

Návrh a realizace experimentální úlohy na bezdotykové měření teploty

Design and implementation of experimental exercise for
non-contact temperature measurement

Tomáš Malinka

Bakalářská práce
2013



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky
akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Tomáš MALINKA**
Osobní číslo: **A10014**
Studijní program: **B3902 Inženýrská informatika**
Studijní obor: **Bezpečnostní technologie, systémy a management**
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Návrh a realizace experimentální úlohy na
bezdotykové měření teploty**

Zásady pro vypracování:

1. Provedte rozbor vybraných senzorů určených na měření teploty bezdotykovým způsobem.
2. Navrhněte experimentální úlohu pro výukové účely s využitím vybraných senzorů.
3. Realizujte a ověřte funkčnost experimentální úlohy.
4. Navrhněte vhodné zadání měření s realizovanou úlohou.
5. Vypracujte vzorový protokol z měření.

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

1. CHUDÝ, Vladimír. Meranie technických veličín. 1. vyd. Bratislava: STU, 1999, 689 s. ISBN 8022712752.
2. KREIDL, Marcel. Měření teploty: senzory a měřicí obvody. 1. vyd. Praha: BEN – technická literatura, 2005, 239 s. Senzory neelektrických veličín. ISBN 80-730-0145-4.
3. LYSENKO, Vladimír. Detektory pro bezdotykové měření teplot. 1. vyd. Praha: BEN – technická literatura, 2005, 153 s. ISBN 80-730-0180-2.
4. ĎAĎO, Stanislav a Marcel KREIDL. Senzory a měřicí obvody. 2. vyd. Praha: ČVUT, 1999, 315 s., 351 obr. ISBN 8001020576.
5. HRUŠKA, František. Senzory v systémech informatiky a automatizace. Vyd. 1. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2007, 177 s. ISBN 978-80-7318-630-2.

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Petr Skočík

Ústav elektroniky a měření

Datum zadání bakalářské práce:

25. února 2013

Termín odevzdání bakalářské práce:

30. května 2013

Ve Zlíně dne 25. února 2013

prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.
děkan



doc. Mgr. Milan Adámek, Ph.D.
ředitel ústavu

ABSTRAKT

Bakalářská práce je zaměřena na jednu ze základních stavových veličin určující stav hmoty – teplotu. Zabývá se historií a principy měření teploty. Práce popisuje základní rozdělení a fyzikální podstatu senzorů určených pro bezdotykové měření teploty. Pro ověření fyzikálních jevů je v praktické části realizován návrh experimentální úlohy na bezdotykové měření teploty, který bude sloužit pro výukové účely s využitím vybraných senzorů. Dále jsou provedena měření teploty povrchu tělesa a zpracování reálných výstupních signálů za účelem ověření správné funkce zrealizované úlohy. Součástí práce je také koncepce návrhu zadání zrealizované laboratorní úlohy do předmětu „Senzory“.

Klíčová slova: Termoelektrické senzory, bezdotykové měření teploty, experimentální úloha

ABSTRACT

The bachelor's thesis focuses on temperature – one of the basic quantities that define the state of matter. The thesis pays attention to the history and the principles of temperature measuring. It describes the basic classification and the physical matter of sensors intended for touchless temperature measurement. To verify the physical effects, the practical part of the thesis includes a proposal of an experimental project for touchless temperature measurement. The mentioned assignment shall serve for educational purposes with the use of selected sensors. Furthermore, to verify the proper function of the assignment implemented, a body surface temperature was measured and the real output signals were processed. A conception of the proposed involvement of the realized laboratory assignment into the subject “Sensors” constitutes a part of the thesis.

Key words: thermoelectric sensors, touchless temperature measurement, experimental project

Rád bych poděkoval svému vedoucímu Ing. Petru Skočíkovi, za jeho vstřícnou spolupráci, cenné rady a podněty, které mi pomohly při tvorbě bakalářské 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.
- že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně

.....
podpis diplomanta

OBSAH

ÚVOD.....	9
I TEORETICKÁ ČÁST.....	10
1 HISTORIE MĚŘENÍ TEPLoty.....	11
1.1 TEPLota	13
1.2 PRINCIPY MĚŘENÍ TEPLoty	14
2 ELEKTROMAGNETICKÉ ZÁŘENÍ	16
2.1 ZÁKONY ZÁŘENÍ.....	17
3 TEORETICKÉ ZÁKLADY BEZDOTYKOVÉHO MĚŘENÍ TEPLoty	21
3.1 EMISIVITA	23
3.2 ČERNÉ TĚLESO	25
3.3 ŠEDÉ TĚLESO	26
4 SENZORY URČENÉ NA MĚŘENÍ TEPLoty BEZDOTYKOVÝM ZPŮSOBEM.....	28
4.1 TEPELNÉ SENZORY	29
4.1.1 Termoelektrické senzory	30
4.1.2 Bolometrické senzory.....	34
4.1.3 Pyroelektrické senzory	35
4.2 KVANTOVÉ SENZORY	36
4.2.1 Intrinsické senzory	37
4.2.2 Extrinsické senzory	37
II PRAKTICKÁ ČÁST	39
ÚVOD DO PRAKTICKÉ ČÁSTI	40
5 SOUČASNÝ STAV NABÍDKY SENZORŮ PRO BEZDOTYKOVÉ MĚŘENÍ TEPLoty	41
5.1 NABÍDKA TERMoeLEKTRICKÝCH SENZORŮ	42
5.2 NABÍDKA PYROELEKTRICKÝCH SENZORŮ	44
6 VÝBĚR VHODNÝCH SENZORŮ	46
6.1 TPS 230	46
6.2 TPS 334	48
6.3 TPS 334L10.6.....	49
7 NÁVRH EXPERIMENTÁLNÍ ÚLOHY.....	52
7.1 KONSTRUKCE ZÁKLADNY EXPERIMENTÁLNÍ ÚLOHY A SPOJOVACÍ MATERIÁL	52
7.2 ZDROJ INFRAČERVENÉHO ZÁŘENÍ.....	54
7.3 VÝPOČET VZDÁLENOSTÍ PRO UMÍSTĚNÍ TERMoeLEKTRICKÝCH SENZORŮ	55
8 REALIZACE EXPERIMENTÁLNÍ ÚLOHY	57
8.1 OVĚŘENÍ FUNKČNOSTI EXPERIMENTÁLNÍ ÚLOHY	59
8.2 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ.....	61
ZÁVĚR	65
ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ.....	66
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	67

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	70
SEZNAM OBRÁZKŮ	71
SEZNAM TABULEK.....	73
SEZNAM PŘÍLOH.....	74

ÚVOD

Teplota patří k nejdůležitějším parametrům v technických, ale i v ostatních oborech pro zajištění optimálního technologického procesu. Právě měření a regulace teploty má zásadní vliv na kvalitu výrobku a bezpečnost provozu. Z toho plyne, že teplota je jednou z nejdůležitějších termodynamických vlastností určující stav hmoty. Objevuje se také v mnoha fyzikálních zákonech. Teplota je obvykle měřena dvěma způsoby a to dotykově a bezdotykově. Někdy nelze z technologických důvodů použít dotykový způsob měření teploty, pak je nutno zvolit bezdotykovou metodu, označovanou pojmem pyrometrie. V dnešní době díky pokrokům v optice a elektronice je stále častěji využívána metoda bezdotyková. Přináší řadu výhod, jako možnost měření velmi vysokých teplot, rychlých teplotních změn a to bez nutnosti kontaktu s měřeným objektem. Nedochozí tak k mechanickému poškození tělesa a není z něho odebírána žádná energie. Mezi nevýhody pyrometrického měření patří chybné definování hodnoty emisivity povrchu tělesa, nejistoty měření způsobené chybným zaměřením měřeného objektu a chybná korekce odraženého záření z okolního prostředí. Další problematice bezdotykového měření teploty je věnována teoretická část práce, ve které je mimo jiné popsán historický vývoj a základní principy měření teploty.

Dále jsou v této části popsány funkce a rozdělení tepelných senzorů, které se právě využívají v aplikacích bezkontaktního měření teploty. Jejich rozdělení je do skupiny tepelných a kvantových senzorů a to podle způsobu snímání infračerveného záření a využívaných fyzikálních jevů. Technickým parametrům a dostupností jednotlivých senzorů je věnována praktická část práce.

Praktická část se tedy zaměřuje na současný stav nabídky senzorů pro bezdotykové měření teploty. Díky široké nabídce senzorů a horší orientaci na trhu je vybráno několik kvalitních výrobců. Další kapitola je věnována návrhu experimentální úlohy s využitím vybraných senzorů. Úloha je navržena způsobem, který umožňuje její rozšíření a pozdější úpravy dle nových trendů v této rychle se rozvíjející oblasti. Součástí této kapitoly je také popis výběru jednotlivých použitých prvků a spojovacího materiálu vhodného pro konstrukci úlohy. Dále je popsáno provedení měření teploty povrchu ohřátého tělesa s reálnými výstupními signály jednotlivých senzorů. Součástí práce je také návrh laboratorní úlohy do předmětu Senzory. Cílem tohoto předmětu je podat studentům znalosti z pohledu využívaných principů u jednotlivých senzorů a seznámit je s jejich fyzikální podstatou.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 HISTORIE MĚŘENÍ TEPLoty

Historie měření teploty sahá tisíce let do minulosti. První známé spisy o teplotě a její měření pochází od historika a filozofa Filóna z Byzantia (asi 20 př. n. l. – 50 n. l.) a přibližně ve stejném období žijícího matematika a vynálezce Heróna z Alexandrie. Oba z autorů použili ve svých dílech slovo teploměr. Jde o spojení dvou starořeckých slov ‚thermo‘ ve významu teplota a ‚meter‘ ve významu měřit, tedy doslova v překladu - měření teploty.

Nicméně ani jeden z těchto spisovatelů nerozvinul práci a návrhy na teploměr. Vynález a vytvoření prvního pracovního teploměru začíná italským fyzikem, matematikem a astronomem Galileo Galileem roku 1592. [6]

Přišel s prostým, málo přesným teploměrem závislým na atmosférickém tlaku. Byl založený na využití tepelné roztažnosti vzduchu. Tvořila jej tenká skleněná trubička s délkou cca 30 cm, která byla zakončena baňkou. Tuto skleněnou baňku zahříval v ruce a poté ji vložil otevřeným koncem trubičky do nádoby se zabarvenou vodou. Následně začal chladnout vzduch v trubičce, smršťoval se a vlivem okolního tlaku vzduchu na hladinu vnikla voda do trubičky. Po vychladnutí baňka přejímala okolní teplotu vzduchu a výška vodního sloupce v trubičce se začala měnit podle změn objemu vzduchu v baňce. Tento přístroj, nazývaný vzduchový termoskop, byl bez teplotní stupnice a měl opačný princip funkce na rozdíl od dnešních teploměrů. Při oteplení hladina v trubičce klesala a při ochlazení stoupala. [7]

Na konci 16. století se zatím nejednalo o skutečné teploměry. Faktem bylo, že šlo o termoskopy, které byly citlivé na vzduch a fungovaly i jako barometry. Bez stupnice tyto zařízení spíše reagovaly na změny teploty než její měření.

V roce 1654 vynalezl Ferdinand II de' Medici první lihový teploměr, který umožňoval jasné čtení teploty. Nebyl zároveň ovlivňován žádnými jinými faktory, jako to bylo u termoskopů. Byl tvořen zatavenou trubicí částečně naplněnou lihem. Protože trubka byla zatavená, nemohl tlak vzduchu ovlivňovat pohyb lihu nahoru či dolů. Teplota byla jediná věc, která byla měřena. Jeden velký problém tento teploměr měl. Každý výrobce si v té době navrhl své vlastní měřítko a vlastní systém pro měření teploty. Medici tak vytvořil první moderní teploměr, kterým dal návod pro mnohé další vynálezce teploměrů. [6]

První pokus o zavedení univerzální teplotní stupnice byl v říjnu 1663. Královská společnost v Londýně, jejímž členem byl Daniel. G. Fahrenheit navrhovala použití stupnice Roberta Hookea (anglický filozof, architekt a vynálezce). Tato společnost však neměla moc k tomu, aby prosadila jednotnou stupnici. Různorodost teploměrů a měříték stále zůstává.

Německý fyzik Daniel G. Fahrenheit v roce 1724 přichází se rtuťovým teploměrem. Jeho teploměr se rtuť je přesnější, než doposud používané lihové. Lze ho aplikovat pro větší rozsah teplot.

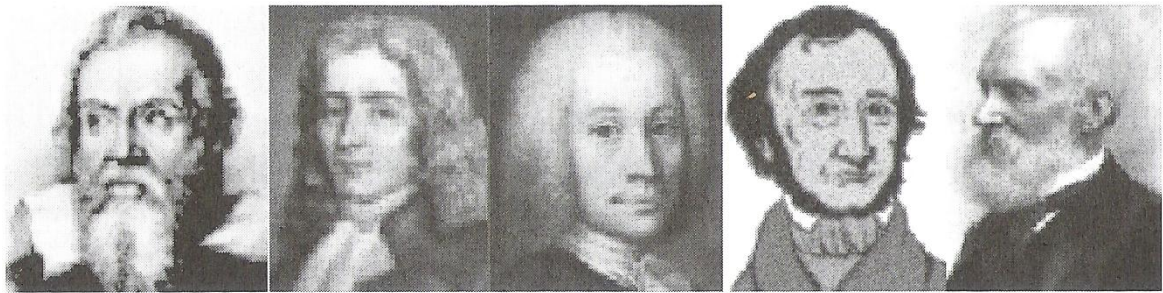
Pro svůj teploměr se snažil nalézt vhodnou teplotní stupnici. Stanovil si proto referenční body:

- 96 °F – teplota lidského těla
- 0 °F – teplota eutektické směsi ledu, vody a salmiaku.

Později referenční body díky přesnějšímu měření upravil. Jeho stupnice se v průběhu let stala standardem a je široce používána ve Spojených státech amerických a několika dalších zemích.

Další teplotní stupnici navrhuje v roce 1730 francouzský fyzik a přírodovědec René-Antoine Ferchault de Réaumur. Jeho stupnice byla rozšířená především ve Francii. Definoval 0 °R jako bod mrznutí vody. Teplotu varu stanovil na 80 °R při normálním atmosférickém tlaku. Dnes se jeho teplotní stupnice téměř nepoužívá.

O 12 let později, v roce 1742 zavádí švédský astronom Anders Celsius Celsiovu stupnici. Navrhl ji tak, že 0 °C odpovídá rovnovážnému stavu mezi ledem a vodou, 100 °C pak odpovídá rovnovážnému stavu mezi vodou a párou. Pouhé dva roky po smrti Celsia, jeho asistent Carolus Linnaeus pomohl vývoji a propagaci měřítka mezi výrobce teploměrů. V dnešní době jde o nejpoužívanější měřítko na celém světě. Je používáno v teploměrech všech druhů a všech odvětví, s výjimkou některých vědních oborů např.: astrofyzika. O století později přichází britský fyzik lord William Thomson Kelvin s termodynamickou stupnicí. [7]



Obr. 1 zleva: Galileo Galilei, René-Antoine Ferchault de Réaumur, Andres Celsius, Daniel G. Fahrenheit, William Thomson Kelvin [2]

1.1 Teplota

Teplotou se rozumí stavová veličina, která určuje stav termodynamické rovnováhy. To je stav, kdy v izolované soustavě těles od okolního prostředí nedochází k průběhu makroskopických změn a všechny fyzikální veličiny, kterými je stav soustavy popsán, jsou nezávislé na čase. Všechny části izolované soustavy musí mít stejnou termodynamickou teplotu, kterou bývá charakterizován stav termodynamické rovnováhy. Musíme rozlišit fyzikální veličinu teplota od fyzikální veličiny teplo. Teplo je forma energie, která bezprostředně souvisí s pohybem částic dané soustavy těles. Teplo na rozdíl od teploty nemůže být stavovou veličinou, protože nezávisí na přítomném stavu soustavy, ale závisí na celé minulosti vývoje této soustavy. Teplota se nadá měřit přímo. Je to jedna z mála veličin, která se měří jen prostřednictvím jiných fyzikálních veličin. Jde tedy o nepřímé měření. [2]

Z pohledu fyzikálního lze též definovat teplotu jako veličinu soustavy SI se základní jednotkou kelvin a nepřímou jednotkou stupeň Celsia. Termodynamickou (Kelvinovu) teplotní stupnici určují dva pevné body. Prvním pevným bodem této stupnice je absolutní nulová teplota, tj. 0 K. Při tomto stavu ustává termický pohyb elementárních částic. Druhý bod je označován za tzv. trojný bod vody. Je to rovnovážný stav tří skupenství vody (syté páry, vody a ledu) s hodnotou 273,16 K. Základní jednotkou termodynamické teploty značené T je Kelvin (K). Jeden kelvin je definován jako 273,16 díl teplotní difference mezi absolutní nulou a teplotou trojného bodu. [4]

Pro praktickou realizaci termodynamické teploty slouží ITS – 90 (Mezinárodní teplotní stupnice). Tato stupnice byla od svého vzniku v roce 1927 generálními konferencemi pro váhy a míry průběžně upravována a doplňována. Její poslední verze je z roku 1990. Mezinárodní teplotní stupnice je definována v rozsahu 0,65 K až po 961,78 K, tedy do

teplot prakticky měřitelných v podmínkách Planckova vyzařovacího zákona. ITS – 90 je rozdělena do 4 rozsahů:

- 1) Rozsah od 0,65 K do 5,0 K definován tlakem páry ^3He nebo ^4He .
- 2) Rozsah od 3 K do 24,556 K definován tlakem plynového teploměru.
- 3) Rozsah od 13,8033 K do 961,78 K definován prostřednictvím rovnic platných pro platinový odporový teploměr.
- 4) Rozsah nad 961,78 K definován Planckovým vyzařovacím zákonem. [4]

Celsiova teplotní stupnice je odvozena od Kelvinovy termodynamické stupnice posunutím o teplotu 273,15 K, což je hodnota o 0,01 K nižší než termodynamická teplota trojného bodu vody. Základní jednotkou je Celsiův stupeň, jehož označení je ($^{\circ}\text{C}$). Tento stupeň je definován jako stý díl teplotního rozdílu mezi tuhnutím vody a teplotou varu vody. Celsiova teplota t se rovná rozdílu termodynamické teploty T a teploty 273,15 K neboli platí: [2]

$$t (^{\circ}\text{C}) = T - T_0 = T - 273,15 \text{ K}, \quad (1)$$

dále pro teplotní rozdíl platí $\Delta t = \Delta T$.

1.2 Principy měření teploty

Pro měření neznámé teploty určitého objektu využíváme možnost měřit různé sekundární veličiny. Tyto veličiny se mění v závislosti od měřené teploty. Takovou veličinou často bývá změna objemu nebo tlaku teploměrné látky. Dále můžeme hovořit o změnách elektrických vlastností snímače nebo vyzařování měřeného objektu.

Všeobecně zařízení pro měření teploty využívají několik základních principů:

- Teplotní roztažnost tuhých, kapalných anebo plyných teploměrných látek. Míru teploty představuje teplotní roztažnost teploměrné látky, resp. rozdíl teplotních roztažností dvou látek. Měříme změnu tlaku teploměrné látky při konstantním objemu (tlakové teploměry) anebo změnu objemu teploměrné látky při stálém tlaku.

- Změna elektrických vlastností čidla, která je závislá na změně teploty. Používá se:
 - závislost elektrického odporu vodičů anebo polovodičů od teploty. Tyto snímače teploty se nazývají termistory, resp. odporové teploměry,
 - vznik termoelektrického napětí v obvodu, který je tvořen dvěma různými kovovými vodiči. Konce těchto vodičů jsou spojeny a vystavují se dvěma různým teplotám tzv. Seebeckův jev. Takové snímače se nazývají termočlánky,
- snímání celkové energie záření. Při každé teplotě $T > 0$ K vysílají tuhé a kapalné látky tepelné záření. Teplota se určí na základě využití tepelné závislosti záření, které měří tepelné detektory,
- využití spektrální zářivosti měřeného objektu. S nárůstem teploty měřeného objektu roste jeho spektrální zářivost. [1]

2 ELEKTROMAGNETICKÉ ZÁŘENÍ

Energie tepleného záření je podobně jako jiné druhy záření přenášena pomocí elektromagnetických vln. Tyto vlny se šíří rychlostí světla. Rychlost světla ve vakuu je definována hodnotou $c = 299\,792\,456 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Elektromagnetické záření lze popsat prostřednictvím vlnové a korpuskulární teorie.

Podle vlnové teorie si lze záření představit jako pohyb vln o frekvenci f [Hz] a vlnové délce λ [m], přičemž platí: [8]

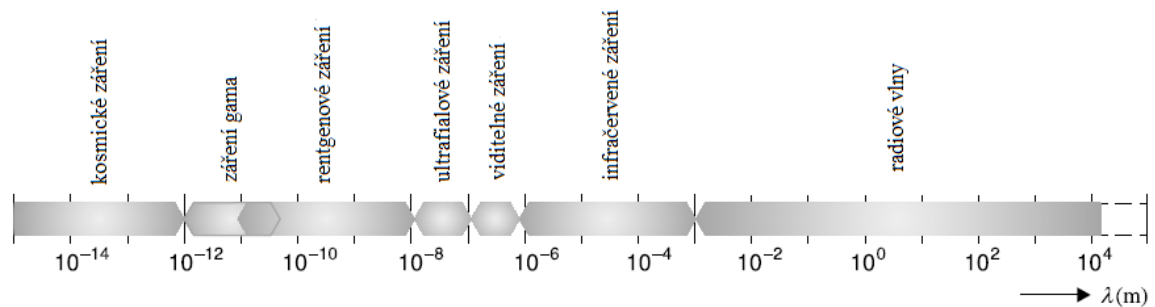
$$c = f \cdot \lambda \text{ [m}\cdot\text{s}^{-1}\text{]}. \quad (2)$$

Oblasti tepleného a světelného záření odpovídají elektromagnetické vlnové délce v rozmezí 10^{-8} až 10^{-3} . Rozžhavená tělesa vydávají určitou barvu záření, která závisí od absolutní teploty tohoto tělesa. Obecně platí, že čím vyšší je teplota rozžhaveného tělesa, tím kratší jsou vlnové délky, na kterých těleso vyzařuje. Pro tělesa zahřátá přibližně do $500 \text{ }^\circ\text{C}$ jsou typické poměrně velké vlnové délky. Jde o infračervené záření, které je pro lidské oko neviditelné.

Tělesa zahřátá nad $500 \text{ }^\circ\text{C}$ vyzařují viditelné záření. Toto viditelné záření je zpočátku červené, přibližně při $1200 \text{ }^\circ\text{C}$ žluté, zelené okolo $2000 \text{ }^\circ\text{C}$ a modré nad $3000 \text{ }^\circ\text{C}$. Pro teploty okolo $6000 \text{ }^\circ\text{C}$ je typické ultrafialové záření. [1]

Na základě korpuskulární teorie se zářivá energie předává nespojitě v malých dávkách, tzv. kvantech. Tato elementární kvanta energie nesou označení fotony. Fotony se chovají jako částice, které popisuje frekvence, vlnová délka, energie a hybnost.

Pokud dojde k přechodu elektronu na jinou kvantovou dráhu, na které má menší energii, vyzáří se foton. Energie fotonu je rovna úbytku energie elektronu. U zahřívání těles dochází v každém okamžiku k přeskokům velkého množství elektronů na různé energetické hladiny. Z toho plyne, že energie fotonů opouštějící těleso je rozdělena do širšího spektra frekvencí. Na obr. 2 je znázorněno spektrum elektromagnetického záření.[8]



Obr. 2 Elektromagnetické spektrum[1]

2.1 Zákony záření

Zářivý tok, intenzita vyzařování, směrová intenzita vyzařování, plošná zářivost a další radiační veličiny nebo vlastnosti se netýkají pouze záření v celém rozsahu spektra elektromagnetického vlnění, ale i záření s určitou vlnovou délkou λ . Veličiny vztahující se na celou oblast spektra se nazývají integrální. Naopak veličiny, které jsou stanoveny při určité vlnové délce, nazýváme spektrální. Pro odlišení se spektrální veličiny označují indexem λ . Jsou to derivace veličin integrálních, mají jiný fyzikální rozměr. [8]

Například intenzita vyzařování E je definována jako podíl zářivého (radiačního, sálavého) toku P , který vychází z elementu povrchu plochy dS nebo do ní vstupuje, a této plochy:

$$E = \frac{dP}{dS} [W \cdot m^{-2}] \quad (3)$$

Spektrální intenzita vyzařování je definována podílem intenzity vyzařování v malém intervalu vlnových délek a tohoto intervalu:

$$E_{\lambda} = \frac{dE}{d\lambda} [W \cdot m^{-3}] \quad (4)$$

Pomocí Planckova zákona je odvozena závislost spektrální intenzity vyzařování černého tělesa na vlnové délce a teplotě ve tvaru:

$$E_{0,\lambda} = \frac{c_1}{\lambda^5 \cdot (e^{c_2/(\lambda \cdot T)} - 1)} [W \cdot m^{-3}] \quad (5)$$

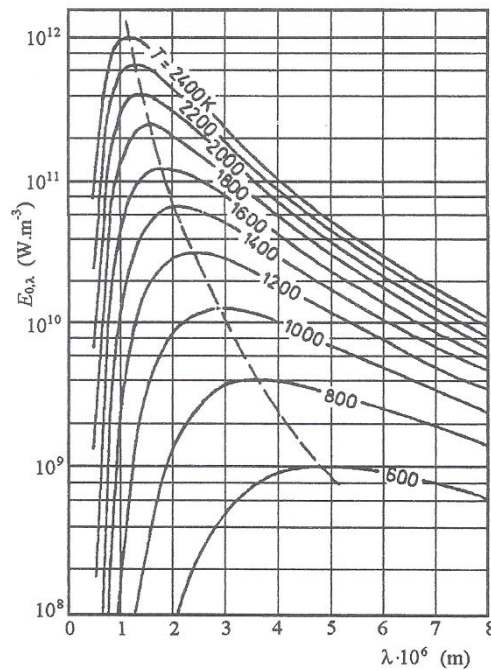
kde

$E_{0,\lambda}$ je spektrální intenzita vyzařování černého tělesa (indexem „0“ se označuje černé těleso)

c_1 první vyzařovací konstanta, $c_1 = 3,7415 \cdot 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$

- c_2 druhá vyzařovací konstanta, $c_2 = 1,4388 \cdot 10^{-2}$ m.K
- λ vlnová délka [m]
- T termodynamická teplota černého tělesa. [8]

Rovnice (5) je nejpoužívanější tvar Planckova zákona. Je stanovena pro teploty v rozmezích 600 až 2400 K a pro vlnové délky menší než 8 μm . Znárodně na grafickém vyjádření Planckova zákona obr. 3.



Obr. 3 Grafické vyjádření Planckova zákona [8]

Dále z obr. 3 a rovnice (5) vyplývá, že spektrální intenzita vyzařování dokonale černého tělesa pro velmi malé i velké vlnové délky konverguje k nule. Je také patrné, že s rostoucí teplotou se hodnota $E_{0,\lambda}$ zvyšuje.

Pro kratší vlnové délky, kdy $\frac{c_2}{\lambda \cdot T} \gg 1$, platí, že $e^{c_2/(\lambda \cdot T)} - 1 \approx e^{c_2/(\lambda \cdot T)}$ a Planckův vzorec přejde na jednodušší vzorec Wienův:

$$E_{0,\lambda} = \frac{c_1 \cdot e^{-c_2/(\lambda \cdot T)}}{\lambda^5} \text{ [W} \cdot \text{m}^{-3}] \quad (6)$$

Pro velké vlnové délky při $\frac{c_2}{\lambda \cdot T} \ll 1$ vystačíme s prvním členem nekonečné sumy

$$e^{c_2/(\lambda \cdot T)} - 1 = \frac{c_2}{\lambda \cdot T} + \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{c_2}{\lambda \cdot T}\right)^2 + \frac{1}{6} \cdot \left(\frac{c_2}{\lambda \cdot T}\right)^3 + \dots \quad (7)$$

a rovnice (5) se zjednoduší na vztah, který je v literatuře známý jako vzorec Rayleighův – Jeansův:

$$E_{0,\lambda} = \frac{c_3 \cdot T}{\lambda^4} \quad (8)$$

kde

$$c_3 = c_1/c_2 = 2,6005 \cdot 10^{-14} \text{ W.m.K}^{-1}.$$

Z Wienova posunovacího zákona vyplývá, že se maximum spektrální intenzity vyzařování s rostoucí teplotou posouvá ke kratším vlnovým délkám. Pro tento zákon platí:

$$\lambda_{max} \cdot T = 2,898 \cdot 10^{-3} \text{ [m.K]} \quad (9)$$

kde

λ_{max} je vlnová délka, která odpovídá maximu závislosti $E_{0,\lambda} = f(\lambda)$.

Stefan – Boltzmannův zákon vyjadřuje integrální intenzitu vyzařování černého tělesa E_0 o teplotě T . Určí se z integrálu

$$E_0 = \int_{\lambda=0}^{\lambda=\infty} E_{0,\lambda} d\lambda = \sigma \cdot T^4 \text{ [W.m}^{-2}\text{]} \quad (10)$$

kde

$E_{0,\lambda}$ je spektrální intenzita vyzařování černého tělesa

σ Stefan – Boltzmannova konstanta, $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ [W.m}^{-2}\text{.K}^{-4}\text{]}$

V praxi se vztah (10) používá nejčastěji ve tvaru:

$$E_0 = C_0 \cdot \left(\frac{T}{100}\right)^4 \text{ [W.m}^{-2}\text{]} \quad (11)$$

kde

E_0 je intenzita vyzařování černého tělesa

C_0 součinitel vyzařování dokonale černého tělesa ($C_0 = 5,67 \text{ W.m}^{-2}\text{.K}^{-4}$).

Ze Stefan-Boltzmannova zákona se určuje celkové záření povrchu tělesa do všech směrů poloprostoru. Vyzařování energie tělesem do jednotlivých směrů popisuje Lambertův zákon (kosinový zákon). [8]

Lambertův zákon nám říká, že zář L ideálního plošného zdroje tepleného záření je stejná ve všech směrech. Důsledkem Lambertova zákona je závislost zářivosti I na úhlu φ . Úhel φ svírá směr pozorování s kolmicí k rovině zdroje (směr normály n), proto platí

$$L_{\varphi} = \frac{I_n}{\Delta S} = \frac{I_{\varphi}}{\Delta S \cos \varphi} = \frac{I_{\varphi}}{\Delta S_n} = konst. \quad (12)$$

$$I_{\varphi} = I_n \cos \varphi.$$

Hodnota I_n představuje maximální hodnotu zářivosti ve směru kolmice. Tělesa, pro která vzorec (ty dva výš) se označují kosinové zářiče. [2]

3 TEORETICKÉ ZÁKLADY BEZDOTYKOVÉHO MĚŘENÍ TEPLOTY

Bezdotykové měření teploty je založeno na vyhodnocování povrchového tepleného záření těles. Tento způsob měření teploty označujeme jako infračervená pyrometrie. Základem je vysílané elektromagnetické záření tělesem. Při rovnovážném stavu mezi energií vysílanou a přijímanou je pro stav zářiče charakteristická určitá teplota. Vysílané záření tělesem nazýváme teplené a skládá se z různých vlnových délek. Pro tepelné záření je typická vlnová délka od 2 μm do 25 μm . [2,13]

Zařízení pro bezdotykové měření teploty zaznamenalo v poslední době značné rozšíření a to díky pokroku v elektronice a optice. Přístroje se původně označovaly jako radiační pyrometry či radiační teploměry. Často se používá název infračervené teploměry. Dělíme je podle jejich výroby na stabilní zařízení určená pro nepřetržité měření a na přenosná zařízení, která zase slouží pro příležitostné měření.

Stabilní pyrometry jsou napájeny ze sítě a instalují se ve vhodném místě pro nepřetržité monitorování probíhajících procesů. Stabilní pyrometry se obvykle skládají ze dvou samostatných celků. Prvním celkem je snímací část, která obsahuje optiku a druhým je senzor záření. Původní uplatnění přístrojů bylo v provozech a aplikacích, kde se využívaly k měření vysoké teploty, často v malých prostorách. Šlo zejména o aplikace v primárním průmyslu (cementárny, vápenky, sklářství apod.).

Přenosné pyrometry jsou kompaktní zařízení, která slouží převážně k příležitostnému měření. Je to ucelené zařízení, které tvoří optická část s detektorem, elektronikou, indikátorem a napájecími obvody. Přenosné pyrometry nejsou uzpůsobeny k napájení ze sítě. Mají bateriové napájení, které se periodicky nabíjí.

V dnešní době se nachází stále větší uplatnění pyrometrů a to díky měření teplot nižších než 0 °C. Běžně se s nimi můžeme setkat v průmyslu elektrotechnickém, potravinářském, farmaceutickém, papírenském, textilním apod. Využití našly i při zpracování plastických hmot, roztaveného nebo vytékajícího kovu. Takzvané přenosné IČ – teploměry (pyrometry) se zase uplatňují při detekci ztrát tepla, při kontrole nádrží, potrubních systému apod. [13]

Tak jako každá metoda nebo postup měření má své úskalí, tak i bezdotykové měření teploty má celou řadu výhod a nevýhod. Mezi výhody patří:

- Zanedbatelná ovlivnění měřeného objektu.

Při měření není z objektu odebírána žádná tepelná energie. Ve srovnání s dotykovým měřením lze poměrně přesně změřit teplotu u látek se špatnou tepelnou vodivostí. Jsou to například plasty, dřevo, sklo, polystyren.

- Měřený objekt není mechanicky opotřeben.

Na měřený povrch není potřeba umisťovat čidla mechanickým, chemickým a jiným způsobem.

- Možnost měření teploty u nepohybujících se objektů.

Mezi povrchem tělesa a čidlem nedochází ke kontaktu.

- Možnost měřit rychlé skokové změny teplot. [2,11]

- Lze měřit bez problému i vysoké teploty (nad 1300 °C).

- Možnost měřit a dále číslicově zpracovat teploty celých povrchů těles – termografie.

- Možnost měření teploty na nebezpečných nebo nesnadno dostupných objektech.

Jedná se o pohyblivé součásti, vzdálené objekty, součásti pod elektrickým napětím apod. [11]

Mezi nevýhody bezdotykového měření patří:

- Nejistoty měření způsobené chybným definováním hodnoty emisivity povrchu tělesa.

Jde o nejčastější nepřesnost při bezdotykovém měření teploty.

- Nejistota měření zapříčiněná chybným zaměřením měřeného objektu.

Většina optických systémů pyrometrů snímá energii vyzařovanou z povrchu tělesa kruhovou měřenou plochou. Je důležité, aby měřený objekt vyplňoval tuto měřenou plochu, jinak dochází k ovlivnění naměřené hodnoty zářením z pozadí.

- Naměřené hodnoty mohou podstatně ovlivňovat fyzikální vlastnosti optické cesty, která je mezi měřeným objektem a čidlem (rozptyl, pohlcení záření apod...).
- Nejistota měření způsobená chybnou korekcí odraženého záření z vnějšího prostředí na měřený objekt. [2,14]

3.1 Emisivita

Emisivitu definujeme jako poměr intenzity vyzařování tepelného zářiče E k intenzitě vyzařování černého tělesa E_0 (dříve absolutně černého tělesa) při téže teplotě. Emisivita je bezrozměrná veličina, jejíž hodnoty jsou mezi 0 a 1,0. Je dána vztahem:

$$\varepsilon = \frac{E}{E_0} [-] \quad (13)$$

kde

ε je emisivita. [3]

Maximální hodnota emisivity, tedy $\varepsilon = 1$ je charakteristická pouze pro ideální černé těleso. V reálném světě se však nevyskytuje, slouží pro modelování tepelného vyzařování. U reálných těles je $\varepsilon < 1$.

Celkové množství vyzařované energie charakteristické pro každý reálný objekt je složeno ze záření emitovaného, odraženého a procházejícího. Právě emitovaná energie indikuje teplotu povrchu těles. Zařízení pro bezkontaktní měření teploty snímají výše uvedené druhy energie. Jsou konstruovány tak, aby odečítali jen energii emitovanou. Pojmy emisivita a emitivita bývají často zaměňovány. Mají ale různý technický obsah. Emisivitou je popisována vlastnost materiálu, emitivitou pak vlastnost daného povrchu. [9]

Emisivitou rozumíte stupeň, nebo měřítko pro schopnost materiálu emitovat elektromagnetické záření, které závisí na charakteru povrchu a samotném materiálu. Tělesa s vysokým, na teplotě nezávislým stupněm emisivity (0,8 – 0,95) jsou většinou z nekovového materiálu. Například organické látky, beton, PVC... Naopak kovy, převážně s lesklým povrchem mají nízkou emisivitu (0,2 – 0,5) klesající s teplotou.

Pohltivost (absorpce) je dána poměrem pohlceného toku a dopadajícího zářivého toku. Platí pro ni vztah:

$$\alpha_e = \frac{\Phi_a}{\Phi_d} [-], \quad (14)$$

kde

α_e je pohltivost (absorpce)

Φ_a pohlcený tok

Φ_d dopadající zářivý tok.

Odrazivost (reflektance) je míra pro schopnost materiálu odrážet elektromagnetické záření. Je závislá na teplotě, povrchu a druhu materiálu. Většinou silněji odrážejí leštěné a hladké povrchy namísto hrubých a matných povrchů stejného materiálu. Reflektance je dána vztahem:

$$\rho_e = \frac{\Phi_r}{\Phi_d} [-] \quad (15)$$

kde

ρ_e je odrazivost (reflektance)

Φ_r odražený zářivý tok.

Propustnost (transmitance) je míra pro schopnost materiálu odevzdat (předat) infračervené záření. Je dána vztahem:

$$\tau_e = \frac{\Phi_t}{\Phi_d} [-] \quad (16)$$

kde

τ_e je propustnost (transmitance)

Φ_t prostupující zářivý tok. [3,10]

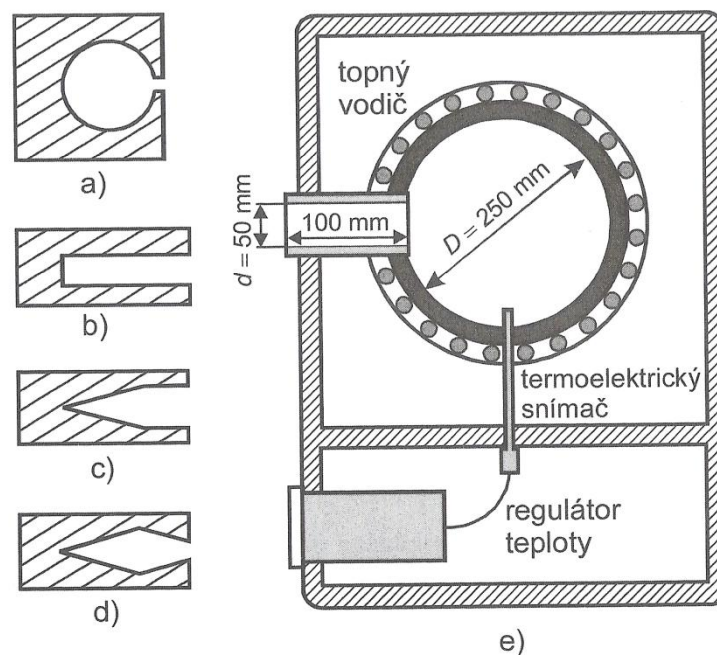
Pro přesné měření teploty bezdotykovým způsobem je důležité, co nejpřesněji stanovit hodnotu emisivity u měřených objektů. Obecně nejjednodušší způsob je vyhledání emisivity daných materiálů v tabulce. Tento způsob je spíše pro orientační zjištění hodnoty. Zvláště u kovů je doporučováno používat hodnoty v tabulkách pouze orientačně. Avšak tabulkové hodnoty emisivity nám napomáhají nalézt správné pásmo vlnových délek, což je důležité pro správné zvolení měřícího zařízení. Druhým způsobem jak stanovit hodnotu emisivity je provést měření. Existuje několik postupů, jak přesněji stanovit emisivitu:

- pomocí kontaktního teploměru (termoelektrický článek) změříme teplotu povrchu měřeného tělesa. Poté změříme teplotu téhož tělesa pyrometrem. Následně na pyrometru měníme emisivitu, dokud naměřená teplota neodpovídá teplotě z termočlátku.
- Pro stanovení emisivity porovnáváním je potřeba na část měřeného tělesa nalepit speciální plastovou pásku. Tato páska má známou emisivitu. Pyrometrem změříme teplotu pásky. Poté změříme povrchovou teplotu bez pásky a na pyrometru nastavíme emisivitu tak, aby infračervený teploměr ukazoval správnou teplotu. Je vhodné zvolit body pro vyhodnocení blízko u sebe.
- Princip další metody spočívá ve vytvoření otvoru v měřeném tělese. Délka vyvrtaného otvoru by měla být přibližně šestkrát větší než jeho průměr. Došlo k vytvoření černého tělesa, kde dno otvoru má emisivitu jedna. Změříme teplotu na dně otvoru při nastavené emisivitě jedna. Následně zvolíme bod na povrchu tělesa a snižujeme emisivitu na pyrometru do doby, dokud nedojde ke shodě mezi naměřenými teplotami v otvoru a na povrchu. [11,12]

3.2 Černé těleso

Černé těleso je fyzikální pojem zavedený Gustavem Kirchhoffem v roce 1862. Je to ideální těleso, které dokonale absorbuje dopadající elektromagnetické záření na jeho povrch a to při každém úhlu dopadu při libovolné spektrální záři. Naopak při každé vlnové délce vyzařuje maximální energii nezávisle na použitém materiálu. Zář černého tělesa je ve všech směrech v poloprostoru nad zářičem konstantní. Emisivita černého tělesa byla zmíněna již v kapitole 3.1 a je rovna jedné. V přírodě neexistuje žádný materiál, který by odpovídal vlastnostem černého tělesa. [2]

Černý zářič se v praxi využívá pro kalibraci bezdotykových teplotních čidel. Kalibrace vyžaduje záření černého tělesa s přesnou znalostí a regulací teploty zdroje. Dutina černého zářiče musí být izotermická. Emisivita je známá, nebo dosti blízká jedné. Její hodnota je zpravidla v rozmezí $1 > \epsilon > 0,99$. Obecně platí, že čím větší velikost dutiny ve srovnání s otvorem, tím se emisivita blíží stále více jedné. Tvar dutiny je nejčastěji kulovitý. Černý zářič však lze realizovat pomocí válcové, kuželové, klínové aj. dutiny. Jednotlivé tvary dutiny spolu s černým zářičem jsou uvedeny na obrázku 4. [15]



Obr. 4 Dutinový černý zářič (a – kulový, b – válcový, c – kuželový, d – inverzní kuželový, e – technická realizace černého zářiče pro rozsah teploty černého tělesa od 200 °C do 1200 °C) [2]

3.3 Šedé těleso

Pojem šedé těleso je zaveden z důvodu zjednodušení řešení úloh, které se týkají výměny tepla zářením. Nejvíce se konceptu šedého tělesa blíží povrchy žáruvzdorných materiálů nebo oxidované povrchy kovů. Vyzařování šedých těles je definováno upraveným Stefan-Boltzmannovým zákonem ve tvaru:

$$E = \varepsilon \cdot E_0 = \varepsilon \cdot C_0 \cdot \left(\frac{T}{100}\right)^4 = C \cdot \left(\frac{T}{100}\right)^4 \quad [W \cdot m^{-2}], \quad (17)$$

kde

- E je intenzita vyzařování
- E_0 intenzita vyzařování černého tělesa
- C_0 součinitel vyzařování dokonale černého tělesa
- C součinitel vyzařování šedého tělesa ($C = \varepsilon \cdot C_0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$)
- T termodynamická teplota.

Pro určitá reálná tělesa platí, že se emisivita při určité teplotě mění v závislosti na vlnové délce. Emisivita šedého tělesa při určité teplotě nezávisí na vlnové délce. Je konstantní v celém rozsahu vlnových délek. Na níže uvedeném obr. 5 je zobrazena závislost

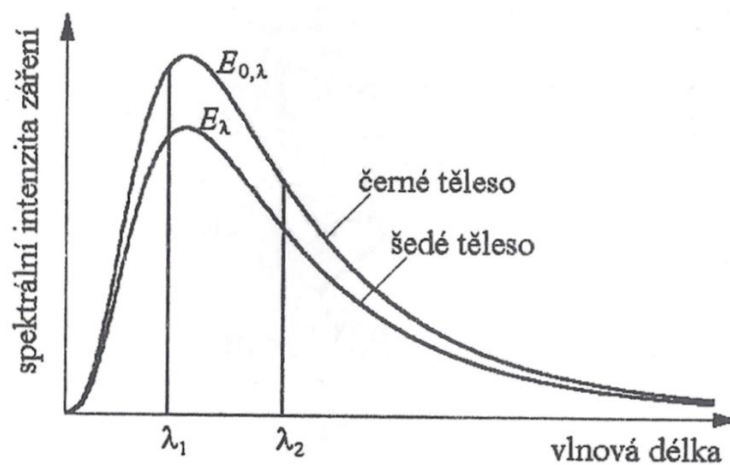
spektrální intenzity záření černého a šedého tělesa na vlnové délce. Je zároveň patrné, že záření šedého tělesa je méně intenzivní než záření černého tělesa a to v celém rozsahu vlnových délek. Tedy platí:

$$\frac{E_{\lambda_1}}{E_{0,\lambda_1}} = \frac{E_{\lambda_2}}{E_{0,\lambda_2}} = \frac{E_{\lambda}}{E_{0,\lambda}} = \varepsilon, \quad (18)$$

kde

E_{λ} je spektrální intenzita záření šedého tělesa

$E_{0,\lambda}$ spektrální intenzita záření černého tělesa.



Obr. 5 Schéma k výkladu šedého tělesa [8]

4 SENZORY URČENÉ NA MĚŘENÍ TEPLoty BEZDOTYKOVÝM ZPŮSOBEM

Senzory záření jsou zařízení schopná zjišťovat přítomnost zářivé energie a tuto energii případně i měřit. Funkce senzoru záření je dána fyzikálními jevy doprovázejícími absorpci dopadajícího záření. Podle vzájemného působení záření s látkou senzoru je lze rozdělit do dvou základních skupin:

- tepelné senzory
- kvantové senzory. [3]

Znalost základních parametrů senzorů záření je zásadní pro správnou volbu senzorů. Mezi základní parametry patří:

- Integrální citlivost K je dána poměrem elektrického napětí U na výstupu detektoru a zářivého toku Φ . Zářivý tok dopadá na citlivou plochu senzoru tj.

$$K = \frac{U}{\Phi} [V \cdot W^{-1}]. \quad (19)$$

- Časová konstanta je minimální doba, kterou senzor potřebuje na změření změny teploty měřeného objektu.
- Spektrální citlivost K_λ je závislost citlivosti K na vlnové délce λ , tj.

$$K_\lambda = \frac{U}{\Phi_\lambda} [V \cdot W^{-1}]. \quad (20)$$

- Relativní spektrální citlivost S_λ neboli

$$S_\lambda = \frac{K_\lambda}{K_{\lambda max}} [1]. \quad (21)$$

- *NEP* (*Noise Equivalent Power – výkonový ekvivalent*) udává zářivý tok, kde je hodnota výstupního signálu U rovna efektivní hodnotě spektrální hustoty šumového napětí. *NEP* je dán vztahem

$$NEP = \Phi \frac{\sqrt{u_s^2}}{U} [W \cdot Hz^{-\frac{1}{2}}] \quad (22)$$

kde

$$\sqrt{\overline{u_s^2}} = \sqrt{\frac{\overline{U_s^2}}{\Delta f}} \text{ je spektrální hustota šumového napětí,}$$

$$\sqrt{\overline{U_s^2}} \quad \text{efektivní hodnota integrálního šumového napětí,}$$

$$\Delta f \quad \text{šířka frekvenčního pásma.}$$

- Detektivka D (detekční schopnost) je převrácená hodnota NEPu neboli $D=1/NEP$.
- Normovaná (specifická) detektivka D^* je závislá na citlivé ploše S senzoru záření a je dána vztahem

$$D^* = D\sqrt{S} = \frac{\sqrt{S}}{NEP} \left[W^{-1} \cdot m \cdot Hz^{\frac{1}{2}} \right]. \quad (23)$$

- Obecně platí na základě znalostí tepelného toku poměr signál/šum – S/N.[2]

$$\frac{S}{N} = \frac{\Phi D^*}{\sqrt{S\Delta f}} \quad (24)$$

4.1 Tepelné senzory

Tepelné senzory se vyznačují tím, že dochází při dopadu fotonů k oteplení aktivní plochy senzoru a pohlcená energie je vyhodnocena nepřímo přes senzory teploty. Spektrální rozdělení nemá téměř žádný vliv na teplotní změny. Vstupní signál těchto detektorů je neselektivní, protože je v principu téměř nezávislý na vlnových délkách dopadajícího záření. Absolutní neselektivnosti však nelze dosáhnout, jelikož povrch detektoru má rozdílnou absorpci pro různé vlnové délky. Reakce citlivého elementu vlastního senzoru na teplotní změny představuje relativně pomalý proces. Proto je časová konstanta teplotních senzorů zpravidla o několik řádů větší, než časová konstanta u kvantových senzorů. Časová konstanta tepelného detektoru je přibližně v milisekundové oblasti, kdežto u kvantových senzorů se pohybuje v mikrosekundové oblasti. Obecně platí, že tyto detektory mají vysokou citlivost, která je dána širokým absorbovaným spektrem a velkým poměrem signál – šum. Tepelné senzory se dělí na:

- termoelektrické,
- bolometrické,
- pyroelektrické. [3,4]

4.1.1 Termoelektrické senzory

Termoelektrické senzory záření neboli Thermopile senzory jsou předmětem návrhu experimentální úlohy na bezdotykové měření teploty. Před samotným teoretickým popisem senzorů je důležité se zaměřit na tepelné jevy, které tyto senzory využívají. Jedná se především o tepelné jevy, jako např. Seebeckův, Peltierův a Thomsonův, z nichž je většinou jeden dominantní. [3,5]

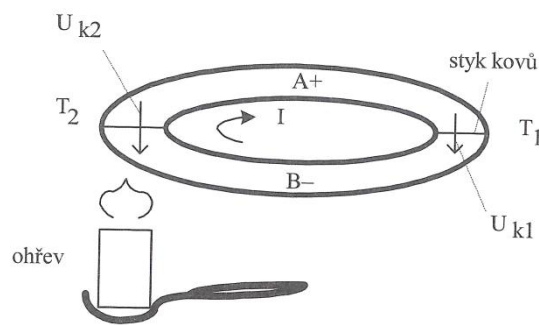
Seebeckův jev

Základním stavebním prvkem termoelektrických senzorů jsou termočlánky. Ty jsou založeny na Seebeckově jevu, tj. jevu, při kterém dochází k převodu tepelné energie na energii elektrickou.

Mějme dva kovy A, B spojené na obou koncích. Tyto kovy jsou z materiálů zajišťujících splnění podmínky $\varphi_a > \varphi_b$. Předpokládejme, že pokud nedojde k ohřevu, bude platit $T_2 = T_1$. Kov A se bude nabíjet kladně vůči kovu B. Pokud, ale jeden konec ohřejeme tak, aby platilo $T_2 > T_1$, bude intenzivnější kmitání krystalové mříže na teplejší straně, než na straně chladnější. Vzájemnými srážkami iontů s elektrony dojde ke zvýšení střední hodnoty rychlosti neuspořádaného pohybu elektronů, tj. elektronový plyn se bude ohřívat shodně s ionty krystalové mříže. Zvětšeným tepelným pohybem začnou elektrony difundovat směrem ke chladnějšímu konci, což vede k proudění tepla. Tímto přesunem elektronů (z teplejšího konce směrem k chladnějšímu konci) je docíleno nabíjení teplejšího konce kladně a chladnějšího záporně.

Lze konstatovat, že na chladnějším spoji T_1 je elektronový plyn hustější, než na teplejším spoji T_2 . Díky rozdílné koncentraci elektrického náboje dochází ke vzniku kontaktního potenciálu.

Předpokládáme – li, že kov B působením difuze elektronů změní rozložení nábojů pouze nepatrně (u Pb vůbec), bude elektromotorické napětí dále jen EMN teplejšího místa vzniklé rozdílem kontaktních potenciálů včetně tepelného spádu větší, než EMN napětí chladnějšího spoje. Na obr. 6 je znázorněn uzavřený elektrický obvod s vnitřním EMN napětím. [3,20]



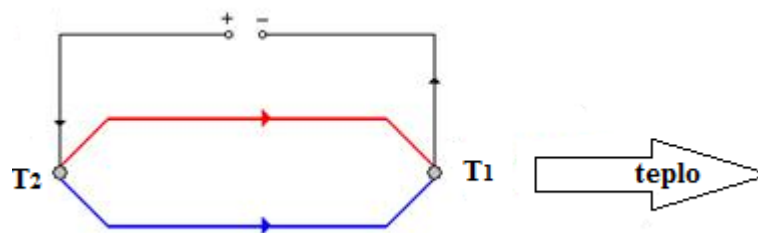
Obr. 6 Seebeckův jev [3]

Peltierův jev

Peltierův jev je inverzní k Seebeckovu jevu a lze vysvětlit na obvodu, na základě kterého byl právě objeven Seebeckův jev.

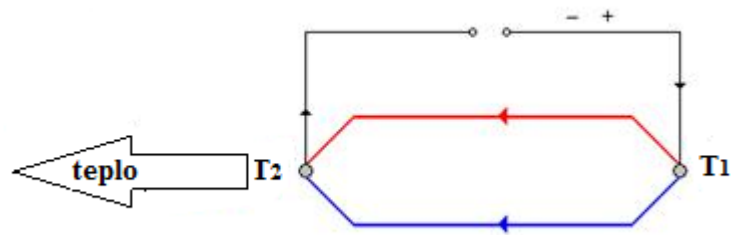
Pokud připojíme termočlánek k vnějšímu zdroji stejnosměrného napětí, aniž bychom vytvořili rozdíl teplot obou rozhraní kovů, nastane Peltierův jev. Lze konstatovat, že při průchodu elektrického proudu oběma kovy se vytvoří teplotní rozdíl mezi oběma spoji. Podle polarity přiloženého napětí se bude jeden spoj ohřívat a druhý ochlazovat.

Bude-li elektrický proud z vnějšího zdroje napětí procházet kovy stejným směrem, jako je směr elektrického proudu při Seebeckově jevu, bude se spoj T_2 ochlazovat a spoj T_1 ohřívat, viz obr 7. [21]



Obr. 7 Stav po připojení termočlátku do elektrického obvodu, uvolnění tepla [21]

Bude-li elektrický proud z vnějšího zdroje napětí procházet kovy opačným směrem, než je to u Seebeckova jevu, bude se spoj T_2 ohřívat a spoj T_1 ochlazovat, znázornění na obr. 8. [21]

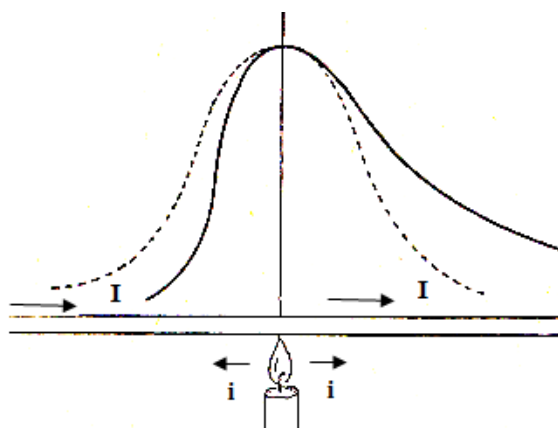


Obr. 8 Stav po připojení termočlánku do elektrického obvodu, kde směr proudu je opačný než u Seebeckova jevu [21]

Thomsonův jev

Mějme jeden homogenní vodič (kovovou tyč), ve které může vzniknout potencionální rozdíl mezi dvěma místy za předpokladu, že mají různou teplotu. Pokud bude zahřívána kovová tyč určité délky uprostřed, dojde ke vzniku tepelného proudu, který bude na obě strany tyče stejný. Teplotní spád je tedy souměrný.

Nechť prochází tyčí současně elektrický proud I směrem zleva. Vpravo nastane změna teplotního spádu. Prochází-li kovem o elektrickém odporu R elektrický proud I , tak dochází k uvolňování Jouleova tepla Q . Další teplo se vyvíjí právě v polovině tyče, kde oba proudy, elektrický proud I a tepelný i mají souhlasný směr, namísto v levé polovině, kde jsou oba proudy směrově proti sobě, se teplo určitým způsobem spotřebuje. Rozdělení teplot je následně nesouměrné. Vpravo je teplotní spád mírnější než v levé polovině tyče, viz obr. 9. [22]

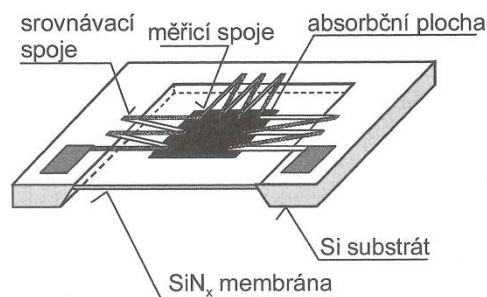


Obr. 9 Pokus s tyčí vysvětlující Thomsonův jev [22]

Termoelektrické senzory jsou tvořeny sériově řazenými termoelektrickými články. Ty mohou být konstruovány jako tenké kovové pásky o tloušťce přibližně 0,03 mm, popř. jako

pásky zhotovené technologií tenkých vrstev nebo Si technologií. Na tyto tenké kovové pásky se používají normované typy termoelektrických větví, ale také materiály jako Bi, Te nebo Sb dopované Se.

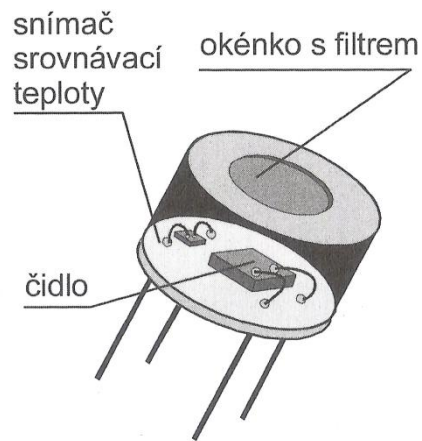
Při výběru materiálu pro termoelektrický senzor je zapotřebí splnění některých základních podmínek, např. závislost termoelektrického napětí na teplotě blízké lineárnímu průběhu. Materiál by měl být odolný vůči chemickým, mechanickým a korozním vlivům. Materiál volíme na základě požadovaného rozsahu teplot a požadované přesnosti měření.



Obr. 10 Termoelektrický senzor realizovaný technologií tenkých vrstev [2]

Termoelektrické senzory tedy přímo reagují na tepelné (infračervené) vyzařování objektu ve směru, kterým jsou namířeny. Série termočlánků má aktivní konce umístěny do jednoho místa. Tyto konce jsou pokryty černě zbarveným materiálem pohlcující infračervené záření. Zde se převádí dopadající záření na teplo měřené termočlánky. Záření dopadá na toto místo skrze okénko v pouzdru senzoru, zároveň pracuje jako optický filtr, který vymezuje snímanou oblast. Výstupem senzoru je výstupní napětí, které je úměrné dopadající intenzitě infračerveného záření.

Součástí senzorů je klasický referenční termistor typu NTC (*Negative Temperature Coefficient*) sloužící k měření teploty pouzdra senzoru. Je nutností provádět kompenzaci vlivu okolní teploty (teplota srovnávacího spoje termočlánků) na měřenou teplotu objektu. [2,3,5]

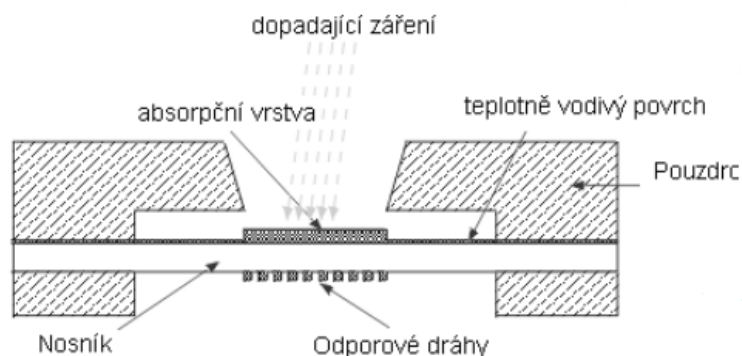


Obr. 11 Uspořádání senzoru v pouzdru [2]

4.1.2 Bolometrické senzory

Bolometry se využívají pro náročné bezkontaktní měření teploty, kdy nelze použít infratermočlánků nebo pyroelektrických senzorů. Jejich činnost je založena na změně elektrického odporu. Ke změně elektrického odporu dochází vlivem ohřevu odporového elementu absorbovaným vstupním ozářením. Odporové elementy mohou být kovové (tenké vrstvy oxidu Ni, Co aj., které jsou nanášeny na tenkou elektricky nevodivou podložku), dielektrické, polovodičové, supravodivé. [3,18]

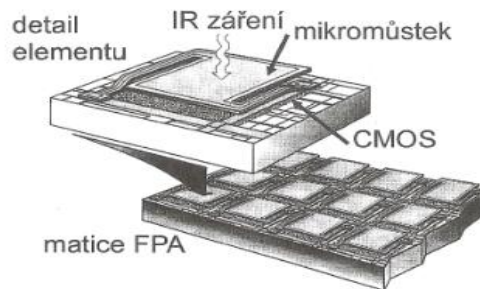
Na obr. 12 je zobrazena struktura jednoduchého bolometru. Infračervené záření dopadá na absorpční vrstvu bolometru, která je tvořena zlatou fólií. Tato fólie je schopná pohltit až 95 % záření. Dopadající záření tedy ohřívá teplotně vodivý povrch i nosník. Na spodní straně nosníku je napařený meandr odporové dráhy, jejíž odpor se mění lineárně s teplotou.



Obr. 12 Provedení jednoduchého bolometru [18]

V současné době se častěji setkáme s bolometry v podobě integrovaných obvodů, které obsahují několik desítek, stovek nebo i tisíců uspořádaných bolometrů do matice, obecně

označované jako mikrobolometry. Mikrobolometry lze uspořádat jako řádkové nebo plošné senzory. Plošné senzory se využívají pro potřeby infračerveného snímání obrazu předmětů s následnou možností měření nebo detekcí jejich teploty, tzv. maticové uspořádání FPA (Focal Plane Array).



Obr. 13 Uspořádání matice FPA [2]

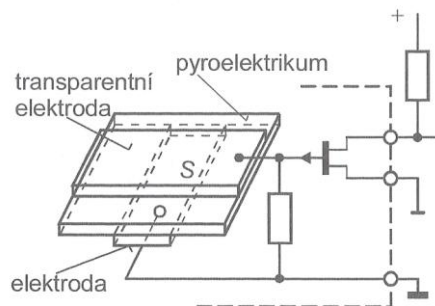
Mezi vlastnosti bolometrů a mikrobolometrů patří jejich velká citlivost, rychlost (krátká časová konstanta až 1 ms), velký pracovní teplotní rozsah (- 40 °C až 100 °C), lze bez problému měřit objekty s teplotou nad 1 500 °C, avšak jejich cena je vysoká a u některých typů je nutnost chlazení. [2,18,19]

4.1.3 Pyroelektrické senzory

Pyroelektrické senzory využívají pyroelektrického efektu spočívajícího ve změně spontánní polarizace ferroelektrických krystalických materiálů, způsobené změnou teploty samotného senzoru. Při změně osvětlení dochází ke změně hodnoty generovaného povrchového náboje a jeho hodnota je měřena ve FET (Field Effect Transistor) tranzistoru, který je součástí snímače. Sensor si lze představit jako kondenzátor, kdy na se elektrodách při změně polarizace naindukuje elektrický náboj. Náboj na elektrodách se vybíjí přes rezistor R. Jak již bylo zmíněno, tak před každým odměrem je nutné dopadající záření na senzor zaclonit a opět odclonit jelikož zářivý tok musí být časově proměnný.

U pyroelektrických materiálů (krystaly LiTaO₃, NaNO₃, triglycerinový sulfid nebo keramické PbTiO₃, modifikovaný olověný zirkonát) se kromě pyroelektrického jevu projevuje parazitní piezoelektrický jev. Piezoelektrický jev způsobuje při deformaci pyroelektrika např. otřesem nejistotu měření. Z toho důvodu se vyrábějí senzory kompenzované druhým, opačně pólovaným senzorem, jehož detekční ploška je odstíněna.

Tyto senzory, mimo fotometrická měření, našly uplatnění v komerční oblasti a to v zabezpečovacích infračervených systémech jako detektory pohybu proti vniknutí osob do střeženého prostoru nebo jako detektory kouřové či vzniku požáru. [2,3]



Obr. 14 Uspořádání pyroelektrického senzoru [2]

4.2 Kvantové senzory

Kvantové senzory využívají fyzikálních jevů, které vznikají při přímé interakci dopadajících fotonů na strukturu senzoru. Při interakci dochází ke generaci párů elektron – díra. K uvolnění elektronu a jeho přechodu na vyšší energetickou hladinu dochází při teplotě vyšší než je absolutní nula a při splnění podmínky $W_f \geq W_g$, kde W_f je energie fotonů a energie W_g udává šířku zakázaného pásu vodiče.

Elektron přejde z valenčního pásu do vodivostního pásu v energetickém pásovém modelu. Při přechodu elektronu zůstane v elektronovém obalu ionizovaného atomu prázdné místo, které je označováno jako díra. Ionizovaný atom se pak chová jako elementární kladný náboj. Uvolněný elektron se může volně pohybovat. Také díra se pohybuje a to způsobem, že ionizovaný atom převezme do elektronového obalu chybějící elektron ze sousedního neutrálního atomu. Takový atom se tedy ionizuje a stává se dírou a nositelem kladného náboje. Tepelný pohyb děr a elektronů je v polovodiči náhodný.

Pokud mluvíme o kvantových senzorech infračerveného záření, tak se jedná o polovodičové senzory (Ge, Pb, PbS, Si, Te, InSb, PbSe, GaAs, PbSnTe, CdHgTe) a dle typu polovodiče je dělíme na:

- Intrinsické – vyrobené z čistého (vlastního) polovodiče,
- Extrinsické – vyrobené z extrinsických (nevlastních) polovodičů. [2,3]

4.2.1 Intrinsické senzory

Intrinsický senzor (fotorezistor) je elektronická součástka bez PN přechodu, která využívá změny pohyblivosti nosičů nábojů při dopadu fotonů na polovodičovou vrstvu. Vodivost fotorezistoru je funkcí fotonového toku a senzor tak pracuje v tzv. fotovodivostním popř. fotokonduktivním režimu a vyžaduje elektrické pole přivedením vnějšího napětí. Elektrické pole pak způsobuje unášení nosičů nábojů a vnějším obvodem prochází elektrický proud. Lze určit poměr mezi odporem fototranzistoru a intenzitou dopadajícího záření. Se zvyšující se intenzitou dopadajícího světla velikost odporu klesá. [2]

4.2.2 Extrinsické senzory

Extrinsický senzor je založen na PN struktuře z nevlastních (extrinsických) polovodičů, u nichž hustota nosičů náboje závisí na koncentraci příměsí. Jestliže atom příměsí má nadbytečné valenční elektrony, tak se nazývá dotovaný polovodič typu N. Podobně, pokud atom příměsí bude vázat elektron polovodiče, bude mít dotovaný polovodič jako majoritní nosiče díry a jeho označení je typ P. PN struktura je vlastně polovodičová destička s oběma typy vodivosti, tzn. s PN přechodem. Na obou stranách PN přechodu se nosiče nábojů snaží difuzí dít z oblasti P do oblasti N a elektronů z oblasti N do oblasti P dosáhnout vyrovnání koncentrace elektronů a dír na obou stranách a také termodynamické rovnováhy. Výsledkem difuze na přechodu je elektrická dvojvrstva nábojů, která se označuje jako OPN (oblast prostorového náboje), zde se volné nosiče nenacházejí v rovnovážném stavu. Pokud dopadá záření do oblasti OPN, tak dojde ke generování párů elektron – díra, přičemž díry driftují do oblasti P a elektrony zase do oblasti N. Fotodioda může pracovat ve dvou základních módech. Ve fotovodivostním módu se fotodioda chová jako pasivní prvek (spotřebič) a odpor této součástky je závislý osvětlení. Z tohoto důvodu se označuje také jako odporová dioda. V tomto módu, kdy je dioda připojena ke zdroji napětí v závěrném směru, lze pomocí rezistoru měřit protékající proud. Ve fotovoltaickém módu fotodioda pracuje jako aktivní součástka, která je schopna dodávat elektrickou energii. V důsledku působení záření vznikne na stranách PN přechodu elektrický náboj, který lze změřit na vývodech fotodiody. V tomto módu je k fotodiodě připojen rezistor jako zátěž a úkolem je přivést náboje vzniklé vlivem působení záření na elektrody dříve, než dojde k jejich přeskupení.

Pro nejvyšší nároky na odstup signálu od šumu se senzory chladí. Chlazení může být realizováno termoelektrickým chladičem, Peltierův článek. Fotovodivostní senzory mají ve

srovnání s fotovoltaickými senzory obvykle větší citlivost a odstup signálu od šumu, ale pouze při optimální hodnotě vlnové délky záření a navíc mají pomalejší odezvu na rychlé změny toku záření. [2,3]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

ÚVOD DO PRAKTICKÉ ČÁSTI

Cílem praktické části této práce je navrhnout a poté vhodným způsobem realizovat laboratorní úlohu určenou na bezdotykové měření teploty. Tato experimentální úloha bude využívána k laboratorním účelům v předmětu Senzory. Tento předmět se aktuálně vyučuje na Fakultě aplikované informatiky ve Zlíně a je součástí studijního programu. Z názvu předmětu je patrné, že je zaměřen na výuku senzorů všech možných druhů využívaných v oboru automatizace, který je součástí téměř všech průmyslových odvětví. Studenti tak získají znalosti z pohledu využívaných principů a fyzikálních jevů. Lze konstatovat, že se jedná o velmi náročnou a zároveň širokou oblast. Laboratoř je tedy využívána pro usnadnění studia. Zefektivňuje a také doplňuje přednášky daného předmětu. Současný stav laboratoře nyní vyžaduje aktualizaci jednotlivých úloh s cílem obsáhnout aktuálnost vývoje rychle se rozvíjející oblasti. Součástí tohoto celku je již výše zmíněná úloha. Její výstupy budou zaměřeny na zpracování a vyhodnocování základních statických charakteristik vybraných senzorů pro bezdotykové měření teploty. Student se seznámí s praktickým provedením a ukázkou těchto senzorů, také s výstupními signály, které vznikají působením vnějších vlivů. Výstupními signály jsou myšleny signály bez dalšího zpracování, tj. zesílení, modulace, převodu aj.

Po konzultaci s vedoucím práce a přihlédnutím na potřeby dané laboratoře vplynuly na nově vznikající úlohy požadavky vyznačující se jednoduchým provedením s možností rozšíření, případně dalších úprav dle aktuálnosti. Z tohoto důvodu budou všechny úlohy modulární konstrukce. Samotnou konstrukci, umístění senzorů a dalších dílu lze snadno měnit, nebo nahrazovat novými. Dalším kritériem je dodržení jednotvárného vzhledu a způsobu konstrukce základěn na všech nově vzniklých úlohách. Z těchto nároků plyne nutná spolupráce a komunikace s ostatními řešiteli. Klíčovým prvkem byla již zmiňovaná desková základna. Ta musela být stejná pro jednotlivé laboratorní úlohy, aby se docílilo jednotvárnosti při zachování modulárnosti úloh. Právě z těchto důvodů byla důležitá již zmiňovaná spolupráce, která předcházela vzniku těchto experimentálních úloh.

5 SOUČASNÝ STAV NABÍDKY SENZORŮ PRO BEZDOTYKOVÉ MĚŘENÍ TEPLoty

Jak již bylo zmíněno v teoretické části, měření teploty bezdotykovým způsobem patří k moderním metodám určování teploty. Hlavně díky pokrokům v elektronice a optice. Proto se také v dnešní době vývojem a výrobou senzorů určených na bezdotykové měření teploty zabývá velké množství firem. Ty pak na trhu nabízejí nepřehledné množství různých typů těchto součástek. Takto široká nabídka negativně ovlivňuje orientaci a samotný proces výběru vhodných senzorů.

Při výběru senzorů pro realizaci experimentální úlohy jsem se zaměřil na výrobce s dlouholetou tradicí, zkušenostmi a profesionalitou. Jejich sortiment zahrnuje senzory vhodné pro dálkové měření teploty, analýzu plynů a pyroelektrické senzory. Mezi tyto společnosti patří Heimann Sensor se sídlem v Německu, GE Measurement & Control Solutions jejichž výzkumná zařízení jsou v 25 zemích po celém světě, Melexis – Microelectronic Integrated Systems se zastoupením ve střední a jižní Evropě a v neposlední řadě společnost PerkinElmer jako americká nadnárodní korporace sídlící ve státě Massachusetts.

Na základě doporučení vedoucího bakalářské práce jsem vybral společnost PerkinElmer. Důvodem byla dřívější dobrá spolupráce a zkušenost s jejich produkty na Fakultě aplikované informatiky ve Zlíně.

Společnost PerkinElmer byla založena roku 1937 a své jméno nese podle zakladatele Richarda Perkina Elmera. Působí v oblastech lidského zdraví a životního prostředí. Poskytuje integrované řešení pro biomedicínské a průmyslové aplikace. Specializuje se na digitální zpracování signálu, speciální osvětlení a na optické detekční technologie. Jejich produkce zařízení, softwaru a spotřebního materiálu je určena pro různé odvětví průmyslu. Prodej, servis a výrobní závody se nacházejí v Severní Americe, Evropě a Asii. [26]

Za zmínění také stojí, že tato společnost byla v minulosti pověřena stavbou optických komponentů Hubbleova vesmírného teleskopu. Práce na hlavním zrcadle započaly v roce 1979 a dokončeny byly v roce 1981. Dále je podstatné uzavření významné smlouvy na stavbu optického systému KH-9 Hexagon, což byla série fotografických průzkumných satelitů pro vojenské letectvo Spojených států. Cílem bylo mapovat a fotografovat velké plochy povrchu země.

V dnešní době společnost čítá okolo 7 500 zaměstnanců a je považována za světovou jedničku v oblasti lidského zdraví. Na svém kontě má 3 300 patentů. Dnešní oblast zaměření je na: [26]

- klinickou genetiku a diagnostiku
- mobilní výzkum
- environmentální analýzy vzduchu, vody a půdy
- forenzní analýzu
- polymery
- polovodiče a elektroniku
- zobrazovací techniku a osvětlení
- pyroelektrické a termoelektrické senzory.

Vývoj samotných infračervených senzorů zajišťuje divize společnosti, kterou je Optoelectronics PerkinElmer. V nabídce najdeme termoelektrické senzory, pyroelektrické infračervené senzory. Dále to jsou senzory určené pro detekci plynu, fotodiody, fototranzistory, fotočlánky aj. využívající se pro průmyslové, automobilové, lékařské, analytické, obranné a vojenské aplikace.

5.1 Nabídka termoelektrických senzorů

Díky vlastní a inovační Si – based technologii mikropracování zaručují senzory PerkinElmer extrémně dlouhodobou stabilitu, velmi nízký teplotní koeficient citlivosti a vynikající opakovatelnost elektro – optických parametrů. Senzory nepotřebují chlazení. Jejich přesnost je závislá od rozsahu měření. Pro široké měřicí rozsahy je rozlišení $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ a rozlišení $\pm 0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ pro úzké rozsahy měření.



Obr. 15 Ukázka termoelektrických senzorů [27]

Ve výrobním sortimentu nalezneme senzory s různým počtem snímačů v jednom pouzdru. Lze je tedy rozdělit na senzory s *jedním snímacím elementem* a na senzory se *dvěma až čtyřmi snímacími elementy* v jednom TO pouzdře.

Senzory s jedním snímacím elementem patří do řady s označením TPS – *Thermopile sensor*. K dispozici jsou čipy různé velikosti a typu zapouzdření s vhodnými velikostmi absorberů (citlivá plocha, na kterou dopadá infračervené záření). Součástí jsou i různé filtry umožňující přizpůsobení každé aplikaci, kde je potřeba bezkontaktního měření teploty. V následující tabulce jsou uvedeny technické specifikace jednotlivých senzorů. Základní parametry uvedené v tabulce jsou podrobně vysvětleny v kapitole 4.

Označení senzoru	Pouzdro	Zorný úhel*	Citlivost [V/W]	Časová konstanta [ms]	Plocha elementu [mm ²]	NEP [nW/Hz ^{1/2}]	Termistor (25 °C) [kΩ]
TPS333	TO-18	100°	35	25	0,7x0,7	1	100
TPS334	TO-39	60°	35	25	0,7x0,7	1	30
TPS334L5.5	TO-39**	7°	55	25	0,7x0,7	0,6	30
TPS434	TO-39	55°	35	20	0,5x0,5	0,7	30
TPS535	TO-39	80°	20	35	1,2x1,2	1,4	30
*Zorný úhel - intenzita záření 50%							
**TO-39 - absorber 5,5 mm							

Tab. 1 Technické specifikace senzorů s jedním snímacím elementem [27]

Senzory se dvěma až čtyřmi elementy jsou určeny k detekci plynu prostřednictvím IR absorpce, proto jsou k dispozici různé druhy infračervených spektrálních pásmových filtrů. Detekovanými plyny jsou CO₂, CO a uhlovodíky. V tab. 2 jsou uvedeny základní technické specifikace senzorů.

Označení senzoru	Pouzdro	Zorný úhel*	Citlivost [V/W]	Časová konstanta [ms]	Plocha elementu [mm ²]	NEP [nW/Hz ^{1/2}]	Termistor (25 °C) [kΩ]
TPS2534	TO-39**	2x90°	42	35	1,2x1,2	0,7	30
TPS4339	TO-39***	4x60°	75	25	0,7x0,7	0,5	100
*Zorný úhel - intenzita záření 50%							
**TO-39 - se dvěma elementy							
***TO-39 - se čtyřmi elementy							

Tab. 2 Technické specifikace senzorů se dvěma a čtyřmi snímacími elementy [27]

Typické aplikace pro termoelektrické senzory:

- dálkové snímání teploty ručními a průmyslovými pyrometry

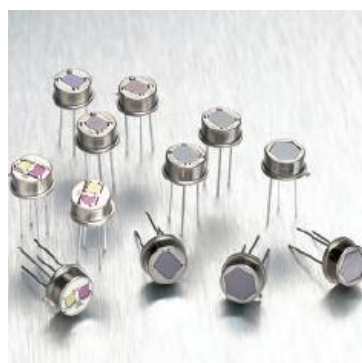
- regulace teploty do tiskáren a kopírek
- senzorové moduly pro řízení klimatizací v automobilovém průmyslu, domovů, firem aj...
- teplotní senzory v domácích spotřebičích
- zdravotní zařízení – teploměry
- požární signalizace
- senzorové pole pro prostorové měření teploty (zobrazovací aplikace).

5.2 Nabídka pyroelektrických senzorů

Mezi další sortiment společnosti PerkinElmer patří pyroelektrické senzory. Mimo fotometrická měření je jejich využití patrné v bezpečnostním průmyslu jako detektory pohybu proti vniknutí nepovolaných osob do střeženého objektu nebo jako kouřové senzory či senzory vzniku požáru.

Společnost vyvíjí pyroelektrický materiál vybavený elektrodami tvořící kondenzátor. Protože tyto části byly vyvinuté pro extrémně nízké úrovně energie tepleného záření, je pyroelektrický proud poměrně malý. Je zapotřebí velkého odporu, aby přeměnil tento malý proud do vhodné napěťové úrovně. Nízký svodový proud FET – *Field Effect Transistor* je přiveden k transformaci vysoké impedance na společný výstupní odpor, typicky 10 k Ω .

Podle procesu výroby je lze rozdělit na senzory s *jedním* nebo *dvěma snímacími elementy*, se *čtyřmi snímacími elementy* a *dvěma kanály*, kde je jeden kanál vždy referenční.



Obr. 16 Ukázka pyroelektrických senzorů [27]

V následující tabulce jsou uvedeny jednotlivé parametry senzorů s jedním snímacím elementem. Tato řada je označována písmeny LHi a je vhodná pro bezkontaktní měření teploty a detekci plynu.

Označení senzoru	Pouzdro	Zorný úhel X/Y	Citlivost [V/W]	Plocha elementu [mm ²]	NEP [W/Hz ^{1/2}]
LHi807	TO-5	135°/120°	640	1,5x1,5	9,4x10 ⁻¹⁰
LHi807 TC	TO-5	135°/120°	320	1,5x1,5	9,4x10 ⁻¹⁰

Tab. 3 Základní parametry pyroelektrických senzorů s jedním snímacím elementem [27]

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

Typické aplikace pro pyroelektrické senzory:

- detekce pohybu
- analýza plynů
- hlásiče plynů
- bezkontaktní měření infračerveného záření.

6 VÝBĚR VHODNÝCH SENZORŮ

Při výběru termoelektrických senzorů od společnosti PerkinElmer jsem se zaměřil na sérii s označením TPS 23X a TPS 33X. Důvodem byly jejich rozdílné technické parametry, které se odrážejí v jejich přesnosti měření, typické aplikaci a samozřejmě v ceně.

Z rodiny TPS 23X byl vybrán zástupce TPS 230, který tuto sérii odstartoval. Jde o extrémně malý senzor, který je svými rozměry nejmenším vyráběným senzorem této společnosti. Plocha elementu je pouhých $0,2 \text{ mm}^2$ s absorberem o průměru 0,5 mm. Tyto malé rozměry jej předurčují do zařízení, jako jsou ušní popř. čelní teploměry.

Jako zástupce série TPS 33X byly zvoleny senzory s označením TPS 334 a TPS 334L10.6. Svými technickými specifikacemi jsou předurčeny pro použití v pyrometrech.

6.1 TPS 230

Termočlánky senzoru jsou vyrobeny technologií na bázi křemíku a umístěny v kovovém TO-41 pouzdře. Optoelektronika je tvořena MOEMS systémy (mikro – opto – elektro – mechanické systémy) a optickým filtrem, který definuje rozsah spektrální citlivosti senzoru. Odkaz na podrobnější technickou specifikaci je v příloze P I, uvedené v Návrhu zadání na laboratorní úlohu (dále jen P1 – NZ, atd.). Tento návrh je ve formě externí přílohy k této práci.

Technické parametry:

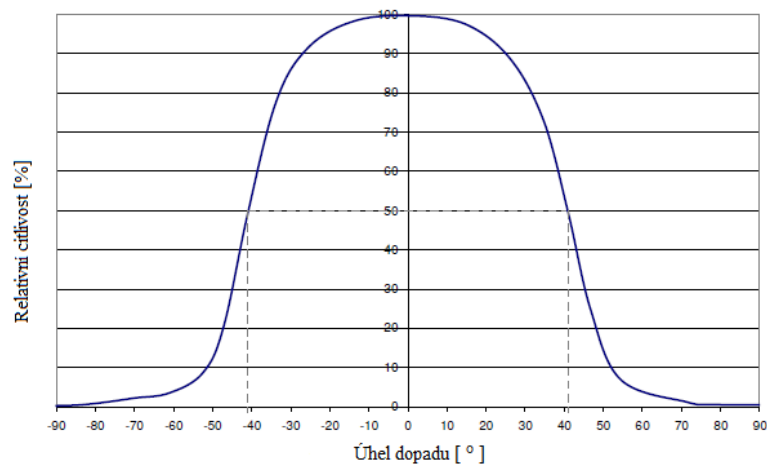
Parametr	Hodnota	Jednotka	Specifika
Plocha elementu	0,2x0,2	mm ²	Průměr absorberu 0,5 mm
Citlivost	42	V/W	T _{obj} = 500K (=227 °C) T _{amb} = 298K (=25 °C)
Časová konstanta	15	ms	
Pracovní teplota	-20 až 100	°C	
Zorný úhel	82	°	Při 50% výstupního signálu
Odpor termistoru	100	kΩ	T _{amb} = 25 °C
Beta - β	3 964	K	Definováno při 25°C/100°C

Tab. 4 Technické parametry senzoru TPS 230

Optická charakteristika:

Zorný úhel je velmi důležitá vlastnost termoelektrických senzorů. Jeho podstatou je, aby měřený objekt vyplňoval celé zorné pole senzoru. Pokud bude měřený objekt svými rozměry menší než zorné pole senzoru, budou údaje ovlivněny teplotou pozadí objektu. Pro správnou funkci je doporučeno, aby plocha objektu přesahovala zorné pole senzoru nejméně o 30 až 50 %.

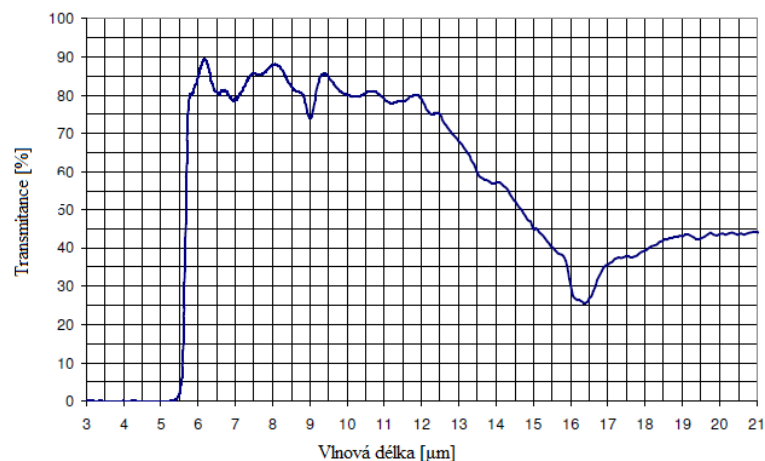
Z následujícího grafu vyplývá, že při zorném úhlu 82° je relativní citlivost výstupního signálu senzoru na 50 %.



Obr. 17 Závislost relativní citlivosti na úhlu dopadu [23]

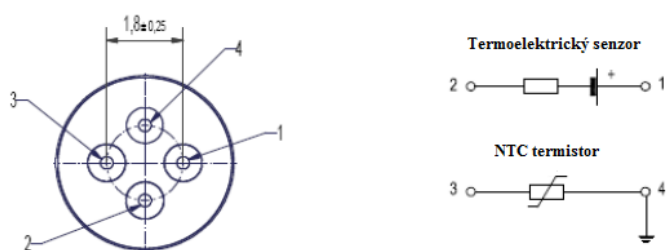
Optický filtr:

Optický filtr senzoru TPS 230 propouští vlnové délky od 5,5 mikrometru. Podle obr. 17 je největší propustnost filtru mezi 6,1 – 6,4 μm , naopak nejmenší je mezi 16,0 – 16,5 μm .



Obr. 18 Spektrální propustnost standardního filtru PerkinElmer [23]

Zapojení výstupů senzoru:



Obr. 19 Zapojení jednotlivých výstupů senzoru TPS 230 [23]

6.2 TPS 334

Senzor TPS 334 se od předešlého senzoru TPS 230 liší jinou velikostí plochy elementu a absorbéru. Také velikost výstupního napětí na intenzitě dopadajícího záření je nižší. Jeho typické použití je vhodné do infračervených pyrometrů, díky dostupným filtrům, které zvyšují přesnost dálkového snímání teploty. Bohužel se mi nepodařilo zakoupit senzor s tímto filtrem, tudíž má totožný standardní filtr jako senzor TPS 230. V tab. 5 jsou uvedeny podstatné parametry, kompletní technická dokumentace je uvedena v P2-NZ.

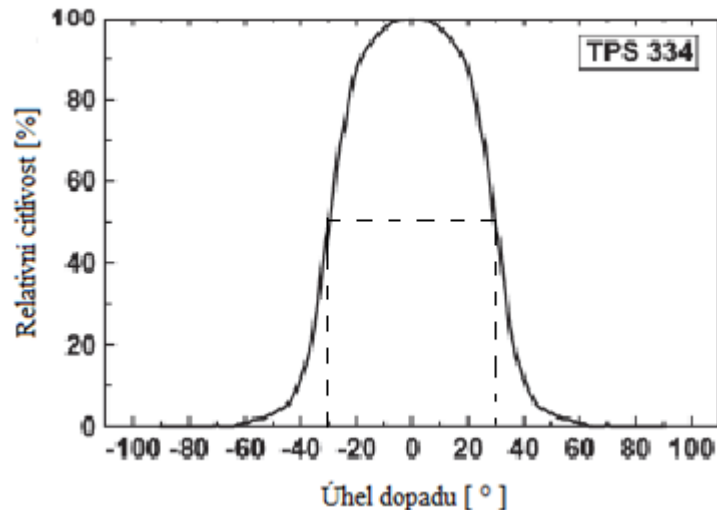
Technické parametry:

Parametr	Hodnota	Jednotka	Specifika
Plocha elementu	0,7x0,7	mm ²	Průměr absorbéru 2,5 mm
Citlivost	35	V/W	T _{obj} = 500K (=227 °C) T _{amb} = 298K (=25 °C)
Časová konstanta	25	ms	
NEP	1,2	nW/Hz ^{1/2}	
D*	0,6x10 ⁸	cmHZ ^{1/2} /W	
Pracovní teplota	-40 až 100	°C	
Zorný úhel	60	°	Při 50% výstupního signálu
Odpor termistoru	30	kΩ	T _{amb} = 25 °C
Beta β	3 964	K	Definováno při 25°C/100°C

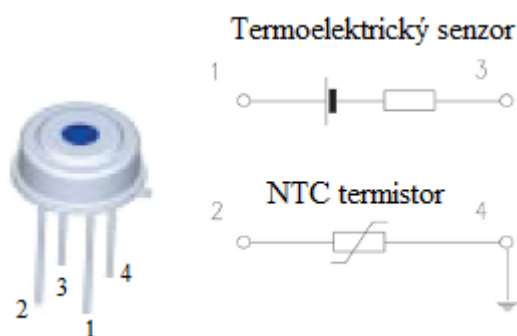
Tab. 5 Technické parametry senzoru TPS 334

Optická charakteristika:

Zorný úhel v případě TPS 334 je 60° při citlivosti výstupního signálu senzoru na 50%.



Obr. 20 Závislost relativní citlivosti na úhlu dopadu [24]

Zapojení výstupů senzoru:

Obr. 21 Zapojení jednotlivých výstupů senzoru TPS 334 [24]

6.3 TPS 334L10.6

Posledním senzorem, který je součástí experimentální úlohy je TPS 334 L10.6, který rozšiřuje vlastnosti TPS 334. Skládá se z řady termočlánků, které tvoří citlivou oblast o velikosti 0,7 mm². Dále je z tab. 6 patrný průměr absorberu 5,5 mm, který je 11x větší než u senzoru TPS230. Senzor je umístěn v kovovém TO-5 pouzdře. Má pevně danou ohniskovou vzdálenost, která činí 10,6 mm. Teplotu objektů lze měřit i ve vzdálenostech menších nebo větších, než je ohnisková vzdálenost, ale průměr snímané stopy je vždy větší než v ohnisku. Výstupní signál je přímo úměrný výkonu dopadajícího záření a do značné

míry nezávisí na vlnové délce. Důležité parametry jsou v následující tabulce, podrobnější technická specifikace je uvedena v příloze P3-NZ.

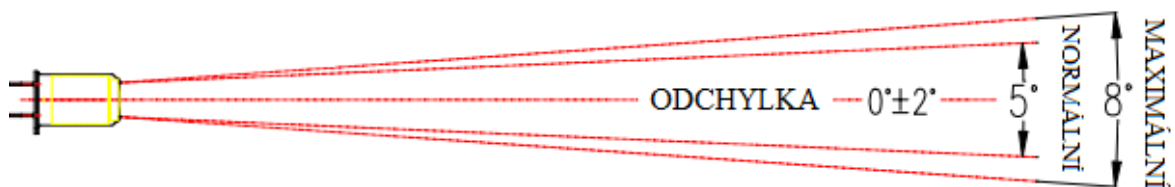
Technické parametry:

Parametr	Hodnota	Jednotka	Specifika
Plocha elementu	0,7x0,7	mm ²	Průměr absorbéru 5,5 mm
Citlivost	55	V/W	T _{obj} = 500K (=227 °C) T _{amb} = 298K (=25 °C)
Časová konstanta	25	ms	
NEP	0,58	nW/Hz ^{1/2}	
D*	1,2x10 ⁸	cmHz ^{1/2} /W	
Pracovní teplota	-40 až 100	°C	
Zorný úhel	5	°	Při 100 % výstupního signálu
Odpor termistoru	30	kΩ	T _{amb} = 25 °C
Beta β	3 964	K	Definováno při 25°C/100°C

Tab. 6 Technické parametry senzoru TPS 334

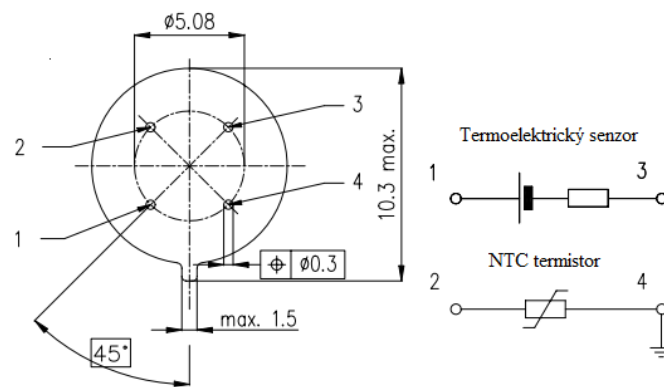
Optická charakteristika:

Zorný úhel tohoto senzoru je definován jako poměr D:S = 1:11. D je poměr průměru snímané plochy na měřeném tělese ke vzdálenosti S měřeného tělesa od senzoru. Čím je index zaostření menší, tím jde o nákladnější a složitější senzor.



Obr. 22 Zorný úhel senzoru TPS 334L10.6 [25]

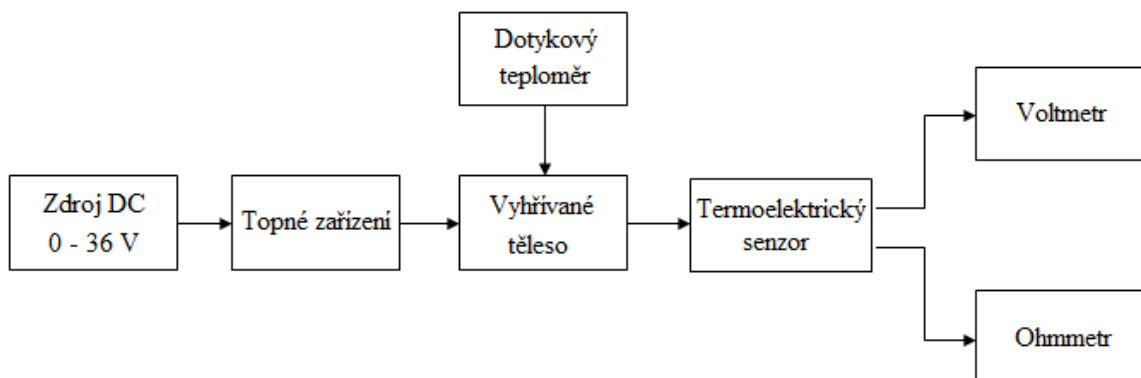
Zapojení výstupů senzoru:



Obr. 23 Zapojení jednotlivých výstupů senzoru TPS 334L10.6 [25]

7 NÁVRH EXPERIMENTÁLNÍ ÚLOHY

Požadavky na návrh experimentální sestavy byly kladeny na její jednoduché provedení s možností pozdějšího rozšíření. Proto musí být sestava konstruována způsobem dovolujícím snadnou manipulaci s jednotlivými prvky a zařízeními. Z tohoto důvodu je použitý spojovací materiál pro přichycení jednotlivých prvků pomocí šroubů k základně. Pro snadnější přehled návrhu experimentální úlohy slouží blokové schéma se zapojením jednotlivých komponent.



Obr. 24 Blokové schéma návrhu experimentální úlohy

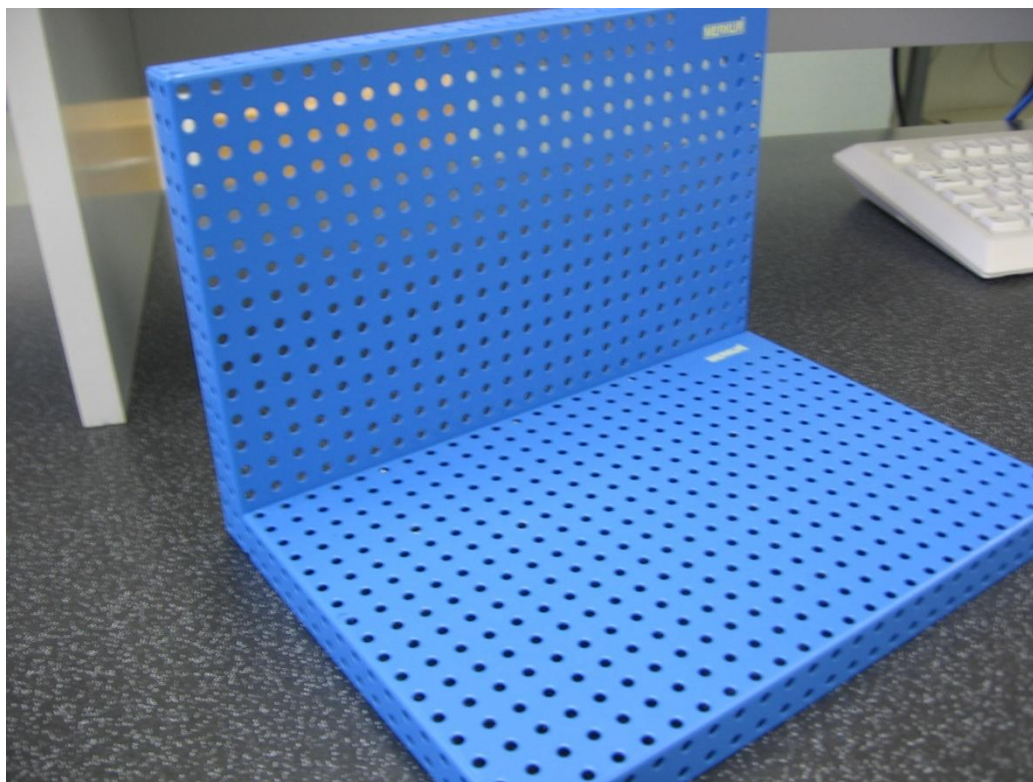
7.1 Konstrukce základny experimentální úlohy a spojovací materiál

Pro sestavení modelu byly použity dvě kovové desky jako základny o rozměrech 250x170x20 mm. Na obr. 25 je zobrazen způsob smontování jednotlivých desek k sobě. Z vyobrazení je také patrné, že na obou deskách jsou již předvrtané otvory umožňující snadnou montáž a variabilitu. Ty byly kritériem pro výběr spojovacího materiálu, kterým byly převážně úhelníky. Pomocí úhelníků je řešeno přichycení hliníkového tělesa, jako zdroje infračerveného záření. Jeho umístění je na svislé stěně deskové základny. Na ploše vodorovné deskové základny se budou nacházet další tři úhelníky o stejné výšce, jako je umístění hliníkového tělesa. Na každém z úhelníků musí být vyvrtán otvor pro uchycení jednotlivých termoelektrických senzorů. Průměry TO pouzder senzorů jsou rozdílné. Průměr senzoru TPS 334, jak uvádí technická specifikace je 9,3 mm. Tento průměr byl ověřen posuvným měřidlem pro měření délek. Ověření u dalších senzorů nebylo možné a to z důvodu jejich nedodání ze strany dodavatele. Musím podotknout, že požadované senzory byly v době objednání prostřednictvím mého vedoucího práce skladem a dokonce samotným dodavatelem potvrzeny. Následně však dodavatel poslal objednávku

nekompletní s vysvětlením, že došlo k chybě na jejich straně. Požadované senzory byly skladem, ale pouze v jejich systému ne však fyzicky. Termín dodání byl stanoven v souladu s jejich obchodními podmínkami a to na 2 až 3 týdny. Bohužel tento termín nebyl dodavatelem potvrzen. Ve fázi návrhu a konstrukce úlohy požadované senzory nebyly k dispozici. Po dohodě s vedoucím práce jsem měl dále při návrhu postupovat stejně jako bych dané senzory měl k dispozici s tím, že se doinstalují dodatečně po jejich doručení.

Dále pak vedení od jednotlivých výstupních pinů senzoru bude přivedeno na svorkovnici, která bude s největší pravděpodobností umístěna v blízkosti úhelníků na vodorovné deskové základně, tak aby nebylo příliš dlouhé. Jinak by mohlo dojít k nechtěnému zachycení rukou popř. jiným nástrojem o toto vedení a tak způsobit poškození pinů.

Takto osazená základna jednotlivými díly bude mít ještě prostor pro přidání např. dalšího zdroje infračerveného záření, na kterém může být realizováno měření teploty jiným, než bezdotykovým způsobem.



Obr. 25 Použití kovových desek jako základny

7.2 Zdroj infračerveného záření

Jako zdroj infračerveného záření bylo vybráno hliníkové těleso, protože jde o velmi dobrý tepelný vodič a zároveň je snadno dostupný např. ve srovnání s mosazí. Jeho rozměry jsou 130x30x20 mm, což je plně dostačující pro realizaci experimentální úlohy. Těleso je zobrazeno na obr. 26. Při finální konstrukci bude na jednu z ploch tělesa nanесena černá matná barva. Důvodem je emisivita tohoto lesklého kovu, která je mezi 0,2 až 0,5 a navíc klesá s teplotou. Po úpravě plochy se však emisivita přiblíží více jedné a tím bude materiál lépe emitovat elektromagnetické záření do prostoru. Problematika emisivity je popsána v teoretické části práce pod kapitolou 3.1.



Obr. 26 Kovové těleso – zdroj infračerveného záření

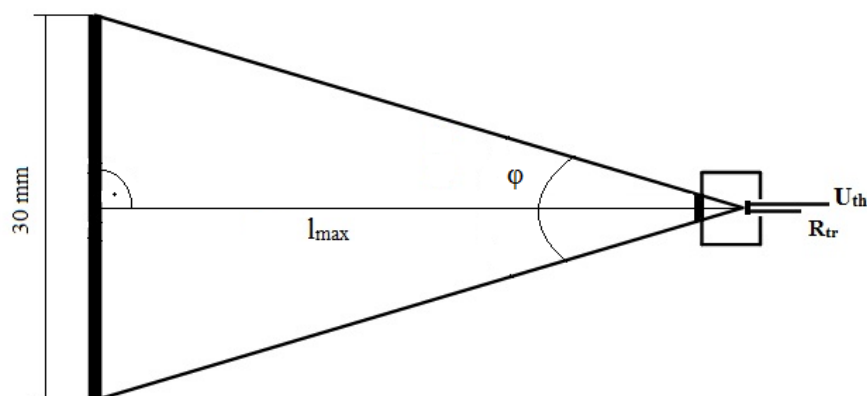
Vyhřívání tělesa bude řešeno dvěma metal oxidovými rezistory o výkonu 20W, které jsou vyobrazené na obr. 27. Rezistory budou uchyceny přilepením na vrchní část tělesa. Je zapotřebí být obezřetný při výběru správného lepidla. Musí být odolné proti teplotám vyšším než 100 °C, protože se při měření předpokládá zahřívání tělesa na hodnoty přesahující 90°C. Pro topná tělíska bude využit zdroj proměnného napětí 0 až 36 V DC, který má požadovaný výkon. Dále bude mezi těleso a úhelník umístěna tepelná izolace, která může být řešena formou teflonových podložek. Tímto nebude docházet k velkému přenosu tepla na konstrukci.



Obr. 27 Metal oxidové rezistory

7.3 Výpočet vzdáleností pro umístění termoelektrických senzorů

S rostoucí vzdáleností senzoru od tělesa se zvětšuje i obsah snímaného povrchu. Pro správné výsledky měření bude důležité jednotlivé senzory umístit v ideální vzdálenosti. Senzory nesmí reagovat na tepelné záření vyzařované za tělesem. Tím dochází k nepřesnostem a průměrování měřených hodnot. Při stanovení vzdálenosti se vychází z technických parametrů jednotlivých senzorů. Důležitou vlastností je zorný úhel jednotlivých senzorů, dále pak průměr citlivé plochy elementu a průměr vyzařovacího povrchu tělesa. Tím lze stanovit vzdálenost, ve které senzor snímá celý aktivní povrch zářiče. Postup výpočtu je patrný z níže uvedeného nákresu. Z pravoúhlého trojúhelníku za použití goniometrické funkce tangens vypočítáme maximální vzdálenost senzoru od objektu.



Obr. 28 Zorné pole termoelektrického senzoru

Příklad výpočtu je uvedený pro senzor TPS 230, jehož zorný úhel $\varphi = 82^\circ$. Při výpočtu budeme uvažovat poloviční úhel, tedy 41° . Průměr citlivé plochy tohoto senzoru je pouhých 0,5 mm.

$$l_{max} = \frac{14,75}{\tan 41^\circ} = 16,97 \text{ mm}$$

Jak již bylo zmíněno, maximální vzdálenost senzoru od objektu se bude brát v potaz při samotné realizaci úlohy. Obdobný způsob výpočtu je aplikován na senzor TPS 334, jehož zorný úhel $\varphi = 60^\circ$ a průměr citlivé plochy je 2,5 mm.

$$l_{max} = \frac{13,75}{\tan 30^\circ} = 23,82 \text{ mm}$$

Poslední senzor TPS 334 L10.6 má velmi odlišné parametry. Jeho zorný úhel $\varphi = 5^\circ$ s odchylkou $\pm 2^\circ$ a průměrem citlivé plochy 5,5 mm. Díky těmto parametrům je předurčen pro dálkové měřící aplikace.

$$l_{max} = \frac{12,25}{\tan 2,5^\circ} = 280,57 \text{ mm}$$

Další možný způsob výpočtu maximální vzdálenosti je z poměru mezi vzdáleností měřeného objektu a průměrem měřené plochy. Výrobce v technické dokumentaci senzoru TPS 334L10.6 uvádí tento poměr $D : S = 11 : 1$. Kde písmenkem D je označována vzdálenost – distance a písmenkem S je označován průměr objektu – spot size. Z toho poměru plyne, že maximální vzdálenost $l_{max} = 330 \text{ mm}$.

8 REALIZACE EXPERIMENTÁLNÍ ÚLOHY

Realizace experimentální úlohy probíhala na Fakultě aplikované informatiky ve Zlíně v laboratoři Senzorů, kde bylo k dispozici nezbytné nářadí a přístrojové vybavení pro konstrukci úlohy.

Základní konstrukce úlohy, jak již bylo popsáno v kapitole 7.1, bude tvořena ze dvou experimentálních desek značky Merkur. Tyto desky byly spojeny do stavu, který je názorně ukázán na obr. 25. Pro zachování modulárnosti konstrukce vycházející z jednoho z požadavků kladených na úlohu bylo použito pouze šroubových spojů. Jako vhodný spojovací materiál byly zvoleny šrouby o průměru 4,0 mm a délce 10 mm. Pomocí stejných šroubů byly na svislou stěnu vytvořené konstrukce upevněny i úhelníky, které budou sloužit jako nosníky pro montáž vyhřívaného tělesa, které je uvedeno na obr. 26 v kapitole 7.2. Před touto montáží bylo nutné těleso osadit rezistory viz. obr. 27., které budou zajišťovat výhřev tělesa a upravit snímanou část tělesa pro potřeby měření. Snímaná část tělesa byla opatřena nástřikem akrylkombinační černé matné barvy z důvodu zvýšení emisivity povrchu. Těleso bez této úpravy, tzn. lesklý kovový vzhled má emisivitu obecně udávanou v rozmezích 0,5 - 0,2. Výše uvedenou úpravou povrchu se předpokládá její nárůst. Určit však skutečnou emisivitu tělesa je velmi složitý a komplikovaný proces a ve většině případů se dá zjistit jen experimentálním měřením za pomoci speciálního k tomu určeného laboratorního vybavení.

Co se týče výhřevu tělesa, bylo z důvodu jeho velikosti zvoleno paralelní zapojení dvou dříve zmiňovaných rezistorů. Toto zapojení pak zajistí dvounásobný topný výkon za předpokladu dostačujícího napájecího zdroje. Rezistory byly na těleso připevněny pomocí vhodného a nejlépe dvousložkového lepidla, které musí odolávat vyšším teplotním rozsahům, čili pro tento případ až do hodnoty téměř 100 °C. U použitého lepidla je uvedena hodnota použití do maximální teploty 150 °C. Výsledný stav tělesa po jeho úpravách a osazení je patrný z obr. 29 a 30.



Obr. 29 Úprava hliníkového tělesa černou matnou barvou

Díky malým rozměrům topných tělísek 60x14x13 mm byly přilepeny na plochu tělesa pod sebou.



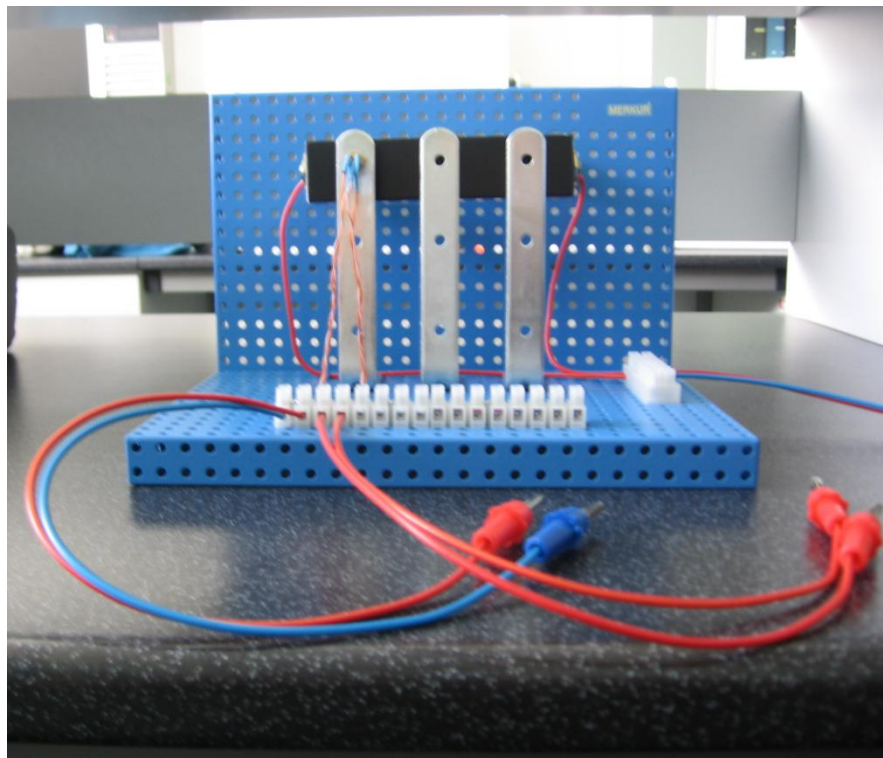
Obr. 30 Uchycení dvou metal oxidových rezistorů na hliníkové těleso

Při realizaci experimentální úlohy byl k dispozici pouze senzor TPS 334. Jak již bylo řečeno při návrhu úlohy popsaného v kap. 7. Bohužel chybějící dva senzory TPS 230 a TPS 334L10.6 nebyly dosud dodány a tudíž úloha bude realizována pouze s jedním z vybraných typů senzorů. Úloha bude konstruována tak, aby se daly chybějící senzory doplnit dodatečně. Po dohodě s vedoucím práce se bude jednat o hotovou přípravu na instalaci senzorů, vč. potřebné svorkovnice na pozdější vyvedení jejich výstupních signálů.

Jako přípravek na instalaci jednotlivých senzorů ve vhodné výšce a předem vypočítané vzdálenosti od snímaného tělesa bude využito tří úhelníků, které opět budou ke konstrukci upevněny pomocí šroubového spoje. Senzor bude instalován do předem vyvrtaného otvoru na přípravku. Z technické dokumentace senzoru TPS 334 byl zjištěn tento průměr, který byl pro jistotu přeměřen posuvným měřidlem vhodným k měření délek. Ten odpovídal přesně průměru uvedenému v technické dokumentaci.

Dále byly v laboratoři k jednotlivým pinům napájeny vodiče. Při pájení se postupovalo také z technické dokumentace, ve které jsou jasně označeny jednotlivé výstupy termistoru a senzoru. Tato technická dokumentace je součástí práce ve formě externí přílohy uvedené v P2-NZ.

Vedení bylo následně uchyceno do svorkovnice umístěné na okraji vodorovné desky. Poté z druhé strany svorkovnice byly vodiče zakončeny konektory typu banánek. Na obr. 31 je zobrazena experimentální úloha před ověřením její funkčnosti.



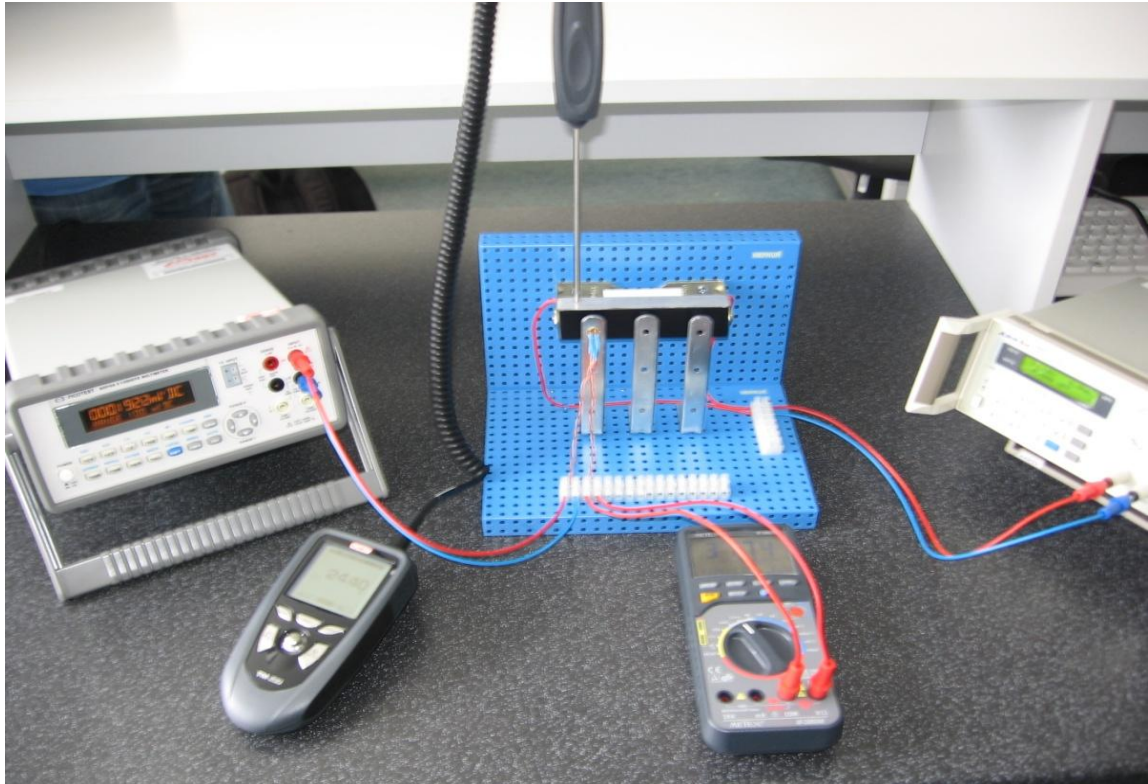
Obr. 31 Realizace experimentální úlohy

8.1 Ověření funkčnosti experimentální úlohy

Pro ověření funkčnosti experimentální úlohy bylo zapotřebí zapojit topné zařízení do zdroje proměnného napětí. V laboratoři byl pro tento účel k dispozici zdroj ARRAY 3645. Jde o programovatelný stejnosměrný napájecí zdroj 0 – 36 V. Může být vyladěn v režimu konstantního napětí nebo proudu. Pro docílení požadované teploty hliníkového tělesa pomocí topných rezistorů byl na zdroji nastaven výkon 40 W.

Jelikož nebyl k dispozici regulátor teploty, který by udržoval konstantní teplotu tělesa, bylo za potřebí teplotu měřit dotykovým teploměrem. Pro tento účel byl použit přístroj KIMO TM 200. Jedná se o digitální teploměr s dvou-kanálovým odporovým čidlem PT 100

a modulárním čtyř-kanálovým termočlávkovým čidlem. Teplota na tělese byla měřena pomocí kabelové sondy. Citlivý konec této sondy byl v kontaktu se zdrojem infračerveného záření. Z obr. 32 je patrné, že byl umístěn na levou stranu tělesa ve svislé poloze tak, aby měřená teplota samotného tělesa byla co nejméně ovlivněna topnými tělisky. Poté, co na displeji digitálního teploměru byla zobrazena požadovaná teplota, došlo k vypnutí výstupu zdroje. Důvodem bylo zamezení zvyšování teploty hliníkového tělesa.



Obr. 32 Ověření funkčnosti experimentální úlohy na měřících přístrojích

Pro měření výstupů senzoru TPS 334 byly použity dva digitální multimetry. Pro výstupní napětí to byl měřící přístroj PICOTEST M3510A. Jde o stolní multimetr se širokou škálou funkcí a mnohem větší citlivostí a přesností oproti ručním multimetrům. Citlivost tohoto přístroje je důležitá z důvodu velmi malého výstupního napětí termoelektrických senzorů v řádu milivoltů při nízkých (pokojových) teplotách. Při teplotě 24,7 °C bylo výstupní napětí senzoru 0,081 mV, které by bylo za použití přístroje s nízkým rozlišením neměřitelné.

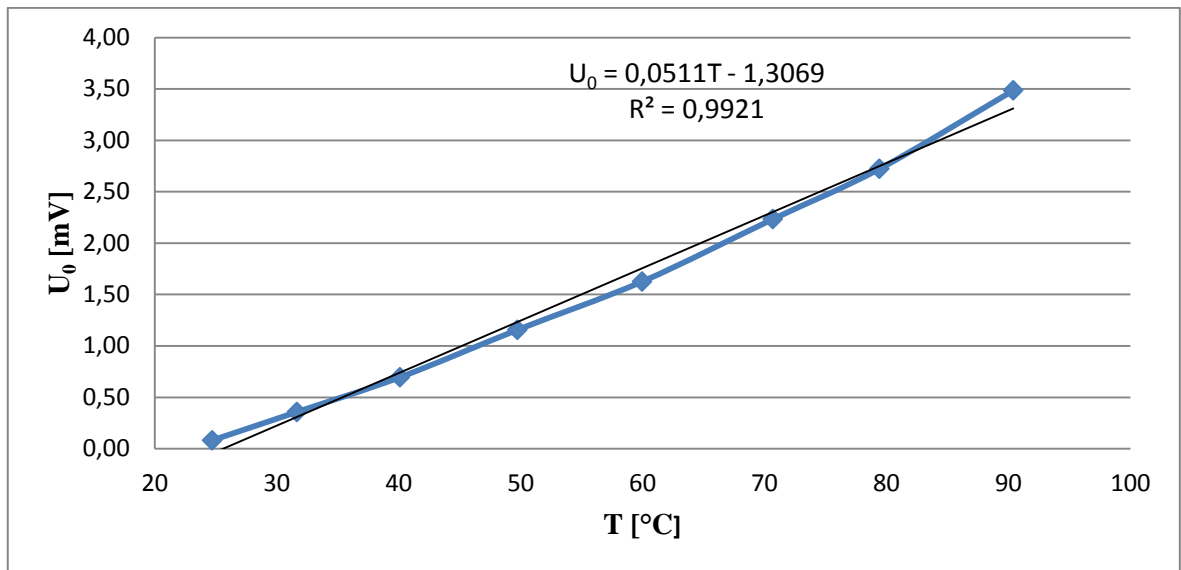
Dále pro měření výstupního odporu termistoru sloužícího pro kompenzaci vlivu okolní teploty na měřenou teplotu tělesa byl použit ruční digitální multimetr METEX M3860M. Se svým vybavením pro slaboproudé aplikace plně vyhovuje k měření odporu, který byl řádově v k Ω a klesal se zvyšující se teplotou pouzdra senzoru.

Funkčnost experimentální úlohy byla prakticky ověřena pro osm bodů zahřátí tělesa v rozmezích od 24,0 °C do 90,0 °C, naměřené hodnoty jsou uvedeny v příloze P1.

8.2 Zhodnocení výsledků měření

Měření teploty pomocí senzoru TPS 334 probíhalo v laboratoři Senzorů, kde došlo zároveň k realizaci experimentální úlohy. Před samotným průběhem měření byla místnost zajištěna před vlivy, které by mohly negativně ovlivnit proces měření. Jednalo se především o zamezení průvanu uzavřením všech oken a dveří. Mezi další faktor ovlivňující měření patřil pohyb osob poblíž měřící soustavy, který vyvolával proudění vzduchu. Veškerým negativním vlivům se však zabránit nedalo, např. zapnutým počítačům, změnám pozice slunce a teploty učebny. Vzhledem k těmto vlivům probíhalo měření teploty povrchu kovového tělesa desetkrát a to pro každý bod zahřátí. Tímto opakovaným měřením byla zajištěna vyšší spolehlivost výsledku.

Z naměřených dat byly určeny grafické závislosti průměrných hodnot vyhodnocených pro jednotlivé body. Na obr. 33 je znázorněn graf závislosti výstupního napětí senzoru na teplotě měřeného objektu. Jak již bylo zmíněno, tato závislost má přibližně lineární charakter a lze ji popsat rovnicí $U_0 = 0,0511T - 1,3069 [mV; ^\circ C]$. Po úpravě této rovnice získáme rovnici pro výpočet teploty měřeného kovového tělesa $T = 8,8496 \cdot U_0 + 20,06 [^\circ C; mV]$. Tato rovnice je však pouze orientační. Pro stanovení přesné teploty tělesa je zapotřebí uvažovat teplotu pouzdra termoelektrického senzoru, jelikož výstupní napětí senzoru je úměrné rozdílu srovnávacího a měřícího konce termočlánků senzoru, viz. obr. 10.



Obr. 33 Napět'ový výstup senzoru v závislosti na teplotě měřeného objektu

Při výpočtu teploty pouzdra senzoru se vychází z rovnice (25).

$$T = \frac{\beta \cdot T_{25}}{T_{25} \cdot \ln\left(\frac{R_{TR}}{R_{25}}\right) + \beta} [K] \quad (25)$$

kde

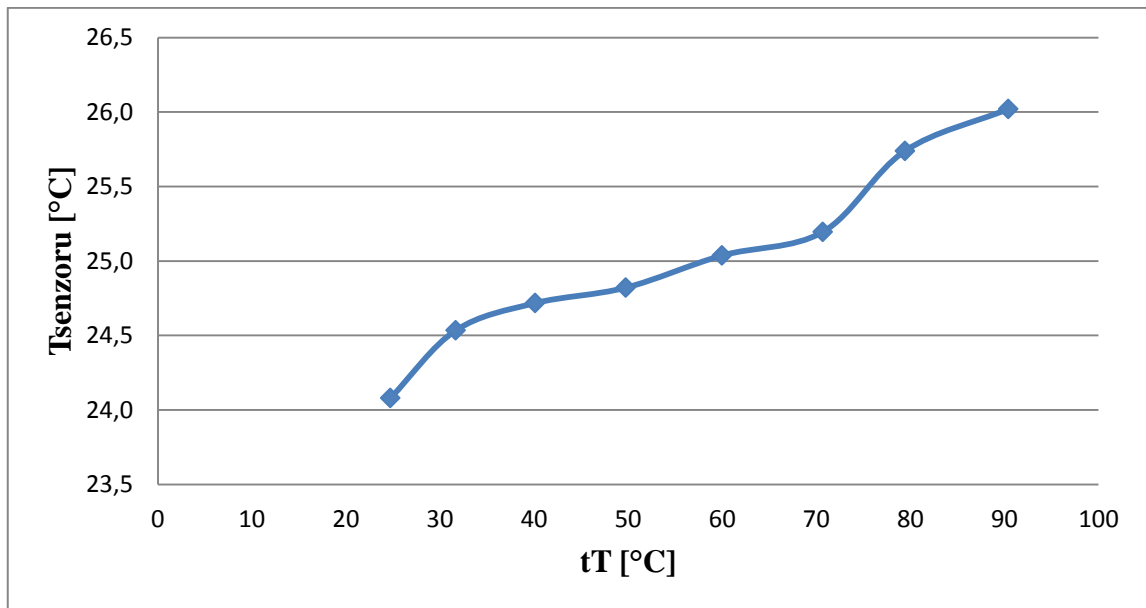
β je materiálová konstanta termistoru

T_{25} 298,15 K – teplotní konstanta

R_{25} odpor termistoru při teplotě 298,15 K

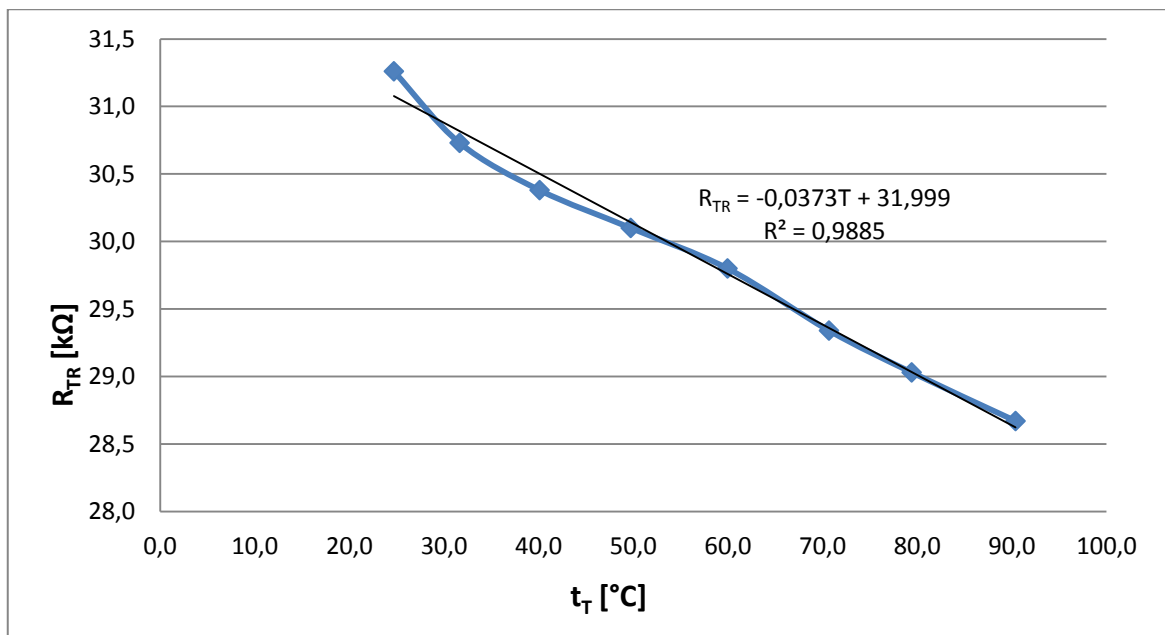
R_{TR} odpor termistoru.

Následně je vytvořena závislost teploty měřeného objektu na teplotě pouzdra senzoru. Z obr. 34 je patrné, že se zvyšující teplotou měřeného objektu nepatrně roste teplota uvnitř senzoru.



Obr. 34 Teplota pouzdra senzoru v závislosti na teplotě měřeného objektu

Měřením bylo také potvrzeno, že se zvyšující se teplotou tělesa dochází ke snižování hodnoty odporu termistoru, což ukazuje obr. 35.



Obr. 35 Výstup odporu termistoru v závislosti na teplotě měřeného tělesa

Na základě provedených měření na dostupných přístrojích byla navržena laboratorní úloha do předmětu Senzory, která je součástí této práce v příloze P I. Dále byl proveden návrh na zadání laboratorní úlohy, který je součástí výstupu této práce ve formě externí přílohy.

Tato příloha kromě návrhu na zadání laboratorní úlohy obsahuje technické dokumentace k jednotlivým sensorům, bez kterých by bylo obtížné uskutečnit správné měření. Tyto technické dokumentace jsou pouze součástí výše zmíněné přílohy, jelikož obsahují větší množství informací.

Předmětem návrhu experimentální úlohy měl být i regulátor teploty pro snadné hlídání a udržování teploty ohřátého tělesa. Bohužel z finančních důvodů již nebylo možné regulátor dokoupit společně s ostatním vybavením. Po konzultaci s vedoucím práce jsem byl ujistiěn, že regulátor teploty bude dokoupen dodatečně z finančních prostředků přislíbených vedením UEM (Ústav elektroniky a měření) pod které spadá laboratoř sensorů.

Celková cena zrealizované úlohy činila přibližně 1 650 Kč vč. DPH, z toho cena za termoelektrické senzory byla 1 041 Kč vč. DPH, cena za spojovací materiál, deskové základny a ostatní cca 580 Kč vč. DPH.

ZÁVĚR

Jedním z hlavních cílů bakalářské práce bylo navrhnout a realizovat experimentální úlohu pro bezdotykové měření teploty s využitím vybraných senzorů. Způsob zrealizování a měření teploty by nebylo účelné bez základních teoretických znalostí, na kterých je bezdotykové měření teploty založeno. Proto je tato práce koncipována do dvou částí. V první části jsou vysvětleny nezbytné fyzikální jevy a procesy ovlivňující podstatu funkce senzorů záření, které jsou pro lepší přehled rozděleny do dvou základních skupin a to tepelných a kvantových senzorů. Na základě tohoto rozdělení a popsaných vlastností jednotlivých senzorů byl proveden vhodný výběr, který je popsán v praktické části. Pro účely návrhu a realizace bylo zvoleno více senzorů, které se od sebe svými technickými parametry odlišují.

Bohužel ve fázi návrhu a realizace požadované senzory nebyly k dispozici a nebyly k dispozici ani v době blízcího se termínu odevzdání této bakalářské práce. Musím však podotknout, že požadované senzory byly v době objednání prostřednictvím vedoucího práce skladem a dokonce samotným dodavatelem potvrzeny. Následně byla dodavatelem poslána nekompletní objednávka s vysvětlením, že došlo k chybě systému. Po dohodě s vedoucím práce jsem při návrhu postupoval stejně, jako bych měl dané senzory k dispozici s tím, že se doinstalují dodatečně až po jejich doručení a to již do předem připravených konstrukcí.

Následně prostřednictvím experimentální aplikace bylo provedeno praktické měření s výběrem vhodných senzorů za účelem ověření jejich vlastností. Z výsledných výstupních napěťových a odporových signálů byly zpracovány grafické závislosti, které potvrdily přibližný očekávaný charakter průběhu těchto signálů. Z tohoto provedeného měření byl dále vypracován vzorový protokol, který je součástí práce. V externí příloze této práce byl navržen jeden z možných způsobů, jakým by mohlo být realizováno měření v rámci výuky předmětu Senzory.

ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ

One of the major objectives of the bachelor's thesis was to propose and implement an experimental assignment for touchless temperature measurement with the use of selected sensors. The way of implementation as well as the temperature measurement would not be purposeful without basic theoretical knowledge, which the touchless temperature measurement is based on. Therefore, the thesis is divided into two parts. The first part explains necessary physical effects and processes affecting the substantial function of radiation sensors, which are divided into two basic groups - the thermal and the quantum sensors – to achieve a better overview. Based on the aforementioned division as well as the described properties of particular sensors, a suitable selection, described in the second part, was made. For the purpose of the proposal and the implementation, more sensors were selected, which differ in their technical parameters.

Unfortunately, in the course of the proposal and implementation, the required sensors were not available; they were not available, however, even when the deadline for submission of this bachelor's thesis was approaching. I have to mention that the required sensors were not in stock, when being ordered by the leader of the thesis, even not confirmed by their supplier. A not complete delivery followed with the supplier's explanation there might have appeared some defects in the system. Upon an agreement with the leader of the thesis, I continued in working on the proposal as if I had had the sensors available with the intention to install them into the ready templates after the delivery.

Afterwards, through an experimental application, practical measurement with the selection of suitable sensors was made to verify their properties. The resulting output voltage and resistance signals were used for graphic dependences that confirmed the approximate expected character of the course of those signals. The aforementioned measurement resulted in a sample protocol, which is a part of the thesis. One of possible methods to implement the measurement within the subject "Sensors" was proposed as an external enclosure.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] CHUDÝ, Vladimír. Meranie technických veličín. 1. vyd. Bratislava: STU, 1999, 689 s. ISBN 8022712752.
- [2] KREIDL, Marcel. Měření teploty: senzory a měřicí obvody. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2005, 239 s. Senzory neelektrických veličín. ISBN 80-730-0145-4.
- [3] LYSENKO, Vladimír. Detektory pro bezdotykové měření teplot. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2005, 153 s. ISBN 80-730-0180-2.
- [4] ĎAĎO, Stanislav a Marcel KREIDL. Senzory a měřicí obvody. 2. vyd. Praha: ČVUT, 1999, 315 s., 351 obr. ISBN 8001020576.
- [5] HRUŠKA, František. Senzory v systémech informatiky a automatizace. Vyd. 1. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2007, 177 s. ISBN 978-80-7318-630-2.
- [6] *The History of Thermometers* [online]. 2008 [cit. 2013-03-21]. Dostupné z: http://www.tmelectronics.co.uk/acatalog/History_of_Thermometry.pdf
- [7] Objev a vývoj teploměru. *Teploměry - Galileo* [online]. 2008 [cit. 2013-03-21]. Dostupné z: <http://www.teplomery-galileo.cz/t-mereni-teploty/>
- [8] PŘÍHODA, Miroslav a Miroslav RÉDR. *Sdílení tepla a proudění*. 2., přeprac. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2008, 177 s. ISBN 978-80-248-1748-4.
- [9] Základy termografie. *Termokamery* [online]. 2005 [cit. 2013-03-21]. Dostupné z: <http://termokamery.net/--12-3-emisivita-odrazivost-priepustnost>
- [10] Emisivita, reflexe, transmise. In: *Testo* [online]. 2011 [cit. 2013-03-21]. Dostupné z: [http://www.testo.com/online/abaxx?\\$part=PORTAL.CZE.ContentDesk&\\$event=show-from-menu&categoryid=104097941](http://www.testo.com/online/abaxx?$part=PORTAL.CZE.ContentDesk&$event=show-from-menu&categoryid=104097941)
- [11] Miloš Hušek. *Principy bezdotykového měření teploty* [online]. 2009 [cit. 2013-03-21]. Dostupné z: <http://www.qtest.cz/bezdotykoveteplomery/bezdotykovemereni-teploty.htm>
- [12] Měření stupně emisivity. *Testo* [online]. 2011 [cit. 2013-03-21]. Dostupné z: [http://www.testo.com/online/abaxx-;jsessionid=A85C4A734F0EE0514B45B000D18F5553?\\$part=PORTAL.CZE.ContentDesk&\\$event=show-from-menu&categoryid=104113593](http://www.testo.com/online/abaxx-;jsessionid=A85C4A734F0EE0514B45B000D18F5553?$part=PORTAL.CZE.ContentDesk&$event=show-from-menu&categoryid=104113593)

- [13] Kadlec Karel. *Bezdotykové teploměry* [online]. 2012 [cit. 2013-03-23]. Dostupné z: http://web.vscht.cz/kadleck/aktual/mrt_fpbt/laboratore/Bezdotykove_tplomery.pdf
- [14] Vavříčka Roman. *Bezdotykové měření teploty* [online]. 29. 10. 2007 [cit. 2013-03-23]. Dostupné z: <http://utp.fs.cvut.cz/vz/clanky/104.pdf>
- [15] OMEGA: Zpravodaj pro měření a regulaci. *Bezdotykové měření teploty* [online]. 2005, roč. 1, č. 2, s. 80 [cit. 2013-03-23]. Dostupné z: http://www.newport.cz/techinfo/PDF/techinfo_1.pdf
- [16] Kadlec Karel: Měřicí technika. In: *Měření teploty* [online]. 2007 [cit. 2013-03-28]. Dostupné z: http://web.vscht.cz/kadleck/archiv/MT_INaRP/MT-INFaRP07_Teplota.pdf
- [17] Technotrend. *Termoelektrické snímače teploty* [online]. 2005 [cit. 2013-03-28]. Dostupné z: <http://www.technotrend.cz/stranky/teorie/teorie2.htm>
- [18] Mikroelektronika. In: *Teplotní senzory* [online]. 12. 1. 2010 [cit. 2013-03-28]. Dostupné z: <http://www.micro.feld.cvut.cz/home/X34SES/prednasky/05aTeplotn%A1%20senzory.pdf>
- [19] Automatizace. *Co jsou bolometry a mikrobolometry?* [online]. 16. 11. 2005 [cit. 2013-03-28]. Dostupné z: <http://automatizace.hw.cz/clanek/2005111601>
- [20] Teplotní senzory: Termoelektrické teplotní senzory. In: *Senzory* [online]. 25. 5. 2006 [cit. 2013-05-03]. Dostupné z: http://www.kom.tul.cz/to/sdilene/teplotni_senzory.pdf
- [21] Termoelektrické články: Peltierův jev. *Encyklopedie fyziky* [online]. 2006 [cit. 2013-05-03]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/911-peltieruv-jev>
- [22] Peltierův, Thomsonův a Seebeckův jev. In: *Maturita* [online]. 19. 4. 2007 [cit. 2013-05-03]. Dostupné z: <http://maturita.spermik.info/soubory/elektronika/MO9.doc>
- [23] Thermopile Sensor TPS 230. In: *Thermopile sensor datasheet* [online]. 12. 11. 2007 [cit. 2013-05-09]. Dostupné z: <http://elcodis.com/parts/5433426/TPS2303365.html#datasheet>

- [24] Thermopile Sensor TPS 334. In: *Thermopile sensor datasheet* [online]. 2007 [cit. 2013-05-09]. Dostupné z:
http://elcodis.com/parts/5432271/TPS3343161_p2.html#datasheet
- [25] Thermopile Sensor TPS 334L10.6. In: *Thermopile sensor datasheet* [online]. 2001 [cit. 2013-05-09]. Dostupné z:
<http://www.hofoo.com.cn/uploadfiles/tps3341106data.pdf>
- [26] PerkinElmer. *Our Company* [online]. 2013 [cit. 2013-05-23]. Dostupné z:
<http://www.perkinelmer.com/ourcompany/aboutus/default.xhtml>
- [27] Sensor technologies. In: *Technical Specification* [online]. 2007 [cit. 2013-05-23]. Dostupné z: <http://www.farnell.com/datasheets/1641812.pdf>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

TPS Thermopile Sensor

TO Transistor Outline

NTC Negative Temperature Coefficient

EMN Elektromotorické Napětí

DPH Daň z Přidané Hodnoty

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 zleva: Galileo Galilei, René-Antoine Ferchault de Réaumur, Andres Celsius, Daniel G. Fahrenheit, William Thomson Kelvin [2].....	13
Obr. 2 Elektromagnetické spektrum[1]	17
Obr. 3 Grafické vyjádření Planckova zákona [8]	18
Obr. 4 Dutinový černý zářič (a – kulový, b – válcový, c – kuželový, d – inverzní kuželový, e – technická realizace černého zářiče pro rozsah teploty černého tělesa od 200 °C do 1200 °C) [2]	26
Obr. 5 Schéma k výkladu šedého tělesa [8].....	27
Obr. 6 Seebeckův jev [3]	31
Obr. 7 Stav po připojení termočlánku do elektrického obvodu, uvolnění tepla [21]	31
Obr. 8 Stav po připojení termočlánku do elektrického obvodu, kde směr proudu je opačný než u Seebeckova jevu [21]	32
Obr. 9 Pokus s tyčí vysvětlující Thomsonův jev [22].....	32
Obr. 10 Termoelektrický senzor realizovaný technologií tenkých vrstev [2]	33
Obr. 11 Uspořádání senzoru v pouzdru [2].....	34
Obr. 12 Provedení jednoduchého bolometru [18]	34
Obr. 13 Uspořádání matice FPA [2]	35
Obr. 14 Uspořádání pyroelektrického senzoru [2].....	36
Obr. 15 Ukázka termoelektrických senzorů [27].....	42
Obr. 16 Ukázka pyroelektrických senzorů [27].....	44
Obr. 17 Závislost relativní citlivosti na úhlu dopadu [23].....	47
Obr. 18 Spektrální propustnost standardního filtru PerkinElmer [23].....	47
Obr. 19 Zapojení jednotlivých výstupů senzoru TPS 230 [23]	48
Obr. 20 Závislost relativní citlivosti na úhlu dopadu [24].....	49
Obr. 21 Zapojení jednotlivých výstupů senzoru TPS 334 [24]	49
Obr. 22 Zorný úhel senzoru TPS 334L10.6 [25]	50
Obr. 23 Zapojení jednotlivých výstupů senzoru TPS 334L10.6 [25].....	51
Obr. 24 Blokové schéma návrhu experimentální úlohy	52
Obr. 25 Použití kovových desek jako základny.....	53
Obr. 26 Kovové těleso – zdroj infračerveného záření	54
Obr. 27 Metal oxidové rezistory	55
Obr. 28 Zorné pole termoelektrického senzoru	55

Obr. 29 Úprava hliníkového tělesa černou matnou barvou	58
Obr. 30 Uchycení dvou metal oxidových rezistorů na hliníkové těleso	58
Obr. 31 Realizace experimentální úlohy.....	59
Obr. 32 Ověření funkčnosti experimentální úlohy na měřicích přístrojích	60
Obr. 33 Napěťový výstup senzoru v závislosti na teplotě měřeného objektu	62
Obr. 34 Teplota pouzdra senzoru v závislosti na teplotě měřeného objektu	63
Obr. 35 Výstup odporu termistoru v závislosti na teplotě měřeného tělesa	63

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Technické specifikace senzorů s jedním snímacím elementem [27].....	43
Tab. 2 Technické specifikace senzorů se dvěma a čtyřmi snímacími elementy [27].....	43
Tab. 3 Základní parametry pyroelektrických senzorů s jedním snímacím elementem [27]	45
Tab. 4 Technické parametry senzoru TPS 230	46
Tab. 5 Technické parametry senzoru TPS 334	48
Tab. 6 Technické parametry senzoru TPS 334	50

SEZNAM PŘÍLOH

P I NÁVRH LABORATORNÍ ÚLOHY

PŘÍLOHA P I: NÁVRH LABORATORNÍ ÚLOHY

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky			
Jméno:	Tomáš Malinka	Ročník:	III.
Předmět:	Senzory	Skupina:	3BX
		Naměřeno:	15. 5. 2013
Název úlohy:	Bezdotykové měření teploty	Odevzdáno:	
		Hodnocení:	

Cíl:

Měření a vyhodnocení termoelektrického senzoru při vystavení působení elektromagnetického záření oblasti vlnové délky od 7 μm .

Teoretický úvod:

Bezdotykové měření teploty je založeno na vyhodnocování povrchového tepleného záření těles. Tento způsob měření teploty označujeme jako infračervená pyrometrie. Základem je vysílané elektromagnetické záření tělesem. Při rovnovážném stavu mezi energií vysílanou a přijímanou je pro stav zářiče charakteristická určitá teplota. Vysílané záření tělesem nazýváme teplené a skládá se z různých vlnových délek. Pro tepelné záření je typická vlnová délka od 2 μm do 25 μm .

Senzory určené na měření teploty bezdotykovým způsobem využívají tepelných jevů, jako Seebeckova, Peltierova a Thomsonova, z nichž je většinou jeden dominantní.

Základním prvkem termoelektrických senzorů jsou termočlánky. Ty jsou právě založeny na Seebeckově jevu, tj. jevu, při kterém dochází k převodu teplené energie na energii elektrickou.

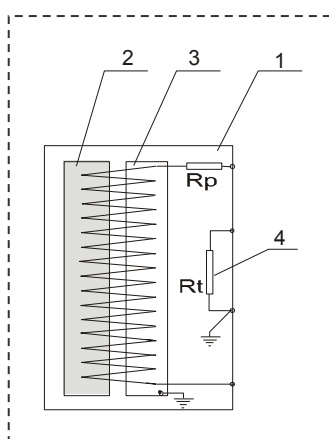
Termoelektrické senzory jsou tvořeny sériově řazenými termoelektrickými články. Ty mohou být konstruovány jako tenké kovové pásky o tloušťce přibližně 0,03 mm, popř. jako pásky zhotovené technologií tenkých vrstev nebo Si technologií. Na tyto tenké kovové pásky se používají normované typy termoelektrických větví, ale také materiály jako Bi, Te nebo Sb dopované Se.

Při výběru materiálu pro termoelektrický senzor je zapotřebí splnění některých základních podmínek, např. závislost termoelektrického napětí na teplotě blízké lineárnímu průběhu. Materiál by měl být odolný vůči chemickým, mechanickým a korozním vlivům. Materiál volíme na základě požadovaného rozsahu teplot a požadované přesnosti měření.

Termoelektrické senzory tedy přímo reagují na tepelné (infračervené) vyzařování objektu ve směru, kterým jsou namířeny. Série termočlánků má aktivní konce umístěny do jednoho místa. Tyto konce jsou pokryty černě zbarveným materiálem pohlcující infračervené záření. Zde se převádí dopadající záření na teplo měřené termočlánky. Záření dopadá na toto místo skrze okénko v pouzdru senzoru, zároveň pracuje jako optický filtr, který vymezuje snímanou oblast. Výstupem senzoru je výstupní napětí, které je úměrné dopadající intenzitě infračerveného záření.

Součástí senzorů je klasický referenční termistor typu NTC sloužící k měření teploty pouzdra senzoru. Je nutností provádět kompenzaci vlivu okolní teploty (teplota srovnávacího spoje termočlánků) na měřenou teplotu objektu.

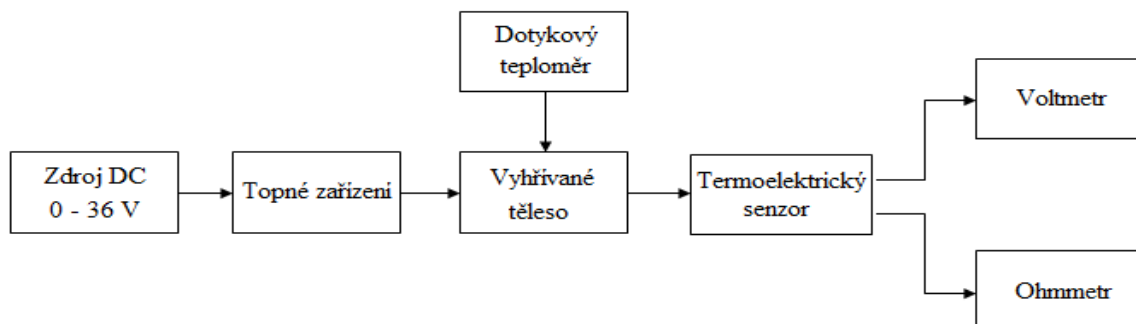
Blokové schéma termoelektrického senzoru je uvedeno na obr. 1. Na tělísku (1) jsou termočlánky umístěny tak, že měřicí konce jsou tepelně vodivě a elektricky nevodivě spojeny s plochou (2), která je vystavena elektromagnetickému záření a srovnávací konce jsou napojeny na plochu (3) umístěnou mimo dosah záření. Přes odpor R_p je vyvedeno výstupní napětí úrovně mV. Termistor obsahuje pro měření teploty srovnávacích konců termistor R_t označený pozicí (4).



Obr. 1 Blokové schéma termoelektrického senzoru

Popis úlohy:

Kovové těleso je za pomoci topných tělísek o celkovém výkonu 40 W zahříváno v rozmezí teplot od 30 °C až po 90 °C, přičemž každý bod zahřátí je kontrolován neustálým měřením pomocí digitálního dotykového teploměru. Infračervené vyzařování kovovým tělesem je snímáno prostřednictvím termoelektrického senzoru, jehož výstupní signály jsou měřeny za pomoci voltmetru a ohmmetru. Tyto signály budou následně zpracovány.



Obr. 2 Blokové schéma experimentální úlohy

Postup při měření:

Na zdroji stejnosměrného napětí bylo nastaveno výstupní napětí 20 V a proud 3,0 A. Pro docílení požadované teploty byl výstup zdroje manuálně zapínán a vypínán. Výstupní signály senzoru tak byly měřeny při pokojové teplotě a poté pro 7 různých bodů zahřátí tělesa v rozmezí od 30 °C až po 90 °C po kroku 10 °C. Při postupném zahřívání teploty tělesa se měnilo působení IČ záření na senzor, který tento podnět snímal a převáděl na elektrický výstupní signál. Tento výstupní signál byl změřen při každém bodu zahřátí celkem 10x. Naměřené hodnoty byly zpracovány do tabulek. Poté byl určen průměr, směrodatná odchylka, maxima a minima těchto hodnot. Výsledně byly vytvořeny grafické závislosti pro termoelektrický senzor.

Použité měřicí přístroje a zařízení:

Sestava modelu úlohy

Zdroj proměnného napětí ARRAY 3645 DC 0 – 36 V / 0 – 3 A

Stolní digitální multimetr PICOTEST M3510A

Ruční digitální multimetr METEX M3860M

Naměřené hodnoty:

Č.m	t_T [°C]	U_0 [mV]	R_t [kΩ]
1	24,90	0,084	31,29
2	24,90	0,083	31,28
3	25,00	0,081	31,30
4	24,70	0,079	31,26
5	24,60	0,084	31,26
6	24,80	0,078	31,28
7	24,50	0,082	31,26
8	24,50	0,076	31,24
9	24,50	0,081	31,25
10	24,60	0,082	31,22
\emptyset	24,70	0,081	31,264
σ	0,189	0,003	0,024
V_{\max}	25,00	0,084	31,30
V_{\min}	24,50	0,076	31,22

Tab. 1 Naměřené hodnoty při pokojové teplotě

Č.m	t_T [°C]	U_0 [mV]	R_t [kΩ]
1	31,90	0,384	30,72
2	31,90	0,381	30,71
3	32,00	0,379	30,71
4	32,00	0,370	30,64
5	31,80	0,368	30,62
6	31,80	0,354	30,62
7	31,80	0,335	30,58
8	31,50	0,335	30,58
9	31,10	0,335	30,56
10	30,70	0,327	30,60
\emptyset	31,65	0,357	30,63
σ	0,430	0,022	0,059
V_{\max}	32,00	0,384	30,72
V_{\min}	30,70	0,327	30,56

Tab. 2 Naměřené hodnoty při požadované teplotě 30 °C

Č.m	t_T [°C]	U_0 [mV]	R_t [kΩ]
1	40,80	0,712	30,34
2	40,90	0,715	30,35
3	40,40	0,709	30,38
4	40,20	0,700	30,34
5	40,00	0,695	30,42
6	40,00	0,692	30,38
7	40,00	0,694	30,38
8	39,70	0,689	30,38
9	39,50	0,674	30,40
10	39,50	0,674	30,40
\emptyset	40,10	0,695	30,38
σ	0,488	0,014	0,027
V_{\max}	40,90	0,715	30,42
V_{\min}	39,50	0,674	30,34

Tab. 3 Naměřené hodnoty při požadované teplotě 40 °C

Č.m	t_T [°C]	U_0 [mV]	R_t [kΩ]
1	50,00	1,153	30,24
2	49,80	1,149	30,29
3	49,40	1,139	30,26
4	49,30	1,140	30,24
5	49,70	1,151	30,26
6	49,90	1,170	30,28
7	49,80	1,169	30,20
8	50,00	1,169	30,20
9	49,70	1,159	30,23
10	49,70	1,162	30,21
\emptyset	49,73	1,156	30,24
σ	0,231	0,012	0,032
V_{\max}	50,00	1,170	30,29
V_{\min}	49,30	1,139	30,20

Tab. 4 Naměřené hodnoty při požadované teplotě 50 °C

Č.m	t_T [°C]	U_0 [mV]	R_t [kΩ]
1	60,00	1,679	29,98
2	60,10	1,681	29,98
3	60,00	1,689	29,94
4	60,40	1,192	29,96
5	60,20	1,684	29,98
6	60,00	1,681	29,94
7	60,10	1,676	29,90
8	59,70	1,665	29,96
9	59,50	1,654	29,90
10	59,60	1,659	29,94
∅	59,96	1,626	29,95
σ	0,280	0,153	0,030
V_{max}	60,40	1,689	29,98
V_{min}	59,50	1,192	29,90

Tab. 5 Naměřené hodnoty při požadované teplotě 60 °C

Č.m	t_T [°C]	U_0 [mV]	R_t [kΩ]
1	69,90	2,214	29,73
2	70,60	2,235	29,72
3	70,50	2,239	29,72
4	70,80	2,247	29,73
5	70,90	2,249	29,74
6	70,90	2,246	29,76
7	70,90	2,244	29,76
8	70,80	2,233	29,75
9	70,90	2,223	29,72
10	70,60	2,212	29,72
∅	70,68	2,234	29,74
σ	0,312	0,014	0,016
V_{max}	70,90	2,249	29,76
V_{min}	69,90	2,212	29,72

Tab. 6 Naměřené hodnoty při požadované teplotě 70 °C

Č.m	t_T [°C]	U_0 [mV]	R_t [kΩ]
1	79,00	2,702	29,06
2	78,80	2,719	29,10
3	79,70	2,724	29,06
4	79,50	2,742	29,02
5	79,30	2,721	29,06
6	79,50	2,721	29,05
7	79,40	2,706	29,02
8	79,40	2,704	28,98
9	79,60	2,742	28,92
10	80,00	2,751	29,04
∅	79,42	2,723	29,03
σ	0,339	0,017	0,050
V_{max}	80,00	2,751	29,10
V_{min}	78,80	2,702	28,92

Tab. 7 Naměřené hodnoty při požadované teplotě 80 °C

Č.m	t_T [°C]	U_0 [mV]	R_t [kΩ]
1	88,60	3,400	28,69
2	89,10	3,435	28,68
3	89,80	3,466	28,70
4	90,00	3,741	28,72
5	90,50	3,482	28,64
6	90,90	3,485	28,71
7	91,40	3,481	28,62
8	91,90	3,469	28,70
9	91,30	3,455	28,64
10	90,50	3,449	28,64
∅	90,40	3,486	28,67
σ	1,042	0,093	0,036
V_{max}	91,90	3,741	28,72
V_{min}	88,60	3,400	28,62

Tab. 8 Naměřené hodnoty při požadované teplotě 90 °C

Výpočet teploty pouzdra termoelektrického senzoru:

Při měření teploty kovového tělesa dochází k přenosu tepla na samotný senzor. Ten se vlivem působení tepleného záření od tělesa nepatrně zahřívá. Tento ohřev má vliv na kvalitu a přesnost měření a je potřeba jej korigovat. Při výpočtu využijeme následující vzorec:

$$T = \frac{\beta \cdot T_{25}}{T_{25} \cdot \ln\left(\frac{R_{TR}}{R_{25}}\right) + \beta} [K] \quad (1)$$

kde

$$\beta = 3\,964 \text{ K definovaných při } 298,15 \text{ K}$$

$$T_{25} = 298,15 \text{ K – teplotní konstanta}$$

$$R_{25} = 30,0 \text{ k}\Omega. \text{ odpor termistoru při } 298,15 \text{ K.}$$

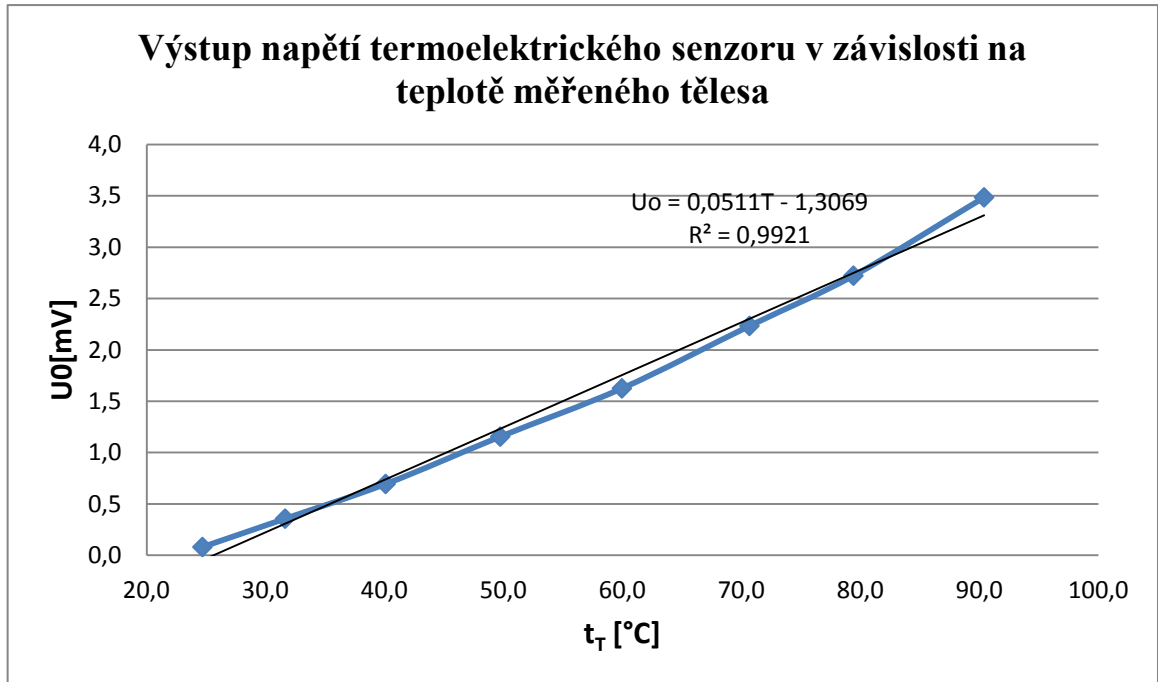
Vzorový výpočet teploty pouzdra termoelektrického senzoru při průměrné teplotě tělesa 31,65 °C a odporu termistoru 30,63 kΩ.

$$T = \frac{\beta \cdot T_{25}}{T_{25} \cdot \ln\left(\frac{R_{TR}}{R_{25}}\right) + \beta} - 273,15 = \frac{3\,964 \cdot 298,15}{298,15 \cdot \ln\left(\frac{30,63}{30,0}\right) + 3964} - 273,15 = 24,53468 \text{ °C}$$

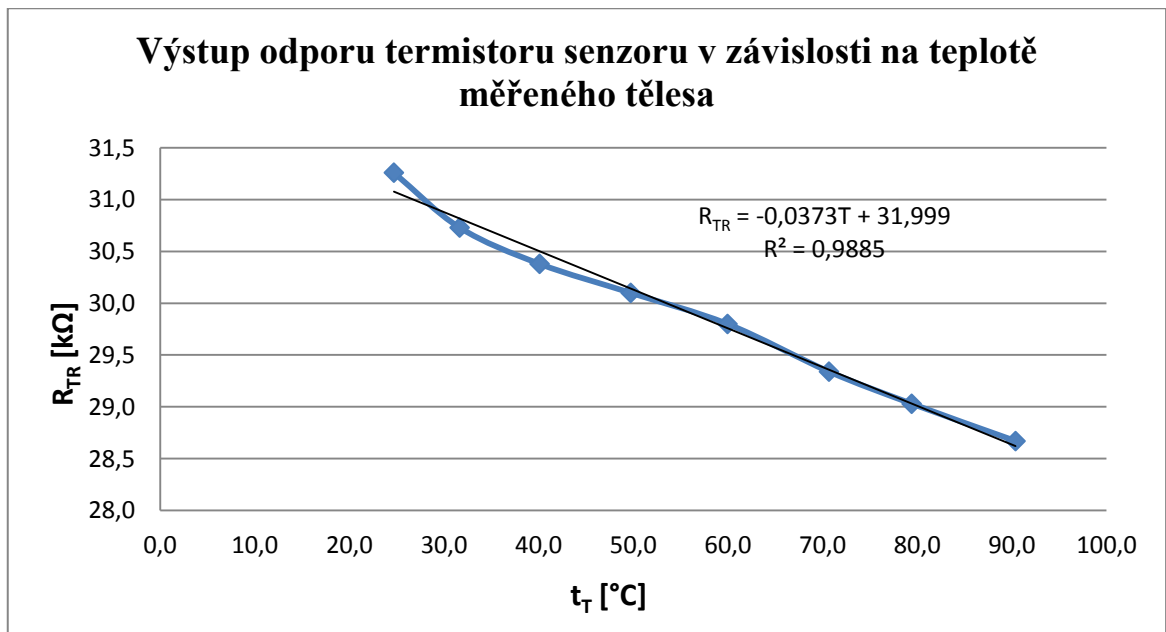
Č.m	t _T [°C]	R _{TR} [kΩ]	t _{senzoru} [°C]
1	24,70	31,26	24,080
2	31,65	30,63	24,535
3	40,10	30,38	24,718
4	49,73	30,24	24,821
5	59,96	29,95	25,037
6	70,68	29,74	25,195
7	79,42	29,03	25,739
8	90,40	28,67	26,020

Tab. 9 Teplota pouzdra termoelektrického senzoru

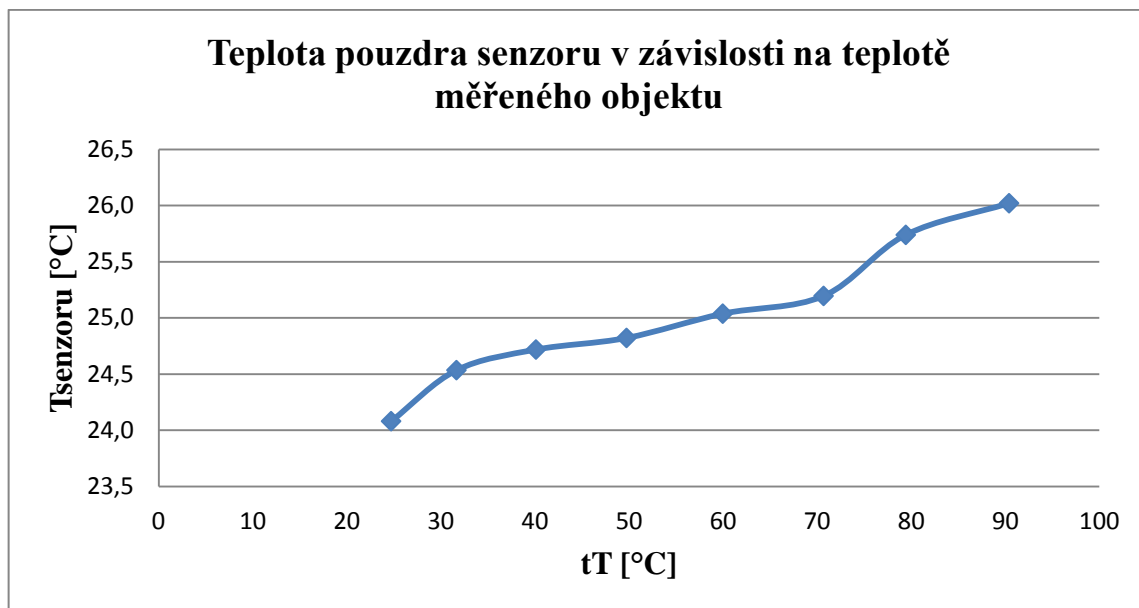
Grafy:



Obr. 3 Výstup napětí termoelektrického senzoru v závislosti na teplotě měřeného tělesa



Obr. 4 Výstup odporu termistoru v závislosti na teplotě měřeného tělesa



Obr. 5 Teplota pouzdra senzoru v závislosti na teplotě měřeného tělesa

Závěr:

Během procesu jednotlivých měření jsem se snažil, aby nedocházelo k velkému ovlivnění měřených hodnot negativními vlivy. Mezi ně můžeme zařadit pohyb osob za senzorem, otevřené okno v místnosti způsobující průvan aj. Senzor na tyto jevy reaguje velmi citlivě a tak může docházet k průměrování měřených hodnot.

Pro větší přesnost bylo provedeno deset měření pro osm ustálených teplot a to v rozmezí od 24 °C až po 90 °C. Během měření byla data zapisována do tabulek, na jejichž základě probíhalo vyhodnocení měření. Z výstupní charakteristiky senzoru TPS 334 je patrné, že se výstupní napětí U_0 s rostoucí teplotou tělesa zvyšuje. Naopak z výstupní charakteristiky termistoru bylo potvrzeno, že s rostoucí teplotou dochází k poklesu hodnoty odporu.

Dále byl proveden výpočet teploty pouzdra senzoru. Tyto hodnoty se mírně zvyšovaly s rostoucí teplotou kovového tělesa. Z naměřené charakteristiky je tedy patrný mírný nárůst této teploty, který má vliv na přesnost měření a je ho třeba korigovat.