

Měření střední radiační teploty a její vliv na tepelnou pohodu

Measurement of mean radiant temperature and its influence on thermal comfort

Bc. David Vorálek

Diplomová práce
2008

 **Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně**
Fakulta aplikované informatiky

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky
Ústav řízení procesů
akademický rok: 2007/2008

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. David VORÁLEK**
Studijní program: **N 2807 Chemické a procesní inženýrství**
Studijní obor: **Automatizace a řídicí technika**

Téma práce: **Měření střední radiační teploty a její vliv na tepelnou pohodu**

Zásady pro vypracování:

1. Zpracujte literární rešerši na dané téma.
2. Provedte analýzu zadání.
3. Vytvořte simulační model pro výpočet střední radiační teploty.
4. Vytvořte měřicí okruh pro získávání dat v testovací kabině.
5. Provedte měření v testovací kabině.
6. Zhodnoťte vliv složky střední radiační teploty při stanovení indexů tepelné pohody.

Rozsah práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

1. **ĎAĎO, S. – KREIDL, M.:** *Senzory a měřicí obvody*. Praha, ČVUT, 1996.
2. **WEBSTER, J., G.:** *The measurement, instrumentation, and sensors handbook*. CRC Press LLC; Springer -- Verlag, 1999, s. 1932. ISBN 3-540-64830-5.
3. **FRADEN, J. :** *Handbook of Modern Sensors. Physics, designs, and Applications*. Springer Verlag, New York, 1996, s. 556. ISBN: 1-56396-538-0.
4. **HRUŠKA, F.:** *Technické prostředky automatizace IV. Snímače, převodníky, regulátory, průmyslová výpočetní technika, ovládací jednotky*. Učební texty. 3. Vyd. Zlín: UTB ve Zlíně, 2005, s. 107. ISBN 80-7318-274-1.
5. **Jencík, J.:** *Bezdotykové měření teploty pyrometry*. *Automatizace*, 42 (1999), č. 4.
6. **Hottel, H.C., Sarofim, A.F.:** *Přenos tepla zářením*. SNTL, 1979.

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Jiří Pálka

Ústav elektrotechniky a měření

Datum zadání diplomové práce:

22. února 2008

Termín odevzdání diplomové práce:

21. května 2008

Ve Zlíně dne 22. února 2008

prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.
děkan



prof. Ing. Petr Dostál, CSc.
ředitel ústavu

ABSTRAKT

Cílem této úlohy je sestavit měřicí řetězec pro stanovování střední radiační teploty poloprostoru a to pomocí termočlánekových baterií na více místech. K měření a vyhodnocení je využita analogově-digitální jednotka DataLab, jenž je schopná naměřené napětí přepočítat pomocí zadaných vztahů na teplotu. Dalším cílem je vytvořit model pro výpočet střední radiační teploty a porovnat s teplotou naměřenou. Ze střední radiační teploty je vypočítána předpověď středního tepelného pocitu, v programu jenž bude vytvořen v prostředí MATLAB.

Klíčová slova: Střední radiační teplota, thermopile, DataLab, Control Web, střední tepelný pocit

ABSTRACT

The aim of this task is to develop measuring chain for determining mean radiant temperature of half-space with the help of thermopile sensors. The measurement and evaluation is made with analog-digital unit DataLab, which is capable to measure low level voltage and then with the specified relationships it is possible to calculate temperature directly in device. Another goal is to create a model for calculating the mean radiant temperature and compare it with the temperature computed theoretically. The mean radiant temperature is then used for calculating thermal comfort indexes (program for this computation will be created in MATLAB).

Keywords: mean radiant temperature, thermopile, DataLab, Control Web, thermal comfort, predicted mean vote

Děkuji tímto vedoucímu mé diplomové práce Ing. Jiřímu Pálkovi za odborné vedení, rady a připomínky, které mi poskytl během řešení mé diplomové práce.

Prohlašuji, že jsem na diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků, je-li to uvolněno na základě licenční smlouvy, budu uveden jako spoluautor.

Ve Zlíně

.....
Podpis diplomanta

OBSAH

LITERÁRNÍ REŠERŠE	8
ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 ELEKTROMAGNETICKÉ ZÁŘENÍ	12
2 PODSTATA ZÁŘENÍ - TEPELNÉ ZÁŘENÍ	13
3 SNÍMAČE TEPELNÉHO ZÁŘENÍ - PYROMETRY	16
3.1 SENZORY POUŽÍVANÉ V RADIAČNÍCH PYROMETRECH.....	17
3.1.1 Odporový senzor infračerveného záření – bolometr.....	17
3.1.2 Pyroelektrický senzor.....	18
3.1.3 Termočláňkový senzor a termočláňková baterie.....	19
3.2 ZÁKLADNÍ PARAMETRY TERMOČLÁŇKOVÝCH BATERIÍ.....	22
3.2.1 Integrovaná citlivost	22
3.2.2 Spektrální citlivost	22
3.2.3 Výkonová spektrální hustota.....	23
3.2.4 Výkonový ekvivalent	23
3.2.5 Detektivita – (detekční schopnost, měrná detektivita).....	24
4 PŘENOS TEPLA ZÁŘENÍM MEZI HMOTNÝMI TĚLESY	25
4.1 ZÁŘENÍ RŮZNÝCH TĚLES:	25
4.1.1 Záření ze zdroje(bodový zdroj) do prostoru	25
4.1.2 Záření ze zdroje(bodový zdroj) na element kulové plochy.....	26
4.1.3 Záření ze zdroje(bodového zdroje) na dutou kulovou plochu	27
4.2 DEFINICE SOUČiniteLE EMISIVITY	28
4.3 ÚHLOVÝ SOUČiniteL A PŘÍMÉ VÝMĚNNÉ PLOCHY	28
4.3.1 Záření zdroje na rovnoběžnou plochu.....	29
4.3.2 Záření zdroje na kolmou plochu	31
4.3.3 Záření elementu dS_2 na kruhový kotouč S_1 o poloměru R_1	32
5 CHYBY BEZDOTYKOVÉHO MĚŘENÍ TEPLoty	34
5.1 MĚŘENÝM PŘEDMĚTEM:.....	34
5.2 PROSTŘEDÍM:	34
5.3 VLASTNÍM PYROMETREM:	34
5.4 METODY ZMENŠENÍ TEPLOTNÍ CHYBY:.....	35
5.5 VÝPOČET CHYBY MĚŘENÍ	35
6 PŘEDPOVĚĎ STŘEDNÍHO TEPELNÉHO POCITU (PMV)	37
6.1 STANOVENÍ UKAZATELE PMV	37
II PRAKTICKÁ ČÁST	39
7 ANALÝZA ZADÁNÍ	40

7.1	POPIS PROSTŘEDÍ CONTROL WEB	40
7.2	DATA LAB PC/IO (PRŮMYSL OVÝ POČÍTAČ SE VSTUPN Ě/VÝSTUPN Í JEDNOTKOU)	42
8	SESTAVENÍ TESTOVAC ÍHO POLOPROSTORU	43
9	REALIZACE VYHŘÍVAN Í PROSTORU	44
9.1	ZÁŘÍC Í T ĚLESO	44
9.2	NASTAVOVÁN Í TEPL OTY NA ZÁŘÍC ÍM T ĚLESE	44
10	MODEL SNÍMAČE STŘEDN Í RADIAČN Í TEPL OTY	46
10.1	SENZOR TERMOČLÁNKOV Ě BATERIE TPS333	47
10.2	VÝPOČET KOMPENZAČN Í TEPL OTY	47
10.3	PROSTOROV Ě M ĚŘEN Í	49
11	VÝPOČET STŘEDN Í RADIAČN Í TEPL OTY SNÍMAN ĚHO PROSTORU	51
11.1	TEORETICKÝ PŘÍKLAD VÝPOČTU STŘEDN Í RADIAČN Í TEPL OTY CEL ĚHO SNÍMAN ĚHO PROSTORU	51
11.1.1	Příkl ad výpočtu úhlov ěho součinitele pro polohu A	52
11.2	VÝPOČET STŘEDN Í RADIAČN Í TEPL OTY PRO UMÍST ĚN Í ZÁŘÍC ÍHO T ĚLESA V MÍST Ě A	56
11.3	VÝPOČET STŘEDN Í RADIAČN Í TEPL OTY PRO UMÍST ĚN Í ZÁŘÍC ÍHO T ĚLESA V MÍST Ě B	61
11.4	VÝPOČET STŘEDN Í RADIAČN Í TEPL OTY PRO UMÍST ĚN Í ZÁŘÍC ÍHO T ĚLESA V MÍST Ě C	63
11.5	POPIS PROGRAMU NA VÝPOČET PMV	65
11.6	DISKUZE VÝSLEDKŮ	65
	ZÁV ĚR	67
	CONCLUSION	68
	SEZNAM POUŽIT Ě LITERATURY	70
	SEZNAM POUŽIT ÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	71
	SEZNAM OBRÁZKŮ	76
	SEZNAM TABULEK	77
	SEZNAM PŘÍLOH	78

LITERÁRNÍ REŠERŠE

Prvním bod diplomové práce je literární rešerše.

1. **ĎAĎO, S.-KREIDL, M. : Senzory a měřicí obvody. Praha, ČVUT, 1996.**

Kniha obsahuje kapitoly o senzorech různých veličin jako jsou např. chemické, optické, elektrické, magnetické, tepelné ad. Zejména kapitola 3. (obsahující základní pojmy a jednotky senzorů pro dotykové a bezdotykové měření teploty. Dále popisuje systémy termovizní a pyrometrii, senzory tepelných veličin.) byla vhodná pro tuto práci

2. **WEBSTER, J., G. : The measurement, instrumentation, and sensor handbook. New York, CRC Press LLC, Springer-Verlag, 1999, s.1932. ISBN 3-540-64830-5.**

Literatura popisuje teorii měření charakteristik a dalších veličin. Nejdůležitější kapitola pro tuto práci je: kapitola 32.- Temperature Measurement, jenž obsahuje popis teploměrů, jejich princip, zapojení a měřicí charakteristiky

3. **FRADEN, J. : Handbook of Modern Sensors. Physics, designs, and Applications. New York, Springer Verlag, 1996,s.556. ISBN 1-56396-538-0.**

Publikace která zahrnuje všeobecné informace z teorie sensoriky, principy, podrobnější popisy jednotlivých senzorů. Z knihy jsem použil kapitoly 15- Electromagnetic Field Detectors a 16 – Temperature Sensors. jenž pojednávají o termistorech a senzorech elektromagnetického pole.

4. **HRUŠKA,F. : Technické prostředky automatizace IV. Snímače, převodníky, regulátory, průmyslová výpočetní technika, ovládací jednotky. Učební texty. 3. Vyd. Zlín: UTB ve Zlíně, 2005, s. 107. ISBN 80-7318-274-1.**

Literatura určená především pro studenty VŠ technických oborů: automatizace, informační systémy. Texty jsou rozděleny do 3 částí: První část je zaměřena na prostředky měřicích obvodů (pro měření veličin např.:teplota, tlak, hladina, atd.). Druhá část se zabývá centrálními jednotkami pro zpracování informací (kompaktní regulátory, výpočetní automaty a průmyslové personální počítače). Třetí část se zabývá ovládacími prvky (pro

řízení elektrické energie, a toku tekutin v potrubí). Pro tuto práci je důležitá kapitola 1.2. Měření teploty, zabývá se jak dotykovým tak bezdotykovým měřením teploty (dilatační snímače, odporové snímače, termoelektrické a snímače tepelného záření).

5. Jencík, J.: Bezdotykové měření teploty pyrometry. Automatizace, 42 (1999), č. 4

Článek, který popisuje princip měření infračervených pyrometrů. Princip je založený na tom, že všechny formy hmoty vyzařují při teplotách vyšších než absolutní nula tepelného záření ve viditelném i neviditelném pásmu spektra. Dále se zabývá vztahy mezi množstvím emitovaného záření, jeho vlnovou délkou a teplotou. Funkcemi a částmi pyrometru.

6. Hottel, H.C., Sarofim, A.F.: Přenos tepla zářením. SNTL, 1979

Knihla obsahuje teorii přenosu tepla zářením a její aplikace na řešení jednoduchých i složitějších úloh. Vedle základních témat publikace obsahuje: sálení jako difúzní proces, jednorozměrné a třírozměrné teplotní pole, rozptyl částicemi prachu a sálení absorbujícím a rozptylujícím prostředím. Důležité kapitoly použitelné pro tuto práci jsou: kapitoly 1, 2, 3, 4, 5 a 6. Které obsahují od základních definic a zákonů, přes výměnné plochy až k radiačním vlastnostem povrchů.

ÚVOD

Co je to vlastně teplota? Jedna z fyzikálních definic nám říká, že teplota je stavová veličina, která charakterizuje termodynamickou rovnováhu. Můžeme si ji také představit jako tok energie od tělesa (prostředí) s vyšším potenciálem k tělesu (prostředí) s potenciálem nižším. Tenhle jev probíhá do té doby než se potenciály dostanou do rovnováhy, proto se nazývá termodynamická rovnováha.

Střední radiační teplota udává střední hodnotu teploty (čili průměr teplot) předmětů (zdi, skříní a věcí jenž se nachází v uvažovaném místě), kde tyto předměty buď teplo vydávají nebo naopak přijímají. Tyto předměty mohou působit pozitivně či negativně na faktor lidské pohody, což je v dnešní době docela omývaným tématem.

K měření teploty se využívají dvě metody:

1) Dotykové

Dotyková metoda využívá čidla, založená na principu změny odporu na teplotě (teplotní odporová čidla). V dalším případě se využívá Seebeckova jevu, kdy vzniká termoelektrické napětí mezi vodiči, které jsou z různých kovů a jsou umístěny v prostředích o různých teplotách (termočláanky)

2) Bezdotykové

V této práci se budeme spíše zabývat metodou, která patří do druhé kategorie a to bezdotykových měření tzv. pyrometrie, která je založena na zákonech elektromagnetického záření. Měření střední radiační teploty probíhá nepřímou, s využitím termočláankové baterie (tzv. thermopile), pyrometrických senzorů nebo senzorů infračerveného záření (tzv. bolometru).

Cílem práce je měření střední radiační teploty pomocí termočláankových baterií, které budou napojeny přes komunikační rozhraní DataLab k počítači, tzn., že měření bude probíhat analogově-digitální cestou. Data jež se naměří v testovacím poloprostoru budou srovnány s daty vypočtenými pomocí zákonů uvedených v teoretické části

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 ELEKTROMAGNETICKÉ ZÁŘENÍ

Elektromagnetické záření se šíří do prostoru vždy z hmotného zdroje v kterém probíhá přeměna energie a ta se z něho šíří do prostoru pomocí elmag. záření. Zdroje vysílají vždy jen záření o frekvenci určitého intervalu. Souhrn jednotlivých intervalů frekvencí elektromagnetického záření nazýváme *spektrum elektromagnetického záření* [1].

Záření se dá charakterizovat 3 základními veličinami: rychlost šíření v , frekvence f a vlnová délka λ . Při konstantní rychlosti šíření je vlnová délka nepřímo úměrná jeho frekvenci, která zůstává neměnná při průchodu různými látkami. Světlo patří do viditelné oblasti a má frekvenci od $3,75 \cdot 10^{14}$ Hz do $7,50 \cdot 10^{14}$ Hz, kde rychlost šíření ve vakuu je $3 \cdot 10^8$ m.s⁻¹ (je to současně i nejvyšší možná rychlost, jakou se může šířit signál) a má vlnovou délkou od 400 nm do 780 nm [1].

Spektrum elektromagnetického záření – do tohoto spektra patří i mimo viditelného záření ještě *infračervené a ultrafialové*. Tyto tři druhy záření se nazývají souhrnně světelné tepelné záření. Při dopadu záření na povrch tělesa se ho část *odrazí* (reflexe), část *pohlí* (absorpce) a zčásti *projde* (transmise) [3].

Infračervené záření (IR) o frekvenci řádově od 10^{12} do 10^{14} Hz (tj. frekvence menší než světlo) a vlnové délce od 780 nm do 400 μ m. Je neviditelné pro člověka, ale registrujeme je tepelným vjemem. Zdrojem tohoto záření jsou tělesa s vyšší teplotou než je teplota okolního prostředí. Má výrazné tepelné účinky.

Ultrafialové záření (UV) o frekvenci řádově od 10^{15} do 10^{17} Hz (tj. naopak frekvence větší než světlo) a vlnové délce od 4 nm do 400 nm. Působí na živé organismy, má fyziologické účinky, ničí mikroorganismy. Způsobuje opálení (vytvářením ochranné pigmentové vrstvy na pokožce) [1].

Absolutně černé těleso pohlcuje veškeré záření co na něj dopadá, v praxi se s ním však nemůžeme setkat, ale můžeme se přiblížit k jeho realizaci. Reálná tělesa pohlcují pouze část dopadající energie tyto tělesa se nazývají šedými [3].

2 PODSTATA ZÁŘENÍ - TEPELNÉ ZÁŘENÍ

Proces při kterém dochází k přenosu energie a to ve formě elektromagnetických vln s vektory intenzit elektrického a magnetického pole, které kmitají kolmo ke směru šíření záření. Energie je přenášena důsledkem vyvolání příjmů či excitace částic a jejich následné migraci. Migrující částice se jmenují fotony a mají různou energii. Proces může nabývat charakteru např. radiové záření aj. Záření označováno jako **tepelné**, vzniklo srážkou molekul charakterizující teplotu [3].

Jedná se v podstatě o proces ve kterém každé těleso buď záření přijímá, v případě, je-li teplota jeho povrchu nižší než teplota jiného tělesa nebo naopak vyzařuje elektromagnetické vlnění úměrné své povrchové teplotě. Když se teplota zvyšuje, dochází tím zároveň i k vyššímu vyzařování energie [4].

Základní vztahy zákonů pro elektromagnetické záření absolutně černých těles:

- intenzitu záření černého tělesa určité vlnové délky udává **Planckův zákon**:

$$H_{0\lambda} = \frac{c_1}{\lambda^5 \left(e^{\frac{c_2}{\lambda T_0}} - 1 \right)}, \quad (1)$$

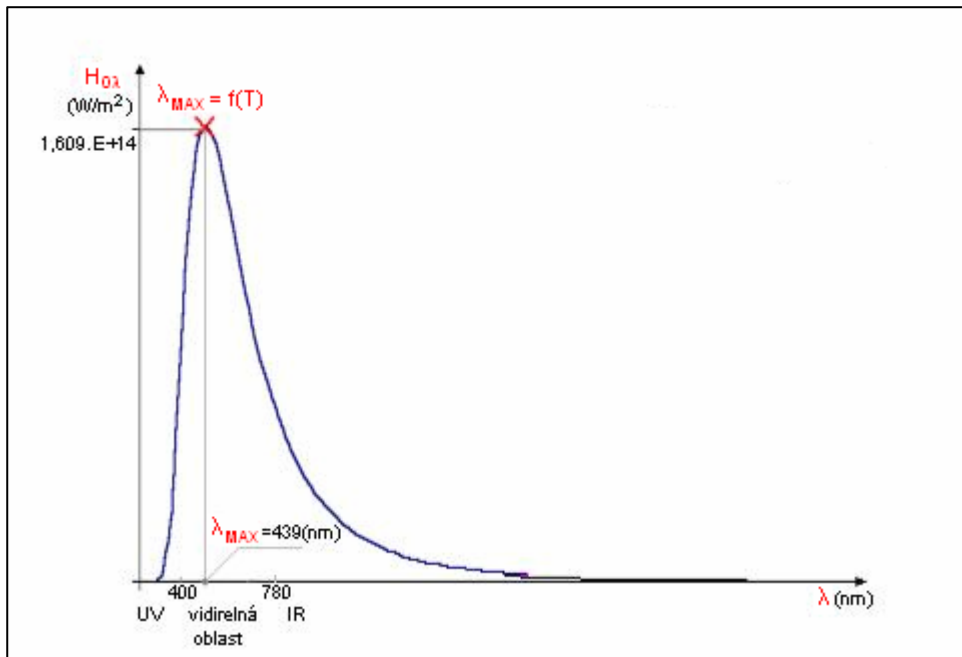
kde: $H_{0\lambda}$ - spektrální hustota intenzity záření černého tělesa ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$),

$c_1 = 3,741832 \cdot 10^{-16}$ ($\text{W}\cdot\text{m}^2$) je první vyzařovací konstanta,

$c_2 = 1,438786 \cdot 10^{-2}$ ($\text{m}\cdot\text{K}$) je druhá vyzařovací konstanta,

λ - vlnová délka záření (m),

T - teplota povrchu tělesa (K).



Obr. 1 Závislost spektrální hustoty intenzity vyzařování černého tělesa na vlnové délce

Vrchol křivky na Obr.1 ukazuje např. záření slunce o teplotě kolem 6000°C v závislosti na vlnové délce. Kde λ_{MAX} dosahuje vlnovou délku 439nm(viditelná oblast), při největší intenzitě slunce. Tuto závislost popisuje Wienův posunovací zákon – vyjadřuje závislost povrchové teploty černého tělesa a vlnové délky elektromagnetického záření:

$$\lambda_{MAX} \cdot T = b, \quad (2)$$

kde: λ_{MAX} - vlnová délka (m), která má při dané teplotě T největší intenzitu záření,

$$b = 2,897779 \cdot 10^{-3} \text{ (m.K)}.$$

Integrací Planckova zákona získáme zákon Stefan-Boltzmannův, který říká, že intenzita tepelného záření je úměrná 4. mocnině absolutní teplotě černého tělesa:

$$H_0 = \delta_0 \cdot T^4, \quad (3)$$

kde: H_0 – je celková intenzita záření ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$),

$\delta_0 = 5,67032\cdot 10^{-8}$ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$) - je Stefan-Boltzmannova konstanta,

T - absolutní teplota tělesa (K).

Dalším ze základních formulí popisující elektromagnetické záření je Lambertův zákon, který platí i pro reálná tělesa.

Lambertův zákon – popisuje závislost zářivosti na úhlu záření φ :

$$I_\varphi = \frac{d^2\phi}{dS\cdot\cos\varphi} = I_N\cdot\cos\varphi, \quad (4)$$

kde: I_N – je zářivost ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$), při 0° úhlu a (sr) je steradián,

φ - je úhel sklonu záření (sr).

3 SNÍMAČE TEPELNÉHO ZÁŘENÍ - PYROMETRY

Umožňují měřit teplotu povrchu těles bezdotykovým způsobem. Pro rozsah vysokých teplot se snímá oblast viditelného záření. Tělesa o teplotě pod 3440 °C až do hodnot záporných teplot, které září v oblasti neviditelného IR záření. Celou tuto oblast elektromagnetického záření lze rozdělit do několika pásem záření [5]:

- viditelné světelné záření o vlnové délce 0,4 – 0,78 μm (záření tělesa např. slunce s teplotou povrchu od 6970 do 3440 °C),
- blízké IR o vlnové délce 0,78 – 1 μm (záření tělesa s teplotou povrchu od 3440 do 2620 °C),
- krátkovlnné IR o vlnové délce 1 – 3 μm (záření tělesa s teplotou povrchu od 2620 do 690 °C),
- středovlnné IR o vlnové délce 3 – 5 μm (záření tělesa s teplotou povrchu od 690 do 305 °C),
- dlouhovlnné infračervené záření o vlnové délce 5 – 25 μm (záření tělesa s teplotou povrchu od 305 do -160 °C, např. tělo člověka o teplotě povrchu 36 °C vysílá záření o vlnové délce 9,32 μm).

Bezdotykové měření teploty využívá k měření teploty povrchu tělesa zákonů pro elektromagnetické záření (viz. kapitola 2). V praxi se bezdotykové měření používá k měření povrchu:

- a) těles vyrobených z tepelně nevodivých materiálů,
- b) na místech kde není možný dotyk např. agresivní látky
- c) rotačních dílů a těles pod elektrickým napětím

Protože v praxi se při bezdotykovém měření jedná o přenos elektromagnetického záření mezi měřeným nečerným tělesem a snímačem. Přístroje pro bezdotykové měření teploty se nazývají *pyrometry* a rozdělují se do tří základních skupin [5]:

- pyrometry *barvové* (využívají barvy tepelného záření)- jsou založeny na principu, že barva povrchu se mění s teplotou od tmavě červené přes žlutou k bílé a dále do modré.
- pyrometry *spektrální* (využívají záření určité vlnové délky), tzv. jasové a optické- teplota povrchu je měřena podle záření určité vlnové délky. Měří teplotu od 700°C do 3500°C a mají větší přesnost měření než radiační pyrometry.

- pyrometry *radiální* (využívají celkového záření tj. všech vlnových délek spektra)- záření je přijmuto v širokém vlnovém rozsahu soustředěno optikou na pyrometrické, odporové, termočlávkové nebo fotoelektrické senzory, které jsou převáděny na elektrický měřenosný signál jenž je úměrný povrchové teplotě. Velikost snímané plochy je dána vzdáleností zářiče od pyrometru. Rozsah měření je od -50°C do 2000°C . Pro naši práci jsou nejvhodnější a to z důvodu velkého rozsahu spektra tepelného záření.

3.1 Senzory používané v radiálních pyrometrech

3.1.1 Odporový senzor infračerveného záření – bolometr

Bolometr přijímá IR záření čímž si ohřívá svojí malou začerněnou plochu a tím odporový senzor teploty mění elektrický odpor. Tyto elementy mohou být: kovové (vrstva oxidu Ni, Co aj. na tenké nevodivé podložce), dielektrické, polovodičové, supravodivé. Oblast měření IR je velmi široká a obsahuje spektrum záření od 0,8 do 50 μm . Senzor má citlivost již 10^{-10} W. Tepelná bilance senzoru v dynamickém režimu je pak dána vztahem [4]:

$$Q_r - Q_k = m \cdot c \cdot \frac{dT}{d\tau} \quad (5)$$

kde je: Q_r – je tepelný tok dopadající na senzor (W),

Q_k – je tepelný tok unikající do okolí (W),

m – je hmotnost senzoru (kg),

c – je tepelná kapacita materiálu senzoru ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$),

T - je teplota senzoru (K),

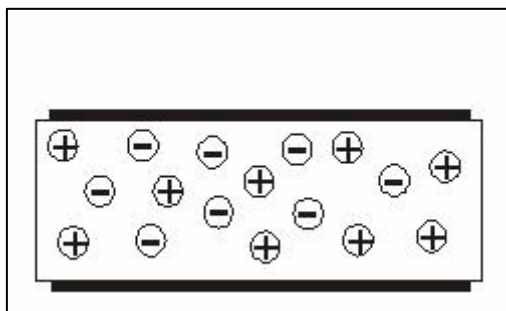
τ - je čas (s).

Využití tohoto senzoru je především v laboratořích a u vědeckých přístrojů, termovizních kamer, zařízení v kosmickém výzkumu a také u snímačů pro bezdotykové měření teploty v rozsahu 0 až 3000 °C.

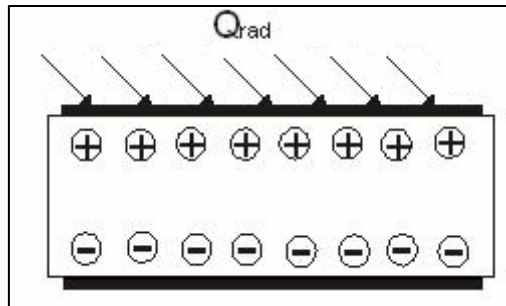
3.1.2 Pyroelektrický senzor

Využívají pyroelektrického jevu, který závisí na spontánní změně polarizace feroelektrických krystalových materiálů způsobené změnou teploty pyroelektrického detektoru.

Elektrická polarizace je fyzikální děj, při němž se mění rozložení elektrických nábojů v dielektriku nebo i ve vodiči. Vázaný náboj je takový, který se nemůže v látce volně pohybovat. Posouvá se pouze na vzdálenost rozměrů částic. Působením polarizace se částice stává tzv. elektrickým dipólem. Působením vnějšího elektrického pole na dielektrikum, dochází k lokálnímu narušení nábojové rovnováhy. I když se v objemu dielektrika množství náboje nemění, jeví se některá místa nabitá kladně a jiná zase záporně. Navenek se dielektrikum tváří jako by mělo kladný a záporný pól [10]. Princip pyroelektrického jevu je na obr. 2 a 3.



Obr. 2 Stav senzoru před ozářením
(částice jsou chaoticky uspořádány)



Obr. 3 Stav po ozáření senzoru (částice se polarizují a vytváří tak náboj)

Má-li krystal elektrody, je možné zjistit elektrický náboj a podle vztahu 6 i změnu náboje, která při pyroelektrickém ději vzniká:

$$dQ_e = S \cdot \frac{dP_e}{dt} \cdot dT \quad (6)$$

kde: dP_e – je změna polarizace ($C \cdot m^{-2}$),

S - je plocha krystalu (m^2),

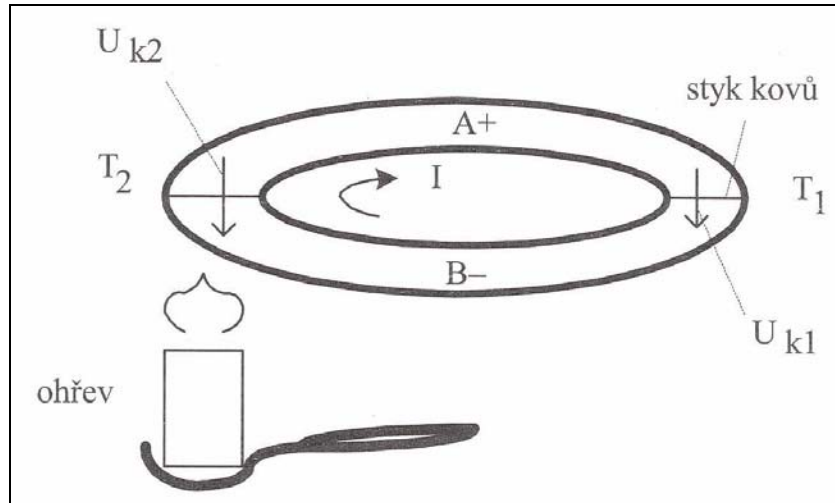
T - je teplota (K).

Vnější podnětem senzoru je tepelné záření v oblasti od 0,4 do 15 μm (od viditelné oblasti do oblasti infračerveného tepelného záření), dá se používat u termovize.

3.1.3 Termočlánekový senzor a termočláneková baterie

Mějme dva kovy, které budou spojené na obou koncích podle obr. 4. Kontaktní potenciály kovů, musí splňovat podmínku $\varphi_A > \varphi_B$. Když se nebudou kovy ohřívat platí že $T_1 = T_2$, tzn. že kov A bude nabíjen kladně ku kovu B . V případě že nastane rozdíl teplot obou konců $T_1 < T_2$ nastane intenzivnější kmitání krystalové mřížky na teplejší straně oproti straně chladnější. Zvýšením teploty bude docházet k migraci elektronů k chladnějšímu konci což způsobí proudění tepla. Tím pádem se elektrony přesouvají od teplejšího konce směrem k chladnějšímu. Z čehož plyne, že teplejší konec bude nabíjen kladně a chladnější

záporně. Rozdílná koncentrace elektrického náboje má za příčinu vznik kontaktního potenciálu [10].



Obr. 4 Vznik termoelektrického napětí

Na rozpojeném obvodu je pak elektromotorické napětí dáno Seebeckovým vztahem:

$$dU_{A,B} = S_{A,B} \cdot dT, \quad (7)$$

kde: $S_{A,B} = S_A - S_B$ – jsou Seebeckovy koeficienty ($V \cdot K^{-1}$),

T – je teplota (K).

Pro Seebeckovy koeficienty platí vztah:

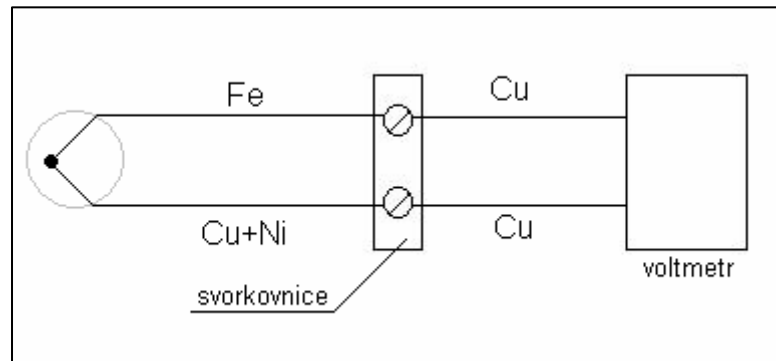
$$S_i = \int_0^T \frac{\delta_i}{T} dT, \quad (8)$$

kde: δ_i – jsou Thomsonovy koeficienty ($V \cdot K^{-1}$),

T – je teplota (K).

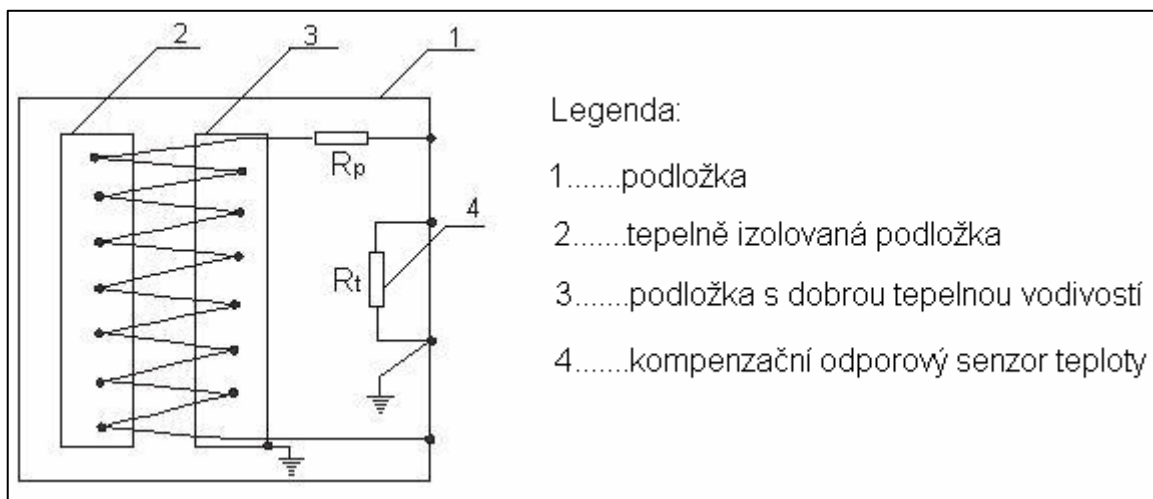
V dnešní době se termoelektrické články vyrábí z tenkých pásků u nichž je z důvodu větší absorpce záření spoj začerněn. K docílení stability jsou články vakuově zapouzdřeny. Mějme např. termočlánek typu J (železo – konstantan) jenž je napojen na

svorkovnici, která je tvořena měděnými vodiči a připojena na měřící přístroj dle (obr.5), tím vznikají mezi spoji svorkovnice další termoelektrická napětí, která jsou úměrná teplotě v okolí spoje. Toto nežádoucí napětí je zapotřebí kompenzovat, proto je v pouzdře detektoru zabudovaný teplotně závislý odpor(termistor) [10].



Obr. 5 Odvození kompenzace srovnávacího konce

Pro dosažení větší citlivosti se zapojuje několik termočlánků do série (obr.6), kdy jsou použity pro měření všechny měřící spoje a jako referenční všechny srovnávací spoje. Výstup pak dává součet napětí jednotlivých termočlánků. Takové senzory se nazývají “termočlánková baterie“ nebo “*thermopile*” [5, 9].



Obr. 6 Schéma zapojení termočlánkové baterie

Významným příkladem použití tohoto senzoru “termočlánková baterie” je pro měření radiční teploty nebo toku sálavé tepelné energie.

3.2 Základní parametry termočlánekových baterií

Slouží k hodnocení senzorů elektromagnetického záření. Mezi nejdůležitější parametry senzorů patří [7, 9]:

3.2.1 Integrovaná citlivost

Mezi nejdůležitější parametry senzoru termočlánekové baterie patří citlivost. Měla by být co největší. Citlivost je dána vztahem, který vyjadřuje podíl výstupního elektrického napětí senzoru na toku záření dopadající na senzor. Hodnoty citlivosti se pohybují řádově od desítek po stovky V/W.

$$K = \frac{U}{H}, \quad (9)$$

kde: K - je integrovaná citlivost ($V \cdot W^{-1}$),

U - je napětí na výstupu senzoru (V),

H - je zářivý tok (W).

3.2.2 Spektrální citlivost

Je dána závislostí citlivosti K na vlnové délce λ :

$$K_{\lambda} = \frac{U}{H_{\lambda}}, \quad (10)$$

kde: K_{λ} - je spektrální citlivost ($V \cdot W^{-1}$),

U - je napětí na výstupu senzoru (V),

H_{λ} - je zářivý tok závislý na vlnové délce (W).

3.2.3 Výkonová spektrální hustota

U každého el. obvodu je výstupní signál ovlivněn šumem a to tzv. bílým šumem, který je u senzoru termočlávková baterie generovaný náhodně na ohmickém odporu.

$$u_{noise} = \sqrt{4 \cdot k_B \cdot T \cdot R \cdot \Delta f} \quad (11)$$

kde: $k_B = 1,380658 \cdot 10^{-23}$ (J.K⁻¹)- Boltzmanova konstanta

Δf - šířka pásma (Hz)

R - odpor senzoru (Ω)

T - termodynamická teplota (K)

$$\frac{u_{noise}^2}{\Delta f} \text{ (V}^2 \cdot \text{Hz}^{-1}\text{)} \quad (12)$$

3.2.4 Výkonový ekvivalent

Je dán zářivým tokem, při kterém se hodnota výstupního signálu rovná efektivní hodnotě spektrální hustoty šumového napětí:

$$NEP = H \frac{\sqrt{\overline{u_s^2}}}{U}, \quad (13)$$

kde: NEP – je (Noise Equivalent Power) výkonový ekvivalent (W.Hz^{-0.5}),

H - je zářivý tok (W),

U – je napětí na výstupu senzoru (V),

$\overline{u_s^2} = \frac{\overline{U_s^2}}{\Delta f}$ - je spektrální hustota šumového napětí (V².Hz⁻¹),

$\overline{U_s^2}$ - je efektivní hodnota integrálního šumového napětí (V²),

Δf – je šířka pásma (Hz).

3.2.5 Detektivita – (detekční schopnost, měrná detektivita)

Udává ho závislost úměrná druhé odmocnině plochy na převrácené hodnotě výkonového ekvivalentu.

$$D^* = \frac{\sqrt{S}}{NEP}, \quad (14)$$

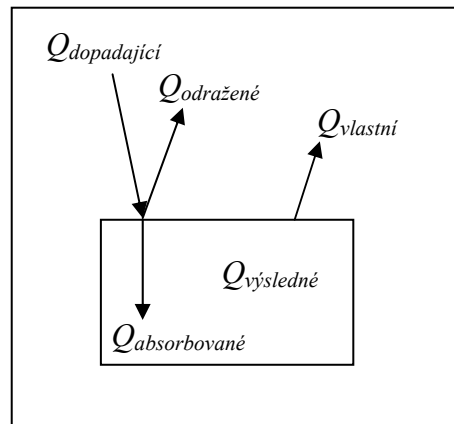
kde: D^* - je detektivita ($\text{m}/\text{W}\cdot\text{Hz}^{-0.5}$),

S – je citlivá plocha senzoru (m^2),

NEP - je výkonový ekvivalent ($\text{W}\cdot\text{Hz}^{-0.5}$).

4 PŘENOS TEPLA ZÁŘENÍM MEZI HMOTNÝMI TĚLESY

Představme si těleso 1 na které dopadá teplo vyzařované z jiného tělesa 2, kde těleso 1 vyzařuje přebytečné teplo na další tělesa (podle Obr.7).



Obr. 7 Dopadající záření na těleso

Kde Q je tok tepla:

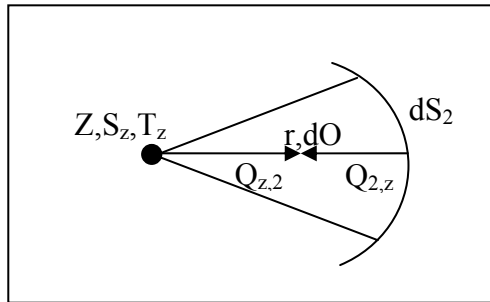
- $Q_{dopadající}$ dopadajícího záření
- $Q_{odražené}$ odraženého záření
- $Q_{absorbované}$ absorbovaného záření
- $Q_{vlastní}$ vlastního záření
- $Q_{výsledný}$ výsledný (vnitřní)
- $Q_{efektivní}$ efektivní

4.1 Záření různých těles:

4.1.1 Záření ze zdroje(bodový zdroj) do prostoru

$$Q_z = \varepsilon_z \cdot S_z \cdot \delta \cdot T_z^4 \quad (15)$$

4.1.2 Záření ze zdroje(bodový zdroj) na element kulové plochy



Obr. 8 Záření ze zdroje(bodový zdroj) na element kulové plochy

Tok vlastního záření do celého poloprostoru:

$$Q_{vlastni,z} = \varepsilon_z \cdot S_z \cdot \delta \cdot T_z^4 \text{ (W)} \quad (16)$$

Zářivost zdroje:

$$I_z = \frac{Q_{vlastni,z}}{2\pi} \text{ (W} \cdot \text{sr}^{-1}\text{)} \quad (17)$$

Prostorový úhel záření na plochu dS_2 :

$$dO = \frac{dS_2}{r^2} \text{ (sr)} \quad (18)$$

Tok záření na element koule :

$$Q_{z,2} = \frac{Q_z \cdot dO}{2\pi} = \frac{\varepsilon_z \cdot S_z \cdot \delta \cdot T_z^4 \cdot dS_2}{2 \cdot \pi \cdot r^2} \text{ (W)} \quad (19)$$

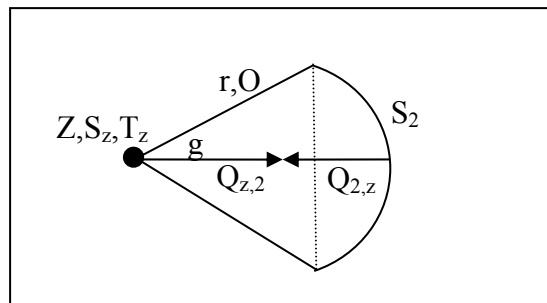
Tok záření z plochy dS_2 na bodový zdroj:

$$Q_{2,z} = \frac{\varepsilon_2 \cdot dS_2 \cdot \delta \cdot T_2^4 \cdot dS_z}{2 \cdot \pi \cdot r^2} \text{ (W)} \quad (20)$$

Výsledný tok záření [3]:

$$Q_{\text{vysledný}} = Q_{z,1} - Q_{2,z} \quad (21)$$

4.1.3 Zářění ze zdroje (bodového zdroje) na dutou kulovou plochu



Obr. 9 Zářění ze zdroje (bodového zdroje) na dutou kulovou plochu

Prostorový úhel pro část koule:

$$O = 2\pi(1 - \cos g) \quad (22)$$

Tok záření z bodového zdroje na plochu S₂:

$$Q_{z,2} = \frac{Q_z \cdot O}{2\pi} = \frac{\varepsilon_z \cdot S_z \cdot \delta \cdot T_z^4 \cdot O}{2\pi} \quad (23)$$

Tok záření z plochy S₂ na bodový zdroj:

$$Q_{2,z} = \frac{\varepsilon_2 \cdot S_2 \cdot \delta \cdot T_2^4 \cdot dS_z}{2 \cdot \pi \cdot r^2} \quad (24)$$

Výsledný tok [3]:

$$Q_{\text{vysledný}} = Q_{z,2} - Q_{2,z} \quad (25)$$

4.2 Definice součinitele emisivity

Emisivita je schopnost předmětu vysílat elektromagnetické záření. Hodnota emisivity se přitom pohybuje v rozsahu od 0 do 1, přičemž hodnoty 1 dosahuje absolutně černé těleso, které veškerou energii vyzáří, zatímco těleso, které nevyzařuje žádnou energii, dosahuje emisivity 0. V praxi se ale z absolutně černými tělesy nesetkáme. Reálná tělesa vyzařují nebo přijímají energie méně než těleso černé, je proto nutné uvedené vztahy doplnit o parametr emisivity ε . Jelikož je záření složeno ze spektra vlnových délek, je nutné emisivitu vyjadřovat jako funkci skutečné vlnové délky $\varepsilon(\lambda)$. Protože poměr intenzity vyzařování libovolného tělesa k jeho absorpční schopnosti při dané teplotě a dané vlnové délce je konstantní a nezávisí na materiálu zářiče. Emisivita závisí na vlnové délce, teplotě a opracování povrchu. Hodnoty emisivity jsou pro různé materiály stanoveny v tabulkách[6].

$$\varepsilon_{\lambda} = \frac{H_{\lambda}}{H_{\lambda 0}}, \quad (26)$$

kde: ε_{λ} - spektrální emisivita (-),

$H_{\lambda 0}$ - intenzita vyzařování absolutně černého tělesa ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$),

H_{λ} - intenzita vyzařování nečerného tělesa ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$).

4.3 Úhlový součinitel a přímé výměnné plochy

Uhlový součinitel vychází přímého přenosu tepelných toků mezi dvěma černými povrchy různého tvaru za předpokladu, že jsou tyto povrchy odděleny prostředím nepohlcujícím záření [3].

Výsledný zářivý tok z černého povrchu S_1 do poloprostoru je roven $S_1 \cdot H_1$, pak poměr toku směřujícího k černému povrchu S_2 a celkového toku označíme $\varphi_{1 \rightarrow 2}$ a nazveme jej *úhlový součinitel* (někdy *součinitel ozáření*).

Protože tento tok musí být nulový, jsou-li teploty obou povrchů stejné, tj. $H_1 = H_2$, a poněvadž součinitele φ jsou u černých nebo reálných (nečerných) povrchů určeny pouze geometrickým uspořádáním, je zřejmé, že:

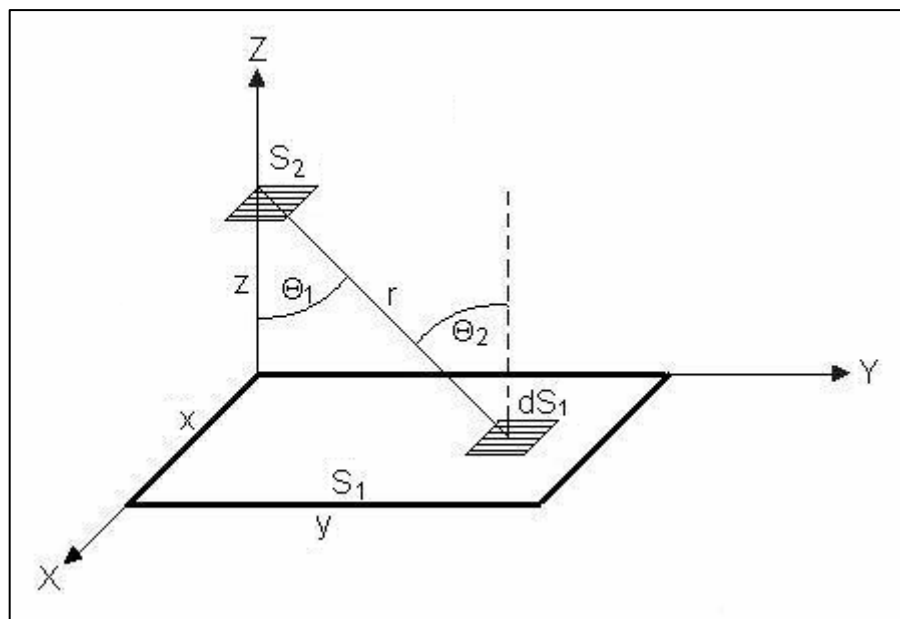
$$S_1 \cdot \varphi_{1 \rightarrow 2} = S_2 \cdot \varphi_{2 \rightarrow 1} \quad (\text{m}^2). \quad (27)$$

Podle definice pak:

$$\varphi_{1 \rightarrow 1} + \varphi_{1 \rightarrow 2} + \dots + \varphi_{1 \rightarrow n} = \sum_{j=1}^n \varphi_{1 \rightarrow j} = 1. \quad (28)$$

4.3.1 Záření zdroje na rovnoběžnou plochu

Uvažujme zdroj záření, který má plochu S_2 a září na plochu o rozměrech x, y .



Obr. 10 Plocha zářícího zdroje S_2 rovnoběžná s rovinou S_1

Dále necht' platí:

$$\varphi_{2 \rightarrow 1} = \varphi(S_2, S_1) = \frac{1}{\pi} \int_{S_1} \frac{\cos \Theta_1 \cos \Theta_2 dS_1}{r^2} \quad (-), \quad (29)$$

kde: $r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ - je vzdálenost plochy S_2 od elementu dS_1 (m),

$dS_1 = dx \cdot dy$ - je plocha ozářeného elementu na S_1 (m^2),

$\cos \Theta_1 = \cos \Theta_2 = \frac{z}{r}$ - je úhel ozáření elementu dS_1 .

Pak

$$\varphi_{2 \rightarrow 1} = \varphi(S_2, S_1) = \frac{1}{\pi} \int_0^x \int_0^y \frac{z^2 dx dy}{(z^2 + x^2 + y^2)^2} \quad (-) = \quad (30)$$

integrace podle x dává

$$= \frac{1}{2\pi} \int_0^y \left[\frac{x}{(y^2 + z^2)(x^2 + y^2 + z^2)} + \frac{1}{\sqrt{(y^2 + z^2)^3}} \operatorname{arctg} \frac{x}{\sqrt{(y^2 + z^2)}} \right] \cdot z^2 dy \quad (31)$$

integrací podle y dostaneme

$$\varphi_{2 \rightarrow 1} = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{x}{\sqrt{(x^2 + z^2)}} \arcsin \frac{y}{\sqrt{(x^2 + y^2 + z^2)}} + \frac{y}{\sqrt{(y^2 + z^2)}} \arcsin \frac{x}{\sqrt{(x^2 + y^2 + z^2)}} \right] \quad (32)$$

Vztah (32) je, výsledný úhlový součinitel $\varphi_{2 \rightarrow 1}$ (-) plochy S_2 rovnoběžné s rovinou S_1 .

Pro vyjádření úhlového součinitele $\varphi_{1 \rightarrow 2}$ plochy S_1 a S_2 , použijeme vztah (27), jehož úpravou dostaneme:

$$\varphi_{1 \rightarrow 2} = \frac{S_2 \varphi_{2 \rightarrow 1}}{S_1} \quad (-). \quad (33)$$

4.3.2 Záření zdroje na kolmou plochu

Uvažujme zdroj záření S_2 podle (obr.11), jenž je umístěn kolmo k jednomu z vrcholů plochy S_1 , která je má rozměr x, y . Zde platí stejný vztah jako u záření na rovnoběžnou plochu:

$$\varphi_{2 \rightarrow 1} = \varphi(S_2, S_1) = \frac{1}{\pi} \int_{S_1} \frac{\cos \Theta_1 \cos \Theta_2 dS_1}{r^2} \quad (-). \quad (34)$$

kde: $r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ - je vzdálenost plochy S_2 od elementu dS_1 (m),

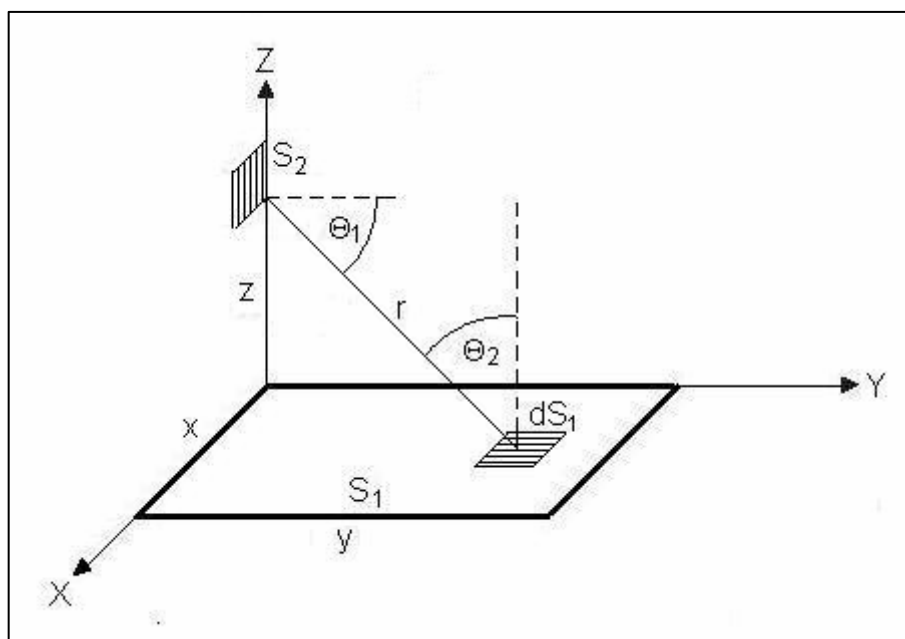
$dS_1 = dx \cdot dy$ - je plocha ozářeného elementu na S_1 (m²),

$\cos \Theta_1 = \frac{y}{r}$ - je úhel pod, kterým je element dS_1 ozářen,

$\cos \Theta_2 = \frac{z}{r}$ - je úhel pod, kterým je element dS_1 ozářen.

Pak

$$\varphi_{2 \rightarrow 1} = \varphi(S_2, S_1) = \frac{1}{\pi} \int_0^x \int_0^y \frac{zy \, dx dy}{(z^2 + x^2 + y^2)^2} \quad (-). \quad (35)$$



Obr. 11 Plocha zářícího zdroje S_2 kolmá k rovině S_1

Integrací vztahu (35) dostaneme:

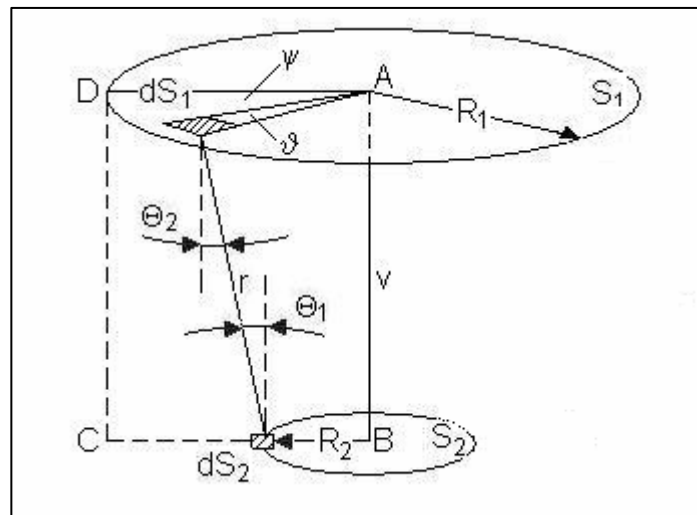
$$\varphi_{2 \rightarrow 1} = \frac{1}{2\pi} \left[\arcsin \frac{x}{\sqrt{(x^2 + z^2)}} - \frac{z}{\sqrt{(y^2 + z^2)}} \arcsin \frac{x}{\sqrt{(x^2 + y^2 + z^2)}} \right] (-). \quad (36)$$

Vztah (36) je, vyjádření úhlového součinitele $\varphi_{2 \rightarrow 1}$ plochy S_2 kolmé k rovině S_1 . Pro vyjádření úhlového součinitele $\varphi_{1 \rightarrow 2}$, můžeme opět použít vztah (27) a dostaneme:

$$\varphi_{1 \rightarrow 2} = \frac{S_2 \varphi_{2 \rightarrow 1}}{S_1} (-). \quad (37)$$

4.3.3 Záření elementu dS_2 na kruhový kotouč S_1 o poloměru R_1

Mějme roviny, kde jsou elementy dS_2 a dS_1 k sobě navzájem rovnoběžné a jsou od sebe vzdáleny na vzdálenost v . Normála procházející středem kotouče je ve vzdálenosti r_2 od elementu dS_2 . Poloha libovolného elementu dS_1 je určena poloměrem ϱ a úhlem ψ od referenční roviny ABCD



Obr. 12 Plocha S_2 a kruhový kotouč v rovině rovnoběžné s rovinou S_1

Podle obr. 12 lze určit:

kde: $r = \sqrt{v^2 + R_2^2 + \varrho^2 - 2.R_2.\varrho.\cos\Psi}$ - je vzdálenost plochy S_2 od elementu dS_1 (m),

$dS_1 = \varrho.d\Psi.d\varrho$ - je plocha ozářeného elementu na S_1 (m²),

$\cos\Theta_1 = \cos\Theta_2 = \frac{v}{r}$ - je úhel pod, kterým je element dS_1 ozářen.

Pak dostaneme:

$$\varphi_{2 \rightarrow 1} = \varphi(S_2, S_1) = \frac{1}{\pi} \int_0^{R_1} \int_0^{2\pi} \frac{v.\rho.d\Psi.d\rho}{(v^2 + R_2^2 + \varrho^2 - 2.R_2.\varrho.\cos\Psi)^2} (-), \quad (38)$$

Po integraci :

$$\varphi_{2 \rightarrow 1} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{v^2 + R_2^2 - R_1^2}{\sqrt{R_2^4 + 2.(v^2 - R_1^2).R_2^2 + (v^2 + R_1^2)^2}} \right) (-). \quad (39)$$

Vztah (39) je, vyjádření úhlového součinitele $\varphi_{2 \rightarrow 1}$ plochy S_2 a kotouče S_1 k sobě rovnoběžné. Je-li použita mála plocha jakožto to plocha senzoru je možné za R_2 dosadit 0. Použitím vztahu (27) pro uhlový součinitel $\varphi_{1 \rightarrow 2}$, tak dostaneme vztah:

$$\varphi_{1 \rightarrow 2} = \frac{S_2 \varphi_{2 \rightarrow 1}}{S_1} (-). \quad (40)$$

5 CHYBY BEZDOTYKOVÉHO NĚŘENÍ TEPLoty

Přesnost je závislá na následujících faktorech daných:

5.1 Měřeným předmětem:

- materiálem, tvarem, rozměry, umístěním v prostoru
- emisivitou, odrazivostí a propustností v měřeném místě povrchu předmětu
- směrovou závislostí, vyzařováním, polarizací záření
- úhlem mezi normálou měřeného povrchu a optickou osou pyrometru
- ovlivněním skutečné hodnoty emisivity drsností povrchu, stopami po opracování, poškrábáním, vrstvou barvy, oxidů, vody, oleje atd.

5.2 Prostředím:

- tlakem a vlhkostí vzduchu, plyny, prachem, vodní mlhou, atd.
- teplotou prostředí a teplotou pozadí předmětu
- vzdáleností mezi měřenou plochou a vstupním otvorem pyrometru
- působením dutin pecí, použitím žhavených trubek a ochranných tubusů.

5.3 Vlastním pyrometrem:

- citlivostí
- teplotní rozlišovací schopností
- šířkou a polohou spektrální oblasti
- nesprávným určením ε , λ_{ef}
- teplotou pláště přístroje
- polohou přístroje při měření
- parametry cejchovního zářiče

Emisivita povrchu měřené materiálu má podstatný vliv na výslednou chybu. Obvykle je teplotní chyba stanovená vůči černému tělesu ($\varepsilon = 1$). To je důvodem, proč většina pyrometrů má zabudovanou korekci na emisivitu měřeného tělesa. Problém spočívá v tom, že není známá skutečná hodnota emisivity povrchu měřeného tělesa.

5.4 Metody zmenšení teplotní chyby:

- stanovením emisivity pomocí tabulek
- stanovením emisivity pomocí skutečné teploty změřené např. dotykovým (kontaktním) způsobem (termočlánkem), převážně u stacionárních pyrometrů (se zabudováním korekcí do vyhodnocovacího programu)
- použitím poměrových pyrometrů
- použitím multispektrálních a učících se systémů
- měřením emisivity laserovým paprskem s následnou korekcí (např. pyrometr typu Pyrolaser).

5.5 Výpočet chyby měření

Absolutní chyba Δ_x se vypočítá jako mezi naměřenou x_m a skutečnou x_s hodnotou

$$\Delta_x = x_m - x_s \quad (41)$$

Relativní chyba δ_x bude vypočtena z podílu absolutní chyby a skutečné hodnoty

$$\delta_x = \frac{\Delta_x}{x_s} = \frac{x_m - x_s}{x_s} \quad (42)$$

Směrodatná odchylka *smodch* patří mezi náhodné chyby, to jsou chyby jež jsou způsobeny naprosto nahodile a lze je z těži předvídat

$$s \text{ mod } ch = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta^2 x_i}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (43)$$

Směrodatná odchylka aritmetického průměru *smodch_x*

$$s \text{ mod } ch_{\bar{x}} = \frac{s}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta(x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (44)$$

Výsledná chyba měření je součet *systematické a náhodné* složky, což lze zapsat:

$$\Delta_H = e + \varepsilon, \quad (45)$$

kde systematická složka $e = \bar{x} - x_s$ a náhodná složka $\varepsilon = s$, popř. $\varepsilon = 2s$.

6 PŘEDPOVĚĎ STŘEDNÍHO TEPELNÉHO POCITU (PMV)

6.1 Stanovení ukazatele PMV

PMV je ukazatel, který předpovídá střední tepelný pocit velké skupiny osob v následující sedmistupňové stupnici pro posuzování tepelného pocitu:

+ 3 horko

+ 2 teplo

+ 1 mírně teplo

0 neutrálně

- 1 mírně chladno

- 2 chladno

- 3 zima

Ukazatel PMV lze stanovit, když se odhadne aktivita (energetický výdej) a oděv (tepelný odpor) a změří se následující parametry prostředí: teplota vzduchu, střední radiální teplota, relativní rychlost proudění vzduchu a parciální tlak vodní páry (ISO 7726).

Ukazatel PMV je založen na tepelné rovnováze lidského těla. Člověk je v tepelné rovnováze, je-li vnitřní produkce tepla v jeho těle rovna ztrátě tepla do okolí.

V mírném tepelném prostředí termoregulační systém člověka automaticky mění teplotu kůže a vylučování potu, aby udržel tepelnou rovnováhu. V ukazateli PMV byla fyziologická odpověď termoregulačního systému statisticky vztažena k výsledkům posouzení tepelného pocitu, které poskytlo víc než 1 300 pokusných subjektů.

PMV je charakterizována rovnicí:

$$\begin{aligned}
 PMV = & (0,303 \cdot e^{-0,036M} + 0,028) \cdot \{ (M - W) - 3,05 \cdot 10^{-3} \cdot [5733 - 6,99(M - W) - p_a] \\
 & - 0,42 \cdot [(M - W) - 58,15] - 1,7 \cdot 10^{-5} M (5867 - p_a) \\
 & - 0,0014M(34 - t_a) - 3,96 \cdot 10^{-8} f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273,15)^4 - (\bar{t}_r + 273,15)^4] \\
 & - f_{cl} h_c (t_{cl} - t_a) \} \quad (46)
 \end{aligned}$$

Kde:

$$t_{cl} = 35,7 - 0,028(M - W) - I_{cl} \left\{ 3,96 \cdot 10^{-8} f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273,15)^4 - (\bar{t}_r + 273,15)^4] + f_{cl} h_c (t_{cl} - t_a) \right\}$$

$$h_c = \begin{cases} 2,38(t_{cl} - t_a)^{0,25} & \text{pro } 2,38(t_{cl} - t_a)^{0,25} > 12,1\sqrt{v_{ar}} \\ 12,1\sqrt{v_{ar}} & \text{pro } 2,38(t_{cl} - t_a)^{0,25} < 12,1\sqrt{v_{ar}} \end{cases}$$

$$f_{cl} = \begin{cases} 1,00 + 1,290I_{cl} & \text{pro } I_{cl} \leq 0,078m^2 \cdot ^\circ C / W \\ 1,05 + 0,645I_{cl} & \text{pro } I_{cl} > 0,078m^2 \cdot ^\circ C / W \end{cases}$$

Kde: PMV je předpověď středního tepelného pocitu;

M energetický výdej, ve wattech na metr čtvereční povrchu lidského těla;

W užitečný mechanický výkon („vnější práce“), ve wattech na metr čtvereční povrchu lidského těla (u většiny prací se rovná nule);

I_{cl} tepelný odpor oděvu, v metrech čtverečních a stupních Celsia na watt;

f_{cl} poměr povrchu oblečeného člověka k povrchu nahého člověka;

t_a teplota vzduchu, ve stupních Celsia;

\bar{t}_r střední radiační teplota, ve stupních Celsia;

v_{ar} relativní rychlost proudění vzduchu (vůči lidskému tělu), v metrech za sekundu;

p_a parciální tlak vodní páry, v Pascalech;

h_c součinitel přestupu tepla konvekcí, ve wattech na metr čtvereční a stupeň Celsia;

t_{cl} teplota povrchu oděvu, ve stupních Celsia.

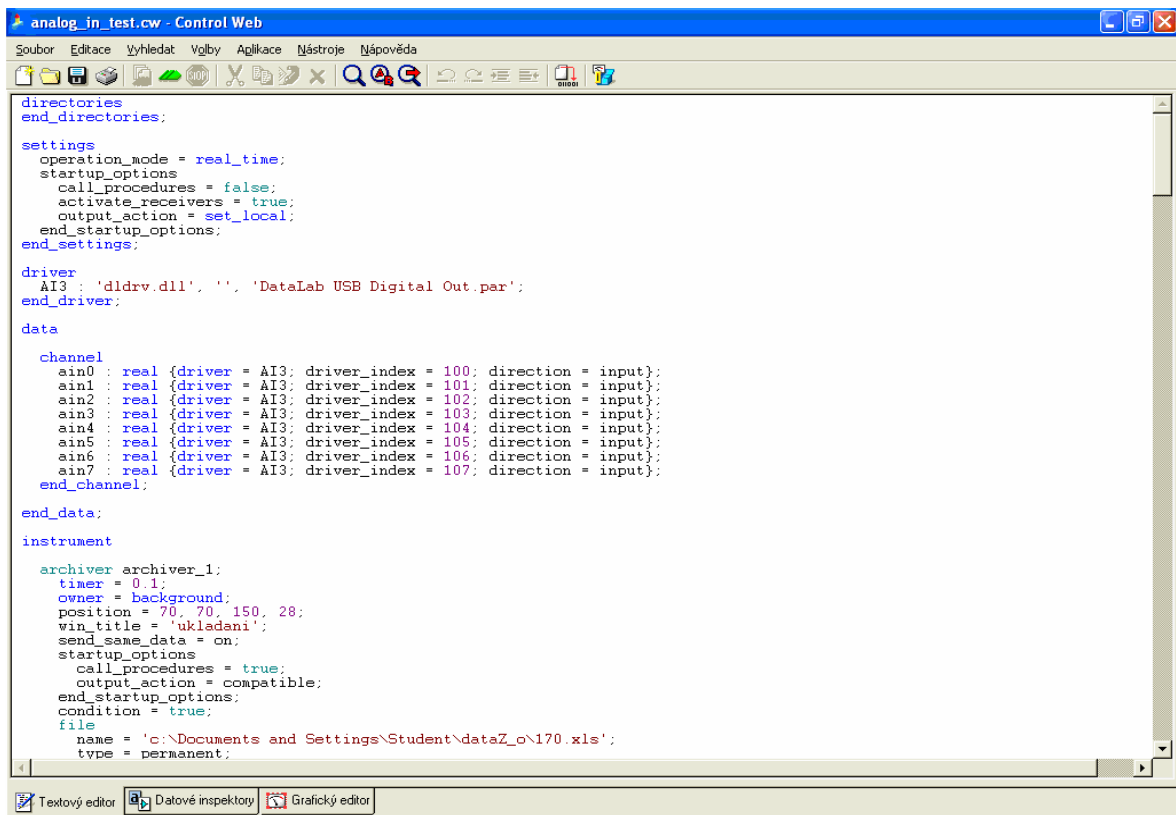
II. PRAKTICKÁ ČÁST

7 ANALÝZA ZADÁNÍ

Úkolem této práce je stanovení středního tepelného pocitu (PMV) a to pomocí měření střední radiační teploty v místnosti (v našem případě se jednalo o testovací poloprostor viz kap.7.1) pomocí senzorů termočláňkové baterie, které jsou umístěny v měřicí hlavici jsou napojeny na rozhraní DataLab, kde jsou snímaná hodnoty převáděny do počítače a následně zpracovány v programu Control Web. Zpracovaná data byly srovnány s daty vypočtenými. Ze srovnaných dat bude vypočten PMV, který se pohybuje v rozmezí nejvýše +3 až -3 viz. kapitola 6.

7.1 Popis prostředí Control Web

Prostředí Control Web se skládá ze tří rozhraní mezi kterými se může uživatel přepínat a to prostředí pro psaní zdrojového kódu (textový editor Obr. 13), prostředí pro nastavení parametrů a ovladačů (datové inspektory Obr. 14) a prostředí vizuální (grafický editor Obr. 15) ve kterém se může tvořit program stejně jako v prostředí textový editor.



```
analog_in_test.cw - Control Web
Soubor  Editace  Vyhledat  Volby  Aplikace  Nástroje  Nápověda

directories
end_directories;

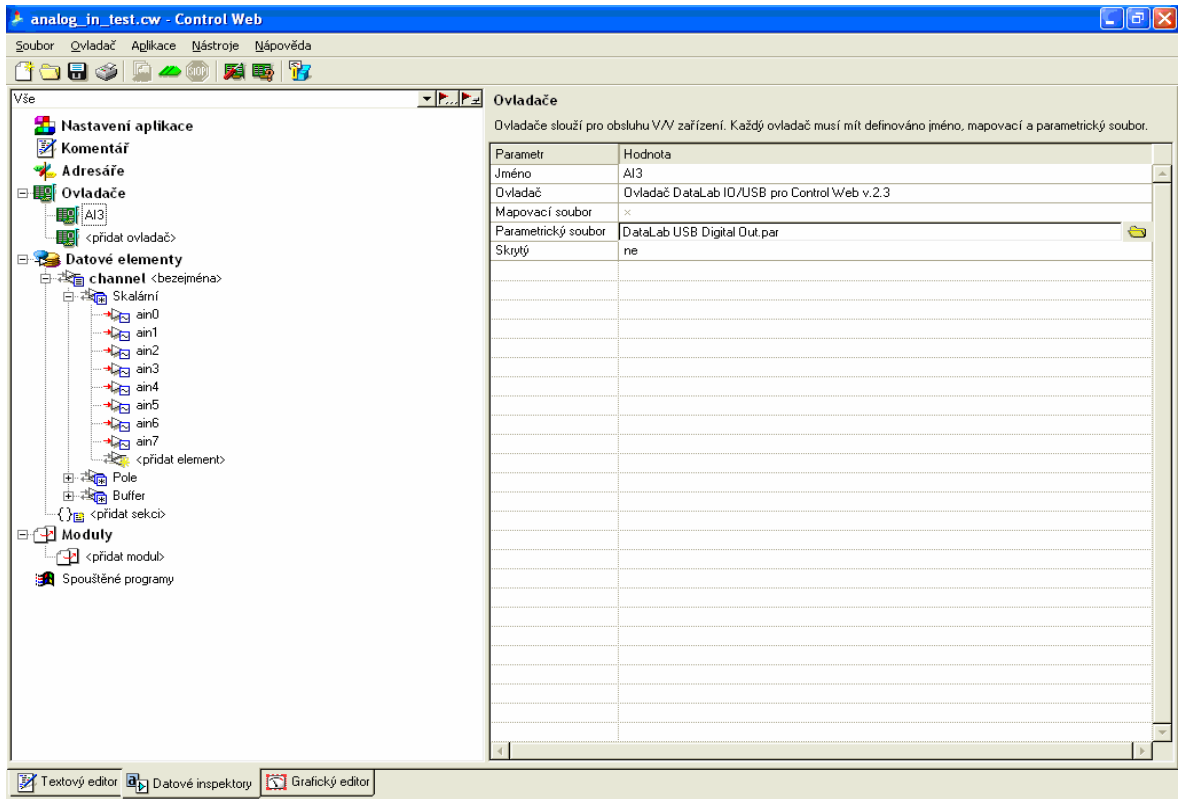
settings
  operation_mode = real_time;
  startup_options
    call_procedures = false;
    activate_receivers = true;
    output_action = set_local;
  end_startup_options;
end_settings;

driver
  AI3 : 'dldrv.dll', '', 'DataLab USB Digital Out.par';
end_driver;

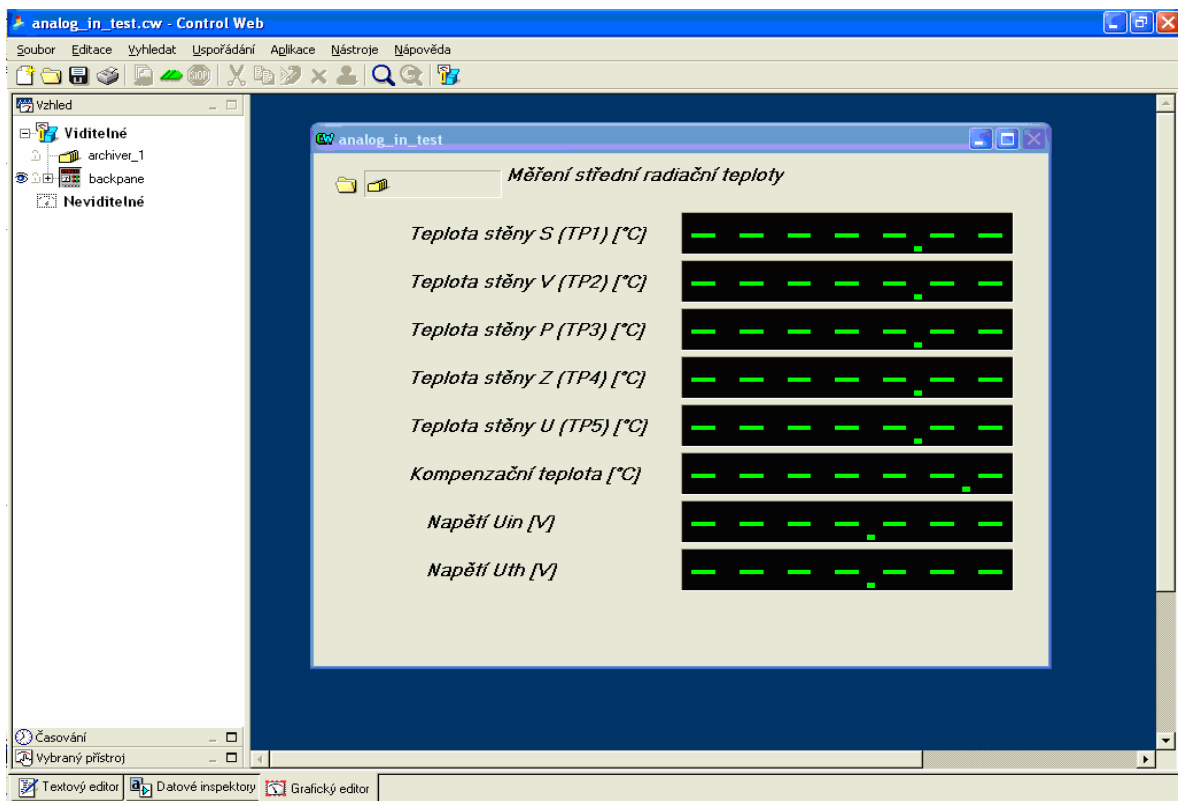
data
  channel
    ain0 : real {driver = AI3; driver_index = 100; direction = input};
    ain1 : real {driver = AI3; driver_index = 101; direction = input};
    ain2 : real {driver = AI3; driver_index = 102; direction = input};
    ain3 : real {driver = AI3; driver_index = 103; direction = input};
    ain4 : real {driver = AI3; driver_index = 104; direction = input};
    ain5 : real {driver = AI3; driver_index = 105; direction = input};
    ain6 : real {driver = AI3; driver_index = 106; direction = input};
    ain7 : real {driver = AI3; driver_index = 107; direction = input};
  end_channel;
end_data;

instrument
  archiver archiver_1;
  timer = 0.1;
  owner = background;
  position = 70, 70, 150, 28;
  win_title = 'ukladani';
  send_same_data = on;
  startup_options
    call_procedures = true;
    output_action = compatible;
  end_startup_options;
  condition = true;
  file
    name = 'c:\Documents and Settings\Student\dataZ_o\170.xls';
    type = permanent;
```

Obr. 13 Textový editor



Obr. 14 Datové inspektory



Obr. 15 Grafický editor

7.2 DataLab PC/IO(Průmyslový počítač se vstupně/výstupní jednotkou)

Jelikož měření teploty je děj spojitý, byl proto vybrán modul AI3- modul analogových vstupů jenž má vlastnosti:

- 8 analogových vstupů
- 16bitový převodník
- Bipolární diferenční vstupy
- Bipolární i unipolární rozsahy
- Galvanicky oddělená signálová část
- Napěťové rozsahy $\pm 0,1$ V až ± 10 V
- Proudové rozsahy ± 1 mA až ± 20 mA

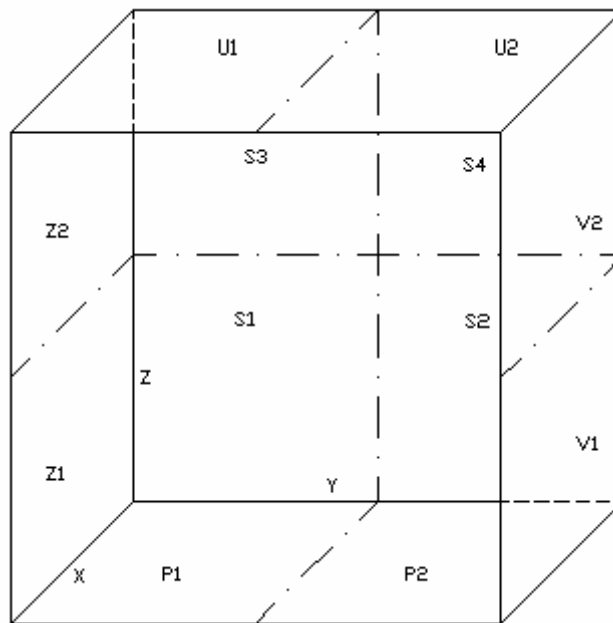
Modul AI3 obsahuje 8 diferenčních analogových vstupů. Pomocí propojek lze nastavit každý vstup zvlášť pro napěťový nebo proudový signál. Modul umožňuje nastavovat rozsahy jednotlivých vstupů a vypínat jejich měření. Vyřazení měření daného vstupu ovlivňuje rychlost, s jakou modul poskytuje měřená data.



Obr. 16 DataLab s krytem i bez něj

8 SESTAVENÍ TESTOVACÍHO POLOPROSTORU

Pro sestavení testovacího poloprostoru byl použit sádkartón o tloušťce 1,5cm, který je byl spojen pomocí kovových spojek. Vnitřní rozměr poloprostoru měl rozměr $X=118\text{cm}$, $Y=100\text{cm}$, $Z=98\text{cm}$. V poloprostoru se dále nacházela snímací hlavice s pěti termočlávkovými bateriemi a zářícím elementem.



Obr. 17 Nákres testovacího poloprostoru

Prostor byl rozdělen na více částí jak je patrné z Obr. 17, rozměry jednotlivých stěn:

$$S = S_1 + S_2 + S_3 + S_4 = Y \cdot Z = 1,0 \cdot 0,98 = 0,98 \text{ (m}^2\text{)},$$

$$P = P_1 + P_2 = X \cdot Y = 0,513 \cdot 1 = 0,513 \text{ (m}^2\text{)},$$

$$Z = Z_1 + Z_2 = X \cdot Z = 0,513 \cdot 0,98 = 0,503 \text{ (m}^2\text{)},$$

$$U = U_1 + U_2 = X \cdot Y = 0,513 \cdot 1 = 0,513 \text{ (m}^2\text{)},$$

$$V = V_1 + V_2 = X \cdot Z = 0,513 \cdot 0,98 = 0,503 \text{ (m}^2\text{)},$$

plocha celého snímaného prostoru je:

$$C = S + P + Z + U + V = 3,01148 \text{ (m}^2\text{)}. \quad (47)$$

9 REALIZACE VYHŘÍVÁNÍ PROSTORU

9.1 Zářící těleso

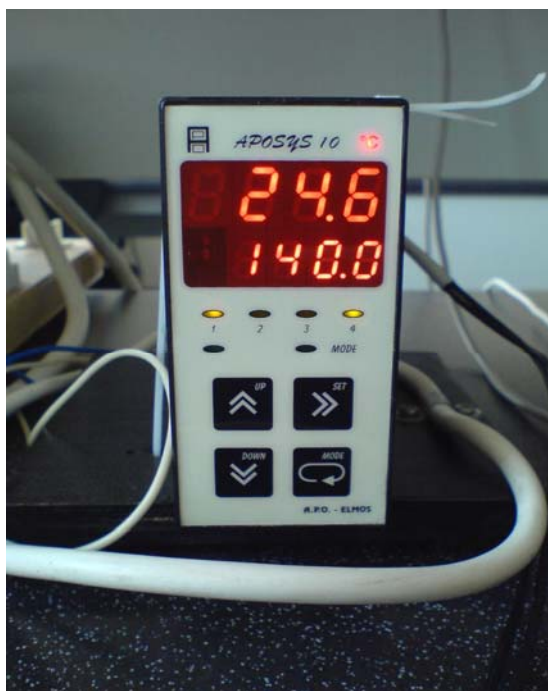
Jako zářící těleso byla použita kruhová plotýnka vyrobená z matného, drsného materiálu (litiny) o průměru 15 cm a emisivitě 0,8. Elektrické vyhřívání plotýnky se dělo pomocí topné spirály. Plotýnka je připevněna na konzolách, které se zavěsí za některou ze stěn jak je patrné na Obr. 18.



Obr. 18 Realizace plotýnky

9.2 Nastavování teploty na zářícím tělese

Teplota na zářícím tělese byla nastavována pomocí přístroje od firmy Elmos Obr.19. Na tomto přístroji je možné nastavit parametry PID regulátoru, podle kterého se daná teplota reguluje. Aktuální teplotu na plotýnce snímá platinový odporový senzor Pt100, jenž je zabudovaný v plotýnce a je připojen na k impulsnímu PID regulátoru. Regulace teploty se řídí unifikovaným proudovým signálem (4 až 20mA). Aktuální teplota je vyobrazena na vrchním řádku obr. 19 a na spodním je teplota, ke které se má plotýnka regulovat.



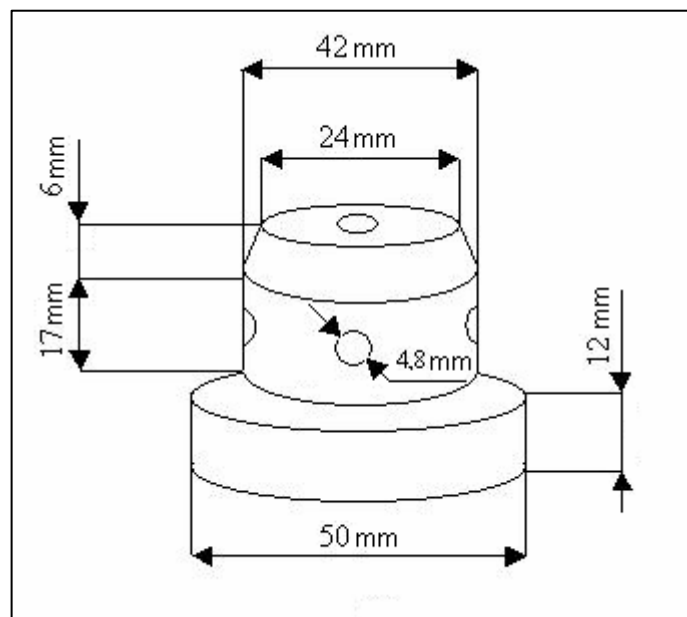
Obr. 19 Mikroprocesorový multi funkční
regulátor teploty

10 MODEL SNÍMAČE STŘEDNÍ RADIČNÍ TEPLoty

Model snímače střední radiční teploty je složen ze snímací hlavice, v níž je nainstalováno pět termočlánekových baterií Obr. 20, každá termočláneková baterie snímá tepelného záření z jedné z pěti stěn testovacího poloprostoru Obr. 17. Hlavice je vyrobena z hliníku z důvodu nízké emisivity povrchu, aby teplota hlavice byla stejná jako teplota okolí a nedocházelo tak vlivem snímaného tepelného záření k jejímu ohřevu.



Obr. 20 Hlavice snímače střední radiční teploty



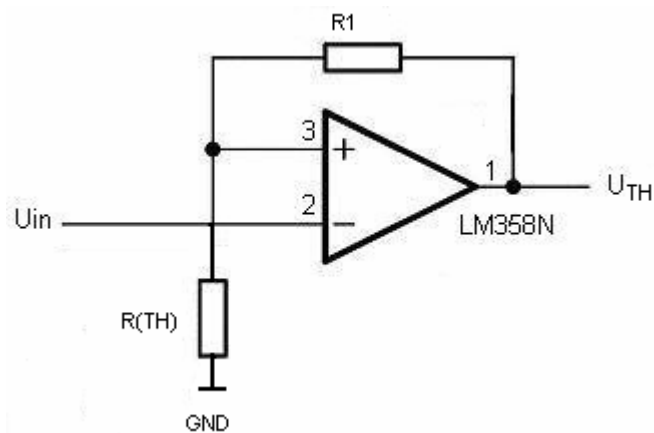
Obr. 21 Rozměry hlavice snímače střední radiční teploty

10.1 Senzor termočlánekové baterie TPS333

Jelikož termočláneková baterie snímá pouze rozdíl teplot mezi její teplotou a teplotou okolí je v každé z pěti termočlánekových baterií TPS333 zabudovaný také kompenzační odporový senzor neboli termistor, jenž měří aktuální teplotu hlavice. Tuto kompenzaci je zapotřebí uvažovat při výpočtech. Měření a výpočet kompenzace je uveden v kapitole 10.2. Na termistor je možno podle výrobce posílat proud od 1 do 5 μA . Protože proud procházející přes termistor se přemění v teplo pláště (krytu) termočlánekové baterie, je důležité, aby byl udržen tento zdroj teploty co nejmenší, tzn. musí se měřený proud držet na minimu.

10.2 Výpočet kompenzační teploty

Kompenzace je provedena tím způsobem, že se termistor je připojen na operační zesilovač kde se mění výstupní napětí U_{TH} úměrně s odporem termistoru $R(TH)$.



Obr. 22 Schéma zapojení teplotní kompenzace

Teplota okolí T_a lze vyjádřit z tohoto vztahu jako závislost odporu termistoru $R(TH)$ na teplotě okolí T_a :

$$R(TH) = R_{25} \cdot e^{\beta \cdot \left(\frac{1}{T_a} - \frac{1}{T_{25}} \right)} \quad (\Omega), \quad (48)$$

kde: $R_{25} = 100000 \text{ } (\Omega)$ - je odpor termistoru při teplotě 298,15 K,

$\beta = 3964 \text{ } (\text{K})$ – je materiálová konstanta termistoru,

T_a – je teplota okolí termistoru (K),

$T_{25} = 298,15 \text{ } (\text{K})$ – je teplotní konstanta.

Po úpravě vyjde vztah:

$$T_a = \frac{\beta \cdot T_{25}}{\ln \frac{R(TH)}{R_{25}} \cdot T_{25} + \beta} \text{ } (\text{K}). \quad (49)$$

Protože není možné změřit odpor termistoru přímo dosadíme za $R(TH)$ vztah, v němž se bude měnit výstupní napětí U_{TH} :

$$R(TH) = \frac{R_1 \cdot U_{in}}{U_{TH} - U_{in}} \text{ } (\text{K}). \quad (50)$$

kde: $R_1 = 99500 \text{ } (\Omega)$

U_{in} – vstupní nezesílené napětí (V)

U_{TH} – výstupní zesílené napětí (V)

Dosazením vztahu (50) do (49):

$$T_a = \frac{\beta \cdot T_{25}}{\ln \frac{U_{TH} - U_{in}}{R_{25}} \cdot T_{25} + \beta} \text{ } (\text{K}). \quad (51)$$

Dosažením byla vypočítána kompenzační teplota:

$$T_a = \frac{3964 \cdot 298,15}{99500 \cdot 0,245} = 298,15 K$$

$$\ln \frac{0,491 - 0,245}{100000} \cdot 298,15 + 3964$$

$$t_a = T_a - 273,15 = 25^\circ C$$

Technické parametry termočláňkové baterie TPS333 stanovené výrobcem jsou uvedeny v Příloha P I.

10.3 Prostorové měření

Ke stanovení střední radiační teploty jako pro celek je nutné měřit každou stěnu z testovacího poloprostoru zvlášť, jelikož každá stěna vyzařuje tepelné záření s rozdílnou intenzitou. Proto byla každá stěna rozdělena ještě na další části. Pro snímání teploty byl použit model snímače střední radiační teploty obr. 20. Pro výpočet střední radiační teploty bylo nutné stanovit rozměry stěn (kapitola 8), umístění a vzdálenost zářícího tělesa od snímače. Jako zářící těleso byla použita plotýnka (kruhového tvaru) St , která byla umístěna na stěnu S , Z a V . Snímač s byl umístěn na stojanu ve stejné výšce jako zářící předmět St , vzdálenost od zářícího předmětu byla zvolena libovolně. A to: při umístění na stěně S (pozice A) byl snímač vzdálen 51 cm, při umístění na stěně Z (pozice B) ve vzdálenosti 39,6 cm a při umístění na stěně V (pozice C) ve vzdálenosti 50,7 cm.

Pro lepší orientaci a určování poměrů záření mezi snímačem a měřeným prostorem byly jednotlivé senzory termočláňkové baterie s označeny:

- TP_I – senzor který má aktivní plochu (plocha senzoru) rovnoběžnou s plochou stěny S a plochy, jejichž povrch se vypočítá vztahem:

$$C_I = S + Z + V + U + P \text{ (m}^2\text{)} \quad (52)$$

- TP_2 – senzor který má aktivní plochu rovnoběžnou s plochou stěny V , a plochy, jejichž povrch se vypočítá vztahem:

$$C_2 = V + P_2 + S_2 + S_4 + U_2 \text{ (m}^2\text{)}$$

- TP_3 – senzor který má aktivní plochu rovnoběžnou s plochou stěny P a plochy, jejichž povrch se vypočítá vztahem:

$$C_3 = P + Z_2 + S_1 + S_2 + V_1 \text{ (m}^2\text{)},$$

- TP_4 – senzor který má aktivní plochu rovnoběžnou s plochou stěny Z a plochy, jejichž povrch se vypočítá vztahem:

$$C_4 = Z + P_1 + S_1 + S_3 + U_1 \text{ (m}^2\text{)},$$

- TP_5 – senzor který má aktivní plochu rovnoběžnou s plochou stěny U a plochy, jejichž povrch se vypočítá vztahem:

$$C_5 = U + Z_4 + S_3 + S_4 + V_3 \text{ (m}^2\text{)}.$$

11 VÝPOČET STŘEDNÍ RADIČNÍ TEPLoty SNÍMANÉHO PROSTORU

Pro výpočet střední radiční teploty bylo vycházeno z poznatků získaných v kapitole 4 a za předpokladu, že celkové tepelné toky záření $Q_{C \rightarrow s}^x$ z jednotlivých měřených stěn, jsou rovny jejich součtu $Q_{C \rightarrow s}^x = Q_{C \rightarrow s, 1}^x + Q_{C \rightarrow s, 2}^x + Q_{C \rightarrow s, 3}^x + Q_{C \rightarrow s, 4}^x + Q_{C \rightarrow s, 5}^x$. Tím bylo možné určit i střední radiční teplotu v tomto celém poloprostoru.

11.1 Teoretický příklad výpočtu střední radiční teploty celého snímaného prostoru

Nechť platí:

$$\bar{Q}_C^x = Q_{C \rightarrow s}^x = \sum_{i=1}^5 Q_{C,i \rightarrow TPi}^x \quad (\text{W}), \quad (53)$$

resp.:

$$\delta_0 \cdot \bar{\varepsilon}_C^x \cdot (\bar{T}_r^x)^4 \cdot S_C \cdot \varphi_{C \rightarrow s} = Q_{C \rightarrow s}^x = \sum_{i=1}^5 Q_{C,i \rightarrow TPi}^x \quad (\text{W}),$$

pak pro střední radiční teplotu \bar{T}_r^x platí:

$$\bar{T}_r^x = \sqrt[4]{\frac{Q_{C \rightarrow s}^x}{\delta_0 \cdot \bar{\varepsilon}_C^x \cdot S_C \cdot \varphi_{C \rightarrow s}}} \quad (\text{K}). \quad (54)$$

kde: $Q_{C \rightarrow s}^x = 5,99251 \cdot 10^{-4}$ (W) – je celkový zářivý tepelný tok dopadající na snímač s ,

$\delta_0 = 5,67032 \cdot 10^{-8}$ W.m⁻².K⁻⁴ – je Stefan – Boltzmanova konstanta,

$\bar{\varepsilon}_C^x = 0,9094$ (-) – je teoretická emisivita měřeného poloprostoru udávaná výrobcem,

$S_C = C$ (m²) – je celková plocha snímaného prostoru C (dle vztahu 42):

$\varphi_{C \rightarrow s}$ – je úhlový součinitel mezi plochou prostoru C a snímačem s (-),

$S_C \cdot \varphi_{C \rightarrow s}$ – je pak přímá výměnná plocha (m^2).

11.1.1 Příklad výpočtu úhlového součinitele pro polohu A

Úhlový součinitel jsem počítal zvlášť jak pro každou část stěny (dílní element), tak pro každý senzor. Vycházel jsem z poznatků získaných v kapitole 4.

Vycházel jsem ze vztahu 39:

$$\varphi_{TP1 \rightarrow St} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{x^2 + r_s^2 - r_t^2}{\sqrt{r_s^4 + 2 \cdot (x^2 - r_t^2) \cdot r_s^2 + (x^2 + r_t^2)^2}} \right) (-), \quad (55)$$

kde: $x = 0,51$ (m) – je vzdálenost senzoru TP_1 od zářícího tělesa St ,

$r_t = d_t/2 = 0,075$ (m) - je poloměr zářícího tělesa St ,

r_s – je poloměr senzoru TP (m)

x – vzdálenost senzoru od zářícího tělesa(m).

Za předpokladu že senzor je natolik malý, tedy $r_s = 0$ (m) mějme:

$$\varphi_{TP1 \rightarrow St} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{0,51^2 - 0,075^2}{\sqrt{(0,51^2 + 0,075^2)^2}} \right) = 0,02117 (-).$$

Pak $\varphi_{St \rightarrow TP1}$ jsem mohl určit ze vztahu (40) jako:

$$\varphi_{St \rightarrow TP1} = \frac{S_{TP1} \varphi_{TP1 \rightarrow St}}{S_t} (-), \quad (56)$$

kde: $S_{TP1} = 4,9 \cdot 10^{-7} (m^2)$ – je plocha senzoru TP ,

S_t – je plocha zářícího tělesa (m^2), dána jako:

$$S_t = r_t^2 \cdot \pi = 0,075^2 \cdot 3,14 = 0,0176625 \text{ (m}^2\text{)},$$

pak

$$\varphi_{S_t \rightarrow TP_1} = \frac{4,9 \cdot 10^{-7} \cdot 0,02117}{0,0176625} = 5,873 \cdot 10^{-7} \text{ (-)}.$$

Další úhlový součinitel $\varphi_{TP_1 \rightarrow S_t}$, $\varphi_{S_t \rightarrow TP_1}$ a to je úhlový součinitel mezi senzorem TP_1 a ostatními dílčími plochami severní stěny S .

Pro $\varphi_{TP_1 \rightarrow S_1}$ dle vztahu (32) platí:

$$\varphi_{TP_1 \rightarrow S_1} = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{x}{\sqrt{(x^2 + z^2)}} \arcsin \frac{y}{\sqrt{(x^2 + y^2 + z^2)}} + \frac{y}{\sqrt{(y^2 + z^2)}} \arcsin \frac{x}{\sqrt{(x^2 + y^2 + z^2)}} \right] \quad (57)$$

Dosazením

$$x = 0,51 \text{ m,}$$

$$y = 0,5 \text{ m,}$$

$$z = 0,49 \text{ m}$$

jež jsou souřadnice polohy senzoru v poloprostoru získáme výsledek:

$$\varphi'_{TP_1 \rightarrow S_1} = 0,14226 \text{ (-)}.$$

Od výsledného úhlového součinitele je nutné odečíst ještě část (přesněji 1/4) úhlového součinitele kruhového zářícího předmětu.

$$\varphi_{TP_1 \rightarrow S_1} = \varphi'_{TP_1 \rightarrow S_1} - \frac{1}{4} \varphi_{TP_1 \rightarrow S_t} = 0,14226 - \frac{1}{4} \cdot 0,02117 = 0,13697 \text{ (-)}.$$

Výsledek byl dosazen do upraveného vztahu (40):

$$\varphi_{S_1 \rightarrow TP_1} = \frac{S_{TP_1} \varphi_{TP_1 \rightarrow S_1}}{S_1} (-), \quad (58)$$

Kde od S_1 se musí odečíst $\frac{1}{4}$ plochy zářícího předmětu:

$$S_1 = \frac{1}{4} S - \frac{1}{4} S_t = \frac{1}{4} \cdot 0,98 - \frac{1}{4} \cdot 0,01766 = 0,24058 \text{ (m}^2\text{)},$$

Úpravou a dosazením vztahu (52) získáme výsledek úhlového součinitele pro plochu S_1 :

$$\varphi_{S_1 \rightarrow TP_1} = \frac{4,9 \cdot 10^{-7} \cdot 0,13697}{0,24058} = 2,78973 \cdot 10^{-7} (-).$$

Podobným postupem jsem vypočítal úhlový součinitel pro plochy S_2 , S_3 , S_4 jejichž sečtením :

$$\varphi_{TP_1 \rightarrow S} = \varphi_{TP_1 \rightarrow S_1} + \varphi_{TP_1 \rightarrow S_2} + \varphi_{TP_1 \rightarrow S_3} + \varphi_{TP_1 \rightarrow S_4} + \varphi_{TP_1 \rightarrow S_t} (-), \quad (59)$$

který se dále po vyčíslení rovná:

$$\varphi_{TP_1 \rightarrow S} = 0,56162 (-),$$

$$\varphi_{S \rightarrow TP_1} = \varphi_{S_1 \rightarrow TP_1} + \varphi_{S_2 \rightarrow TP_1} + \varphi_{S_3 \rightarrow TP_1} + \varphi_{S_4 \rightarrow TP_1} + \varphi_{S_t \rightarrow TP_1} (-), \quad (60)$$

a $\varphi_{S \rightarrow TP_1}$ je pak vyjádřeno obdobným způsobem:

$$\varphi_{S \rightarrow TP_1} = 1,688 \cdot 10^{-6} (-).$$

Pro výpočet všech zbylých částí stěn Z_1 , Z_2 , V_1 , V_2 , U_1 , U_2 , P_1 , P_2 , kolmých vůči senzoru TP , jenž se nachází ve snímaném poloprostoru byl použit následující vztah, který vychází z kapitoly 4.3.2:

$$\varphi_{TP1 \rightarrow Z1} = \frac{1}{2\pi} \left[\arcsin \frac{x}{\sqrt{(x^2 + z^2)}} - \frac{z}{\sqrt{(y^2 + z^2)}} \arcsin \frac{x}{\sqrt{(x^2 + y^2 + z^2)}} \right] (-), \quad (61)$$

Do vztahu byly dosazeny souřadnice x, y, z pro danou plochu:

$$\varphi_{TP1 \rightarrow Z1} = 0,05642 (-),$$

Výsledek byl dosazen do upraveného vztahu (40):

$$\varphi_{Z1 \rightarrow TP1} = \frac{S_{TP1} \varphi_{TP1 \rightarrow Z1}}{Z_1} (-), \quad (62)$$

Kde od S_I se musí odečíst $\frac{1}{4}$ plochy zářícího předmětu:

$$Z_I = \frac{1}{2} \cdot Z = \frac{1}{2} \cdot 0,4998 = 0,2499 \text{ (m}^2\text{)},$$

Úpravou a dosazením vztahu (56) získáme výsledek úhlového součinitele pro plochu Z_I :

$$\varphi_{Z1 \rightarrow TP1} = \frac{4,9 \cdot 10^{-7} \cdot 0,05642}{0,2499} = 1,10632 \cdot 10^{-7} (-),$$

Všechny zbylé plochy byly vypočítány stejným způsobem a dosazeny do následujícího vztahu pro výpočet $\varphi_{TP1 \rightarrow CI}$:

$$\varphi_{TP1 \rightarrow CI} = \varphi_{TP1 \rightarrow S} + \varphi_{TP1 \rightarrow P} + \varphi_{TP1 \rightarrow Z} + \varphi_{TP1 \rightarrow U} + \varphi_{TP1 \rightarrow V} (-), \quad (63)$$

dále pak:

$$\varphi_{CI \rightarrow TP1} = \varphi_{S \rightarrow TP1} + \varphi_{P \rightarrow TP1} + \varphi_{Z \rightarrow TP1} + \varphi_{U \rightarrow TP1} + \varphi_{V \rightarrow TP1} (-), \quad (64)$$

Po jejichž vyčíslení:

$$\varphi_{TP1 \rightarrow CI} = 1,01825 (-),$$

$$\varphi_{CI \rightarrow TP1} = 4,98944 \cdot 10^{-7} (-).$$

Celkový úhlový součinitel je součinitelem mezi všemi senzory a celým poloprostorem byl určen součtem $\varphi_{TP1 \rightarrow C1}$, $\varphi_{TP2 \rightarrow C2}$, $\varphi_{TP3 \rightarrow C3}$, $\varphi_{TP4 \rightarrow C4}$, $\varphi_{TP5 \rightarrow C5}$:

$$\varphi_{s \rightarrow C} = \varphi_{TP1 \rightarrow C1} + \varphi_{TP2 \rightarrow C2} + \varphi_{TP3 \rightarrow C3} + \varphi_{TP4 \rightarrow C4} + \varphi_{TP5 \rightarrow C5} \quad (-), \quad (65)$$

a současně, pak platí:

$$\varphi_{C \rightarrow s} = \varphi_{C1 \rightarrow TP1} + \varphi_{C2 \rightarrow TP2} + \varphi_{C3 \rightarrow TP3} + \varphi_{C4 \rightarrow TP4} + \varphi_{C5 \rightarrow TP5} \quad (-), \quad (66)$$

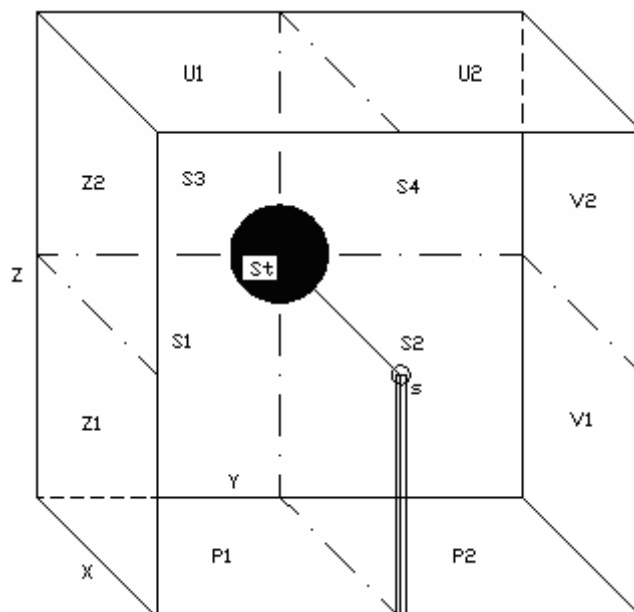
Dosazením do vztahů (65, 66) vyšlo:

$$\varphi_{s \rightarrow C} = 3,00152 \quad (-),$$

$$\varphi_{C \rightarrow s} = 6,44903 \cdot 10^{-6} \quad (-).$$

11.2 Výpočet střední radiční teploty pro umístění zářícího tělesa v místě *A*

V případě měření v místě *A* byla snímací hlavice od zářícího tělesa vzdálena 51 cm. Zářící těleso bylo zavěšeno na stěně *S* jak je patrné z Obr. 20



Obr. 23 Umístění zářícího tělesa na pozici *A*

Příklad výpočtu první hodnoty teoretické střední radiční teploty ze vztahu 54:

$$\bar{T}_r^\times = \sqrt[4]{\frac{Q_{C \rightarrow s}^\times}{\delta_0 \cdot \bar{\varepsilon}_C^\times \cdot S_C \cdot \varphi_{C \rightarrow s}}} \quad (\text{K}).$$

Kde:

$Q_{C \rightarrow s}^\times = 5,994 \cdot 10^{-4}$ (W) – celkový zářivý tepelný tok dopadající na snímač s ,

$\delta_0 = 5,67032 \cdot 10^{-8}$ W.m⁻².K⁻⁴ – je Stefan – Boltzmanova konstanta,

$\bar{\varepsilon}_C^\times = 0,9094$ (-) – je teoretická emisivita měřeného poloprostoru udávaná výrobcem,

$S_C = C$ (m²) – plocha celého snímaného poloprostoru C ,

$\varphi_{C \rightarrow s}$ – je úhlový součinitel mezi plochou poloprostoru C a snímačem s (-),

$S_C \cdot \varphi_{C \rightarrow s}$ – je pak přímá výměnná plocha, jenž se vypočítá podle vztahu (67) (m²).

$$S_C \cdot \varphi_{C \rightarrow s} = s \cdot \varphi_{s \rightarrow C} = \sum_{i=1}^5 s \cdot \varphi_{TPi \rightarrow C, i} \quad (\text{m}^2), \quad (67)$$

kde: $s = 4,9 \cdot 10^{-7}$ (m²) – je plocha snímače,

$\varphi_{s \rightarrow C} = 3,00152164$ (-) – je úhlový součinitel mezi plochou snímače s a poloprostorem C ,

$$s \cdot \varphi_{s \rightarrow C} = 1,47075 \cdot 10^{-6} \quad (-),$$

Příklady vypočítání úhlových součinitelů byly uvedeny v kapitole 12.1.1

Do nějž byly dosazeny hodnoty:

$$\bar{T}_r^\times = \sqrt[4]{\frac{5,994 \cdot 10^{-4}}{5,67032 \cdot 10^{-8} \cdot 0,9094 \cdot 1,47075 \cdot 10^{-6}}} = 298,1697(\text{K})$$

$$\bar{t}_r^\times = \bar{T}_r^\times - 273,15 = 298,1697 - 273,15 = \underline{25,0297}(\text{°C})$$

Příklad výpočtu první hodnoty naměřené střední radiační teploty ze vztahu (54). V tomto případě bylo nutné do vztahu přičíst teplotu z kompenzačního termistoru, jenž je podrobněji popsána v kapitole (10.2). Teplota naměřená každým z pěti byla přepočítána na stupně Celsia přímo v programu Control Web podle uvedených vztahů (68) a (51). Podrobné výpočty jsou uloženy v programu MS Excel na přiloženém CD-ROM disku.

$$T_{rTP1} = \sqrt[4]{\frac{U_{TP1}}{\delta_0 \cdot \bar{\epsilon}_C \cdot S_C \cdot \varphi_{C \rightarrow s}} + T_a^4} \quad (\text{K}). \quad (68)$$

Kde: $U_{TP1} = 0,04659 \cdot 10^{-3}$ (V) – napětí vyvolané zářivým tepelným tokem dopadající na senzor $TP1$,

$\bar{\epsilon}_C = 0,815$ (-) – je skutečná emisivita měřeného poloprostoru,

Kompenzační teplota vypočítaná dle vztahu (51):

$$T_a = \frac{3964,298,15}{\frac{99500,0,245}{\ln \frac{0,4837 - 0,245}{100000}} \cdot 298,15 + 3964} = 297,4942 \quad (\text{K})$$

Dosazením byla vypočítána teplota pro stěnu S čili $TP1$:

$$T_{rTP1} = \sqrt[4]{\frac{0,04659 \cdot 10^{-3}}{5,67032 \cdot 10^{-8} \cdot 0,815 \cdot 1,4075 \cdot 10^{-6}} + 297,4942^4} = 298,1833 \quad (\text{K})$$

$$t_{rTP1} = T_{rTP1} - 273,15 = 298,1833 - 273,15 = 25,0333 \quad (^\circ\text{C}).$$

Celková radiační teplota pro $T_w = 25^\circ\text{C}$, vznikla průměrem teplot ze všech stěn.

$$\bar{t}_r = \frac{t_{rTP1} + t_{rTP2} + t_{rTP3} + t_{rTP4} + t_{rTP5}}{5} \quad (^\circ\text{C}). \quad (69)$$

Dosazením teplot změřených jednotlivými senzory vyjde střední radiační teplota

$$\bar{t}_r = \frac{25,0333 + 25,0463 + 24,4624 + 24,6982 + 25,2116}{5}$$

$$\bar{t}_r = 24,8904 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

Tabulka 1: Naměřená střední radiální teplota pro umístění A

<i>tw</i> (°C)	<i>t-dotykem</i> (°C)	<i>t_stěnyS(TP1)</i> (°C)	<i>t_stěnyV(TP2)</i> (°C)	<i>t_stěnyP(TP3)</i> (°C)	<i>t_stěnyZ(TP4)</i> (°C)	<i>t_stěnyU(TP5)</i> (°C)	<i>t_kompez.</i> (°C)	<i>tr-namer</i> (°C)
25	23,9	25,0333	25,0463	24,4624	24,6982	25,2116	24,3442	24,8904
30	30,00	25,2476	25,0728	24,5734	24,7665	25,2434	24,6388	24,9807
40	40,00	25,2979	25,3681	24,9018	25,0732	25,5640	24,9287	25,2410
50	50,00	26,1693	25,0846	24,7480	24,8391	25,6089	24,7304	25,2900
60	60,00	26,6360	25,3604	24,7900	25,4058	25,7472	24,7073	25,5879
70	72,20	27,5370	25,2342	24,8305	24,9783	25,5457	24,7387	25,6251
80	82,00	28,4898	25,2310	24,7588	24,9671	25,5087	24,7749	25,7911
90	93,50	29,0506	25,5135	25,0386	25,2507	25,8177	24,8643	26,1342
100	100,50	29,9093	25,5151	25,1734	25,3159	25,9341	24,8449	26,3696
110	112,20	30,8912	25,4888	25,1788	25,3240	25,9540	24,8594	26,5673
120	120,60	31,8207	25,3418	25,0587	25,2084	25,8431	24,8942	26,6546
130	130,00	32,3353	25,7407	25,3432	25,5651	26,1569	24,9338	27,0282
140	140,20	33,3958	25,4181	25,1558	25,3080	25,9746	24,9833	27,0505
150	150,50	34,6170	25,6204	25,2919	25,4803	26,1358	25,0397	27,4291
160	160,30	35,4828	25,4917	25,1949	25,4209	26,0254	25,0655	27,5231
170	170,00	36,9963	25,7014	25,4135	25,6587	26,3457	25,0671	28,0231

Tabulka 2: Teoretická a naměřená střední radiální teplota pro umístění A

<i>tr-teoret.</i> (°C)	<i>tr-namer</i> (°C)	Δtr (°C)
25,0297	24,8904	0,1393
25,0855	24,9807	0,1048
25,1951	25,2410	-0,0459
25,3423	25,2900	0,0523
25,4657	25,5879	-0,1221
25,6111	25,6251	-0,0140
25,7679	25,7911	-0,0231
25,9366	26,1342	-0,1976
26,1175	26,3696	-0,2521
26,3111	26,5673	-0,2562
26,5179	26,6546	-0,1367
26,7383	27,0282	-0,2900
26,9727	27,0505	-0,0777
27,2183	27,4291	-0,2108
27,4756	27,5231	-0,0475
27,6983	28,0231	-0,3248
	<i>průměr</i>	-0,1064
	<i>max</i>	0,1393
	<i>min</i>	-0,3248
	<i>smodch</i>	0,1367

Legenda k tabulkám 1,2,3,4,5 a 6:

t_W – žádaná teplota na zářícím tělese (plotýnce) ($^{\circ}\text{C}$),

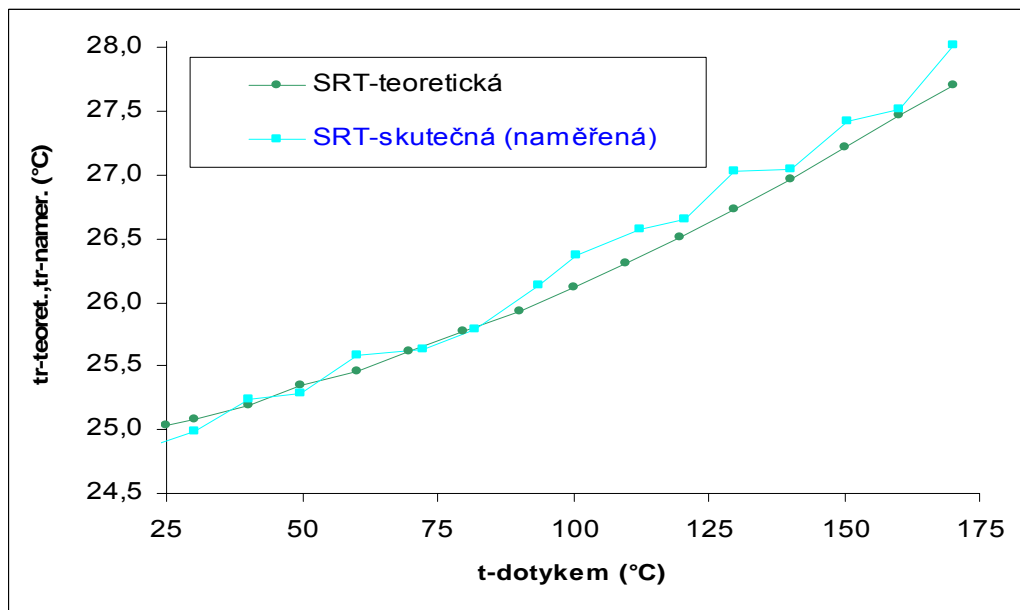
$t_{DOTYKEM}$ – teplota plotýnky naměřená senzorem Pt100 ($^{\circ}\text{C}$),

$t_{stěnyS,V,P,Z,U(1,2,3,4,5)}$ – teplota stěny S, V, P, Z, U změřená senzorem $1, 2, 3, 4, 5$ ($^{\circ}\text{C}$),

$t_{kompez.}$ – teplota okolí neboli kompenzační určená termistorem ($^{\circ}\text{C}$),

\bar{t}_r -namer. – průměrná naměřená střední radiální teplota ($^{\circ}\text{C}$),

\bar{t}_r^{\times} -teoret. – teoretická střední radiální teplota ($^{\circ}\text{C}$).

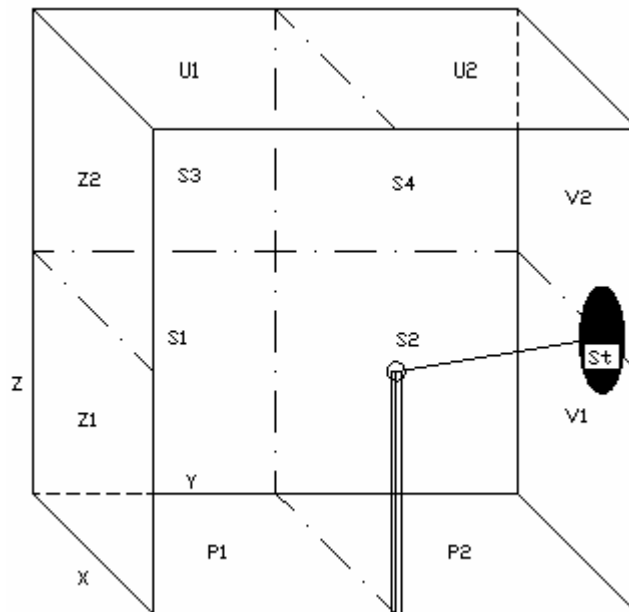


Obr. 24 Závislost střední radiální teoretické a naměřené na

$t_{dotykem}$ v místě A

11.3 Výpočet střední radiační teploty pro umístění zářícího tělesa v místě *B*

V případě měření v místě *B* byla snímací hlavice od zářícího tělesa vzdálena 39,6 cm. Zářící těleso bylo zavěšeno na stěně *V* jak je patrné z Obr. 22. Při výpočtech bylo postupováno stejným způsobem jako v případě umístění *A*.



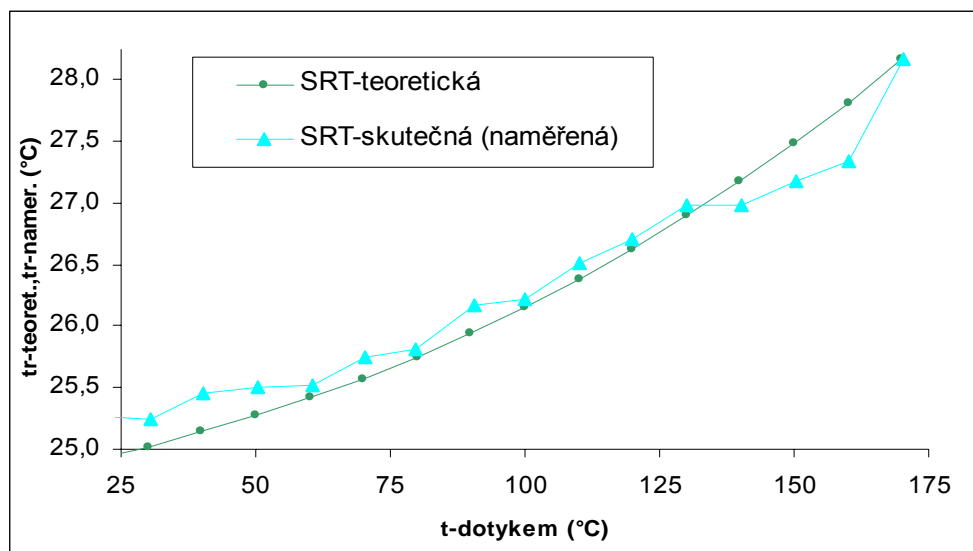
Obr. 25 Umístění zářícího tělesa na pozici *B*

Tabulka 3: Naměřená střední radiační teplota pro umístění *B*

<i>tw</i> (°C)	<i>t-dotykem</i> (°C)	<i>t stěnyS(TP1)</i> (°C)	<i>t stěnyV(TP2)</i> (°C)	<i>t stěnyP(TP3)</i> (°C)	<i>t stěnyZ(TP4)</i> (°C)	<i>t stěnyU(TP5)</i> (°C)	<i>t kompez.</i> (°C)	<i>tr-namer</i> (°C)
25	24,00	24,7753	25,3289	25,3054	25,2573	25,6738	24,3490	25,2681
30	30,50	24,7564	25,5473	25,1900	25,1061	25,6000	24,3984	25,2400
40	40,30	24,8608	26,2585	25,2537	25,2285	25,6657	24,4236	25,4535
50	50,40	24,8120	26,7505	25,1621	25,1118	25,6489	24,4677	25,4970
60	60,50	24,7173	27,2894	25,0462	25,0226	25,5438	24,5511	25,5238
70	70,20	24,7833	27,4444	25,0196	25,5162	25,9645	24,5863	25,7456
80	79,80	24,8964	28,3953	24,9594	25,0362	25,7417	24,8515	25,8058
90	90,50	24,9930	29,6403	25,0979	25,2024	25,9142	24,8391	26,1696
100	100,10	24,9830	30,0770	25,0142	25,1909	25,7891	24,9379	26,2108
110	110,00	25,0967	31,2033	25,0431	25,2507	25,9612	25,0038	26,5110
120	120,00	25,0953	32,0898	25,0365	25,2271	26,0908	25,0205	26,7079
130	130,20	25,1525	33,2355	25,0294	25,3176	26,1749	25,1406	26,9820
140	140,10	25,0139	34,0018	24,8645	25,0967	25,9569	25,1225	26,9867
150	150,20	24,9951	34,9973	24,8289	25,0575	26,0408	25,1285	27,1839
160	160,10	24,9108	36,0505	24,6341	25,0418	26,0407	25,2473	27,3356
170	170,30	25,5968	37,7281	25,2989	25,7052	26,5250	25,2289	28,1708

Tabulka 4: Teoretická a naměřená střední radiální teplota pro umístění B

<i>tr-teoret.</i> (°C)	<i>tr-namer</i> (°C)	Δtr (°C)
24,9697	25,2681	-0,2984
25,0241	25,2400	-0,2159
25,1405	25,4535	-0,3129
25,2708	25,4970	-0,2262
25,4156	25,5238	-0,1082
25,5756	25,7456	-0,1700
25,7515	25,8058	-0,0543
25,9439	26,1696	-0,2257
26,1536	26,2108	-0,0572
26,3813	26,5110	-0,1297
26,6278	26,7079	-0,0802
26,8936	26,9820	-0,0884
27,1796	26,9867	0,1929
27,4866	27,1839	0,3027
27,8151	27,3356	0,4796
28,1661	28,1708	-0,0047
	průměr	-0,1798
	max	-0,0543
	min	-0,3129
	st.odchylka	0,0918

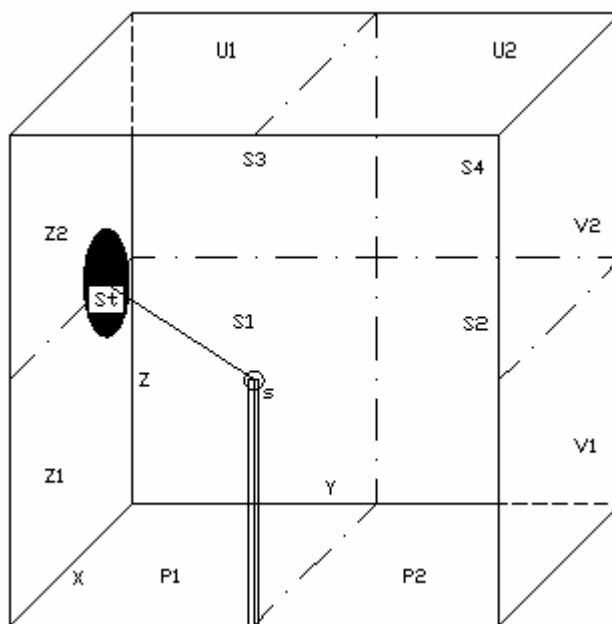


Obr. 26 Závislost střední radiální teoretické a naměřené na

 $t_{dotykem}$ v místě B

11.4 Výpočet střední radiační teploty pro umístění zářícího tělesa v místě C

V případě měření v místě C byla snímací hlavice od zářícího tělesa vzdálena 50,7 cm. Zářící těleso bylo zavěšeno na okraji stěny Z jak je patrné z Obr. 24. Při výpočtech bylo postupováno stejným způsobem jako v případě umístění A.



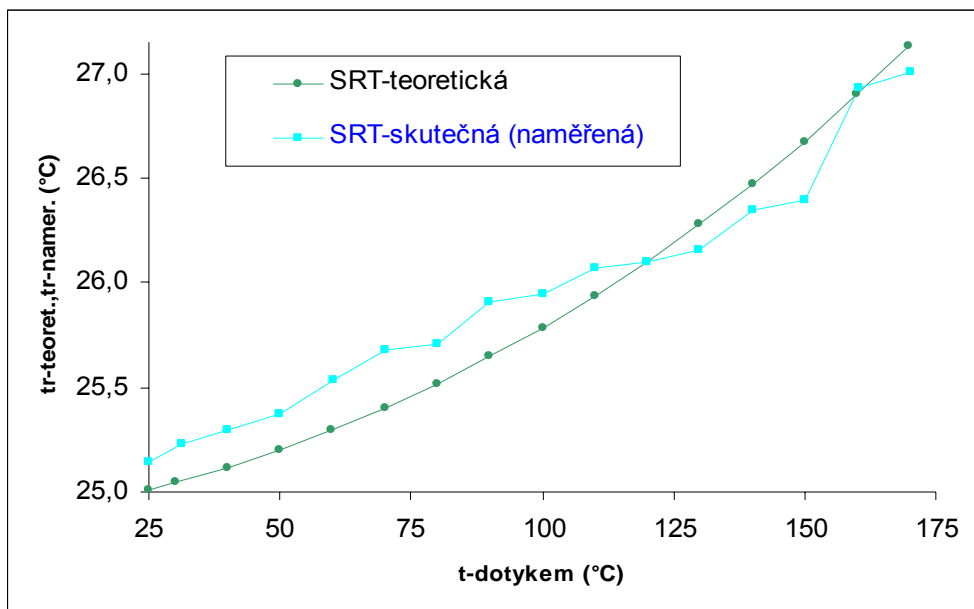
Obr. 27 Umístění zářícího tělesa na pozici C

Tabulka 5: Naměřená střední radiační teplota pro umístění C

t_w (°C)	t_{dotykem} (°C)	$t_{\text{stěnyS(TP1)}}$ (°C)	$t_{\text{stěnyV(TP2)}}$ (°C)	$t_{\text{stěnyP(TP3)}}$ (°C)	$t_{\text{stěnyZ(TP4)}}$ (°C)	$t_{\text{stěnyU(TP5)}}$ (°C)	$t_{\text{kompez.}}$ (°C)	$t_{\text{r-namer}}$ (°C)
25	25	24,8211	25,0493	25,1360	25,1371	25,5957	23,7771	25,1478
30	31,2	25,0059	25,0528	25,0600	25,2925	25,7522	23,9038	25,2327
40	40,1	25,4232	25,0838	25,1236	25,2568	25,5874	24,0492	25,2950
50	50,1	25,6882	25,1936	25,0832	25,3631	25,5421	24,0277	25,3740
60	60,1	25,8818	25,2089	25,1398	25,7936	25,6408	24,0737	25,5330
70	70,2	26,0213	25,2235	25,1949	26,0349	25,8961	24,1263	25,6742
80	80,1	26,0542	25,2740	25,2138	26,2197	25,7689	24,1559	25,7061
90	90,1	26,5886	25,3293	25,3555	26,4937	25,7579	24,1927	25,9050
100	100,1	26,6713	25,0016	25,5070	26,6699	25,8888	24,2428	25,9477
110	110	26,9723	25,2847	25,4171	26,8205	25,8548	24,2831	26,0699
120	120	27,2121	25,2242	25,1201	27,1467	25,8142	24,4218	26,1035
130	130	27,6462	25,0757	25,0389	27,3996	25,6168	24,5002	26,1554
140	140	27,9773	25,2168	25,0219	27,7320	25,7927	24,6090	26,3481
150	150,1	28,1196	24,9825	25,1640	27,8370	25,8696	24,6685	26,3945
160	160,2	29,1659	25,3709	25,2748	28,7577	26,0643	24,8032	26,9267
170	170,2	29,4578	25,4295	25,1525	29,0002	25,9727	24,8442	27,0025

Tabulka 6: Teoretická a naměřená střední radiální teplota pro umístění C

<i>tr-teoret.</i> (°C)	<i>tr-namer</i> (°C)	Δtr (°C)
25,0088	25,1478	-0,1390
25,0436	25,2327	-0,1891
25,1181	25,2950	-0,1769
25,2024	25,3740	-0,1717
25,2967	25,5330	-0,2362
25,4017	25,6742	-0,2724
25,5177	25,7061	-0,1884
25,6452	25,9050	-0,2598
25,7846	25,9477	-0,1631
25,9364	26,0699	-0,1335
26,1010	26,1035	-0,0024
26,2790	26,1554	0,1236
26,4708	26,3481	0,1227
26,6769	26,3945	0,2824
26,8979	26,9267	-0,0289
27,1341	27,0025	0,1315
průměr		-0,0813
max		0,2824
min		-0,2724
smodch		0,1612



Obr. 28 Závislost střední radiální teoretické a naměřené na

 $t_{dotykem}$ v místě C

11.5 Popis programu na výpočet PMV

Byl vytvořen program v prostředí MATLAB pro výpočet předpovědi středního tepelného pocitu. Program funguje na bázi, kdy se zadá 7 vstupních hodnot (CLO tepelný odpor oděvu ($\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$), MET energetický výdej lidského těla ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$), WME vnější práce ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$), TA teplota vzduchu ($^{\circ}\text{C}$), TR střední radiační teplota ($^{\circ}\text{C}$), VEL relativní rychlost vzduchu ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), RH relativní vlhkost (%)) a PA tlak vodních par (Pa)). Výstupem je hodnota v rozmezí od +3 do -3, která udává index středního tepelného pocitu jež je blíže popsán v kap.6.

Příklad výpočtu PMV při vstupních hodnotách:

$$CLO = 0,5 (\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1});$$

$$MET = 1,2 (\text{W} \cdot \text{m}^{-2});$$

$$WME = 0 (\text{W} \cdot \text{m}^{-2});$$

$$TA = 24,34 (^{\circ}\text{C});$$

$$TR = 24,89 (^{\circ}\text{C});$$

$$VEL = 0,1 (\text{m} \cdot \text{s}^{-1});$$

$$RH = 40 (\%);$$

$$PA = 0 (\text{Pa});$$

Výsledek $PMV = -0,1043 (-)$

Při zachování $PMV = -0,1043$ a při snížení teploty okolí na 20°C je třeba zvýšit TR na 31°C .

11.6 Diskuze výsledků

Při měření střední radiační teploty byla nastavována teplota na zářícím tělese St u všech tří měření t_w (od 25°C do 170°C), což představuje změnu střední radiační teploty od 25°C do 29°C .

Místo A: v místě *A* kap.11.2, bylo zářící těleso *St* ve vzdálenosti 51 cm od snímače *s* a zavěšeno na severní stěně *S* Obr. 23. Grafické porovnání teoretických a naměřených hodnot je na Obr.24 a numerické v Tabulce 2. V tomto místě je schopen snímač určit střední radiační teplotu se směrodatnou odchylkou 0,1364.

Místo B: v případě měření v místě *B* kap. 11.3 se zářící těleso *St* nacházelo na stěně *V* Obr.25 ve vzdálenosti 39,6 cm od snímače *s*. Tato vzdálenost byla ze všech tří měření nejkratší jak je vidět z Tabulky 3 ve sloupci s označením $t_{stěnyV}(TP2)$, kdy byla plocha tohoto senzoru rovnoběžná se stěnou *V* Obr. 25 proto byla naměřena nejvyšší teplota, což je dáno již zmiňovanou vzdáleností a větším úhlovým součinitelem ozáření. Z tohoto důvodu bylo měření více zatíženo náhodnou chybou než v ostatních případech, kdy byly vzdálenosti větší. Směrodatná odchylka měření v místě *B* vyšla 0,2107.

Místo C: v posledním měření v místě *C* kap. 11.4 ve vzdálenosti 50,7 cm zářícího tělesa *St* od snímače *s*, kdy bylo zářící těleso *St* zavěšené na stěně *Z* Obr. 27 na místě, kde dopadá zorný úhel dvou termočláňkových baterií s označením $t_{stěnyS}(TP1)$ a $t_{stěnyZ}(TP4)$ jak je patrné z Tabulky 5. Toto měření vyšlo se směrodatnou odchylkou 0,1612.

Nepřesnosti naměřených vůči vypočteným datům byly způsobené parazitními okolními odrazy jenž vznikaly neuzavřeným poloprostorem. Další podíl chyb na stanovení výsledků měření má i spektrální emisivita, kterou není zatím možno měřit přímou metodou, ale je možné ji stanovit jen z tabulek daných výrobcem. Dalším možným vnesením chyb, bylo teoretické stanovení poměrů elektromagnetického záření v poloprostoru, a složitým výpočtem úhlového součinitele, který tvoří obtížné a problematické řešení. Poslední nemalý vliv na měření mělo zářící těleso (plotýnka), z kterého nedokonalou izolací topné spirály unikalo teplo a tím docházelo ke kolísání teplot. Senzor teploty Pt100 zabudovaný v tělese plotýnky vnášel nejistotu měření tím, že teplota plotýnky není zcela rovnoměrně rozložena po celém jejím povrchu a senzor Pt100 měří teplotu pouze v jednom určitém místě.

ZÁVĚR

Prvním bodem teoretické části je literární rešerše, kde jsou stručně popsány vhodné kapitoly knih autorů, které byly pro tuto práci vhodné. Nejprve byly uvedeny základní pojmy jako je elektromagnetické záření, dále se teoretická část zabývá rozborem měřících metod teploty a vztahů vhodných pro její výpočet. Jsou zde uvedeny např: Stefan-Boltzmannův zákon, Planckův, Lambertův a Wienův posunovací zákon. Popis a princip snímačů určených pro měření teploty od bolometrů, přes pyroelektrický senzor až po termočlánekovou baterii, již se při měření využívalo. Dále byly popsány některé z parametrů tohoto senzoru. Důležitými kapitolami pro práci byly, záření zdroje na rovnoběžnou a kolmou plochu a záření elementu na kruhový kotouč podle vztahů z těchto kapitol byl vypočítán úhlový součinitel ozáření, jenž má důležitou roli pro správný výpočet střední radiační teploty. Závěr teoretické částí tvoří chyby způsobené při bezdotykovém měření.

Praktická část se zabývá rozborem zadání, kde je určeno jak má měření střední radiační teploty správně probíhat. Další kapitola se zabývá sestavením testovacího poloprostoru, měřicí a topné soustavy. Před zahájením samotného měření bylo nutné seznámit se zařízením DataLab, které měřilo napětí generované senzorem termočláneková baterie a přepočítalo na teplotu podle naprogramovaných vztahů v programu Control Web. Data byly ukládány pro pozdější zpracování v programu MS Excel. Měření probíhalo na třech náhodně zvolených místech o různé vzdálenosti a poloze snímač-zářič. Po skončení měření se přistoupilo k vyhodnocování teoreticky vypočítaných dat podle zákonů elektromagnetického záření s daty naměřenými. Při výpočtech byly používány poznatky získané o topné soustavě a testovacím poloprostoru. Hodnocení měření se nachází v diskuzi výsledků, kde byly popsány vlivy možných chyb, které mohly ovlivňovat správnost měření a vyhodnocování výsledků. Posledním úkolem bylo vytvoření programu na výpočet předpovědi středního tepelného pocitu. Tento program je přiložen spolu se soubory naměřených a vypočtených dat na CD-ROM disku.

Tato práce je realizací měření střední radiační teploty v prostoru při zachování platnosti zákonů elektromagnetického záření a poměrů mezi poloprostorem a snímačem, což prokazuje jak správnost použitých vztahů, tak i správnost celé měřicí soustavy která byla k tomuto měření sestavena.

CONCLUSION

The first point is the theoretical part of literature reviews, which are briefly described in the appropriate chapters of books the authors that were appropriate for this work. First part describes basic concepts such as electromagnetic radiation, the theoretical part deals with the analysis of the temperature measuring methods and the relationship appropriate for its calculation. There are listed Stefan-Boltzmann Law, Planck, Lambert and Wien's displacement law. Then it follows the description and the principles of sensors used for temperature measurement such as bolometers, pyroelectric sensors and thermopile sensor that was used in our solution. Furthermore, it was described some of the parameters of the sensors. Important chapter deals with the radiation of sources parallel and perpendicular to the surface and radiation element to the circular disc according to the relationship of these chapters was calculated angle factor exposure, which has an important role for calculating the correct mean radiant temperature.

The practical part deals with analysis of the award, which is determined by how the central radiation measurements of temperature correctly carried out. Another chapter deals with devising a test space, measuring and heating system. Before the actual measurement was started it was necessary to get acquainted with the DataLab device, which measured low level voltage signal generated thermopile sensor and then calculated the temperature according to the programmed relations in the Control Web. Data was stored for later work in MS Excel. The measurement was carried out on three randomly chosen places and different distances and sensor-emitter (hot object) position. After measurements are held to evaluate the data in theory, calculated in accordance with the laws of electromagnetic radiation with the measured data. The calculations were using the knowledge gained about the heating system and test space. The evaluation of measurement is located in the discussion of results, which were described the effects of possible errors that could affect the accuracy of measurement and evaluation of the results. The last goal was to create program for calculating one thermal comfort index - predicted mean vote. This program and files with measured and calculated values are saved on CD-ROM.

In this work the measuring chain for determining the mean radiant temperature of half-space and theoretical model for its calculation from laws of electromagnetic radiation and the relationships between the space and the detector was developed and realization. The

results show acceptable accuracy of measurement and correctness of constructed measuring system.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Svoboda a kol.: Fyzika pro technické obory středních škol. SPN Praha, 1984
- [2] Tichý, O.: Tepelná technika I pro technické obory SPŠ. SNTL Praha, 1990
- [3] Hottel, H.C., Sarofim, A.F.: Přenos tepla záření. SNTL, 1979
- [4] Hruška, F. : Technické prostředky automatizace III. Senzory, jejich principy a funkce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2002
- [5] Hruška, F. : Technické prostředky automatizace IV. Snímače, převodníky. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2003
- [6] Hruška, F. : Projektování systémů integrované automatizace. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2002
- [7] Ďaďo – Kreidl: Senzory a měřicí obvody. Praha ČVUT, 1996
- [8] Nejistoty v měření. Automa, 7-8,10,12/01, 4,5/02
- [9] Webster, J., G. : The measurement, instrumentation, and sensor handbook. New York, CRC Press LLC, Springer-Verlag, 1999, s.1932. ISBN 3-540-64830-5
- [10] Lysenko, V.: Detektory pro bezdotykové měření teplot. Praha, 2005. ISBN 80-7300-180-2

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

v	Rychlost šíření
f	Frekvence
λ	Vlnová délka (m)
IR	Infračervené záření
UV	Ultrafialové záření
$H_{0,\lambda}$	Spektrální hustota intenzity záření černého tělesa ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)
c_1	První vyzařovací konstanta ($c_1 = 3,741832\cdot 10^{-16} \text{ W}\cdot\text{m}^2$)
c_2	druhá vyzařovací konstanta ($c_2 = 1,438786\cdot 10^{-2} \text{ m}\cdot\text{K}$)
T	Teplota povrchu tělesa (K)
λ_{MAX}	Maximální vlnová délka (m)
b	Wienova konstanta ($b = 2,897779\cdot 10^{-3} \text{ m}\cdot\text{K}$)
H_0	Celková intenzita záření ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)
δ_0	Stefan-Boltzmannova konstanta ($\delta_0 = 5,67032\cdot 10^{-8} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$)
I_N	Zářivost při 0° úhlu ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$)
sr	Steradián
φ	Úhel sklonu záření (sr)
$^\circ\text{C}$	Stupně Celsia
K	Stupně Kelvina
Ni	Chemický prvek Nikl
Co	Chemický prvek Kobalt
Q_r	Tepelný tok dopadající na senzor (W)
Q_k	Tepelný tok unikající do okolí (W)
m	Hmotnost senzoru (kg)
c	Tepelná kapacita materiálu senzoru ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)

τ	Čas (s)
dP_e	Změna polarizace ($C.m^{-2}$)
S	Plocha krystalu (m^2)
φ_A	Kontaktní potenciální bariéra kovu A (V)
φ_B	Kontaktní potenciální bariéra kovu B (V)
$U_{k1,2}$	Elektromotorické napětí mezi dvěma kovy (V)
$S_{A,B}$	Seebeckovy koeficienty ($V.K^{-1}$)
δ_i	Thomsonovy koeficienty ($V.K^{-1}$)
K	Integrální citlivost ($V.W^{-1}$)
U	Napětí na výstupu senzoru (V)
H	Zářivý tok (W)
K_λ	Spektrální citlivost ($V.W^{-1}$)
H_λ	Zářivý tok závislý na vlnové délce (W)
u_{noise}	Tepelný šum (V)
k_B	Boltzmanova konstanta ($k_B = 1,380658 \cdot 10^{-23} J.K^{-1}$)
Δf	Šířka pásma (Hz)
R	Odpor senzoru (Ω)
NEP	(Noise Equivalent Power) výkonový ekvivalent ($W.Hz^{-0.5}$)
$\overline{u_s^2}$	Spektrální hustota šumového napětí ($V^2.Hz^{-1}$)
$\overline{U_s^2}$	Efektivní hodnota integrálního šumového napětí (V^2)
D^*	Detektivita ($m/W.Hz^{-0.5}$)
$Q_{dopadající}$	Tok tepla dopadajícího záření (W)
$Q_{odražené}$	Tok tepla odraženého záření (W)
$Q_{absorbované}$	Tok tepla absorbovaného záření (W)

$Q_{vlastní}$	Tok tepla vlastního záření (W)
$Q_{výsledný}$	Tok tepla výsledného (vnitřního) záření (W)
$Q_{efektivní}$	Tok tepla efektivního záření (W)
I	Zářivost ($W \cdot sr^{-1}$)
ε_z	Emisivita zdroje (-)
ε	Emisivita (-)
dO	Prostorový úhel záření na plochu (sr)
dS	Element plochy
Q_z	Záření zdroje (W)
π	Konstanta $\pi = 3,14159265358979$
τ	Čas (s)
R, r	Poloměr (m)
ε_λ	Spektrální emisivita (-)
$H_{\lambda 0}$	Intenzita vyzařování absolutně černého tělesa ($W \cdot m^{-2}$)
φ	Úhlový součinitel ozáření
$\varphi_{1 \rightarrow 2}$	Úhlový součinitel ozáření plochy 1 na plochu 2
x, y	Vzdálenost na ose x a y
ϱ	Poloměr (m)
ψ	Úhel ($^\circ$)
Θ	Úhel ($^\circ$)
λ_{ef}	Efektivní vlnová délka
PMV	Předpověď středního tepelného pocitu
M	Energetický výdej ($W \cdot m^{-2}$)
W	Užitečný mechanický výkon („vnější práce“) ($W \cdot m^{-2}$)
I_{cl}	Tepelný odpor oděvu ($m^2 \cdot ^\circ C \cdot W^{-1}$)

f_{cl}	Poměr povrchu oblečeného člověka k povrchu nahého člověka (-)
t_a	Teplota vzduchu ($^{\circ}\text{C}$)
\bar{t}_r^{\times}	Střední radiační teplota ($^{\circ}\text{C}$)
v_{ar}	relativní rychlost proudění vzduchu ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
p_a	Parciální tlak vodní páry (Pa)
h_c	Součinitel přestupu tepla konvekcí ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$)
t_{cl}	Teplota povrchu oděvu ($^{\circ}\text{C}$)
<i>PC/IO</i>	Průmyslový počítač se vstupně/výstupní jednotkou
<i>AI3</i>	Modul analogových vstupů
X, Y, Z	Rozměry (m)
S, P, Z, U, V	Stěny poloprostoru (m^2)
C	Celková plocha poloprostoru (m^2)
<i>Pt100</i>	Odporový platinový senzor
<i>PID</i>	Proporciálně integračně derivační regulátor
<i>RI</i>	Rezistor ($R_I=99500 \Omega$)
U_{in}	Vstupní nezesílené napětí (V)
U_{TH}	Výstupní zesílené napětí (V)
$R(TH)$	Odporu termistoru (Ω)
T_a	Teplota okolí termistoru (K)
R_{25}	Odpor termistoru při teplotě 298,15 K, ($R_{25} = 100000 \Omega$)
β	Materiálová konstanta termistoru ($\beta = 3964 \text{ K}$)
T_{25}	Teplotní konstanta ($T_{25} = 298,15 \text{ K}$)
<i>TP</i>	Senzor termočláneková baterie TPS333
Q_C^{\times}	Celkový zářivý tepelný tok (W)
S_C	Celková plocha snímaného prostoru C (m^2)

S_t	Plocha zářícího tělesa (m^2)
s_{TPI}	Plocha senzoru TP (m^2)
s	Senzor
t_W	Žádaná teplota nastavovaná na zářícím tělese (plotýnce) ($^{\circ}C$)
$t_{DOTYKEM}$	Teplota plotýnky naměřená senzorem Pt100 ($^{\circ}C$)
$t_{kompez.}$	Teplota okolí neboli kompenzační určená termistorem ($^{\circ}C$)
\bar{t}_r -namer.	Průměrná naměřená střední radiační teplota ($^{\circ}C$)
\bar{t}_r^{\times} -teoret.	Teoretická střední radiační teplota ($^{\circ}C$)
A, B, C	Označení umístění zářícího předmětu (plotýnky)
CLO	Tepelný odpor oděvu($m^2.K.W^{-1}$)
MET	Energetický výdej lidského těla($W.m^{-2}$)
WME	Vnější práce
TA	teplota vzduchu($^{\circ}C$)
TR	Střední radiační teplota($^{\circ}C$)
VEL	Relativní rychlost vzduchu ($m.s^{-1}$)
RH	Relativní vlhkost (%)
PA	Tlak vodních par (Pa)
Δ_x	Absolutní chyba (-)
x_m	Naměřená hodnota (-)
x_s	Skutečná hodnota
δ_x	Relativní chyba
$smodch$	Směrodatná odchylka
Δ_H	Výsledná chyba měření
e	Systematická složka
ε	Náhodná složka

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Závislost spektrální hustoty intenzity vyzařování černého tělesa na vlnové délce.....	14
Obr. 2 Stav senzoru před ozářením (částice jsou chaoticky uspořádány)	18
Obr. 3 Stav po ozáření senzoru (částice se polarizují a vytváří tak náboj).....	19
Obr. 4 Vznik termoelektrického napětí	20
Obr. 5 Odvození kompenzace srovnávacího konce.....	21
Obr. 6 Schéma zapojení termočlávkové baterie	21
Obr. 7 Dopadající záření na těleso.....	25
Obr. 8 Záření ze zdroje(bodový zdroj) na element kulové plochy	26
Obr. 9 Záření ze zdroje (bodového zdroje) na dutou kulovou plochu.....	27
Obr. 10 Plocha zářícího zdroje S_2 rovnoběžná s rovinou S_1	29
Obr. 11 Plocha zářícího zdroje S_2 kolmá k rovině S_1	31
Obr. 12 Plocha S_2 a kruhový kotouč v rovině rovnoběžné s rovinou S_2	32
Obr. 13 Textový editor.....	40
Obr. 14 Datové inspektory.....	41
Obr. 15 Grafický editor.....	41
Obr. 16 DataLab s krytem i bez něj	42
Obr. 17 Nákres testovacího poloprostoru	43
Obr. 18 Realizace plotýnky	44
Obr. 19 Mikroprocesorový multi funkční.....	45
Obr. 20 Hlavice snímače střední radiační teploty.....	46
Obr. 21 Rozměry hlavice snímače střední radiační teploty	46
Obr. 22 Schéma zapojení teplotní kompenzace.....	47
Obr. 23 Umístění zářícího tělesa na pozici A	56
Obr. 24 Závislost střední radiační teoretické a naměřené na.....	60
Obr. 25 Umístění zářícího tělesa na pozici B	61
Obr. 26 Závislost střední radiační teoretické a naměřené na.....	62
Obr. 27 Umístění zářícího tělesa na pozici C	63
Obr. 28 Závislost střední radiační teoretické a naměřené na.....	64

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Naměřená střední radiační teplota pro umístění <i>A</i>	59
Tabulka 2: Teoretická a naměřená střední radiační teplota pro umístění <i>A</i>	59
Tabulka 3: Naměřená střední radiační teplota pro umístění <i>B</i>	61
Tabulka 4: Teoretická a naměřená střední radiační teplota pro umístění <i>B</i>	62
Tabulka 5: Naměřená střední radiační teplota pro umístění <i>C</i>	63
Tabulka 6: Teoretická a naměřená střední radiační teplota pro umístění <i>C</i>	64

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I: CD-ROM, který obsahuje soubor TPS 333.pdf ve formátu pdf na němž jsou informace o senzoru thermopile TPS 333 (termočláňkové baterii). Dále obsahuje soubory Měření v místě A.xls, Měření v místě B.xls, Měření v místě C.xls, tyto soubory obsahují naměřená a vypočtená data. A jako poslední obsahuje kopii diplomové práce ve formátu pdf a program na výpočet středního tepelného pocitu, jenž je vytvořený v prostředí MATLAB.