

ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ
Ústav automobilů, spalovacích
motorů a kolejových vozidel

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2022



REALIZACE BEZDOTYKOVÉHO MĚŘENÍ TEPLOTY DÍLŮ VE SPALOVACÍM MOTORU

**IMPLEMENTATION OF NON-CONTACT TEMPERATURE
MEASUREMENT OF PARTS IN AN INTERNAL COMBUSTION
ENGINE**

AUTOR: Vojtěch Kohoutek

VEDOUCÍ: Ing. Zbyněk Syrovátka, Ph.D.

STUDIJNÍ OBOR: Teoretický základ strojního
inženýrství, bez oboru

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Kohoutek** Jméno: **Vojtěch** Osobní číslo: **493581**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Realizace bezdotykového měření teploty dílů ve spalovacím motoru

Název bakalářské práce anglicky:

Implementation of non-contact temperature measurement of parts in an internal combustion engine

Pokyny pro vypracování:

Podle předběžného návrhu, proveďte realizaci bezdotykového měření teploty dílů ve spalovacím motoru pomocí pyrometru. Navrhněte a vyhledejte vhodné komponenty měřicího řetězce, vytvořte technickou dokumentaci. Systém sestavte a otestujte jeho funkčnost. Hlavním cílem této práce je zjištění teploty spodní části tzv. předkomůrky (zapalovací systém pro nepřímý zážeh homogenní plyné směsi) za provozu motoru.

Seznam doporučené literatury:

BP - A. Flídr (FS ČVUT, 2020), dokumentace: Micro-epsilon, výkresová dokumentace.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Zbyněk Syrovátka, Ph.D. ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **20.04.2022** Termín odevzdání bakalářské práce: **13.07.2022**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

Ing. Zbyněk Syrovátka, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Oldřich Vítek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Anotační list

Jméno autora:	Vojtěch Kohoutek
Název BP:	Realizace bezdotykového měření teploty dílů ve spalovacím motoru
Akademický rok:	2021/2022
Ústav:	Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel
Vedoucí BP:	Ing. Zbyněk Syrovátka, Ph.D.
Klíčová slova:	Teplota, mechanismy přenosu tepla, kontaktní a bezkontaktní měření teploty, termoelektrický článek, odporové snímače teploty, bezdotykové snímání teploty, detektory tepelného záření, pyrometr
Keywords:	Heat, heat transfer mechanism, contact and non-contact temperature measurement, thermocouple, resistive temperature detector, non-contact temperature measurement, thermal radiation detector, pyrometr
Anotace:	Bakalářská práce se věnuje bezdotykovému měření spalovací předkomůrky ve spalovacím motoru. Nejprve jsou popsány a definovány základní pojmy jako teplo a mechanismy přenosu tepla. Vysvětlení pojmu emisivita a černé těleso. Dalším tématem je obecně měření a navazující měření teploty. Je popsáno měření kontaktní pomocí termoelektrických článků, odporových snímačů teploty a termistoru. Dále navazuje popis bezdotykového měření teploty pyrometru. Cílem práce je zhotovený návrh na úpravu hlavy motoru pro přístup pyrometru a vyhodnocení měřicí úlohy pro nakalibrování pyrometru.

Abstract:

The object of bachelor thesis is devoted to non-contact temperature measurement of combustion prechamber in internal combustion engine. In the first instance are described and defined basic concepts such as heat and mechanism of heat transfer. Explanation of emissivity and the black body. In the next topic is described measurement in general following by temperature measurement. Next is described temperature measurement with thermocouples, resistant temperature detectors and thermistors. Last but not least is described non-contact temperature measurement with pyrometer. The goal of work is completed proposal to engine head adjustments for pyrometer access and also evaluation measuring task for pyrometer calibration.

Čestné prohlášení

Tímto prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím citované literatury uvedené v seznamu citované literatury na konci dokumentu, pod vedením pana Ing. Zbyňka Syrovátky, Ph.D.

V Praze dne:

Podpis:

Vojtěch Kohoutek

Poděkování

Rád bych poděkoval svému vedoucímu práce Ing. Zbyněk Syrovátka, Ph.D. za odborný dohled, konzultace, měření, rady při vypracování mé práce a čas, který mi věnoval.

Obsah

Obsah	7
Úvod.....	9
1 Základní pojmy	11
1.1 Teplo	11
1.2 Rozdíl mezi teplem a teplotou.....	11
2 Mechanismy sdílení tepla	13
2.1 Vedení (kondukce)	13
2.1.1 Součinitel tepelné vodivosti.....	13
2.2 Proudění (konvekce)	14
2.3 Tepelné záření (radiace).....	15
2.4 Emisivita, černé těleso	16
3 Měření teploty	18
3.1 Senzor teploty.....	18
3.2 Dotykové snímání teploty	19
3.2.1 Termoelektrické články	19
3.2.2 Odporové snímače teploty	21
3.2.3 Termistory.....	23
3.3 Bezdotykové měření teploty	24
3.3.1 Zákony záření	25
3.3.2 Detektory tepelného záření	27
3.3.3 Pyrometry.....	29
4 Návrh úpravy hlavy motoru.....	31
4.1 Popis značení senzoru	31
4.2 Sestava finálního návrhu	32

4.3	Výpočet tloušťky ochranného sklíčka.....	33
5	Zpracování dat z měření pyrometrem.....	34
5.1	Popis úlohy.....	34
5.2	Měření teploty předkomůrky.....	36
5.3	Sekundární měření	39
5.4	Vyhodnocení směrníc.....	41
5.5	Závěr měření	41
	Závěr	43
	Citovaná literatura.....	44
	Seznam obrázků	46
	Seznam tabulek	47
	Seznam příloh	48

Úvod

Konkrétní zadání mé bakalářské práce je bezdotykové snímání teploty spalovací předkomůrky v jednoválcovém spalovacím motoru od firmy Škoda. Při použití předkomůrky dojde k vytvoření dvou spalovacích prostor, které jsou propojeny pomocí malých otvorů předkomůrky. Může jít o předkomůrku pasivní či aktivní, kdy součástí aktivní tzv. vyplachované předkomůrky je vlastní přívod paliva jak sacím potrubím, tak předkomůrkou a dochází tedy k vyplachování plynů z předešlého cyklu spalování. V komůrce je zapalovací svíčka, která zapaluje směs v prostorech komůrky a pomocí otvůrků dále i v hlavním spalovacím prostoru. Pasivní nebo také nevyplachovaná předkomůrka již nemá samostatný přívod spalovací směsi do prostor komůrky a k jejímu plnění dochází z hlavních spalovacích prostor a nedochází již k jejímu samovyplachování.

Spalovací předkomůrka umožňuje spalování chudé směsi, která poskytuje snížení maximální teploty a tím i snížení tepelných ztrát, tedy zvýšení tepelné účinnosti. Zvyšuje i rychlost spalování chudé směsi. Díky snížení maximální teploty dochází i ke snížení emisí, primárně NO_x. Znalost tepelného zatížení spalovací předkomůrky je tedy požadovaná z důvodu lepšího pochopení průběhu spalování paliva v prostorech předkomůrky, popřípadě k úpravě její konstrukce.

Od začátku práce jsem měl k dispozici bezkontaktní snímač teploty od firmy Micro-Epsilon, se kterým jsem musel pracovat a vycházet z jeho parametrů, při návrhu úpravy hlavy motoru. V praktické části se věnuji návrhu pro úpravu hlavy motoru tak, aby se zmíněný senzor mohl použít a snímat teplotu spalovací předkomůrky. Důvodů, proč je použito bezdotykové měření teploty je povícero. Mezi hlavní důvody patří složitá přístupnost dotykového snímače v těchto prostorech spalovacího motoru, protože spodní část předkomůrky je malých rozměrů a bylo by komplikované do těchto míst zpřístupnit dotykový senzor. Dále pak například jednodušší manipulace se senzorem, jeho výměna nebo nastavení, který nepřímě zasahuje do spalovacího prostoru. Je tedy jednodušší použít bezdotykového snímání teploty.

Měření teploty je obecně v motoru velmi důležité a požadované, pomocí různých typů senzorů. Výsledky měření vypovídají o teplotním zatížení jednotlivých komponent, které je možné poté sledovat a předcházet různorodým komplikacím.

V teoretické části práce se věnuji základním pojmům předcházející měření teploty, jako rozdíl mezi teplem a teplotou, či mechanismům sdílení tepla. Dále se věnuji popisu měření teploty, které je rozdělené na kontaktní a bezkontaktní. V obou případech jsou vysvětleny jednotlivé typy snímačů a jejich principy, dle kterých pracují.

V konečné části práce se věnuji měření náhradní úlohy pyrometrem, protože naneštěstí můj návrh pro úpravu hlavy motoru a následné snímání teploty senzorem nemohl být realizován, kvůli nemožnosti demontování hlavy motoru, a tedy i nemožnosti jejího obrobení.

1 Základní pojmy

Pro měření teploty je nejprve nutné si popsat a definovat co teplota vlastně je, jaký je například rozdíl mezi teplem a teplotou nebo jakými mechanismy se teplo může přenášet. V následujících kapitolách a podkapitolách jsou tedy vysvětleny a popsány základní pojmy a principy předcházející měření teploty, včetně popsání černého tělesa a emisivity.

1.1 Teplo

Teplo je výměna energie způsobená rozdílnou teplotou ve dvou různých systémech, které jsou spolu v kontaktu. Protože teplo je přenos energie, je také měřeno ve stejných jednotkách jako energie, v joulech (J) a značí se Q . Podle druhého zákona termodynamiky bude teplo vždy proudit z teplejšího systému do chladnějšího. [5]

1.2 Rozdíl mezi teplem a teplotou

Ačkoli jsou teplo a teplota spolu velmi úzce spjaty, jsou to dvě různé veličiny o různých jednotkách. Teplo má rozměr energie (joule) a teplota se udává ve stupních Celsia ($^{\circ}\text{C}$) (nebo kelvinech, K). Hlavním rozdílem je, že teplo popisuje přenos energie mezi molekulami v definovaném systému a tento systém může teplo přijmout nebo ztratit, ale nemůže ho mít.

Kdežto teplota je stavová veličina dána mírou průměrné kinetické energie částic v systému. Je jedna z nejdůležitějších fyzikálních vlastností, které mohou určit stav hmoty a objevuje se v mnoha fyzikálních zákonech. [1]

Dle nulté hlavní věty termodynamiky: „*Je-li v termodynamické soustavě tvořené subsystémy A, B a C subsystém A v termodynamické rovnováze se subsystémem B a současně se subsystémem C, pak jsou i subsystémy B a C ve vzájemné termodynamické rovnováze. Celý systém má pak společnou hodnotu intenzivní stavové veličiny, kterou budeme nazývat teplota.*“ [2]

Za nejnižší možnou teplotu se považuje absolutní teplotní nula na termodynamické stupnici, tedy 0 K. Při této teplotě již molekuly nemají žádnou kinetickou energii a ustává jejich pohyb. [3]

2 Mechanismy sdílení tepla

Mechanismy pro sdílení tepla jsou způsoby, jakými lze přenášet tepelnou energii mezi systémy či objekty. Jsou možné tři základní možnosti pro přenos tepla:

2.1 Vedení (kondukce)

Je pohyb kinetické energie při kontaktu dvou materiálů. K přenosu dochází pomocí vzájemných srážek částic o vyšší teplotě a vyšší kinetické energii s částicemi o nižší teplotě, dokud nenastane termodynamická rovnováha. Jde o molekulární mechanismus přenosu tepla tzn. je zapříčiněné vzájemnou interakcí atomů a molekul. A pomocí těchto srážek či odrazů se transformuje jejich kinetická energie na teplo. [4] [5]

Vedení se vyskytuje do jisté míry ve všech skupenstvích hmoty, především ale v pevných látkách díky silným mezimolekulárním silám, které umožňují snadný přenos energie, nejvíce v kovech. Fyzikální princip, který popisuje konduktivní přenos tepla se jmenuje Fourierův zákon: [4]

$$\vec{q} = -\lambda \nabla T \quad (2.1)$$

kde

\vec{q} je hustota tepelného toku [$W \cdot m^{-2}$]

λ je součinitel tepelné vodivosti [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$], veličina, která popisuje schopnost tělesa vést teplo

∇T teplotní gradient.

Protože gradient udává směr růstu veličiny teploty, musí zde být záporné znaménko kvůli tepelnému toku, který vždy proudí z místa o vyšší teplotě do místa s nižší teplotou. [5]

2.1.1 Součinitel tepelné vodivosti

Součinitel tepelné vodivosti λ je pro homogenní materiály skalární hodnotou, kdežto pro anizotropní materiály je tepelná vodivost různá v různých směrech (dřevo, kompozit) a již ji není možné popsat skalární veličinou, nýbrž se musí definovat ve všech směrech, zavede se tedy tenzor tepelné vodivosti a Fourierův zákon lze zobecnit do tvaru: [4]

$$\vec{q} = -\lambda \cdot \nabla T \quad (2.2)$$

kde

λ je součinitel tepelné vodivosti, tenzor 3 x 3, [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$], jehož složky lze stanovit experimentálně

U plynů je hodnota součinitele tepelné vodivosti rostoucí s teplotou, u kapalin také roste s teplotou, kromě vody. U pevných látek je nutné rozlišit krystalické a amorfni látky, kdy u krystalických látek je součinitel nepřímo úměrný teplotě a u amorfních na teplotě nezávisí. [5]

2.2 Proudění (konvekce)

Další způsob pro přenos tepla probíhá zejména v tekutinách (plynech a kapalinách). Jde znovu o molekulární mechanismus přenosu tepla spjatý s makroskopickým pohybem neboli prouděním tekutiny podél stěny. [4]

Konvekce je opět řízená rozdílnými teplotami v systému. Když dojde k ohřátí tekutiny v místech, kde je v blízkém kontaktu se zdrojem tepla, díky zvýšené kinetické energii částic teplejšího tělesa se začne rozpínat a tím pádem se jí začne zmenšovat hustota. Tato část tekutiny s menší hustotou poté začne v systému stoupat, mezitím co část s větší hustotou klesat. Celý proces se nazývá přirozená (volná) konvekce a samovolně se opakuje, protože během stoupaní zahřáté tekutiny se její teplota snižuje kvůli rostoucí vzdálenosti od zdroje tepla a začne tedy klesat. Chladnější část, která klesala, se dostane ke zdroji tepla, ohřeje se a začne stoupat a vznikne tak přirozené cirkulační pole.

Existuje i tzv. nucená konvekce, kde směr proudění tekutiny ovlivňuje např. větrák, který udává nový směr proudění, zvýší hodnotu součinitele přestupu tepla a dochází tak k výrazně většímu přenosu tepla. Matematické vyjádření zákona, který udává množství tepla, které se přeneso vlivem proudění se nazývá Newtonův ochlazovací zákon: [4]

(2.3)

$$\vec{q} \cdot \vec{n} = q_n = \alpha(T_s - T_f)$$

kde

q_n je hustota tepelného toku ve směru vnější normály

\vec{n} je směr vnější normály od povrchu stěny

α je součinitel přestupu tepla [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$]

T_s teplota povrchu stěny

T_f je teplota okolí

Součinitel přestupu tepla α na rozdíl od součinitele tepelné vodivosti λ není materiálová konstanta. Je závislý na termofyzikálních vlastnostech dané látky, geometrii tělesa, prostředí ve kterém dochází k proudění či na parametrech proudění. Je tedy nutné pro daný systém, ve kterém se má provádět měření, odvodit nebo experimentálně určit jeden koeficient, tak aby se neměnil v celém rozsahu teplotních rozdílů měření. [4] [5]

2.3 Tepelné záření (radiace)

Je proces, při kterém je emitována energie ve formě elektromagnetického záření z ohřátého povrchu tělesa do okolí ve všech směrech. Tepelně vyzařují všechna tělesa, jejichž teplota je větší, jak nula stupňů Kelvina ($-273,15^\circ\text{C}$). Tepelné záření již není molekulárním mechanismem přenosu tepla. K přenosu tepla tedy nedochází pomocí vzájemných srážek atomů a molekul. Přenáší se rychlostí světla do místa absorpce. Protože se teplo přenáší pomocí elektromagnetických vln, není potřeba žádné fyzické médium pro uskutečnění přenosu. Tepelné záření se pohybuje ve vlnových délkách v rozmezí přibližně 10^{-7} až 10^{-4} m. [3]. Intenzita a rozložení energie se řídí podle teploty vyzařujícího objektu. Celková vyzářená tepelná energie z povrchu objektu je popsána Stefan-Boltzmannovým zákonem: [4]

$$E = \sigma T^4 \tag{2.4}$$

kde

E je celková intenzita tepelného záření

T je termodynamická teplota tělesa, (v kelvinech)

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

Míra, jakou těleso vyzařuje nebo absorbuje tepelnou energii závisí také na povaze povrchu. Takto formulovaný Stefan-Boltzmannův zákon platí pouze pro absolutně černá tělesa (modelové těleso, které vyzařuje a absorbuje nejvíce ze všech těles). Byl tedy zaveden pojem emisivita pro měření teploty i na reálných tělesech z různých materiálů tzv. šedá tělesa, které mají různou emisivitu. [6]

2.4 Emisivita, černé těleso

Emisivita ε je účinnost, s jakou povrch emituje uložené teplo, jako tepelné infračervené záření, a tedy velice důležitá při měření teploty povrchu tělesa pomocí tepelného záření. Je definována jako poměr intenzity tepelného záření vydávané povrchem šedých těles a intenzity záření vydávané absolutně černým tělesem.

Absolutně černé těleso je modelové těleso, které dokonale pohlcuje všechno elektromagnetické záření o všech vlnových délkách dopadajících pod různými úhly. Vyzařování černého tělesa pak záleží na jeho termodynamické teplotě. Čím větší záření těleso absorbuje, tím větší bude jeho teplota a bude vyzařovat tepelné záření. Dokáže tedy tepelné záření dokonale pohltit a dokonale vyzářit. Černé těleso je fyzikální základ pro bezkontaktní měření teploty a kalibrování a lze ho sestrojít jako duté těleso s malým otvorem. Pokud dojde k zahřátí černého tělesa, začne se teplo v dutině šířit. Malý otvor poté emituje přesně tu stejnou hodnotu, jakou bylo těleso ohříváno. Při namíření senzoru pro snímání teploty na malý otvor, začne senzor snímat teplotu vyzařující z černého tělesa a je možné senzor kalibrovat. [7]

Protože se pouze pár těles blíží svou emisivitou černému tělesu je definované tzv. šedé těleso, které vyzařuje méně radiace než černé těleso při stejné teplotě. Šedé těleso má hodnotu emisivity mezi 0 a 1, tedy částečně záření pohlcuje a částečně odráží. Emisivita jeví závislost na některých dalších fyzikálních veličinách jako např. teplota povrchu materiálu (u kovových látek emisivita roste s teplotou, u nekovových materiálů je tomu naopak), tvar povrchu (konvexní, konkávní), stav povrchu (hrubý, hladký), vlhkost povrchu a rozsah vyzařovaných vlnových délek tepelného záření. [8]

Aby se dala bezkontaktně měřit teplota různých těles a materiálů, je nutné znát jejich emisivitu pro kalibraci, aby měření probíhalo co nejpřesněji. Hodnota emisivity se zjišťuje pomocí dvou teploměrů, jednoho kontaktního a jednoho bezkontaktního. Oba teploměry vyhodnocují teplotu stejného tělesa o dané teplotě T . Hodnoty na stupnicích teploměrů se budou lišit. Kontaktní teploměr bude ukazovat skutečnou hodnotu a na bezkontaktním teploměru je nutné nastavit příslušnou hodnotu emisivity tak, aby se hodnoty na obou teploměrech shodovaly. Hodnota emisivity se dá určit takto experimentálně nebo dohledat v příslušných tabulkách, kde budou pro různé materiály uvedeny hodnoty. [6]

3 Měření teploty

Měření obecně je proces shromažďování informací z fyzického světa a porovnávání těchto informací s obecnými standardy. Měření se dá označit za esenciální činnost pro objevování a testování přírodních a technických průzkumů a je spojeno s užitím měřících nástrojů a senzorů, které jsou primárním elementem pro měření a snímání dané fyzikální veličiny. [9]

Output většiny moderních senzorů je elektrický, díky lehkému zpracování, zobrazení, uchování a odesílání výsledných změřených dat. Po převedení pozorované fyzikální veličiny na elektrickou formu se dá vztah mezi signálem senzoru a změny hodnoty fyzikální veličiny vyjádřit pomocí přenosové funkce. V kontinuálním systému, může být lineární či nelineární. Lineární vztah je možné popsat následující rovnicí: [9]

$$y = a + bx \quad (3.1)$$

kde

y je elektrický signál

x je fyzický podnět

a je průsečík na ose y při nulovém vstupním signálu

b je směrnice nebo také citlivost senzoru

3.1 Senzor teploty

Pro měření teploty se používají tzv. senzory teploty. Senzor je funkční prvek, jež na počátku měřícího řetězce v přímém kontaktu s měřícím prostředím, přijímá a reaguje na signál. Pojem senzor teploty je ekvivalentní s výrazy snímač teploty, detektor tepelného záření, teploměr či čidlo teploty (část snímače převádějící teplotu na jinou, vhodnou fyzikální veličinu). [1]

Dle fyzikálního principu se senzory dělí na: odporové, termoelektrické, polovodičové s PN přechodem, dilatační, optické, radiační, chemické, šumové, akustické, magnetické, kapacitní, aerodynamické. [1]

Všechny senzory měřící teplotu by se také daly rozdělit do dvou kategorií, a to absolutní a relativní. Snímače absolutní měří teplotu vůči danému referenčnímu bodu na stupnici absolutní teploty, například k hodnotě absolutní nuly. Do této kategorie spadají termistory a odporové snímače teploty. Relativní snímače měří rozdíl teplot dvou objektů nebo gradientu teploty. Příkladem relativního snímače je termočlánek. [10]

Senzory se dále mohou rozlišovat podle jejich kontaktu s měřícím prostředím na dotykové a bezdotykové. Práce nese název o bezdotykovém měření teplot, nicméně v kapitole 2.4 bylo uvedeno, že pro bezdotykové měření je nutné měřit teplotu i dotykově, pro správné nakalibrování bezdotykového snímače teploty. Dále je tedy vysvětlen princip měření teploty dotykového snímání teploty.

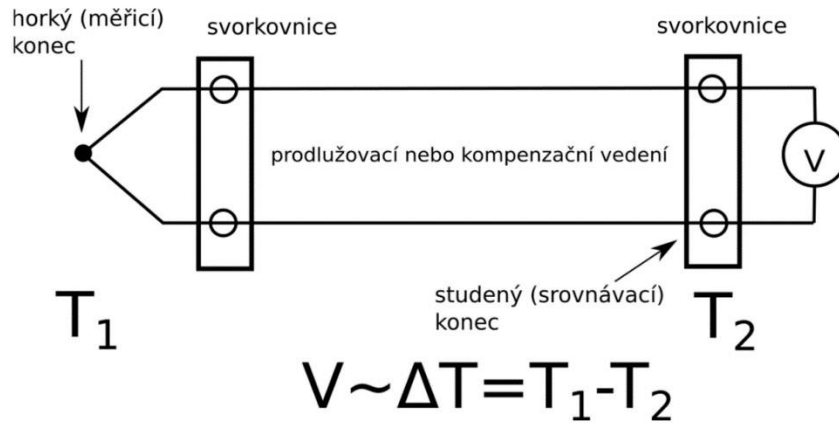
3.2 Dotykové snímání teploty

Způsobů, jak měřit teplotu je již v dnešní době mnoho. Například pomocí změny teploty v závislosti na změně napětí nebo teplotní závislosti odporu kovu atd. Požadavkem, jak měřit teplotu může být přímý kontakt snímače teploty s pozorovaným médiem. Pokud k tomuto kontaktu nemůže dojít například z konstrukčního hlediska či špatné přístupnosti, lze použít i metodu pro vzdálené měření teploty pomocí bezdotykového snímače. [11]

3.2.1 Termoelektrické články

Termoelektrické články neboli tzv. termočlánky jsou založeny na Seebeckově jevu. Seebeckův jev vzniká tím, že v teplejší části vodiče mají nositelé náboje větší energii (v polovodičích i větší prostorovou hustotu, tj. koncentraci), a proto difundují ve větším množství do chladnějších míst než nositelé z chladnějších míst do teplejších. [1]

Termočlánek je tedy uzavřená smyčka složená ze dvou materiálů různých vodičů (polovodičů), kterými protéká elektrický proud, pokud mají oba konce rozdílnou teplotu. Termočlánek měří rozdíl teplot a převádí měření teploty na měření elektrického napětí. [8]



Obr. 1: Termočlánek [11]

Termoelektrické články se vyrábějí svařováním. Konec, který je svařen se nazývá horký nebo měrný konec, v prostředí o měřené teplotě viz Obr. 1. Druhý konec je volný pro možnost připojení voltmetru a nazývá se studený nebo srovnávací konec, který se udržuje na málo proměnné hodnotě. Hodnota elektromotorického napětí, které voltmetr naměří záleží kromě rozdílů teplot dvou konců také na typu materiálu, ze kterého jsou vodiče vyrobeny. [11]

Při výběru materiálu, ze kterého bude termočlánek vyroben je kladen důraz na citlivost a linearitu závislosti termoelektrického napětí na teplotě pro daný teplotní rozsah. Materiály také musí být odolné vůči vnějším chemickým a korozivním vlivům a nesmějí podléhat rekrystalizaci při vyšších teplotách. [8]

Jednotlivé páry termoelektrických materiálů pro výrobu termočláneků jsou normalizovány. [1] Označují se velkými písmeny a barvou pláště drátu. Nejběžnější a nejpoužívanější typy termočláneků jsou typy J a K. Vlastnosti jsou uvedeny v Tab. 1.

Tab. 1: Nejpoužívanější typy termočlánků [11]

Typ	Materiál	Citlivost v rozsahu 0 až 100 °C
J	Fe + Konstantan (CuNi)	5,8 $\mu\text{V} / ^\circ\text{C}$
K	NiCr + NiAl	4,5 $\mu\text{V} / ^\circ\text{C}$

Z důvodů ochrany před mechanickým a chemickým poškozením a delší výdrže termočlánku, se snímače ukládají do ochranných jímek. Drát je poté vyveden na svorkovnici a vedením dopraven do měřícího přístroje, jež má také svou svorkovnici. Vedení může být dvojího typu, a to buď prodlužovací nebo kompenzační. Prodlužovací vedení je ze stejného materiálu jako termočlánkový drát. Ponechání stejného materiálu má pozitivní vliv na vlastnosti měření, nicméně logicky při delších vzdálenostech by se použití stejného materiálu finančně nevyplatilo například u platinových snímačů. Je tedy možnost na delší vzdálenosti, pro úsporu, použití kompenzačního vedení, z obecných kovů, které ale mají v určitém omezeném rozsahu teplot velmi podobné vlastnosti jako vedení prodlužovací. [11]

Termočlánek může být nechráněný bez jímký, kdy mu jímka neposkytuje žádnou ochranu, ale zároveň má termočlánek rychlou odezvu při měření teploty. Jímka tedy ovlivňuje vlastnosti měření. Při jejím použití je sice termočlánek chráněn, ale prodlužuje se jeho časová konstanta a není tedy možné měřit rychlé změny teplot. Termočlánek může být v jímkce buď izolovaný, tzn. že se drát termočlánku nedotýká jímký a je velmi dobře chráněn. Dalším způsobem provedení může být uzemněný termočlánek, kdy je horký konec přímo spojený na povrch jímký, přivařený nebo připájený. [11]

3.2.2 Odporové snímače teploty

Odporové snímače teploty (RTD-Resistive Temperature Detector) fungují na principu změny elektrického odporu s teplotou dle nelineárního vztahu. Pro malé teplotní rozsahy, ale lze použít lineární vztah, zhruba $\pm 100\text{ }^\circ\text{C}$, a to: [11]

$$R_t = R_0[1 + \alpha T] \quad (3.2)$$

kde

R_t je výsledný odpor v závislosti na teplotě

R_0 vyjadřuje odpor snímače při teplotě 0 °C

Za předpokladu, kdy měření bude probíhat v určitých rozmezích teplot lze stanovit střední hodnotu teplotního součinitele odporu α :

$$\alpha = \frac{R_{100} - R_0}{100 \cdot R_0} \quad (3.3)$$

kde

R_0 vyjadřuje odpor snímače při teplotě 0 °C

R_{100} je odpor při teplotě 100 °C

Součinitel α popisuje citlivost, s jakou se mění odpor v závislosti na teplotě a z rovnice 3.3 je vidět, že je definovaný jako rozdíl odporů při teplotě 0 a 100 °C. V následující Tab. 2 jsou uvedeny hodnoty teplotního koeficientu elektrického odporu α .

Tab. 2: Teplotní koeficient elektrického odporu a rezistivita pro vybrané kovy [11]

Element	$\alpha [10^{-3}/K]$	$\rho [\Omega \cdot m]$
Pt	3,85	$9,81 \cdot 10^{-8}$
Ni	6,17	$12,13 \cdot 10^{-8}$
Cu	3,9	$1,54 \cdot 10^{-8}$

Mezi nejstabilnější, nejpřesnější a nejvíc používané materiály pro výrobu průmyslových odporových snímačů patří platina, nikl, měď a pro měření velmi nízkých teplot slitiny Rh-Fe, Pt-Co. [1] Každý materiál má jinou rovnici pro výslednou změnu odporu

v závislosti na teplotě, nicméně při určitých teplotních rozsazích se dá tato závislost považovat za lineární. [8]

a) Platinový odporový snímač teploty

Platina je velmi vhodným materiálem, protože je stabilní, chemicky netečná a má vysoký bod tání čili je s ní možné měřit i vyšší teploty. Vykazuje také velmi lineární závislost odporu na změnu teploty. Pro výrobu je velmi důležité, aby se použila co nejvíce čistá platina (99,999 %). [10] Dle kvality použité platiny a daných požadavků na výrobek se pak snímače dají rozdělit do dvou tolerančních tříd, přesnější A, a méně přesné B. [1]

Často používaný snímač nese označení Pt100, tedy platinový snímač s hodnotou elektrického odporu 100Ω při teplotě $0 \text{ }^\circ\text{C}$. Citlivost, s jakou tento snímač pracuje je $0,385 \Omega/^\circ\text{C}$. [10] Patří tedy k velmi přesným snímačům. Dalším používaným může být například Pt1000. Platinové snímače lze používat při rozsahu teplot $-200 \text{ }^\circ\text{C}$ až $600 \text{ }^\circ\text{C}$. Velkou výhodou platinových snímačů je možnost přímě výměny bez další kalibrace. Nevýhodou pak vyšší cena. [10]

b) Niklové odporové snímače teploty

Z Tab. 2 je vidět, že platina a měď mají zhruba stejnou hodnotu součinitele α , kdežto nikl má tuto hodnotu zhruba dvojnásobnou, respektive dvojnásobnou citlivost. Výhodou niklového snímače je tedy větší citlivost oproti mědi a platině, bohužel ale pouze pro menší teplotní rozsahy. Další výhodou je pak rychlá odezva, tj. malá časová konstanta. [1]

Volba niklového snímače teploty je často v aplikacích, kde není třeba tak přesného měření a kdy je dostatečná přesnost do $\pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ [10]. Běžně se niklové snímače používají do $200 \text{ }^\circ\text{C}$. Snímače se označují velmi podobně jako platinové snímače, nejběžnějším z nich je Ni120, tedy má hodnotu odporu 120Ω při $0 \text{ }^\circ\text{C}$. Opět lze snímače rozdělit do dvou tolerančních tříd A a B. [10]

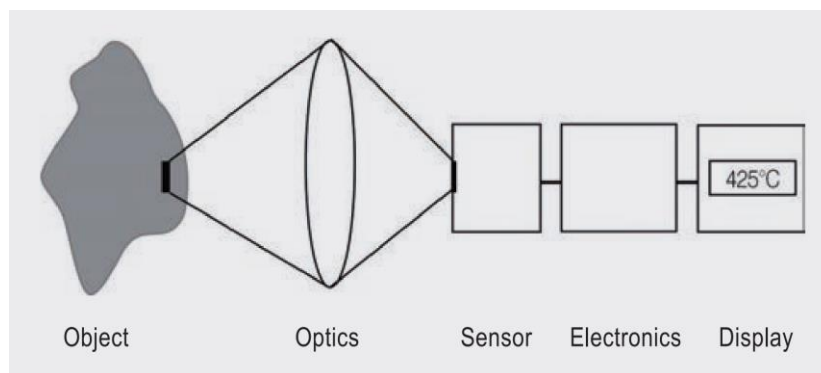
3.2.3 Termistory

Termistor je teplotně závislý polovodičový snímač. Termistory lze dle hodnoty teplotního součinitele dělit na negastory (NTC) a pozistory (PTC). Nejčastěji se pro měření

teploty používají NTC. V teplotním rozsahu $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ mají dobré vlastnosti v porovnání třeba s platinovým snímačem. Výhody termistorů jsou malé rozměry, dobrá teplotní citlivost a rychlost odezvy. Nevýhodou je nestabilita, respektive nelinearita. [8]

3.3 Bezdotykové měření teploty

Každé těleso, které má svou teplotu větší, než absolutní nula, vyzařuje do svého okolí elektromagnetické záření ze svého povrchu, a toto záření je úměrné teplotě tělesa. Část tohoto záření je infračervené záření, které je možné využít při bezdotykovém měření teploty. Toto záření prochází atmosférou a je pomocí optiky (čoček nebo zrcadel) usměrňováno na senzor (detector), který generuje elektrický signál v závislosti na dopadajícím záření. Tento signál je nadále zesílen a digitálně zpracován jako výstupní signál popisující změnu teploty tělesa. Hodnota výsledné teploty je uvedena na displeji. [3] Víše popsané schéma je uvedeno na Obr. 2.



Obr. 2: Základní schéma pro bezdotykové měření teploty [3]

Důvodů, proč měřit teplotu právě bezkontaktním způsobem může být mnoho a vždy záleží na konkrétní aplikaci nebo úloze měření. Nejčastěji to může být špatný přístup kontaktního snímače teploty anebo potřeba měřit velmi vysoké teploty. Dále jsou tedy uvedeny důvody, výhody a nevýhody proč teplotu měřit bezdotykově:

Výhody měření bezkontaktně: [1] [3]

- Možnosti měřit teplotu pohybujících se nebo rotujících objektů
- Měření v nebezpečných prostředích

- Velmi rychlá odezva měření, tedy možnost měřit velmi rychlou změnu teplot
- Snímač není v přímém kontaktu s měřeným objektem a neovlivňuje tak měření
- Nedestruktivní měření
- Odolnost měření, nedochází k mechanickému opotřebení
- Možnost měřit teploty celých povrchů těles (termografie, termovize)
- Měření velmi vysokých teplot

Mezi hlavní nevýhody patří nutnost určení správné hodnoty emisivity povrchu tělesa, která je různá a je nutné ji přesně určit. Dále pak rušení měření od ostatních záření, například záření z okolí a další jiná různá odražená záření, která vnášejí chybu do měření. [8]

3.3.1 Zákony záření

Následující zákony je nutné uvést při bezdotykovém měření teploty, protože s nimi senzory počítají a jsou vyjádřeny pro černé těleso.

- Planckův zákon

Základní vztah pro určení velikosti záření je Planckův zákon. Ten udává vztah pro velikost spektrální hustoty vyzařování v závislosti na konkrétní vlnové délce a absolutní teplotě. Pro aplikace bezdotykového měření teploty lze tento vztah vyjádřit v jednodušším tvaru, za předpokladu že $T < 3\,000\text{ °C}$, ten je pro pyrometrii vyhovující. Nejedná se ale už o Planckův zákon, i když z něho vztah vychází, ale o Wienův zákon: [8] [1]

$$M_{0\lambda} = c_1 \lambda^{-5} e^{-\frac{c_2}{\lambda T}} \quad (3.3)$$

kde

$M_{0\lambda}$ je spektrální hustota vyzařování černého tělesa

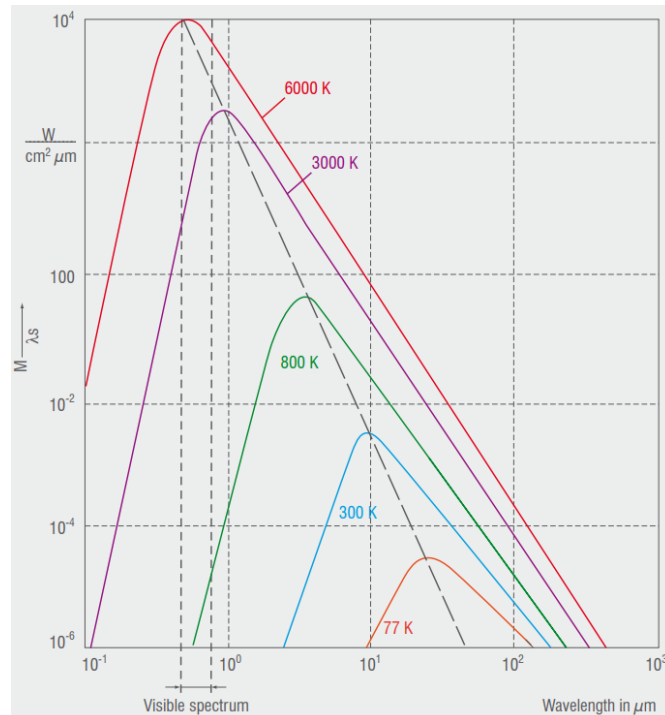
c_1 je první vyzařovací konstanta $c_1 = 2\pi hc^2 = 3,7417749\text{ [W} \cdot \text{m}^{-2}\text{]}$

c_2 druhá vyzařovací konstanta $c_2 = hc/k\text{ [m} \cdot \text{K}\text{]}$

λ vlnová délka záření [m]

T termodynamická teplota černého tělesa [K]

Na Obr. 3 je vidět grafická ilustrace zákona v závislosti na λ s rozdílnými teplotami jako parametry.



Obr. 3: Spektrální hustota intenzity vyzařování černého tělesa [6]

- Wienův zákon posuvu

Protože teplota je vlastně reprezentace průměrné kinetické energie částic, určuje tak největší pravděpodobnost, jakou frekvencí budou částice kmitat a konkrétní vlnovou délkou. Tuto vlnovou délku popisuje Wienův zákon posuvu, který je možné získat derivací rovnice 3.3 a porovnání ji s nulou. Vznikne tak vztah pro maximální vlnovou délku, okolo které je koncentrováno většina záření.

$$\lambda_m \approx \frac{2898}{T} \quad (3.4)$$

kde

λ_m je v μm , T v kelvinech

Z Wienova zákonu posuvu je vidět, že s rostoucí teplotou se maximální hodnota spektrální hustoty intenzity vyzařování posouvá směrem ke kratším vlnovým délkám, jak je vidět na Obr. 3. Tento vztah také udává střední bod spektrálního rozsahu pro měření pyrometrem nebo infračerveným teploměrem. [8]

- Stefan-Boltzmannův zákon

Stefan-Boltzmannův zákon udává intenzitu vyzařování pro danou teplotu v celém rozsahu vlnových délek a jeho znalost je podstatná pro pyrometry celkového záření. [1] Jeho tvar je uveden v rovnici 2.4.

Z rovnice je vidět, že s rostoucí teplotou reste hodnota záření velice rychle, díky čtvrté mocnině teploty. Neuvažuje se tedy, že vlnová délka se mění s teplotou, aby se odstranily šum a nepřesnosti měření. [8]

- Kirchhoffův zákon

Hodnota záření není dána pouhou změnou teploty měřeného tělesa, ale je také funkcí emisivity povrchu tělesa. Pojem emisivita byl vysvětlen v kapitole 2.4. K pojmu emisivita v Kirchhoffově zákonu se přidají ještě τ prostupnost (transmitance) a ρ odraznost (reflektance). Obě veličiny také nabývají hodnot od 0 do 1 a vyjadřují odražené záření a záření které projde skrz objekt. Rovnice, které tyto veličiny spojuje je právě Kirchhoffův zákon: [8]

$$\epsilon + \rho + \tau = 1 \quad (3.5)$$

Všechny veličiny jsou závislé na vlnové délce a pokud dojde ke změně jedné z nich, tak na úkor změny zbylých dvou.

3.3.2 Detektory tepelného záření

Pro snímání tepelného záření v pyrometrii je nejvíce důležitým elementem přijímač tepelného záření neboli detektor (sensor). Existují dvě hlavní skupiny infračervených detektorů, tepelné a kvantové detektory.

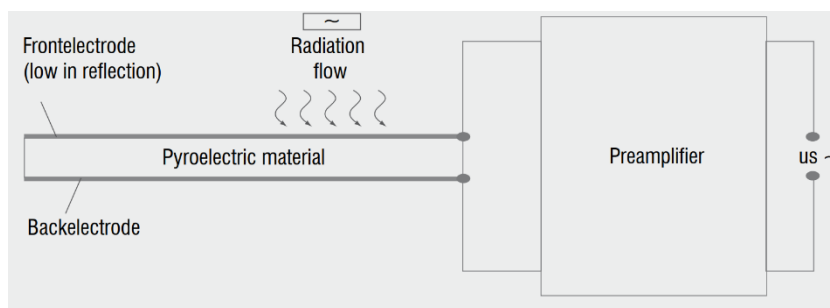
Tepelné detektory infračerveného záření

Tyto detektory měří teplotu, pomocí dopadajícího záření na citlivý element senzoru, která se mění s absorbcí dopadajícího záření na tento citlivý element. Tepelné detektory se dají rozdělit do dalších kategorií termoelektrické, bolometrické a pyroelektrické.

Termoelektrické detektory fungují na stejném principu jako termoelektrické články popsané v kapitole 3.2.1, pouze v termoelektrickém detektoru je sériově zapojeno mnoho termočlánků, které jsou vyrobeny jako tenké kovové pásky (cca 0,03 mm). [1] Díky optice, dopadá záření na citlivý element, v tomto případě termoelektrický detektor, ten se zahřeje a generuje napětí. Výhody termoelektrického detektoru jsou vysoká citlivost, rychlá odezva a malý šum. [3]

Bolometrické detektory využívají podobného principu jako odporové snímače teploty, tedy záření dopadá na citlivý element, kterým je teplotně závislý odporový materiál, změní se jeho teplota a tím i elektrický odpor. Pro výrobu se opět používají tenkovrstvé mikroelektronické technologie. Čím větší je hodnota elektrického odporu materiálu, tím má detektor lepší citlivost. [1] [3]

Pyroelektrický detektor, jehož konstrukce je na Obr. 4, má citlivý element z pyroelektrického materiálu a dvou elektrod. Je založen na pyroelektrickém jevu, tj. změně spontánní polarizace při změně teploty. [1] Zesilovač slouží k lepším výsledkům a menšímu šumu. [3]



Obr. 4: Konstrukce pyroelektrického detektoru [6]

Kvantové detektory infračerveného záření

Kvantové detektory pracují na principu foto efektu, kdy fotony infračerveného záření dopadají na povrch polovodiče a generují páry elektron – díra. Dochází k uvolnění elektronu a k přenosu do vyšší energetické hladiny, z valemní vrstvy do tzv. vodivostního pásma modelu polovodiče. V tomto vodivostním pásu může sloužit jako nositel proudu, což je požadavek pro snímání teploty. Po uvolnění elektronu, zůstane v elektronovém obalu ionizovaného atomu prázdné místo, díra, což se projeví jako změna odporu materiálu. [1] [8] [3]

Protože kvantový snímač funguje na principu foto efektu, pracuje vlastně na principu, kdy reaguje na dopadání jednotlivých fotonů, oproti tepelnému detektoru, který snímá teplo absorbované infračerveným zářením. Kvantový detektor má tedy lepší odezvu měření a větší citlivost. [8]

3.3.3 Pyrometry

Pyrometr je jakékoliv bezdotykové zařízení snímající a měřící tepelné záření vyzářeného z tělesa, pro určení teploty povrchu tělesa. Jeho základem je optický systém a detektor. Optika soustředí vyzářenou energii tělesem (pomocí soustavou čoček nebo zrcadel) na detektor, který je citlivý na tepelné záření a reaguje na něj. Výstupní signál detektoru je úměrný emitované energii tělesem, jehož teplotu je měřena (kromě záření, které je pohlceno optickým systémem). Pyrometry měří tepelné záření v určitých vlnových délkách. [12]

Nevýhodou pyrometrů je vyšší cena oproti dotykovým snímačům teploty a někdy poměrně těžká instalace. Pyrometry jsou odolné, ale vyžadují pravidelnou údržbu. Oblast snímaná senzorem musí být vždy čistá, stejně tak optický systém. Dále jsou uvedeny různé druhy pyrometrů. [12]

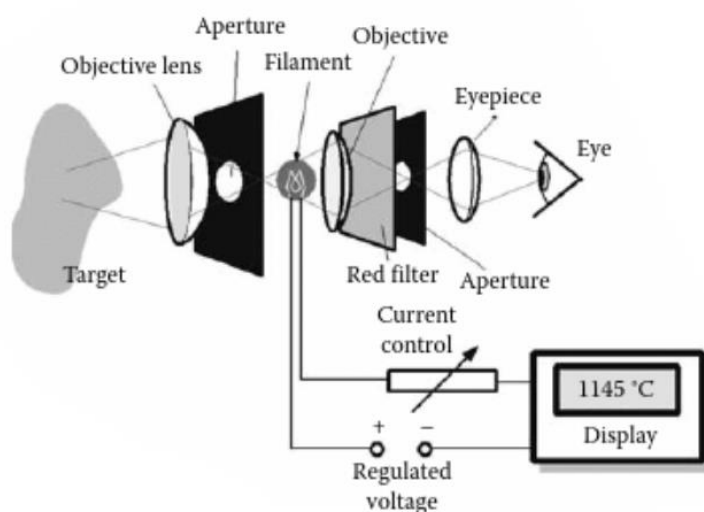
- Pyrometry na celkové záření (úhrnné pyrometry)

Pyrometry na celkové záření měří tepelné záření dle Stefan-Boltzmannova zákona v celém spektru vlnových délek. Užívají tepelných detektorů. Tepelné záření se soustředí na

dotykový snímač teploty pomocí čoček, se širokým spektrem prostupnosti, skrz šedý filtr. Principem je porovnávání intenzity záření, které ohřeje termočlánek. [1] [11]

- Monochromatické pyrometry

Jsou pyrometry měřící na jedné vlnové délce. Princip monochromatického pyrometru je zobrazen na Obr. 5 a je založen na Planckově zákonu, který popisuje závislost spektrálního vyzařování tělesa při dané vlnové délce na teplotě. Zařízení se skládá z optiky, která usměrňuje záření měřeného tělesa na vlákno (filament). Principem je porovnání jasů vlákna a jasů měřeného objektu. Jas vlákna se dá nastavit změnou protékajícího proudu. Cílem je, aby vlákno zmizelo ze zorného pole obsluhy, a tak dojde k vyrovnání jasů a vlákno i měřený objekt mají stejnou teplotu. Teplota vlákna se poté odečte z kalibrované stupnice. [8] [11]



Obr. 5: Schéma monochromatického pyrometru [8]

- Poměrové pyrometry

Poměrové pyrometry vyhodnocují povrchovou teplotu objektu na základě poměru dvou září při dvou různých vlnových délkách. [1] Protože je někdy velmi těžké určit emisivitu různých materiálů, zvláště při vyšších teplotách, vnáší to velké chyby do měření. Určení emisivity se ale při tomto měření dá vyhnout, protože záření je měřeno při dvou

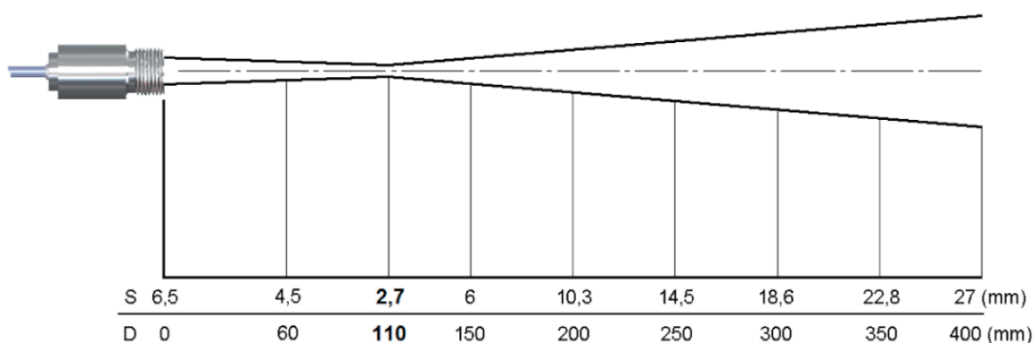
různých vlnových délkách, ale emisivity povrchu objektu se sobě rovnají. Měřená teplota již poté nezávisí na emisivitě povrchu objektu, pokud se budou tyto dvě emisivity rovnat. [8]

4 Návrh úpravy hlavy motoru

V nadcházející kapitole je popsán a zobrazen finální návrh úpravy hlavy motoru. Jak bylo řečeno v úvodu práce, od začátku návrhu se vycházelo z rozměrů a parametrů senzoru od firmy Micro-Epsilon. Tento senzor nesl produktové označení CTM-2CF40-C3.

4.1 Popis značení senzoru

CTM značí, že jde o thermoMETER, tedy o tepelný snímač. Dvojka popisuje, v jakém spektrálním rozsahu senzor snímá tepelné záření, v tomto případě 2 značí spektrální rozsah 1,6 μm . CF40 je zkratka pro *close focus* tedy model pro snímání teploty menších dílů na menší vzdálenosti. Kromě tohoto modelu je možné použít i *standart focus* nebo *far focus*. Zaleží na dané aplikaci. Číslice 40 je poměrové číslo, které udává poměr mezi průměrem snímané oblasti senzorem ku vzdálenosti mezi čelem těla senzoru a měřeným objektem. Senzor měří teplotu od 250 $^{\circ}\text{C}$ do 800 $^{\circ}\text{C}$. Na následujícím grafu Obr. 6 je vidět konkrétní snímaná oblast senzorem: [13]

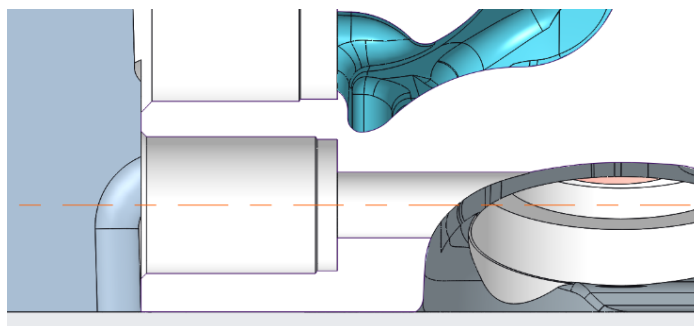


Obr. 6: Průměr měřeného objektu v závislosti na vzdálenosti mezi měřeným objektem a senzorem [13]

Velmi podstatná je pro návrh ohnisková vzdálenost mezi předkomůrkou a senzorem, v tomto případě 110 mm, ve které musí být senzor nastaven pro správné snímání teploty. V příloze č.1. jsou uvedeny i další specifikace senzoru.

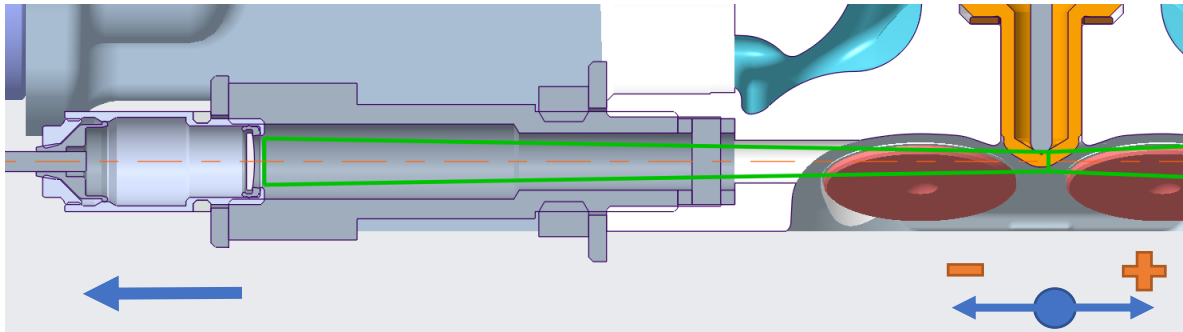
4.2 Sestava finálního návrhu

V příloze č.2. je uveden podélný řez hlavou motoru ve výchozím stavu. Na Obr. 7 je uveden již finální návrh úpravy hlavy motoru. Ke spalovací předkomůrce byl zvolen přístup z levé strany hlavy motoru. Bohužel se při pozdějším návrhu vyskytla komplikace, kdy držák kladky pro rozváděcí řemen právě na levé straně motoru, mohl komplikovat obrobení hlavy. V katalogu firmy Hoffmann Group byly vyhledány všechny, dostatečně dlouhé nástroje pro obrobení hlavy tak, aby nedošlo ke kolizi držáku kladky a obráběcí hlavy. Tyto vybrané nástroje jsou uvedeny v příloze č.3



Obr. 7: Finální upravení hlavy motoru

Na dalším Obr. 8 je již vidět sestava finálního návrhu. Do díry vytvořené na Obr. 7 byly nejprve vloženy dvoje grafitová těsnění mezi něž je umístěné ochranné safírové sklíčko. Do díry je poté zašroubované šroubení a uchyceno podložkou a maticí k hlavě motoru. Do šroubení je dále vešroubován senzor a přichycen kontra maticí. Tlustou zelenou čarou je znázorněna snímaná oblast senzoru. Jak je z obrázku vidět, dříve popsaná ohnisková vzdálenost je lehce za osou předkomůrky. Je to z důvodu možnosti nastavení vzdálenosti senzoru, pomocí dalšího vypořádání. Je tedy pak možné ve výsledcích komentovat, jaká poloha je pro měření nejideálnější a jak změna polohy ovlivnila výsledky měření. Na Obr. 8 je v předkomůrce vidět šedou barvou žhavicí svíčka, která slouží k zahřátí předkomůrky, při kalibraci pyrometru.



Obr. 8: Sestava finálního návrhu

4.3 Výpočet tloušťky ochranného sklíčka

Uvedené safírové sklíčko, je zde hlavně z důvodu ochrany senzoru před vysokými teplotami a vysokým tlakem. Protože průměr díry, ve které je sklíčko, byl daný technologií výroby, bylo nutné určit jakou tloušťku musí ochranné sklíčko mít, aby plnilo svůj účel a zároveň nedošlo k jeho poškození. Vzorec pro vypočtení tloušťky sklíčka je uveden v příloze č.4. Zde je uvedena Tab. 3 popisující různé tloušťky sklíček, dle SF (safety factor). Safety factor značí ve vzorci bezpečnost a čím větší hodnoty nabývá, tím větší je hodnota tloušťky sklíčka, ostatně jak je vidět v Tab. 3.

Tab. 3: Tloušťka sklíčka dle různých SF [14]

T[mm] (SF = 4)	T[mm] (SF = 8)	T[mm] (SF = 10)
1,62	2,28	2,55

Bylo vybráno sklíčko průměru 12 mm a tloušťky 4 mm, což vyhovuje i největšímu safety factoru 10. Sklíčko bylo zakoupeno od britské firmy CRYSTRAN.

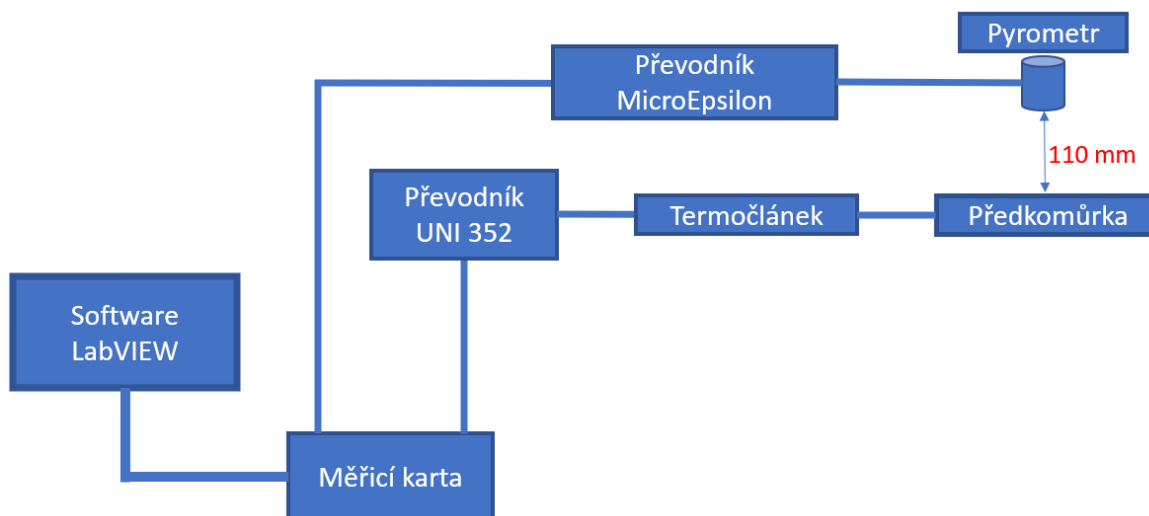
5 Zpracování dat z měření pyrometrem

5.1 Popis úlohy

Praktická část se zabývá úlohou na měření teploty kontaktně termočlánkem typu J, který snímá teplotu zhruba do 700 °C. [1] a zároveň pyrometrem od firmy Micro-Epsilon typu CTM-2CF40-C3, jež byl popsán v kapitole 4.1.

V úloze se měřila teplota spalovací předkomůrky ze dvou různých materiálů, mědi a nerezové oceli. Ohřívání předkomůrky se realizovalo pomocí žhavicí svíčky, která byla uchycena ve svěráku a předkomůrka na ni byla pouze nasazena bez dalšího uchycení. Žhavicí svíčka byla zapojena na zdroj.

Kolem horní části předkomůrky byl konec termočlánekového drátu spojen a vyveden do převodníku UNI 352, který dle změny napětí na konci drátů ukazoval hodnotu teploty. I když takové spojení není z hlediska kontaktu při měření teploty ideální, byla při měření ponechána dostatečně dlouhá doba, pro stabilizaci teplot. Měřicí rozsah převodníku UNI 352 pro termočlánek, byl nastaven pro rozsah 0 °C až 400 °C, čemuž odpovídalo vstupní napětí 0 V až 10 V, které bylo přivedeno na vstup měřicí karty.



Obr. 9: Schéma měřicí úlohy

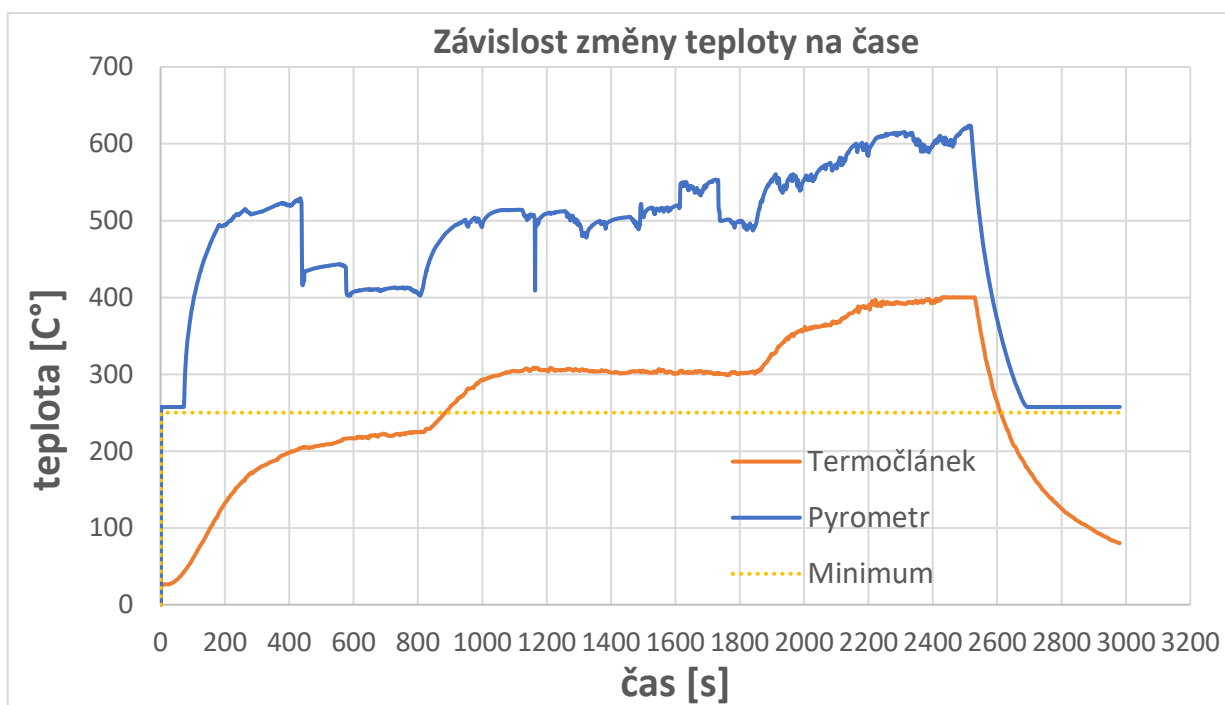
Nad předkomůrkou byl umístěn pyrometr, pomocí magnetického držáku, který se magneticky uchytil ke svěráku. Pyrometr byl dále vyveden do převodníku Micro-Epsilon, který ukazoval aktuální hodnotu teploty předkomůrky. Pyrometr se k držáku přichytil pomocí dvou stahovacích pásek. S využitím posuvného měřítka a úhelníku, byla upřesněna poloha a vzdálenost pyrometru od předkomůrky.



Obr. 10: Pracoviště měřící úlohy

Z převodníků byl vyveden výstup do měřící karty a dále do notebooku, který vše zaznamenával v programu LabVIEW. V reálném čase se v programu zobrazovala teplota v závislosti na čase, termočlánku i pyrometru. V programu i na pyrometru bylo nutné nastavit typ, měřící rozsah vstupních hodnot a měřítko. Pro měření byl zvolen rozsah 0 V až 10 V, kdy 0 V znamenalo 250 stupňů Celsia, protože pyrometr z výroby měří až od 250 °C, a 10 V znamenalo maximum, které mohl pyrometr naměřit čili 800 °C.

5.2 Měření teploty předkomůrky



Obr. 11: Závislost změny teploty na čase, měděná předkomůrka, vliv změny emisivity a transmisivity

Při zapnutí zdroje a ohřívání žhavicí svíčky, je vidět že pyrometr reaguje mnohem rychleji na změnu teploty oproti termočlátku, který má delší přechodovou křivku. Dále je možné pozorovat, že pyrometr snímá mnohem větší teplotu oproti termočlátku, což může být zaviněné mnoha různými faktory. Je nutné zmínit že pyrometr měl od začátku měření nastavenou hodnotu emisivity na 0,1 a je vidět že zhruba v čase 400 s, kdy došlo ke změně hodnoty emisivity na hodnotu 0,5 se teplota měřená pyrometrem přiblížila k teplotě termočlátku, což je žádané. Emisivita byla tedy po chvíli znovu změněna na hodnotu 1 a z grafu lze poznat, že v čase 600 s se hodnota snímaná pyrometrem opět přiblížila k teplotě snímané termočlátkem.

Zhruba v čase 800 s se zvedl proud ve zdroji od žhavicí svíčky z 4,6 A na 5,5 A, a tedy zvýšila se teplota na žhavicí svíčke. Opět je vidět mnohem rychlejší reakce pyrometru

oproti termočlátku. Jak je vidět na grafu Obr. 11, k přiblížení měřených teplot pyrometru a termočlátku nedošlo, protože během měření docházelo k několika různým chybám.

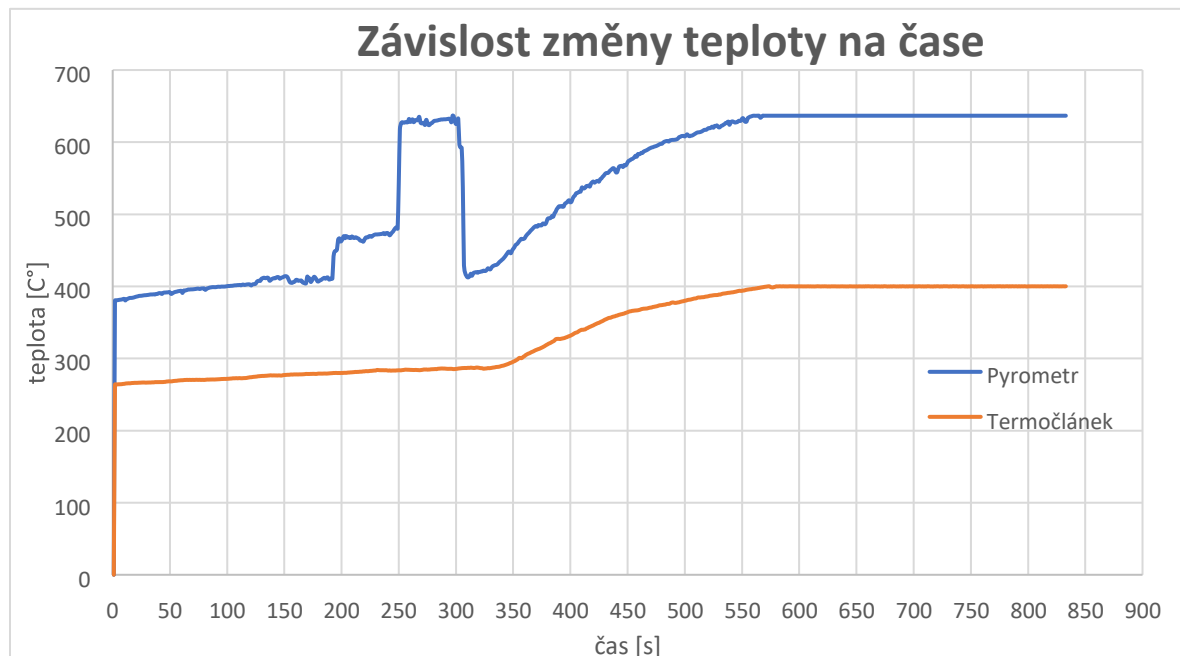
Nejspíše hlavním důvodem této nepřesnosti měření je fakt, že předkomůrka nasazená na žhavicí svíčku má v sobě malé otvůrky a při ohřívání svíčky těmito otvory mohlo teplo zářit přímo směrem na pyrometr, který tedy snímal mnohem větší teplotu, než jakou mohl termočlánek naměřit. Další možností je, že pyrometr byl nastaven ze shora na předkomůrku, ale termočlánek byl umístěn ne na horní část předkomůrky, nýbrž k jejímu úpatí. Protože nebyla jiná možnost, jak termočlánek efektivně umístit na předkomůrku. Nadále je také možné, že již při delším ohřívání žhavicí svíčkou se mohl začít ohřívat i svěrák ve kterém byla svíčka uchycena a ten tak vnášel další chybu do měření. V neposlední řadě, mohlo výsledky měření negativně ovlivnit špatné umístění senzoru nad předkomůrkou, protože senzor má přesně definovanou ohniskovou vzdálenost 110 mm, ve které měří, nemusel se v ní nacházet a také nemusel být souosý s osou předkomůrky a snímat jinou část. Tyto negativní vlivy na měření zmíněné výše, budou odstraněny, pokud se měření a kalibrace pyrometru bude realizovat dle návrhu, který je prezentován v kapitole 4.2.

Dalším parametrem, který se na pyrometru mohl měnit byla transmisivita. Transmisivita je sice relevantní pouze pokud se mezi snímaným objektem a senzorem nachází nějaké další například ochranné sklíčko nebo jiný objekt, který může mít různou transmisivitu. Nicméně pro ukázání ovlivnění výsledků měření byla transmisivita zhruba v čase 1500 s změněna z původní hodnoty 1 na hodnotu 0,8. Na grafu Obr. 11 je vidět že teplota snímána pyrometrem se ještě více oddálila od teploty snímané termočlátkem. Zhruba v čase 1600 s byla pak hodnota ještě jednou snížena na hodnotu 0,5 a je vidět že došlo ještě k většímu rozdílu měřených teplot. Je tedy ukázáno, že snížení hodnoty transmisivity má na toto měření negativní vliv. Hodnota transmisivity byla tedy opět nastavena na hodnotu 1 v čase 1800 s a je vidět že teplota se dostala do původní hodnoty před její změnou.

Mezi časy 1850 s až zhruba 2200 s se zvedal proud na zdroji až na hodnotu 7 A. Je vidět že rozdíly měřených teplot pyrometrem a termočlátkem se pořád vzdalují, což je nejspíše zaviněno tím, že čím více je žhavicí svíčka zahřívána, tím větší vyzařuje teplo

malými otvory v předkomůrce a dochází tak k větší chybě měření. Po celou dobu tohoto měření se již hodnoty emisivity a transmisivity neměnily.

Zhruba v čase 2550 s došlo k vypnutí zdroje a ohřívání svíčky. Je opět patrný rozdíl, kdy pyrometr změnu chladnutí zaznamenal mnohem rychleji oproti termočlátku.



Obr. 12: Závislost změny teploty na čase, předkomůrka z nerezové oceli, vliv změny emisivity

Na Obr. 12 je již vyměněná měděná předkomůrka za nerezovou ocel a žhavící svíčka již ohřívá předkomůrku. Je vidět že hodnota snímaná pyrometrem je opět větší, kvůli snímání záření, vyzařujícího z malých otvorů předkomůrky a nedokonalému umístění termočlátku. Opět se měnila hodnota emisivity, která byla již od času 0 s nastavena na hodnotu 1. V čase zhruba 200 s byla změněna emisivita na hodnotu 0,5 a je vidět, že teplota měřená pyrometrem se opět oddálila od hodnoty termočlátku. V čase 250 s byla hodnota snížena podruhé na hodnotu 0,1 a je vidět že výsledky se již dost vzdalují. Hodnota byla tedy opět navržena na původních 1. Zhruba v čase 250 s se zvedl proud na svíčke a začalo docházet k většímu ohřevu. Je opět vidět že pyrometr měří teplotu o něco rychleji než termočlánek, nicméně né o tolik rychleji jako tomu bylo u měděné předkomůrky. Hlavním důvodem může být, že

nerezová ocel má oproti mědi mnohem menší součinitel tepelné vodivosti a ocel se tedy ohřívá mnohem pomaleji než měď. Pyrometr tedy nesníma pomaleji ale ve skutečnosti se předkomůrka ohřívá pomaleji.

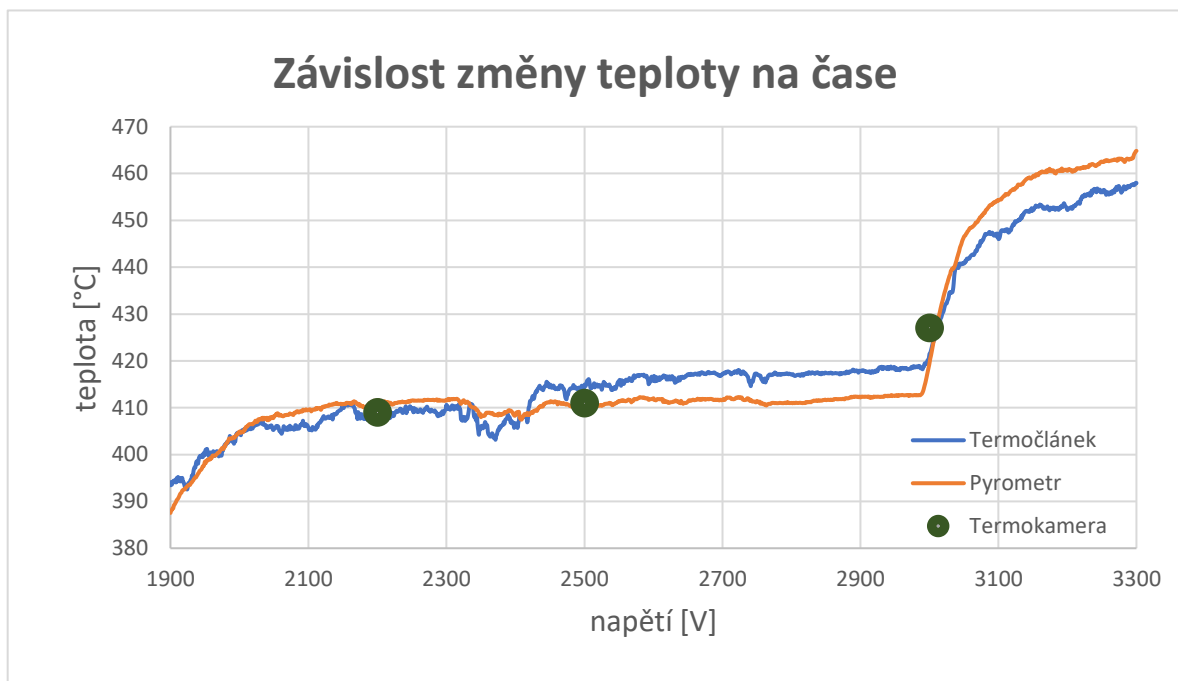
Toto prvotní měření vzhledem k příliš odlišným výsledkům, se použije pouze jako reprezentace toho, jak se změny výsledky měření při různém nastavení emisivity a transmisivity pyrometru, rozdíl rychlosti snímání teploty pyrometru a termočlánku a jakou chybu do měření vnáší špatné umístění senzoru nad předkomůrku, kde senzor přímo snímá tepelné záření žhavicí svíčky skrz otvůrky.

5.3 Sekundární měření

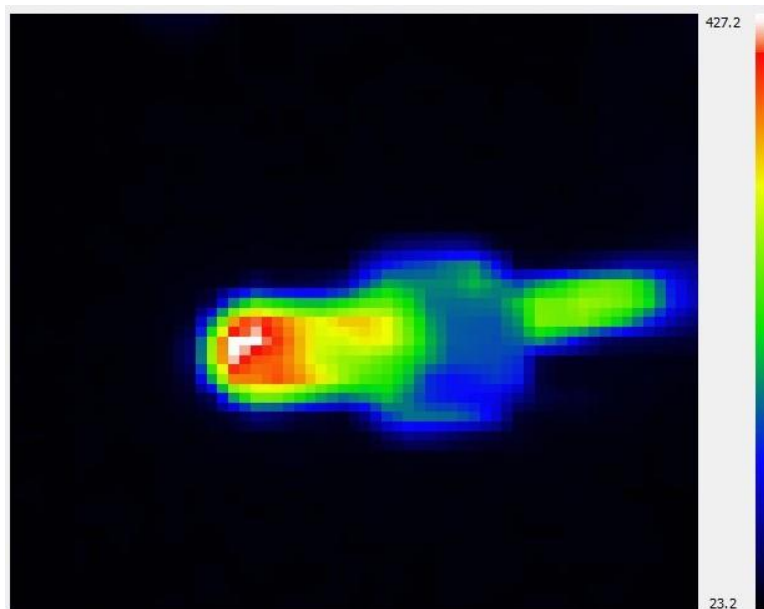
Protože v prvním měření došlo k velkým rozdílům snímaných teplot, bylo toto prvotní měření považované pouze za ukázkou a reprezentaci citlivosti měření při změně emisivity a transmisivity. A dále také jakou nepřesnost do měření vneslo snímání teploty přímo žhavicí svíčky skrz otvory.

Toto sekundární měření pro kalibraci pyrometru proběhlo velmi podobně jako první měření. Tentokrát byl ale pyrometr nastaven ne ze shora, nýbrž z boku předkomůrky, aby již nedocházelo k rušení měření skrz otvůrky předkomůrky. Úloha byla jinak nastavena souhlasně s prvním měřením. Ještě jedna věc byla odlišná, a to pořízené snímky termokamerou od firmy Heimann sensor. Kalibrování pyrometru se tedy realizovalo pomocí termočlánku i pomocí termokamery, protože hodnoty teplot ukazované termočlánkem a termokamerou se shodovaly. Na grafu Obr. 13 je výsledný graf měření, kde je vidět že teplota snímaná pyrometrem se zhruba shoduje s teplotami termočlánku a termokamery. Maximální rozdíl teplot je do 10 °C.

Na grafu Obr. 13 jsou tmavou zelenou barvou znázorněny okamžiky, kdy byly pořízeny snímky termokamerou. Obrázek z termokamery, která ukazuje aktuálně nejvyšší možnou teplotu 427,2 °C, v čase 3000 s, v místech vrcholu předkomůrky, je možné vidět na Obr. 14.



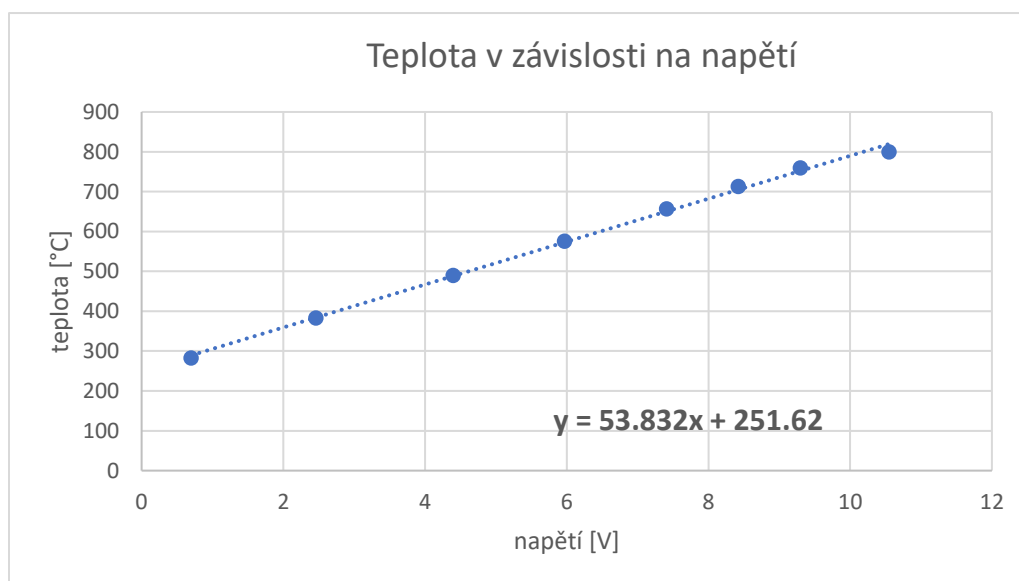
Obr. 13: Závislost změny teploty na čase, měření boku předkomůrky



Obr. 14: Snímek předkomůrky z termokamery

5.4 Vyhodnocení směrnic

Během měření byly zaznamenávány i další hodnoty, kromě teploty termočlánu, nebo teploty ukazující se přímo na pyrometru. Dále také napětí na měřící kartě, do které byli přivedeny pyrometr i termočlánek nebo proud na zdroji, který ohříval žhavicí svíčku. V jednotlivých časech byly tedy zaznamenávány teploty na pyrometru a napětí na kartě, ze kterých je možné sestavit graf a zjistit rovnici přímky, pro určení směrnice do dalších měření a přepočítání naměřených hodnot pyrometrem. Směrnice se nastavuje přímo v programu LabVIEW a je nutné ji znát, pro správné nastavení úlohy. Byla vytvořena směrnice pro rozsah 0 V až 10 V. Pomocí předpisu této funkce byla přepočítán naměřená data sekundárního měření pyrometru, pro zpřesnění výsledků. A také se tato směrnice musí zadat do program LabVIEW, pro správný přepočet hodnot při měření, při dalších měření.



Obr. 15: Změna teploty v závislosti na napětí, směrnice přímky

5.5 Závěr měření

Původně se tato úloha měla měřit, již v obrobené hlavě motoru se šroubením, do kterého by se umístil senzor v přesně definované vzdálenosti a sousosti od spalovací předkomůrky. Hlavním cílem původního měření bylo určení emisivity pomocí dotykového

a bezdotykového snímání teploty. Nicméně hlava nemohla být obrobena, a tedy se úloha nemohla uskutečnit.

Namísto toho byla uskutečněna tato dvě měření. První popsané v kapitole 5.2, alespoň pro možnost vyzkoušení měření s pyrometrem, pokusit se ho na kalibrovat a zjistit jaký vliv má na měření změna emisivity a transmisivity. Z výsledků měření je ale vidět, že hodnoty pyrometru a termočlánku se velice rozcházel. Důvody proč tomu tak mohlo být, jsou popsány v předchozích kapitolách. Měřením se tedy nepodařilo dosáhnout původního cíle, ale bylo alespoň možné říci, jaké chyby se v měření vyskytovali a co by se dalo v příštích měřeních zlepšit.

V sekundárním měření popsané v kapitole 5.3 byla popsána druhá úloha, kde se snímala teplota boku předkomůrky a jak je vidět z grafu Obr. 13, teploty pyrometru a termočlánku se mnohem více shodují oproti prvotnímu měření. Došlo tedy ke správné kalibraci pyrometru. Vypočtená směrnice z grafu Obr. 15 se použila pro přepočítání získaných dat měření, pro lepší přiblížení výsledků.

Velmi důležitá je pro měření pozice pyrometru vůči měřenému objektu, která se špatně definuje a v původní úloze byla definována jasně a přehledně. Velkou chybu vnášelo v prvotním měření vyzařování žhavící svíčky skrz otvorky z předkomůrky. Dalo by se tedy namísto předkomůrky použít nějaké speciální kalibrační tělísko ze stejných materiálu, jako měřené předkomůrky bez daných otvorů a závitů. A nedocházelo by pak k vyzařování tepelného záření z žhavící svíčky přímo na senzor pyrometru a měření by probíhalo přesněji. V sekundárním měření, kdy se snímal bok předkomůrky, došlo k mnohem přesnějším výsledkům.

Závěr

Byla provedena úprava hlavy motoru v prostředí programu Creo 4, kde jsem se věnoval jednotlivým úpravám i technologii výroby. V přílohách jsou postupně uvedeny všechny nástroje pro obrobení hlavy motoru a dále jsou tam uvedeny výkresy soustavy finálního návrhu hlavy motoru a výkres šroubení, které se zašroubuje a upevní do hlavy motoru, sloužící jako prvek přichycení senzoru v definované ohniskové vzdálenosti. A vypočtení tloušťky ochranného safírového sklíčka.

Dále proběhlo vyhodnocení náhradní měřící úlohy spalovací předkomůrky pomocí pyrometru a termočlánku. Bylo popsáno schéma a měřící pracoviště náhradní úlohy. Prvotní měření sloužilo jako reprezentace změny citlivosti měření na změnu emisivity a transmisivity, protože bylo do měření vneseno příliš mnoho chyb a rušení. Doporučení pro další měření, aby došlo k lepším výsledkům jsou následující: neměřit teplotu předkomůrky z jejího čela, kdy dojde k tomu, že pyrometr snímá mnohem větší teplotu než termočlánek, protože pyrometr snímá teplotu žhavicí svíčky skrz malé otvory komůrky. Je tedy nutné měřit teplotu komůrky z boku anebo použití kalibračního tělesa, které je ze stejného materiálu jako předkomůrka, již bez otvůrků a závitů. Dále správné nastavení geometrie úlohy, kdy je velmi klíčová ohnisková vzdálenost a sousost, v mém návrhu v kapitole 4.2 je tato poloha jasně definovaná. V sekundárním měření se již úspěšně povedlo zkalibrovat hodnoty teplot pyrometru pomocí termočlánku a termokamery, kdy již pyrometr snímal teplotu předkomůrky z jejího boku a došlo tedy k přesnějšímu měření.

Na návrhu úpravy hlavy motoru, jsem pracoval s tím, že dojde k jejímu obrobení, bohužel ale není možnost hlavu obrobít. Pro navazující práce tedy doporučuji pokračovat v práci a obrobít hlavu motoru a vyrobení šroubení pro uchycení senzoru. A následnou realizaci bezdotykového měření teploty předkomůrky s doporučeními získanými v této práci, pro jednodušší kalibraci předkomůrky. Ochranné safírové sklíčko je již k dispozici. S možností měřit teplotu předkomůrky lze dále zjišťovat, jak je tepelně zatěžována.

Citovaná literatura

- [1] M. Kreidl, Měření teploty - senzory a měřící obvody, Praha: BEN - technická literatura, 2005, ISBN 80-7300-145-4
- [2] J. Nožička, „Základy termomechaniky,“ Praha, Vydavatelství ČVUT, ISBN 8001029336 2001,
- [3] Optris GmbH, „<https://www.optris.global/>,“ [Online]. Dostupné z: https://www.optris.global/tl_files/pdf/Downloads/Zubehoer/IR%20Basics.pdf. [Přístup získán 5 7 2022].
- [4] D. prof. Ing. Jiří Šesták, Přenos hybnosti, tepla a hmoty, Praha: Vydavatelství ČVUT, 1993.
- [5] J. P. Holman, „Heat Transfer,“ 2010. [Online]. Dostupné z: https://www.academia.edu/6340170/Heat_Transfer_J_P_Holman_Ed_10. [Přístup získán 6 7 2022].
- [6] MICRO-EPSILON, „Basics of non contact temperature measurement,“ [Online]. Dostupné z: <https://www.micro-epsilon.cz/download/products/dat--infrared-basics--en.pdf>. [Přístup získán 10 7 2022].
- [7] E. G. Njoku, „Encyclopedia of Remote Sensing,“ 2014. [Online]. Dostupné z: <https://link.springer.com/referencework/10.1007/978-0-387-36699-9#bibliographic-information>. [Přístup získán 23 6 2022].
- [8] John G. Webster, and Halit Eren „Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook: Two Volume Set,“ Taylor&Francis Group, 2014. [Online]. Dostupné z: <https://www.proquest.com/docview/2136067241/bookReader?accountid=26988&ppg=1>. [Přístup získán 2 7 2022].
- [9] J. Fraden, „Handbook of Modern Sensors: Physics, Desings, and Applications,“ 2016. [Online]. Dostupné z: <https://web.p.ebscohost.com/ehost/ebookviewer/ebook/bmxlYmtfXzEwODE5NTthX0FOO?sid=27447ffc-fe01-4ecf-8dc3-c260bd5276fb@redis&vid=6&format=EB&rid=1>. [Přístup získán 2 7 2022].
- [10] J. G. a. C. L. P.R.N. Childs, „Review of temperature mesurement. Review of Scientific Instruments,“ [Online]. Dostupné z: <https://aip.scitation.org/doi/pdf/10.1063/1.1305516>. [Přístup získán 2 7 2022].
- [11] P. doc. Ing. Martin Novák, Technická měření, Praha: ČVUT, 2018, ISBN 978-80-01-06388-0

- [12] OMEGA, „Infrared pyrometers,“ [Online]. Dostupné z: <https://www.omega.com/en-us/resources/optical-pyrometer>. [Přístup získán 11 7 2022].
- [13] Mirco_Epsilon, „Operating Instructions thermoMETER CT,“ [Online]. Dostupné z: <https://www.micro-epsilon.com/download/manuals/man--thermoMETER-CT--en.pdf>. [Přístup získán 7 7 2022].
- [14] CRYSTRAN LTD, „Design of Pressure Windows,“ [Online]. Dostupné z: <https://www.crystran.co.uk/documents>. [Přístup získán 7 7 2022].
- [15] H. Group. [Online]. Dostupné z: https://ecatalog.hoffmann-group.com/index.html?country=ces_CZ_CZE/catalogs/&catalog=90000001#page_228. [Přístup získán 10 7 2022].

Seznam obrázků

Obr. 1:Termočlánek [11].....	20
Obr. 2: Základní schéma pro bezdotykové měření teploty [3]	24
Obr. 3: Spektrální hustota intenzity vyzařování černého tělesa [6]	26
Obr. 4: Konstrukce pyroelektrického detektoru [6].....	28
Obr. 5: Schéma monochromatického pyrometru [8]	30
Obr. 6: Průměr měřeného objektu v závislosti na vzdálenosti mezi měřeným objektem a senzorem [12].....	31
Obr. 7: Finální upravení hlavy motoru	32
Obr. 8: Sestava finálního návrhu	33
Obr. 9: Schéma měřicí úlohy	34
Obr. 10: Pracoviště měřicí úlohy	35
Obr. 11: Závislost změny teploty na čase, měděná předkomůrka, vliv změny emisivity a transmisivity.....	36
Obr. 12: Závislost změny teploty na čase, předkomůrka z nerezové oceli, vliv změny emisivity.....	38
Obr. 13: Závislost změny teploty na čase, měření boku předkomůrky	40
Obr. 14: Snímek předkomůrky z termokamery	40

Seznam tabulek

Tab. 1: Nejpoužívanější typy termočlánků [11].....	21
Tab. 2: Teplotní koeficient elektrického odporu a rezistivita pro vybrané kovy [11]	22
Tab. 3: Tloušťka sklíčka dle různých SF [13]	33

Seznam příloh

Příloha č.1	Pyrometr CTM-2SF40-C3 z katalogu firmy Micro-Epsilon [13]
Příloha č.2	Výchozí stav hlavy motoru
Příloha č.3	Nástroje pro technologii výroby [15]
Příloha č.4	Vzorec pro výpočet sklíčka, CRYSTRAN [14]
Příloha č.5	Výkresy šroubení a finální sestavy návrhu