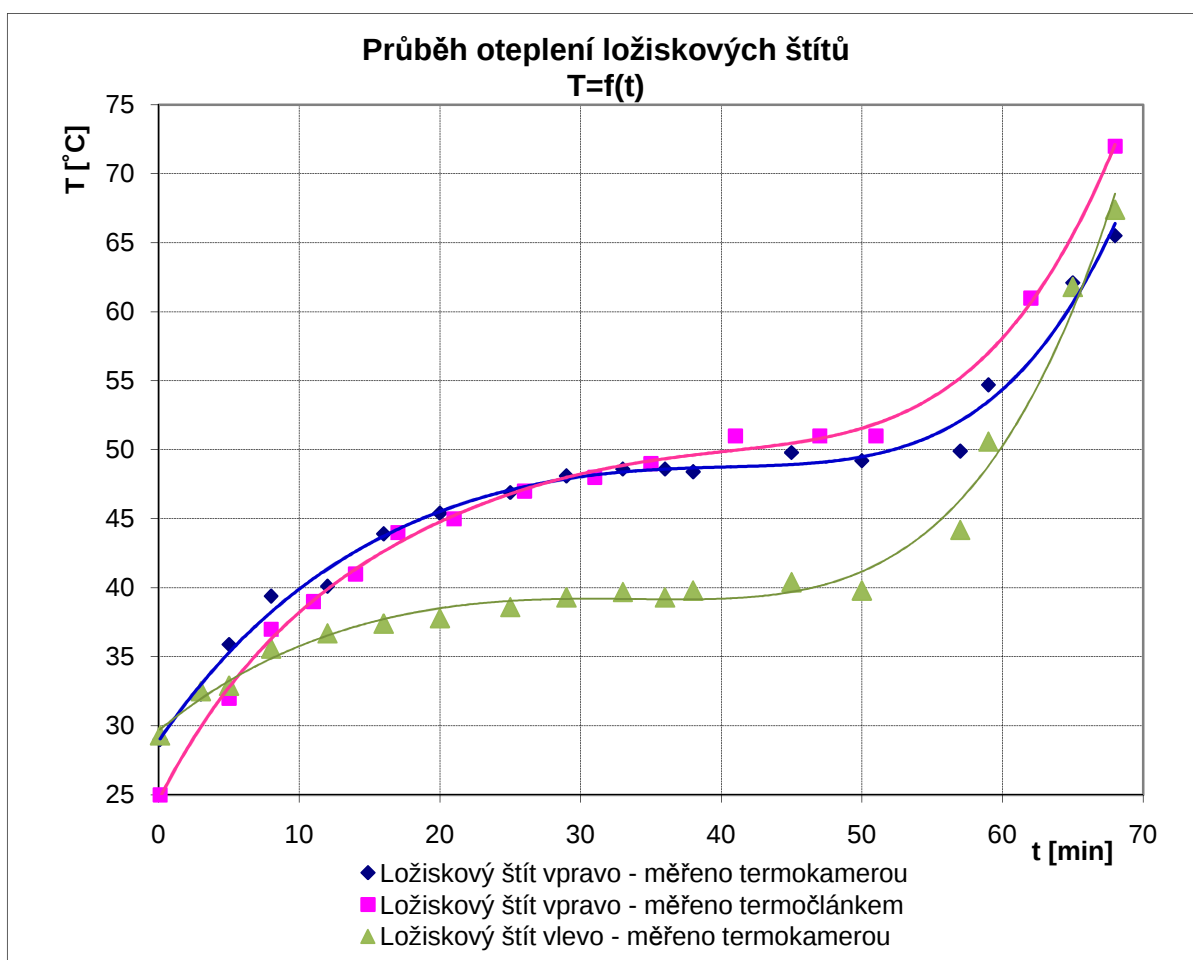
Graf 1 – Průběh oteplení svazku rotorových plechů

Dále se vyhodnocovalo oteplení ložiskových štítů. Termočlánkem se měřila teplota pravého ložiskového štítu, emisivita se nastavila na hodnotu $\varepsilon_2 = 0,5$. Při této emisivitě teploty nejvíce odpovídaly teplotám naměřeným termočlánkem. Slitin hliníku je mnoho, emisivity tudíž záleží na jejich konkrétním složení a úpravě povrchu. Tabulky emisivit, pokud existují, nejsou volně dostupné. Pro příklad zdroj [31] uvádí – nezoxidovaný hliník má $\varepsilon = 0,02$ až $0,06$, zoxidovaný $\varepsilon = 0,2$ až $0,3$, hliníková slitina A3003, tedy slitina hliníku s manganem $\varepsilon = 0,4$. Ložiskový štít je odlitek z hliníku, zjištěná emisivita $\varepsilon_2 = 0,5$ odpovídá uváděným hodnotám. Emisivita levého ložiskového štítu, protože se jedná o stejný materiál, byla nastavena rovněž na hodnotu $\varepsilon_2 = 0,5$. Z grafu 2 je vidět, že za čas přibližně 35 minut se pravý ložiskový štít ohřál o $\Delta T_3 = 25^\circ\text{C}$ na teplotu $T_3 = 50^\circ\text{C}$. Oproti svazku rotorových plechů je to o 15°C méně, protože rotorovými plechy přímo prochází nejteplejší část motoru – měděné vinutí. Hliníkový odlitek je také masivnější a lépe odvádí teplo do okolního prostředí.

Jak je dále vidět z grafu 2, levý ložiskový štít se za dobu 30 minut ohřál pouze o $\Delta T_4 = 15^\circ\text{C}$ na teplotu $T_4 = 40^\circ\text{C}$. Byl tedy o 10°C chladnější než pravý štít. To je způsobeno intenzivním prouděním vzduchu rotujícím ventilátorem na hřídeli a následným odvodem tepla. Je tedy zřejmé, že část motoru, na které je umístěn ventilátor, je chlazena účinněji (levá část z pohledu termokamery).

Poté, co byl sejmut ventilátor z hřídele motoru, se oba ložiskové štíty začaly rychle zahřívat. Než zareagovala tepelná ochrana motoru, teploty obou štítů se vyrovnaly na hodnotě $T_5 = 66^\circ\text{C}$. Pravý ložiskový štít se tedy ohřál ještě o $\Delta T_5 = 16^\circ\text{C}$, levý štít o $\Delta T_6 = 26^\circ\text{C}$.

Z grafu 2 je patrné, že křivky oteplení měřené termokamerou začínají na teplotě $T_6 = 29^\circ\text{C}$, místo na teplotě okolí $T_0 = 25^\circ\text{C}$, kde má počátek křivka oteplení měřená termočlánkem. Motor měl před začátkem měření rovněž teplotu okolí. Emisivita ložiskových štítů $\varepsilon_2 = 0,5$ je relativně malá a znamená to, že tento povrch snadněji odráží tepelné záření okolních těles. Rozdíl 4°C je tedy patrně způsoben infračerveným zářením, které vydávaly osoby shromážděné na začátku měření kolem termokamery, a které se odráželo od povrchu ložiskových štítů směrem do termokamery. Toto infračervené záření se přičítá k tepelnému záření samotného ložiskového štítu. Kůže člověka teplotně září mezi 30 až 35°C (rovněž zjištěno termokamerou).

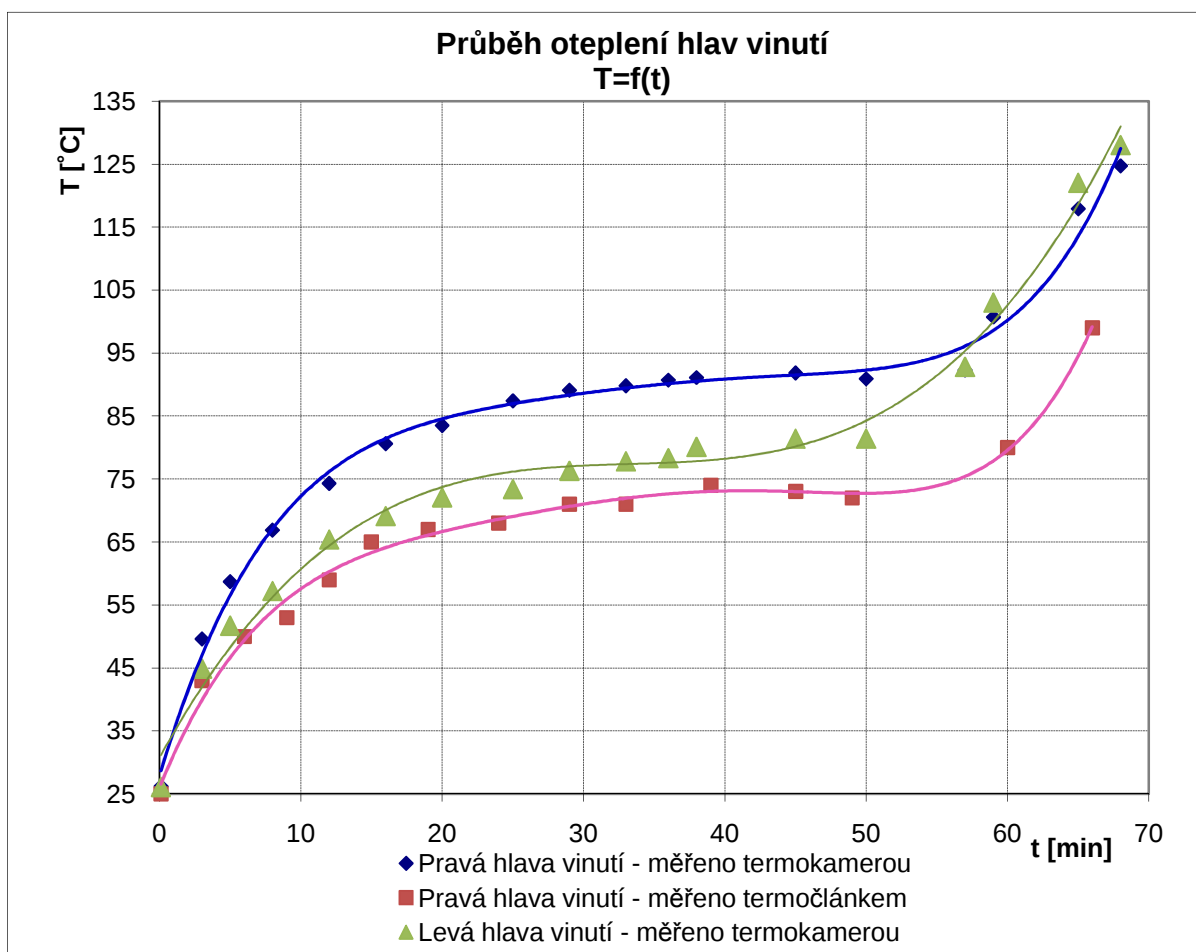


Graf 2 – Průběh oteplení ložiskových štítů

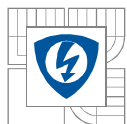
Další částí měřenou termočlánkem byla pravá hlava vinutí. Hlava vinutí je svazek měděných lakovaných drátů. Při nastavování emisivity termosnímků tedy nelze uvažovat hodnotu emisivity mědi (leštěná měď $\varepsilon = 0,02$ až $0,07$, válcovaná $\varepsilon = 0,64$, surová $\varepsilon = 0,74$, oxidovaná $\varepsilon = 0,77$ až $0,95$ [31]), ale emisivitu povrchu drátu, tedy laku. Při různých úpravách povrchu kovu, jako je např. eloxování (hliník) nebo lakování (libovolné barvy), totiž dosahuje emisivita hodnoty blízké $\varepsilon = 1$.

Při nastavování emisivity v programu SAT Report nebylo možné křivku oteplení termokamerou a termočlánkem sjednotit. Termosnímky ukazovaly i při maximální teoretické emisivitě $\varepsilon = 1$ teplotu hlavy vinutí vyšší, než bylo naměřeno termočlánkem. Muselo to být pravděpodobně způsobeno nedostatečným kontaktem měřicího hrotu termočlánku s měřeným vinutím. Svazek měděných drátů má totiž „nerovný“ povrch (dráty a mezery mezi nimi), důsledkem čehož byl zaviněn nejspíše špatný přestup tepla z vinutí na termočlánek. Byla tedy zvolena nejčastěji udávaná emisivita pro lakovaný povrch $\varepsilon_3 = 0,95$. Ta také nejlépe odpovídá teplotě $T = 25^\circ\text{C}$ prvního termosnímku, před začátkem měření (tzn. křivky oteplení v grafu 3 vycházejí z bodu $T = 25^\circ\text{C}$).

Z grafu 3 je vidět, že se pravá hlava vinutí za dobu 30 minut ohřeje o $\Delta T_7 = 65^\circ\text{C}$ na teplotu $T_7 = 91^\circ\text{C}$. Vinutí je tedy nejteplejší částí motoru. Levá hlava vinutí má nastavenou emisivitu rovněž $\varepsilon_3 = 0,95$. Z grafu 3 je vidět, že se ohřeje za 35 minut o $\Delta T_8 = 55^\circ\text{C}$ na teplotu $T_8 = 81^\circ\text{C}$. Je to o 10°C méně, než pravá hlava vinutí, což je opět způsobeno chlazením ventilátoru a odvodem teplého vzduchu ven z motoru.



Graf 3 – Průběh oteplení hlav vinutí



Ve firmě ATAS určují oteplení vinutí dle následujícího vztahu:

$$\Delta T = \frac{R_2 - R_1}{R_1} \cdot (k + T_1) - (T_{\text{okolí}} - T_1)$$

kde R_1 je odpor vinutí při $T_1 = 22^\circ\text{C}$, R_2 je odpor vinutí na konci zkoušky, $k = 234,5$ je konstanta pro měděné vinutí, $T_{\text{okolí}}$ teplota okolí (v našem případě $T_{\text{okolí}} = 25^\circ\text{C}$).

Při teplotě $T_1 = 22^\circ\text{C}$ je změřen odpor vinutí daného motoru $R_1 = 14,2\ \Omega$ (použito ze zdroje ATAS). Při okolní teplotě $T_{\text{okolí}} = 25^\circ\text{C}$ jsme změřili odpor vinutí po ustálení jeho teploty při dlouhodobém chodu: odpor vinutí hlavní fáze $R_{2H} = 17,2\ \Omega$, odpor vinutí pomocné fáze $R_{2P} = 17,6\ \Omega$. Uvažoval se horší případ, kdy $R_2 = R_{2P} = 17,6\ \Omega$. Spočítané oteplení je potom:

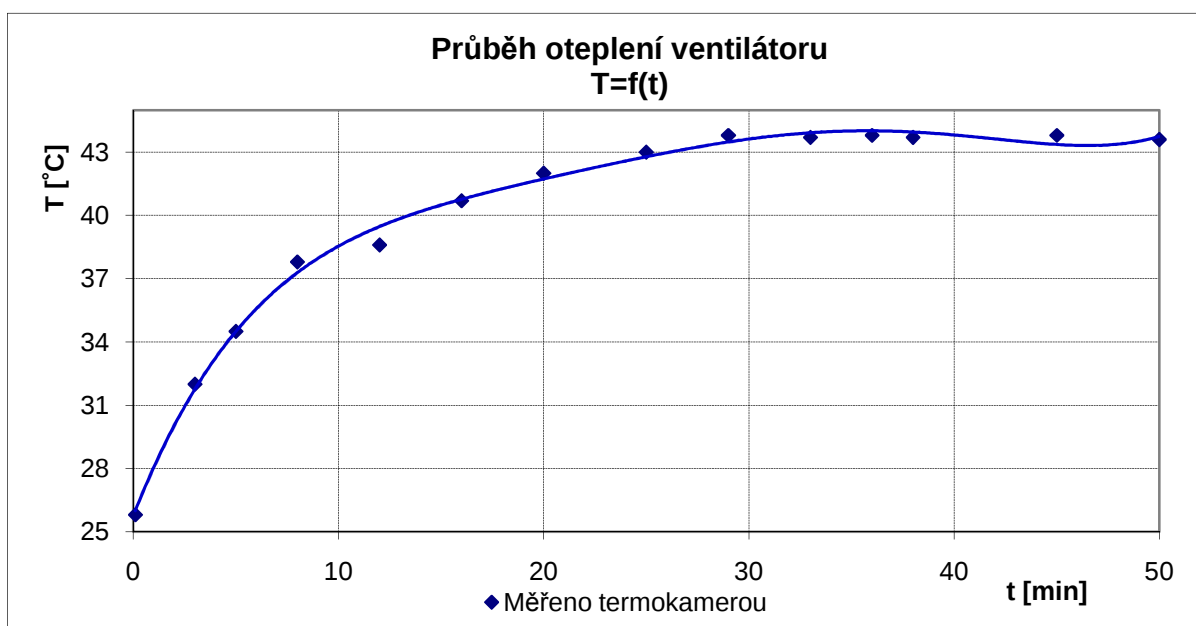
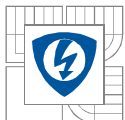
$$\Delta T = \frac{R_2 - R_1}{R_1} \cdot (k + T_1) - (T_{\text{okolí}} - T_1) = \frac{17,6\ \Omega - 14,2\ \Omega}{14,2\ \Omega} \cdot (234,5 + 22^\circ\text{C}) - (25^\circ\text{C} - 22^\circ\text{C}) = \underline{58,4^\circ\text{C}}$$

Výsledná teplota vinutí bude tedy: $T = \Delta T + T_{\text{okolí}} = 58,4 + 25 = \underline{83,4^\circ\text{C}}$

Je vidět, že termokamerou zjištěná teplota levé hlavy vinutí je o 2°C nižší, pravé hlavy vinutí je o 8°C vyšší, než vypočítaná. Průměrné hodnoty teploty změřené termokamerou a spočítané dle výše uvedeného vztahu se přibližně shodují.

Po sundání ventilátoru v čase 55 minut od začátku měření začaly teploty levé i pravé hlavy vinutí stoupat. Teplota pravé hlavy vinutí vystoupala až na hodnotu $T_9 = 125^\circ\text{C}$, levá hlava byla ještě o 3°C teplejší - $T_{10} = 128^\circ\text{C}$. Při těchto teplotách vybavila tepelná ochrana motoru, která je nastavena na hodnotu $T_{\text{och}} = 135^\circ\text{C}$. Vybavila tedy správně. Z grafu 3 je vidět, že teploty naměřené termočlánkem v tomto případě neodpovídají, termočlánek ukázal nejvyšší teplotu jen $T_{11} = 99^\circ\text{C}$. Je to patrně způsobeno výše popsanou chybou.

Poslední zkoumanou částí motoru byl ventilátor. Zde se s výhodou využije schopnosti termokamery bezkontaktně snímat pohyblivé a rotující části, které by kontaktním měřením bylo velmi obtížné změřit. Protože je ventilátor vyroben z umělé hmoty s matným černým povrchem, velmi se podobá černému tělesu. Hodnota emisivity proto byla určena na $\varepsilon_4 = 0,95$. Vyhodnocování teploty ventilátoru nebylo nutné zjišťovat průměrnou teplotou z vyznačené oblasti, ale pouze bodovou analýzou. Teplota ventilátoru se totiž v měřené oblasti (viz bod P01 na obrázku 33) neměnila, byla v rámci každého snímku konstantní. Z grafu 4 je zřejmé, že se ventilátor odváděným teplým vzduchem z prostředí motoru ohřívá. Za 30 minut se jeho teplota ustálila na $T_{12} = 44^\circ\text{C}$, ohřál se tedy o $\Delta T_9 = 19^\circ\text{C}$. Toto oteplení je z hlediska funkčnosti motoru zanedbatelné.



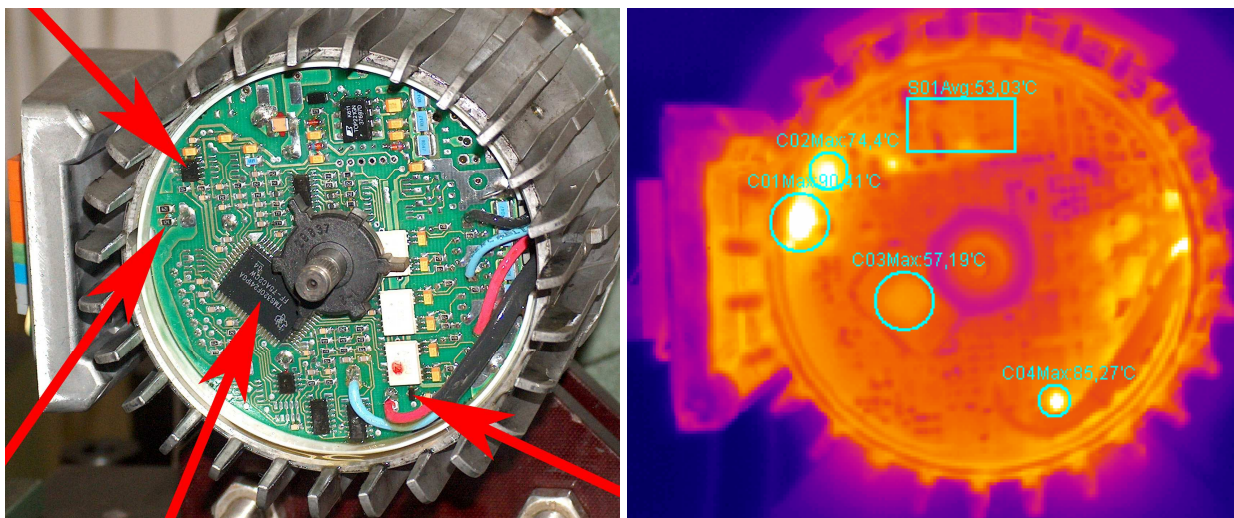
Graf 4 – Průběh oteplení ventilátoru

8 MĚŘENÍ EC MOTORU

Nad rámec zadání diplomové práce bylo na přání firmy ATAS dále provedeno teplotní měření na elektronicky komutovaném motoru. Jedná se o EC motor řady G6. Tyto motory s integrovanou elektronikou pracují jako servomotory v polohovém, rychlostním nebo momentovém módu. Nastavení, řízení a diagnostika motoru se provádí pomocí počítače přes sériové komunikační rozhraní RS232 / RS485, popř. CAN.

U tohoto motoru se zjišťovalo, jak se zahřívají výkonové součástky na desce tištěného spoje. Motoru byl sejmut kryt, termokamera se namířila na plošnou desku součástek a motor se řídil prostřednictvím počítače pomocí programu EC Motor Control. V programu se nastavovaly různé hodnoty pro zrychlení motoru při rozběhu, hodnoty otáček a zadávaly se hodnoty při nastavování PID regulátorů. Tím se simulovaly různé běhy motoru.

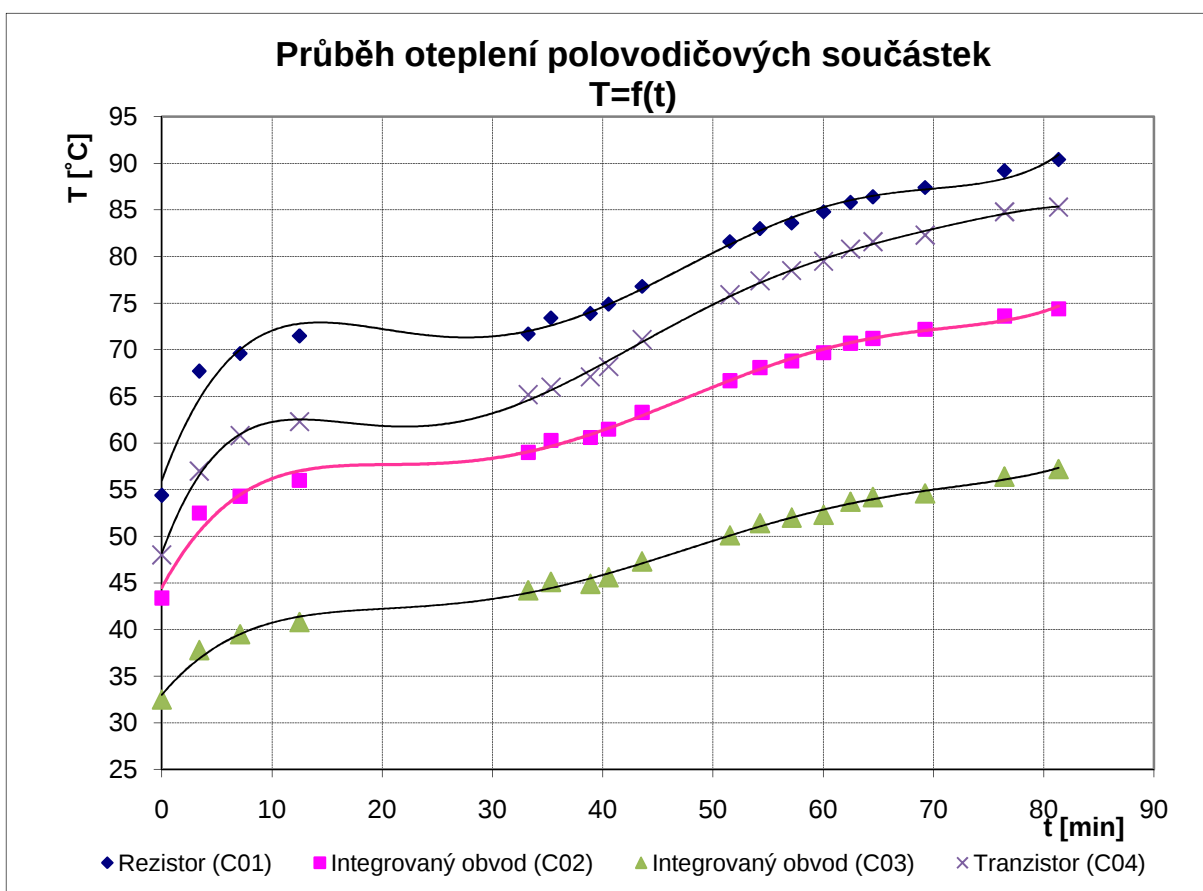
Jak je vidět na obrázku 34, byla zjišťována teplota tří nejvíce se zahřívajících součástek a teplota řídicího integrovaného obvodu. V programu SAT Report byla kolem každé součástky vybrána kruhová oblast, ze které se zjišťovala maximální teplota součástky. Průměrná teplota nemohla být uvažována, protože by se do této teploty promítla i mnohem nižší teplota okolí součástky, což by značně zkreslilo výslednou hodnotu. Protože je barva všech uvažovaných součástek černá a povrch matný, byla všem součástkám nastavena emisivita $\varepsilon_s = 0,95$.



Obrázek 34 – Umístění měřených součástek

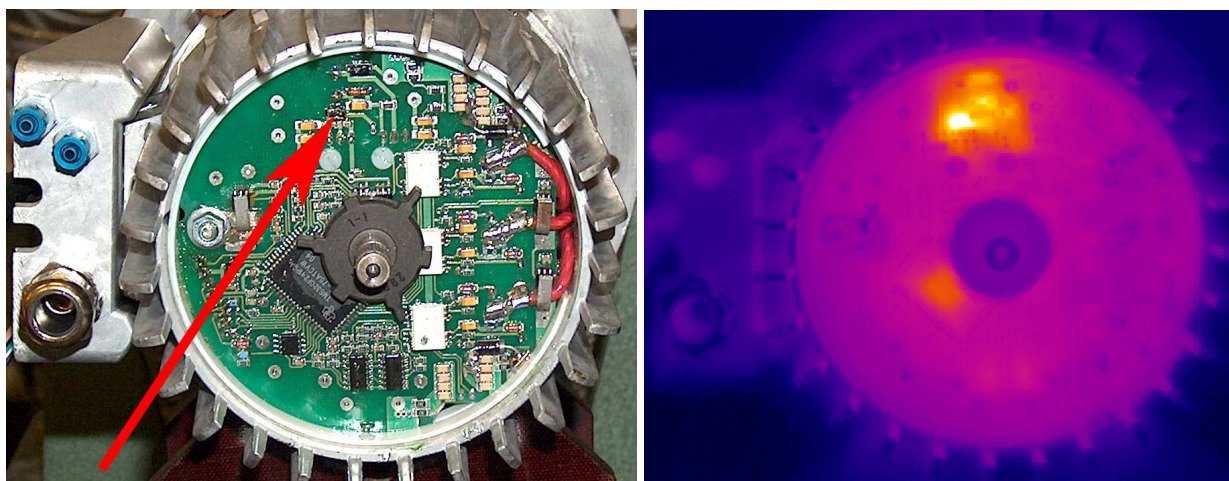
V grafu 5 jsou vyneseny průběhy oteplení součástek. Je vidět, že nejvíce se zahřívá rezistor a spínací tranzistor. Teplota rezistoru po 80 minutách běhu motoru vystoupala na $T_{13} = 90^\circ\text{C}$, teplota tranzistoru byla $T_{14} = 85^\circ\text{C}$. Maximální teplota integrovaného obvodu (C02) byla $T_{15} = 75^\circ\text{C}$, teplota integrovaného obvodu (C03) $T_{16} = 57^\circ\text{C}$. Po 80 minutách se plošná deska zahřála průměrně na teplotu $T_{17} = 50^\circ\text{C}$. Naměřené teploty součástek jsou vyneseny v tabulce 5 v příloze 6.

Při chodu motoru v běžném provozu jsou však teploty součástek i celé plošné desky vyšší, protože jsou schovány pod krytem. Teplo je poté odváděno pouze vedením přes kryt motoru a není odváděno prouděním vzduchu jako v našem případě.



Graf 5 – Oteplení polovodičových součástek EC motoru

Termokamera při takovémto měření podává důležitou představu o celkovém rozložení teplot na plošné desce. Z výsledného teplotního obrazu je ihned patrné, které součástky a části jsou nejvíce namáhány a kde lze případně očekávat poruchy. Této výhody bylo využito při měření dalšího, tentokrát stejnosměrného EC motoru. Tomuto motoru po rozběhnutí a následném minimálním zatížení klesly neúměrně otáčky. Termokamerou bylo zjištěno, že se jeden rezistor (viz obrázek 35) zahřál na více než $150\text{ }^{\circ}\text{C}$, zatímco ostatní nejteplejší součástky měly maximálně $50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Bylo tak ihned zjištěno nejpravděpodobnější místo poruchy, které lze následně podrobit dalšímu testování.



Obrázek 35 – Pravděpodobné místo poruchy na stejnosměrném EC motoru

9 VYTVOŘENÍ ANIMACE ASYNCHRONNÍHO MOTORU

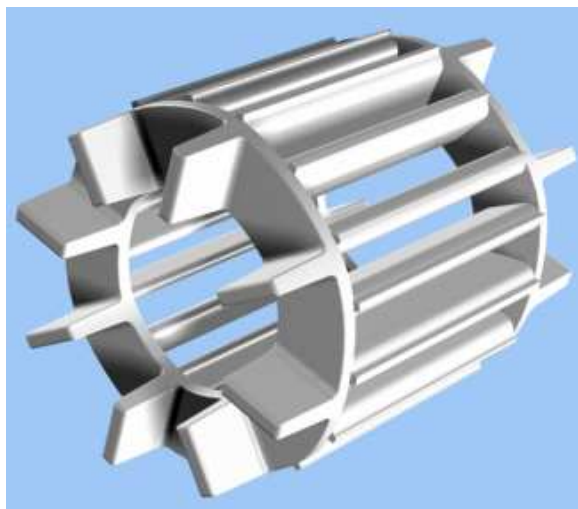
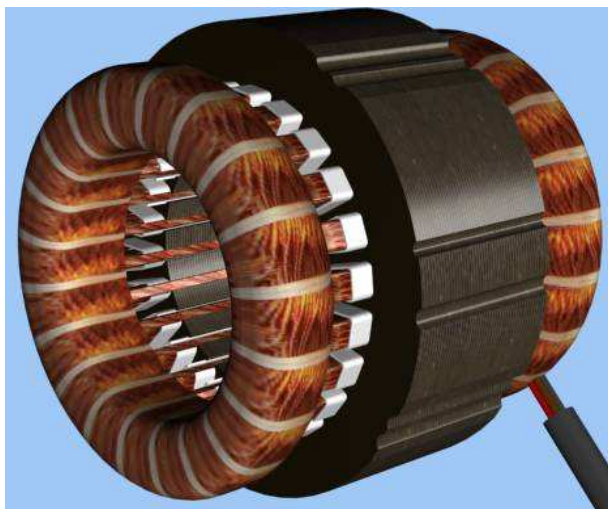
V následující kapitole jsou popsány základní kroky při vytváření animace jednofázového asynchronního motoru typu J22TO455 s trvale připojeným kondenzátorem. Tento motor vyrábí firma ATAS elektromotory Náchod. Sestava motoru je zobrazena v příloze 1. Animace byla vytvářena v rámci praktické části semestrálního projektu v zimním semestru.

9.1 Animace elektrického točivého stroje

Animace jednofázového asynchronního motoru slouží jako ukázka procesu sestavení základních částí motoru při výrobě v jeden celek a naznačuje způsob chlazení tohoto motoru. Na základě informací a připomínek obdržených od vedoucího prodeje pana Ing. Leoše Kuchaře a vedoucího konstrukce pana Ing. Aleše Lamky z firmy ATAS byla provedena celá animace.

Většina částí motoru byla vymodelována v programu Inventor a následně importována do programu 3ds Max 8. Všechna práce při vytvoření animace byla v rámci semestrální práce 1 prováděna v prostředí programu 3ds Max 8. Při semestrální práci 2 se již pracovalo ve verzi 3ds Max 9 a 3ds Max 2009, animace byla rozšířena o naznačení způsobu chlazení motoru ventilátorem a dále optimalizována.

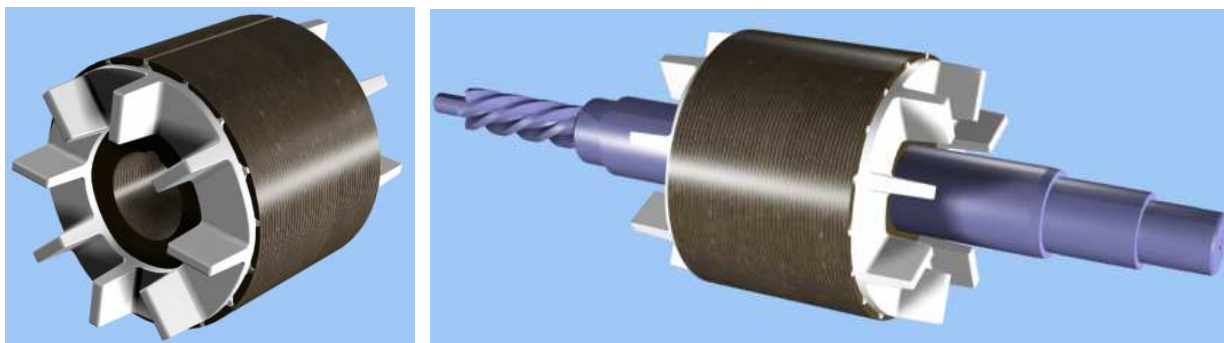
Po importování (*File* → *Import*) celého sestaveného motoru, bylo nutné „rozebrat“ ho na jednotlivé části, jediné tak s nimi šlo samostatně pracovat. Rozebrání spočívalo v posunutí (funkce *Move*) jednotlivých částí pomocí souřadnic ve virtuálním prostoru od sebe. Následně bylo upraveno vinutí motoru, které neodpovídalo skutečnému. Svazky vinutí byly zmenšeny (funkcí *Scale*) a upraveny do tvaru, který se podobá skutečnému vinutí. Na tento tvar byla umístěna struktura jednotlivých měděných drátů formou *textury* (viz obrázek 36a). *Textura* byla vytvořena pořizováním fotografie skutečného vinutí motoru, tato fotografie byla upravena v programu Photoshop, byl z ní pořízen výřez a ten umístěn v několika kopiích vedle sebe na model vinutí. Všechny části motoru byly skryty (funkcí *Object properties* → *Visibility* = 0), aby nemohly animaci nijak ovlivnit. Odkrývány byly postupně (*Visibility* = 1), když měly nějakým způsobem do animace zasáhnout. [6]



Obrázek 36 – a) Upravené vinutí (vlevo), b) kotva nakrátko (vpravo)

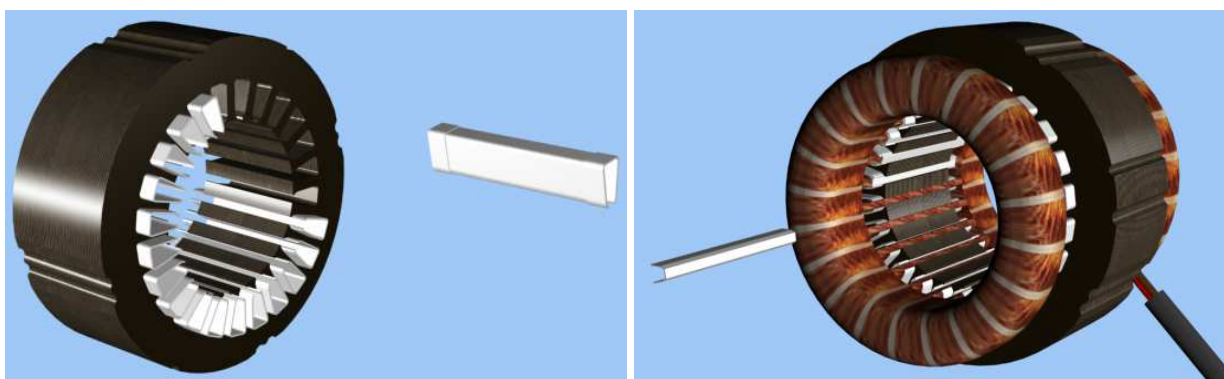
Dále byla vytvořena kamera (klávesovou zkratkou *Ctrl+C*) a zvětšen počet snímků animace na 6 500. Počet snímků zobrazovaných za sekundu se nazývá *Frame Rate* (FPS – *Frames Per Sekond*) a lze změnit v okně *Time Configuration* (ikonka okna s ciferníkem vedle nástrojů pro manipulaci s pohledy). Ve filmu a televizním vysílání v České republice se používá FPS = 25 (tzv. PAL). V této animaci bylo zvoleno FPS = 30 (NTSC), což při 6 500 snímcích odpovídá celkovému času 3 minuty a 36 vteřin.

Poté již následovalo samotné sestavování modelů částí motoru v souladu s výrobním procesem. Nejdříve bylo naznačeno vstříknutí tekutého hliníku do rotorového svazku plechů, čímž se vytvoří kotva nakrátko. Tento postup byl znázorněn plynulým postupným zobrazením modelu rotorových kruhů nakrátko, poté zprůhledněním svazku plechů, aby byla vidět celá rotorová klec (viz obrázek 36b). Svazky plechů byly následně opět zviditelněny (viz obrázek 37a). Dále se do hotového rotoru nalisuje hřídel motoru, což je zobrazeno zasunutím hřídele (viz obrázek 37b).



Obrázek 37 – a) Model rotoru (vlevo), b) vlisovaná hřídel (vpravo)

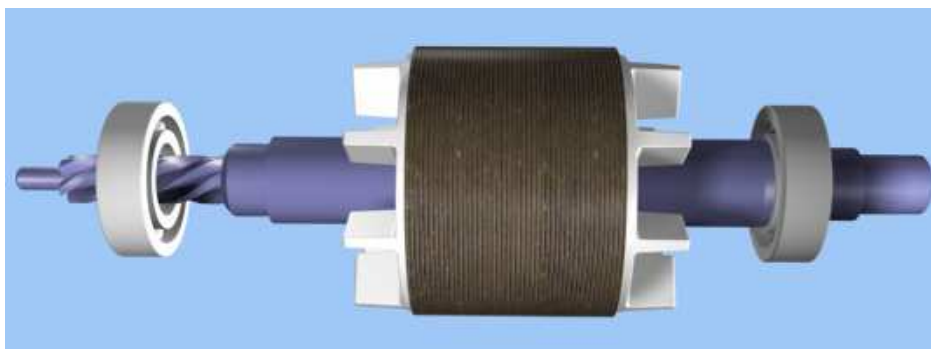
Následuje pohled na tělo statoru a nastřelování drážkové izolace do drážek statoru. Nastřelování bylo znázorněno „přilétáváním“ izolace z pravé strany do zorného pole kamery (viz obrázek 38a). Po nastřelení jedné drážkové izolace se tělo statoru pootočí, nastřelí se další atd. Po tomto procesu se do drážek navine vinutí, což bylo znázorněno postupným zviditelněním modelu vinutí. Nakonec se vinutí v drážkách uzavře opět izolací. V animaci je tato část znázorněna opět přilétáváním zbylé části izolace tentokrát z levé části zorného pole kamery (viz obrázek 38b).



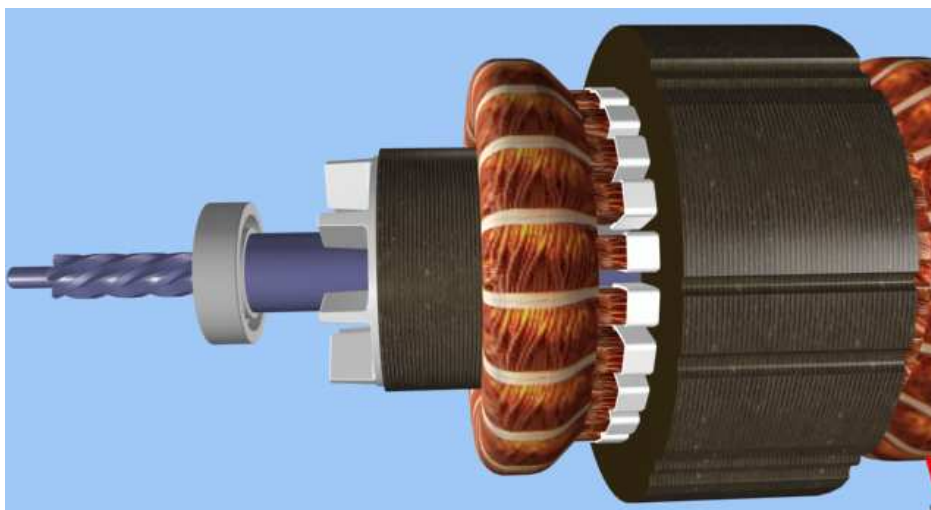
Obrázek 38 – a) Nastřelování drážkové izolace (vlevo), b) uzavření drážkové izolace (vpravo)

Animace pokračuje nasunutím modelů dvou ložisek z obou stran na hřídel (viz obrázek 39) a zasunutím rotoru do statoru (viz obrázek 40). Pro ulehčení posunování více objektů najednou (desítky a více objektů), aniž by se musely vždy zdlouhavě vybírat všechny

objekty, je vhodné vytvořit výběrové skupiny objektů. Stačí vybrat všechny objekty, které chce uživatel spojit do výběrové skupiny a kliknout na tlačítko *Command Panel* → *Edit Named Selection Set*. Kdykoliv poté již jen stačí kliknout na název vytvořené skupiny a všechny objekty ve skupině se vyberou. V této animaci jsou například v jedné výběrové skupině všechny části rotoru, v další jsou všechny části statoru.

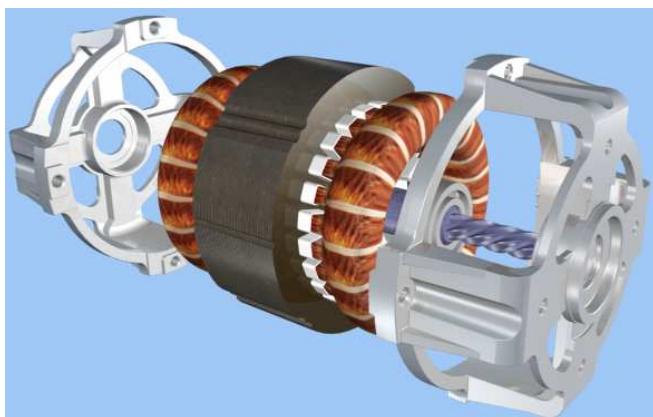


Obrázek 39 - Nasunutí ložisek



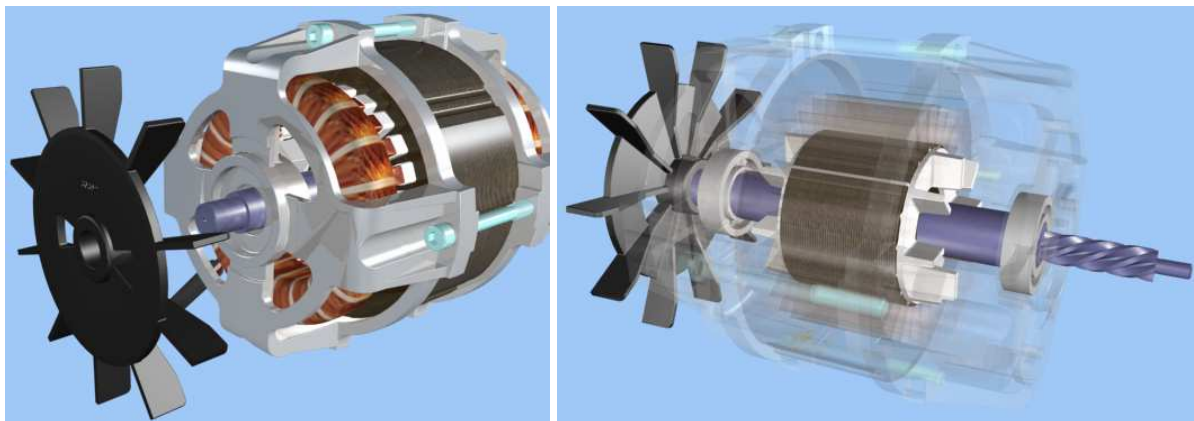
Obrázek 40 - Zasunutí rotoru do statoru

Dalším krokem je zakrytování motoru. Z obou stran se na motor nasunou ložiskové štíty (viz obrázek 41a), které se upevní pomocí šroubů s pérovými podložkami (viz obrázek 41b). Tyto modely jsou také plynule zviditelněny (funkcí *Visibility*) a funkcí *Move* nasunuty na své místo.



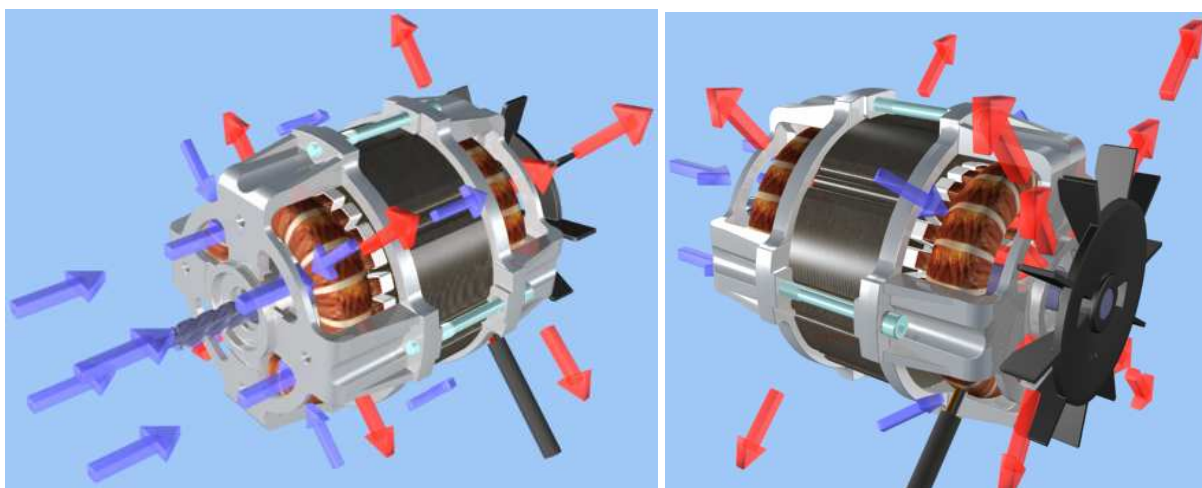
Obrázek 41 – a) Ložiskové štíty (vlevo), b) zajištění pomocí šroubů (vpravo)

Posledním modelem, který se nasune na hřídel motoru je ventilátor (viz obrázek 42a). Následuje simulace roztočení rotoru a průlet kamerou kolem celého motoru. Všechny části statoru byly na okamžik funkcí *Visibility* s hodnotou = 0,2 zprůhledněny, aby bylo možné nahlédnout dovnitř motoru na otáčející se hřídel a rotor (viz obrázek 42b).



Obrázek 42 – a) Umístění ventilátoru (vlevo), b) efekt zprůhlednění (vpravo)

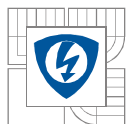
V poslední fázi animace bylo podle výkresu, dodaného z firmy ATAS, naznačeno chlazení motoru (viz Příloha 4). Po roztočení ventilátoru je z druhé strany motoru nasáván chladný vzduch, který je v animaci znázorněn modrými šipkami. Vzduch proudí přes vinutí, ochlazuje ho a teplý vzduch, znázorněný červenými šipkami, je vytlačován ven z motoru (viz obrázek 43).



Obrázek 43 – Simulace chlazení motoru (vlevo i vpravo)

9.1.1 Osvětlení

Pro nasvícení scény nebylo použito implicitní osvětlení programu 3ds Max, nebylo totiž pro tuto animaci vhodné. Protože kamera v průběhu animace snímá motor ze všech stran, bylo tedy nutné vytvořit osvětlení, které svítí na motor rovněž ze všech stran. Proto bylo zvoleno osm reflektorových (*Spot*) světel a dvě všesměrová (*Omni*) světla. Všechna světla svítí na vymodelované části motoru do míst, která snímá kamera, každé světlo je však namířeno na jinou část motoru. Některá světla se podle potřeby v průběhu animace stmívají a rozsvěčují – je tedy naanimována intenzita světla (*Modify* → *Intensity/Color/Attenuation* → *Multiplier*), jiná naopak mění svoji polohu, to vše kvůli optimálnímu a reálnému výsledku.



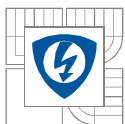
9.1.2 Rendering

Před vykreslením (vyrenderováním) animace, byl v okně *Rendering* → *Environment* v dialogu *Common Parameters* → *Environment Map* zvolen obrázek, který je v průběhu animace zobrazen na pozadí. Je to světlemodrý obrázek s logem firmy ATAS v pravém dolním rohu.

Vyrenderování celé animace je relativně zdoluhavý proces, záleží především na tom, jaký materiál (*textura*) je k jednotlivým modelům ve scéně přiřazen. Dále také záleží na rozlišení, v jakém je animace renderována. Vykreslovalo se všech 6 500 obrázků do formátu .png, protože tento datový formát podporuje tzv. alfa kanál. To znamená, že v souboru je v jedné vrstvě uložen vykreslený model a nezávisle na něm, ve vrstvě druhé, obrázek na pozadí. Což je výhodné z hlediska toho, že lze jednoduše u každého .png souboru změnit obrázek pozadí, aniž by bylo nutné renderovat znovu všechny snímky animace. V dialogu *Rendering* → *Render* → *Common* se nastaví počet vykreslovaných obrázků, jejich rozlišení, cesta kam se mají uložit a datový formát obrázků. V tomto dialogu je možné nastavit ještě mnoho dalších efektů a parametrů, ty však výsledek této animace viditelně neovlivní.

Pro následné spojení vykreslených obrázků do video-souboru (například .avi) lze také použít program 3ds Max. Stačí vytvořit nový (prázdný) projekt, v dialogu *Rendering* → *Environment* → *Common Parameters* → *Environment Map* vybrat první vykreslený obrázek, který je uložený na disku a zatrhnout funkci *Sequence*. Tímto se programu nastaví, aby automaticky zpracovával jeden obrázek po druhém. Nakonec se již jen v dialogu *Rendering* → *Render* zvolí výstupní video-soubor, například .avi, a vybere se jeden z nabízených video-kodeků, kterým se výstupní video zkompileje.

Nejdříve se modely motoru vykreslovaly s jednoduchou *texturou* – nastavena byla pouze barva co nejvíce podobná skutečným částem motoru, žádné další vlastnosti materiálu nebyly určeny. Rendering všech 6 500 snímků v rozlišení 800 x 600 bodů trval přibližně 25 hodin, scéna obsahuje 424 objektů. Byl použit běžný počítač – 2 GHz procesor, 1 500 Mb RAM. Spojení obrázků do .avi souboru poté ještě trvalo asi 2,5 hodiny. Použit byl kodek Xvid MPEG-4, který podával nejlepší vlastnosti v poměru datové velikosti souboru k vizuálnímu dojmu. Poté byla na některých modelech (hřídel, rotorový a statorový svazek plechů, rotorová klec, ložiskové štíty, šrouby) textura upravena tak, aby věrněji vystihovala kovový materiál. Byl nastaven odlesk od okolních světél a předmětů, rozptýl dopadajícího světla, zrcadlový odraz, *Shader* → *Anisotropic*, a další. V tomto případě se rendering snímků v rozlišení 800 x 600 bodů značně prodloužil, trval přibližně 40 hodin, následné spojení do video souboru další 4 hodiny. Nakonec se animace vykreslovala v rozlišení 1 024 x 768 bodů, což celkově zabralo více než 50 hodin. Animace trvá celkem 3 minuty a 36 vteřin, výsledný soubor, velký 43 MB, je vypálen na přiloženém CD.



10 ZÁVĚR

Při vytváření této diplomové práce jsem se seznámil s problematikou bezdotykového měření teploty, především s termovizí. Naučil jsem se pracovat s termovizní kamerou SAT-HY 6800 a vyhodnocovat termovizní snímky pořízené touto kamerou v prostředí programu SAT Report. Zjistil jsem, jaké okolní faktory mají na bezkontaktní měření vliv a čeho je třeba se při tomto měření vyvarovat. Nejdůležitější je určitě správně stanovit emisivitu měřeného povrchu. Bez znalosti této veličiny by měření bylo nepřesné.

Při praktické části diplomové práce jsem teplotně proměřoval jednotlivé části jednofázového asynchronního motoru typu J22TO484 s trvale připojeným kondenzátorem. Tento motor se používá výhradně ve skartovacích strojích. Emisivitu měřených částí jsem zjišťoval porovnáním teplot změřených termokamerou a teplot změřených referenčním dotykovým termočlánkem. Správná hodnota emisivity byla ta, při které oba měřicí přístroje ukazovaly shodnou teplotu. Zjištěné emisivity uvedené v kapitole 7 lze považovat za správné, protože odpovídají emisivitám uváděným v tabulkách vlastností materiálů.

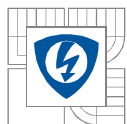
Měřením se mělo zjistit, jaký vliv má na chlazení motoru proud vzduchu vytvářený ventilátorem, umístěným na hřídeli motoru a jak se motor zahřívá bez ventilátoru. Z grafů uvedených v kapitole 7 je zřejmé, že se za daných podmínek při měření teplota motoru ustálí asi za 35 minut. Svazek rotorových plechů se ohřeje o $\Delta T_1 = 40^\circ\text{C}$, pravý ložiskový štít o $\Delta T_3 = 25^\circ\text{C}$, levý ložiskový štít pouze o $\Delta T_4 = 15^\circ\text{C}$, pravá hlava vinutí o $\Delta T_7 = 65^\circ\text{C}$, levá hlava vinutí o $\Delta T_8 = 55^\circ\text{C}$ a konečně ventilátor o $\Delta T_9 = 19^\circ\text{C}$. Ze zjištěných výsledků lze říci, že polovina motoru, na které je umístěn ventilátor (zde levá část), je proudícím vzduchem ochlazována tak, že je o 10°C chladnější, než druhá polovina motoru. Při ustálené teplotě je nejteplejší částí motoru logicky vinutí, pravá hlava dosáhla teploty $T_7 = 91^\circ\text{C}$. Naměřené teploty odpovídají spočítaným a zjištěným hodnotám dle zdrojů firmy ATAS.

Po sundání ventilátoru se motor začal ihned přehřívat a přibližně po jedenácti minutách vystoupala teplota pravé hlavy vinutí až na hodnotu $T_9 = 125^\circ\text{C}$, levá hlava byla ještě o 3°C teplejší - $T_{10} = 128^\circ\text{C}$. Při těchto teplotách vybavila tepelná ochrana motoru, která je nastavena na hodnotu $T_{och} = 135^\circ\text{C}$. Vybavila tedy správně.

V návaznosti na toto měření by bylo zajímavé zjistit, jaký vliv by měly na ochlazování motoru různé druhy ventilátorů – např. tvar a velikost lopatek, jejich zešíkmení a počet. Nebo by bylo možné přidat ještě jeden ventilátor na opačnou stranu hřídele motoru a rovněž zjišťovat jeho vliv.

Dále bylo ještě provedeno měření na elektronicky komutovaném motoru popsané v kapitole 8. Zjišťovalo se oteplení polovodičových součástek. Při tomto měření se s výhodou využilo bezkontaktního způsobu zjišťování teploty, neboť dotykové měření by značně ovlivňovalo výsledek – z malé polovodičové součástky by např. termočlánek (nebo jiná měřicí sonda) odváděl teplo a zkresloval by výsledek.

Termovize je tedy ideální pro teplotní měření, kde je nutné, aby se měřicím přístrojem nezasahovalo do probíhajícího děje. Dále je vhodná pro měření pohybujících se nebo rotujících částí – např. zde měřený ventilátor. Termovize se také uplatňuje při měření těžko



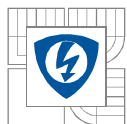
dostupných částí nebo částí pod napětím (měření na vzdálenost). Nevýhodou je, že lze měřit pouze povrchovou teplotu.

Měření termokamerou je relativně jednoduché, rychlé a komfortní, je však nutné znát zákonitosti bezkontaktního měření, faktory ovlivňující měření a především znát správnou emisivitu měřeného povrchu, jinak se nelze na zjištěné hodnoty spolehnout a jsou pouze orientační. Pro měření povrchu elektrických strojů je, dle mého názoru, termovizní kamera vhodná. Při měření nízkých teplot (kolem $30\text{ }^{\circ}\text{C}$) je třeba vyvarovat se parazitního teplotního záření odrážejícího se od měřeného objektu směrem do termokamery (např. od okolních osob). Přesnost zjištěných výsledků, při dodržení všech zásad bezkontaktního měření, se pohybuje do dvou procent, jak uvádí výrobce.

Pro teplotní měření byl zvolen motor typu J22TO484 z toho důvodu, protože náplní praktické části semestrálního projektu v zimním semestru bylo vytvořit animaci motoru J22TO455. Animace slouží jako ukázka procesu sestavení základních částí motoru při výrobě v jeden celek a naznačuje způsob chlazení tohoto motoru (popsána je v kapitole 9). Provedení motoru typu J22TO484 je stejné jako u typu J22TO455, liší se pouze průměrem hřídele. Vytvořená animace bude firmě ATAS sloužit především jako propagační materiál, například při prezentaci na veletrzích.

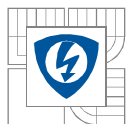
Při vytváření této animace v animačním a vizualizačním programu Autodesk 3ds Max 2009 jsem si vyzkoušel, jak se vytvářejí 3D modely reálných objektů a osvojil jsem si základní metody při práci na animační scéně – osvětlování předmětů pomocí reflektorových, všesměrových a směrových světel, umístování kamer a pohyby s nimi a renderování hotové scény. Využil jsem také znalosti, které jsem získal v předešlých letech při práci na semestrálních projektech a bakalářské práci, kdy jsem pracoval s programem Autodesk Inventor, ve kterém jsem vytvářel trojrozměrné modely technických součástí (např. zkoušečku s kombinovanou signalizací pro indikaci vn $40,5\text{ kV}$, univerzální zkratovací soupravu do $40,5\text{ kV}$ pro zajištění pracoviště, atd.). V neposlední řadě jsem se seznámil s nejnovějšími verzemi konstrukčních programů a nabral nové zkušenosti z oblasti CAD systémů a získal další cenné informace z oboru počítačové grafiky.

Na závěr bych chtěl poděkovat vedení firmy ATAS, které mi umožnilo uskutečnit výše popisovaná měření v laboratoři prototypů v sídle firmy ATAS v Náchodě. A pánům Ing. Leoši Kuchařovi a Ing. Aleši Lamkovi za konzultace a připomínky při vytváření počítačové animace.



11 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] ŠIMKO, Milan, CHUPÁČ, Milan. *Termovízia a jej využitie v praxi*. 1. vyd. Žilinská univerzita v Žiline : EDIS, 2007. 110 s. ISBN 978-80-8070-654-8.
- [2] KREIDL, Marcel. *Měření teploty : Senzory a měřicí obvody*. 1. vyd. Praha : BEN - technická literatura, 2005. 240 s. ISBN 80-7300-145-4.
- [3] LYSENKO, Vladimír. *Detektory pro bezdotykové měření teplot*. 1. vyd. Praha : BEN - technická literatura, 2005. 160 s. ISBN 80-7300-180-2.
- [4] VOJÁČEK, Antonín. *Princip termografického měření : IR senzor - Bolometr* [online]. c2008 [cit. 2009-03-13]. Dostupný z WWW: <http://www.termokamera.cz/index.php?option=com_content&task=view&id=4&Itemid=9>.
- [5] VOJÁČEK, Antonín. *Co jsou BOLOMETRY a MIKROBOLOMETRY* [online]. 2005 [cit. 2009-03-13]. Dostupný z WWW: <<http://automatizace.hw.cz/mereni-a-regulace/ART196-co-jsou-bolometry-a-mikrobolometry-.html>>.
- [6] LÍBAL, J. Možnosti využití počítačové grafiky v silnoproudé elektrotechnice. Brno: VUT, FEKT, 2007, 49 s.
- [7] ATAS elektromotory Náchod a.s., *Historie firmy* [online]. 1999 [cit. 2008-04-20]. Dostupný z WWW: <<http://www.atas.cz/history.php?lng=czech>>.
- [8] *Jednofázové motory : J22T* [online]. c2008 [cit. 2008-12-01]. Dostupný z WWW: <<http://www.atas.cz/files/J22T.pdf>>.
- [9] NOVOTNÁ, Klára. *Neselektivní tepelné detektory* [online]. 2004 [cit. 2009-03-14]. Dostupný z WWW: <<http://www.dbme.feec.vutbr.cz/ubmi/courses/MKZS/neseldet.ppt>>.
- [10] VOJÁČEK, Antonín. *Thermopile sensors = radiační pyrometry* [online]. 2005 [cit. 2009-03-15]. Dostupný z WWW: <<http://automatizace.hw.cz/mereni-a-regulace/ART189-thermopile-sensors--radiacni-pyrometry.html>>.
- [11] KADLEC. *Měřicí technika : Měření teploty* [online]. 2008 [cit. 2009-03-15]. Dostupný z WWW: <<http://web.vscht.cz/kadleck/aktual/mt.html>>.
- [12] ŠVÉDA, Martin. *Pyroelektrické snímače*. [s.l.], [200-?]. 12 s. Seminární práce.
- [13] KADLEC, Karel. *Bezdotykové teploměry* [online]. 2008 [cit. 2009-03-25]. Dostupný z WWW: <http://web.vscht.cz/kadleck/aktual/mrt_fpbtlaboratore/Bezdotykoveteplomery.pdf>.
- [14] ŠMÍD. *Termovize* [online]. 2007 [cit. 2009-03-25]. Dostupný z WWW: <<http://measure.feld.cvut.cz/usr/staff/smid/Lectures/>>.
- [15] *Teorie termovizního měření* [online]. c2008 [cit. 2009-03-25]. Dostupný z WWW: <<http://www.termovize.com/teorie/>>.
- [16] HUŠEK, Miloš. *Princip bezdotykového měření teploty* [online]. c2009 [cit. 2009-03-25]. Dostupný z WWW: <<http://www.qtest.cz/bezdotykoveteplomery/bezdotykoveteplomeni-teploty.htm>>.
- [17] ČECH, Bohumír. *Měření teplot v energetice*. 1. vyd. Ostrava : VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2008. 60 s. ISBN 978-80-248-1861-0.
- [18] *Teplota* [online]. [2008] , 19.3.2009 [cit. 2009-03-25]. Dostupný z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Teplota>>.
- [19] VOJÁČEK, Antonín. *Infračervené kvantové detektory a termokamery - úvod* [online]. 2007 [cit. 2009-03-25]. Dostupný z WWW: <<http://automatizace.hw.cz/infracervene-kvantove-detektory-termokamery-uvod>>.
- [20] *Review of infrared systems : Thermal imaging systems* [online]. 200 [cit. 2009-03-25]. Dostupný z WWW: <<http://www.inframet.com/review.htm>>.
- [21] *Support and Download* [online]. c2006 [cit. 2009-03-27]. Dostupný z WWW: <http://www.sat.com.cn/english/support_index.php>.
- [22] *SAT-HY6800* [online]. c2006 [cit. 2009-03-27]. Dostupný z WWW: <<http://www.sat.com.cn/english/pdf/HY6800brochureEn.pdf>>.
- [23] *SH-68/HY-6800 Profesionálna termovízna kamera : Návod na použitie*. [s.l.] : [s.n.], [200-?]. 32 s. Manuál k termovizní kameře.
- [24] HORELICA, Josef. *Přístroje pro měření teplot*. [s.l.], 2008. 48 s. , CD. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích. Vedoucí bakalářské práce Ing. Michal Šerý. Dostupný z WWW: <<http://wstag.jcu.cz/ws/services/rest/kvalifikacniprace/downloadPraceContent?adipldno=9434>>.

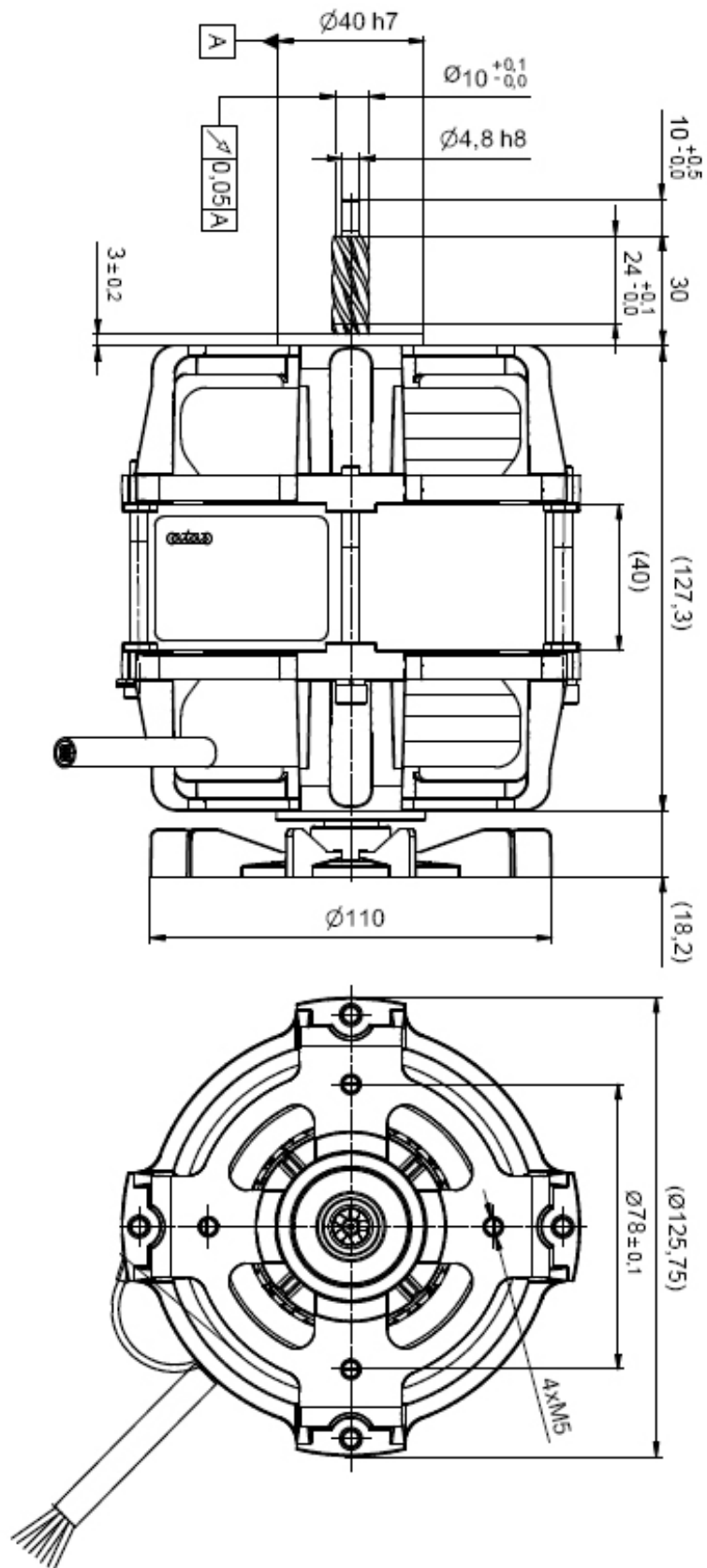


- [25] NOVÁČEK, Jiří. *Kalibrace termovizního systému (kamery) Fluke Ti30*. [s.l.], 2007. 41 s. Masarykova univerzita. Vedoucí bakalářské práce MUDr. Věra Maryšková. Dostupný z WWW: <<http://theses.cz/id/1I9s4y/>>.
- [26] VOVES, Jan. *Pásový model polovodičů* [online]. [2006] [cit. 2009-04-04]. Přednáškové materiály. Dostupný z WWW: <www.micro.feld.cvut.cz/home/34EPO/prednasky/epo2cz_pasy1.pdf>.
- [27] VOVES, Jan. *Fyzika polovodičových součástek*. [s.l.] : [s.n.], [200-?]. 155 s. Skriptum. Dostupný z WWW: <<http://www.micro.feld.cvut.cz/home/34EPO/prednasky/>>.
- [28] NOVÁK, Jan. *Nový typ infračerveného detektoru* [online]. 2006 [cit. 2009-04-04]. Dostupný z WWW: <http://www.rozhlas.cz/leonardo/technologie/_zprava/249511>.
- [29] QWIP Arrays : *Infrared Detector Arrays for Thermal Imaging* [online]. c2004 [cit. 2009-04-04]. Dostupný z WWW: <http://www.acreo.se/templates/Page_____227.aspx?mode=print>.
- [30] STRUMIENSKÝ, Jiří. *Experimenty s infračerveným a ultrafialovým zářením*. [s.l.], 2009. 60 s. Masarykova univerzita. Vedoucí diplomové práce Zdeněk Bochníček. Dostupný z WWW: <<http://theses.cz/id/t8npbg/>>.
- [31] *Tabulka emisivit kovových materiálů* [online]. c2005 [cit. 2009-04-16]. Dostupný z WWW: <<http://www.newport.cz/techinfo/emiskovy.html>>.
- [32] VAVŘIČKA, Roman. *Bezdotykové měření teploty*. [s.l.], [200-?]. 6 s. Seminární práce.
- [33] *Tabulka emisivit nekovových materiálů* [online]. c2005 [cit. 2009-04-16]. Dostupný z WWW: <<http://www.newport.cz/techinfo/emisnekovy.html>>.

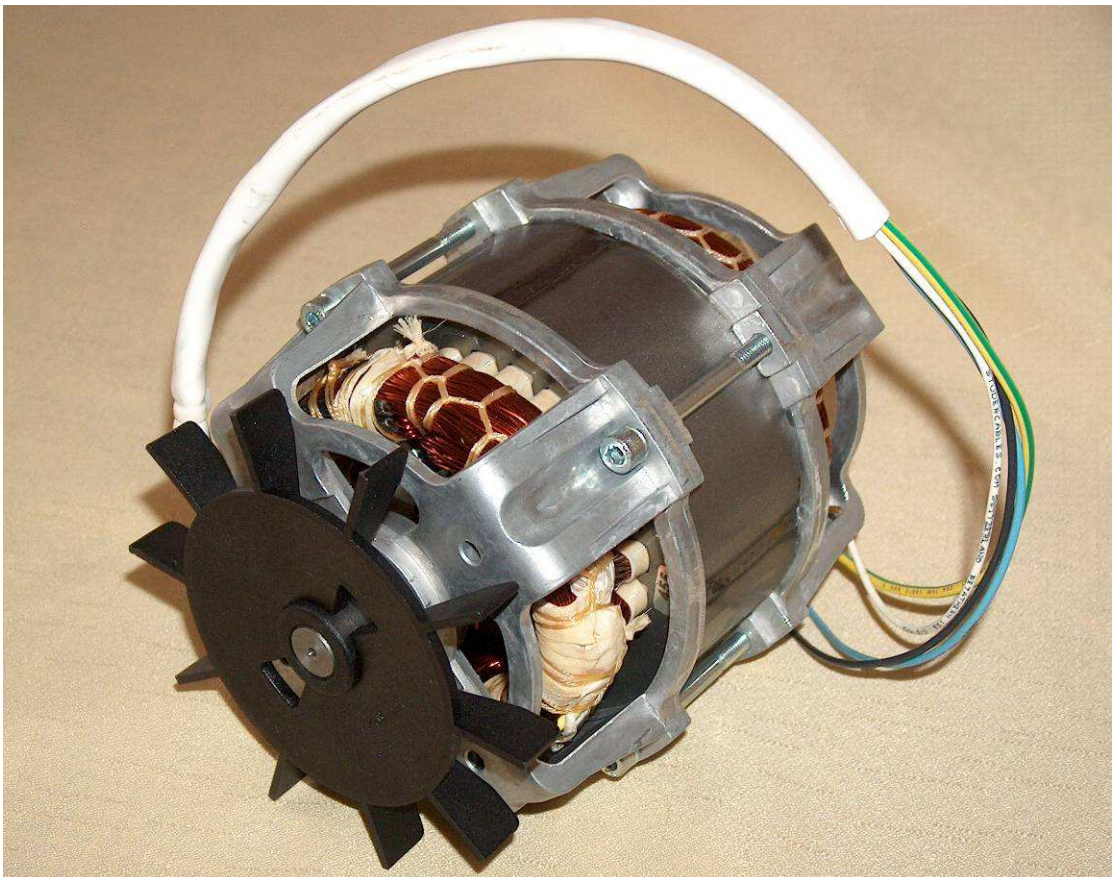
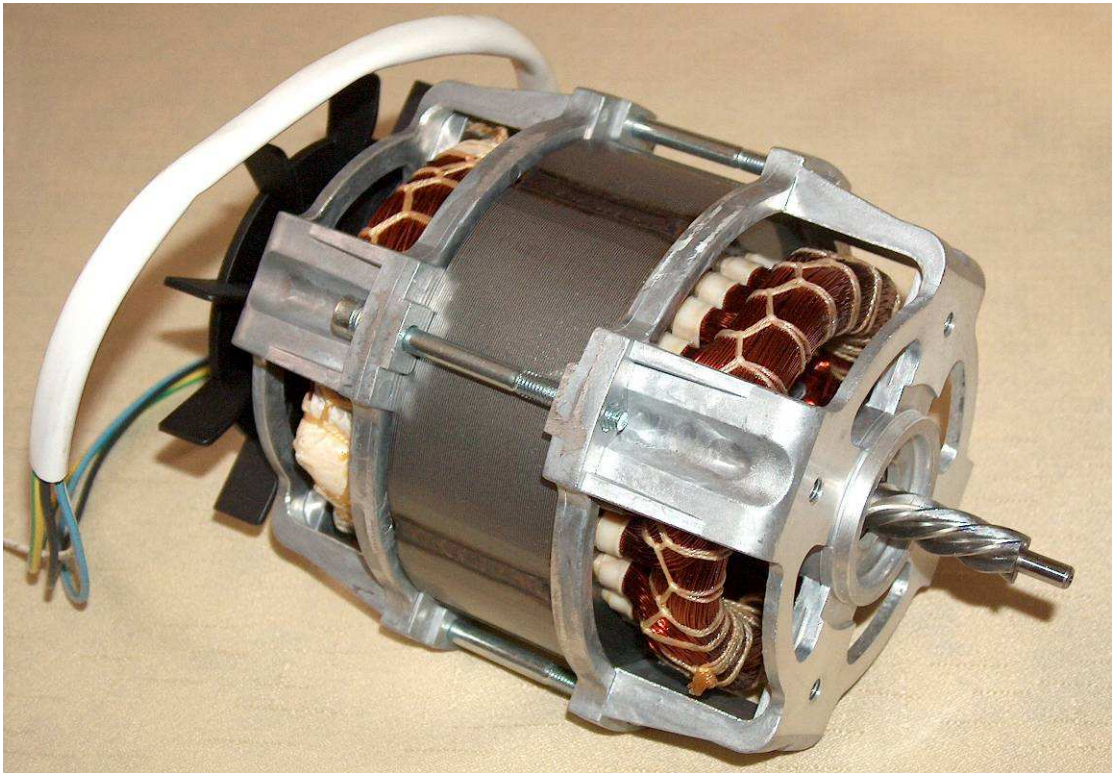
SEZNAM PŘÍLOH

1. Sestava jednofázového asynchronního motoru typu J22TO484 [8]
2. Fotografie motoru typu J22TO455
3. Obrázky modelu motoru typu J22TO455
4. Naznačené vzduchové chlazení motoru
5. Termovizní snímky motoru typu J22TO484
6. Tabulky naměřených teplot

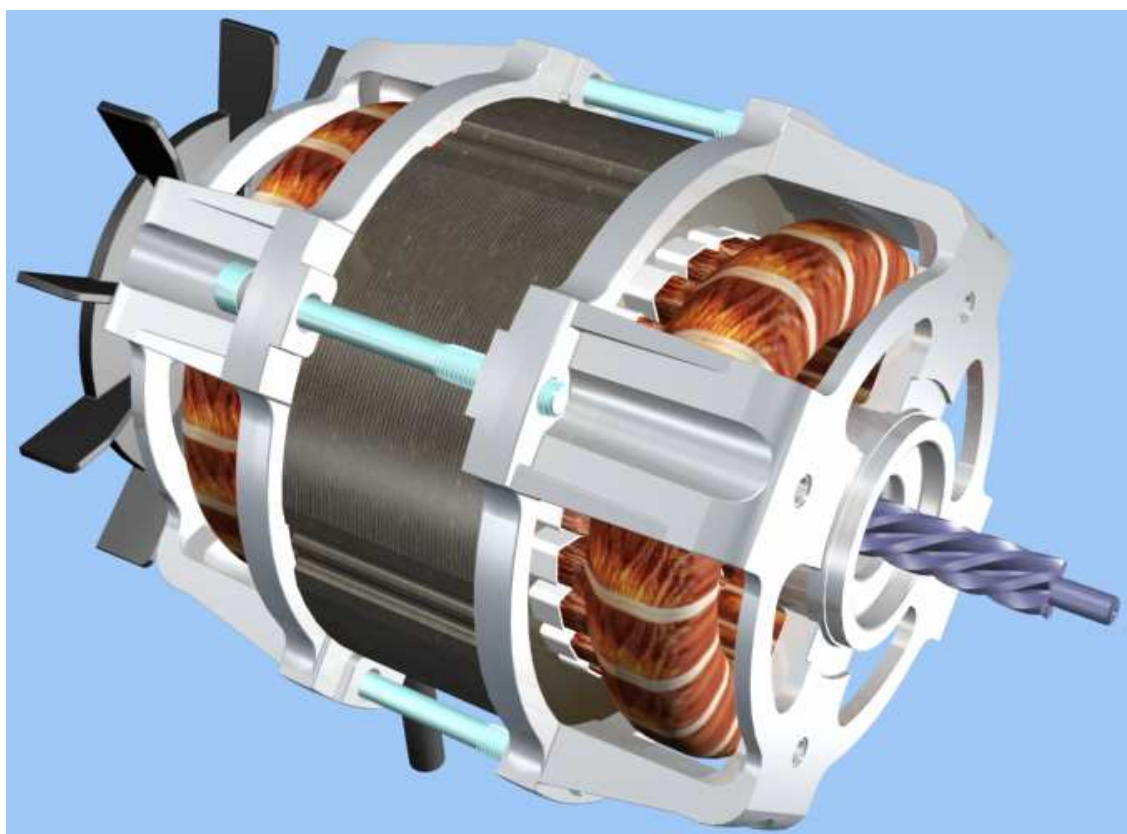
1. Sestava jednofázového asynchronního motoru typu J22TO484 [8]



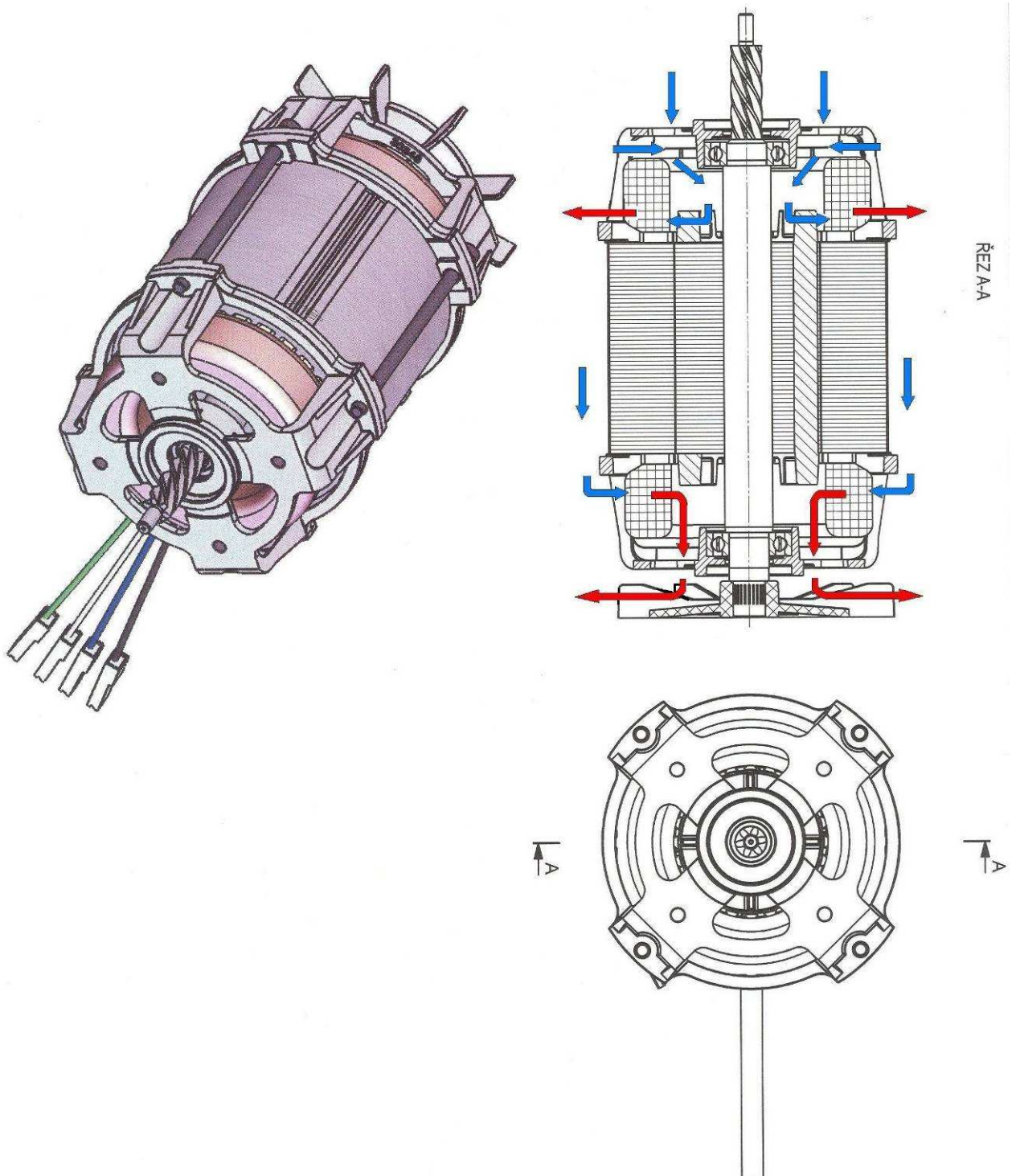
2. Fotografie motoru typu J22TO455



3. Obrázky modelu motoru typu J22TO455

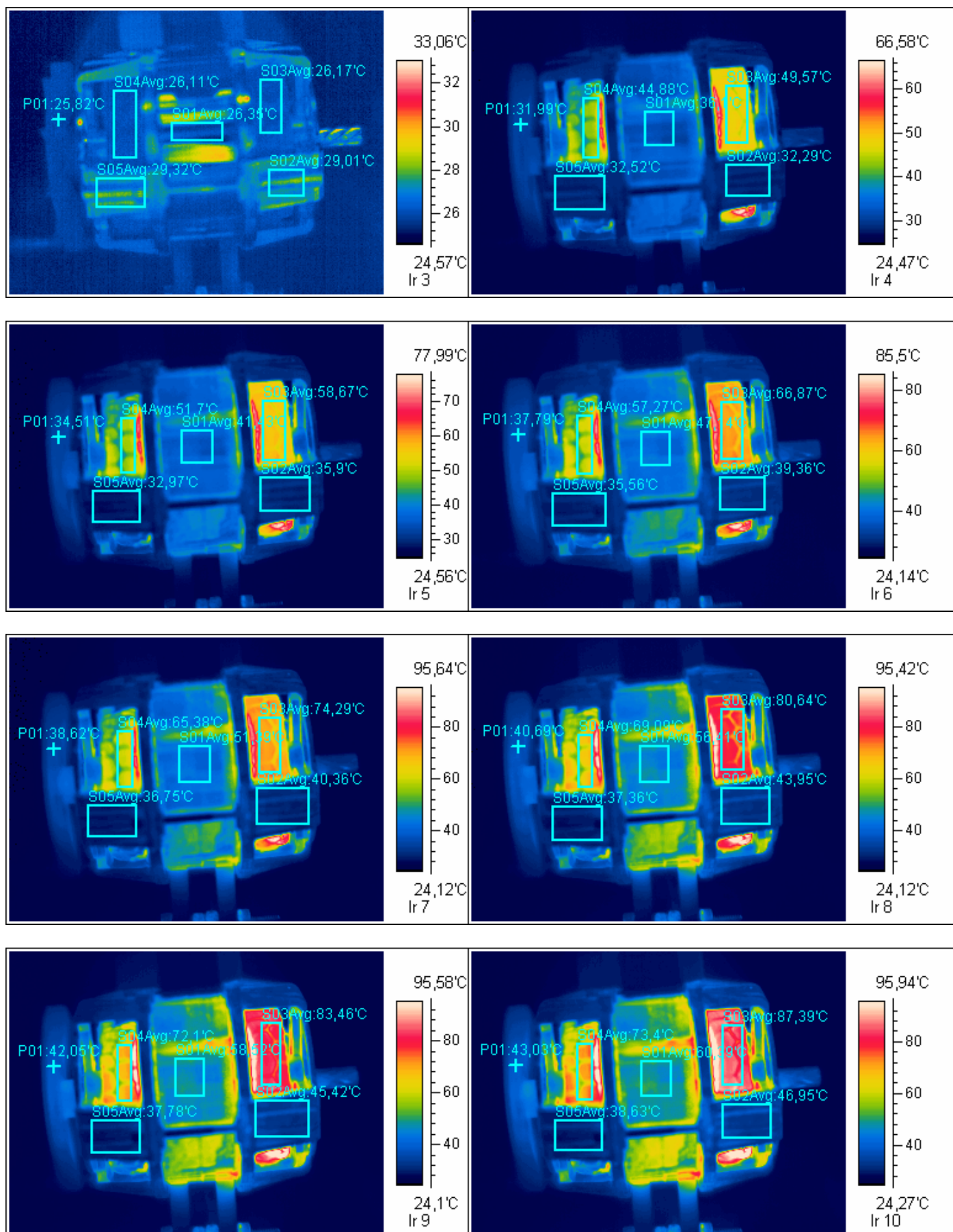


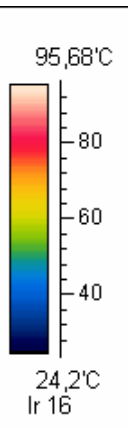
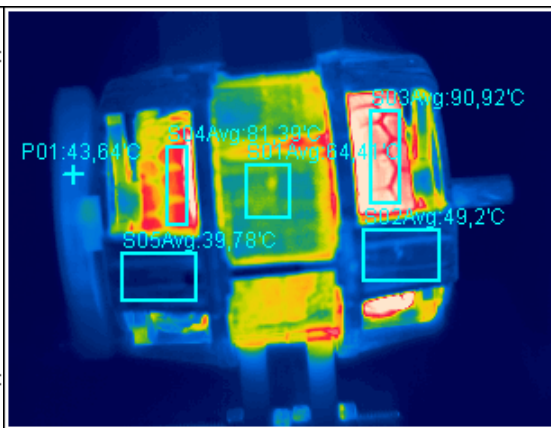
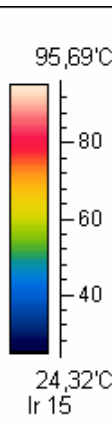
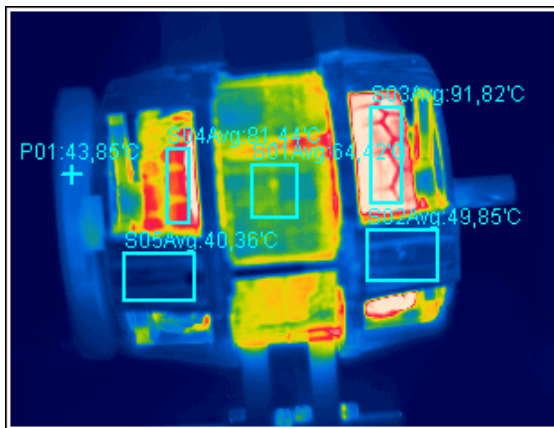
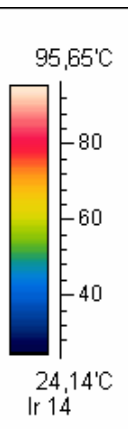
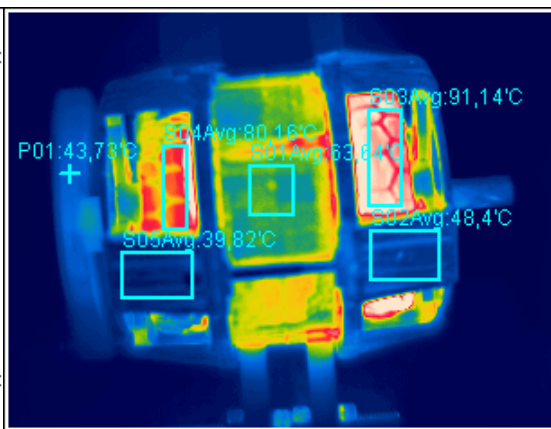
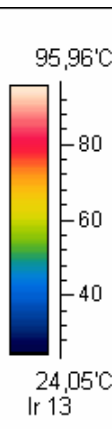
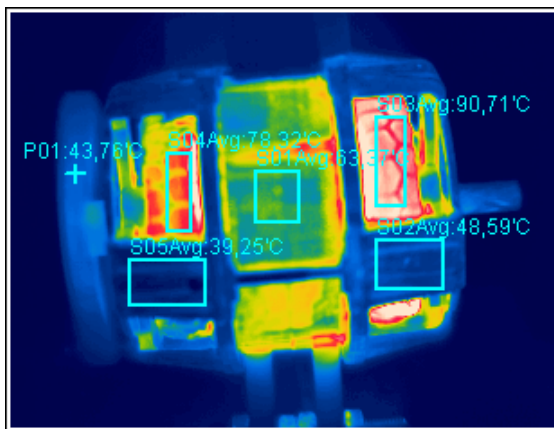
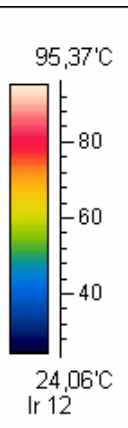
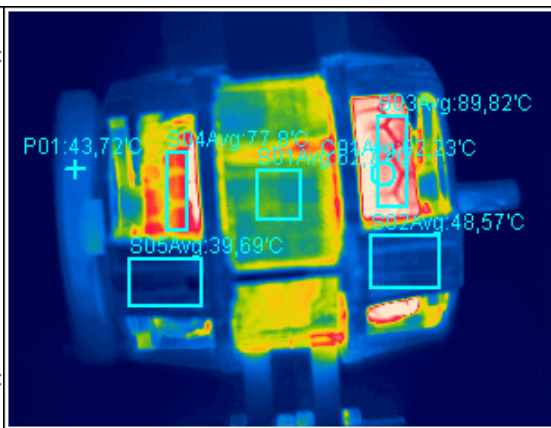
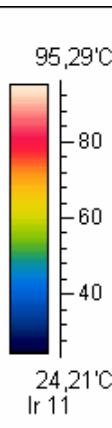
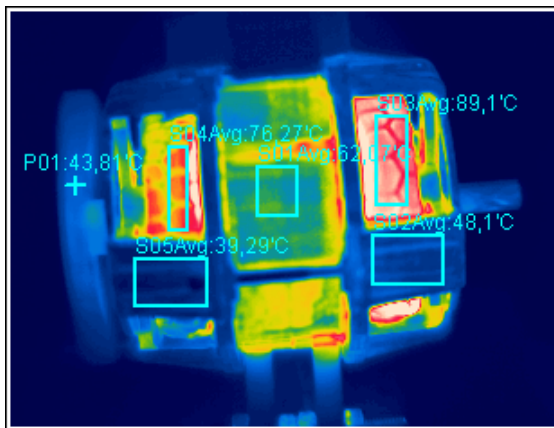
4. Naznačené vzduchové chlazení motoru



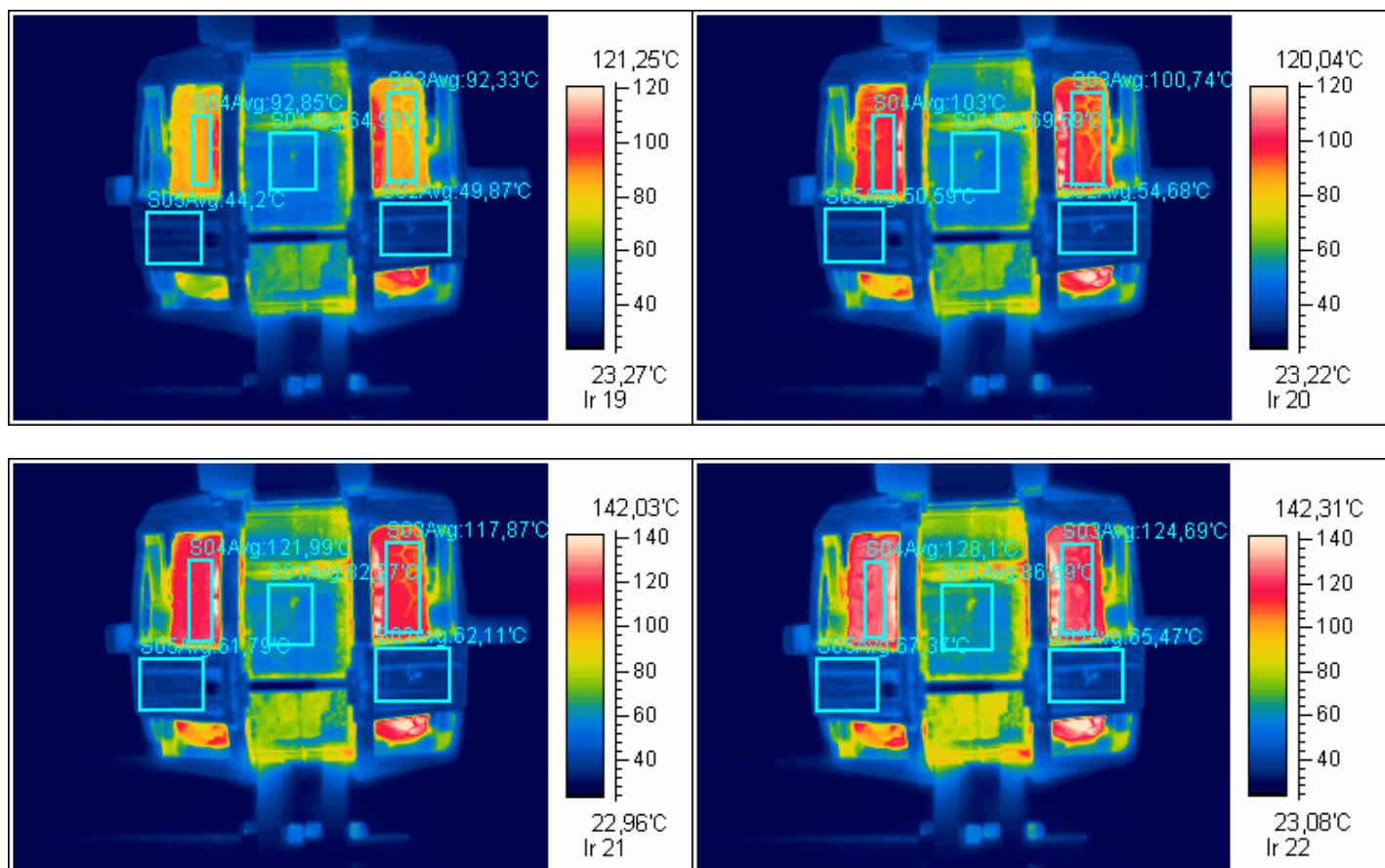
5. Termovizní snímky motoru typu J22TO484

Pořízené termovizní snímky do ustálení teploty motoru.

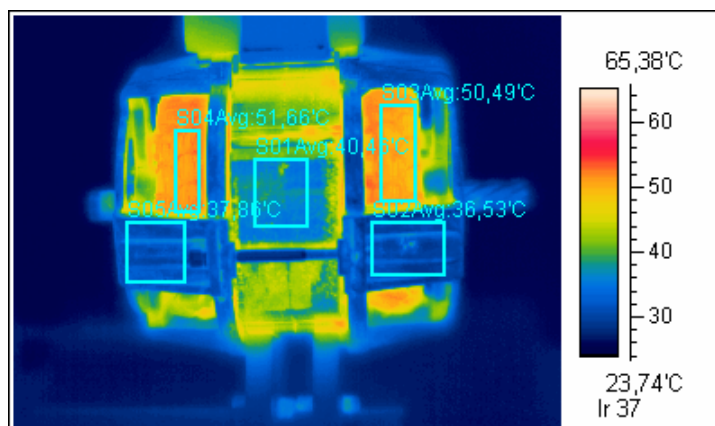




Termovizní snímky po sundání ventilátoru, až do okamžiku vybavení tepelné ochrany.



Přirozené ochlazení motoru po jedné hodině od konce měření.



6. Tabulky naměřených teplot

pravá hlava vinutí				levá hlava vinutí		svazek rotorových plechů			
termočlánek		termokamera		termokamera		termočlánek		termokamera	
t [min]	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]	T [°C]
0	25	0	26,2	0,1	26,1	0,1	25	0	26,4
3	43	3	49,6	3	44,9	4	35	3	33,9
6	50	5	58,7	5	51,7	7	39	5	41,4
9	53	8	66,9	8	57,2	10	42	8	47,1
12	59	12	74,3	12	65,4	13	51	12	51,4
15	65	16	80,6	16	69,1	16	57	16	56,4
19	67	20	83,5	20	72,1	20	59	20	58,5
24	68	25	87,4	25	73,4	25	62	25	60,4
29	71	29	89,1	29	76,3	30	64	29	62,1
33	71	33	89,8	33	77,8	34	63	33	62,7
		36	90,7	36	78,3			36	63,4
39	74	38	91,1	38	80,1	40	65	38	63,6
45	73	45	91,8	45	81,4	46	66	45	64,4
49	72	50	90,9	50	81,4	50	65	50	64,4
		57	92,3	57	92,8			57	64,9
60	80	59	100,7	59	103	61	75	59	69,6
66	99	65	117,9	65	122			65	82,3
		68	124,7	68	128	67	90	68	86,7

Tabulka 3 – Naměřené teploty hlav vinutí a svazku rotorových plechů (motor J22TO484)

ložiskový štít vpravo				ložiskový štít vlevo		ventilátor	
termočlánek		termokamera		termokamera		termokamera	
t [min]	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]	T [°C]
0	25	0	29	0	29,3	0	25,8
5	32	3	32,3	3	32,5	3	32,0
8	37	5	35,9	5	32,9	5	34,5
11	39	8	39,4	8	35,6	8	37,8
14	41	12	40,1	12	36,7	12	38,6
17	44	16	43,9	16	37,4	16	40,7
21	45	20	45,4	20	37,8	20	42,0
26	47	25	46,9	25	38,6	25	43,0
31	48	29	48,1	29	39,3	29	43,8
35	49	33	48,6	33	39,7	33	43,7
		36	48,6	36	39,3	36	43,8
41	51	38	48,4	38	39,8	38	43,7
47	51	45	49,8	45	40,4	45	43,8
51	51	50	49,2	50	39,8	50	43,6
		57	49,9	57	44,2		
62	61	59	54,7	59	50,6		
		65	62,1	65	61,8		
68	72	68	65,5	68	67,4		

Tabulka 4 – Naměřené teploty ložiskových štítů a ventilátoru (motor J22TO484)

	Rezistor (C01)	Integrovaný obvod (C02)	Integrovaný obvod (C03)	Tranzistor (C04)
t [min]	T [°C]	T [°C]	T [°C]	T [°C]
0	54,4	43,4	32,5	48,0
3	67,7	52,5	37,8	57,0
7	69,6	54,3	39,5	60,8
13	71,5	56,0	40,8	62,3
33	71,7	59,0	44,2	65,2
35	73,4	60,3	45,1	66,0
39	73,9	60,6	44,9	67,1
41	74,9	61,5	45,6	68,2
44	76,8	63,3	47,3	71,1
52	81,6	66,7	50,1	75,9
54	83,0	68,1	51,4	77,4
57	83,6	68,8	52,0	78,5
60	84,8	69,7	52,3	79,5
62	85,8	70,7	53,7	80,8
65	86,4	71,2	54,2	81,6
69	87,4	72,2	54,6	82,3
76	89,2	73,6	56,4	84,8
81	90,4	74,4	57,2	85,3

Tabulka 5 – Termokamerou naměřené teploty polovodičových součástek (EC motor)