

# **České vysoké učení technické v Praze**

Fakulta dopravní



**Diplomová práce**

**Bc. Lukáš Ksandr**

**Detekce horkoběžnosti železničního dvojkolí**

**2015**

Str. 2 originální zadání bakalářské práce

Str.3 zadání zadní strana

## **Prohlášení**

Já, Lukáš Ksandr, student Fakulty dopravní ČVUT v Praze, prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně a veškeré materiály, z nichž jsem čerpal, jsou uvedeny v seznamu použité literatury. Nemám námitky proti použití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb. o právu autorském a právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

---

Lukáš Ksandr

## **Abstrakt**

Autor: Bc. Lukáš Ksandr

Název: Detekce horkoběžnosti železničního dvojkolí

Škola: České vysoké učení technické v Praze

Fakulta: Fakulta dopravní

Rok vydání: 2015

Počet stran: 79

Klíčová slova: Železniční dvojkolí, horkoběžnost, bezdotykové termovizní měření, teplotní pole, teplotní čipy

Diplomová práce navazuje na bakalářskou práci, zabývající se bezkontaktním měřením teplotních polí ložiskových skříní jedoucích vlaků. Teplotní pole pak vyhodnocuje a zkoumá, zda jsou ložiska v pořádku, či nikoliv. V práci jsou navrženy a částečně otestovány komponenty nového modulárního mobilního systému pro bezkontaktní detekci horkoběžnosti dvojkolí.

## **Abstrakt**

Author: Bc. Lukáš Ksandr  
Title: Hot axle detection in railway wheelset  
University: Czech Technical University in Prague  
Faculty: Faculty of Transportation Sciences  
Year of publication: 2015  
Number of pages: 79  
Key words: railway wheels, hot axle, noncontact thermal measurement,  
temperature field, thermal chips

This thesis deals with the contactless measurement of temperature fields of bearing housings on moving trains. Based on a previous bachelor thesis of the same author, it proposes a new method of hot axle detection on moving train. This method forms a fundament for a new, mobile and modular system for hot axle detection which is designed, and also partially tested.

# Obsah

Prohlášení .....	4
Abstrakt .....	5
Abstrakt .....	6
Obsah.....	7
Seznam obrázků .....	10
Seznam tabulek .....	13
Seznam použitých konstant a veličin .....	14
Seznam použitých symbolů a označení.....	15
Předmluva.....	16
Úvod.....	18
1 Záření černého tělesa – teorie.....	23
Tepelné záření .....	23
1.1 Planckův zákon.....	24
1.2 Wienův zákon posuvu .....	25
1.3 Stefanův - Boltzmannův zákon.....	26
1.4 Emisivita.....	27
1.4.1 Černé těleso .....	29
1.4.2 Šedé těleso .....	30
1.4.3 Selektivní zářič .....	30
1.5 Infračervená termografie .....	31
2 Zhodnocení využitelnosti termovizních měření pro detekci horkoběžnosti železničního dvojkolí.....	32
2.1 Konstrukce obecného IR teplotního čipu vs. celá termokamera .....	32

2.2	Detektor .....	33
2.2.1	Základní parametry infračerveného detektoru .....	33
2.2.2	Detektory infračerveného záření .....	34
2.3	Proč nelze použít termokameru .....	39
3	Alternativní způsoby bezkontaktního měření horkoběžnosti .....	42
3.1	Výhody bezdotykového měření teploty .....	42
3.2	Nevýhody bezdotykového měření teploty .....	42
3.3	Rozdělení IR čipů (pyrometrů) .....	42
3.3.1	Širokopásmové pyrometry (radiální) .....	43
3.3.2	Monokrystalické pyrometry .....	43
3.3.3	Dvoubarevné pyrometry (poměrové) .....	44
3.3.4	Linescanner .....	45
3.4	Srovnání teplotních čipů .....	46
3.4.1	Keramická žároměrka .....	47
3.5	Kalibrace .....	48
3.5.1	Simulátor absolutně černého tělesa .....	48
3.5.2	Žárovky s wolframovým vláknem .....	49
3.5.3	Referenční pyrometr .....	50
3.6	Chyby a nejistoty bezdotykového měření .....	50
3.6.1	Neznalost správné hodnoty emisivity povrchu tělesa .....	50
3.6.2	Chyba v neznalosti propustnosti prostředí .....	51
3.6.3	Nepřesná korekce odraženého záření z okolí .....	51
3.6.4	Špatné zaměření měřeného objektu .....	51
4	Cíle projektu .....	53
4.1	Etapy projektu a jejich cíle .....	53
4.1.1	Měřicí část .....	53



4.1.2	Komunikační část .....	54
4.1.3	Serverová část .....	54
5	Návrh IR řídicí jednotky .....	56
5.1	Verze Melexis.....	57
5.1.1	Konstrukce MLX 90614.....	57
5.1.2	Zapojení MLX90614.....	60
5.1.3	Programování .....	63
5.2	Verze Hamamatsu.....	68
5.2.1	Konstrukce G12460-0606S .....	68
5.2.2	Konstrukce dvoubarevného detektoru K3413-09 .....	70
6	Testování zařízení a závěr .....	71
6.1	Testování MLX 90614.....	71
6.2	Testování Hamamtsu G12460-0606S.....	74
7	Závěr.....	75
	Použitá literatura .....	76
	Přílohy: .....	79

## Seznam obrázků

Obrázek 1 Nápravové ložisko vybavené snímačem, zdroj [2].....	20
Obrázek 2 Dělená ložisková skříň, zdroj [3].....	21
Obrázek 3 Umístění snímače IHL, zdroj [2].....	22
Obrázek 4 Celé elektromagnetické spektrum, zdroj [9].....	23
Obrázek 5 Spektrální hustota vyzařování, zdroj [5].....	25
Obrázek 6 Wienův posunovací zákon, zdroj [6].....	26
Obrázek 7 Rozdílná emisivita, zdroj [5].....	27
Obrázek 8 Kirchhoffův zákon termální radiace, zdroj [10].....	29
Obrázek 9 Znárodnění černého tělesa, zdroj [11].....	30
Obrázek 10 Rozdíl vyzařování těles, zdroj: [5].....	31
Obrázek 11 Blokvné schéma termokamery, zdroj [5].....	33
Obrázek 12 Blokvné schéma IR teplotního čipu, zdroj [12].....	33
Obrázek 13 Rozdění detektorů IČ záření, zdroj [10].....	35
Obrázek 14 Fotonka, zdroj [14].....	36
Obrázek 15 Termočlánek, zdroj [14].....	36
Obrázek 16 blokvné schéma IR detektoru: IČ – emitované infračervené záření; OPT – optický systém; SN – infračervený snímač; Z – zesilovač; A/D – analogočíslicový převodník; $\mu\text{P}$ – elektronika s mikroprocesorem, zdroj [14].....	37
Obrázek 17 Pyroelektrický detektor, zdroj [14].....	37
Obrázek 18 2D pole mikrobolometrů, zdroj [10].....	38
Obrázek 19 Detail mikrobolometru, zdroj [5].....	38
Obrázek 20 Grafické znárodnění problému.....	40
Obrázek 21 Změřené hodnoty v tabulkovém provedení.....	40
Obrázek 22 Princip radiačního pyrometru s termočlánekvným čidlem, zdroj [16].....	43
Obrázek 23 Blokvné schéma radiačního pyrometru, zdroj [16].....	43

Obrázek 24 Obrázek 24 Jasový pyrometr: 1 – měřený objekt, 2 – objektiv, 3 – pyrometrická žárovka, 4 – baterie, 5 – reostat, 6 – šedý klín (funkce měřené teploty), 7 – červený filtr, 8 – okulár, 9 – měřicí přístroj, zdroj [16] .....	44
Obrázek 25 Poměrový pyrometr R1 fibropti, zdroj [17].....	45
Obrázek 26 Linescanner MP150 zdroj [18].....	46
Obrázek 27 Princip funkce žároměrky, zdroj [19].....	48
Obrázek 28 Simulátor černého tělesa, zdroj [20].....	49
Obrázek 29 Optický diagram, zdroj [14] .....	51
Obrázek 30 Zorné pole čipu, zdroj [14] .....	52
Obrázek 31 obrázkový princip systém .....	55
Obrázek 32 Blokové schéma projektu .....	55
Obrázek 33 MLX 90614, zdroj [21].....	60
Obrázek 34 pohled ze spodu .....	60
Obrázek 35 Reálná ukázka zapojení čipu.....	62
Obrázek 36 mikrokontroler EvB 5.1 .....	62
Obrázek 37 připojení EvB.....	63
Obrázek 38 Spuštění display .....	64
Obrázek 39 Blokové schéma funkce programu .....	65
Obrázek 40 Adresování paměti, zdroj [21] .....	67
Obrázek 41 SMBus protokol, zdroj [21].....	67
Obrázek 42 Detekce vlaku, zdroj [25].....	68
Obrázek 43 Senzor G12460-0606S, zdroj [25].....	69
Obrázek 44 Pipis pinů pro správné zapojení zdroj [25] .....	70
Obrázek 45 Dvoubarevný detektor K3413-09 , zdroj [25] .....	70
Obrázek 46 Hodnoty po zapnutí přístroje .....	71
Obrázek 47 Hodnoty z venkovního prostředí .....	72

Obrázek 48 Hodnoty z plynové trouby .....	72
Obrázek 49 Model pro test rychlosti systému .....	73
Obrázek 50 Teplota modelu .....	73

## Seznam tabulek

Tabulka 1 Pásma dělení IR záření .....	24
Tabulka 2 Vyzařování různých předmětů .....	26
Tabulka 3 Hodnoty emisivit pro různé materiály.....	30
Tabulka 4 Rozdíl mezi tepelným a fotonovým detektorem .....	39
Tabulka 5 Klady a zápory teplotních čidel.....	47
Tabulka 6 popis pinů MLX 90614 .....	61

## Seznam použitých konstant a veličin

### Konstanty, jejich označení a hodnoty

Planckova konstanta	$h = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$
Rychlost světla ve vakuu	$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
Boltzmanova konstanta	$k = 1,4 \cdot 10^{-23} \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$
Wienova konstanta	$b = 2,898 \cdot 10^{-3} \text{ m}\cdot\text{K}$
Stefanova - Boltzmanova konstanta	$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$
Ludolfovo číslo	$\pi = 3,141592654$

### Označení použitých veličin a jejich jednotky

Spektrální hustota vyzařování	$W_\lambda$ jednotka: $\text{W}\cdot\text{m}^{-3}$
Vlnová délka	$\lambda_{\text{max}}$ jednotka: m
Intenzita vyzařování	$W$ jednotka: $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$
Integrální citlivost	$K$ jednotka: $\text{VW}^{-1}$
Spektrální citlivost	$K_\lambda$
Časová konstanta	$\tau$ jednotka: s
Teplota	$T$ jednotka: K

## **Seznam použitých symbolů a označení**

**ČVUT** – České vysoké učení technické

**TMVSS** – "TMV SS" spol.s r.o. je obchodní společností, zastupující na trhu ČR a SR zahraniční firmy , které se specializují na měřicí a zobrazovací techniku.

**FLIR** – Největší výrobce termovizní techniky

**ČD** – České Dráhy a.s.

**Žst.** – Železniční stanice

**IR** – (Infrared Radiation) – Infračervené záření o délce 0,7 - 100 $\mu$ m

**IHL** – indikátor horkoběžnosti ložiska

**Tzv.** – Tak zvané

**Obr.** – Obrázek

## Předmluva

Tato diplomová práce je pokračováním výzkumu bezkontaktního měření teploty ložiskových skříní na jedoucích vlacích z mé bakalářské práce, ve které jsme se tento jev snažili zachytit pomocí termokamer, ale ve výsledku se tato metoda ukázala jako technicky nemožná. V této práci jsme zvolili další možnosti detekce. Tato práce je výsledkem spolupráce Ústavu aplikované matematiky Fakulty dopravní ČVUT a kolegů z ČVUT, fakulty elektrotechnické. Záměr této práce vznikl na základě požadavku Českých drah, které potřebují vyvinout a zrealizovat mobilní zařízení pro detekci horkoběžnosti železničního dvojkolí. Když se tato porucha včas nedetekuje, způsobí velké škody, jak je vidět například v níže uvedeném výťahu ze zprávy [1] o výsledcích šetření příčin a okolností vzniku mimořádné události ze dne 9.3.2010. K takovýmto nehodám dochází bohužel často.

Cítace:

Skupina události: závažná nehoda;

Vznik události: 9. 3. 2010, 08:28 hodin;

Popis události: vykolejení drážního vozidla za jízdy vlaku Pn 66681;

Dráha, místo: dráha železniční, celostátní, 1. TK dvoukolejná trati č. 527 Praha  
Bubeneč – Děčín hl. n., mezi žst. Prackovice nad Labem a žst.  
Lovosice, km 497,599;

Zúčastnění: Správa železniční dopravní cesty, státní organizace (provozovatel  
dráhy);  
ČD Cargo, a. s. (dopravce);

Následky: nedošlo k úmrtí ani ke zranění;  
celková škoda **32 172 440 Kč**;

Bezprostřední příčiny: vykolejení DV způsobilo poškození ložiskového uložení druhé  
nápravy zadního podvozku vpravo ve směru jízdy vlivem dvou  
únavových lomů vnitřního kroužku zadního válečkového ložiska;

Zásadní příčiny: porušení technologických postupů provozovatele dráhy pro  
obsahu indikátoru horkoběžnosti ložisek po aktivaci snímacího



zařízení jízdou vlaku;

Příčiny v systému bezpečnosti: nezjištěny;

Bezpečnostní doporučení: nebylo vydáno.

V té době jsem se zrovna začínal věnovat termovizní technice a napadlo mne, že by tento problém mohl být řešitelný pomocí termokamery. Na tomto nápadu jsem postavil svoji bakalářskou práci. Protože metoda detekce pomocí termokamery neměla velký úspěch, začal jsem přemýšlet, jakým způsobem detekovat horkoběžnost soukolí jinak, lépe a proto téma předkládané diplomové práce navazuje na můj dosavadní výzkum a zjištění. S tímto nápadem a vývojem nové technologie mi pomáhají moji přátelé a kolegové z ČVUT, Fakulty elektrotechnické, Ing. Daniel Štěpán a Ing. Karel Durkota. Tímto bych jim velice rád poděkoval za jejich nápady, spolupráci a vzájemné konzultace na tomto pokusu vymyslet nové funkční zařízení.

Chtěl bych také poděkovat vedoucí mé bakalářské práce RNDr. Zuzaně Malé, Ph.D. a Dr. Ing. Janu Přikrylovi za pomoc a velkou trpělivost při vedení mé práce.

Poslední dík patří taky Ing. Janu Sovovi z firmy Workswell za poskytnuté materiály, ze kterých jsem pro tuto práci převážně čerpal.

## Úvod

V souvislosti s výstavbou nových železničních koridorů je pro České dráhy nezbytným úkolem zajistit dlouhodobou vysokou kvalitu provedených prací na železničním svršku, a to nejen využitím náročných stavebních technologií při výstavbě, ale i následnou kvalitní údržbou. Do této oblasti patří i kvalita a technický stav železničních vozů, které se po koridorech pohybují.

Jedním z největších nebezpečí pro bezpečnost železničního provozu jsou nehody z důvodu ukroucení čepu dvojkolí při poškození ložiska a jeho přehřátí. S vyřazením vozů s kluznými ložisky z provozu se toto nebezpečí značně snížilo. Nebylo však odstraněno úplně. I nadále se tyto případy občas vyskytují a představují významné ohrožení bezpečnosti provozu, proto se na starších železničních jednotkách musí tato ložiska detekovat právě našim bezkontaktním měřením teploty. Včasné zjištění takového stavu nemálo přispívá k větší bezpečnosti provozu.

Nejmodernější světová železniční vozidla mají na svých nápravách již instalované senzory pro železniční ložiskové jednotky. Než však budou tímto systémem standardně vybavena všechna vozidla, uplyne ještě minimálně několik let, spíše desetiletí. Prokluzování a smyku kol kolejových vozidel se lze ubránit systémy podobajících se systému ABS z automobilů [2]. Společnost SKF zdokonalila toto technické řešení tak, aby vyhovovalo specifickým nárokům železnice. Nové vlaky již tuto technologii mají aplikovanou. Dnes je většina kolejových vozidel konstruovaných pro vyšší rychlosti vybavena protiskluzovým systémem, který brání smyku a zablokování kol během brždění. Základ tohoto systému využívá techniku snímání integrovanou v ložiskových jednotkách. První tyto snímače byly na vozech odzkoušeny již v roce 1990 a rok později byly uvedeny do provozu. Dalšími léty vývoje se tento systém již zdokonalil tak, že dokáže sledovat:

- otáčky,
- teplotu ložiska,
- směr otáčení,
- ujetou vzdálenost,
- vertikální zrychlení.

Tyto snímače jsou schváleny Mezinárodní železniční unií, UIC. Signály ze snímačů jsou přenášeny do elektronických řídicích jednotek.

Integrované snímače mají celou řadu výhod jako například úspora prostoru, hmotnost a počet dílů a hlavně každý problém zjistí ihned. Mají také vcelku dlouhou životnost a vysokou účinnost. Samotný snímač je založen na principu bezdotykového měření změny magnetického toku rotujícího impulsního kroužku. Dle činnosti jsou tyto snímače rozděleny na aktivní a pasivní. Aktivní snímače mají vlastní napájení.

Pro měření teploty ložiska je určen snímač teploty, který je umístěn uvnitř pouzdra senzoru. Toto řešení umožňuje přímé měření teploty ložiska v reálném čase. Elektrický obvod se dvěma magnetorezistory v můstkové zapojení umožňuje zjistit také směr otáčení ložisek. Další integrovanou částí tohoto systému je snímač vibrací pro sledování axiálních zrychlení. Signál vibrací lze použít jako charakteristiku vývoje provozního stavu ložiska. Tak lze s velkým předstihem zjistit i vznikající vážné poruchy. Systém integrovaného snímače našel zatím uplatnění ve vysokorychlostních vlacích jako například v jednotkách Pendolino, které jezdí v Itálii, Španělsku, Portugalsku, Slovinsku, Švýcarsku a také České republice. Rovněž lokomotivy a jednotky s několika hnacími vozy, které jsou v provozu v Itálii a Británii, jsou vybaveny těmito integrovanými snímači. Další oblastí využití tohoto snímače představuje městská hromadná doprava jako například metro a tramvaje.

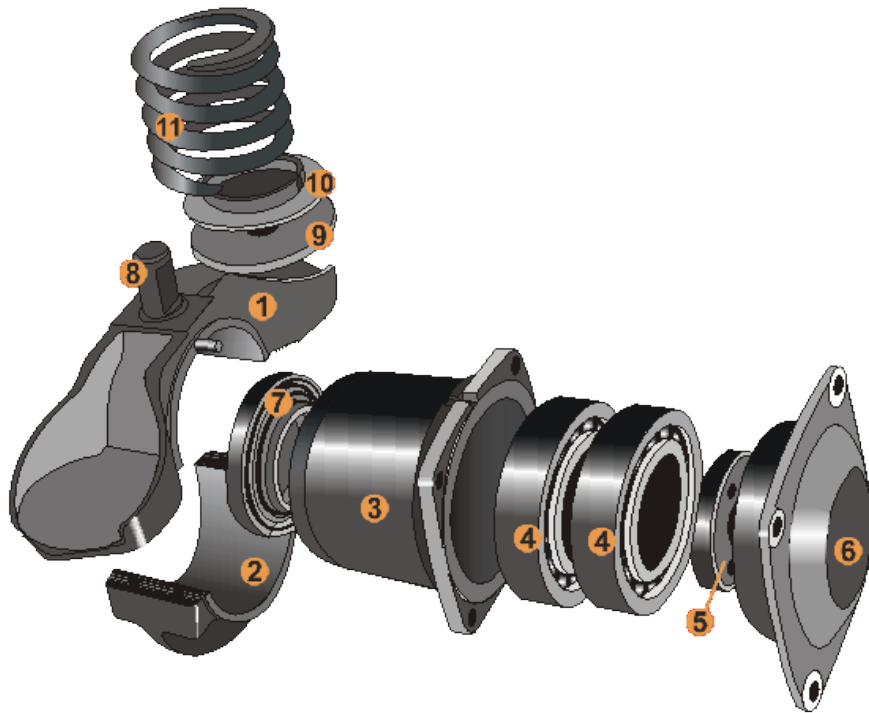


**Obrázek 1** Nápravové ložisko vybavené snímačem, zdroj [2]

Když se ovšem vrátím ke starším konstrukcím železničních dvojkolí bez integrovaného snímače ložiskových skříní, kterých se v dnešní době po našich železnicích pohubuje více než dostatek, tak dřívější typické železniční dvojkolí se skládá ze dvou kol nalisovaných na nápravu. Obě kola jsou tak pevně mechanicky spojena s nápravou. Železniční dvojkolí nemá žádný diferenciál, tak jak jej známe třeba z nápravy silničních vozidel. V kolejovém vozidle je dvojkolí uloženo pomocí valivých nebo, dnes již zřídka, i kluzných ložisek v ložiskových skříních.

Dělená ložisková skříň z ocelolitiny umožňuje vyvázat dvojkolí bez demontáže prvotního vypružení, vzor nápravového ložiska 84V. Ložisková skříň se skládá ze tří částí. Válcové pouzdro (obr. 2 poz. **3**) je sevřeno dvoudílnou objímkou (horní část obr. 2 poz. **1**, spodní část poz. **2**). Objímka je stažena šrouby, styčné plochy horní a spodní části jsou opatřeny drážkováním.

Vnitřní kroužky ložisek (obr. 2 poz. **4**) jsou za tepla nataženy přímo na ložiskový čep nápravy, vnější kroužky ložisek **4** jsou i s válečky a klecí nasunuty do pouzdra ložiskové skříně a tento celek je následně nalisován na vychladlé vnitřní kroužky na nápravě a zajištěn přišroubováním koncové desky (obr. 2 poz. **5**).



**Obrázek 2 Dělená ložisková skříň, zdroj [3]**

Právě v takovéto ložiskové skříni dochází k takovým defektům, které v lepším případě způsobí pouze finanční škody, nikoli ztráty na životech. Celá ložisková skříň je naplněna speciálním olejem, který dává ložiskům vhodnou kluznost a také působí proti jejich zahřívání. Problém ovšem nastane tehdy, když v ložisku vznikne netěsnost, mazivo vyteče a vůz je uveden do pohybu. V ložiskové skříni se v důsledku suchého tření začne vytvářet teplo, které se zvyšující se teplotou narušuje části ložisek a ložiskové skříně. Pokud se tento problém včas nezjistí, vlivem extrémních teplot dojde k zadření ložisek a jejich ukroucení, a tak se přestane točit celé dvojkolí. Tomuto jevu zahřívání se říká horkoběžnost železničního dvojkolí a je ho třeba kontrolovat.

Před rokem 2001 byl problém ve sledování horkoběžnosti ložisek v síti ČD řešen pomocí indikátorů horkoběžnosti Servo HBD. Se vznikem nových rychlostních koridorů však tyto indikátory ztrácely svůj účel, protože svou konstrukcí nebyly stavěny pro detekci na tratích pro rychlost 160 km/h a vyšší. Hlavní problém byl v upevnění snímačů. Jejich umístění předpokládalo zřízení pevného betonového základu pod železniční pláni, na kterém byla připevněna plechová skříň, sloužící jako podstavec pro snímače. Skříň se snímači byla namontována v blízkosti kolejnice na vnější straně koleje. Z tohoto důvodu musely být dva pražce v místě snímačů zkráceny těsně za podkladnicemi. Tím se narušovala homogenita

kolejového lože, což je pro vyšší rychlosti nepřijatelné. Indikátory také fungovaly na analogovém přenosu informace.

V březnu roku 2001 bylo schváleno nové zařízení ASDEK polské firmy pro detekci horkoběžnosti ložisek (IHL). V provedení nového systému došlo k zásadním změnám.

- Výstupní informace ze systému jsou digitalizovány.
- Přenos do dopravní se uskutečňuje pomocí modemů.
- Vizualizace dat u výpravčího je na obrazovce počítače.
- Údaje o teplotě jsou ve °C.
- Systém lze budovat jako síťový.
- Systém se instaluje na pražce, nebo je jejich součástí – není třeba velkých zásahů.



**Obrázek 3 Umístění snímače IHL, zdroj [2]**

Naším dalším úkolem je zjistit, zda je reálné z uvedeného stacionárního způsobu měření udělat systém mobilní a moderní.

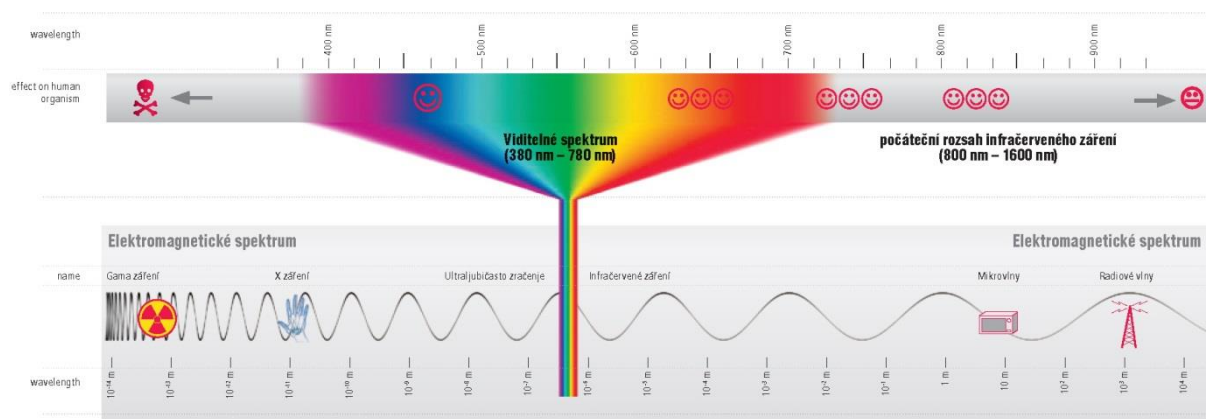
# 1 Záření černého tělesa – teorie

V této kapitole čerpáme z publikací [4] – [8]

## Tepelné záření

Všechna reálná tělesa, která mají teplotu větší než je absolutní nula, tj. veškerá tělesa ve známém vesmíru, vyzařují elektromagnetické záření, které vzniká pohybem částic, z nichž jsou tyto objekty složeny. Toto záření se nazývá „tepelné záření“. Je závislé na teplotě tělesa. Protože intenzita elektromagnetického záření závisí na povrchové teplotě předmětu, který toto záření vydává, lze změřením intenzity záření určit povrchovou teplotu předmětu. Toto je princip bezdotykového měření teploty, na kterém fungují naše pokusy.

Energie vyzařovaná tepelným zářením závisí na několika faktorech, jako jsou: teplota tělesa, barva, povrch a také velikost zářivé plochy. Nejmenší množství energie se vyzařuje z lesklého stříbrného povrchu. Naopak největší množství energie vyzařují černé matné povrchy. Pokud je teplota předmětu nižší než  $525^{\circ}\text{C}$ , je veškerá energie vyzářena v infračervené oblasti, která pro lidské oko není viditelná.



Obrázek 4 Celé elektromagnetické spektrum, zdroj [9]

Infračervená oblast elektromagnetického záření (IR) obsahuje oblast vlnových délek větších než viditelné záření a menší než mikrovlnné záření. IR oblast se rozděluje do 4 podoblastí

**Tabulka 1 Pásma dělení IR záření**

Blízké IR	(0,75 – 3 μm)
Střední IR	(3 – 6 μm)
Vzdálené IR	(6 – 15 μm)
Velmi vzdálené	(15 – 100 μm)

## 1.1 Planckův zákon

Roku 1900 plně popsal tepelné vyzařování těles Max Planck. Planckův vyzařovací zákon, je zákon, který ukazuje, kolik energie se vyžáří na jednotlivých vlnových délkách.

Vyjádřuje závislost spektrální hustoty vyzařování  $W_\lambda$  na vlnové délce a teplotě. Planck také vyslovil předpoklad, že záření vzniká tepelnými pohyby hmotných částic. Dále také prohlásil, že výměna energie se uskutečňuje po určitých množstvích – kvantech energie  $E$  a to podle vztahu:

$$E = h\nu,$$

kde:

$\nu$  je frekvence záření,

$h$  je Planckova konstanta.

Dále lze určit vztah pro spektrální hustotu intenzity záření pomocí vzorce:

$$W_\lambda = \frac{2\pi hc^3}{\lambda^5 \left( e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1 \right)}, \quad (1)$$

kde:

$W_\lambda$  je spektrální hustota vyzařování černého tělesa při vlnové délce  $\lambda$ ,

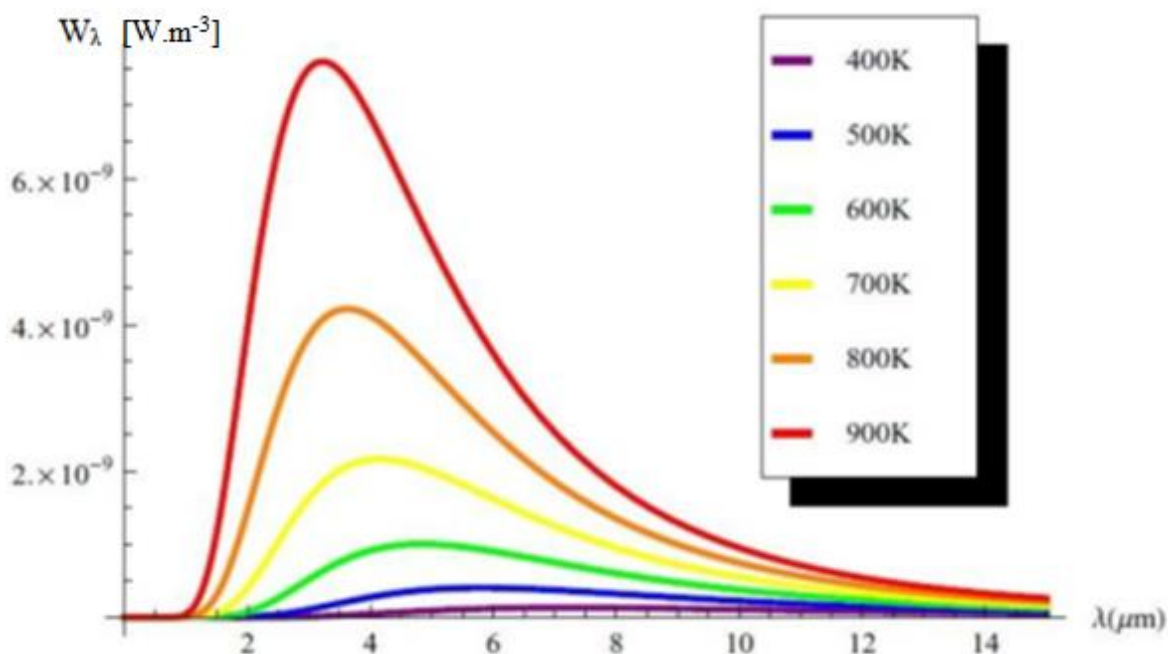
$c$  – rychlost světla ve vakuu,

$k$  – Boltzmannova konstanta,

$T$  – teplota tělesa,

$\lambda$  – vlnová délka.





Obrázek 5 Spektrální hustota vyzařování, zdroj [5]

Na obrázku 5 vidíme průběh spektrální hustoty vyzařování v závislosti na vlnové délce pro různé teploty černého tělesa. S vyšší teplotou tělesa dochází k dosažení maxima v kratší vlnové délce, což vychází z Wienova zákona posuvu.

## 1.2 Wienův zákon posuvu

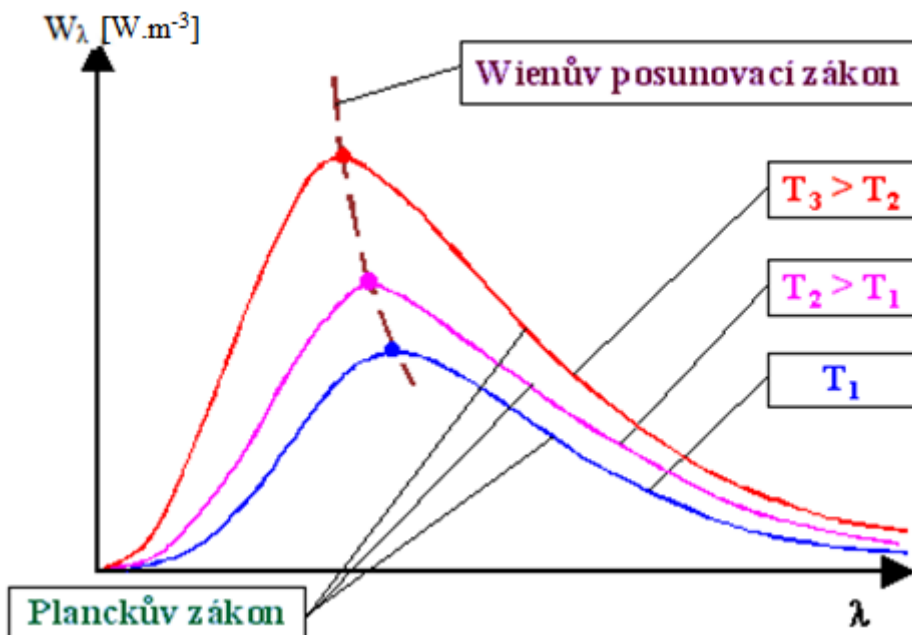
V případě změny teploty předmětu se změní jeho spektrální rozložení vyzařovaného výkonu. Wienův posunovací zákon je derivací Planckova vyzařovacího zákona podle vlnové délky. Ukazuje vlnovou délku, na které těleso dané teploty vyzařuje maximum energie. Jak je patrné z obrázku 5, tak čím je těleso teplejší, tím vyzařuje na kratších vlnových délkách a vyšších frekvencích, platí tedy:

$$\lambda_{max} = \frac{b}{T} \quad (2)$$

kde:

$\lambda_{max}$  – vlnová délka, pro kterou spektrální hustota vyzařování dosahuje maxima

$b$  – Wienova konstanta



Obrázek 6 Wienův posunovací zákon, zdroj [6]

Tabulka 2 Vyzařování různých předmětů

T[K]	zdroj	$\lambda_{\max}$
310	člověk	9,3 $\mu\text{m}$
500	vařič	5,8 $\mu\text{m}$
2000	žárovka	1,45 $\mu\text{m}$
5800	Slunce	0,55 $\mu\text{m}$

### 1.3 Stefanův - Boltzmannův zákon

Vše okolo nás vyzařuje tepelné záření, dokonce i třeba kostka ledu. Když známe emisivitu předmětu, který je zdrojem záření a víme jeho teplotu v Kelvinech a také velikost povrchu v metrech čtverečních, můžeme spočítat vyzařovaný výkon ve Watech pomocí tohoto zákona. Stefanův - Boltzmannův zákon popisuje vyzařování  $W$  tělesa. Je integrací Planckova vyzařovacího zákona podle vlnové délky.

$$W = \varepsilon\sigma T^4 \quad (3)$$

kde:

$\varepsilon$  – emisivita,

$\sigma$  – Stefanova - Boltzmannova konstanta.

## 1.4 Emisivita

Emisivita je definována jako poměr vyzářené energie reálného tělesa, oproti energii vyzářené černým tělesem při stejné teplotě.

$$\varepsilon = \frac{W_{RT}}{W_{\check{C}T}}, \quad (4)$$

kde:

$W_{RT}$  – vyzařování reálného tělesa,

$W_{\check{C}T}$  – vyzařování černého tělesa.

Emisivitu lze brát jako efektivitu vyzařování. Je to vlastně schopnost povrchu materiálu vyzařovat energii.

Černé těleso má emisivitu  $\varepsilon=1$ , všechna reálná tělesa mají emisivitu  $\varepsilon<1$ , což v praxi znamená, že daný předmět při stejné povrchové teplotě jako má černé těleso, vyzáří méně tepelného záření.

Velikost emisivity měřeného povrchu má výrazný vliv na výsledek měření. Je-li nastavena špatně, budou velmi nepřesné i výsledky měření, jak je uvedeno na obr.:6.



Obrázek 7 Rozdílná emisivita, zdroj [5]

Na tomto termogramu je zachycen povrch s konstantní povrchovou teplotou. Nasprejovaná část má však jinou emisivitu než zbylá část omítky, a tak se zdá, že posprejované místo je chladnější, i když tomu tak vůbec není. Vše je dáno jen rozdílnou emisivitou.

Kirchhoffův zákon termální radiace říká, že emisivita je rovna pohltivosti pro objekt, který je v teplotní rovnováze. Každý objekt pohlcuje nejvíce těch vlnových délek, které pak následovně nejsilněji vyzáří. Platí:

$$\varepsilon = \alpha, \quad (5)$$

kde:

$\alpha$  – pohltivost.

Další parametr záření je odrazivost. Podle vztahu prvního Kirchhoffova zákona termální radiace a druhého Kirchhoffova zákona termální radiace dojdeme k výsledné rovnici:

$$1 = \alpha + \tau + \rho. \quad (6)$$

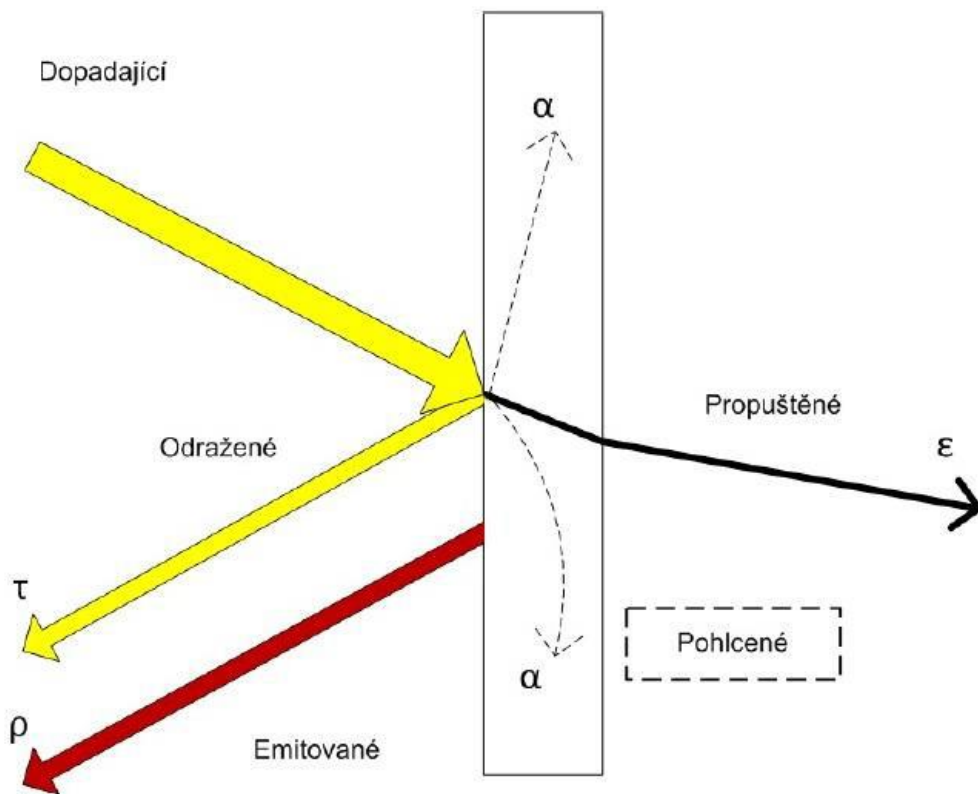
Dosadíme:

$$1 = \varepsilon + \tau + \rho, \quad (7)$$

kde:

$\tau$  – propustnost,

$\rho$  – odrazivost.



Obrázek 8 Kirchhoffův zákon termální radiace, zdroj [10]

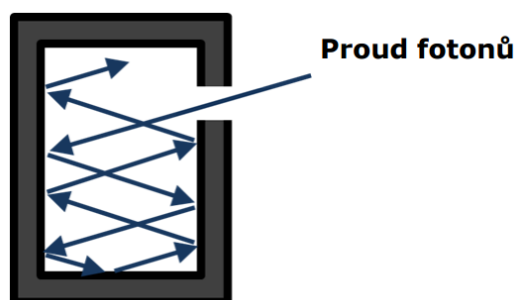
Podle předchozích čtyř veličin lze všechny předměty rozdělit do tří skupin:

- a) černá tělesa,
- b) šedá tělesa,
- c) selektivní zářiče.

#### 1.4.1 Černé těleso

$$\varepsilon = 1 ; \alpha = 1 ; \tau = 0 ; \rho = 0;$$

Černé těleso pohlcuje 100% veškerého záření všech vlnových délek dopadajících na jeho povrch a nic neodrazí ani nepropustí. Toto těleso je ideální případ a v praxi neexistuje.



Obrázek 9 Znárodnění černého tělesa, zdroj [11]

### 1.4.2 Šedé těleso

$\varepsilon = \text{konstantní, } \varepsilon < 1$

Rozdíl mezi šedým tělesem a černým je pouze v tom, že šedé těleso má sice konstantní emisivitu, ale její hodnota je menší než 1. Šedé těleso je také ideální případ a v praxi se taktéž nevyskytuje, protože ve skutečnosti je emisivita vždy závislá na vlnové délce.

### 1.4.3 Selektivní zářič

Selektivním zářičem je každý objekt reálného světa. Situace je zde složitější. Od černého tělesa se odlišuje tím, že část dopadajícího záření je pohlcena ( $\alpha(\lambda)$ ), část se odráží ( $\rho(\lambda)$ ) a část může tělesem projít ( $\tau(\lambda)$ ). Všechny tyto veličiny jsou u selektivního zářiče závislé na vlnové délce. Závislost emisivity na vlnové délce nazýváme termínem spektrální emisivita  $\varepsilon(\lambda)$ .

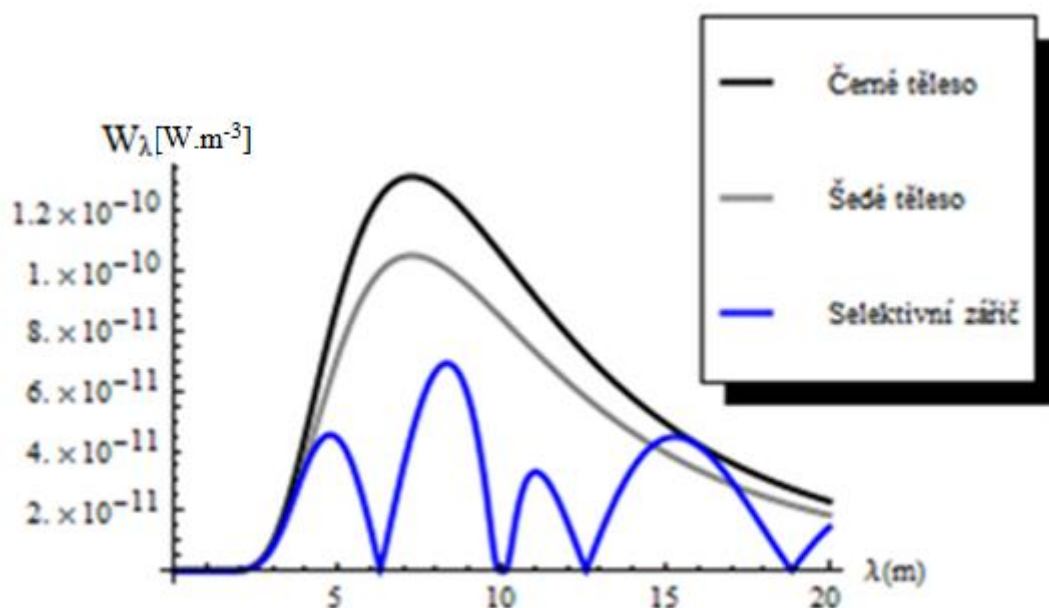
Při měření v praxi se uvažuje konstantní emisivita tělesa v daném rozsahu vlnových délek.

Tabulka 3 Hodnoty emisivit pro různé materiály

Materiál	Emisivita
Azbestová deska	0,96
Beton	0,97
Dřevo	0,98
Hliníková folie	0,04

Měď leštěná	0,02
Měď oxidovaná	0,6
Papír	0,93

Rozdíl mezi vyzařováním selektivního zářiče, černého tělesa a šedého tělesa je vidět na obrázku 8.



Obrázek 10 Rozdíl vyzařování těles, zdroj: [5]

## 1.5 Infračervená termografie

Infračervená termografie je vědní obor, který se zabývá zkoumáním rozložení teploty na povrchu tělesa bezkontaktním způsobem. Zkoumá, zachycuje a analyzuje energii vyzařenou tělesem z jeho povrchu. Výsledkem tohoto zkoumání je termogram, který ukazuje rozložení teplotního pole na povrchu daného tělesa.

## **2 Zhodnocení využitelnosti termovizních měření pro detekci horkoběžnosti železničního dvojkolí**

V této části práce bych rád zhodnotil a porovnal metodu z bakalářské práce a nový nápad na detekci pomocí samostatných IR teplotních čipů.

Nejprve však vysvětlím, co je samotná horkoběžnost a jak se určuje. Horkoběžnost ložisek je sledování teploty ložiskové skříně na jedoucím vlaku a zkoumání, zda je naměřená teplota optimální pro jeho provoz. Horkoběžnost ložiska má dva stupně požadované sledovanosti. Když je ložisko teplejší o více jak 40°C nad teplotu okolí, je třeba mu věnovat zvýšenou pozornost a drážní vozidlo dopravit do servisu. Když má však ložisko teplotu vyšší o 60°C nad teplotou okolí, je třeba vozidlo okamžitě zastavit, protože tato teplota je kritická pro následné poškození, či zadření ložiska a může tak způsobit utavení a následné zablokování celé ložiskové skříně a tím pádem vykolejení celého vlaku viz. předmluva.

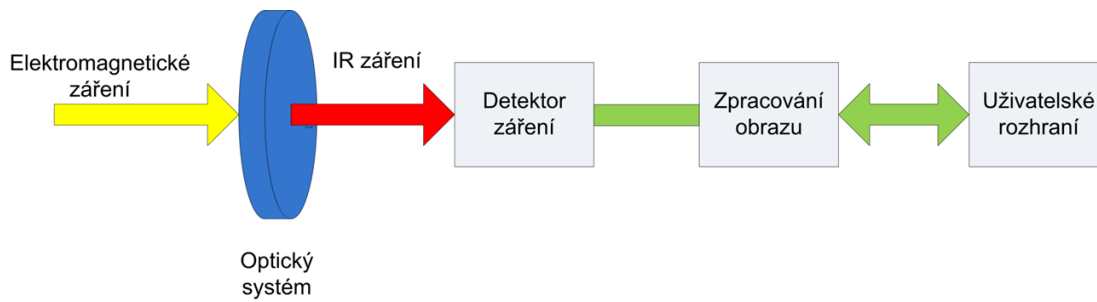
### **2.1 Konstrukce obecného IR teplotního čipu vs. celá termokamera**

Termokamera se svojí konstrukcí a vzhledem podobá normálně běžné kameře s tím rozdílem, že objektiv promítá na čip dopadající tepelné záření, kde se měří jeho intenzita. Tato informace je dále převáděna do digitální podoby a je vyobrazena na snímku, který se odborně nazývá termogram. Jestliže měření proběhlo bezchybně a v kameře byly nastaveny správně veškeré potřebné hodnoty, nese pak termogram informaci o rozložení povrchové teploty na měřeném tělese. Čip je jednou z mnoha součástí celé termokamery. Když ovšem pomineme potřebu vidět celý termogram, který je výstupem termokamery a spokojíme se jen s čistými daty z čipu, jsme schopni dosáhnout mnohem rychlejšího měření. Termokamery jsou zbytečně pomalé, kvůli přepočtu jednotlivých pixelů na čipu zpět na viditelný obraz (termogram).

Blokové schéma termokamery lze rozdělit na:

- optiku
- detektor
- elektroniku pro zpracování obrazu

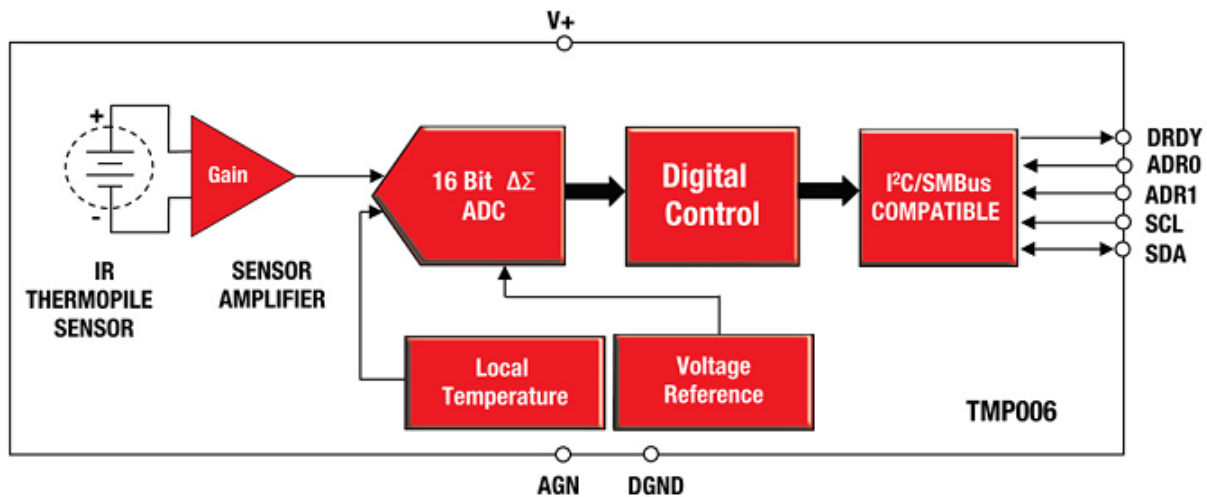




Obrázek 11 Blokové schéma termokamery, zdroj [5]

Blokové schéma IR teplotního čipu (pyrometru):

Infračervený teplotní čip je v obr.: 11 nazván jako detektor záření a jeho blokové schéma vypadá takto:



Obrázek 12 Blokové schéma IR teplotního čipu, zdroj [12]

## 2.2 Detektor

Detektor infračerveného záření převádí dopadající tepelné záření na elektrický signál, který je pak v dalším zpracování převeden na výstup, který je pro uživatele čitelný, jako je například teplota ve °C. Základní parametry detektoru jsou uvedeny v [5] a [13].

### 2.2.1 Základní parametry infračerveného detektoru

Integrální citlivost –  $K$ , podíl elektrického signálu  $U$  na výstupu snímače a zářivého toku  $\Phi$ , který na detektor dopadá.

$$K = \frac{U}{\Phi}, \quad (8)$$

kde:

$U$  – napětí [V],

$\Phi$  – zářivý tok [W].

Spektrální citlivost –  $K(\lambda)$ , podíl výstupu snímače  $U$  a vlnové délky dopadajícího zářivého toku.

$$K(\lambda) = \frac{U}{\Phi(\lambda)}. \quad (9)$$

Časová konstanta –  $\tau$ , určuje minimální dobu, za kterou detektor dokáže poznat změnu zářivého toku a změnu teploty.

NEP – ekvivalentní šumový výkon – pro určení prahové citlivosti infračervených detektorů byl zaveden pojem ekvivalentní šumový výkon, který je definován jako výkon dopadajícího záření, který vytváří na detektoru stejnou efektivní hodnotu napětí, jako je napětí vlastního šumu detektoru. Ekvivalentní šumový výkon udává zářivý výkon, při jehož detekci je na výstupu detektoru záření poměr signál/šum roven jedné. Tato veličina tak udává minimální intenzitu záření, kterou je detektoru schopen odlišit od šumu. Čím menší je tato hodnota (NEP), tím lepší je detektor, protože zvládá detekovat slabší signály.

Detektivita –  $D$  je detekční schopnost definována jako:

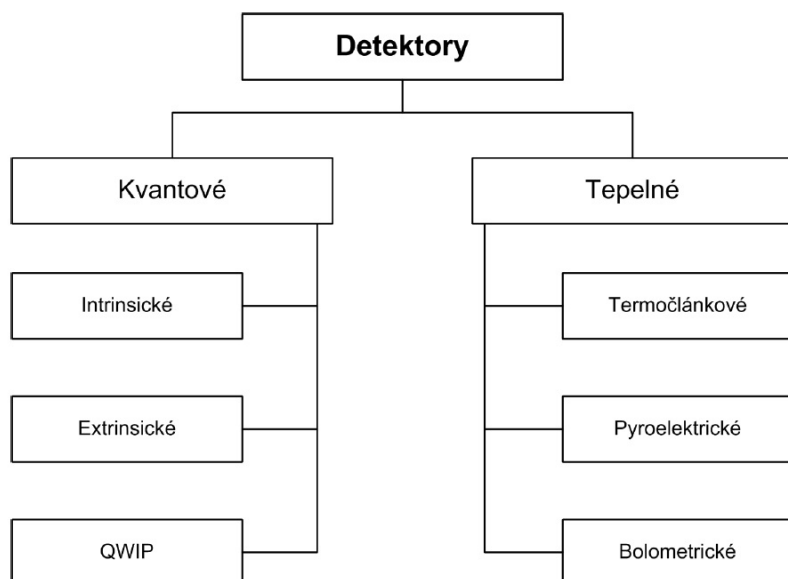
$$D = \frac{1}{NEP}. \quad (10)$$

Ze vztahu plyne, že čím menší je detektivita, tím horší je pro detektor zachytit slabší signály, protože ekvivalentní šumový výkon (NEP) je vysoký. Pro správné porovnání detektorů různých výrobců byl vytvořen standart, tzv. normovaná detektivita  $D^*$ , což je detektivita  $D$  normovaná na plochu  $S$  [m<sup>2</sup>] a šířku kmitočtového pásma  $\Delta f$  [Hz].

### 2.2.2 Detektory infračerveného záření

Z hlediska funkce rozlišujeme detektory na:

- Fotonové (kvantové)
- Tepelné



Obrázek 13 Rozdělení detektorů IČ záření, zdroj [10]

**Fotonový detektor** je postaven na principu počítání kvant elektronového záření, nebo-li počítá fotony, které samy vytvářejí elektrický signál. Základem tohoto detektoru je fotoelektrický jev: Je-li energie elektronu ve valenčním pásmu, která mu byla předána fotonem záření, dostatečná k překonání zakázaného pásma  $Q_g$ , elektron opustí valenční pásmo a pohybuje se v pásmu vodivostním (vznik párů elektron- díra). Minimální energie fotonu (vlnová délka) je dána šířkou zakázaného pásma.

$$\lambda_c = \frac{hc}{Q_g} \text{ [m]}, \quad (11)$$

kde:

$\lambda_c$  – mezní vlnová délka,

$Q_g$  – zakázané pásmo energie [eV].

Detektor je velmi citlivý, více než tepelný detektor, ale musí se chladit. Proto jsou termokamery s tímto typem detektoru těžší, ale také výrazně dražší.

Fotonový detektor je úzkopásmový a je schopný detekovat záření jen v úzkém rozsahu vlnových délek. Příkladem takového detektoru je fotonka.



Obrázek 14 Fotonka, zdroj [14]

**Tepelný detektor** v závislosti na intenzitě dopadajícího infračerveného záření mění své elektrické vlastnosti. Charakteristickou veličinou těchto detektorů je teplotní součinitel odporu, kde odpor elektrických vodičů s rostoucí teplotou stoupá:  $\alpha$  má kladnou hodnotu a odpor elektrických polovodičů s rostoucí teplotou klesá:  $\alpha$  má zápornou hodnotu.

$$\alpha = \frac{1}{R_d} * \frac{dR_d}{dT} \quad (12)$$

Tuto vlastnost má součástka zvaná mikrobolometr, která mění svůj elektrický odpor v závislosti na intenzitě dopadajícího záření. Detektor čipu je pak tvořen tzv. mikrobolometrickým polem, což je velké množství mikrobolometrů uspořádaných vedle sebe v 2D poli. Tento typ snímače je dnes nejčastěji používán a lze se s ním setkat minimálně v 95 % případů.

Dalším tepelným senzorem může být také

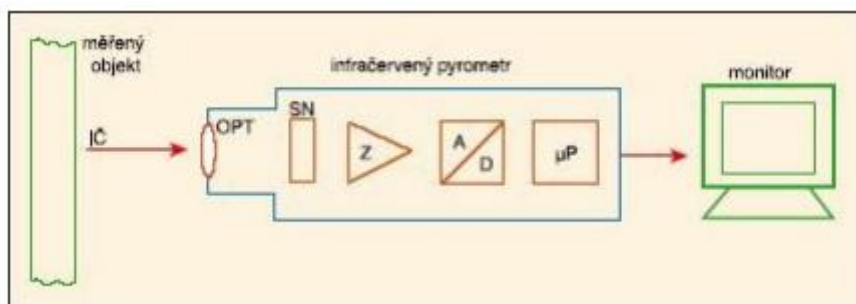
### termočláneková baterie



Obrázek 15 Termočlánek, zdroj [14]

nebo

**pyroelektrický senzor** využívající pyroelektrického jevu vyskytujícího se u tzv. pyroelektrik, kdy při změně teploty dochází k naindukování elektrického náboje na elektrodách.



**Obrázek 16** blokové schéma IR detektoru: IČ – emitované infračervené záření; OPT – optický systém; SN – infračervený snímač; Z – zesilovač; A/D – analogočíslíkový převodník; μP – elektronika s mikroprocesorem, zdroj [14]

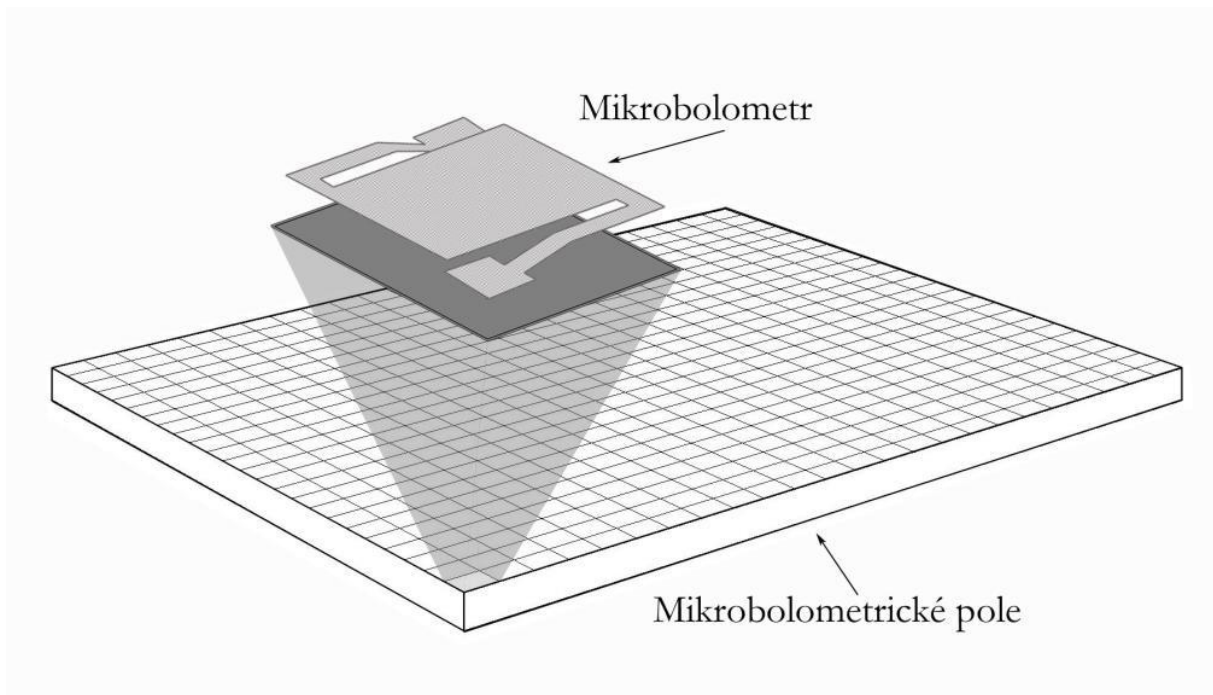


**Obrázek 17** Pyroelektrický detektor, zdroj [14]

Tepelný detektor není v infračervené oblasti frekvenčně selektivní, proto jeho schopnost nezávisí na frekvenci dopadajícího záření. Absorbér záření je postaven tak, aby přijmul maximální množství dopadajícího záření na plochu detektoru. Za tímto účelem je použita reflexní hliníková vrstva, která odráží nepohlcené záření, a proto je absorpce až 95 %.

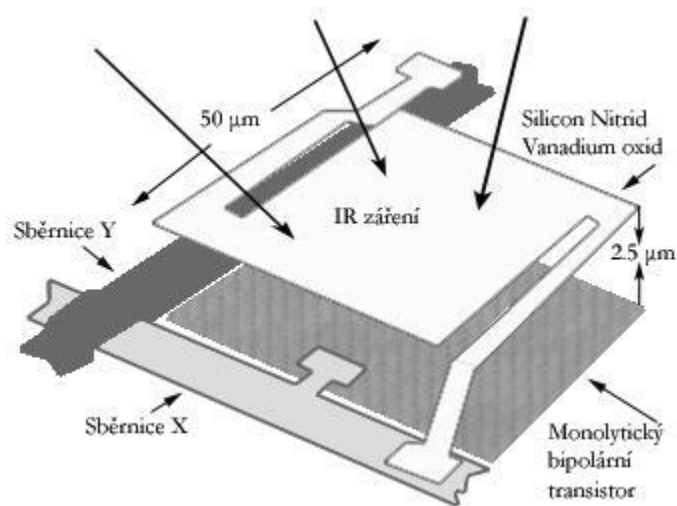
**Mikrobolometr** je nejobvyklejší typ tepelného detektoru pro IR čipy s teplotní citlivostí cca 30 mK a spektrálním rozsahem 8  $\mu\text{m}$  až 14  $\mu\text{m}$ . Na jeho povrch dopadá tepelné záření, které ho ohřívá a mikrobolometr pak mění svůj vnitřní elektrický odpor. Tato změna elektrického odporu se měří pomocí Wheastonova můstku a zpracovává se pro vytvoření obrazu. Tento typ detektoru nevyžaduje chlazení.

Jednotlivé mikrobolometry jsou integrovány do 2D pole, kde vytvoří matici plošek, které absorbují infračervené záření. Celý mikrobolometrický senzor je pak vyroben jako monolytický obvod.



**Obrázek 18 2D pole mikrobolometrů, zdroj [10]**

Mikrobolometr je velký řádově  $\mu\text{m}$  a silný desetiny  $\mu\text{m}$ . Jako elektrický odpor se dnes používá výhradně oxid vanadičitý nebo nitrid křemíku. Ploška je nad křemíkovou plochou vyvýšena pomocí „paciček“, které jsou i vodícími kontakty. Izolantem je zde vzduch. Pod a kolem plošky se nachází antireflexní vrstva, která odvádí neabsorbované tepelné záření.



**Obrázek 19 Detail mikrobolometru, zdroj [5]**

Příložená tabulka 4 shrnuje základní odlišnosti tepelného a fotonového detektoru.

**Tabulka 4 Rozdíl mezi tepelným a fotonovým detektorem**

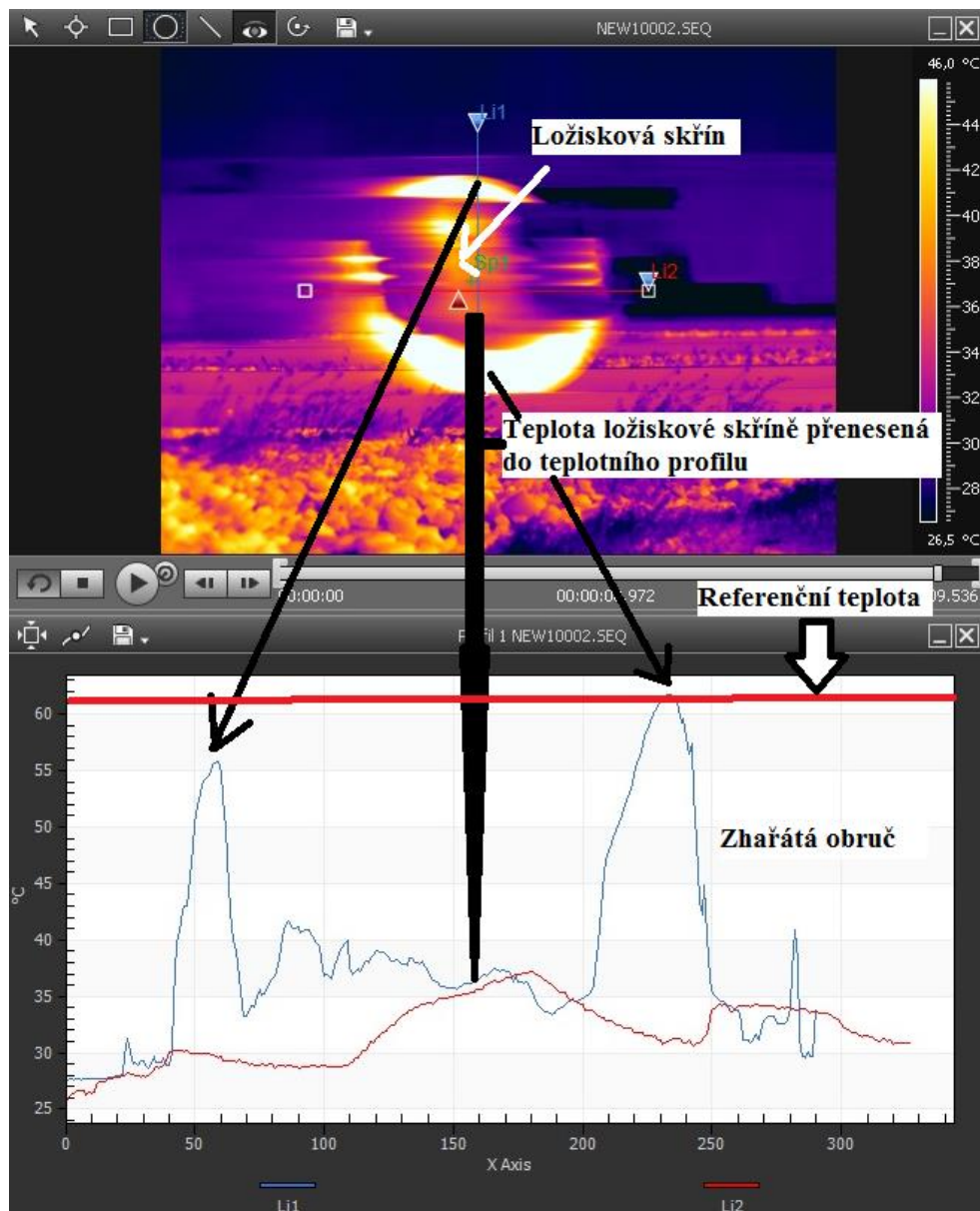
Vlastnost	Fotonový detektor	Tepelný detektor
Spektrální citlivost	Omezená	Široká
Citlivost	Vysoká	Nízká
Časová konstanta	Velmi krátká ( $\mu\text{s}$ )	Střední (ms)
Nejčastější typ	PtSi a InSB, QWIP	Mikrobolometr
Pracovní teplota	Nízká (nutné chlazení)	Pokožová
Cena	Vysoká	Nízká

### 2.3 Proč nelze použít termokameru

Původní nápad, prezentovaný v bakalářské práci, byl jednoduchý v tom, že v práci použítá termokamera FLIR SC 660 umí nastavit referenční teplotní bod, který když zachytí, tak na svůj výstup pošle elektrický signál. Předpokládali jsme tedy, že na termokameře nastavíme okolní teplotu a tam také referenční bod o  $40^{\circ}\text{C}$  vyšší než je teplota okolí. V případě, že projede snímaným místem ložisko s teplotou překračující daný referenční bod, termokamera to zaznamená a sepne binární výstup, což by byl signál toho, že je něco v nepořádku.

Celé snímání zahřívání ložisek pomocí termokamery selhává na tom, že když vlak brzdí, třením se zahřívají obruče železničních kol, které mají vysoké teploty a tím pádem navržené zařízení hlásí chybu, respektive podává hlášení o přehřívání ložisek. Jak je vidět na obrázku (20) na teplotním profilu přímky Li1, tak teplota překračuje doporučenou mez a tím pádem je vyhodnocována jak horkoběžné ložisko. Ve skutečnosti však tato teplota není naměřena na ložiskové skříni, ale na obruči železničního kola. Skutečná teplota ložiskové skříně v tomto případě byla  $37^{\circ}\text{C}$ , jak je vidět na příložené tabulce změřených hodnot. Tento problém by mohl jít odstranit tím, že ve chvíli, kdy se bude pohybovat v rovině měření cokoliv jiného, než je ložisková skříň, tak systém nebude aktivní. Na tomto způsobu měření však termokamera ztroskotala svojí rychlostí snímání (ta je u termokamer obecně nízká) a nemožností přeprogramovat firmware kamery.

Zde je celý problém znázorněn graficky



Obrázek 20 Grafické znázornění problému

Filtr: Aktuální karta		Výsledky									
Název	Typ	Max.	Min.	Průměr	StdOdch.	Rozmezí	Součet	Emisivita	Vzdálenost (m)	Ref. tepl.	
NEW10002.SEQ											
Image	Image	62.4°C	23.7°C	32°C	5.6°C	38.7°C	9825186.6°C	0.92	3	20	
Li1	Li1	61.7°C	27.6°C	38.6°C	8.7°C	34.1°C	11236.5°C	0.92	3	20	
Sp1	Sp1	37°C	37°C	37°C	-	-	-	0.92	3	20	
Li2	Li2	37.2°C	25.6°C	31.8°C	2.8°C	11.6°C	10417.5°C	0.92	3	20	

Obrázek 21 Změřené hodnoty v tabulkovém provedení



Data byla zpracována a analyzována programem FLIR Researcher IR [15], který je volně stažitelný z webových stránek firmy Flir na zkušební dobu 30 dní.

### **3 Alternativní způsoby bezkontaktního měření horkoběžnosti**

Přes to, že náš první nápad na získávání správných dat bezkontaktním způsobem nenašel správné uplatnění, i nadále tento způsob měření považujeme za velmi důležitý a výhodný. Kromě toho, že tento nápad mobilního bezdotykového měření vzešel původně jako požadavek Českých drah, tak jaká jsou vlastně jeho pozitiva a proč je tak výhodný?

#### **3.1 Výhody bezdotykového měření teploty**

- Mobilita – systém je snadno přemístitelný z bodu A do bodu B.
- Rychlost – šetří čas a uskutečňuje více měření.
- Měří teplotu pohybujících se objektů.
- Bezpečně měří na nebezpečných nebo špatně dostupných místech – součásti pod elektrickým napětím, vzdálené objekty.
- Bez problémů lze měřit vysoké teploty – dotykové teploměry mají omezenou teplotní životnost.
- Neovlivňuje měřený objekt – z měřeného objektu není odebírána žádná energie.
- Nulové riziko kontaminace a mechanických účinků na povrch měřeného objektu – nelze poškrábat lakované povrchy, lze měřit i měkké povrchy, měření je hygienické.

#### **3.2 Nevýhody bezdotykového měření teploty**

Bohužel však jak to ve světě chodí, žádný systém není dokonalý a i přes velký počet kladů, existují i pravidla (nevýhody), která se při bezkontaktním měření musí dodržet.

- Měřený objekt musí být pro IR čip opticky viditelný – bezdotykovým měřením se značně snižuje přesnost v místech s vysokou koncentrací prachu nebo kouře v ovzduší.
- Optika čidla musí být chráněna před kondenzujícími kapalinami a usazujícím se prachem.
- Touto metodou lze měřit pouze povrchovou teplotu, při čemž je nutno brát v úvahu emisivitu jednotlivých povrchů.

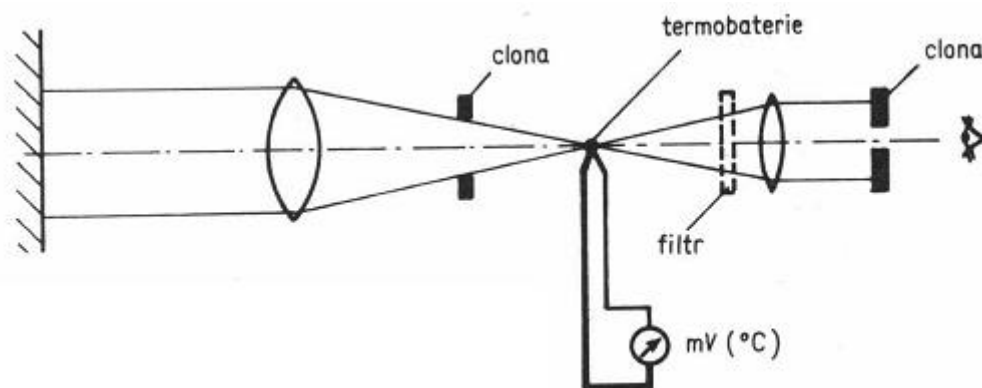
#### **3.3 Rozdělení IR čipů (pyrometrů)**

Aby nedocházelo ke zkreslení významů slov, tak bych rád ujasnil jednu věc. V mé práci se setkáte se slovy IR čip a pyrometr. Ve skutečnosti se jedná o jednu a tu samou techniku. Jedná se o infračervený bezkontaktní teploměr. Obecně se touto metodou měření zabývá Pyrometrie – bezdotykové měření. Jedná se o měření povrchové teploty těles na

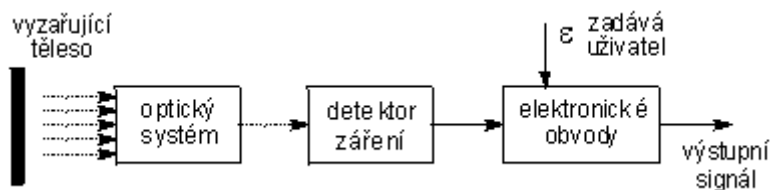
základě elektromagnetického záření mezi tělesem a okolím. Při měření se využívá viditelná a infračervená oblast elektromagnetického záření, která odpovídá měření teplot v rozsahu cca  $-40^{\circ}\text{C} \dots +10000^{\circ}\text{C}$ . Také bych rád upozornil na skutečnost, že při hledání alternativních způsobů měření již nemůžeme zůstat jen u bolometrických snímačů obsažených v termokamerách, ale v našem srovnání se již budou vyskytovat i infračervené pyroelektrické senzory spadající do stejné skupiny tepelných detektorů (viz kapitola 2.2.2). Jejich výhodou je především rychlost. Dnešní trhy nabízejí velkou spoustu takovýchto bezkontaktních teploměrů v různých cenových relacích a provedeních. Svě porovnání budu směřovat hlavně podle rozdělení čipů [16].

### 3.3.1 Širokopásmové pyrometry (radiační)

Tento druh pyrometru je nejjednodušší a nejlevnější. Pracuje s vlnovými délkami  $0,3\mu\text{m}$  až do  $20\mu\text{m}$ . Horní a dolní mez šíře pásma pyrometru je určena hlavně jeho použitou optikou. Širokopásmové jsou tyto detektory proto, že měří podstatnou část tepelného záření vyzařovaného tělesa v běžném teplotním rozsahu.



Obrázek 22 Princíp radiačního pyrometru s termočláňkovým čidlem, zdroj [16]

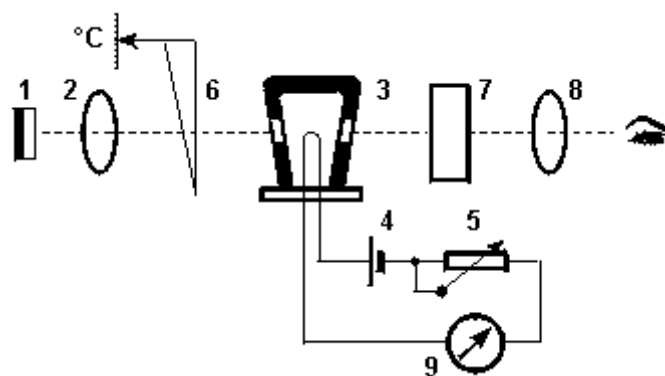


Obrázek 23 Blokové schéma radiačního pyrometru, zdroj [16]

### 3.3.2 Monokrystalické pyrometry

Nazývají se také úzkopásmové, protože pracují s úzkým pásmem vlnových délek. V přístroji je použitý pro vlnovou délku specifický detektor, který udává spektrální citlivost

zařízení. Například teploměr, který používá křemíkový detektor, bude mít vrchol citlivosti přibližně mezi  $0,9\mu\text{m}$  s horní mezí použití asi  $1,1\mu\text{m}$ . Toto zařízení se hodí pro měření teplot od  $600^\circ\text{C}$  do  $3000^\circ\text{C}$ . Úzkopásmové přístroje většinou používají pásmo menší než  $1\mu\text{m}$ . Využívají filtry, aby omezily svoji odezvu jen na selektovanou vlnovou délku. Selektivní filtry dosahují vyšší přesnosti zařízení. Do této skupiny pyrometrů můžeme zařadit i jasový pyrometr, u něhož se využívá k měření teploty úzkého spektrálního pásma v oblasti viditelného záření. Přístroj pracuje kompenzační měřicí metodou, u které se porovnává záře měřeného objektu se září srovnávacího zdroje při určité vlnové délce, vymezené barevným filtrem.



Obrázek 24 Obrázek 24 Jasový pyrometr: 1 – měřený objekt, 2 – objektiv, 3 – pyrometrická žárovka, 4 – baterie, 5 – reostat, 6 – šedý klín (funkce měřené teploty), 7 – červený filtr, 8 – okulár, 9 – měřicí přístroj, zdroj [16]

### 3.3.3 Dvoubarevné pyrometry (poměrové)

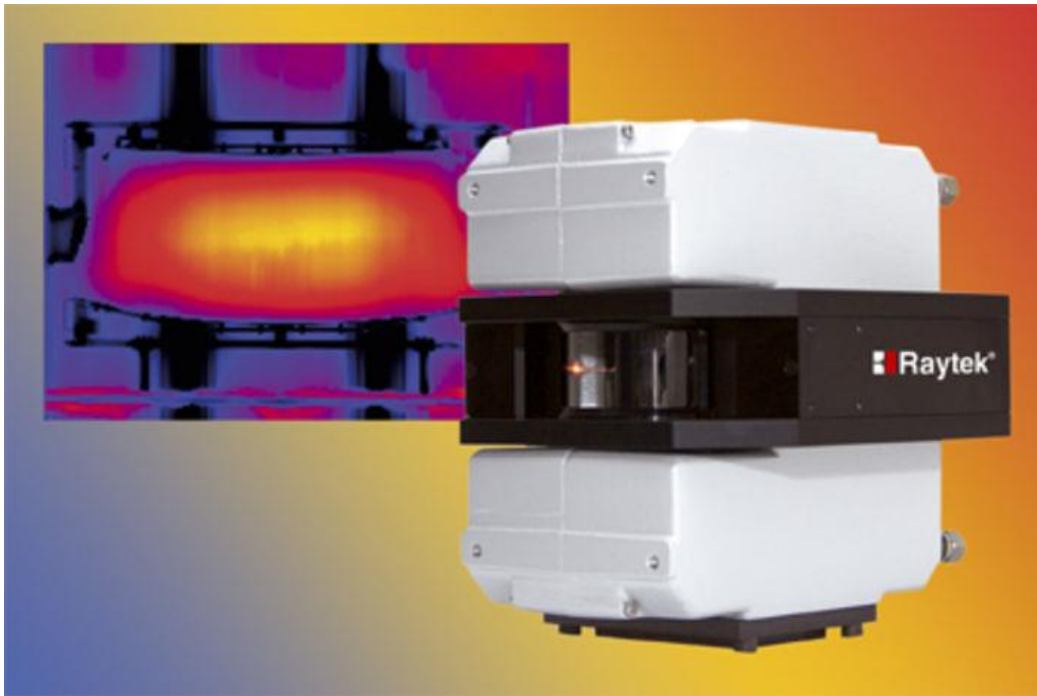
Dvoubarevné snímače byly vyvinuty a zkonstruovány jako snímače nezávislé na emisivitě měřených povrchů. Dvoubarevné jsou někdy též nazývané jako poměrové, které měří energii vyzařovanou objektem na dvou úzkých pásmech vlnových délek a vypočítají poměr těchto energií, který je funkcí teploty objektu. Název dvoubarevné pyrometry vychází z toho, že dvě vlnové délky odpovídají dvěma různým barvám ve viditelném spektru. Nezávislost na emisivitě je obrovskou výhodou. Při měření teploty materiálu, u kterého se při měření emisivita mění nebo dokonce ani není známa, je použití dvoubarevného pyrometru obrovskou výhodou. Nejčastější použití tohoto pyrometru je ve sklářském průmyslu, v hutním průmyslu, ve vysokoteplotních pecích a aplikacích. Další využití je tam, kde se nachází velké množství páry a kouře.



Obrázek 25 Poměrový pyrometr R1 fibropti, zdroj [17]

### 3.3.4 Linescanner

Tento přístroj [18] je naprostý TOP v oboru měření teploty. Používá se ve vysoce náročných průmyslových prostředích. Poskytuje přesné obrazy teplot pohybujících se objektů. Ke svému měření využívá rotační vícebodový optický systém, který shromažďuje infračervené záření v zorném poli o 90 stupních až v 1024 bodech. Systém dokáže skenovat rychlostí až 150 řádků za 1 sekundu. Vnitřní vysokorychlostní mikroprocesor vypočítává teplotu jednotlivých měřicích bodů každého řádku. Vše dokáže zpracovávat v reálném čase.



Obrázek 26 Linescanner MP150 zdroj [18]

### 3.4 Srovnání teplotních čipů

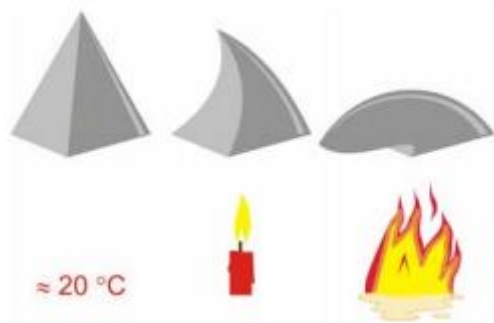
Jak je již zmíněno výše, různé prostředí, podmínky a měřené předměty vyžadují odlišný postup měření. Pyrometrická čidla se liší svými vlastnostmi a také pro různé aplikace jsou obvyklé jiné měřené vlnové délky. Na různých vlnových délkách mají tělesa také různou emisivitu. Vždy je vhodné použít takové spektrální pásmo, na kterém bude emisivita povrchu předmětu co největší. Vhodnost použití jednotlivých čidel dle vlnových délek si přiblížíme následující tabulkou.

**Tabulka 5 Klady a zápory teplotních čidel**

<u>Typ přístroje</u>	<u>Klady</u>	<u>Zápory</u>
Infračervený termočlánek	Levný Samonapájecí Bez posunu měření Vnitřní bezpečnost Dosažení obtížně dostupných oblastí	Nelineární výstup Ovlivnění elektromagnetickou interferencí
Termometr pro dlouhé vlnové délky	Přenosný a praktický Levný od 5000 Kč Vhodný pro údržbu	Použití limituje maximální délka kabelu sondy 1m
Termometr pro krátké vlnové délky	Snadné zaměření cíle Mobilní Nízká až střední cena od 7000 Kč	Měří pouze fixní oblast na měřeném objektu Přesnost je ovlivněna kouřem, prachem apod. Ovlivnění elektromagnetickou interferencí
Vláknová optika	Práce v nepříznivých podmínkách, vysokoteplotním prostředí, vakuu nebo v nepřístupných lokalizacích. Může obejít překážky k dosažení cíle. Není ovlivněn elektromagnetickou interferencí.	Cena 30000 – 50000 Kč Fixní zaostření
Dvoubarevný pyrometr	Měří skrze prach, kouř a další znečištění prostředí Nezávislý na emisivitě měřeného objektu	Vyšší cena 70 000 Kč jen čidlo, 100 000 Kč display a ovládací zařízení
linescanner	Provádí měření na celé šíři Kontinuální měření pohybujícího se objektu Počítač poskytuje termografické obrazy	Vysoká cena od 200 000 Kč jen čidlo, cca 1 000 000 komplet systém

### 3.4.1 Keramická žároměrka

Pro zajímavost si dovoluji zmínit i keramickou žároměrku [19], protože je to velmi specifický a zajímavý indikátor teploty. Její hlavní nevýhodou je jednorázové použití. Její historie se odvíjí od 12. století z oblasti Číny, kde čínští řemeslníci je využívali při vypalování z hlíny. Princip žároměrky vychází z jejího tvaru. Je to jehlan, kterému se se zvyšující se teplotou ohýbá špička až k jeho podložce. Protože tento jehlan má přesně definovanou teplotu, při které dochází k ohybu špičky, lze tím přesně určit teplotu. Teplotní rozsah je od 650°C do 2000°C. Největší využití zůstalo vesměs stejné – vypalování v keramických pecích.



Obrázek 27 Princip funkce žároměrky, zdroj [19]

### 3.5 Kalibrace

Po shrnutí veškerých možných detektorů z předešlých kapitol je vidět, že je skutečně z čeho vybírat. Ať už si ale vybereme ten nejlevnější detektor nebo detektor třeba za statisíce, je vždy třeba myslet na jednu věc, kterou mají všechny tyto detektory společnou. Pro to, aby správně fungovaly, musí být vždy správně kalibrovány. Individuální kalibrace měřících přístrojů se řadí mezi základní bloky před samotným měřením. Provádí se kvůli rozdílům ve vlastnostech materiálů použitých v konstrukcích radiačních teploměrů. Kalibrace je důležitá k dosažení velké přesnosti měření. Pro jiná, než jen orientační měření, jsou důležité pravidelné kalibrace [14], přičemž trvalá přesnost bezdotykových teplotních čidel závisí na způsobu jejich provedení či četnosti a také na rychlosti driftu celého systému. U kontaktních měřících zařízení je snadnější zajištění absolutní přesnosti, protože zde není brána v úvahu emisivita těles.

Nabízejí se nám tři různé metody, jak kalibrovat průmyslové radiační teploměry.

#### 3.5.1 Simulátor absolutně černého tělesa

První metoda spočívá v použití simulátoru absolutně černého tělesa. Emisivita vnitřku dutiny je známá, nebo se dostatečně blíží hodnotě jedna a referenční termočlánek musí mít stejnou teplotu, jako dutina. Kalibrace na principu absolutně černého tělesa je složena z vyhřívání dutiny s malým otvorem, kterým je vidět dovnitř. Tento model simulátoru absolutně černého tělesa je zobrazen níže na obrázku. Aby dutina pracovala správně, musí být izotermická. K dosažení izotermického prostředí obklopující dutinu se používají obvykle následující materiály:

- Lázeň s promíchávanou vodou pro teploty 30-100°C



- Hliníkové jádro pro teploty 50-400°C
- Ocelové jádro pro teploty 350-1000°C

Tyto dutin jsou většinou ale drahé a těžké. Docela dlouho trvá, než dosáhnout požadované tepelné rovnováhy, což má za následek zpomalení procesu kalibrace.



Obrázek 28 Simulátor černého tělesa, zdroj [20]

### 3.5.2 Žárovky s wolframovým vláknem

Za druhé, jako reference pro vyšší teploty se musí použít kalibrované wolframové lampy. Wolframové páskové lampy jsou zdrojem vysoce reprodukovatelného záření a jsou přesně kalibrovány na teploty v rozsahu 800-2300°C. Jdou okamžitě a přesně nastavit a mohou pracovat na vyšších teplotách, než většina dutin. Lampy musí být kalibrovány podle standardů simulujících absolutně černá tělesa. Pracují na principu vztahu mezi elektrickým proudem procházejícího vláknem a jeho teplotou. Emisivita se pohybuje v závislosti na teplotě a vlnové délce, avšak wolfram je tak moc známý materiál, že lze konvertovat zdánlivou teplotu na skutečnou.

### 3.5.3 Referenční pyrometr

Jako třetí řešení při kalibraci bezdotykového měřidla lze využít referenční pyrometr. V tomto případě se sekundární standardní kalibrace srovnává s výstupem primárního pyrometru a sekundárního pyrometru, přičemž oba přístroje jsou střídavě namířeny na jedinou wolframovou lampu. Takto se eliminuje mnoho systematických chyb a tento způsob je v praxi výhodnější.

## 3.6 Chyby a nejistoty bezdotykového měření

Ať už si pro svoji práci vybereme jakýkoli teplotní čip a máme ho dobře zkalibrovaný, pořád nemusí být naše měření přesné nebo dokonce můžeme získávat hodnoty naprosto bezúčelné. Čím jsou tyto chyby způsobené [14]?

### 3.6.1 Neznalost správné hodnoty emisivity povrchu tělesa

Důkladné seznámení s pojmem emisivity najdeme na začátku této práce v teorii, kde najdeme i zmínku o tom, proč je tak důležitá. Nastavení špatné emisivity patří k nejčastějším příčinám vzniku chyb při měření. Emisivitu měřeného objektu můžeme zjistit dle několika metod.

- Vyhledáme emisivitu v tabulkách vlastností materiálů

Příklad tabulky emisivit též nalezneme v teoretické části této práce. V lepších tabulkách lze najít i pásmo vlnových délek, na kterém je předepsaná emisivita konstantní a to velmi pomáhá při vhodné volbě pyrometru. Takto zvolenou emisivitu je třeba brát s velkou rezervou, protože skutečná emisivita daného povrchu v daný čas na daném místě může být ovlivněna spoustu faktory (obrobení povrchu, broušení, frézování, leštění). Obzvláště u kovů by hodnoty emisivity brány z tabulky měly být pouze orientační.

- Vzorek ohřejeme na známou teplotu

Když ohřejeme vzorek nebo celé těleso na předem známou teplotu, můžeme pak na pyrometru měnit hodnotu emisivity tak dlouho, dokud se nám správně nezobrazí teplota, na kterou jsme vzorek ohřáli.

- Použijeme dodatečný materiál nebo speciální nátěr

Tento způsob metody zjištění emisivity lze uplatnit při měření v nízkých teplotách cca 250°C a spočívá v tom, že na měřený materiál se nalepí speciální páska se známou emisivitou nebo se vzorek natře barvou taktéž se známou emisivitou. Tyto pásky, či barvy dodávají přímo

výrobci měřících zařízení, pracujících s emisivitou. Pyrometrem se pak změří teplota samolepky či barvy a pak se nastavuje emisivita měřeného objektu tak, aby změřená teplota odpovídala teplotě samolepky. Tato metoda lze použít na všechny měřené objekty, kde je možnost instalace samolepky či barvy, které mají emisivitu kolem 0,95.

### 3.6.2 Chyba v neznalosti propustnosti prostředí

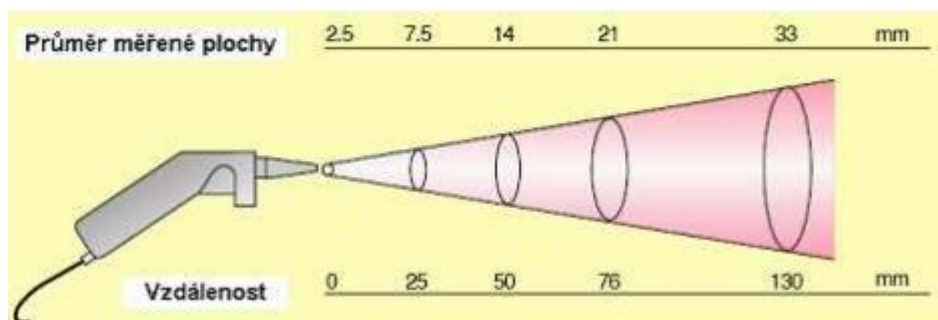
Další chybou, které se lze dopustit je zanedbání transparence prostředí, ve kterém měříme. Tato chyba se projevuje hlavně při měření na větší vzdálenosti. Zeslabení zářivého toku při průchodu atmosférou může být způsobeno jednak přímou absorpcí a jednak rozptylem infračerveného záření na molekulách plynu, aerosolech, kapkách vody, částicích kouře atd. Na snižování transparence atmosféry se podílí zejména molekuly H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, CH<sub>4</sub> a CO, které vymezují ve spektrální závislosti součinitele propustnosti.

### 3.6.3 Nepřesná korekce odraženého záření z okolí

Teplota okolí ovlivňuje velikost detekovaného infra signálu a zároveň i jeho kolísání. Okolní zdroje infračerveného záření mohou velice zkreslit či úplně znemožnit měření požadovaného objektu. Tento případ nastal v mé bakalářské práci, a tudíž znemožnil použití termokamery na detekci horkoběžnosti železničního dvojkolí. Při měření pohybujícího se objektu je také třeba brát v úvahu proudění vzduchu, který může povrch daného materiálu značně ochlazovat.

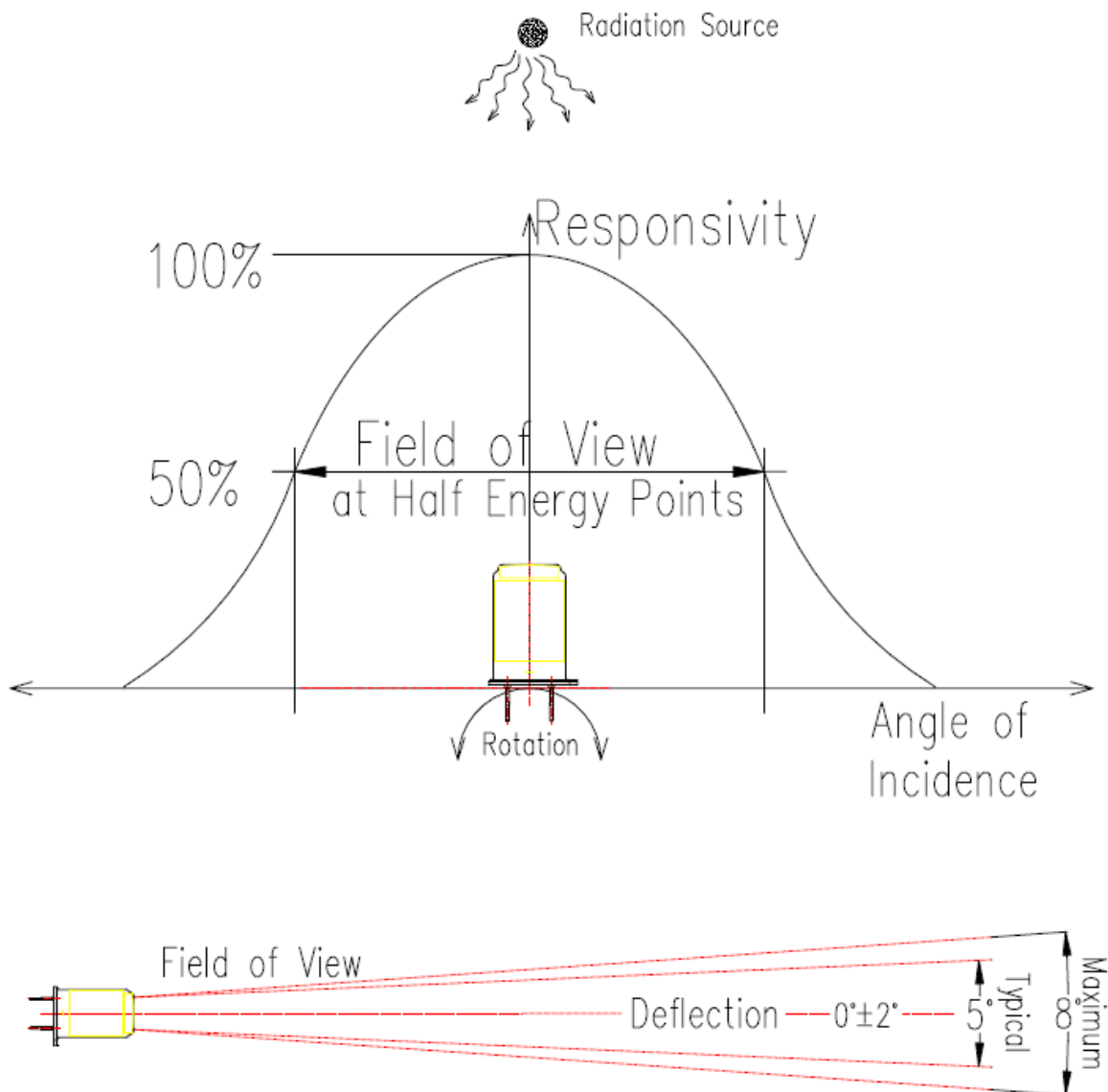
### 3.6.4 Špatné zaměření měřeného objektu

Před měřením objektu je třeba zjistit, jakým způsobem pyrometr snímá plochu objektu. Ve většině případů je snímání energie z měřené plochy kruhové, které je soustředěno na detektor. Měřený objekt proto musí úplně vyplňovat tuto měřenou plochu, aby se do snímání neprojevila i teplota z pozadí okolních ploch.



Obrázek 29 Optický diagram, zdroj [14]

U našich čipů, které jsme si pro náš výzkum vybrali, se tento jev nazývá „field of view“ neboli zorné pole a graficky je znázorněno takto:



Obrázek 30 Zorné pole čipu, zdroj [14]

## 4 Cíle projektu

Nyní bychom se měli vrátit k tomu, proč vlastně tento projekt vznikl a stanovit se jeho cíl. Cílem celého projektu je navržení dynamického bezkontaktního systému pro detekci přehřátí ložiskové skříně jedoucího vlaku. Systém bude detekovat blížící se vlak, čímž zahájí měření jednotlivých ložiskových skříní pomocí infračerveného záření. Naměřená data budou odesílána vybaveným radiokomunikačním zařízením na centrálu k analýze. Tento systém se bude lišit od existujících přístrojů jeho jednoduchou instalací a možnosti relokace podle potřeb. Celý projekt bude sestávat z několika vývojových etap. V každé etapě bude vývoj zaměřen na určitou část měřicího zařízení, která bude doprovázena podrobným testováním a ověřením funkčnosti. Výstupem každé etapy bude detailní report, jehož obsahem budou výsledky a charakteristiky daných měření.

Cílem této diplomové práce je navrhnout infračervenou řídicí jednotku, která bude horkoběžné železniční dvojkolí efektivně detekovat a předcházet tak případným škodám.

### 4.1 Etapy projektu a jejich cíle

#### 4.1.1 Měřicí část

*Návrh IR měřicí jednotky* - V této prvotní fázi bude předmětem sestavení IR senzoru, který bude umožňovat měření teploty objektu nacházejícího se před senzorem. Důraz bude kladen na vysokou vzorkovací frekvenci a přesnost v rozsahu jednotek stupňů celsia. Návrh bude spočívat ve výběru vhodného IR detektoru, optiky a měřicích prvků. Výstupní signál této soustavy bude přiveden do procesoru, kde bude zpracován a bude poskytovat informace o teplotě pro nadřazené funkční jednotky.

*Návrh hlavní řídicí jednotky* - Smyslem této etapy je navrhnout mobilní jednotku, která bude za pomoci “*IR měřicích jednotek*” umožňovat detekovat, změřit a uložit teploty ložiskových skříní. Výzkum se bude zaměřovat zejména na možnosti přenositelnosti jednotky, aby instalace nevyžadovala zdlouhavé přípravy a přesné zaměřování. Při projíždějícím vlaku provede jednotka měření, zaznamená teploty ložiskových skříní a ostatní nežádoucí teploty eliminuje. Pro správné určení kritické teplotní hranice bude jednotka uvažovat i teplotu okolí. Výstupem budou data o naměřených hodnotách, která budou poskytována komunikační jednotce a také po určitou dobu archivována.

#### 4.1.2 Komunikační část

Návrh GPS (Galileo) jednotky - Jelikož stanice budou navrhovány jako přenosné, je vhodné znát jejich polohu. GPS jednotka bude tedy sloužit pro určení polohy měřicí stanice. V případě detekování překročení teploty bude pak snadno dohledatelné v jakém místě a tedy i u kterého vlaku k záznamu došlo.

Návrh komunikační jednotky - Jedná se o prvek, který bude sloužit k přenesení informací do řídicího centra a to přes síť internet pomocí mobilního operátora. Jednotka bude získávat informace o teplotě a času z hlavní řídicí jednotky a souřadnicích z GPS jednotky. Tyto informace bude následně odesílat do řídicího centra, kde budou data zpracována.

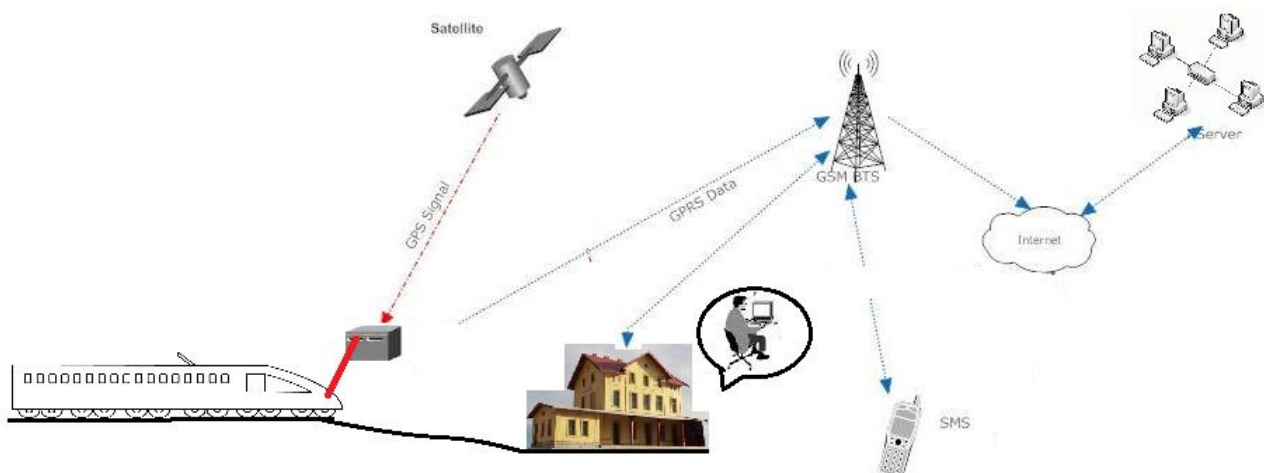
Dokončení stanice - Touto etapou se rozumí zkompletování celé měřicí stanice sestávající z jednotek uvedených výše. Dále pak analýzou a testováním komunikace mezi jednotkami, zkoumáním vlivů počasí na měřicí soustavu, monitorováním spotřeby, přidáním dalších sensorů, sloužících pro “probuzení” soustavy z režimu snížené spotřeby při blížícím se vlaku a nakonec ověřením, zda stanice dokáže bezproblémově samostatně pracovat po delší dobu.

#### 4.1.3 Serverová část

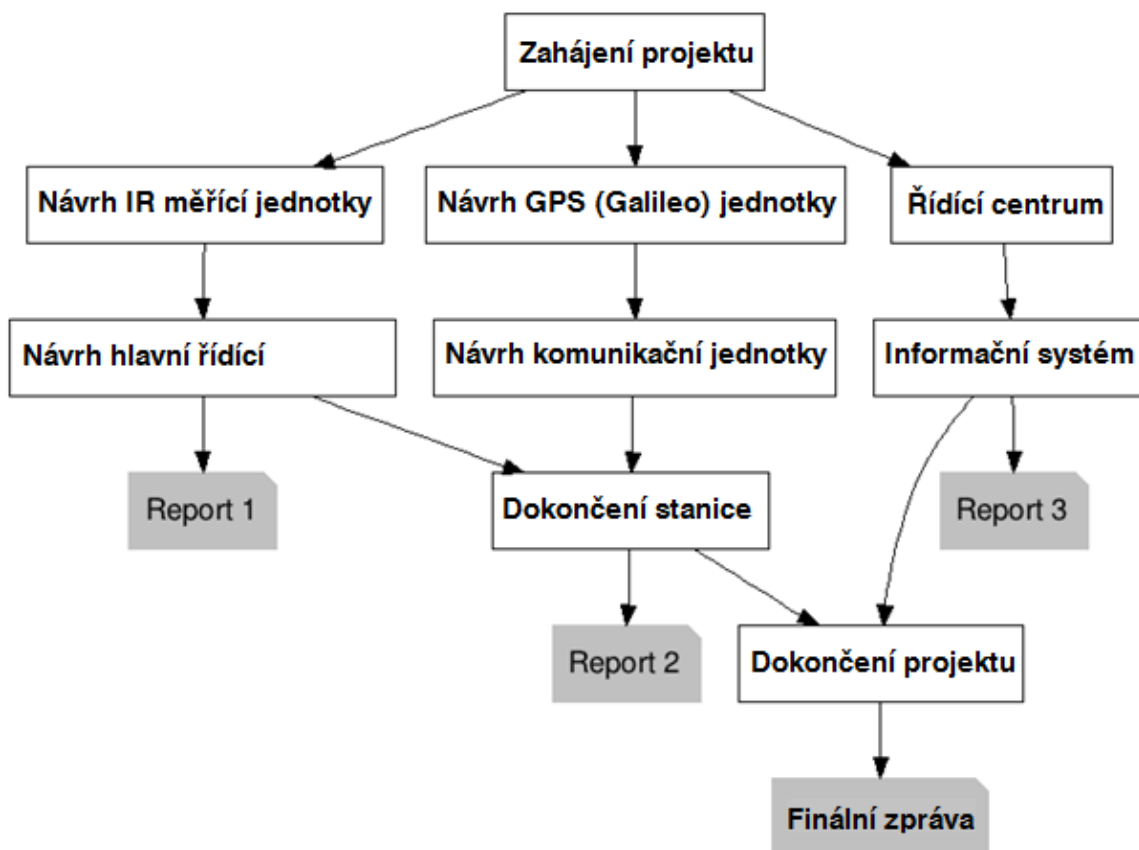
Řídicí centrum - Účelem centra bude přijímat data z jednotlivých měřících stanic a následně je vyhodnocovat. Vývoj bude zaměřen zejména na software, který bude dané vyhodnocení provádět. Software bude disponovat uživatelským rozhraním, kde bude možno dohledat kterýkoliv měřený vlak a získat informace o naměřených teplotách. V případě záznamu o překročení kritické teploty se provede okamžité vyhodnocení a bude informován uživatel.

Informační systém - Tato etapa bude zaměřena na nástavbový vývoj software, sloužícího k co nejrychlejšímu informování uživatele o překročení hraniční teploty. Tím se rozumí dle polohy měřicí stanice, která překročení teploty zaznamenala, a času, ve kterém k záznamu došlo, software vyhledá příslušný vlak a pošle varování do nejbližší stanice.

Všechny výše uvedené vývojové etapy jsou pouze teoretické. Jednotlivé fáze vývoje mohou být modifikovány na základě dohody se zákazníkem.



Obrázek 31 obrázkový princip systém



Obrázek 32 Blokové schéma projektu

## 5 Návrh IR řídicí jednotky

V první řadě si musíme vybrat vhodný infračervený teploměr, který bude umožňovat měření teploty objektu nacházejícího se před ním. Největší důraz při jeho výběru bude kladen hlavně na jeho rychlost a přesnost. Když se zúží seznam možných kandidátů pro danou aplikaci, je ještě třeba zvážit i ostatní okolnosti, jako je spektrální citlivost detektoru, propustnost optického systému a propustnost atmosféry mezi přístrojem a měřeným objektem, emisivitu měřeného objektu a dynamiku procesu.

Zhodnocení:

- Propustnost atmosféry

Naše zařízení by mělo měřit na krátké vzdálenosti maximálně 1 metr od detekovaného objektu. V této vzdálenosti je zanedbatelný vliv atmosféry a ani se nepředpokládá žádný velký vliv jiných plynů, par a kouře, které by měření měly ovlivnit. Jediným činitelem ovlivňující měření bude velmi husté sněžení, či hustý déšť.

- Materiál měřeného objektu

Předpokládáme, že ložiskové skříně jsou vyrobeny z kvalitních ocelí, které však mohou být opatřeny určitými druhy antikoročních nátěrů. Emisivitu těchto povrchů bude zapotřebí zjistit ve spolupráci s železničními dopravci. Tento průzkum se zajistí, až bude zařízení spolehlivě měřit teplotu na objektu pohybujícího se vysokou rychlostí.

- Teplotní rozsah

Momentálně není předpoklad, že by měl přístroj měřit velmi nízké nebo naopak velmi vysoké teploty. Ideální případ pro měření v našich klimatických podmínkách je pro měření od  $-50^{\circ}\text{C}$  až  $200^{\circ}\text{C}$ .

- Pracovní prostředí

Předpokládané umístění zařízení je u hlavních koridorů železničních tratí, tudíž by měl přístroj odolat všem venkovním vlivům působících v naší oblasti. U termometrů může být k ochraně optiky a k udržení čistého zorného pole použit tubus s uzavřeným koncem. Zatímco na jednom konci tubusu se načítá teplota měřeného objektu, na opačném konci tubusu je termometr pomocí chlazení chráněn před vlivem vysokých teplot. Tubusy s uzavřeným nebo otevřeným koncem zabraňují snížení emitované radiace, ke kterému by došlo vlivem přítomnosti vodních par, prachu, kouře, páry a jiných plynů v prostředí. V jiných případech je



nutné měřit teplotu objektu skrze sklo. Celý systém by měl být zakomponován v bytelném vodotěsném pouzdře.

V předchozích kapitolách jsme již srovnávali velké množství přístrojů, které jsou bezdotykově schopny zaměřit teplotu požadovaných objektů, problém je však buď v jejich rychlosti, nebo v ceně. Naše zařízení kromě toho, že by mělo být plně mobilní, tak by také mělo být cenově dostupné. Abychom splnili všechny předpoklady, vydali jsme se cestou vlastního výzkumu, a proto si vybíráme takovou metodu, ve které se zařízení budeme snažit postavit celé, z jednotlivých na trhu dostupných součástek. Nejdůležitější a také tou hlavní součástí toho systému je samozřejmě vhodný IR čip. Po důkladném prozkoumání aktuálního trhu jsme objevili dvě světové firmy, které dodávají své teplotní čipy snad do veškeré měřicí techniky na světě. Jedná se o firmu Melexis a firmu Hamamatsu.

Firma Melexis je akciovou společností vzniklou na trhu v Belgii od roku 1988. Zabývá se hlavně výrobou mikroelektroniky a integrovaných obvodů. Většina integrovaných obvodů je určena pro automobilový průmysl. Melexis úzce spolupracuje s firmou X-FAB vyrábějící polovodičové součástky a integrované obvody pro automobilový, letecký a další průmysl.

Firma Hamamatsu se objevila na trhu v Japonsku již v roce 1926. Tehdy se týmu profesora Kenjiro Takayanagi podařilo produkovat japonský znak na první elektronické televizní obrazovky na světě. V historii se díky tomuto objevu a rozvoji fotoniky začalo říkat „století světla“. V dnešní době se tato společnost zabývá vývojem mikroelektronických součástek do zařízení z celého světa.

## **5.1 Verze Melexis**

### **5.1.1 Konstrukce MLX 90614**

V první etapě výzkumu jsme zvolili čip od firmy Melexis, protože tyto čipy jsou již vybaveny vlastním procesorem a optikou. To by nám hodně usnadnilo práci, protože by pak stačilo čip už jen správně naprogramovat a připravit. Jako nejvhodnější verzi pro náš projekt jsme vybrali bolometrický čip MLX 90614.

MLX 90614 je infračervený teploměr pro bezkontaktní měření teploty. IR citlivý detektor a procesor pro zpracování jsou integrované v jedné součástce. Integrovaný je zde taky zesilovač, 17-bit ADC a výkonná DSP jednotka, čímž se dosáhne vysoké přesnosti a rozlišení teploměru. Teploměr přichází nakalibrován z továrny přes digitální výstup SM-bus, pomocí kterého je úplný přístup k naměřeným teplotám v kompletním rozsahu s přesností

0,02°C. Uživatel také může naprogramovat digitální výstup PWM. Standardně, 10-ti bitový PWM je nakonfigurován tak, aby nepřetržitě předával naměřené teploty v rozmezí od -20 do 120°C, s výstupním rozlišením 0,14°C.

#### **Vlastnosti a výhody:**

- Malé rozměry, nízká cena
- Snadná integrace
- Továrně kalibrován v širokém rozmezí teplot
- Vysoká přesnost 0,5°C v širokém rozsahu teplot
- Vysoká přesnost 0,1°C v omezeném rozsahu teplot
- Rozlišení měření 0,01°C
- SM-bus kompatibilní s digitálním rozhraním
- Přizpůsobitelný PWM výstup pro kontinuální čtení
- K dispozici 3V a 5V verze
- Jednoduché přizpůsobení pro 8V a 16V aplikace
- Režim úspory energie

V reportu od Melexisu [21] je napsáno, že jejich „Infrared Thermal Array Thermometer“ umí měřit s frekvencí až 64Hz. Nejsme si jisti, zda bude taková rychlost snímání dostatečná. To nás ovšem vede k nápadu, zda by bylo možné použít dva tyto čipy, které by byly vůči sobě v měření posunuté a půl fáze, čímž bychom dosáhli dvojnásobné frekvence 128Hz.

**PWM modulace**, je diskretní modulace pro přenos analogového signálu pomocí dvouhodnotového signálu. Signál se přenáší pomocí stříd. Tato modulace je často používána ve výkonové elektronice. Přenosový signál, který nese informaci o přenášené hodnotě, může nabývat hodnot 0 a 1. V těchto poměrech stavů je zakódována hodnota přenášeného signálu. Tento poměr je nazýván jako střída. Cyklus, kdy se přeneše jedna střída je nazýván jako perioda.

**Čtení pomocí PWM:** na výstup je vysílána pulzně šířková PWM modulace (Pulse Width Modulation). Dle střidy PWM lze vypočítat konkrétní hodnotu měřené teploty (viz. datasheet). Minimální možná perioda PWM lze nastavit na 1,024 ms. Čili když to shrneme, v režimu čtení teploty pomocí PWM, lze teplotu vyčíst každých 1,024ms (vzorkovací frekvence cca 1kHz). Otázkou zůstává, zda takhle rychle stihnou na změnu teploty reagovat

bolometrická čidla. Jelikož výrobce nabízí tuto rychlost vyčítání, předpokládáme, že čidla reagovat stihnou. Uvedené informace platí pro “single” mode. V režimu duálního čtení se perioda násobí dvakrát (frekvence jen cca 500Hz). Dále je možná rychlost vyčítání pomocí režimu “SMBus” sběrnice.

### **System Management Bus** (zkráceně SMBus) je

jednoduchá dvouvodičová sběrnice vyvinutá za účelem snadné komunikace. Nejčastěji ji můžeme nalézt na základních deskách počítače pro komunikaci se zdrojem napájení instrukcí ON/OFF. Je odvozena ze sběrnice I<sup>2</sup>C pro komunikaci na základní desce se zařízením s malou šířkou pásma, a to zejména s čipy souvisejícími s napájením. Jiná zařízení mohou zahrnovat teplotní, ventilátorová nebo napěťová čidla a čipy hodin. K SMBus segmentu se mohou připojit PCI karty. Zařízení může poskytnout informace o výrobci, uvést typ modelu/číslo dílu, uložit svůj stav a pozastavit událost, hlásit různé typy chyb, přijímat regulační parametry a návratový stav. SMBus není obecně uživatelsky konfigurovatelné nebo přístupné.

**Čtení pomocí SMBus:** Používají se výstupy SDA (data) a SCL (hodiny). Pokud jsme dobře počítali, jedno vyčtení teploty z paměti vyžaduje komunikaci dlouhou zhruba 57 bitů. Maximální taktovací frekvence přenosu je 100kHz. Teoreticky tedy, při stoprocentním vytížení sběrnice, lze teplotu vyčítat cca každých 0,57ms (vzorkovací frekvence téměř 2 kHz). Otázkou opět zůstává, zda by takhle rychle stihly na změnu teploty reagovat čidla. Další nevýhodou může být, že při chybě v komunikaci je požadavek o vyčtení teploty opakován. To může narušit periodičnost vyčítání vzorků.

**Sleep mode:** Přejít do sleep módu se provede příkazem přes SMBus (doba trvání cca 0,3 ms). Probuzení proběhne buď resetem procesoru (data jsou k dispozici cca po 45 ms) nebo “Wake up” požadavkem přes SMBus. Minimální doba probuzení přes SMBus je 33ms. Data jsou v paměti k dispozici až za dalších 25ms (celková doba probuzení je tak min 58ms).

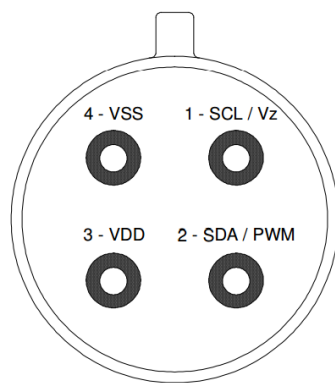
Myšlenka “použít dva čipy, které by byly posunuté o půl fáze, čímž bychom dosáhli dvojnásobné frekvence” by šla implementovat velmi těžko. V případě režimu SMBus, by každé čidlo muselo mít svou vlastní sběrnici, na kterou by byly exportovány změřená data, tzn. každé čidlo, aby mělo svůj procesor pro zpracování komunikace. Tento způsob komunikace bohužel nedokážeme tak přesně zesynchronizovat, např. kvůli neúplně stejné taktovací frekvenci. Při vyčítání pomocí PWM by posunout fázi teoreticky šlo, to bychom dokázali vyčítat jedním procesorem. Problém ale nastává, že probuzení a přepnutí do režimu PWM může být zatíženo malou chybou (např. kvůli nestejnému taktování signálů procesorů), což by nám časování mohlo rozhodit. Čidla by také musela být namířena úplně přesně do

jednoho bodu. Pro posunutí fáze o půlku by to znamenalo precizně nastavit časování (synchronizaci) čtení dat a směr paprsku, což by bylo velmi obtížně realizovatelné, pokud by to v praxi vůbec realizovatelné bylo.



Obrázek 33 MLX 90614, zdroj [21]

### 5.1.2 Zapojení MLX90614

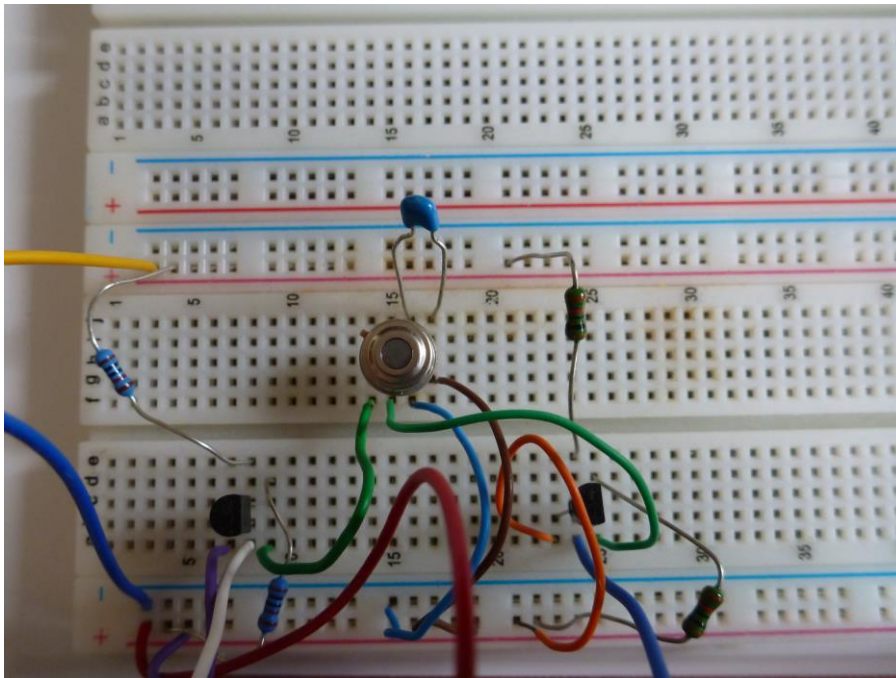


Obrázek 34 pohled ze spodu

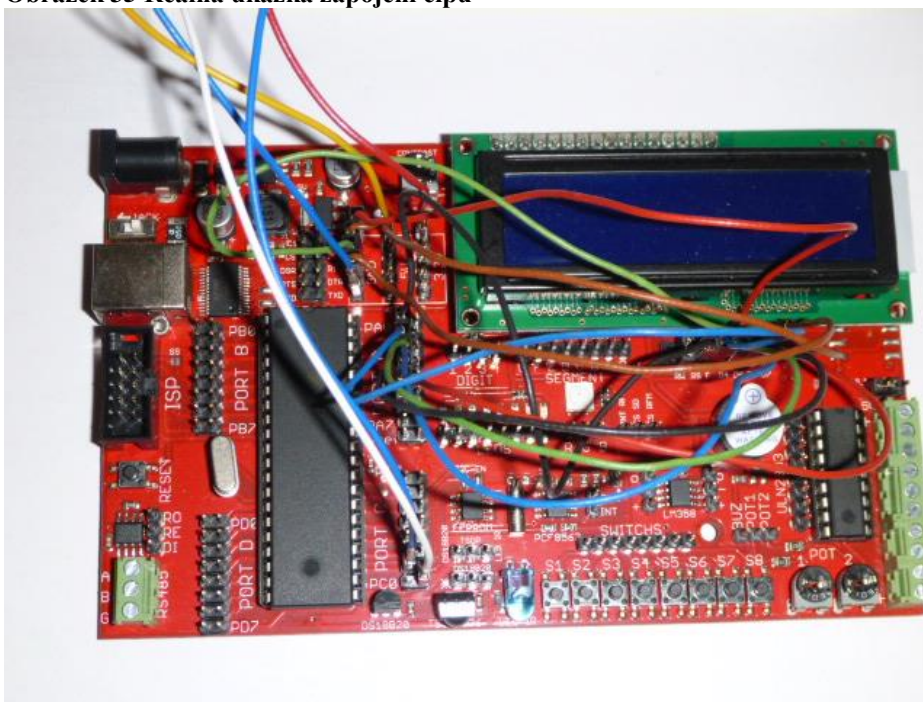
**Tabulka 6 popis pinů MLX 90614**

Jméno pinu	Funkce
SCL/ Vz	Sériový hodinový vstup pro dvousměrný komunikační protokol.
SDA/ PWM	Digitální vstup / výstup
VDD	Externí napájení
VSS	Zem.

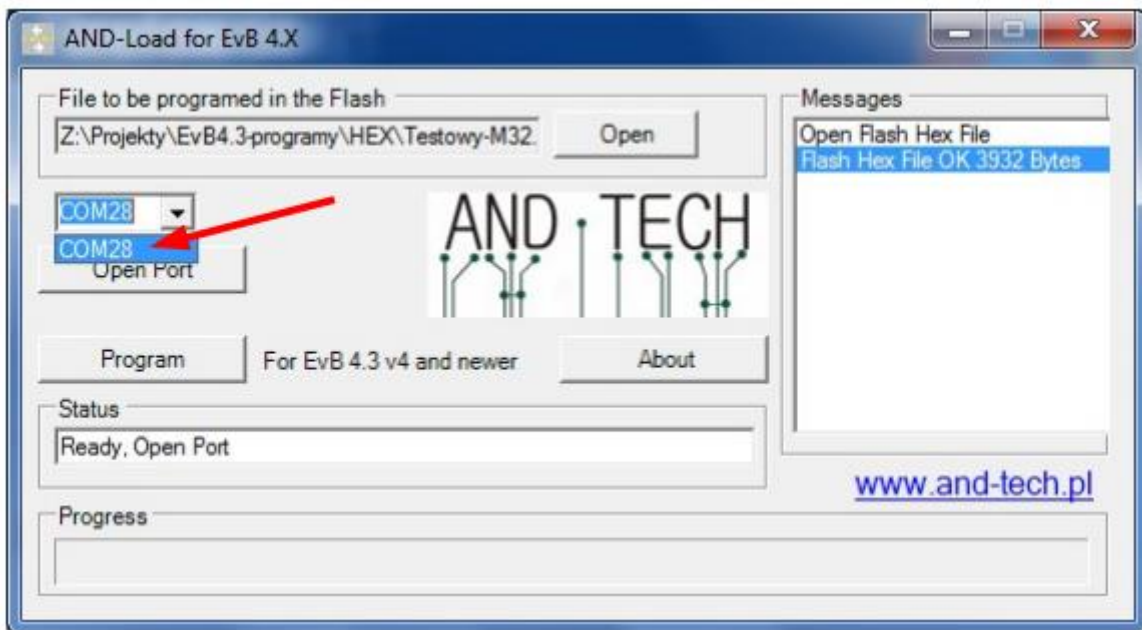
Abychom mohli vůbec čip zprovoznit, bylo potřeba ještě další techniky. Zakoupili jsme vývojový kit EvB 5.1 s mikrokontrolérem ATmega32, pomocí kterého jsme čip mohli řídit a zároveň z něho zobrazovat na LCD display aktuální změřené hodnoty. Tento mikrokontrolér lze naprogramovat pomocí stolního počítače přes USB vstup. Pro správnou činnost je třeba stáhnout a nainstalovat výrobcem doporučený program [22]. Po zprovoznění program je jen třeba nastavit správný COM port, kde je EvB připojen. Detailní popis připojení EvB mikrokontroleru k vlastnímu PC a komunikace s ním je ke stažení na stránkách výrobce [23].



Obrázek 35 Reálná ukázka zapojení čipu



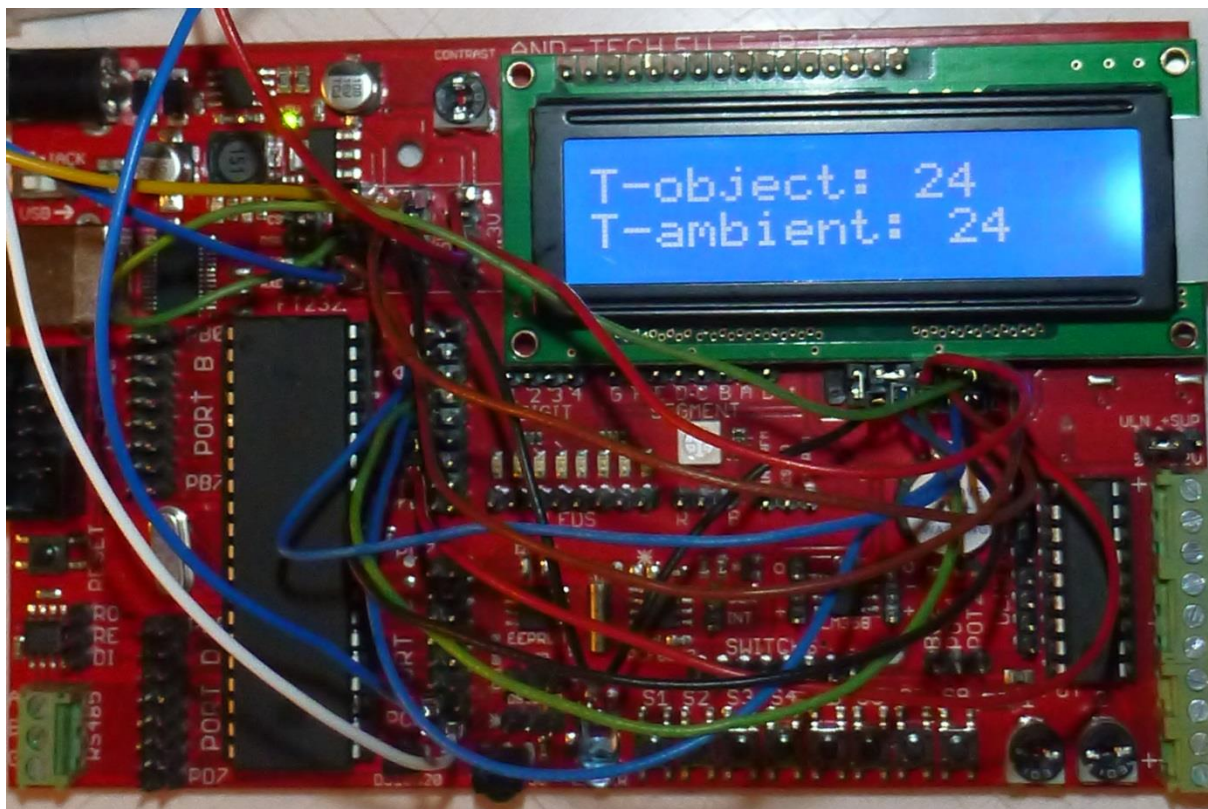
Obrázek 36 mikrokontroler EvB 5.1



Obrázek 37 připojení EvB

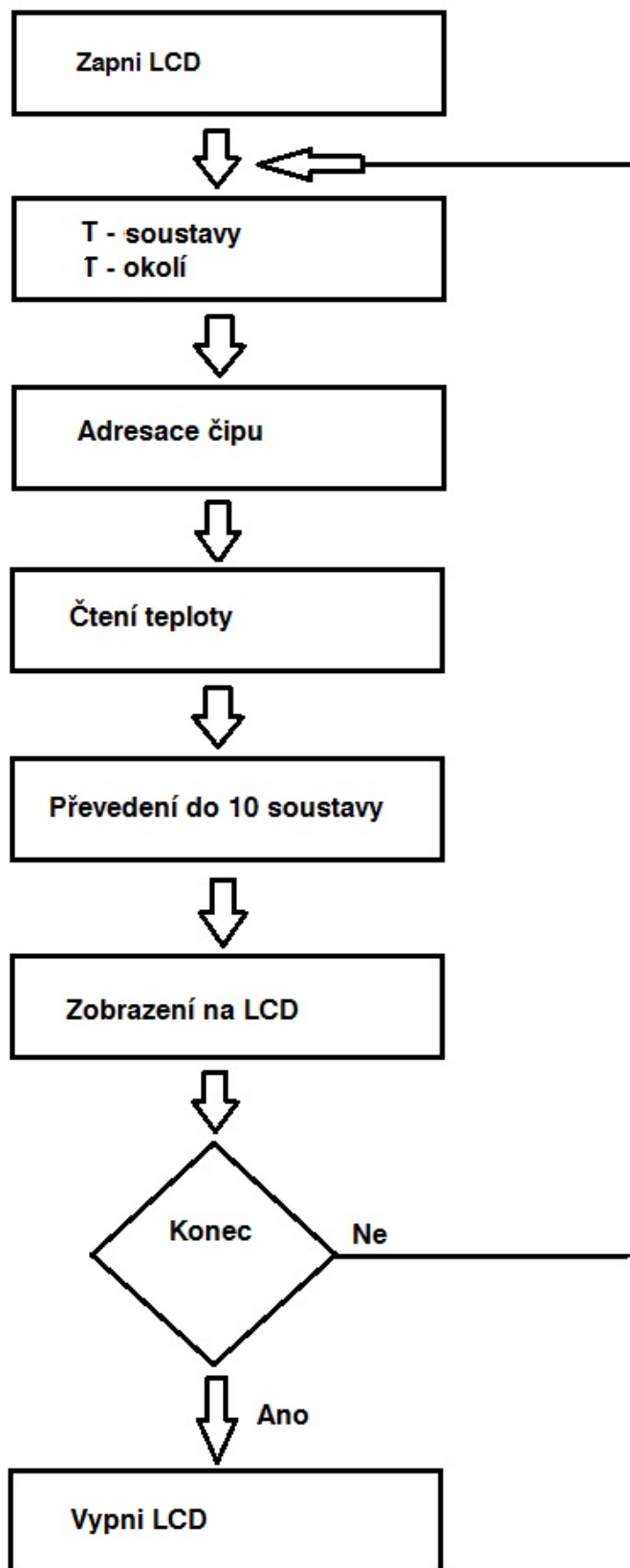
### 5.1.3 Programování

Dalším krokem k úspěšnému spuštění zakoupených komponentů je jim sdělit, co po nich chceme. Musíme je naprogramovat. Program jsme vytvořili v programu ARV-studio 5.6. Programování proběhlo pomocí literatury [24]. Úkolem programu měla být jeho jednoduchost, aby zbytečně neplnil paměť našeho procesoru a tím ho zbytečně nezpomaloval. Program byl vymyšlen jednoduše ale tak, aby nám poskytl informace, které jsme potřebovali. Program jsme nahráli do paměti procesoru ATMega, který máme osazený na našem mikrokontroleru. Po instalaci programu, již můžeme mikrokontroler odpojit od stolního počítače, protože je již schopen vlastního provozu. Na obrázku 39 je přiložené blokové schéma našeho programu a graficky zobrazeno, jakým způsobem funguje. Po přivedení napájení na mikrokontroler se zapne nahraný program který zapne display, zobrazí teplotu okolí, zjistí teplotu měřeného objektu, tedy zadresuje nainstalovaný čip, který zjistí teplotu měřeného objektu. Tato teplota se přečte a pomocí procesoru se převede do desítkové soustavy nastavené na stupně Celsia. Dále tuto hodnotu zobrazí na display. Program je udělán tak, aby fungoval cyklicky, tudíž aby neustále četl hodnotu teploty z čipu.



Obrázek 38 Spuštění display





Obrázek 39 Blokové schéma funkce programu

Celý program pro spuštění mikrokontroleru je uveden jako příloha této práce, zde je jen malá ukázka, jak takový program vypadá. Jelikož jsme se pustili do vytvoření celého systému úplně od základu, tak aby mohl čip správně komunikovat s mikrokontrolerem tak je zapotřebí jim sdělit, po jakých pinech a jakým způsobem mají vůbec komunikovat.

```
#ifndef DEFINICEFCI_H_
#define DEFINICEFCI_H_

#define PORT_DISP          PORTA
#define PODSVICENI        porta.bit0
#define RS                 porta.bit1
#define E                  porta.bit2
#define DB4                porta.bit3
#define DB5                porta.bit4
#define DB6                porta.bit5
#define DB7                porta.bit6

#define DDR_PORT_DISP     DDRA
#define DDR_PODSVICENI    ddra.bit0
#define DDR_RS            ddra.bit1
#define DDR_E             ddra.bit2
#define DDR_DB4           ddra.bit3
#define DDR_DB5           ddra.bit4
#define DDR_DB6           ddra.bit5
#define DDR_DB7           ddra.bit6

#define DDR_VYSL          ddrd.bit6
#define VYSL              portd.bit6
#define CASOVAC           pind.bit5

#define GEN_POLYNOM 0x107;

void TWI_start(void);
void TWI_repeated_start(void);
void TWI_init_master(void);
void TWI_write_address(unsigned char);
void TWI_read_address(unsigned char);
void TWI_write_data(unsigned char);
uint8_t TWI_read_data(void);
void TWI_stop(void);
uint8_t Update_CRC_8(uint8_t crc, uint8_t data);
uint16_t Object_temperature(uint8_t dataHB, uint8_t dataLB);

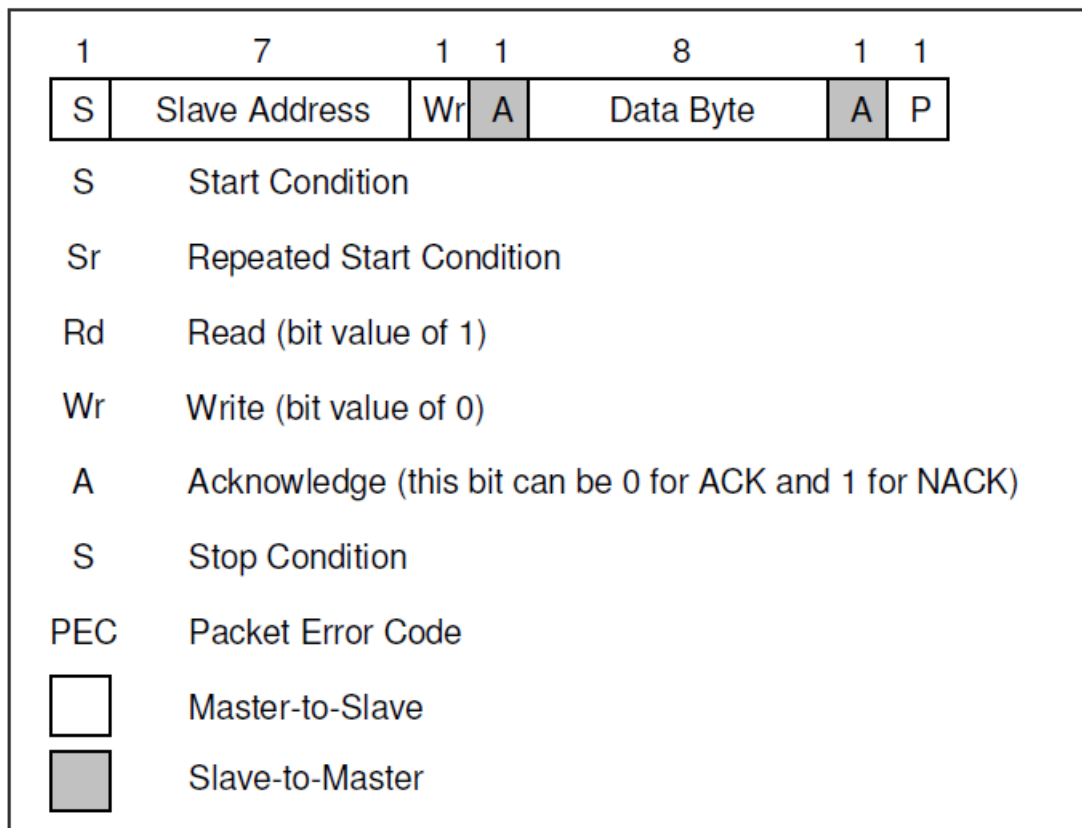
void Enable();
void Odeslat(unsigned char data, unsigned char typ);
void Smazat();
void Lcd_ini();
void Odestat_Retezec(char *retezec);
void Odeslat_Cislo(uint16_t cislo);
void Nastav_Kurzor(uint8_t misto, uint8_t radek);

#endif /* DEFINICEFCI_H_ */
```

Veškeré procesy vzájemné komunikace, jak, kde a co nadefinovat jsou zase popsány v knize [24]. Funkce a komunikace čipu s okolím je popsána v jeho datasheetu přímo od firmy Melexis.

RAM (32x17)		
Name	Address	Read access
Melexis reserved	0x00	Yes
...	...	...
Melexis reserved	0x03	Yes
Raw data IR channel 1	0x04	
Raw data IR channel 2	0x05	
T <sub>A</sub>	0x06	Yes
T <sub>OBJ1</sub>	0x07	Yes
T <sub>OBJ2</sub>	0x08	Yes
Melexis reserved	0x09	Yes
...	...	...
Melexis reserved	0x1F	Yes

Obrázek 40 Adresování paměti, zdroj [21]



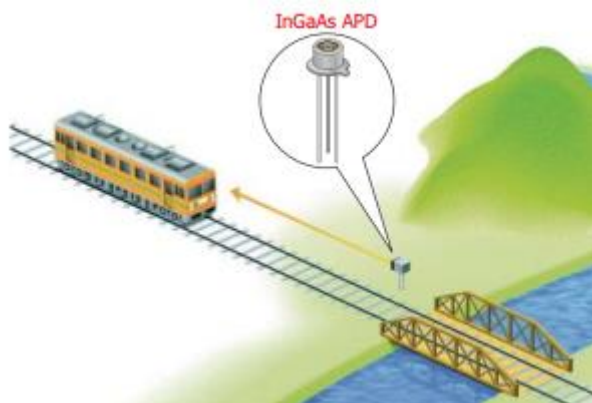
Obrázek 41 SMBus protokol, zdroj [21]

V této fázi vývoje je zařízení již zapojeno a naprogramováno a připraveno ke zkoušce funkčnosti.

## 5.2 Verze Hamamatsu

### 5.2.1 Konstrukce G12460-0606S

Ačkoliv verze od firmy Melexis je funkční, máme jisté obavy, zda zvládne snímat i vysoké rychlosti. Je to zapříčiněno hlavně funkcí, která je v datasheetu [25] popsána jako „chopper frequency“, což je takzvaný přerušovač, či rotující závěrka, která poskytuje střídavý výstup z čidla. Když se změní teplota měřeného objektu, nemusí detektor dosáhnout tepelné rovnováhy, protože odpovídá na změny dopadajícího záření. Přicházející záření musí být přerušováno a výstup detektoru se nemůže používat přímo. Relativně slabé střídavé signály jsou výhodněji zpracovávány měřicími obvody.



Obrázek 42 Detekce vlaku, zdroj [25]

Výrobce udává, že tento druh senzoru umí kromě teploty detekovat také velmi přesně a rychle i vzdálenost přibližujícího se objektu. To by mohlo vyřešit problém v dalším kroku tohoto vývoje, který se týče toho, jak udělat zařízení co nejefektivnější ve spotřebě energie. Jde o to, že když chceme udělat zařízení mobilní, tak by mělo být napájené z vlastního zdroje energie, který bude mít co nejdelší výdrž, tudíž by bylo vhodné, aby zařízení bylo zapnuté jen tehdy, když kolem pojede vlak. Je však třeba vyřešit problém s tím, jak přístroj pozná blížící se vlak, aby se systém pro detekci horkoběžnosti stačil zapnout.

Tento druh čipu jsme si vybrali díky jeho bezkonkurenčním vlastnostem a také díky naprosto variabilnímu naprogramování. Čipy od firmy Hamamatsu jsou totiž uzpůsobené tak, že nedisponují vlastním procesorem ani vlastním objektivem, tudíž ani přerušovačem. Vše se k tomu musí dodat variabilně dle potřeby využití.

- **Technické parametry**

Velikost pixelu: 50x50  $\mu\text{m}$

Frekvence snímkování: 1025 obrávků/s

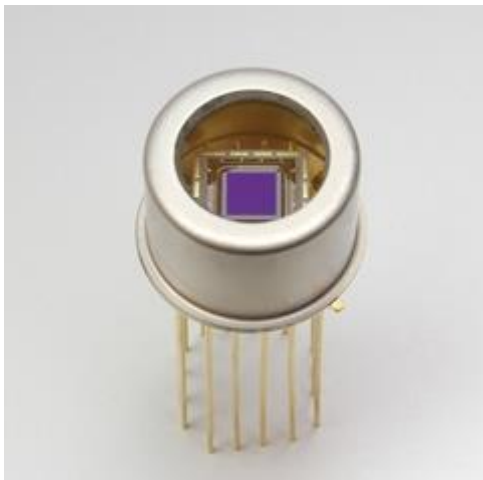
Spektrální rozsah: 1,1-1,9  $\mu\text{m}$

Vlastní chlazení

Nízké provozní náklady

- **Popis**

Snímač vyvinutý pro dvojrozměrné infračervené snímkování. Vyznačuje se hybridní strukturou sestavenou z obvodu CMOS a InGaAs fotodiody. Světlo dopadající na fotodiodu je převáděno na elektrický signál, který je pak vstupem pro ROIC. ROIC je integrovaný obvod v CMOS. Elektrické signály jsou v ROIC převedeny zesilovačem na napěťové signály a pak postupně zobrazeny z řádkového registru. Čip je hermeticky uzavřen v obalu společně s chladičem a tudíž má velmi stabilní provoz.



Obrázek 43 Senzor G12460-0606S, zdroj [25]

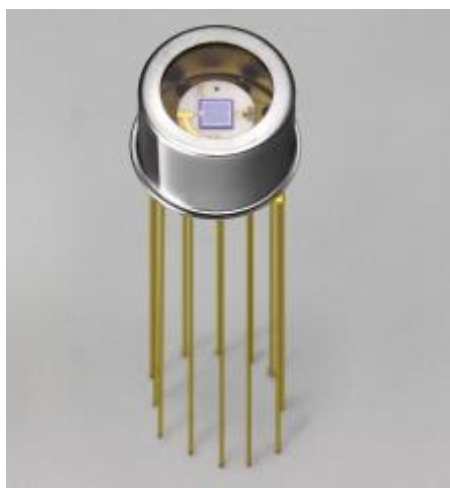
Jak je vidět z předešlého obrázku, tento druh čipu má již 16 pinů. To je oproti 4 pinu od Melexisu značný rozdíl a jeho zapojení a hlavně správné řízení bude velmi složité.

Pin no.	Name	Input/Output	Function	Remark
1	Vss	Input	0 V ground	0 V
2	Vdd	Input	+5 V supply voltage	5 V
3	MCLK	Input	Clock pulse for timing generator	Falling synchronous pulse
4	AD_TRIG	Output	Signal for A/D sampling	Falling synchronous pulse
5	MSP	Input	Clock pulse for flame scan start	
6	NC	-	-	
7	NC	-	-	
8	Vdd	Input	+5 V supply voltage	5 V
9	PD_bias	Input	Photodiode bias voltage	4.5 V
10	Vb1	Output	Pixel bias voltage	1.27 V
11	NC	-	-	
12	VIDEO	Output	Video output	1.2 to 3.2 V
13	TE (-)	Input	TE-cooler (-)	
14	THERM	Output	Thermistor	
15	THERM	Output	Thermistor	
16	TE (+)	Input	TE-cooler (+)	

Obrázek 44 Pipis pinů pro správné zapojení zdroj [25]

### 5.2.2 Konstrukce dvoubarevného detektoru K3413-09

Dalším vhodným adeptem na testování v našem projektu by mohl být tento dvoubarevný sensor. Dvoubarevné sensory jsou popsány v kapitole rozdělení IR čipů. Jeho největší výhodou oproti všem ostatním čipům by byla jeho nezávislost na znalosti emisivity měřeného povrchu. Sensor je vybaven snímačem se širokou spektrální odezvou od UV oblasti do IR oblasti. Je to též hybridní detektor obsahující infračervený přenos křemíkové fotodiody, která je namontována nad fotodiodou InGaAs a mají stejnou optickou osu. Toto sestavení poskytuje širokou spektrální odezvu od 0,25 $\mu$ m do 1,7 $\mu$ m. Integrovaný termoelektrický chladič udržuje konstantní teplotu, což umožňuje přesné měření. Otázkou však zůstává, jak to bude s rychlostí toho čipu, protože v jeho datasheetu se rychlost jeho snímání neuvádí.



Obrázek 45 Dvoubarevný detektor K3413-09 , zdroj [25]

## 6 Testování zařízení a závěr

### 6.1 Testování MLX 90614

Po sestavení všech částí a propojení všech drátů a po nahrání programu do paměti mikrokontroleru můžeme sestavu zapnout a otestovat její reakce na teplotu okolí.

#### Seznam použitých dílů:

- Vývojový kit EvB 5.1
- Mikrokontroler ATmega 32
- Nepájivé pole
- Čip MLX 90614
- Propojky do nepájivého pole
- Napájecí zdroj 12V
- Digitální teploměr Emos – E0114 rozsah 0-50°C
- Kovový model vozu BMW

Testovací zařízení zatím není vyvinuté do takové fáze, aby mohlo být odzkoušeno v reálném provozu. Pro otestování, zda je vše sestavené a naprogramované správně nám však stačí domácí podmínky a digitální teploměr pro kontrolu zjištěných teplot. Test byl prováděn při pokojové teplotě, kterou nám digitální teploměr zjistil 23°C.



Obrázek 46 Hodnoty po zapnutí přístroje

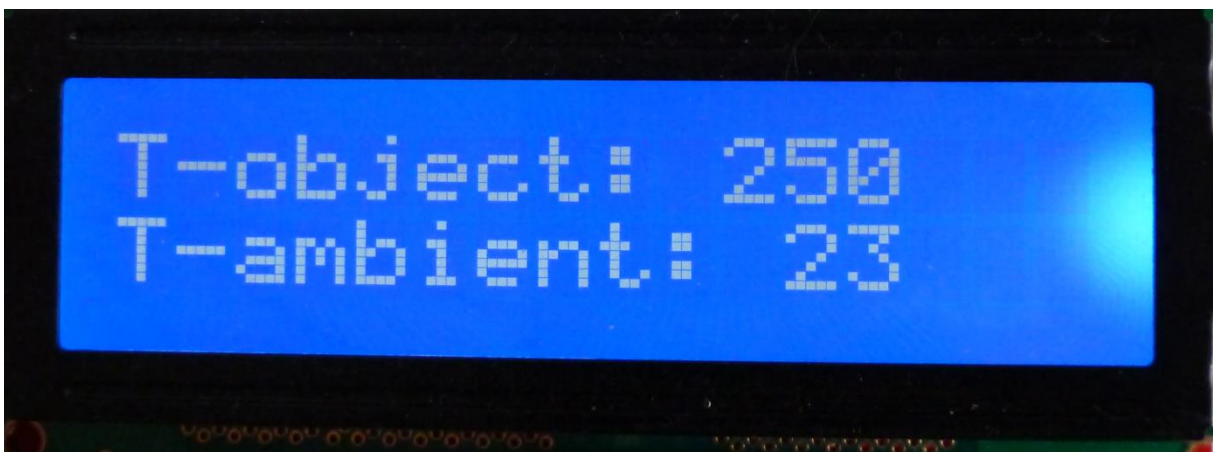
Po zapnutí sestavy byly na display vypsány teploty 24°C, což by odpovídalo skutečnosti. Digitální teploměr měl teplotu 23°C, takže rozdíl toho jednoho stupně je

zanedbatelný v nepřesnosti obou měřidel. Teplota objektu byla stejná jako teplota okolí, protože před čidlem nebyl jiný zdroj tepelné energie.

Další krokem tohoto pokusu bylo zjistit, zda je čip schopný reagovat na jinou teplotu, než je teplota okolí. To jsme vyzkoušeli tak, že jsme zkusili změřit teplotu venkovního prostředí, kde digitální teploměr ukázal hodnotu 11°C a také jsme zkusili změřit teplotu v přehřáté plynové troubě na 8 stupeň, což by měla být teplota kolem 240°C. Tato teplota již nešla naším domácím teploměrem zjistit, protože byla mimo jeho teplotní rozsah.



**Obrázek 47** Hodnoty z venkovního prostředí



**Obrázek 48** Hodnoty z plynové trouby

Z předešlých dvou obrázků lze určit, že zařízení je schopné detekce teploty vcelku přesně. Všimli jsme si však jedné věci a to té, že aby bylo měření co nejpřesnější, je třeba měřit s co nejmenší vzdáleností.

Dalším krokem v našich pokusech bylo zjistit, jak rychle dokáže systém zareagovat na změnu teploty. Pokus byl vymyšlen tak, že se vloží kovový model auta do horké lázně ohřáté

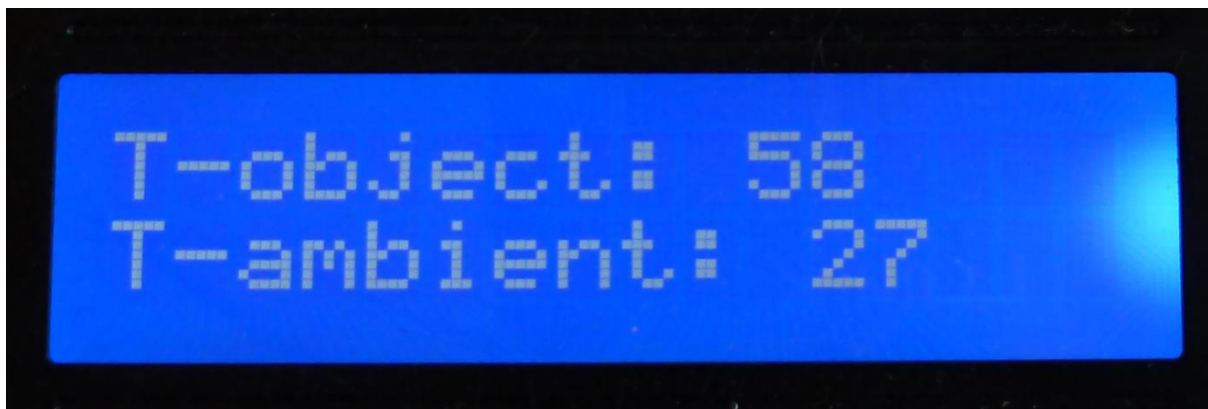


na teplotu cca 60°C na dobu přibližně 5 min, aby této teploty dosáhl také. 60°C bylo zvoleno proto, aby se už tato teplota přibližovala varovné teplotě horkoběžného ložiska a také z důvodu ochrany plastových částí modelu auta.



**Obrázek 49 Model pro test rychlosti systému**

Po ohřátí modelu na požadovanou teplotu jsme ho vyndali z lázně a teplotu jsme změřili naším čidlem. Teplota modelu byla 58°C, což bylo pro testování přijatelné. Test musel proběhnout velmi rychle, protože musíme brát v úvahu skutečnost, že při pohybu modelu dochází k proudění vzduchu, který model velmi rychle ochlazuje.



**Obrázek 50 Teplota modelu**

Při testování bylo zjištěno, že čidlo je schopné na změnu teploty reagovat, problém však nastal při rychlostech větších než 4m/s, kde změna teploty byla zjištěna, ale proces změny proběhl tak rychle, že lidské oko nebylo schopné tuto změnu teploty na displeji přečíst. Při dalších testech by proto bylo vhodné ukládat změřené hodnoty tohoto systému do vestavěné paměti, ze které by se pak tyto hodnoty daly vyčíst a zjistit, co přesně čip změřil.

## 6.2 Testování Hamamtsu G12460-0606S

Testy s tímto druhem čipu bohužel nebyly do této doby provedeny, protože v české republice neexistuje žádné oficiální zastoupení této firmy, které by tyto součástky prodávaly po kusech. Výrobce dodává tyto čipy pouze v minimálních sériích 100ks a to pouze svým certifikovaným dealerům. Na americkém trhu se nám podařilo sehnat prodejce takového čipu <http://www.futureelectronics.com/>, který je oficiálně nedodává, ale odepsal nám, že je schopen tento čip sehnat a dodat. Od tohoto dodavatele jsme též objednávali čipy od Melexisu, protože s jejich nákupem od výrobce je to úplně stejné. Na dodání čipů od Melexisu jsme čekali cca 4 týdny.

## 7 Závěr

Cílem této diplomové práce bylo navrhnout infračervenou řídicí jednotku, které bude problém horkoběžnosti železničního dvojkolí efektivně detekovat a předcházet tak případným škodám.

Z teoretického hlediska dle dosavadního výzkumu se tato cesta ukazuje jako správná. Rychlosti nalezených čipů jsou dle jejich technických parametrů dostatečně vysoké na to, aby byly se 100% účinností schopny detekovat jedoucí vlak do zaručené rychlosti 50 km/h. Určitě bude tento systém schopen detekovat i větší rychlosti, ovšem zatím není zjištěno, s jakou přesností by to bylo. Co se týče variabilního přizpůsobení se čipů od Hamamatsu, kde se dá variabilně doprogramovat a dodat téměř cokoliv, myslíme si, že tento čip bude schopný kvůli své vysoké obnovovací frekvenci přesně detekovat rychlosti do 160 km/h.

Z praktického hlediska a provedení zatím základních testů funkčnosti systému nebyly zjištěny žádné kritické závady, které by vývoji tohoto systému mohly bránit, tak jako to bylo u termokamer. Myslím si, že když jsme s tímto projektem začínali, že nikdo nepočítal s tím, že se z toho vznikne tak velký projekt, na kterém by mohli spojit síly studenti nejen z mého oboru a mé fakulty ale také studenti z jiných fakult ČVUT, hlavně fakulty elektrotechnické a strojní.

Ač je tato práce pouze jedním z asi devíti kroků, které je potřeba udělat pro realizaci celého zařízení, shledávám jí jako zásadní krok pro další pokračování v tomto projektu. Dalším krokem vývoje tohoto systému je nastavit ho tak, aby snímalo pouze v daném okamžiku jen ložiskovou skříň a nebylo ovlivněno zahřátou obručí železničního kola. Naším nápadem je probouzet tento systém pomocí optické brány, která zjistí rychlost vlaku a čas vjezdu, podle toho by se dalo přesně dopočítat, v jaký čas bude ložisková skříň v zorném poli čipu a systém zapnout a vypnout. To je ovšem jen teoretická úvaha, a zda bude funkční, nechám zjistit své kolegy, kteří navážou na tuto práci.

## Použitá literatura

- [1] Drážní inspekce, Zpráva o výsledcích šetření příčin a okolností vzniku mimořádné události; Č. j.: 6-896/2010/DI, Úterý, 9. března 2010 [cit. 2011-11-21]
- [2] Czech Raildays [online], [cit. 2015-05-01]. Dostupné z:  
<http://www.railvolution.net>
- [3] Vedení a vypružení ložiskové skříně [online], [cit. 2015-05-01]. Dostupné z:  
<http://www.vagony.cz/pojezdy/gp200/pasnice.html>
- [4] ING. JAN SOVA A SPOL. Základy termografie v příkladech, [cit. 2015-04-27].
- [5] Princip termografického měření. VOJÁČEK, Antonín [online], [cit. 2015-04-27]. Dostupné z: <http://www.termokamera.cz>
- [6] Planckův vyzařovací zákon, Odbor termomechaniky a techniky prostředí, Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně [online], [cit. 2015-05-01]. Dostupné z <http://ottp.fme.vutbr.cz/~pavelek/optika/0202.htm>
- [7] DRASTICH, Aleš. *Netelevizní zobrazovací systémy*. Brno: VUT v Brně, 2001. 174 s. ISBN 80-214-1974-1.
- [8] NOVÁKOVÁ, Danuše; MALÁ, Zuzana; NOVÁK, Rudolf. *Fyzika II*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. 170 s. ISBN 80-01-03090-3.
- [9] Eva sojková [online], [cit. 2015-04-15]. Dostupné z: <http://www.nezestarni.cz/>
- [10] SUMARA, Jan. *Termografie v elektroenergetice*. Praha: ČVUT 2012. Diplomová práce. Dostupné z:  
<http://www.centrumtermografie.cz>
- [11] Wikipedia [online], [cit. 2015-04-15]. Dostupné z:  
[http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/08/Black-body\\_realization.png](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/08/Black-body_realization.png)
- [12] Hardware.cz [online], [cit. 2015-05-02]. Dostupné z:  
<http://www.hw.cz/novinky/inovace-mems-od-ti-prinasi-moznost-ir-mereni-teploty-v-prenosne-spotrebni-elektronice.html>

- [13] PECH, Jan; ZAHRADNÍK, Pavel. Mikrobolometrické obrazové snímače. *Elektrorevue* [online]. 2003, č. 15, [cit. 2015-04-25]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/03015/index.html>
- [14] VRÁNA, Tomáš. Bezkontaktní metody měření v ekologickém inženýrství. Brno: VUT v Brně 2010. Diplomová práce. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=28399](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=28399)
- [15] FLIR a.s. Flir Research MAX 3.4 SP3, 30-daz Evaluation (3.4.13235.2002), last update 2013/12/04. [cit. 2014-01-21]. Dostupné z: <http://80.77.70.144/SwDownload/app/RssSWDownload.aspx?ID=134>
- [16] Pyrometrické měření teploty [online], [cit. 2015-04-21]. Dostupné z: <http://www.maryshfmmi.webzdarma.cz/pmt.htm>
- [17] E-THERM a.s. [online], [cit. 2015-04-12]. Dostupné z: [http://data.etherm.cz/land/system4/pyrometry/r1fibroptic\\_dat\\_cz.pdf](http://data.etherm.cz/land/system4/pyrometry/r1fibroptic_dat_cz.pdf)
- [18] RAYTEK CORPORATION 1999-2015 [online], [cit. 2015-04-12]. Dostupné z: <http://www.raytek.com/>
- [19] Keramické centrum doupe [online], [cit.2015-05-02]. Dostupné z: <http://www.kcdoupe.cz/cs/clanky/1/pouzivani-zaromerek/>
- [20] Process Sensors [online], [cit. 2015-05-02]. Dostupné z: <http://www.processsensorsir.co.uk/BBS4000-Blackbody.asp>
- [21] MELEXIS a.s. [online], [cit. 2015-05-02]. Dostupné z: <http://melexis.com/>
- [22] Program pro připojení mikrokontroleru k PC [online], [cit. 2015-05-02]. Dostupné z: [http://shop.onpa.cz/download/AND-Load\\_v31.zip](http://shop.onpa.cz/download/AND-Load_v31.zip).
- [23] AND-TECH, uživatelská příručka EvB 5.1 v5 [online], [cit. 2015-05-02]. Dostupné z: <http://and-tech.pl/wp-content/uploads/downloads/2013/10/Instrukcja-EvB5.1-v1-cze.pdf>
- [24] MATOUŠEK, David. Práce s mikrokontroléry ATMEL AT89C2051: [měření, řízení a regulace pomocí několika jednoduchých přípravků]. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2002-2006, 5 sv.  $\mu$ C & praxe. ISBN 80-7300-048-2.

[25] HAMATSU a.s. [online], [cit. 2015-05-02]. Dostupné z:  
<http://www.hamamatsu.com/eu/en/index.html>

**Přílohy:**

- 1) CD s programem pro snímač teploty
- 2) CD s fotodokumentací práce