

# **Senzory pro bezdotykové měření teplot povrchu těles**

Sensor for non-contact temperature measurement

Petr Valenta

---

Bakalářská práce  
2009

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta aplikované informatiky

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta aplikované informatiky

Ústav automatizace a řídicí techniky

akademický rok: 2008/2009

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Petr VALENTA**

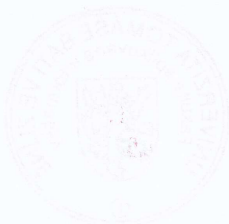
Studijní program: **B 3902 Inženýrská informatika**

Studijní obor: **Automatické řízení a informatika**

Téma práce: **Sensory pro bezdotykové měření teplot povrchu těles**

Zásady pro vypracování:

1. Literární rešerše současného stavu nabídky senzorů.
2. Zpracování klasifikace podle metod snímání a rozsahů a optických vlastností.
3. Popis elektroniky pro vyhodnocování signálů ze senzorů.
4. Aplikace senzorů pro oblast bezpečnostních systémů a pro systémy automatizace a informatiky.
5. Návrh a realizace experimentální sestavy se senzorem a vyhodnocováním.
6. Ověření senzoru na experimentální sestavě a vyhodnocení ověření.



Rozsah práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. **ĎAĎO, S.-KREIDL, M.:** Senzory a měřicí obvody. Praha: ČVUT, 1996.
2. **FRADEN, J.** Handbook of Modern Sensors. Physics, designs, and Applications. New York: Springer Verlag, 1996, s.556. ISBN 1-56396-538-0
3. **HRUŠKA, F.** Senzory pro systémy informatiky a automatizace. Učební texty. 1.vyd. Zlín: UTB ve Zlíně, prosinec 2007, s.177. ISBN 978-80-7318-630-2
4. **Tumanski, S.** Principles of electrical measurement. Taylor & Francis, Boca Raton, s. 472, ISBN 0-7503-1038-3
5. **HRUŠKA, F.** Technické prostředky informatiky a automatizace. Učební texty. 1.vyd. Zlín: UTB ve Zlíně, duben 2007, s.193. ISBN 978-80-7318-535-0
6. **WEB stránky orientované na problematiku senzorů elektromagnetického záření.**

Vedoucí bakalářské práce:

**doc. Ing. František Hruška, Ph.D.**

Ústav elektrotechniky a měření

Datum zadání bakalářské práce:

**27. února 2009**

Termín odevzdání bakalářské práce:

**20. května 2009**

Ve Zlíně dne 27. února 2009

prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.

*děkan*



prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.

*ředitel ústavu*

## Abstrakt

Teoretická část této bakalářské práce nejprve říká co to pyrometrie je, jaké jsou její výhody a nevýhody a jak se v praxi aplikuje. Dále jsou popsány způsoby snímání infračerveného záření a jeho transformace na elektricky měřitelný signál, čili fyzikální jevy použité v senzorech bezdotykového měření teplot. Poté je popsán optický systém senzorů, požadavky na jeho realizaci a s ním související teplotní rozsah snímačů. V závěru této části je stručný popis vyhodnocovací elektroniky a seznam oblastí s možným využitím těchto senzorů.

V praktické části je bezdotykově měřena teplota stabilního infračerveného zářiče v různých vzdálenostech od tohoto měřeného tělesa. Následně jsou provedeny výpočty vyzařené a snímané energie a nakonec je vše vyhodnoceno.

Klíčové slova: pyrometrie, senzory bezdotykového měření teplot, infračervené záření, optický systém

## Abstract

First chapter of teoreticle part says: what is pyrometry, what is their features and what is aplication of pyrometry. Other chapter shows metods of IR radiation sensing and how these sensors of non-contact temperature measurement transformate IR radiation to electrical signal. Afterwards optical system of sensors is described and also it is described realization progress. In the end of theoretical part it is written about circuits of ambient temperature compenzation and there is list of sensors aplications

Practical part is focused on non-contact temperature measurement. As the IR radiation source is used steady state IR source. Distance between radiation source and sensor is being changed measurement progress. In the end there are realized calculations of emitted energy by radiation source and calculations of energy that impacted on the sensor. That all is evaulated.

Key words: pyrometry, non-contact temperature measurement, infrared radiation, optical system

Zde bych chtěl poděkovat svému vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Františkovi Hruškovi, Ph.D. za odborné vedení a cenné rady při psaní této práce.

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby;
- beru na vědomí, že bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k prezenčnímu nahlédnutí, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen v příruční knihovně Fakulty aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo –bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

že jsem na bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.

Ve Zlíně

.....  
podpis diplomanta

## Obsah

Úvod.....	9
<b>I TEORETICKÁ ČÁST.....</b>	<b>10</b>
<b>1. SOUČASNÝ STAV NABÍDKY SENZORŮ .....</b>	<b>11</b>
<b>1.1. THERMOPILE SENZORY .....</b>	<b>11</b>
1.1.1. DETEKTORY S JEDNÍM SNÍMACÍM ELEMENTEM.....	11
1.1.2. DETEKTORY SE DVĚMA NEBO ČTYŘMA ELEMENTY PRO DETEKCI PLYNU .....	12
1.1.3. TPMI MODULY .....	13
<b>1.2. PYROELEKTRICKÉ SENZORY .....</b>	<b>13</b>
1.2.1. DETEKTORY S JEDNÍM SNÍMACÍM ELEMENTEM.....	13
1.2.2. DETEKTORY SE DVĚMA ELEMENTY .....	14
1.2.3. DVOUKANÁLOVÉ DETEKTORY .....	14
<b>1.3. VYSVĚTLENÍ CHARAKTERISTICKÝCH PARAMETRŮ SENZORŮ.....</b>	<b>15</b>
<b>2. PYROMETRIE .....</b>	<b>15</b>
<b>2.1. VLASTNOSTI PYROMETRIE .....</b>	<b>15</b>
2.1.1. BEZDOTYKOVÝM MĚŘENÍM TEPLoty NÁM POSKYTUJE TYTO VÝHODY .....	15
2.1.2. NEVÝHODOU PAK MŮŽE BÝT .....	15
<b>2.2. PRINCIP PYROMETRIE.....</b>	<b>16</b>
<b>2.3. PYROMETRY (IČ-TEPLOMĚRY) .....</b>	<b>18</b>
<b>3. METODY SNÍMÁNÍ .....</b>	<b>18</b>
<b>3.1. THERMOPILE SENSORS (INFRATERMOČLÁNKY, TERMOČLÁNKOVÁ BATERIE) .....</b>	<b>18</b>
3.1.1. PRINCIP THERMOPILE SENZORU .....	18
3.1.2. VÝHODY .....	21
3.1.3. NEVÝHODY.....	21
<b>3.2. PYROELEKTRICKÉ SENZORY .....</b>	<b>21</b>
3.2.1. ÚVOD.....	21
3.2.2. PRINCIP PYROELEKTRICKÉHO SENZORU .....	22
3.2.3. VÝHODY .....	23
3.2.4. NEVÝHODY.....	23
<b>3.3. BOLOMETRY A MIKROBOLOMETRY.....</b>	<b>23</b>
3.3.1. ÚVOD.....	23
3.3.2. PRINCIP BOLOMETRU .....	23
3.3.3. VLASTNOSTI BOLOMETRŮ (MIKROBOLOMETRŮ) .....	25
<b>4. KLASIFIKACE PODLE ROZSAHŮ A OPTICKÝCH VLASTNOSTÍ .....</b>	<b>25</b>
4.1. OPTICKÉ SYSTÉMY A JEJICH VÝZNAM.....	25
4.2. ZORNÝ ÚHEL .....	25
4.3. ZAMĚROVACÍ OPTIKA .....	26
4.4. POŽADAVKY NA PRVKY OPTICKÉHO SYSTÉMU .....	26
4.5. POŽÍVANÉ MATERIÁLY .....	26
<b>5. POPIS ELEKTRONIKY PRO VYHODNOCOVÁNÍ SIGNÁLU SENZORŮ .....</b>	<b>27</b>
5.1. ANALOGOVÉ ŘEŠENÍ.....	27
5.2. ČÍSLICOVÉ ŘEŠENÍ.....	28
<b>6. APLIKACE SENZORŮ PRO OBLAST BEZPEČNOSTNÍCH SYSTÉMŮ A PRO SYSTÉMY</b>	
<b>AUTOMATIZACE A INFORMATIKY.....</b>	<b>29</b>
6.1. SEZNAM POUŽITÍ THERMOPILE SENZORŮ VE ZMÍNĚNÝCH OBLASTECH.....	29
6.2. SEZNAM POUŽITÍ PYROELEKTRICKÝCH SENZORŮ VE ZMÍNĚNÝCH OBLASTECH.....	30
6.3. SEZNAM POUŽITÍ BOLOMETRŮ (MIKROBOLOMETRŮ) VE ZMÍNĚNÝCH OBLASTECH .....	30
<b>II TEORETICKÁ ČÁST.....</b>	<b>31</b>

7.	NÁVRH A REALIZACE EXPERIMENTÁLNÍ SESTAVY SE SENZOREM A VYHODNOCOVÁNÍM .....	32
7.1.	ZDROJ INFRAČERVENÉHO ZÁŘENÍ .....	32
7.2.	SENZOR .....	32
7.3.	PODLOŽKA A OBJÍMKY .....	32
8.	OVĚŘENÍ SENZORU NA EXPERIMENTÁLNÍ SESTAVĚ A VYHODNOCENÍ OVĚŘENÍ .....	34
8.1.	ÚKOL MĚŘENÍ .....	34
8.2.	SEZNAM POUŽITÝCH ZAŘÍZENÍ .....	34
8.3.	SCHÉMA ZAPOJENÍ A JEHO POPIS .....	34
8.3.1.	POPIS ZAPOJENÝCH VÝVODŮ SENZORU: .....	35
8.4.	POSTUP MĚŘENÍ .....	36
8.5.	VÝPOČTY .....	36
8.5.1.	URČENÍ MAXIMÁLNÍ VZDÁLENOSTI $L_{MAX}$ .....	36
8.5.2.	VÝPOČET POMĚRU PLOCHY SNÍMANÉ ENERGIE A PLOCHY VYZAŘOVANÉ ENERGIE	37
8.5.2.1.	VZDÁLENOST $L = 1,5MM$ .....	38
8.5.2.2.	VZDÁLENOST $L = 3,5MM$ .....	39
8.5.2.3.	VZDÁLENOST $L = 9MM$ .....	40
8.6.	VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ.....	41
	ZÁVĚR .....	42
	ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ .....	43
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	46
	SEZNAM OBRÁZKŮ .....	47
	SEZNAM PŘÍLOH .....	48



## Úvod

S měřením teploty se setkáváme prakticky na každém kroku. Většinou se jedná o dotykové měření teploty. Jsou ale případy kde teplotu nelze měřit dotykově nebo je z určitých důvodů vhodnější použít bezdotykové měření teploty. Jedná se například o měření teploty pohybujících se předmětů nebo předmětů pod elektrickým napětím. Dále můžeme například měřit rychlé teplotní změny což je u dotykového měření velký problém. Tento způsob měření poskytuje měření obrovských rozsahů teploty i další výhody.

Bezdotykovému měření teploty se odborně říká pyrometrie. Pyrometrie je založena na snímání infračervené oblasti elektromagnetického záření. Infračervené záření je vyzařováno povrchem každého tělesa o teplotě větší než absolutní nula. Protože je snímáno záření povrchu tělesa, je možné měřit pouze jeho povrchovou teplotu.

Senzory bezdotykového měření teploty převádí dopadající infračervené záření na elektricky měřitelný signál. Možností provedení senzorů infračerveného záření je několik. Nejčastějšími jsou Thermopile senzory, pyroelektrické senzory a bolometry. Každý z těchto senzorů je založen na odlišném fyzikálním jevu. Thermopile senzory využívají principu termočlánku (Seebeckův jev), pyroelektrické senzory, jak už napovídá jejich název, jsou založeny na pyroelektrickém jevu a bolometry využívají tepelně závislých odporů.

Zařízení, které obsahuje senzor infračerveného záření pro měření teploty se nazývá pyrometr, avšak dnes se spíše využívá označení jako bezdotykový teploměr. Takové teploměry se dělají ve dvou variantách. Buď jako zařízení trvale umístěné na jednom místě, ze kterého měří teplotu, nebo jako přenosné. Zaměření objektu se provádí často zabudovaným laserovým ukazovátkem. Samotné měření se pak provede zaměřením na měřený objekt a odečtením teploty, která je zobrazena prakticky hned. Jediné co je potřeba nastavit před měřením je hodnota emisivity infračerveného záření pro daný objekt. Tu má každý povrch specifický. Určuje se měřením nebo z tabulek.

## I. TEORETICKÁ ČÁST

# 1. Současný stav nabídky senzorů

Pro ukázkou současného stavu nabídky senzorů na trhu jsem vybral některé produkty z nabídky firmy Perkin Elmer.

## 1.1. *Thermopile senzory*

### 1.1.1. Detektory s jedním snímacím elementem

- a) model TPS 332
- pouzdro TO-46
  - zorný úhel  $100^{\circ}$  (intenzita 50%)
  - citlivost 35V/W
  - časová konstanta 25ms
  - plocha elementu 0,7x0,7mm
  - termistor 100k $\Omega$
- b) model TPS 334
- pouzdro TO-39
  - zorný úhel  $60^{\circ}$  (intenzita 50%)
  - citlivost 35V/W
  - časová konstanta 25ms
  - plocha elementu 0,7x0,7mm
  - termistor 30k $\Omega$  [1]



Thermopile Sensors in TO-46 (left) (TPS 332, TPS 232) and Isothermal (right) (TPS 23B) Housing

Obr. 1. - Thermopile senzory v TO pouzdrech

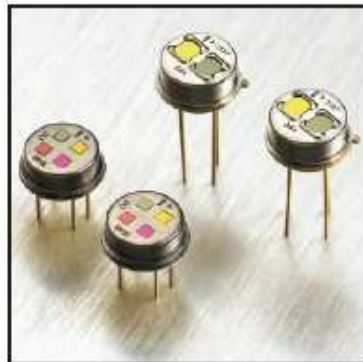
### 1.1.2. Detektory se dvěma nebo čtyřma elementy pro detekci plynu

a) model TPS 2534

- pouzdro TO-39 (dvou-kanálové)
- zorný úhel  $2 \times 90^\circ$  (intenzita 50%)
- citlivost 42V/W
- časová konstanta 35ms
- plocha elementu 1,2x1,2mm
- NEP 0,7nW/\*Hz
- termistor 30k $\Omega$  (25 $^\circ$ C)

b) model TPS 4339

- pouzdro TO-39 (čtyř-kanálové)
- zorný úhel  $4 \times 60^\circ$  (intenzita 50%)
- citlivost 75V/W
- časová konstanta 25ms
- plocha elementu 0,7x0,7mm
- NEP 0,5nW/\*Hz
- termistor 100k $\Omega$  (25 $^\circ$ C) [1]



Dual and Quad Element  
Thermopile Detectors  
General Data

Obr. 2. – Dvoj a čtyř  
elementové Thermopile  
senzory

### 1.1.3. TPMI moduly

- a) model a2TPMI 334 0AA060 / 6259
- pouzdro TO-39
  - optika – infračervené okýnko (průměr 2,5mm)
  - zorný úhel  $60^{\circ}$  (intenzita 50%)
  - rozsah měřené teploty objektu  $-20$  až  $60^{\circ}\text{C}$
  - analogový výstup 5V
  - napájecí napětí 5V
- b) model a2TPMI 334-L5.5 0AA180 / 6264
- pouzdro TO-39
  - optika – Si čočka (ohnisková vzdálenost 5,5mm)
  - zorný úhel  $7^{\circ}$  (intenzita 50%; D:S=8:1)
  - rozsah měřené teploty objektu  $-20$  až  $180^{\circ}\text{C}$
  - analogový výstup 5V
  - napájecí napětí 5V [1]



Thermopile TPMI<sup>®</sup> Modules  
with Si-Lens Optics

Obr. 3. – Thermopile TPMI  
moduly s Si čočkou

## 1.2. Pyroelektrické senzory

### 1.2.1. Detektory s jedním snímacím elementem

model Lhi 807

- pouzdro TO-5
- citlivost  $640\text{V/W}$
- NEP  $9,4 \times 10^{-10}\text{ W/*Hz}$
- zorný úhel  $X=135^{\circ}$ ,  $Y=120^{\circ}$
- plocha elementu  $1,5 \times 1,5\text{mm}$  [1]



Obr. 4. – pyroelektrický senzor s jedním snímacím elementem

### 1.2.2. Detektory se dvěma elementy

model LHi 944

- pouzdro TO-39
- citlivost 4000V/W
- NEP  $9,4 \times 10^{-10}$  W/\*Hz
- zorný úhel  $X=77^\circ$ ,  $Y=95^\circ$
- plocha elementu 1,5x1,5mm [1]

### 1.2.3. Dvoukanálové detektory

(jeden kanál je vždy referenční)

model LHi 814 G1/G20

- pouzdro TO-5
- citlivost 640V/W
- NEP  $7,5 \times 10^{-10}$  W/\*Hz
- zorný úhel  $X=110^\circ$ ,  $Y=110^\circ$
- plocha elementu 1,5x1,5mm [1]



Z uvedených parametrů jednotlivých senzorů si všimněme vysoké citlivosti pyroelektrických senzorů. Ta se pohybuje několikanásobně výše než u senzorů Thermopile.

### 1.3. Vysvětlení charakteristických parametrů senzorů

- **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)** =  $1/NEP$ .
- **Specific detectivity (D\*)** =  $\sqrt{A_D} / NEP$  - rozšířený parametr detektivit D o vliv plochy detektoru  $A_D$
- **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). [2]

## 2. Pyrometrie

### 2.1. Vlastnosti pyrometrie

#### 2.1.1. Bezdotykovým měřením teploty nám poskytuje tyto výhody

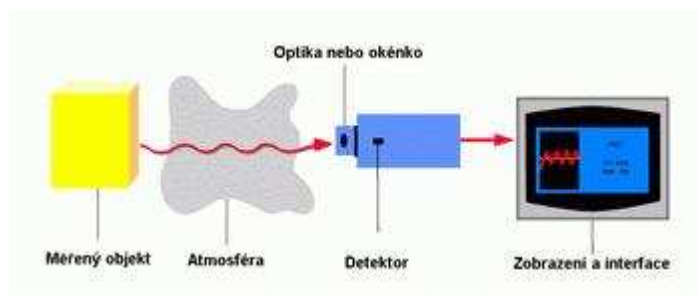
- můžeme měřit velice rychlé teplotní změny
- lze měřit obrovské teplotní rozsahy cca od  $-50^{\circ}\text{C}$  do  $5000^{\circ}\text{C}$  i více
- je možné měřit pohybující se objekty (rotující součásti, výrobky na dopravnících apod.)
- možnost měřit a dále digitálně zpracovávat teploty celých povrchů (termovize)
- bezpečné měření na nebezpečných nebo nesnadno dostupných objektech (součásti pod elektrickým napětím, pohyblivé součásti, vzdálené objekty).
- Není zde riziko kontaminace a nejsou zde žádné mechanické účinky na povrch měřeného objektu. Nedojde tedy např. k poškrábání lakovaných povrchů a je možno měřit i měkké povrchy. Měření v potravinářství je naprosto hygienické.
- Není zde žádné ovlivnění měřeného objektu v tom smyslu, že z něho není při měření odebírána žádná energie. [2][3][4]

#### 2.1.2. Nevýhodou pak může být

- neznalost teorie sálání a špatné nastavení okrajových podmínek měření
- je možno měřit pouze povrchovou teplotu
- nejistota měření způsobená neznalostí správné hodnoty emisivity povrchu tělesa, hodnoty propustnosti prostředí mezi čidlem a měřeným objektem
- nejistota měření způsobená nepřesnou korekcí odraženého záření z okolního prostředí na měřený objekt
- nejistota měření způsobená špatným označením (zaměřením) měřeného objektu
- optika čidla musí být chráněna před prachem a kondenzujícími kapalinami [2][3][4]

## 2.2. Princip pyrometrie

Každé těleso o teplotě větší než absolutní nula vyzařuje elektromagnetické záření (sálání), které je způsobeno mechanickým pohybem částic uvnitř tohoto tělesa. Tento pohyb představuje přemísťování náboje, tím pádem je vyzařováno elektromagnetické záření. Bezkontaktní měření teploty využívá část elektromagnetického spektra v rozmezí vlnových délek 0,4 $\mu$ m až 1mm. Tento rozsah zahrnuje oblast viditelného spektra (0,4 $\mu$ m – 0,78 $\mu$ m) a oblast infračerveného spektra (0,78 $\mu$ m – 1mm) přičemž tuto oblast nazýváme též tepelné záření. Toto záření je zachycováno senzorem, kterým je převeden na elektricky měřitelnou veličinu. Taková veličina se pak dále zpracovává. Princip je schematicky vyjádřen na obrázku 6.



Obr. 6. - Princip bezdotykového měření teploty prostřednictvím tepelného záření

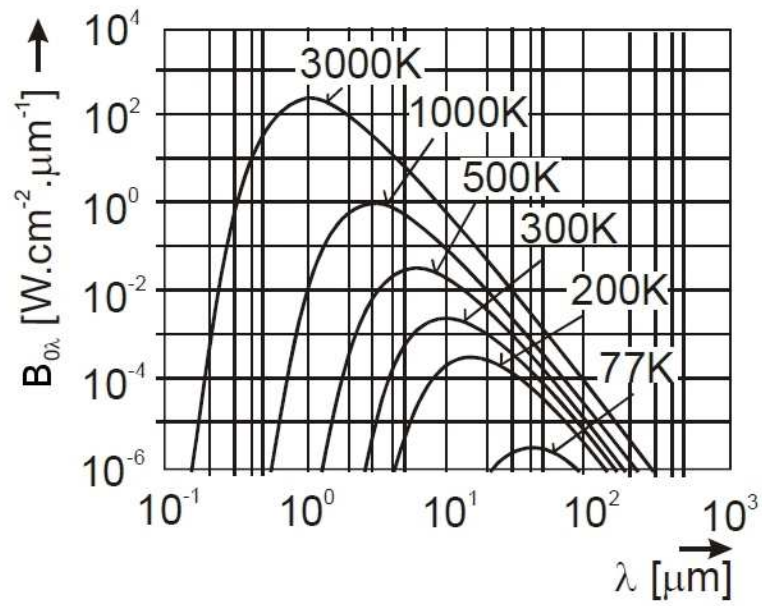
Intenzita vyzařování absolutně černého tělesa  $H_0$  je závislá jen na jeho absolutní teplotě a podle Stefan-Boltzmanova zákona platí  $H_0 = \sigma T^4$ , kde  $\sigma$  je Stefan-Boltzmanova konstanta. Absolutně černé těleso je takové těleso, které maximálně pohlcuje i vyzařuje záření. Závislost spektrální hustoty intenzity vyzařování na vlnové délce a na teplotě je dána Planckovým vyzařovacím zákonem. Na obrázku 7. je grafické znázornění Planckova zákona pro dokonale černé těleso. Plocha pod křivkou pro danou teplotu odpovídá  $H_0$ . Množství vyzářené tepelné energie je tím větší, čím je kratší vlnová délka a vyšší teplota měřeného tělesa.

Materiál, který by měl vlastnosti absolutně černého tělesa neexistuje. U obecně známých materiálů se vyzařovací schopnosti totiž mění s vlnovou délkou záření. Proto je při bezdotykovém měření teploty důležitý parametr zvaný emisivita, to protože žádný předmět nevyzařuje ideálně. Emisivita  $\epsilon$  je mírou schopnosti daného předmětu vyzařovat infračervenou energii a je to poměr celkového zářivého toku  $q$  vyzářený daným tělesem k zářivému toku  $q_0$ , které by vyzářilo absolutně černé těleso. Emisivita může nabývat hodnot od 0 (lesklé zrcadlo) do 1,0 (absolutně černé těleso).

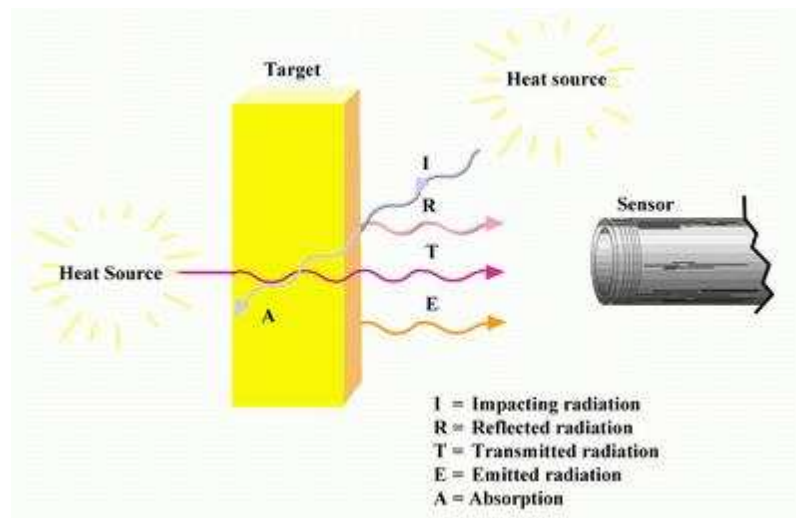
Je nutné mít na paměti, že celkové množství vyzařované energie se skládá z několika složek. Tyto složky jsou: záření  $E$  emitované měřeným tělesem, záření  $R$  pocházející z jiného zdroje, které je povrchem měřeného objektem odraženo a záření procházející měřeným objektem  $T$ . Jednotlivé složky jsou vidět na obrázku 8. Z toho tedy plyne, že nelze jednoznačně určit teplotu uvnitř objektu.

[2][3][4][5][6]





Obr. 7. - Vyzářovací charakteristika absolutně černého tělesa



Obr. 8. - Složky záření obsažené při měření teploty prostřednictvím pyrometrie

### 2.3. Pyrometry (IČ-teploměry)

Pyrometry jsou teploměry umožňující bezdotykové měření teploty povrchu těles z jejich teplotního záření. Využíváme-li pro určení teploty tělesa celého rozsahu vlnových délek, přístroj se nazývá radiační pyrometr. Využívá-li pyrometr úzkého rozsahu vlnových délek, říkáme mu spektrální pyrometr. Pokud teplotu spektrálního pyrometru určujeme ze záře zářícího tělesa, nazývá se jasový pyrometr.

Tepelné záření, vysílané měřeným objektem, se soustřeďuje optickým systémem na snímač pyrometru. Optický systém bývá sestaven z čoček nebo zrcadel. Informace ze senzoru se dále vyhodnocuje. Snímačem bývá nejčastěji **infratermočlánek**, **pyroelektrický senzor** nebo **bolometr**. Přijímač zařízení i optika musí být co nejméně závislé na vlnové délce. Volba optiky záleží na měřicím rozsahu. [6][7]

## 3. Metody snímání

### 3.1. Thermopile sensors (infratermočlánky, termočláneková baterie)

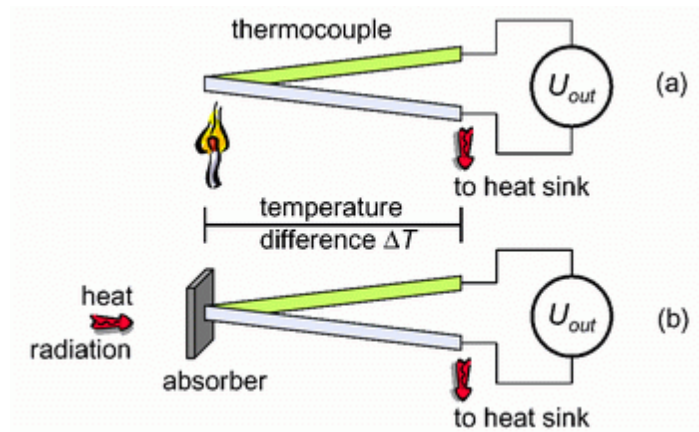
#### 3.1.1. Princip thermopile senzoru

Základním stavebním kamenem tohoto senzoru jsou termočlánky. Ty se dnes již vyrábí tenkovrstvou technologií anebo technologií na bázi křemíku, což zlepšuje jeho parametry jako je stabilita, velmi nízký teplotní koeficient v citlivosti a opakovatelnosti měření. Pro zvýšení citlivosti musí být snímač také izolován od svého okolí. Tyto detektory lze použít díky své ceně i v levných zařízeních. Senzory není nutné chladit a běžně dosahují rozlišení 1°C v širokém měřicím rozsahu a až 0.1°C v rozsahu úzkém.

Termočlánek využívá principu termoelektrického jevu (Seebeckův jev) viz obrázek 9. Je to jev, při kterém dochází k přímé přeměně tepelné energie na energii elektrickou. Termoelektrický článek se skládá ze dvou různých materiálů (vodičů nebo polovodičů), které jsou na jednom konci spojeny a na druhém konci připojeny na Volt-metr (V-metr je zde jen pro jednodušší vysvětlení a samozřejmě není součástí termočlátku). Pokud je mezi spojeným koncem a koncem, kde je připojen V-metr teplotní rozdíl, V-metr ukazuje termoelektrické napětí. Velikost tohoto napětí je závislá na rozdílu teplot ale i na vlastnostech těchto dvou materiálů.

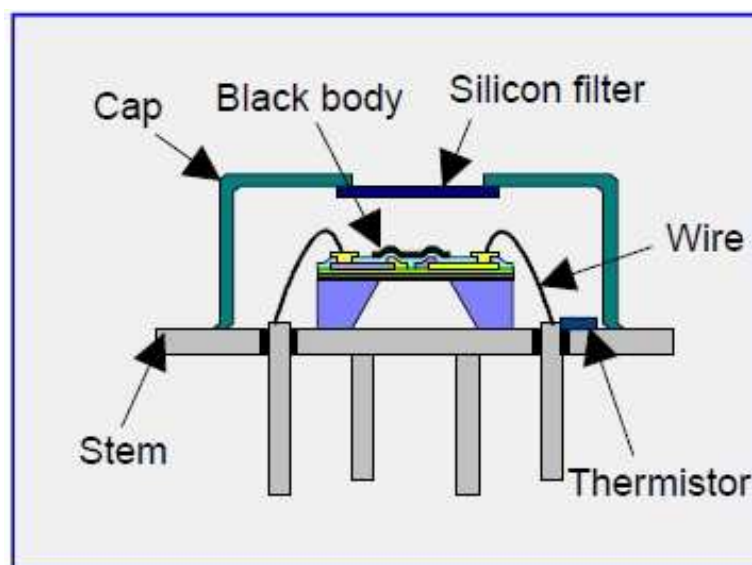
Jestliže na spoj těchto dvou materiálů upevníme materiál schopný absorbovat infračervené záření a nasměrujeme jej tak, aby na něj dopadalo záření z vyzařujícího objektu, dojde k růstu teploty absorberu i spojeného konce vodičů. Za okamžik se teplotní rozdíl mezi konci materiálů ustálí a na volt-metru je napětí odpovídající tomuto záření. Z naměřeného napětí lze určit teplotu objektu. Thermopile senzor tedy vytváří sám měřitelný signál a není tedy potřeba žádného dodatečného zdroje. Pro zvýšení termoelektrického napětí a tím citlivosti senzoru se zapojí několik článků do série. Nejčastěji používané materiály termočláneků v thermopile senzorech jsou antimon a bismut, právě díky vysokému termoelektrickému napětí oproti jiným materiálům. Další používané dvojice jsou Si (typ P)-Al, Si (typ N) - Au, Si (typ P)-Au. V současné době nám polovodičová technologie dovoluje vyrobit thermopile senzory, které mají stovky termočláneků na několika čtverečních milimetrech. Takovéto senzory jsou extrémně citlivé a díky svým malým rozměrům vykazují rychlou dobu odezvy. Zvýšením počtu termoelektrických článků na jednom čipu se ale i

zhoršuje tepelná časová odezva.



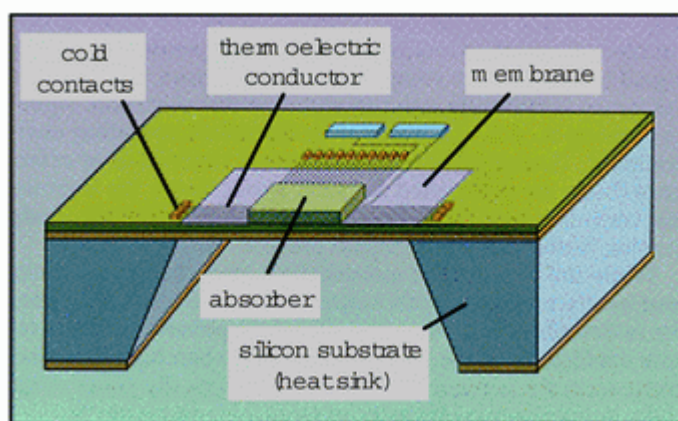
Obr. 9. - Princip termočlánku. Měření dotykově (a) a bezdotykově (b)

Standardně se thermopile senzory umísťují do pouzder typu TO. Příklad realizace thermopile senzoru je na obrázku 10. Okénko je u něj tvořeno silikonovým filtrem. Ten se vždy volí podle oblasti použití senzoru. Je zde termistor pro kompenzaci okolní teploty, dle kterého je upravován signál na výstupu snímače.



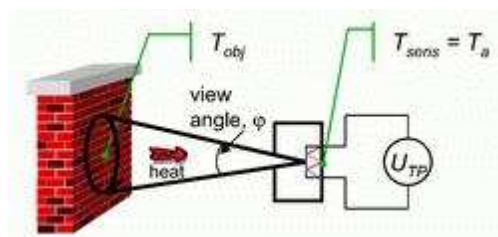
Obr. 10. - Příklad realizace pouzdra senzoru

Proces výroby samotného monolitického senzoru může být následující. Na silikonové destičce je nanášena tenká skelná vrstva (elektrický izolant). Poté jsou přidány termočlánky společně s jejich přívody. Dále je leptáním odstraněna část silikonové destičky pod membránou. Posledním krokem je nanášení absorpčního materiálu o vysokém a neměnném absorpčním koeficientu v infračervené oblasti. Termočlánky jsou vedeny od středu membrány (kde jsou pokryty absorbujícím materiálem-absorber) až na okraj podložky. Monolitické senzory se díky dobré tepelné vodivosti křemíku realizují na velmi tenké membráně (5 až 10 mikrometru), aby se zabránilo tepelnému toku mezi měřícími a srovnávacími (studenými) spoji termočlánků. Tím se zajistí teplotní rozdíl mezi konci článků. Popsaná struktura je na obrázku 11.

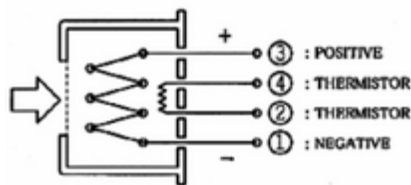


Obr. 11. - Příklad struktury části čipu thermopile senzoru

Základem je tedy několik termočlánků, které mají aktivní konce umístěné v jednom místě (terčik). Toto místo je pokryto černým, tepelné záření pohlcujícím materiálem. Záření se v něm přemění na teplo, které měří termočlánky. Záření dopadá na senzor okénkem v pouzdře přes optický filtr. Tento filtr současně určuje snímaný úhel (view angle) viz obrázek 12. Na výstupu senzoru se potom nachází napětí  $U_{TP}$  úměrné intenzitě dopadajícího záření čili na teplotě  $T_{obj}$  měřeného objektu. Na obrázku 13. je ještě blokové schéma senzoru. [2][6][8][9][10][11][12][13]



Obr. 12. - Měření teploty objektu thermopile senzorem



Obr. 13. - *Blokové schéma jednoduchého senzoru*

### 3.1.2. Výhody

- žádné mechanické součásti
  - pracují při pokojových teplotách
  - široký spektrální rozsah
  - nepotřebují vnější napájení, jednoduchá indikace výstupu- voltmetr
  - nedochází k vzájemnému ovlivňování přes napájecí zdroj
  - Seebeckův efekt je v Si 0,5 – 1 mV/K na jeden proužek
- technologie výroby je kompatibilní s bipolární nebo CMOS [2][6][8][9][10][11][12][13]

### 3.1.3. Nevýhody

- velký vnitřní odpor, limitovaný tepelný odpor senzoru (je dán tím že existuje křemíkové spojení mezi teplou a referenční částí [2][6][8][9][10][11][12][13])

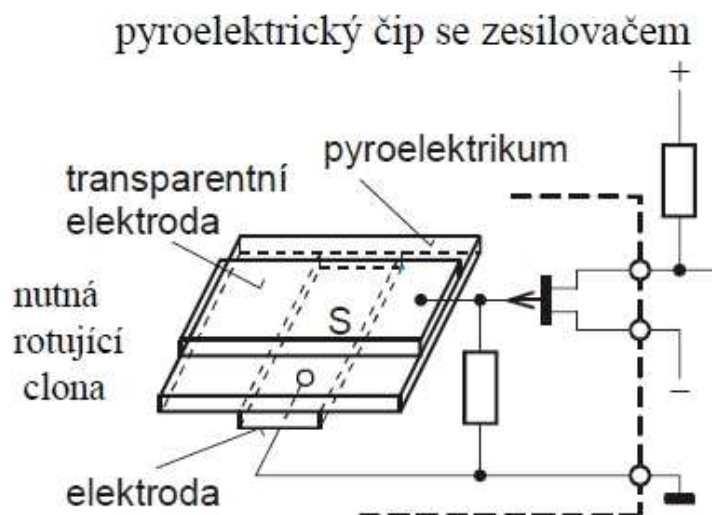
## 3.2. Pyroelektrické senzory

### 3.2.1. Úvod

Základem pyroelektrického senzoru je krystalický materiál, který když je vystaven infračervenému záření, vytváří povrchový elektrický náboj. Pokud dojde ke změně infračerveného záření, dojde i ke změně hodnoty elektrického náboje. Změna náboje se měří citlivým FET tranzistorem, který bývá vestavěn přímo ve snímači. Schéma takového senzoru je na obrázku 14. Tyto snímače reagují na široký vlnový rozsah a proto se musí dopadající záření filtrovat.

Protože je signál pyroelektrického senzoru většinou příliš slabý je nutné signál zesílit. Zesilovač je vhodné umístit co nejbližše zdroji signálu. Nejlepším řešením je tedy nanesení

pyroelektrického materiálu na křemíkovou destičku, kde může být zesilovač signálu. Toto řešení je bohužel složité a drahé proto se pyroelektrické senzory pro levnější aplikace vyrábí nanášením na levnější materiály (např. keramika). [11][14][15]



Obr. 14. – Schématické uspořádání pyroelektrického senzoru

### 3.2.2. Princip pyroelektrického senzoru

Pyroelektrické materiály reagují na změnu teploty spontánní změnou polarizace - pyroelektrický jev. Změna polarizace způsobuje změnu náboje v materiálu a změna náboje může být převedena na elektrický signál. Změna teploty se provádí tak, že tepelné záření přerušujeme otáčením dírkovaného kotouče. Kotouč tedy vytvoří z původního záření pulsy. Senzor pracuje tak, že výkyvy v ozáření senzoru odpovídají kolísání polarizace, tím vzniká střídavý proud, který může být monitorován zesilovačem.

Pyroelektrické senzory se vyrábí z různých materiálů. Některé z jednodolých krystalů ( $\text{LiTaO}_3$ ,  $\text{NaNO}_2$ , triglycerínový sulfát TGS) jiné z keramických materiálů (titaničitan a zirkoničitan olovnatý). Typický pyroelektrický snímač na keramické podložce je metodou nastřelování nanesen na čip, jež v sobě už má potřebné zesilovače a multiplexory. Tento způsob nanášení je poměrně drahý. Jsou ale i další pyroelektrické materiály, které lze nanášet jiným postupem než nastřelováním. To se týká jak jednodolých krystalů tak pyroelektrických materiálů ve formě povlaku (filmu). Vytvoření povlaku je technicky jednoduše uskutečnitelné. Zato jednodolité krystaly se nanášejí hůře na rozdíl od povlaků ale jejich odezva na infračervené záření je značně lepší.

Pyroelektrický detektor je v podstatě kondenzátor vytvořený nanášením kovových elektrod na obě strany tenké vrstvy pyroelektrického materiálu. Absorpce infračerveného záření pyroelektrickým materiálem způsobí změnu jeho teploty. Změna teploty zapříčiní změnu polarizace v pyroelektriku. Změna polarizace způsobí indukování elektrického náboje na elektrodách tohoto „kondenzátoru“ a ten způsobí tok střídavého proudu. [11][14][15]

### 3.2.3. Výhody

- Především vysoká citlivost [11][14][15]

### 3.2.4. Nevýhody

- Při aplikaci pyroelektrického senzoru pro měření teploty musí být tepelné záření cyklicky přerušováno
- Velice slabý výstupní signál ze senzoru (nutné použít přiměřený zesilovač) [11][14][15]

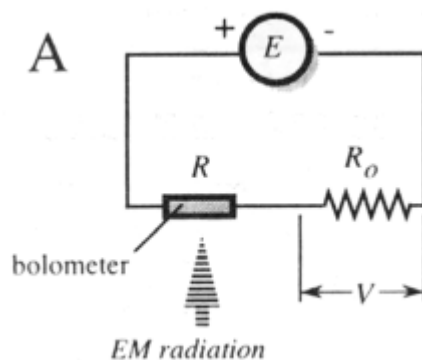
## 3.3. Bolometry a mikrobolometry

### 3.3.1. Úvod

Bolometry jsou určeny pro náročnější měření než termopile a pyroelektrické senzory. Jejich aplikace je zejména v laboratořích. Mimo laboratoře si bolometry našli uplatnění v infračerveném snímání obrazu (termovize). V tomto případě se už jedná o mikrobolometry. Mikrobolometry jsou bolometry ve formě integrovaných obvodů. Integrovaný obvod tvoří velké množství (desítky, stovky, tisíce) bolometrů uspořádaných do matice. [16]

### 3.3.2. Princip bolometru

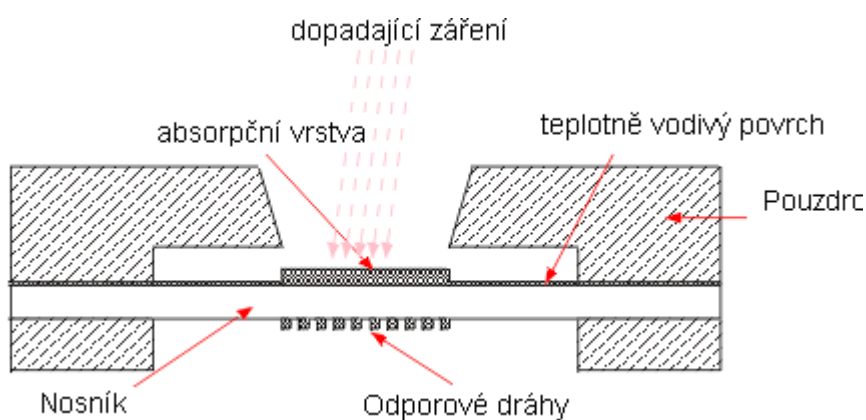
Elektrický odpor bolometru se mění v závislosti na jeho teplotě. Změna teploty je způsobena pohlcováním infračerveného záření. Množství dopadajícího záření je tedy možné určit ze změny odporu bolometru. Aby byly změny odporu závislé pouze na pohlcovaném infračerveném záření, musí být detektor tepelně izolován od okolí. Na obrázku 15. je bolometr ve funkci proměnného odporu odporového děliče.



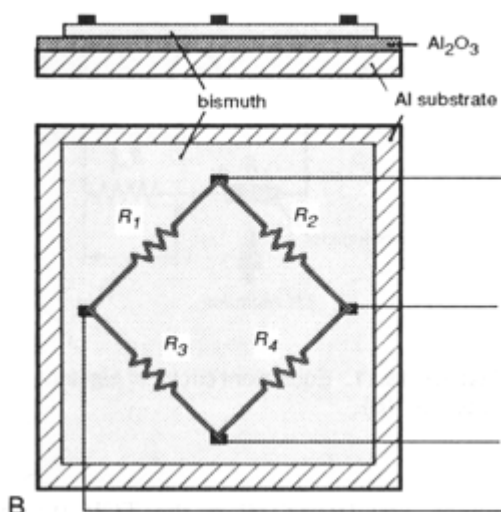
Obr. 15. - Bolometr ve funkci proměnného odporu odporového děliče

Na obrázku 16. je struktura jednoduchého bolometru. Infračervené záření dopadá na absorpční vrstvu senzoru tvořenou zlatou fólií, která pohlcuje až 95% záření. To ohřívá teplotně vodivý povrch, který předává teplo nosníku. Na spodní straně nosníku je napařený meandr odporové dráhy, jejíž odpor se mění lineárně s teplotou. Dnes se častěji využívá bolometr, jehož model je znázorněn na obr. 17. Na hliníkový substrát (desku), který je odizolována vrstvičkou oxidu hlinitého  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , se na dobře tepelně vodivou desku z bismutu napaňují odporové dráhy z oxidů  $\text{MnO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{TiO}$ ,  $\text{TiO}_2$  (tzv. termistorové bolometry) nebo chalkogenidové sklo (tzv. vrstevné bolometry). U jednoduchých bolometrů se zapojují čtyři dráhy ( $R_1$  až  $R_4$ ) do Wheatstonova můstku. Některé z nich se používají jako kompenzační nebo referenční.

Dále se používají taky germaniové a křemíkové bolometry, které se chladí na teplotu kapalného hélia. Aplikace těchto bolometrů je v oblasti kosmického měření. [16]



Obr. 16. - Struktura jednoduchého bolometru



Obr. 17. - Struktura integrovaného můstku z bolometrů



### 3.3.3. Vlastnosti bolometrů (mikrobolometrů)

- Jsou rychlé - krátká časová konstanta (až 1 ms)
- Velká citlivost
- Spektrální citlivost 1.6 až 5000  $\mu\text{m}$
- Velký pracovní teplotní rozsah senzorů (-40°C až 100 °C)
- Lze bez problémů měřit vysoký rozsah teplot měřeného objektu (i nad 1500 °C).
- Malé rozměry (u mikrobolometrů jen desítky  $\mu\text{m}$ )
- Není zde žádné ovlivnění měřeného objektu
- U mikrobolometrů velký počet snímačů ( i přes 80 tisíc) na malé ploše => infračervené snímání obrazu s rozlišením až 320x240 pixelů
- Vysoká cena
- U některých typů je nutné chlazení [16]

## 4. Klasifikace podle rozsahů a optických vlastností

### 4.1. Optické systémy a jejich význam

Za účelem dosažení vysoké přesnosti měření je záření tělesa soustředováno na detektor pyrometru optickým systémem. Ten je možné realizovat jako clonkový, čočkový, zrcadlový nebo světlovodný. Jeho účelem je také zmenšit zorný úhel pyrometru a tudíž i nezbytnou velikost snímaného povrchu tělesa. A také schopnost zaměřit správně cíl (těleso). Pro měření určitého rozsahu teplot je nutné mít před samotným senzorem různé optické filtry. Jimi jsou pak propouštěny jen vlnové délky odpovídající potřebnému rozsahu měření teplot. [7] [17] [18]

### 4.2. Zorný úhel

Zorný úhel je pro posouzení pyrometru důležitou veličinou. Tento úhel se výrobci udává indexem zaostření pyrometru definovaným jako poměr průměru  $D$  snímané plochy na měřeném objektu ke vzdálenosti  $L$  měřeného objektu od objektivu pyrometru. V současné době se nabízejí infračervené pyrometry s indexem zaostření od 1 : 2 až cca 1 : 300. Čím menší je index zaostření, tím je optický systém pyrometru složitější a nákladnější. Volba velikosti indexu zaostření  $D : L$  závisí na velikosti měřeného objektu a na vzdálenosti pyrometru od objektu. Podstatné je, aby měřené těleso vyplňovalo pokud možno celé zorné pole pyrometru. Jinak v případě, že je měřený objekt menší než zorné pole je údaj pyrometru ovlivněn teplotou pozadí objektu. Pro zajištění správné funkce IR pyrometru se doporučuje, aby plocha měřeného tělesa přesahovala velikost zorného pole pyrometru nejméně o 30 až 50 %. U malých těles, které jsou jen o trochu větší než zorné pole, může špatné zaostření zapříčinit značné chyby v měření.

Infračervené pyrometry se dělají s objektivy mající pevnou (fixfokus) i proměnnou ohniskovou vzdálenost. V ohnisku optického systému je plocha, ze které se snímá teplota tělesa nejmenší. Teplotu lze samozřejmě měřit i ve vzdálenostech menších nebo větších, než je ohnisková vzdálenost, ale průměr snímané stopy bude vždy větší než v ohnisku. Přístroje s nastavitelnou ohniskovou vzdáleností umožňují umístit ohnisko na objekt nebo alespoň do jeho optimální vzdálenosti. [17]

### 4.3. Zaměřovací optika

Zaměřovací optika většiny nabízených přístrojů umožňuje uživateli zaměřit hledáčkem požadovanou oblast měřeného objektu. Některé pyrometry mají vestavěný laserový zaměřovač, který usnadňuje zaměření tím, že na měřeném objektu vyznačí kruhovou stopou snímanou plochu, což je hlavně výhodné u objektů s tmavým povrchem. Důležité je mít na zřeteli, že infračervené měření teploty je založeno na optickém měření, a proto mají optické vlastnosti pyrometru velký a často podceňovaný vliv na výsledky měření. Použitá optika musí být kvalitní, antireflexní a měla by být správně korigována pro celý spektrální rozsah pyrometru. Protože co je platný uživateli pyrometr, který má specifikovanou nejistotu měření menší než 1 %, jestliže použitím špatně korigovaných čoček jeho optického systému vznikne mnohanásobně větší chyba? [17]

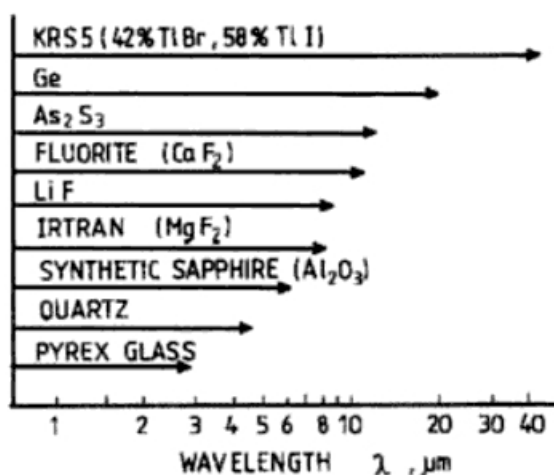
### 4.4. Požadavky na prvky optického systému

Čočky ale i jiné prvky optického systému by měli mít tyto vlastnosti:

- široký rozsah přenášené vlnové délky
- vysokou mechanickou odolnost
- schopnost pracovat ve velkém rozsahu teplot
- odolnost proti atmosférickým a chemickým vlivům, poškrábání a rychlým teplotním změnám [19]

### 4.5. Požívané materiály

Používané materiály čoček a okýnek pyrometrů jsou varné sklo (pyrex glass), křemen (quartz), umělý safír (synthetic sapphire), silikon a další. Některé používané materiály jsou na obrázku 18., kde je znázorněn jejich vlnový rozsah. Každý z těchto materiálů má vlastnosti. Například varné sklo je vysoce odolné vůči mechanickým a chemickým vlivům. Křemen oproti němu vyniká schopností snášet vyšší teplotní změny a také snášet rychlé teplotní změny. Umělý safír je tvrdý a je tedy odolný proti poškrábání, na druhou stranu je křehký a nesnese rychlé teplotní změny. [19]



Obr. 18. - Požívané materiály a jejich vlnové rozsahy

## 5. Popis elektroniky pro vyhodnocování signálu senzorů

Výstupní signál senzoru kolísá se změnou teploty okolí (teploty pouzdra). Tento jev je nutno kompenzovat. Kompenzace teploty okolí může být implementovaná na Si substrátu společně se senzorem uvnitř pouzdra nebo je ji nutno provést vně.

### 5.1. Analogové řešení

Na obr. 19. je příklad schéma obvodu analogové kompenzace, kde je také snímek skutečného provedení modulu. Výstup senzoru dán vztahem (1). Protože signál z thermopile senzoru je v řádech milivoltů je potřeba jej zesílit. Použitý operační zesilovač musí mít velmi nízký šum i offset. Signál z thermopile je zesílen  $A$ -krát a toven vztahu (2). Teplota senzoru je měřena termistorem umístěným v pouzdře. Tento termistor je nelineárně závislý na teplotě a jeho charakteristika je aproximována v pracovním rozsahu senzoru. Protékající proud termistorem vytváří na jeho přívodech napětí (3), které je úměrné jeho odporu. Toto napětí je násobeno zesílením  $A_{th}$  a dále je v operačním zesilovači Comp (kompenzační fáze) odečteno od napětí thermopile senzoru (také již zesíleného). Aby tato kompenzace pracovala správně musí být splněna podmínka (4). To se zajistí nastavením zesílení  $A$ .

Popis parametrů:

$S$ ...cistlivost thermopile senzoru

$\varepsilon$ ...emisivita

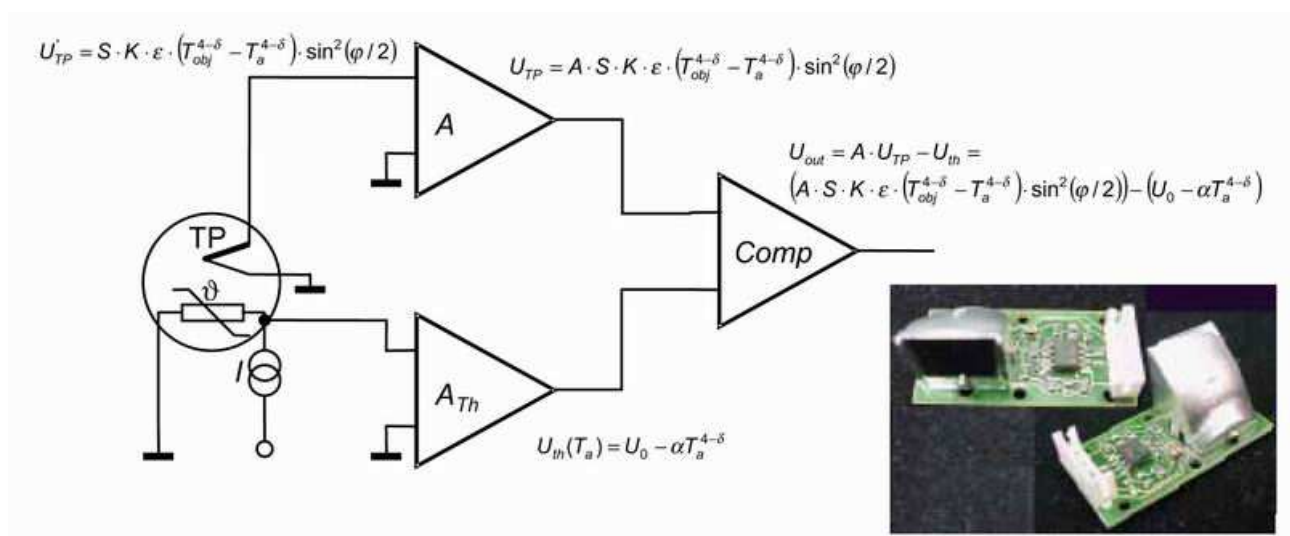
$K \cdot \sin(\varphi/2)$ ...zahrnuje  $\sigma$  (Stefan-Boltzmanova konstanta) a zorný úhel senzoru

$$U_{out} = AU_{TP} - U_{th} \quad (1)$$

$$U_{TP} = ASK\varepsilon(T_{obj}^{4-\delta} - T_a^{4-\delta}) \sin^2(\varphi/2) \quad (2)$$

$$U_{th}(T_a) = U_0 - \alpha T_a^{4-\delta} \quad (3)$$

$$\alpha - ASK\varepsilon \sin^2(\varphi/2) = 0 \quad (4)$$



Obr. 19. - Analogová kompenzace vlivu okolní teploty

V pyrometrech s vyšší přesností se používá číslicová kompenzace vlivu okolní teploty. [20]

## 5.2. Číslicové řešení

Z důvodu vyšší přesnosti měření je napětí  $U_{TP}$  (2) a napětí  $U_{th}$  (3) zpracováno zvlášť. Signály jsou v AD převodníku převedeny do digitální formy. Poté jsou jejich hodnoty přeneseny do mikrokontroleru kde se provedou potřebné výpočty. Vypočítaná teplota (napětí) se potom buď zobrazuje v digitální podobě nebo je převedena na analogovou (již linearizována). Principiální zapojení je na obr. 20. Pro funkci této kompenzace není přímo nezbytné znát funkce  $U_{TP}(T_{obj})$  a  $U_{TP}(T_a)$ . Je pouze nutné znát chování funkce (povahu). Závislost tepelné rovnováhy je pak následující.

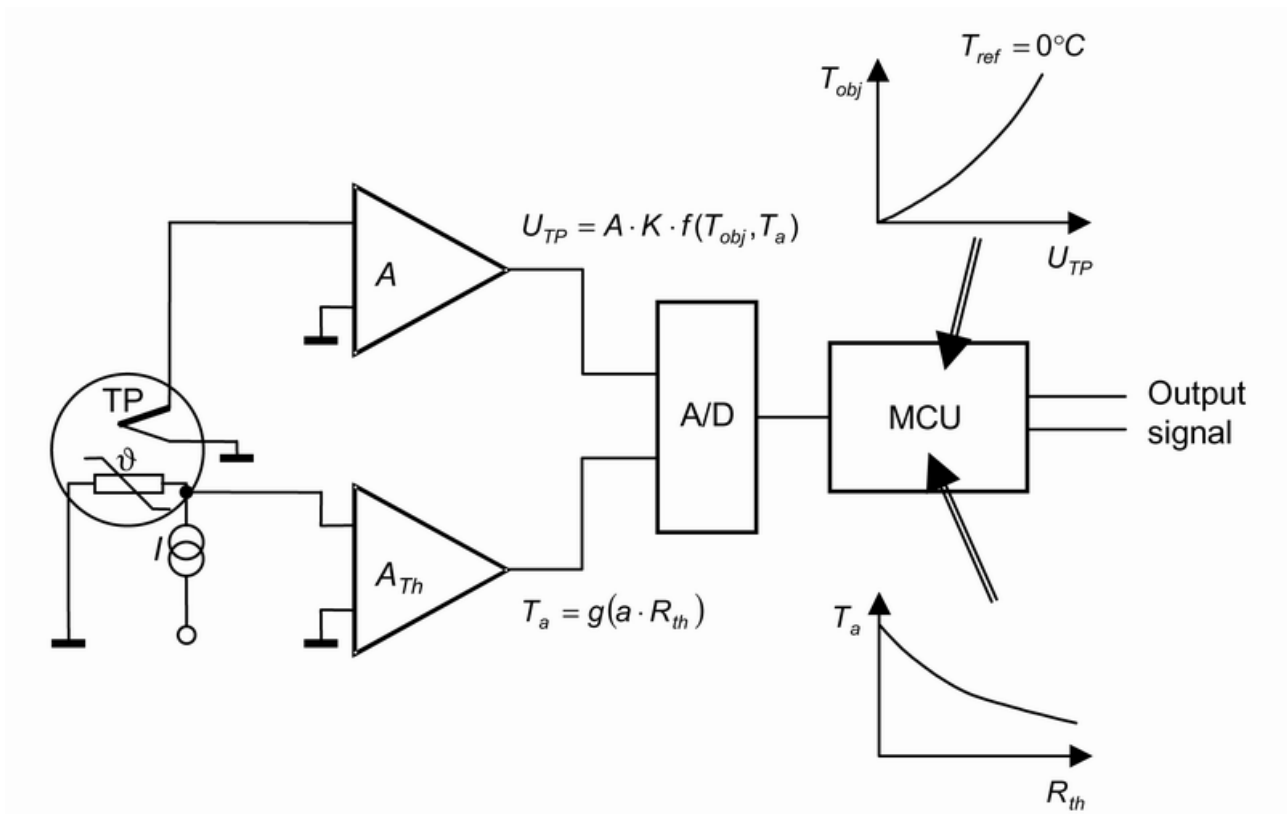
$$U_{TP} = Kf(T_{obj}, T_a) \quad (5)$$

Funkci  $f$  není tedy potřeba znát v explicitním tvaru. Důležité je znát rozšíření rovnice tepelné rovnováhy (6).

$$U_{TP} = Kf(T_{obj}, T_{ref}) - Kf(T_a, T_{ref}) \quad (6)$$

$T_{ref}$ ...svévolně zvolená neměnná teplota, např.  $0^\circ\text{C}$ .

Nyní můžeme pracovat s funkcí  $f(T, T_{ref})$ . Pro měření je tato funkce použita 2-krát. Jednou je za  $T$  dosazeno  $T_a$  a podruhé  $T_{obj}$ . [20]



Obr. 20. - Číslicová kompenzace vlivu okolní teploty

## 6. Aplikace senzorů pro oblast bezpečnostních systémů a pro systémy automatizace a informatiky

### 6.1. Seznam použití termopile senzorů ve zmíněných oblastech

- Bezdotykové měření teploty
- Moduly teplotních senzorů v mikrovlnných troubách, sporácích, klimatizacích, toustovačích, fénech na vlasy apod.
- Detekce ohně a plamenů
- Detekce výbuchu
- Ruční a průmyslové pyrometry
- Spektrometrie
- Monitorování teploty procesů
- Radiometers
- Analýza plynů v průmyslu a lékařství
- Měření teploty pohyblivých předmětů a další [2]

## **6.2. Seznam použití pyroelektrických senzorů ve zmíněných oblastech**

- Detekce požáru
- Analýza plynů pro průmyslové a lékařské použití
- Detekce výbuchu
- Bezdotykové měření teploty
- Spektrometry
- Radiometry
- Zabezpečovací systémy – detektory pohybu PIR (pasivní infračervené senzory)  
a další [14]

## **6.3. Seznam použití bolometrů (mikrobolometrů) ve zmíněných oblastech**

- Detekce ohně a plamenů
- Detekce výbuchu
- Monitorování tepelného zatížení součástek, objektů – termovce
- Bezdotykové měření teploty
- Spektrometrie
- Monitorování teploty procesů
- Měření teploty pohyblivých předmětů
- Astronomie
- Infračervené kamery a dalekohledy
- Zabezpečovací technika [20]

## **II. TEORETICKÁ ČÁST**

## 7. Návrh a realizace experimentální sestavy se senzorem a vyhodnocováním

Experimentální sestava se skládá ze zdroje záření a senzoru. Dále je zde podložka a objímky pro uchycení černého tělesa a senzoru.

### 7.1. Zdroj infračerveného záření

Jako zdroj infračerveného záření bylo použito černé těleso od výrobce Helioworks s modelovým označením EK-8522. Jedná se o vysílač středního infračerveného spektra, který pracuje až s 950 stupni C. Okýnko zářiče je vyrobeno z  $\text{CaF}_2$  a propouští záření do vlnové délky 9  $\mu\text{m}$ . Podrobnosti tohoto zdroje záření jsou v Příloze 1.

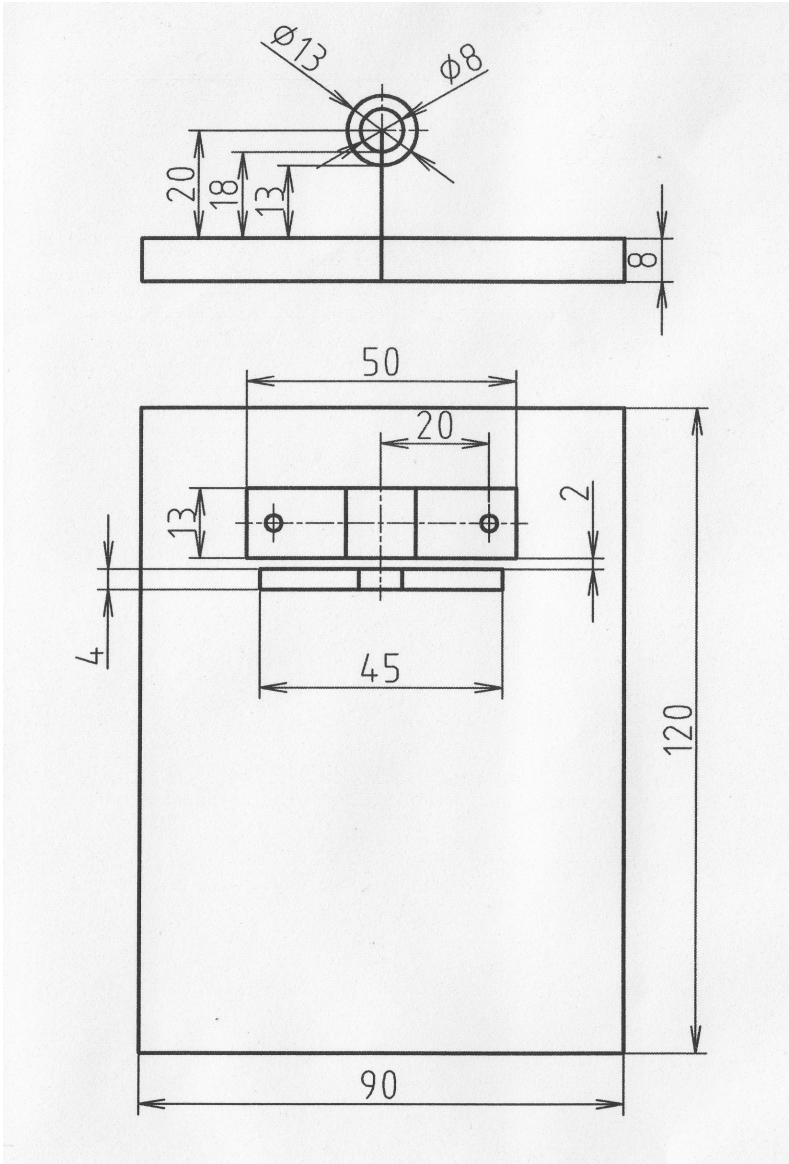
### 7.2. Senzor

Senzor záření byl použit A2TPMI 334 OAA300 od firmy PerkinElmer. Tento termopile senzor má v sobě již integrovaný obvod pro zpracování signálu. Zorný úhel senzoru je 60 stupňů. Senzor je odolný proti intenzivnímu přímému slunečnímu nebo halogenovému světlu, které dopadá na něj nebo na měřený objekt.

### 7.3. Podložka a objímky

Podložka (deska) je vyrobená z překližky. Na této podložce jsou pomocí vrtů uchyceny plechové objímky. Tyto objímky jsou vyrobeny z tenkého plechu a slouží pro stabilní uchycení černého tělesa a senzoru. Měření je potřeba provést pro různé vzdálenosti mezi černým tělesem a zářičem a proto je jedna objímka odnímatelná. Konkrétně je to objímka senzoru. Změna polohy se provede povelím šroubů a posunutím objímky. Na obrázku 21. je výkres podložky s objímkami.





Obr. 21. - Výkres soustavy

## 8. Ověření senzoru na experimentální sestavě a vyhodnocení ověření

### 8.1. Úkol měření

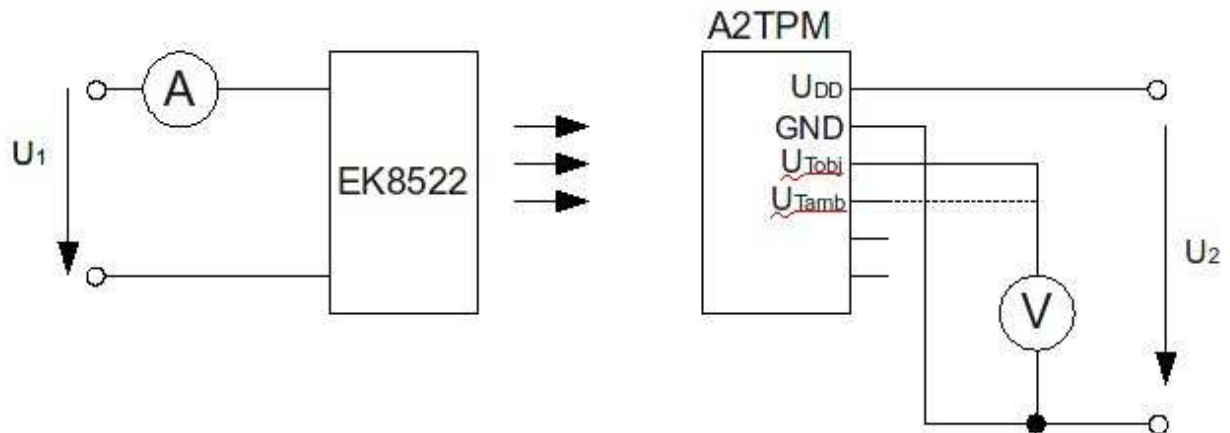
Cílem tohoto měření je bezdotykově změřit povrchovou teplotu objektu, kdy jako zdroj záření je použit stálý zdroj infračerveného záření. Přičemž toto měření provést pro různý výkon vyzařovaný tělesem (různou teplotu tělesa) a v různých vzdálenostech od zářiče. Takto získané data vyhodnotit.

### 8.2. Seznam použitých zařízení

- 2 laboratorní zdroje
- V-metr
- senzor A2TPMI 334 OAA300
- zářič EK-8522
- objímky s podložkou
- kabeláž

### 8.3. Schéma zapojení a jeho popis

Na obr. 22. je schéma zapojení. Zářičem EK8522 je vyzařováno ir-záření a jeho část je zachycena senzorem A2TPM. Intenzita senzorem snímaného záření odpovídá naměřenému napětí na výstupu  $U_{Tobj}$ . Teplota okolí se měří stejným V-metrem jako  $U_{Tobj}$  a to na výstupu  $U_{Tamb}$ , s tím že se vždy provede manuální odpojení od jednoho vývodu a připojení ke druhému. Napětí  $U_1$  slouží k napájení zářiče (EK-8522), napájecí napětí  $U_2$  senzoru (A2TPM) je přivedeno na vývod  $U_{DD}$ .



Obr. 22. - Schéma zapojení

### 8.3.1. Popis zapojených vývodů senzoru:

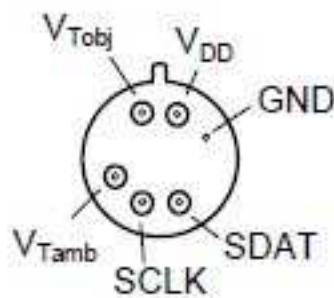
Na obr. 23. jsou označeny jednotlivé vývody.

$U_{DD}$  – napájecí napětí

$V_{Tobj}$  – výstup teploty objektu

$V_{Tamb}$  – výstup teploty okolí

GND – zem



Obr. 23. - Popis vývodů senzoru A2TPM ze strany vývodů

## 8.4. Postup měření

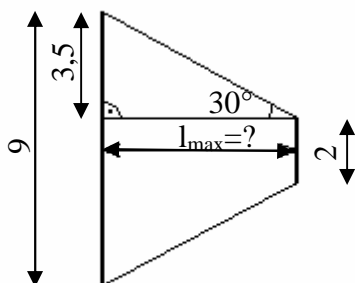
Zapojíme obvod podle schématu na obr. 22. Napájecí napětí senzoru je zvoleno z výrobcem povoleného rozsahu tj.  $U_{DD} = 5V$ . Na začátku a na konci každého měření teploty objektu je změřena teplota okolí senzoru (napětí  $U_{Tamb}$ ). Napětí  $U_1$  je voleno v závislosti na tekoucím proudu zářičem a to v rozsahu 0,1A – 0,8A po kroku 0,1A. V každém kroku je odečteno napětí  $U_{Tobj}$  a to 10-krát protože měření je náhodný proces. Z hodnot se poté vytvoří průměr. Měření je z důvodu minimalizace chyby provedeno první zvyšováním proudu zářičem a poté jeho snižováním. Čili od 0,1A do 0,8A a poté od 0,8A do 0,1A. Tento postup provedeme pro 3 vzdálenosti od měřeného tělesa (zářiče). Vzdálenost  $l_1 = 1,5mm$ , kdy se senzor a zářič prakticky dotýkají. Další polohy senzoru jsou ve vzdálenostech před a za vzdáleností maximální  $l_{max}$ .  $l_{max}$  je nutno vypočítat před měřením ze zorného úhlu senzoru a průměru okýnka zářiče.

## 8.5. Výpočty

### 8.5.1. Určení maximální vzdálenosti $l_{max}$

S rostoucí vzdáleností senzoru od měřeného tělesa roste i obsah snímaného povrchu. Výpočet maximální vzdálenosti mezi senzorem a zářičem, kdy senzor snímá celý aktivní povrch zářiče (ne menší ani ne větší, ve které my snímá i pozadí zářiče) je následující.

Zorný úhel senzoru je  $\pm 30^\circ$ . Průměr vyzařujícího povrchu zářiče je 9mm. Průměr snímací plochy senzoru je 2mm. Z těchto hodnot byla vypočítána maximální vzdálenost  $l_{max}$  dle obr. 24.



Obr. 24. - Nákres výpočtu  $l_{max}$

Plocha se rozdělí na 2 poloviny, vznikne pravoúhlý lichoběžník, který rozdělíme dále na obdélník a trojúhelník. Obdélník o výšce 1mm a trojúhelník o výšce 3,5mm. Z pravoúhlého trojúhelníku, ve kterém známe jednu stranu a úhel dopočítáme odvěsnu  $l_{max}$ .

$$\tan 30^\circ = 3,5 / l$$

$$l = 3,5 / \tan 30^\circ = 6,06mm$$

Podle vypočtené  $l_{max}$  volíme  $l_2 = 3,5mm$  kdy senzor snímá jen část zářícího povrchu a  $l_3 = 9mm$ , kdy senzor snímá nejenom povrch měřeného tělesa ale i jeho pozadí.

### 8.5.2. Výpočet poměru plochy snímané energie a plochy vyzařované energie

Bylo nutné vypočítat poměr energie dopadající na senzor vůči celkové energii vyzařené zářičem. Tento poměr se rovná poměru plochy  $S_v$  snímaného záření (zorného pole snímače) pro danou vzdálenost  $l$  vůči ploše  $S_c$  vyzařené energie zářičem opět pro danou délku  $l$ . Na obr. 25., 27. a 28. jsou tyto plochy pro různé vzdálenosti graficky znázorněny. Na levé straně je okýnky zářiče (9mm) a na pravé straně okýnky senzoru (2mm). Z vyzařovací charakteristiky zářiče (viz příloha 1.) byl určen úhel, ve které je intenzita záření rovna 50-ti procentům maxima čili cca  $\pm 20^\circ$ . Z poměru snímané plochy a celkové plochy se následně vypočítal výkon záření dopadajícího na senzor (snímaného záření). Výpočty byly provedeny pomocí nákresu na obr. 26.

Popis parametrů:

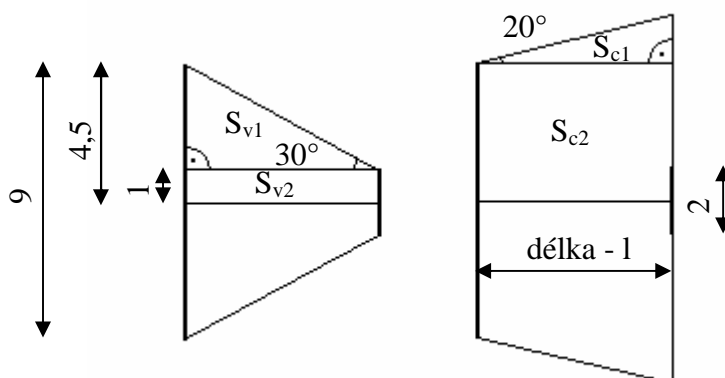
$S_v$  – obsah plochy snímané senzorem

$S_c$  – obsah celkové plochy

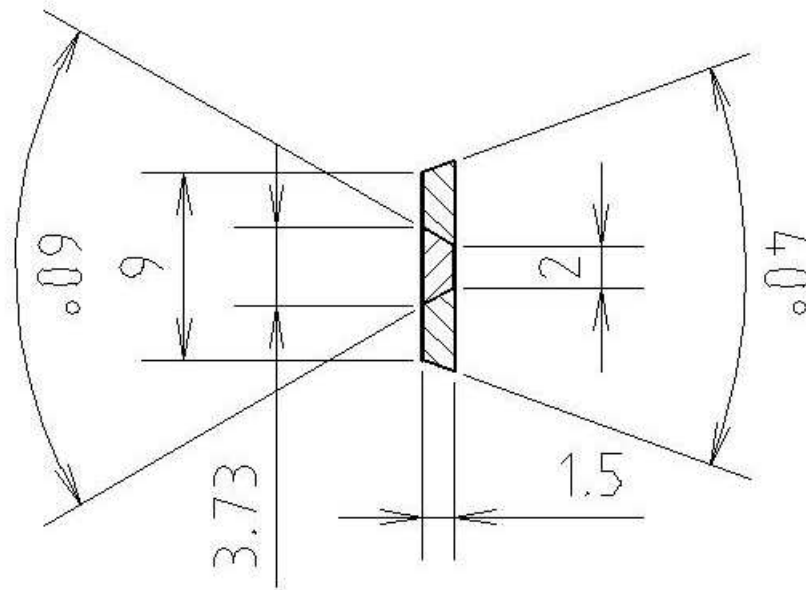
$$S_v = (S_{v1} + S_{v2}) * 2 \quad (7)$$

$$S_c = (S_{c1} + S_{c2}) * 2 \quad (8)$$

$$a = S_v / S_c \quad (9)$$



Obr. 25. - Pomocný nákres k výpočtům

8.5.2.1. Vzdálenost  $l = 1,5\text{mm}$ 

Obr. 26. - Vyobrazení snímací plochy a vyzařovací plochy pro vzdálenost 1,5mm

$$S_v = (S_{v1} + S_{v2}) * 2$$

$$S_{v1} = (1,5 * (1,5 * \tan 30^\circ) / 2) = (1,5 * 0,866) / 2 = 0,6495 \text{mm}^2 \quad S_{v2} = 1 * 1,5 = 1,5 \text{mm}^2$$

$$S_v = (S_{v1} + S_{v2}) * 2 = (0,6495 + 1,5) * 2 = 4,299 \text{mm}^2$$

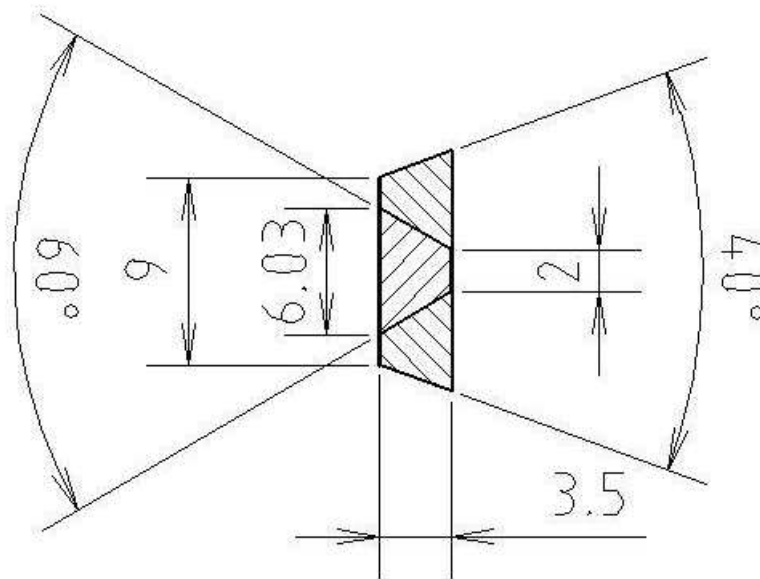
$$S_c = (S_{c1} + S_{c2}) * 2$$

$$S_{c1} = (1,5 * (1,5 * \tan 20^\circ) / 2) = 0,409 \text{mm}^2$$

$$S_{c2} = 1,5 * 4,5 = 6,75 \text{mm}^2$$

$$S_c = (0,409 + 6,75) * 2 = 14,318 \text{mm}^2$$

$$a = S_v / S_c = 4,299 / 14,318 = 0,3003$$

8.5.2.2. Vzdálenost  $l = 3,5\text{mm}$ 

Obr. 27. - Vyobrazení snímáčí plochy a vyzařovací plochy pro vzdálenost 3,5mm

$$S_v = (S_{v1} + S_{v2}) * 2$$

$$S_{v1} = (3,5 * (3,5 * \tan 30^\circ) / 2) = (3,5 * 2,02) / 2 = 3,536 \text{mm}^2 \quad S_{v2} = 3,5 * 1 = 3,5 \text{mm}^2$$

$$S_v = (S_{v1} + S_{v2}) * 2 = (3,536 + 3,5) * 2 = 14,072 \text{mm}^2$$

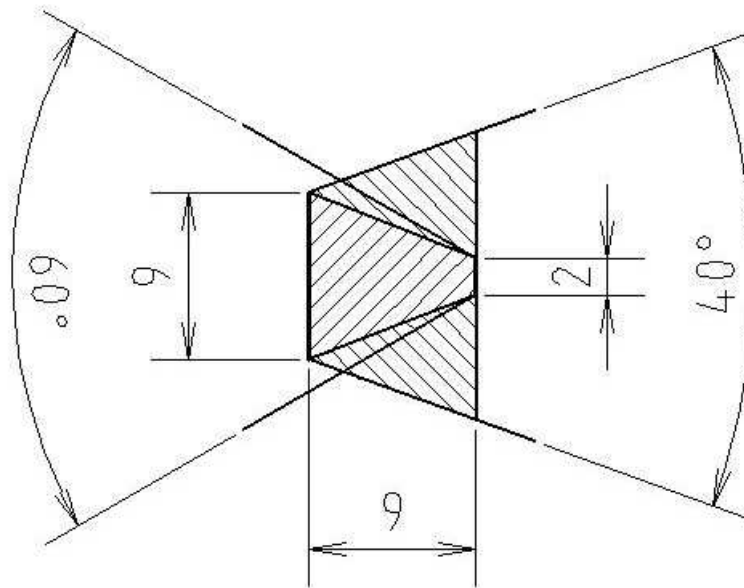
$$S_c = (S_{c1} + S_{c2}) * 2$$

$$S_{c1} = (3,5 * (3,5 * \tan 20^\circ)) / 2 = 2,229 \text{mm}^2$$

$$S_{c2} = 3,5 * 4,5 = 15,75 \text{mm}^2$$

$$S_c = (2,229 + 15,75) * 2 = 35,96 \text{mm}^2$$

$$a = S_v / S_c = 2,229 / 35,96 = 0,3908$$

8.5.2.3. Vzdálenost  $l = 9\text{mm}$ 

Obr. 28. - Vyobrazení snímací plochy a vyzářovací plochy pro vzdálenost 9mm

$$S_v = (S_{v1} + S_{v2}) * 2$$

$$S_{v1} = (3,5 * 9) / 2 = 15,75 \text{mm}^2$$

$$S_{v2} = 1 * 9 = 9 \text{mm}^2$$

$$S_v = (S_{v1} + S_{v2}) * 2 = (15,75 + 9) * 2 = 49,5 \text{mm}^2$$

$$S_c = (S_{c1} + S_{c2}) * 2$$

$$S_{c1} = (9 * (9 * \tan 20^\circ)) / 2 = 14,76 \text{mm}^2$$

$$S_{c2} = 9 * 4,5 = 40,5 \text{mm}^2$$

$$S_c = (14,76 + 40,5) * 2 = 110,5 \text{mm}^2$$

$$a = S_v / S_c = 49,5 / 110,5 = 0,448$$

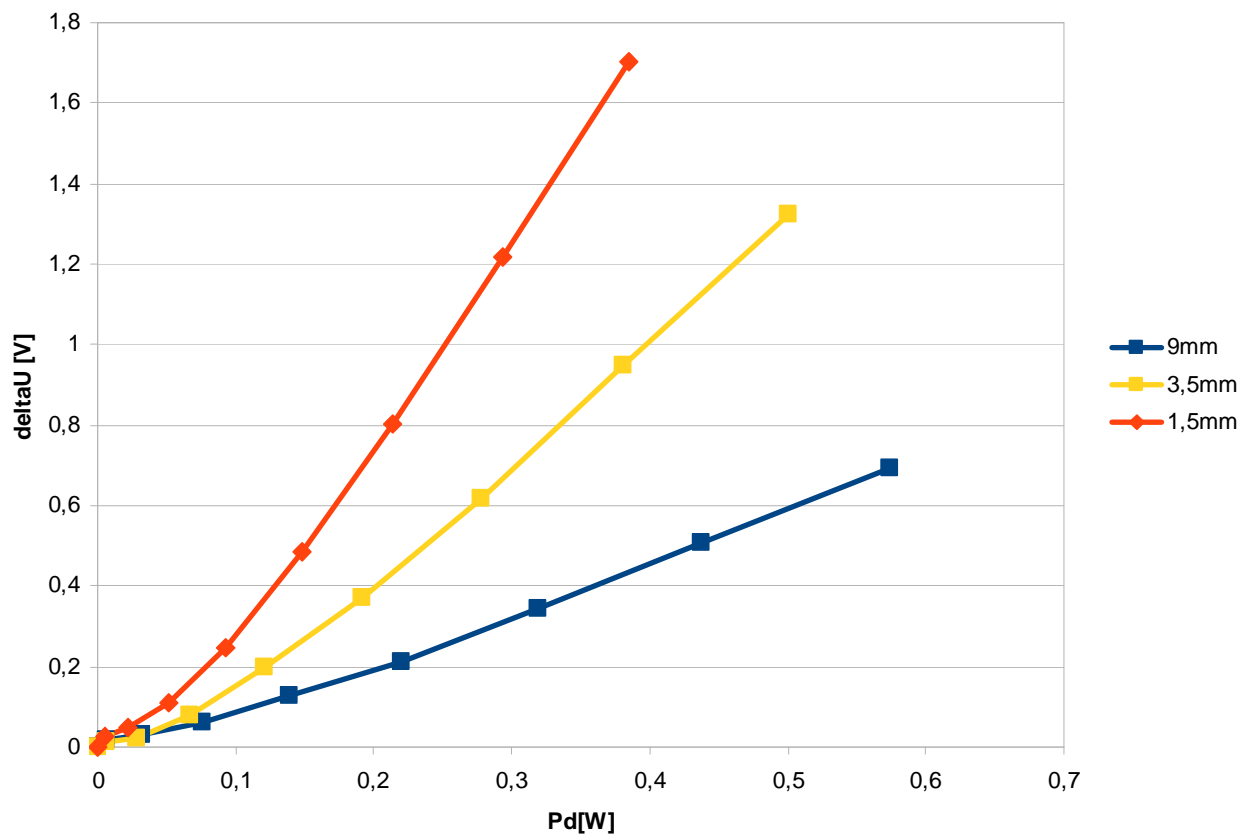


## 8.6. Vyhodnocení měření

Naměřená data byla přepsána do programu Excel a zpracována. Byly vytvořeny průměry naměřených hodnot a po úpravách a výpočtech viz. výše vyjádřeny závislosti na obr. 29. dle vztahu (10).

$$\begin{aligned}\Delta(U_{Tobj} - U_{Tamb}) &= P \cdot a \\ \Delta U &= P \cdot a = P_d\end{aligned}\quad (10)$$

Pd...část záření z použitého zdroje IR-záření dopadající na senzor



Obr. 29. - Závislost napětí  $\Delta U$  na výkonu dopadajícího záření

## Závěr

Na navržené soustavě bylo provedeno ověření senzoru A2TPMI 334 OAA300. Byla tedy bezdotykově měřena teplota povrchu tělesa. Jako měřené těleso byl použit stálý zdroj infračerveného záření EK-8522.

Při měření byla získávána teplota zdroje záření neboli výkon vyzařované energie. Změna teploty se prováděla změnou proudu procházejícího zářičem. Část vyzářené energie zachytil senzor a na jeho výstupu se generovalo napětí úměrné dopadajícímu záření. Toto měření jsem provedl 3-krát a to vždy pro jinou vzdálenost od zdroje záření.

První bylo měřeno v co nejmenší vzdálenosti (1,5mm), pak při vzdálenosti 3,5mm a nakonec ve vzdálenosti 9mm. Přičemž v největší vzdálenosti byl překročen limit maximální možné vzdálenosti mezi senzorem a zářičem, který byl vypočten 6,1mm. V tomto případě byla snímaná plocha větší než vyzařovací povrch zdroje záření a tudíž bylo snímáno i záření těles v pozadí zářiče. To způsobilo značnou chybu. Výsledná teplota byla tedy nižší.

Ve vzdálenosti 3,5mm od zářiče by se za ideálních podmínek měly naměřené teploty shodovat s hodnotami ze vzdálenosti 1,5mm. Což se ale nestalo. Senzor ukazoval ve vzdálenosti 1,5mm teploty vyšší než v  $l = 3,5\text{mm}$ . To je možné vysvětlit tím, že se některé paprsky infračerveného záření při nejmenší měřené vzdálenosti odrazily zpět na zářič zatímco u vzdálenějšího měření se část paprsků odrazila od senzoru do okolního prostředí.

Senzor při měření patřičně reagoval na změny teploty snímaného zářiče. Potvrdil se teoretický předpoklad, že měření teploty povrchu o určitém průměru je možné jen do omezené vzdálenosti. Při překročení této vzdálenosti není už jen snímáno záření měřeného povrchu ale i záření objektů nacházejících se v jeho pozadí.

Dále chci zmínit, že naměřené napětí na senzoru (úměrné teplotě měřeného objektu) nebylo možné přepočítat na teplotu objektu a to z toho důvodu, že k senzoru nebyl dodán žádný manuál a z „datasheetů“ na stránkách výrobce se nepovedlo tuto informaci zjistit.

Pro další měření bych navrhoval ověřit snímací možnosti senzoru na jiném zdroji záření a získané hodnoty porovnat.

## Závěr v angličtině

The sensor A2TPMI 334 OAA300 was verified on designed system. As a measured object was used steady state IR radiation source.

The temperature of measured object was gained with different emitted power and for different distance between measured object and sensor. Distance was 1,5mm, 3,5mm and 9mm.

When the distance was 9mm the measurement was fault. Because sensing area was bigger than measured area.

When the distance was 1,5mm and 3,5mm the measured temperature should be same. But it was not. Explanation of this could be that the infrared rays in distance 1,5mm were reflected back to radiation source. When distance was 3,5mm infrared rays were reflected to ambient environment.

Values of temperature was not able to calculate through output voltage because it was not delivered manual with this informations by supplier.

For other research I sugges use another infrared radiation source and compare results.

## Seznam použité literatury

- [1] Katalog senzorů PerkinElmer [online]. [cit. 2009-5-10]. Dostupný z WWW: <[http://optoelectronics.perkinelmer.com/content/RelatedLinks/Brochures/BRO\\_sensorsbrochure.pdf](http://optoelectronics.perkinelmer.com/content/RelatedLinks/Brochures/BRO_sensorsbrochure.pdf)>.
- [2] VOJÁČEK, Antonín. Thermopile sensors = radiační pyrometry [online]. 2005 - [cit. 2009-3-4]. Dostupný z WWW: <<http://automatizace.hw.cz/mereni-a-regulace/ART189-thermopile-sensors--radiacni-pyrometry.html>>.
- [3] VAVŘIČKA, Roman. Bezdotykové měření teploty [online]. [cit. 2009-4-20]. Dostupný z WWW: <<http://utp.fs.cvut.cz/vz/clanky/104.pdf>>.
- [4] Bezkontaktní měření teploty. Základy pyrometrie [online]. [cit. 2009-4-20]. Dostupný z WWW: <[http://measure.feld.cvut.cz/groups/edu/sz/pdfs/prednasky/09\\_teplota\\_bezkontaktni.pdf](http://measure.feld.cvut.cz/groups/edu/sz/pdfs/prednasky/09_teplota_bezkontaktni.pdf)>.
- [5] KADLEC, K. Bezdotykové teploměry [online]. [cit. 2009-20-4]. Dostupný z WWW: <[http://web.vscht.cz/kadleck/aktual/mrt\\_fpbt/laboratore/Bezdotykov\\_e teplomery.pdf](http://web.vscht.cz/kadleck/aktual/mrt_fpbt/laboratore/Bezdotykov_e teplomery.pdf)>.
- [6] HUŠEK, M. Princip bezdotykového měření teploty [online]. [cit. 2009-4-21]. Dostupný z WWW: <[http://www.qtest.cz/bezdotykov\\_e teplomery/bezdotykov\\_e mereni-teploty.htm](http://www.qtest.cz/bezdotykov_e teplomery/bezdotykov_e mereni-teploty.htm)>.
- [7] Pyrometry [online]. [cit. 2009-25-4]. Dostupný z WWW: <<http://www.technotrend.cz/stranky/teorie/teorie3.htm>>.
- [8] GE Thermometrics Technologies. Thermopile, Application Note [online]. [cit. 2009-4-25]. Dostupný z WWW: <<http://www.thermometrics.com/assets/images/thermopile.pdf>>.
- [9] SHILZ, J. PerkinElmer Optoelectronics GmbH. Thermoelectric infrared sensors (thermopiles) for remote temperature measurements; pyrometry [online]. [cit. 2009-4-25]. Dostupný z WWW: <[http://optoelectronics.perkinelmer.com/content/applicationnotes/app\\_pyrometry.pdf](http://optoelectronics.perkinelmer.com/content/applicationnotes/app_pyrometry.pdf)>.
- [10] Wikipedie: Termoelektrický jev [online]. [cit. 2009-4-25]. Dostupný z WWW: <[http://cs.wikipedia.org/wiki/Termoelektrick%C3%BD\\_jev](http://cs.wikipedia.org/wiki/Termoelektrick%C3%BD_jev)>.
- [11] KADLEC, K., KMÍNEK, M. Měřicí a řídicí technika: výukové materiály [online]. [cit. 2009-5-5]. Dostupný z WWW: <<http://uprt.vscht.cz/ucebnice/mrt/predn/txt-Bc/5-FCHI09-IC-teplom.pdf>>.

- [12] KADLEC, K. Měření teploty [online]. [cit. 2009-5-10]. Dostupný z WWW: <[http://web.vscht.cz/kadleck/aktual/mrt\\_fpbt/prednasky/3-FPBT09-Teplota.pdf](http://web.vscht.cz/kadleck/aktual/mrt_fpbt/prednasky/3-FPBT09-Teplota.pdf)>.
- [13] VOJÁČEK, Antonín. Kompletní thermopile senzory Omega v průmyslovém provedení [online]. 2005 - [cit. 2009-5-10]. Dostupný z WWW: <<http://automatizace.hw.cz/mereni-a-regulace/ART197-kompletni-thermopile-senzory-omega-v-prumyslovem-provedeni.html>>.
- [14] ŠVÉDA, M., KRUTÁK, T. Pyroelektrické snímače [online]. [cit. 2009-5-10]. Dostupný z WWW: <<http://jaja.kn.vutbr.cz/~sveda3/texty/pyro.pdf?PHPSESSID=5ef786d5f0c91bf0cf71a89e74a45fda>>.
- [15] NOVÁČEK, J. Kalibrace termovizního systému (kamery) Fluke Ti30 [online]. 2007 - [cit. 2009-5-10]. Dostupný z WWW: <[http://is.muni.cz/th/151132/prif\\_b/bakal\\_kalib.txt](http://is.muni.cz/th/151132/prif_b/bakal_kalib.txt)>.
- [16] VOJÁČEK, Antonín. BOLOMETRY a MIKROBOLOMETRY [online]. 2005 - [cit. 2009-5-11]. Dostupný z WWW: <<http://automatizace.hw.cz/mereni-a-regulace/ART196-co-jsou-bolometry-a-mikrobolometry-.html>>.
- [17] KABEŠ, K. Infračervené pyrometry – přehled trhu [online]. 2005-, roč. 49, č. 9, s. 536. [cit. 2009-5-11]. Dostupný z WWW: <<http://www.automatizace.cz/article.php?a=827>>.
- [18] Wikipedie: Pyrometry [online]. 2009 - [cit. 2009-5-11]. Dostupný z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Pyrometr>>.
- [19] MICHALSKI, L., ECKERSDORF, K., MCGHEE, J. Temperature measurement. Edition: 2, illustrated. John Wiley and Sons, 2001. 501 s. ISBN 0471867799, 9780471867791.
- [20] PerkinElmer Optoelectronics GmbH. Remote temperature measurement with PerkinElmer thermopile sensors (pyrometry): A practical guide to quantitative results [online]. [cit. 2009-5-12]. Dostupný z WWW: <[http://optoelectronics.perkinelmer.com/content/applicationnotes/app\\_thermophilere\\_motetemp.pdf](http://optoelectronics.perkinelmer.com/content/applicationnotes/app_thermophilere_motetemp.pdf)>.

## Seznam použitých symbolů a zkratek

$\sigma$	Stefan-Boltzmanova konstanta
NEP	Noise equivalent power – minimální intenzita záření, kterou je schopen senzor detekovat
D:S	index zaostření
$\varepsilon$	emisivita
S	citlivost senzoru
$T_{amb}$	Teplota okolí
$T_a$	Teplota okolí
$T_{obj}$	Teplota objektu
$T_{ref}$	Svévolně zvolená neměnná teplota
$\lambda$	Vlnová délka

## Seznam obrázků

Obr. 1. - Thermopile senzory v TO pouzdrech .....	11
Obr. 2. – Dvoj a čtyř elementové Thermopile senzory .....	12
Obr. 3. – Thermopile TPMI moduly s Si čočkou .....	13
Obr. 4. – pyroelektrický senzor s jedním snímacím elementem .....	14
Obr. 5. – pyroelektrický dvoukanálový detektor.....	14
Obr. 6. - Princip bezdotykového měření teploty prostřednictvím tepelného záření .....	16
Obr. 7. - Vyzařovací charakteristika absolutně černého tělesa.....	17
Obr. 8. - Složky záření obsažené při měření teploty prostřednictvím pyrometrie .....	17
Obr. 9. - Princip termočlánku. Měření dotykově (a) a bezdotykově (b).....	19
Obr. 10. - Příklad realizace pouzdra senzoru .....	19
Obr. 11. - Příklad struktury části čipu thermopile senzoru .....	20
Obr. 12. - Měření teploty objektu thermopile senzorem.....	20
Obr. 13. - Blokové schéma jednoduchého senzoru.....	21
Obr. 14. – Schématické uspořádání pyroelektrického senzoru .....	22
Obr. 15. - Bolometr ve funkci proměnného odporu odporového děliče .....	23
Obr. 16. - Struktura jednoduchého bolometru.....	24
Obr. 17. - Struktura integrovaného můstku z bolometrů.....	24
Obr. 18. - Požívané materiály a jejich vlnové rozsahy.....	26
Obr. 19. - Analogová kompenzace vlivu okolní teploty .....	27
Obr. 20. - Číslicová kompenzace vlivu okolní teploty.....	29
Obr. 21. - Výkres soustavy .....	33
Obr. 22. - Schéma zapojení .....	35
Obr. 23. - Popis vývodů senzoru A2TPM ze strany vývodů.....	35
Obr. 25. - Pomocný nákres k výpočtům.....	37
Obr. 26. - Vyobrazení snímací plochy a vyzařovací plochy pro vzdálenost 1,5mm.....	38
Obr. 27. - Vyobrazení snímací plochy a vyzařovací plochy pro vzdálenost 3,5mm.....	39
Obr. 28. - Vyobrazení snímací plochy a vyzařovací plochy pro vzdálenost 9mm.....	40
Obr. 29. - Závislost napětí $\Delta U$ na výkonu dopadajícího záření .....	41

## Seznam příloh

PI Vlastnosti zdroje záření EK-8522 od výrobce.



# Příloha P I: Vlastnosti zdroje záření EK-8522 od výrobce.



**HELIOWORKS**  
*"Out Shines All Others"*  
**STEADY STATE IR SOURCE**  
**Model EK-8522**

Helioworks offers a unique steady state infrared emitter for the mid IR spectrum that operates at up to 950° Centigrade in an industry standard TO-8 package. A Calcium Fluoride (CaF<sub>2</sub>) window provides spectral transmission to over 9 microns.

**Key Features Include:**

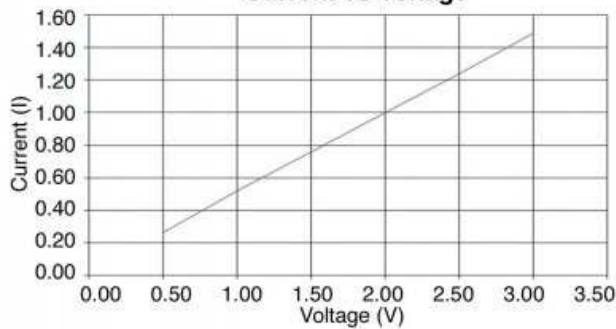
- Kanthal Filament with Emissivity of 0.7
- Calcium Fluoride (CaF<sub>2</sub>) Window
- Internal Gold Plated Parabolic Reflector
- Industry Standard TO-8 Package
- Inert Gas Backfill
- Expected 3 Year Lifetime



**Electrical Specification:**

Peak voltage = 3.0 Volts MAXIMUM  
 Peak Current = 1.48 Amps  
 Peak Power = 4.4 Watts

**Current vs Voltage**

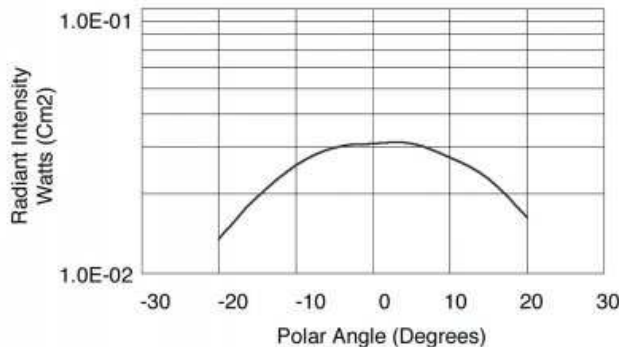


V	I	W=V*I	R=V/I
0.50	0.26	0.13	1.90
1.00	0.52	0.52	1.92
1.50	0.75	1.13	2.00
2.00	0.99	1.99	2.01
2.50	1.23	3.08	2.03
2.80	1.38	3.87	2.03
3.00	1.48	4.43	2.03

Approximate 950° C

**Radiant Intensity (Watts/Cm2):**

Volts = 3.0, Distance - 3.0 inches from source



Polar Angle	Average Intensity (Watts/Cm2)
-20	1.35E-02
-15	1.95E-02
-10	2.58E-02
-5	2.98E-02
0	3.10E-02
5	3.09E-02
10	2.75E-02
15	2.28E-02
20	1.63E-02