



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

## BEZDOTYKOVÉ MĚŘENÍ TEPLoty

NON-CONTACT TEMPERATURE MEASUREMENT

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Vojtěch Sládek

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Dominik Hermanský

BRNO 2017

# Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student:	<b>Vojtěch Sládek</b>
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Stavba strojů a zařízení
Vedoucí práce:	<b>Ing. Dominik Hermanský</b>
Akademický rok:	2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

## Bezdotykové měření teploty

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Bezdotykové měření se často využívá v oblasti predikce teplotního chování obráběcích strojů. Snímače se liší vlastní konstrukcí, způsobem zpracování signálu, přesnosti měření atd. Předmětem práce bude řešerše v oblasti bezdotykového snímání teploty a jednoduchá praktická úloha.

### Cíle bakalářské práce:

1. Seznámení se s řešenou problematikou.
2. Řešerše v oblasti bezkontaktního měření teploty.
3. Možností využití metody v oblasti výrobních strojů.
4. Měření s využitím bezdotykových snímačů.
5. Vyhodnocení výsledků měření.

### Seznam literatury:

VAVŘIČKA, Roman. Bezkontaktní způsoby měření teploty. 1. vyd. Praha: Společnost pro techniku prostředí, 2013. Sešit projektanta - pracovní podklady. ISBN 978-80-02-02515-3.

PAVELEK, Milan. Termomechanika. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. MM speciál. ISBN 978-80-214-4300-6.

INCROPERA, Frank. Fundamentals of Heat Transfer. 1. vyd. New York: John Wiley, 1981. MM speciál. ISBN 978-80-214-4300-6.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Václav Píštěk, DrSc.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## ABSTRAKT

Cílem práce bylo studium o bezkontaktním měření teploty a využití tohoto měření v oblasti výrobních strojů. První část práce zahrnuje pojmy a definice, které jsou nezbytné k seznámení s problematikou. Ve druhé, praktické části bylo srovnáno kontaktní a bezkontaktní měření na dvou experimentech. V prvním byl měřen rám stroje, na kterém bylo simulováno teplotní zatížení, dále byla určena emise, která byla porovnána s emisivitou z tabulek. V druhém experimentu byl stanovován teplotní gradient kuličkového šroubu, který byl měřen při chodu kuličkového šroubu, a byla opět určena emisivita, která byla porovnána s tabulkovými hodnotami. Závěr práce shrnuje výhody a nevýhody bezkontaktního měření, které byly ověřeny v praxi.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Teplota, technická diagnostika, kontaktní měření, záření, emisivita, detektory, pyrometry, termokamera

## ABSTRACT

The aim of the thesis was the study of non-contact temperature measurement and the use of this measurement in the field of production machines. The first part of thesis includes concepts and definitions that are necessary for familiarization with the issue. In the second, practical part, contact and non-contact measurements were compared in two experiments. In the first one the machine frame was measured, on which the thermal load was simulated, the emission was determined, which was compared with emissivity from the tables. In the second experiment, the temperature gradient of the ball screw was measured during the ball screw operation and was determined emissivity, which was again compared with the table values. The conclusion of the thesis summarizes advantages and disadvantages of non-contact measurements that have been verified in practice.

## KEYWORDS

Temperature, technical diagnostics, contact measurements, radiation, emissivity, detectors, pyrometers, thermal camera

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

SLÁDEK, V. *Bezdotykové měření teploty*. Brno, 2017. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. 42 s. Vedoucí bakalářské práce Dominik Hermanský.



## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Dominika Hermanského a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 25. května 2017

.....

Vojtěch Sládek

## **PODĚKOVÁNÍ**

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Dominikovi Hermanskému za odborné vedení, konzultace ke studované problematice a rady v průběhu práce.

## OBSAH

Úvod .....	10
1 Charakteristika teploty .....	11
1.1 Historie měření teploty .....	11
1.2 Teplotní stupnice .....	11
1.3 Technická diagnostika a infračervená termografie .....	12
2 Kontaktní měření .....	13
2.1 Dilatační teploměry .....	13
2.2 Elektrické teploměry .....	14
2.3 Termočlánky .....	14
3 Záření a bezkontaktní měření teploty .....	15
3.1 Emisivita .....	16
3.2 Charakteristika bezkontaktního měření teploty .....	16
3.3 Rozdělení bezkontaktních měřičů teploty .....	16
3.4 Základní vztahy pro zákony bezkontaktního měření .....	17
3.4.1 Černé těleso .....	17
3.4.2 Šedé těleso .....	18
3.4.3 Planckův vyzařovací zákon .....	18
3.4.4 Kirchhoffův zákon .....	19
3.5 Nejistoty měření bezkontaktního měření teploty .....	19
3.6 Porovnání výhod a nevýhod kontaktních měřidel s bezkontaktními .....	20
3.7 Využití bezkontaktního měření ve výrobě .....	21
3.8 Detektory pro bezdotykové měření teplot .....	21
3.8.1 Tepelné detektory .....	21
3.8.2 Pyroelektrické detektory .....	22
3.8.3 Termoelektrické detektory .....	22
3.8.4 Bolometrické detektory .....	22
3.8.5 Kvantové detektory .....	23
3.9 Pyrometry .....	23
3.9.1 Jasové spektrální pyrometry .....	23
3.9.2 Radiální (úhrnné) pyrometry .....	24
3.9.3 Pásmové (vícepásmové) pyrometry .....	24
3.9.4 Barvové pyrometry .....	24
3.10 Infračervená termografická kamera .....	24
3.10.1 Měřicí funkce termokamery .....	25
3.10.2 Termokamera FLIR T440 .....	27

3.10.3	FLIR Tools .....	28
4	Praktická část.....	29
4.1	Zadání .....	29
4.2	Seznam použitého vybavení .....	29
4.3	Experiment č.1 Simulace tepelného zatížení rámu obráběcího stroje .....	30
4.3.1	Postup Přípravy experimentu.....	30
4.3.2	Měření tepelného zatížení.....	32
4.3.3	Výsledky a vyhodnocení experimentu 1 .....	32
4.4	Experiment č.2 Měření teplotního gradientu kuličkového šroubu .....	34
4.4.1	Postup Přípravy experimentu.....	34
4.4.2	Měření tepelného zatížení.....	35
4.4.3	Výsledky a vyhodnocení experimentu 2 .....	36
	Závěr.....	38
	Seznam použitých zkratk a symbolů .....	42

## ÚVOD

Teplota je základní prostředek ke zjišťování technického stavu objektů a zařízení, jedná se o jednu z nejčastěji měřených fyzikálních veličin. Jelikož teplotu nelze měřit přímo, tak ji stanovujeme pomocí jiných fyzikálních veličin například pomocí teplotní roztažnosti nebo změny elektrického odporu vodičů a nevodivců. Tyto metody stanovení se provádějí kontaktními nebo bezkontaktními měřidly.

První měřicí přístroje byly vynalezeny v 17. století a pracovaly s tepelnou roztažností vzduchu, později vody. Voda ale nebyla vhodná kapalina, protože měla nízkou tepelnou roztažnost, z tohoto důvodu vodu nahradily líh a rtuť. První bezkontaktní měřicí přístroje se objevily na začátku 20. století a používaly termoelektrická čidla. Po druhé světové válce se na trhu objevily radiační teploměry, které sloužily především k vojenským účelům a na konci 20. století byla vyvinuta termokamera, jejíž princip byl založený na analogovém zaznamenávání teplotního vývoje v čase.

Hlavním prvkem bezpečnosti a spolehlivosti ve veškeré průmyslové produkci, ale i v dopravě, energetice, výpočetní a telekomunikační technice je technická diagnostika, do které patří i měření teploty. Technická diagnostika je soubor činností, které mají za cíl zvýšit spolehlivost a prodloužit životnost a také minimalizovat počet havarijních výpadků provozu nejčastěji u provozně kritických výrobních zařízení. Teplota ovlivňuje i ostatní měřicí přístroje na měření dalších veličin, proto má každý měřicí systém definovaný rozsah teploty, ve kterém se zaručuje správnost měření.

Cílem této práce je řešerše v oblasti bezkontaktního měření teploty, jeho využití v oblasti výrobních strojů a následné měření teploty částí obráběcího stroje, rámu obráběcího stroje a kuličkového šroubu. Posledním krokem bude vyhodnocení, teoretické určení emisivity, porovnání a diskuze, který z použitých měřicích přístrojů je k tomuto měření nejvhodnější.

Při obrábění dochází často ke změnám provozních podmínek, obvykle se mění technologie vrtání, hrubování, obrábění načisto nebo výroba v malých dávkách. Z těchto důvodů je nutné zajistit co nejvyšší stabilitu obráběcích strojů. Jinak by totiž mohl nastat problém s rostoucí teplotou a následným vzrůstem přírůstků délky. Tato změna délky může následně vést k velkým chybám rozměrů obrobku.

# 1 CHARAKTERISTIKA TEPLoty

Stavové veličiny popisují stav soustavy a jsou to např. veličiny jako objem, hmotnost, látkové množství, tlak, hustota a teplota. Teplota určuje stav, kdy se v izolované soustavě těles neodehrává žádná makroskopická transformace a veškeré fyzikální veličiny se nemění v závislosti na čase. Termodynamickou rovnováhu určuje termodynamická teplota, pro ni platí pravidlo, že musí mít stejnou hodnotu ve všech místech izolované soustavy. Často se nesprávně zaměňuje teplo s teplotou. Spojuje je fakt, že se jedná o fyzikální veličiny, ale teplo na rozdíl od teploty není stavovou veličinou, protože závisí na čase a evoluci soustavy. Vyjadřuje přítom energii, která závisí na pohybu částic. Teplotu není možné měřit přímo, v jejím měření nám pomáhají další fyzikální veličiny. např. ve rtuťovém teploměru sledujeme teplotní roztažnost látek [4].

Teplota je míra uložené potencionální energie v množství hmoty. V případě, že se teplota zvyšuje, tak se zvyšuje i vibrační energie molekul a potenciál pro přenos molekulární kinetické energie na jiný objekt. Téměř všechny chemické procesy a reakce jsou závislé na teplotě. Existuje mnoho dalších oblastí průmyslu, v nichž je měření teploty zásadní. Takové aplikace zahrnují výrobu páry a elektřiny, výrobu plastů a mnoho dalších oblastí v potravinářském průmyslu [4, 7].

Neustále kolem nás dochází k přenosu tepla, a to při kontaktu dvou objektů s různou teplotou. Spontánně dochází k přenosu tepla z místa o vyšší teplotě do oblasti s nižší, jedná se o nevratný děj. Tento jev nám popisuje 2. zákon termodynamiky. Z fyzikálního hlediska rozlišujeme 3 druhy přenosu tepla: přenos tepla zářením (radiací), přenos tepla prouděním a přenos tepla vedením [3, 24].

## 1.1 HISTORIE MĚŘENÍ TEPLoty

První měření teploty provedl Galileo Galilei na konci 16. století. Jeho teploměr byl založen na expanzi vzduchu a skládal se ze skleněné trubičky, která měla na konci baňku. Nejdříve baňku zahřál a následně ponořil teploměr otevřeným koncem trubičky do vody, přičemž se vzduch v teploměru začal ochlazovat, vzduch se v něm začal smršťovat a vlivem okolního tlaku vnikala voda do teploměru [2, 7].

První teplotní stupnice byla vyvinuta německým fyzikem Danielem G. Fahrenheitem, který přispěl světu i rtuťovým teploměrem. Do té doby se používaly lihové teploměry, které měly ovšem vyšší roztažnost než rtuť, a proto byly méně přesné. Navíc se rtuť dala použít pro větší rozsah teplot. V roce 1730 přišel s návrhem nové stupnice René-Antoine Ferchault de Réaumur. Jeho stupnice byla rozšířena hlavně ve Francii a bod varu na ní byl 80 °R. Dnes nejrozšířenější Celsiova stupnice byla zavedena v roce 1742 švédským astronomem Andersem Celsiem. Termodynamickou stupnici, nazývanou taky jako Kelvinova stupnice, známe od roku 1848 a vytvořil ji lord William Thomson Kelvin [2, 7].

## 1.2 TEPLotNÍ STUPNICE

Nejčastěji používané jsou tři teplotní stupnice, a to Celsiova stupnice, stupnice Fahrenheitova a Kelvinova termodynamická teplotní stupnice. Celsiova stupnice je odvozena z Kelvinovy stupnice, která je posunuta o teplotu 273,15 K [2, 7].

Fahrenheitova stupnice dostala jméno po fyzikovi Gabrielu Fahrenheitovi, který tuto stupnici navrhl v roce 1724. Bod mrazu vody je 32 °F a bod varu vody je 212 °F při jedné atmosféře.

Fahrenheitova existuje dodnes ve Spojených státech, které nechtějí přijmout stupnici Celsiovu. Další země, které tuto stupnici používají jsou Barma, Libérie, Belize a Jamajka [2, 7].

Další používaná stupnice se nazývá Kelvinova termodynamická teplotní stupnice, která má počátek v absolutní nule, teoretické absenci veškeré tepelné energie. Používá se ve vědě a inženýrství, jelikož nejlépe vyjadřuje teplotní intervaly. Existuje ještě Mezinárodní teplotní stupnice z roku 1990 (ITS-90), která se používá ke kalibraci a málo nebo vůbec používané jsou Rankinova a Newtonova stupnice a Delisleovo měřítko [2, 7].

### **1.3 TECHNICKÁ DIAGNOSTIKA A INFRAČERVENÁ TERMOGRAFIE**

Technickou diagnózou je vyšetření symptomů a syndromů, které určují povahu poruch nebo selhání technických objektů. Symptom je percepce, která se provádí pomocí lidských pozorování a měření, což může znamenat přítomnost abnormálního stavu s určitou pravděpodobností a syndrom je skupina příznaků, které kolektivně naznačují nebo charakterizují abnormální stav. Stručně řečeno, diagnóza je posouzení okamžitého stavu objektu nebo taky provozuschopnosti objektu [8, 13].

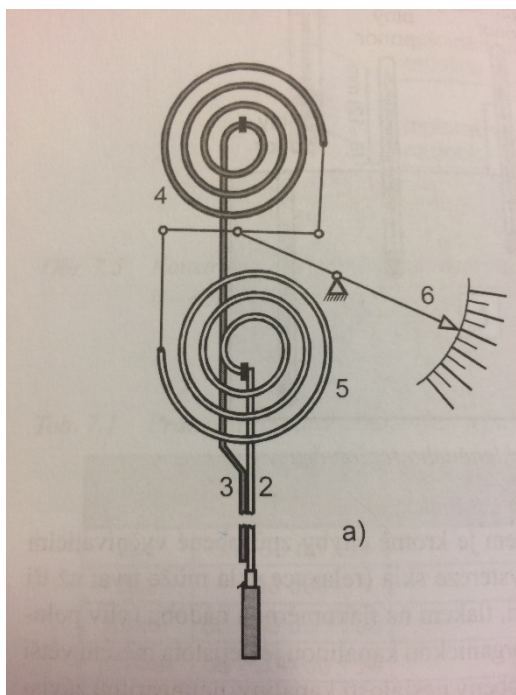
Stav objektu a jeho provozuschopnost se analyzuje a vyhodnocuje pomocí diagnostických prostředků, které jsou tvořeny technickými zařízeními a pracovními postupy. Jedním z těchto prostředků je i infračervená termografie. Infračervená termografie, která se běžně označuje i jako termální zobrazování, je nedestruktivní testovací technika, která se v posledních několika desetiletích těší rostoucí oblibě [8, 13].

## 2 KONTAKTNÍ MĚŘENÍ

Kontaktní teploměry snímají teplotu materiálu přiložením k tělesu nebo ponořením teploměru do tělesa. Existuje mnoho druhů dotykových teploměrů, jsou to např. dilatační, elektrické a termočlánky [2, 7].

### 2.1 DILATAČNÍ TEPLoměRY

Dilatační teploměry fungují na principu teplotní roztažnosti látek skupenství pevného, kapalného a plynného. Jsou to například teploměry tyčové, které pracují díky rozdílné teplotní délkové roztažnosti dvou součástí, které jsou spojeny v jednom místě. Při ohřátí se měří rozdílné prodloužení. Velmi známé jsou skleněné teploměry složené ze skleněné trubičky neboli kapiláry, ve které je vakuum, se stupnicí a baňky, v níž je kapalina, která mění objem v závislosti na teplotě. Teplota se určuje podle výšky hladiny, které kapalina po ohřátí dosáhne. Používají se v intervalu od  $-190\text{ °C}$  do  $+600\text{ °C}$ , s nejistotou měření  $\pm 0,1\text{ °C}$  a rozeznatelností  $0,001\text{ °C}$ . Podle konstrukčního řešení se dělí na škálové, tyčinkové a stonkové. Kapalínový tlakový a parní tlakový pracují na stejném principu jako skleněný, jen se neměří objemová roztažnost, ale tlak. Jsou složeny z kapiláry, jímky a měřícího přístroje. Rozdíl mezi kapalínovým a parním je v tom, že kapalínový je celý zaplněný kapalinou, ale parní z části kapalinou a z části její sytou párou [7, 14, 18].



Obr. 1 Kapalínový tlakový teploměr: 1 - teploměrová nádobka, 2 - spojovací kapilára, 3 - kompenzační zaslepená kapilára, 4 a 5 - deformační tlakoměry, 6 - ručička [7].

## 2.2 ELEKTRICKÉ TEPLoměRY

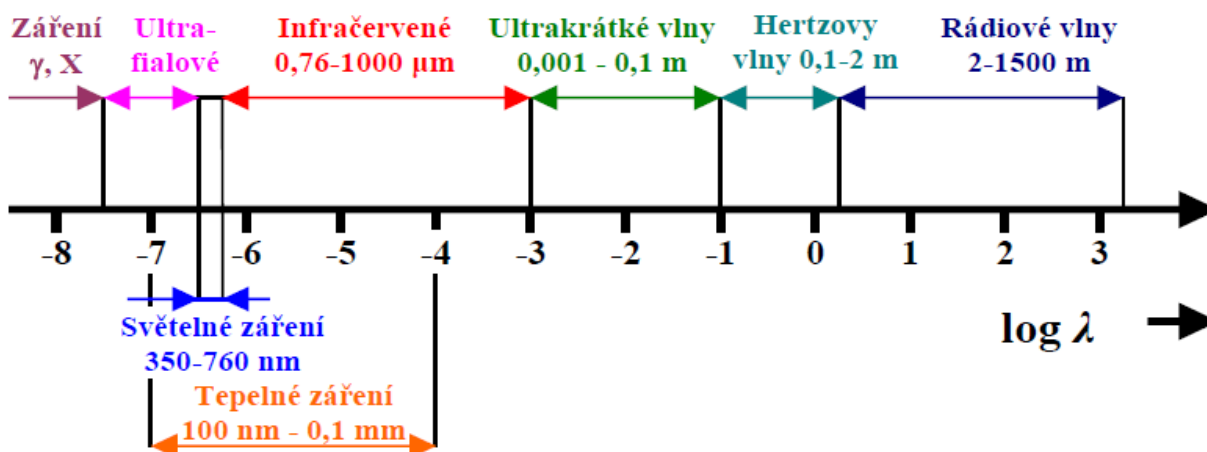
Tyto teploměry se dělí na termoelektrické snímače teploty a na odporové snímače. Termoelektrické teploměry přeměňují teplotu na elektrický signál, například elektrický proud nebo odpor, který dále zpracují na teplotní údaj. Výhodou je jejich malý rozměr a s tím související snadná montáž. Nevýhodou ale je, že tyto snímače se nesmí při průchodu proudem příliš ohřívat, aby nedocházelo k chybnému měření. Odporové pracují s teplotní závislostí elektrického odporu kovů nebo polovodičů, a to na jednoduchém principu, čím vyšší teplota, tím vyšší odpor [1, 12].

## 2.3 TERMOČLÁNKY

U termočlánků dochází k přeměně tepelné energie na elektrickou. Tento úkaz se nazývá Seebeckův jev a vzniká tak, že v teplejším úseku vodiče mají přenašeči náboje větší energii, a proto pronikají do studenějších úseků. Termoelektrický článek je zkonstruován ze dvou vodičů, které musí být v uzavřeném obvodu a musí mít rozdílnou teplotu, aby mohl protékat elektrický proud [7, 18].

### 3 ZÁŘENÍ A BEZKONTAKTNÍ MĚŘENÍ TEPLoty

Jako tepelné záření se označuje elektromagnetické záření o vlnové délce 2–25  $\mu\text{m}$ , oblast viditelného spektra je 0,4–0,78  $\mu\text{m}$ , blízkého infračerveného spektra 0,78–1  $\mu\text{m}$ , krátkovlnného infračerveného spektra 2–3  $\mu\text{m}$ , středovlnného infračerveného spektra 3–5  $\mu\text{m}$ , a nakonec oblast dlouhovlnného infračerveného spektra 5–25  $\mu\text{m}$ . To odpovídá teplotní škále  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  až  $+10\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$  [1, 20, 21].



Obr. 2 Typy záření dle vlnové délky  $\lambda$  [15].

Veškeré látky nezávisle na skupenství (kapalném, plynném nebo pevném), jejichž teplota je vyšší jak absolutní nula (tj.  $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), vyzařují energii. Jinak řečeno: emitují elektromagnetické záření, které má vlnovou délku odpovídající teplotě vyzařujícího materiálu. Při interakci záření a hmoty může docházet k absorpci elektromagnetického záření např. valenčními nebo i vnitřními elektrony atomů, přičemž dochází k nárůstu energie částic či látek. V důsledku tohoto procesu dochází k přeskoků elektronu z nižší energetické hladiny do vyšší excitované energetické hladiny (tzv. excitace), a poté dochází po různě dlouhém čase k zářivým (fluorescence, fosforescence) nebo nezářivým (relaxace spojené se ztrátou energie ve formě tepla) deexcitačním přechodům. V případě zářivého přechodu dochází k emisi energie ve formě elektromagnetického záření, kdy látka přechází zpět na nižší energetický stav, přičemž emituje charakteristické záření. Zatímco k absorpci záření nemusí zpravidla dojít, k ní opačný proces nastává vždy, protože látka či částice v excitovaném stavu je nestabilní. Energetické stavy elementárních částic jsou kvantovány, proto má-li být dopadající záření absorbováno, musí se jeho energie přesně rovnat energetickému rozdílu hladin dané elementární částice. V případě, že vlnová délka dopadajícího záření neodpovídá rezonanční frekvenci elektronů, elektromagnetické vlny látkou procházejí, aniž by s ní interagovaly (přenos). Odraz vlnění je jednoduše absorpce a následná emise [1, 20, 21].

Čím vyšší má materiál teplotu, tím je záření intenzivnější, protože se rychleji pohybují nabitě částice tělesa. Pokud nedodáváme teplo materiálu, tak dochází ke chlazení materiálu a pohyb částic se zpomaluje a ustane na hodnotě absolutní nuly. Existuje rozdíl mezi přijímáním tepla mezi pevnými látkami a látkami kapalnými a plynnými, pevné totiž přijímají teplo pouze povrchem a kapaliny a plyny celým objemem [1, 20].

### 3.1 EMISIVITA

Emisivita je schopnost objektu vyzařovat energii a značí se  $\varepsilon$ , nabývá hodnot 0–1, kdy 1 je dokonalý zářič a 0 nevyzařuje žádnou energii. Emisivita se určuje různými způsoby, pro často používané materiály se dá jejich emisivita dohledat v tabulkách, kde je zapsáno správné pásmo vlnových délek pro tento materiál. To nám pomáhá při volbě vhodného měřidla. U kovů však ovlivňují emisivitu i úprava a stav materiálů, které mohou být zoxidované, zvrásněné či leštěné, a proto bereme emisivitu z tabulek u kovů jen orientačně [15, 24].

Tab. 1 Hodnoty emisivit pro různé materiály [24].

materiál	emisivita
Bronz: leštěný	0,10
Bronz: pórovitý, drsný	0,55
Hliník: folie, lesklá	0,036
Hliník: eloxovaný	0,77
Ocel: leštěná	0,07
Ocel: rezavá, červená	0,69
Železo: lesklé, leptané	0,16
Železo: odlitek, leštěný	0,21

V tabulce je vidět velký rozdíl emisivity u stejných materiálů, ale s jinou úpravou povrchu [15, 24].

### 3.2 CHARAKTERISTIKA BEZKONTAKTNÍHO MĚŘENÍ TEPLoty

Pro bezkontaktní měření teploty, taky označované jako infračervená pyrometrie, se používá infračervená část spektra vyzařované energie. Jak už bylo zmíněno dříve, záření probíhá ve škále 0,4–25  $\mu\text{m}$  a to koresponduje s teplotami od  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $+10\ 000\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Senzor (detektor) přijímá elektromagnetické záření, které vysílá těleso. Vlastnosti detektorů jsou integrální citlivost, která je dána podílem zářivého toku dopadajícího na citlivou plochu snímače a podílem elektrického napětí na výstupu detektoru a relativní spektrální citlivost, která je dána podílem spektrální citlivosti k spektrální citlivosti vlnové délky [7, 21].

Měření je taky ovlivněno vlivy prostředí, přes které se šíří elektromagnetické záření, jsou to transmitance (propustnost), absorptance (pohltivost), emisivita a reflektance (odrazivost), všechny jsou funkcemi vlnové délky a teploty [7, 21].

### 3.3 ROZDĚLENÍ BEZKONTAKTNÍCH MĚŘIČŮ TEPLoty

Bezkontaktní teploměry se dělí na pyrometry, které vyhodnocují teplotu v jednom aktuálně měřeném bodě, a zobrazovací metody (infra), které znázorňují živý termogram neboli

infračervený obraz, tj. teplotní pole v úplném záběru čočky. Pyrometry se dále dělí na jasové, pásmové, barvové a radiační a zobrazovací metody na termovize a fototermovize [11, 12, 14, 22].



Obr. 3 Vlevo je pyrometr, který ukazuje teplotu v jednom bodě a vpravo termokamera značky FLIR, která měří teplotu v 3600 bodech najednou [22].

Bodové lze dále dělit dle rozsahu spektra vlnových délek, které mohou zpracovat, na přístroje umožňující zpracovat celou škálu vlnových délek, dále jen některá vybraná pásma vlnových délek, dvoupásmové, vícepásmové [11, 12, 14, 22].

### 3.4 ZÁKLADNÍ VZTAHY PRO ZÁKONY BEZKONTAKTNÍHO MĚŘENÍ

#### 3.4.1 ČERNÉ TĚLESO

Zákony bezkontaktního měření (Plancův, Wienův, Stefan-Boltzmanův, Lambertův a Kirchhoffův zákon) a jejich vztahy platí pouze pro absolutně černé těleso [7, 20].

Černé těleso je ideální těleso absorbující všechno záření dopadající v jakémkoliv úhlu, které dopadá na jeho povrch, ale ve stejnou chvíli nabývá maximální možné intenzity vyzařování z vlastního povrchu, žádné záření ovšem neodráží. Absolutně černá tělesa neexistují, ale asi nejbližší je Slunce a hvězdy. Někdo by si mohl myslet, že to budou Černé díry, ale ty nemají vlastnost dokonalého zářiče [1, 11].



Obr. 4 Slunce je téměř dokonalý zářič a téměř dokonale pohlcuje záření [15].

Běžná tělesa jsou horším zářičem než tělesa černá a nemají tak souvislé rozložení zářivosti, ale je známo, že intenzita jejich vyzařování při totožné teplotě je menší. Běžná tělesa nahrazujeme šedými tělesy o totožné teplotě povrchu, protože není snadné přesně určit intenzitu vyzařování [1, 11].

Pro černé těleso se emisivita rovná jedné, v praxi se realizuje jako malý otvor do velké dutiny s ústím ohraničeným ostrým břitem. Poté přichází v platnost Stefanův-Boltzmannův zákon, který vyjadřuje, že intenzita vyzařování z povrchu černého tělesa je stejná jako násobek Stefanovy-Boltzmannovy konstanty [7, 20].

### 3.4.2 ŠEDÉ TĚLESO

Jak už bylo zmíněno dříve, šedým tělesem nahrazujeme reálná tělesa. Šedé těleso má menší intenzitu vyzařování než černé, a to při totožné teplotě povrchu a poměr těchto intenzit se nazývá poměrná zářivost nebo emisivita [7, 20].

Povrchy reálných těles mají poměrnou zářivost nižší než jedna, ale většinou jsou hodně tmavé, s poměrnou zářivostí asi 0,9. Výjimkou jsou čisté kovové povrchy, jejichž emisivita je většinou mnohem menší a pohybuje se kolem 0,1 [7, 20].

### 3.4.3 PLANCKŮV VYZAŘOVACÍ ZÁKON

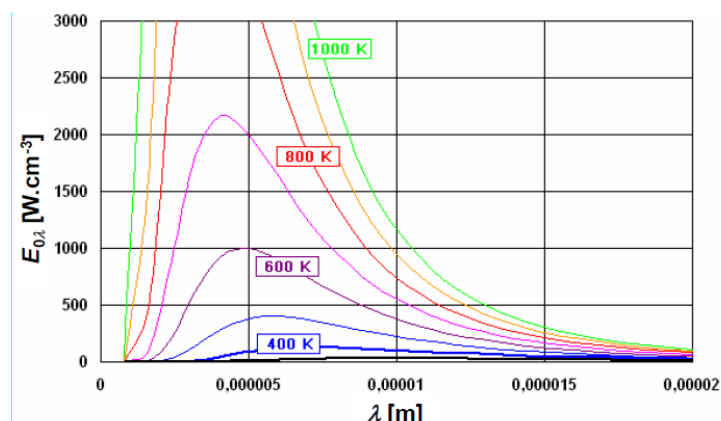
Planckův zákon nám říká, že původce elektromagnetického záření vyzařuje energii po kvantech. Z toho Planck vydedukoval na základě kvantové teorie a v souladu se zákony pravděpodobnosti svůj vyzařovací zákon: „Záření o frekvenci  $f$  může být vyzařováno, nebo pohlcováno jen po kvantech energie o velikosti“ [15]:

$$e = h \cdot f \quad (1)$$

kde  $h$  je Planckova konstanta  $h = (6,6256 \pm 0,0005) \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$  a  $f$  je frekvence. Z tohoto zákona můžeme odvodit pro dokonale černé těleso ve vakuu, nebo taky dokonalý zářič, vztah pro spektrální hustotu zářivého toku  $E_{o\lambda}$  [15]:

$$E_{o\lambda} = \frac{dE_o}{d\lambda} = f(\lambda, T) \quad (2)$$

kde  $E_o$  je hustota zářivého toku dokonale černého tělesa. Tento vztah lze vyjádřit graficky:



Obr. 5 Spektrální hustota zářivého toku dokonale černého tělesa v závislosti na vlnové délce záření a teplotě zářiče [15].

Můžeme pozorovat závislosti spektrální hustoty zářivého toku dokonale černého tělesa na vlnové délce záření, a to pro různé teploty [1, 15, 16].

#### 3.4.4 KIRCHHOFFŮV ZÁKON

Kirchhoffův zákon ukazuje, že těleso pohlcuje intenzivně ty spektrální složky elektromagnetického vlnění, které intenzivně vyzařuje a naopak. Zář lze vyjádřit rovnicí [7]:

$$\frac{M}{\alpha} = f(T) \quad (3)$$

kde  $M$  je poměr intenzity vyzařování tepelného zářiče k pohltivosti  $\alpha$  a závisí jen na termodynamické teplotě tělesa a nezávisí tedy na jeho chemickém složení, úpravě povrchu a oxidaci [7].

### 3.5 NEJISTOTY MĚŘENÍ BEZKONTAKTNÍHO MĚŘENÍ TEPLoty

Nejistota měření slouží k určení přesnosti měření, které je ovlivněno relativní chybou měřidel absolutními a relativními chybami měření. Vyjadřuje škálu hodnot, ve které se nachází pravá hodnota měřené veličiny. Je nemožné zjistit přesnou hodnotu měřené veličiny, protože není dokonalého senzoru a neexistují dokonalé podmínky k měření. Proto každé měření, které se více, či méně přibližuje pravé hodnotě, provází určení nejistoty měření.

Jestliže známe výsledek měření  $X$  a nejistotu měření  $Y$ , nachází se reálná hodnota v rozmezí  $\langle X - Y; X + Y \rangle$  s pravděpodobností, která je většinou 95 % [7, 9].

Je několik druhů nejistot: Standartní nejistota typu A ( $u_A$ ), neboli směrodatná odchylka aritmetického průměru, která se spočítá pomocí vztahu [7]:

$$s_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2} = u_A \quad (4)$$

kde  $n$  je počet naměřených veličin,  $\bar{x}$  je aritmetický průměr a  $x_i$  naměřená hodnota. Dále je to nejistota typu B, která se získává jinými způsoby. Určí se možné důvody nejistot: nedokonalá

měřidla, nepřesné konstanty a způsoby vyhodnocování, aplikované metody měření a někdy i nedostačující zkušenost laborantů. Další je Kombinovaná standardní nejistota  $u_c$  [7]:

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (5)$$

kde  $u_A$  je již zmiňovaná nejistota typu A a  $u_B$  je nejistota typu B. Poslední je Rozšířená nejistota  $U$  [7]:

$$U = k_u \cdot u_c \quad (6)$$

kde  $k_U$  je koeficient rozšíření (pokrytí, nejčastěji  $k_U = 2$ ). Při bezkontaktním měření teploty musíme vzít do úvahy tyto druhy nejistot:

- Nejistotu měření vyvolanou neznalostí správné hodnoty emisivity povrchu měřeného objektu. Patří k nejčastějším nepřesnostem při měření bezkontaktním teploměrem. Správnou emisivitu můžeme určit několika způsoby: můžeme ji určit z tabulek, použitím dodatečného materiálu nebo nátěru nebo přidáním další metody k měření povrchové teploty a porovnáním teplot určit emisivitu povrchu.
- Nejistotu měření zapříčiněnou neznalostí správné hodnoty propustnosti prostředí mezi měřičem a povrchem měřeného předmětu. Průhlednost prostředí je důležitá hlavně při dálkovém snímání měřeného objektu. Zářivý tok totiž negativně ovlivňuje přímá absorpce a taky rozptyl infračerveného záření.
- Nejistotu měření zapříčiněnou nepřesnou úpravou odraženého záření z okolí na měřený objekt. To způsobuje chybu v měření velikosti detekovaného infra signálu nebo jeho kolísání. Okolí buď ovlivňuje teplotu měřeného objektu, nebo jeho reflexi, taktéž musíme vzít v úvahu proudění vzduchu [7].

### 3.6 POROVNÁNÍ VÝHOD A NEVÝHOD KONTAKTNÍCH MĚŘIDEL S BEZKONTAKTNÍMI

Výhodou kontaktního měření teploty je, že se měří přímo z povrchu tělesa, dále můžeme zanedbat vliv permeability prostředí. Nevýhodou kontaktního měření teploty je, že snímačem ovlivňujeme měřený povrch, např. odvod tepla a proudění tepla v měřeném objektu. Další jsou omezená možnost snímání rychlých změn teploty a nemožnost měření teploty objektů pod napětím nebo rotujících částí [4, 7].

Výhodou bezkontaktního měření teploty je minimální ovlivnění měřeného objektu teplotním snímačem. Je možné měřit pohybuující se objekt i rychlé změny teplot, také objekt pod napětím. Měřit lze jedno místo, ale i celé plochy. Nevýhody bezkontaktního měření jsou nejistota měření teploty vyvolaná stanovením emisivity tělesa, tomu se předchází tak, že se porovnává měřené těleso s jiným povrchem o známé emisivitě, např. samolepkou s matnou černou barvou, která má velkou emisivitu a pomocí této metody porovnávání provádíme kalibraci. Dále je to nejistota měření teploty zapříčiněná prostupností prostředí (mezi snímačem teploty a měřeným povrchem) a nejistota měření teploty způsobená odrazem z okolního prostředí. Důležité je, zda se měří v interiéru nebo v exteriéru, protože nám měření venku ovlivňuje voda, např. mlha, déšť, vlhkost, prach, oslunění, rychlost větru atd.[4, 7, 12].

### 3.7 VYUŽITÍ BEZKONTAKTNÍHO MĚŘENÍ VE VÝROBĚ

Až 75 % z celkových geometrických chyb dílce může být vyvolána působením teplot a v současnosti je kladen kritický požadavek na vysokou přesnost výroků. Používají se různá média k regulaci rozložení teploty obráběcích strojů, stejně jako okolní teploty v dílně. K chlazení se využívá chladících tekutin, u nichž jsou velmi důležité materiálové vlastnosti, které ovlivňují konstrukční a energetickou účinnost chladicího systému. V současné době výrobci obráběcích přístrojů přebírají zodpovědnost za kontrolu tepelně indukovaných posunů. Stalo se tak, protože si uživatelé obráběcích strojů uvědomili, že srovnatelné stroje mají významně odlišné teplotní chyby. Pokrok v tomto odvětví průmyslové výroby lze vidět díky nejnovějším mezinárodním standardům. Zejména pokles cen pyrometrických měřících zařízení jako jsou infračervené kamery vede k novým možnostem při analýze tepelného chování obráběcích strojů. Bezkontaktní měřidla se využívají nejen ke kontrole teploty stroje, ale i k výzkumu a vývoji vedoucích k přesnějším obráběcím strojům [14].

Volba správného systému měření závisí na zdrojích chyb. Vnější vlivy prostředí, jako je teplota dílny, obecně vedou ke zpomalení změny teplot obráběcích strojů, ale ovlivňují objemový výkon. Vnitřní vlivy, jako je teplo generované z ložisek a vodících drah, vede k lokální deformaci struktury obráběcích strojů, a proto vede k posunutí, které mění objemový výkon částečně. Dislokace způsobené vnitřním zdrojem tepla jsou méně předvídatelné a mohou se měnit rychleji než ty venkovní [14].

Pomocí termokamery se odhalují mechanické závady, např. úniky maziv, problémy se sousostí, přehřívání motoru, opotřebením válce, přetížení čerpadla, přehřívání hřídele motoru, přehřívání ložiska atd. Pomocí termokamery se dá předejít nákladným škodám a zajistit plynulost výroby včasnou výměnou vadné součástky [12].

### 3.8 DETEKTORY PRO BEZDOTYKOVÉ MĚŘENÍ TEPLoty

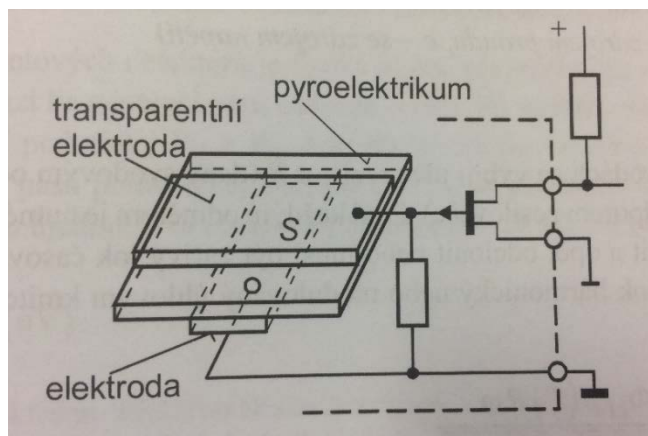
Funkcí detektorů je absorbovat infračervené záření a realizovat jeho transformaci do elektrického signálu, který je dále převáděn pomocí softwaru a dalších součástí na data, např. na údaj teploty na displeji přístroje nebo termovizní snímek. Detektor je nejdůležitější část každého bezkontaktního měřícího přístroje. Významnými parametry je časová konstanta, po kterou musí být detektor podroben tepelnému záření, aby mohlo být zrealizováno měření teploty a detektivita, nebo jinak citlivost, která je dána vztahem mezi plochou a výkonovým ekvivalentem detektoru [12].

#### 3.8.1 TEPELNÉ DETEKTORY

Nejpoužívanější detektory v radiačních teploměrech jsou tepelné detektory. Při vstřebávání fotonů se v detektorech zahřívá citlivá součást detektoru a vstřebovaná energie se hodnotí nepřímo pomocí snímačů teploty. Tepelné detektory můžeme ještě dělit na termoelektrické, pyroelektrické a bolometrické [7, 11, 12].

### 3.8.2 PYROELEKTRICKÉ DETEKTORY

Pyroelektrické detektory využívají spontánní polarizace neboli generování elektrického náboje feroelektrických krystalických materiálů zapříčiněné změnou teploty. Nejčastějším materiálem je keramika na bázi titaničitanu a zirkoničitanu olovnatého. Jsou součástí kouřových detektorů, taky detektorů vzniku požáru nebo v detektorech pohybu [7, 11, 12].



Obr. 6 Pyroelektrický čip s předzesilovačem [7].

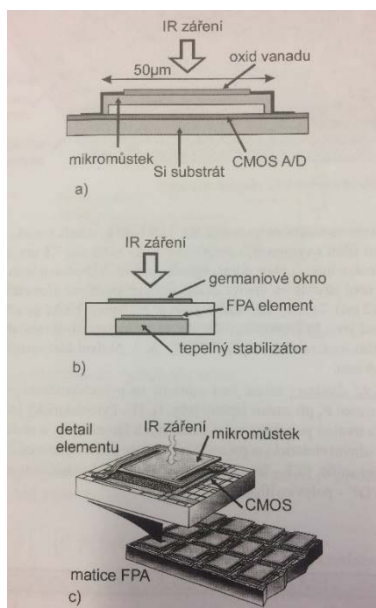
### 3.8.3 TERMoeLEKTRICKÉ DETEKTORY

Jsou to sériově řazené termoelektrické články, které využívají Seebeckův jev, kdy se mění termoelektrické napětí dvou vodičů kvůli různým teplotám ozařovaného a srovnávacího spoje [7, 11, 12].

### 3.8.4 BOLOMETRICKÉ DETEKTORY

Fungují na principu měnění se elektrického odporu v závislosti na změně teploty. Vstřebané záření zapříčiní změnu teploty odporového senzoru a tím i změnu jeho elektrického odporu [7, 11, 12].

V dnešní době se často používají mikrobolometrické pole. Ty jsou složeny z dvourozměrného pole mříčkových struktur pokrytých teplotně senzibilním odporovým materiálem, např. oxidem MgO, MnO, NiO, chalkogenidovým sklem atd. Tyto senzory jsou buď skládány do řádků nebo do ploch, které se užívají do termokamer [7, 11, 12].



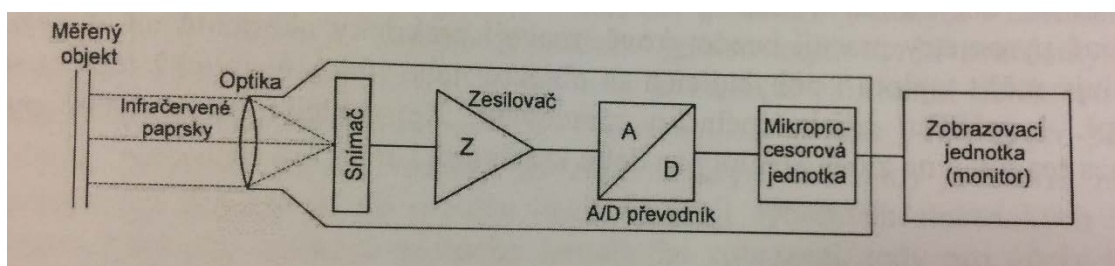
Obr. 7 Mikrobolometrická matice (a - detail elementu, b - řez umístění elementu, c - uspořádání matice [7]).

### 3.8.5 KVANTOVÉ DETEKTORY

Kvantové detektory se od tepelných odlišují procesem, který následuje po dopadu fotonů a to tak, že nevytvářejí teplo, ale rovnou mění fotony na elektrický signál vytvořením párů elektron-díra. Kvantové detektory jsou tím pádem polovodičové detektory a vyrábí se z materiálů Si, Ge, PbS, Te, InSb atd. Nevýhodou kvantového detektoru je silné ovlivnění měření při pokojové teplotě rušením vycházejícím zevnitř součástky, proto je nezbytné tento detektor chladit na nízké teploty [7, 11, 12].

## 3.9 PYROMETRY

Pyrometr je přístroj, který skenuje emitované infračervené záření ze skenovaného místa, bodu na povrchu tělesa, kdy nám na displeji ukazuje teplotu, která odpovídá teplotě v měřeném bodu. Pyrometry se dále dělí na jasové, radiační, barvové, pásmové a infračervené [7, 11, 12].



Obr. 8 Blokové schéma infračerveného pyrometru [11].

### 3.9.1 JASOVÉ SPEKTRÁLNÍ PYROMETRY

U jasových pyrometrů se porovnává jas ze srovnávacího zdroje pyrometru s jasnem měřeného tělesa a toto srovnávání se provádí okem nebo automaticky, kdy měřená teplota je vždy nižší

než skutečná teplota. Dále se dělí dle možnosti měnit jas přístroje na přístroje s proměnným jasnem, kde je indikátorem teploty žhavicí proud žárovky, a přístroje se stálým jasnem porovnávacího zdroje, kde se jas žárovky upravuje filtrem s nastavitelnou absorpcí, nebo bez ní. V tom případě se vkládá klínový šedý filtr, dokud se nedosáhne stejného jasů, jako je jas měřeného tělesa [11].

### 3.9.2 RADIACNÍ (ÚHRNNÉ) PYROMETRY

Radiační (úhrnné) pyrometry teoreticky měří teplotu dle Stefan-Boltzmannova zákona, to nám dovoluje vyhodnocovat teplotu v rozsahu vlnových délek  $\lambda=0$  až do  $\lambda=\infty$ . Požadavku měření v celém spektru vyhovují pouze tepelné detektory. Nejsme ale schopni vyrobit detektor s ideální spektrální pohltivostí, a proto je naše měření omezeno, a to od 0,4  $\mu\text{m}$  cca do 20  $\mu\text{m}$ . Velké chyby mohou vznikat, jestliže se nepřekryje celé zorné pole měřeným povrchem [7, 11, 12].

### 3.9.3 PÁSMOVÉ (VÍCEPÁSMOVÉ) PYROMETRY

Pásmové pyrometry jsou schopny měřit jenom v úzkém pásmu vlnových délek (10 nm – jednotky milimetru), to znamená, že měří záři na povrchu tělesa ve stanoveném rozsahu vlnových délek. Pásmo je vymezeno spektrální citlivostí kvantového detektoru záření, spektrální propustností optiky a optických filtrů, spektrální odrazivostí zrcadel u tepelných i kvantových detektorů. Výhodou je, že s nimi lze měřit malá tělesa, nízké teploty (od  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) a rychle reagují na změnu teploty, proto jsou v dnešní době nejpoužívanějšími detektory [7, 11, 12].

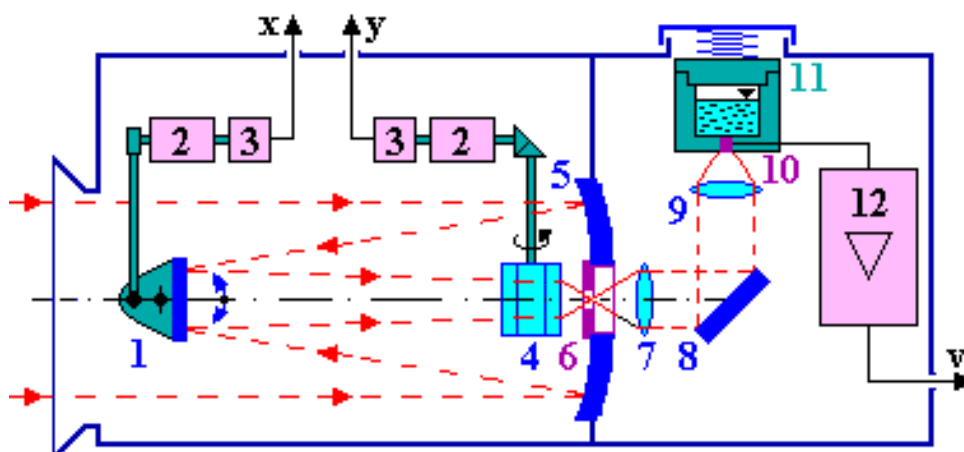
### 3.9.4 BARVOVÉ PYROMETRY

Fungují na podobném principu jako pyrometry jasové, rozdíl je v tom, že nepotřebují přesnou spektrální emisi, ale jenom interval, ve kterém se pohybují. Pracují s chybou menší než 3 %, jsou vhodné pro předměty, kterým se během měření mění emisivita. Barevnou teplotu určujeme na základě barevného vjemu způsobeného smíšením dvou jednobarevných záření, nebo srovnáním (poměrem) jasů ve dvou různých spektrálních oblastech [7, 11, 12].

## 3.10 INFRAČERVENÁ TERMOGRAFICKÁ KAMERA

Je to přístroj, který stejně jak pyrometr skenuje emitované infračervené záření tělesa, kterou však prezentuje na displeji jako reálný obraz tělesa, kde jsou znázorněny rozdílné teploty barvami, a to buď černobíle, nebo barevně, kdy stupně šedi nebo barevné odstíny odpovídají teplotnímu rozložení [7, 11, 12].

V praxi měření probíhá tak že dopadající infračervené záření detektor převádí na elektrický signál, následující obvody ho zesílí a analogově nebo digitálně zpracují do podoby vhodné pro záznam nebo zobrazení na displeji. Obraz zobrazuje rozložení teplot pomocí termogramu [7, 11, 12].



Obr. 9 Schéma termovizní kamery (1 rozmitací zrcadlo, 2 motorky, 3 fotoelektrické vysílače, 4 křemenný osmiboký hranol, 5 duté zrcadlo, 6 clona, 7, 8, 9 optická soustava, 10 kvantový detektor, 11 termoska na kapalný dusík, 12 předzesilovač) [17].

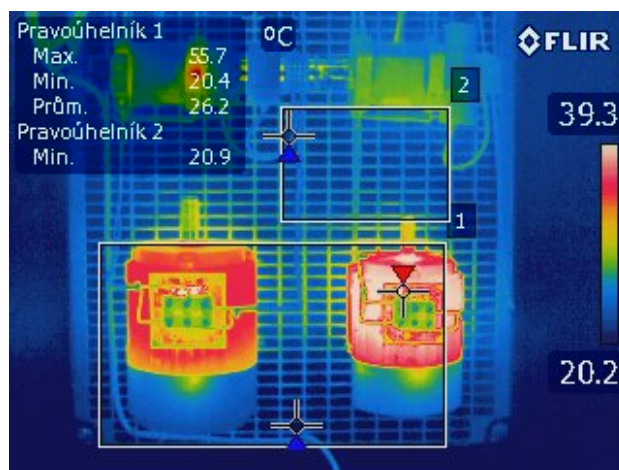
Termovize můžeme dělit na systémy s opticko-mechanickým rozkladem obrazu, kdy se snímají jednotlivé body objektu řízenou optickou osou. Přístroje s tímto systémem se už nevyrábějí, místo nich je tu systém, se kterým bude měřena experimentální část této práce. Systém aplikuje chlazené a nechlazené maticové mikrobolometrické a kvantové detektory. Chlazení probíhá pomocí Stirlingova chladiče v hermeticky uzavřeném chladícím systému se dvěma písty a s heliem. Signál se zpracovává přímo na čipu pomocí multiplexerů, elektrických členů, které pracují na principu přepínačů, kdy je podle řídicího signálu přiváděn na výstup jeden ze vstupních signálů, a převodníků v každém řádku matice [7, 11, 12].

Optika v termokamerách se v dnešní době skládá ze spojky z germania bez možnosti optického zoomu. Povrch čočky je pokryt antireflexivní vrstvou kvůli možnému odražení infračerveného záření [6, 7, 11, 12].

### 3.10.1 MĚŘÍCÍ FUNKCE TERMOKAMERY

Měřicí funkce termokamery jsou hlavní měřicí nástroje termokamery a jsou využívány k analýze problému buď na displeji termokamery či tabletu, nebo později na počítači při podrobné analýze a vytváření zprávy [25].

Jednou z funkcí je měřicí funkce oblast. Po určení oblasti na displeji nám termokamera stanoví minimální, maximální a průměrnou teplotu v námi určené oblasti. Zobrazí s i body, určující polohu s minimální a maximální teplotou. Této funkce můžeme využít v praxi například v průmyslu, protože ukazuje, která část může být z hlediska přetížení nebo poškození nejvíce ohrožena [25].



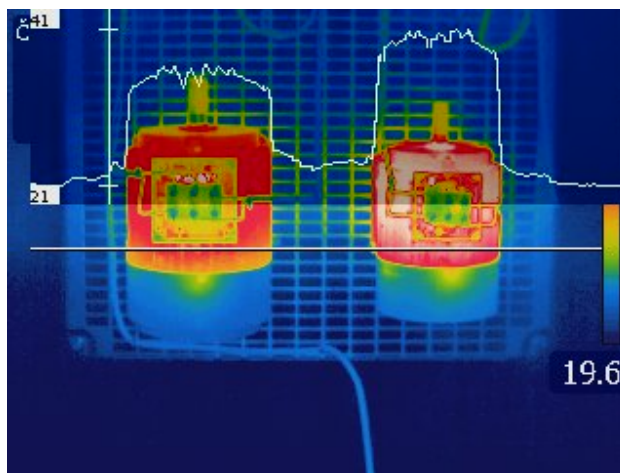
Obr. 10 Obrázek s určenými dvěma oblastmi, kde v levém horním rohu zobrazuje termokamera maximální, minimální a průměrnou teplotu [25].

Další užitečná funkce je měření teploty v bodě. Tato funkce je v každé termokameře a slouží k měření teploty přímo v terénu přidáním několika bodů, přesněji malých kruhových oblastí [25].



Obr. 11 Pokročilejší termokamery umožňují měření ve více bodech [25].

Pomocí funkce teplotní profil lze zobrazit průběh teploty na přímce a to jako graf. Využijeme ji během analýzy teplotní homogenity a rozsahu poruch. Díky této funkci můžeme porovnávat teplotu po celém povrchu a zjistit případné odchylky [25].



Obr. 12 Termogram s funkcí „teplotní profil“ s hodnotami teplot vykreslenými v grafu [25].

### 3.10.2 TERMOKAMERA FLIR T440

Termokamera, se kterou bude prováděno měření v praktické části, je značky FLIR a nese označení T440. Je určena především k měření pohonů, fotovoltaických panelů a výrobních strojů. Termokamera má všechny již zmíněné funkce, které usnadňují měření, tedy funkci oblast, měření teploty až v pěti bodech i teplotní profil. Součástí je i vestavěný digitální fotoaparát, který jednak umožňuje pořizovat skutečné snímky objektu, ale slouží i k zamíření termokamery na měřený objekt. V termokameře lze nastavit několik druhů termogramů a frekvence pořizování snímků, nebo může točit video, díky kterému můžeme sledovat teplotní gradient. Má naklopitelný objektiv s detektorem, autofokus a motorizované ostření [26].



Obr. 13 Termokamera FLIR T440 [26].

### 3.10.3 FLIR TOOLS

Software FLIR Tools je primární program, který je součástí dodávky ke každé termokameře FLIR a je to software, který byl použit ke zpracování výsledků z termokamery v praktické části této práce. V tomto softwaru lze editovat a zpracovávat snímky z termokamery (znázorňovat informace o snímku, jako čas pořízení a typ termokamery, doplnění libovolného počtu měřících bodů, oblastí, delta funkcí pro stanovení teplotních rozdílů, vložení izotermie, apod.), tvořit jednoduché protokoly, lze si zvolit několik šablon a stylů vytváření protokolů a exportovat snímky z termokamery na disk počítače [23].

Po propojení Termokamery FLIR přes USB s počítačem má termokamera vlastnost jako HID zařízení, tedy veškerý obsah i ovládání termokamery a nastavování lze provádět přes počítač. Velkou výhodou je, že termogramy jsou ve formátu JPG, tzn. že je termogram zobrazitelný v libovolném prohlížeči obrázků [23].



Obr. 14 Na obrázku je vrchní část rámu z experimentu č.1, obrázek je upravován v programu FLIR Tools a jsou na něm měřící body (Sp1-Sp6), Dále je v něm umístěna křivka (Li1), která v kartě vlevo ukazuje maximální, minimální a průměrnou teplotu, vlevo nahoře je obdélník (Ar1), tedy vybraná oblast, ze které program, stejně jako u přímky, ukazuje minimální, maximální a průměrnou teplotu

## 4 PRAKTICKÁ ČÁST

### 4.1 ZADÁNÍ

Na dvou experimentech ověřte teoretické znalosti v praxi, s termokamerou značky FLIR T440 a programem od stejné společnosti provedte měření, při kterých se s termokamerou naučíte pracovat a následně budete vyhodnocovat termogramy. Určete teoretickou hodnotu emisivity měřeného tělesa a získaná data porovnejte s výsledky kontaktního měření. V první úloze budete měřit simulaci zahřívání na rámu obráběcího stroje, který byl nahrazen upínacími kostkami, a ve druhé tepelný gradient kuličkového šroubu v zatíženém stavu.

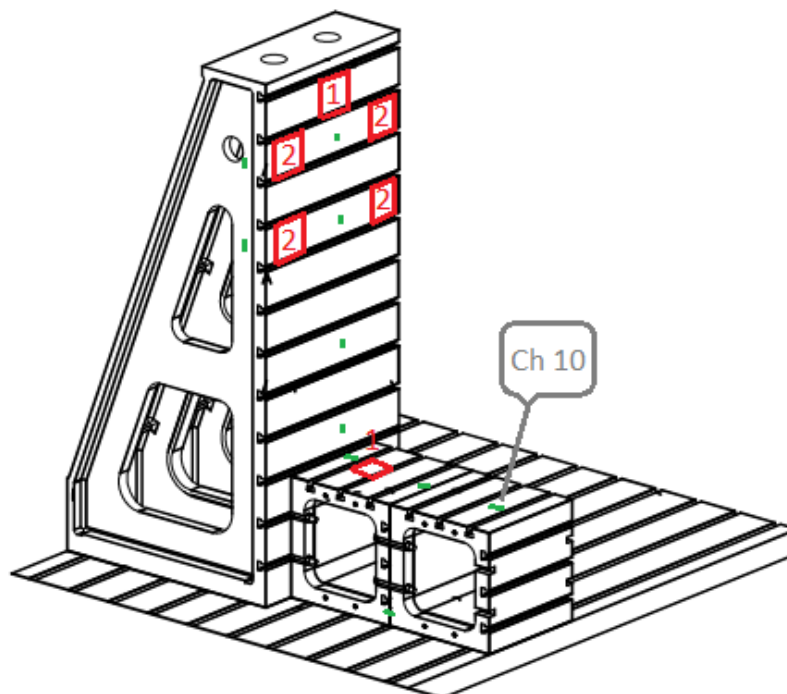
### 4.2 SEZNAM POUŽITÉHO VYBAVENÍ

- Termokamera značka FLIR T440

Základní údaje	
Rozlišení IR detektoru	320x240 bodů, 60 Hz
Zorný úhel objektivu	25° x 19°, zaostření od 0,4 m
Teplotní citlivost	<0,045 °C
Rozsah měřených teplot	-20 °C až +1 200 °C
Přesnost	±2 °C nebo ±2 %
Nastavitelná emisivita	0,01 až 1

- Stojan na Termokameru značka Manfrotto
- Rezistory-4x150W, 2x300W
- Kontaktní čidla Pt1000/3850 (přesnost ±0,1 °C)
- Pasta DOW CORNING DC340
- Program FLIR Tools
- Počítače
- Datalogger-National Instruments řada NI cRIO-9022
- Digitální vlhkoměr
- Líh-očistění rámu
- Páska emisivita=0,96
- Sprej emisivita=0,96
- Izolační páska
- Konstrukce upínacích kostek reprezentující rám výrobního stroje
- Sestava složená z kuličkového šroubu, rámu, matice a pohonu

### 4.3 EXPERIMENT Č.1 SIMULACE TEPELNÉHO ZATÍŽENÍ RÁMU OBRÁBĚCÍHO STROJE



Obr. 15 Schéma rozmístění kontaktních čidel (zeleně) a rezistorů (rezistory 1-300 W, 2-150W) a čidla 10, na kterém bylo provedeno porovnání kontaktního a bezkontaktního měření, termokamera byla nainstalována 2 metry od rámu ve výšce 1,8metru

#### 4.3.1 POSTUP PŘÍPRAVY EXPERIMENTU

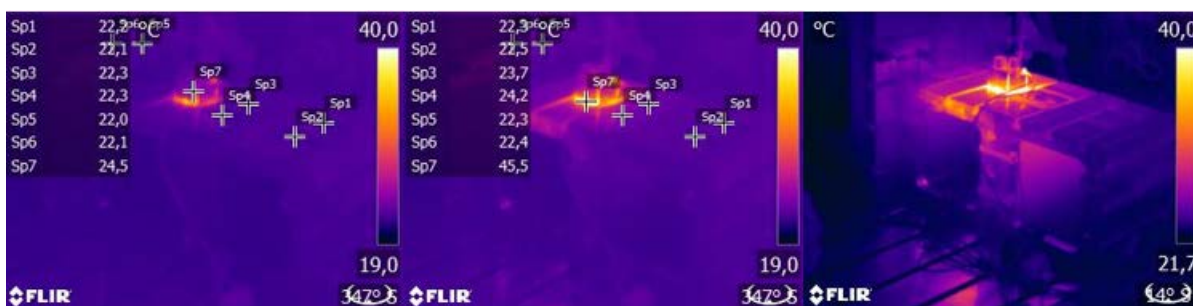
Před začátkem experimentu byla ocelová konstrukce reprezentující rám výrobního stroje, která byla složena z upínacích kostek, zbavena nečistot pomocí lihu. Dalším krokem byla příprava rezistorů, které byly očištěny, na plochu mezi rezistor a teplovodivou desku byla nanášena teplovodivá pasta po celé ploše styku, aby docházelo k co nejlepšímu přenosu tepla. Přichystanými šrouby byl rezistor připevněn k desce a přimontován ke konstrukci rámu. Mezi rám a teplovodivou desku byla přidána teplovodivá pasta. Aby se teplo z rezistorů přenášelo pouze do rámu, byl celý rezistor i s deskou odizolován vatou a hliníkovým krytem. Posledním krokem přípravy rezistorů byla zkouška jejich funkčnosti a zjištění jejich skutečných výkonů.

Dalším krokem byla příprava a montáž kontaktních čidel teploty. Kontaktní čidla byla na kontaktní ploše odmaštěna a potřena teplovodivou pastou. Pomocí magnetů byla čidla přidělána na osy rámu a zapojena do sběrnice, která byla napojena na počítače, na kterých bylo prováděno měření. Čidla byla kvůli okolním vlivům a jejich ovlivňování měření obalena vatou.



Obr. 16 Připravený experiment č.1 Simulace tepelného zatížení rámu výrobního stroje. Na obrázku je termokamera namířená na část měřeného rámu.

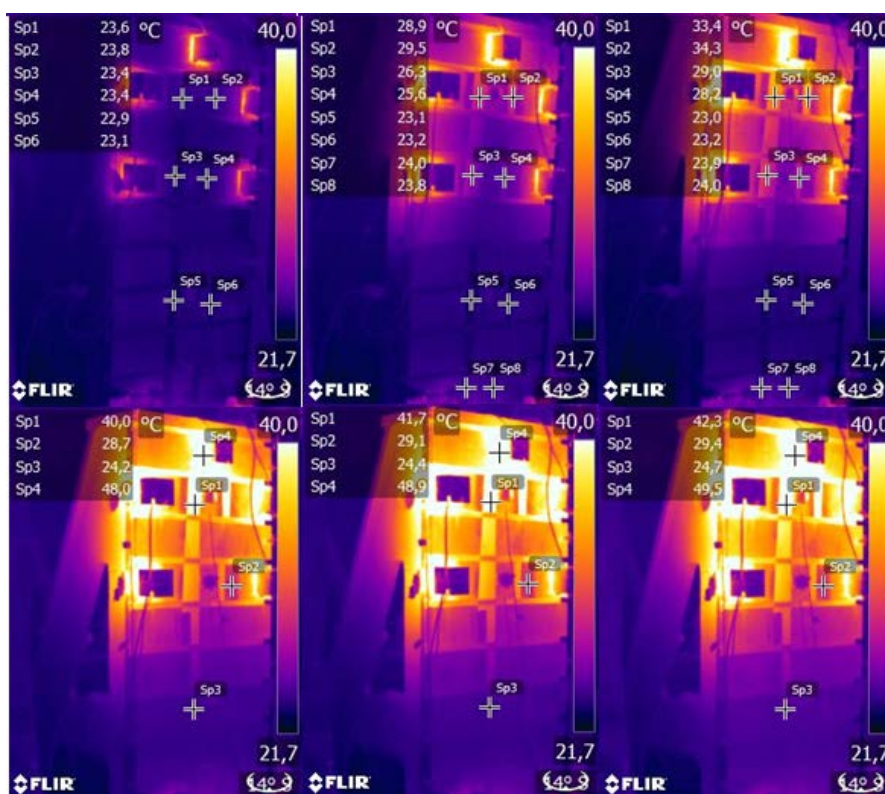
Poslední byla umístěna do potřebné vzdálenosti termokamera, vzdálenost byla zvolena taková, aby zabírala co největší část měřeného rámu, ale aby nebyla příliš daleko a nedocházelo k ovlivňování měření probíhajícími experimenty v laboratoři. Poté byla kamera napojena na počítač a byly změřeny okolní vlivy a přednastaveny v termokameře. Posledním krokem přípravy termokamery byla úprava povrchu pro měření termokamerou nanesením pásky a spreje v blízkosti kontaktních čidel kvůli emisivitě.



Obr. 17 Průběh zahřívání spodní části rámu

### 4.3.2 MĚŘENÍ TEPELNÉHO ZATÍŽENÍ

Začátek měření byl stanoven na 11:42 a konec měření na 15:32, interval pořizování fotografií na termokameře na jednu fotografii za 5 minut. Kontaktní snímače byly nastaveny na snímání teploty každých 10 sekund. Termokamera byla namířena na spodní část rámu a byl spuštěn Rezistor č. 1. Po 45 minutách byla termokamera namířena na horní část rámu a byly zapnuty zbývající rezistory. Po celý čas byla kontrolována čidla i správný chod kamery. Na konci měření byly odpojeny rezistory a byla odpojena čidla i termokamera.



Obr. 17 Průběh zahřívání vrchní části rámu

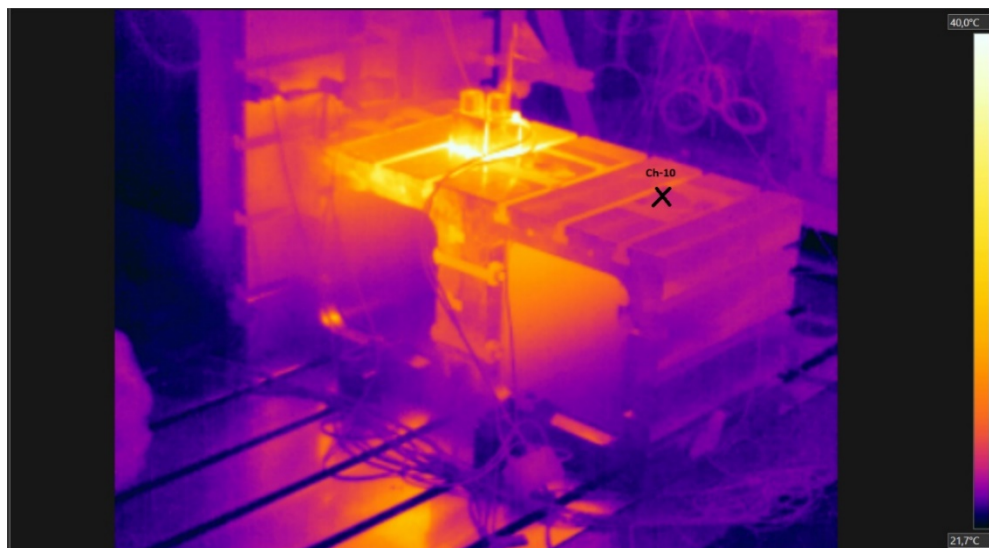
### 4.3.3 VÝSLEDKY A VYHODNOCENÍ EXPERIMENTU 1

Na začátku byla určena emisivita, kdy se v programu FLIR Tools porovnávaly teploty na termografu. K určení emisivity bylo využito funkce měření teploty v bodě a to tak, že bylo namířeno na místo, kde byla páska s danou emisivitou, která se nastavila v termokameře, a určila se teplota tohoto místa. Poté bylo namířeno na místo těsně vedle pásky na povrch rámu. Naměřená teplota se porovnála s teplotou pásky. V programu FLIR Tools byla snižována emisivita na druhém termografu, dokud nebyla teplota stejná, jako při prvním určení teploty v místě pásky. Zjištěná emisivita byla porovnána s tabulkovými hodnotami.

Tab. 2 Porovnání emisivit experimentu č.1

Naměřená emisivita rámu	0,96
Emisivita z tab. [1]	0,7–0,95

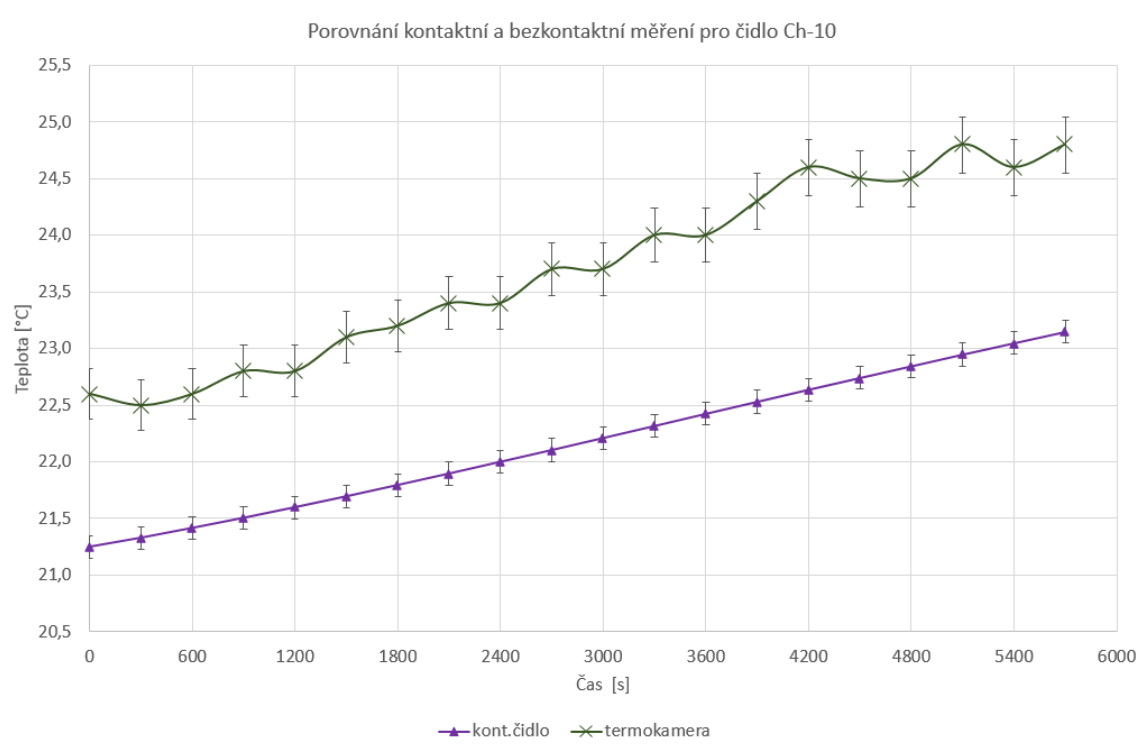
Porovnání kontaktního a bezkontaktního měření bylo provedeno v oblasti, kde bylo instalováno čidlo Ch-10 s přesností  $\pm 0,2$  °C. Byly vytvořeny grafy závislosti času na teplotě pro toto kontaktní čidlo a místo měřené termokamerou v bezprostřední blízkosti k tomuto čidlu.



*Obr. 18 Umístění čidla Ch-10*

Nevýhodou bezkontaktního měření je vysoká nepřesnost ( $\pm 2$  °C), a to se ukázalo i v tomto experimentu. Při měření působilo příliš mnoho okolních vlivů, protože s námi v laboratoři byl současně prováděn jiný experiment a pohybovalo se v okolí hodně lidí, tzn. že tam vznikala průvan a tepelné záření cizího experimentu ovlivňovalo odraženou teplotu rámu. Kontaktní měřiče nebyly okolním rušením ovlivněny, protože byly zaizolovány vatou.

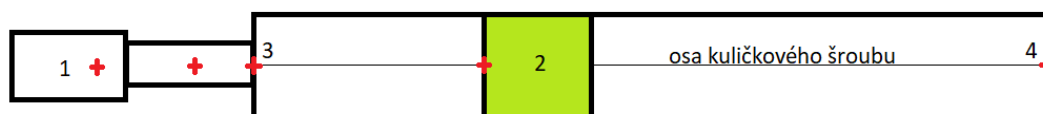
Dalším negativem bylo vyhodnocování termogramu v softwaru FLIR Tools. Při vyhodnocování mi chyběla funkce zoom, abych si mohl přiblížit části v termogramu a přesněji umístit měřicí bod, nebo alespoň mřížka, díky které by bylo zaměřování jednodušší.



Obr. 19 Porovnání kontaktního a bezkontaktního měření experiment č. 1

V grafu lze vidět, že termokamera na začátku měření provedla první měření s chybou přibližně 1,35 °C a s touto chybou měřila dál. Kontaktní snímače jsou velmi přesné a ve výzkumném ústavu velmi často používané, takže jsme jejich hodnotu brali jako referenční.

#### 4.4 EXPERIMENT Č.2 MĚŘENÍ TEPLOTNÍHO GRADIENTU KULIČKOVÉHO ŠROUBU

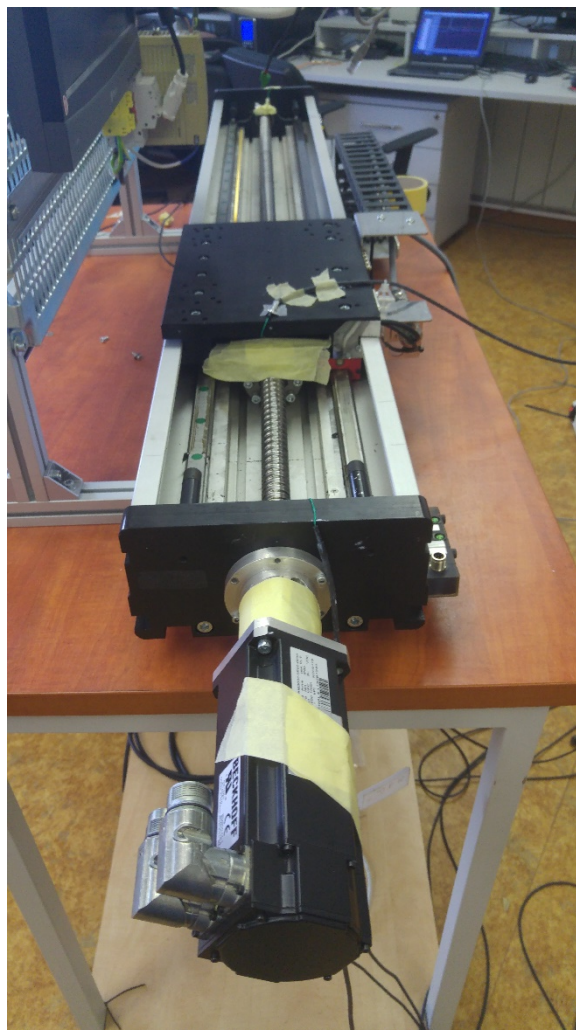


Obr. 20 Schéma kuličkového šroubu (1-zdroj, 2-matice, 3 a 4-ložiska) a rozmístění kontaktních snímačů teploty (vyznačeno červeně)

##### 4.4.1 POSTUP PŘÍPRAVY EXPERIMENTU

Měřené součásti kuličkového šroubu (matice, ložiska, pohon) byly očištěny od nečistot. Následně byla nainstalována kontaktní čidla, ta se pomazala teplovodivou pastou a byla přichycena k měřené součásti izolační páskou. Poté byla zapojena do sběrnice a sběrnice do počítače. Vedle čidel byla nalepena páska s danou emisivitou 0,96 kvůli bezkontaktnímu měření. Nakonec byla umístěna termokamera, ta byla instalována na stoleček, aby snímala co největší část kuličkového šroubu a měřených součástí. Kamera byla umístěna 2 metry

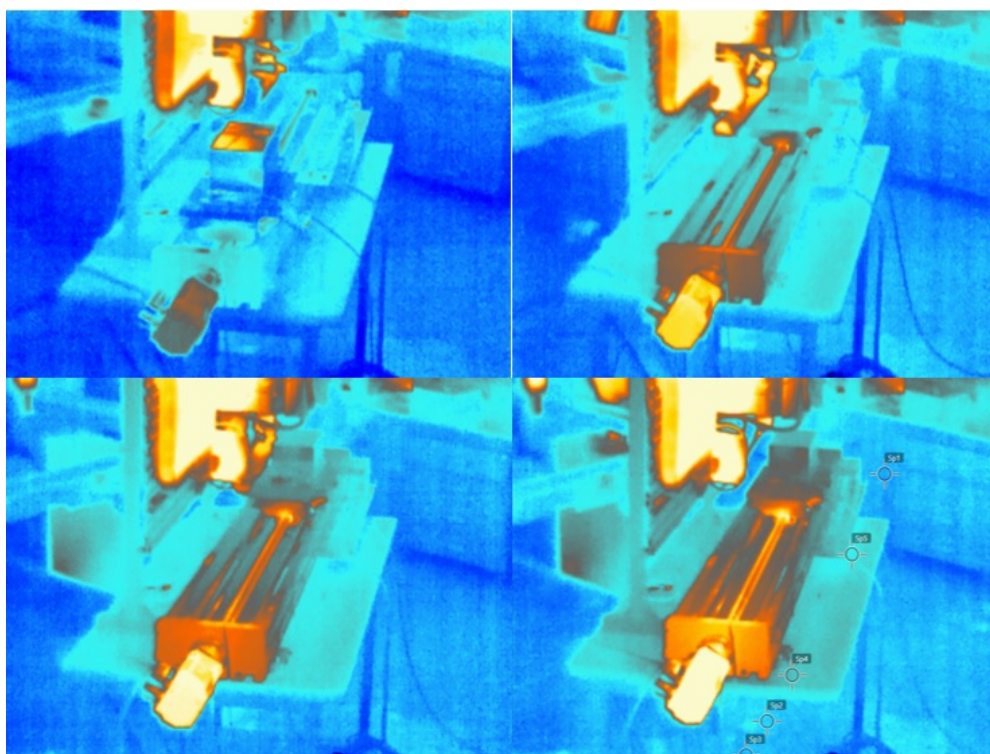
od kuličkového šroubu do výšky 1,8 metru a natočena tak, aby měřila celou sestavu kuličkového šroubu. Poté byla napojena na počítač, na kterém probíhalo měření a vyhodnocování.



*Obr. 21 Kuličkový šroub před zahájením měření*

#### **4.4.2 MĚŘENÍ TEPelnÉHO ZATÍŽENÍ**

Kuličkový šroub byl spuštěn v čase 16:17, ale měření kvůli špatně nastavené rychlosti začalo až v 16:20. Snímky z termokamery byly pořizovány každé 2 minuty a kontaktní snímače byly nastaveny na opakování měření každou sekundu. V čase 17:20 byla rychlost kuličkového šroubu zvýšena a měření bylo ukončeno v čase 17:30.



Obr. 22 Průběh šíření teploty v kuličkovém šroubu

#### 4.4.3 VÝSLEDKY A VYHODNOCENÍ EXPERIMENTU 2

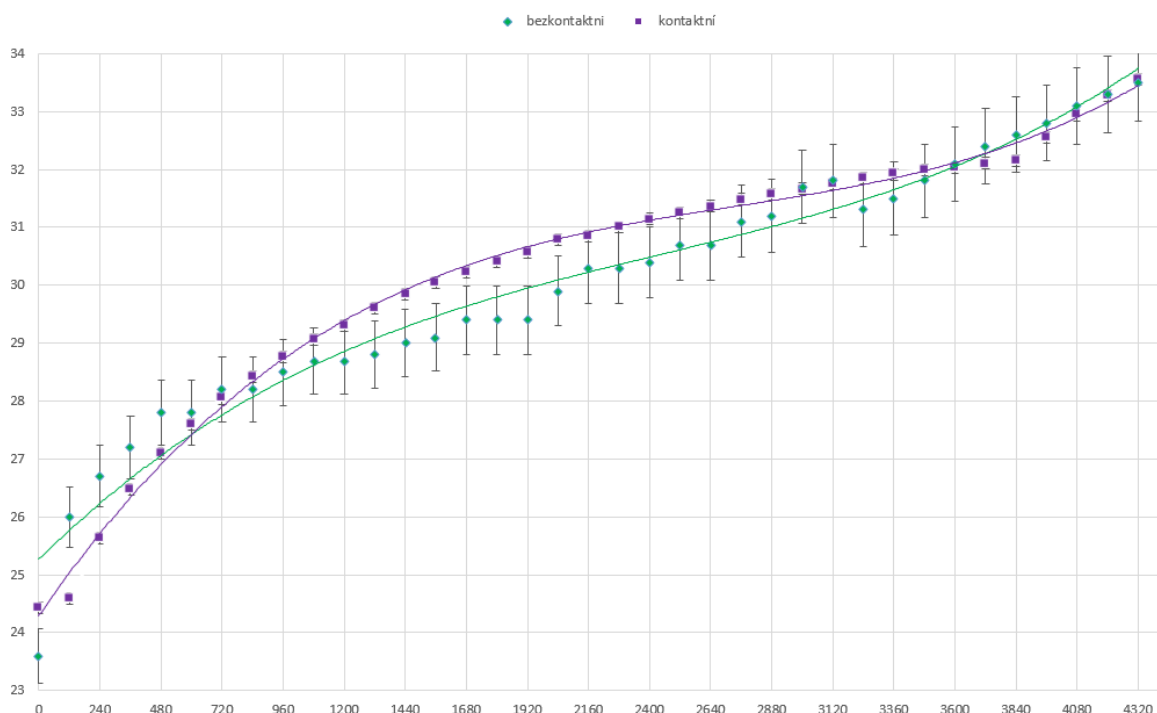
Emisivita kuličkového šroubu byla zjištěna stejným způsobem jako u experimentu č. 1.

Tab. 3 Porovnání emisivit experimentu č.2

Naměřená emisivita kul. šroubu	0,69
Emisivita z tab. pro mat. 42CrMo4	0,7-0,9

Porovnání kontaktního a bezkontaktního měření bylo provedeno v místě, kde bylo instalováno čidlo ch-0, tedy na zdroji kuličkového šroubu. Byly vytvořeny grafy závislosti teploty na čase pro toto kontaktní čidlo a místo měřené termokamerou mířící na toto čidlo. Teplota kuličkového šroubu byla určena na 31 °C na konci měření.

## POROVNÁNÍ KONTAKTNÍHO A BEZKONTAKTNÍHO MĚŘENÍ EXPERIMENT Č.2



Obr. 23 Porovnání kontaktního a bezkontaktního měření experiment č. 2

Jak je vidět v grafu, výsledky experimentu 2 vyšly mnohem lépe než z experimentu 1, křivka bezkontaktního měření dokonce dvakrát protíná křivku kontaktního. Experiment 2 totiž nebyl prováděn v laboratoři, která byla uzavřena, a kromě našeho experimentu v místnosti nikdo jiný nebyl.

## ZÁVĚR

Cílem práce byla řešerše na téma bezkontaktního měření, využití tohoto způsobu měření v odvětví výrobních strojů, které se v poslední době velmi rychle rozvíjí, a praktická úloha s cílem seznámení se s termokamerou a vyhodnocováním měření.

Teoretická část se skládá ze tří částí, první část obsahuje definice a pojmy, charakterizaci teploty, stupnice a vysvětluje pojmy technická diagnostika a termografie. Druhá část se věnuje kontaktnímu měření teploty a jsou zde uvedeny příklady kontaktních snímačů. Třetí část pojednává o bezkontaktním měření a záření, kde je vysvětlen princip emisivity, rozdělení bezkontaktních měřičů na pyrometry a termovize a jejich další dělení a principy, jakými měří teplotu. Na závěr teoretické části práce je shrnuta charakteristika termokamery FLIR T440, se kterou bylo prováděno měření praktické části a programu FLIR Tools, ve kterém byly vyhodnocovány výsledky a upravovány termogramy.

Praktická část byla rozdělena na dvě praktické úlohy, ve kterých bylo demonstrováno využití bezkontaktního měření na částech výrobních strojů. V první úloze byl měřen teplotní gradient na náhradě rámu výrobního stroje, která byla poskládána z upínacích kostek, ve výzkumném centru Intemac v Kuřimi, na kterém se simulovalo tepelné zatížení od pohonů. Byla určena emisivita, která se porovnávala s tabulkovými hodnotami pro měřený materiál, a byly zjištěny menší odchylky, které byly zapříčiněny okolním rušením, hlavně probíhajícím sousedním experimentem. Dále byly porovnány hodnoty kontaktního měření s bezkontaktním měřením. Druhé měření proběhlo v laboratoři školy a byl měřen teplotní gradient v kuličkovém šroubu. Stejně jako u první úlohy, i zde se určila a porovnávala emisivita s tabulkovými hodnotami a porovnávalo se kontaktní a bezkontaktní měření.

Na obou úlohách jsem v praxi pozoroval výhody a nevýhody obou měření. U kontaktního to byla větší přesnost měření, ale nebylo možné pozorovat, jakým způsobem se teplo šíří, nebo která místa jsou zatěžována nejvíce. Přestože mělo bezkontaktní měření menší přesnost, tak vidím jako velkou výhodu možnost pozorovat právě zmiňované šíření tepla v měřených součástech a u druhé úlohy možnost měření teploty rotujícího kuličkového šroubu.

V praktických úlohách jsem ověřili, že je bezkontaktní měření vhodné ve výrobních procesech, kde je nutné kontrolovat šíření teploty ve strojích, jejich částech, příp. výrobcích, nebo kde je nutné sledovat teplotní gradient v rotujících nebo špatně dostupných částech pro kontaktní měřidla. Kde je ovšem potřeba měřit přesnou teplotu, tak bezkontaktní měření nedoporučuji.

## POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] BROWNSON, Jeffrey R.S. *Laws of Light. Solar Energy Conversion Systems* [online]. Elsevier, 2014, s. 41 [cit. 2017-01-14]. DOI: 10.1016/B978-0-12-397021-3.00003-X. ISBN 9780123970213. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B978012397021300003X>
- [2] CELKO, Joe. *Temperature Scales. Joe Celko's Data, Measurements and Standards in SQL*. Elsevier, 2010, 211. DOI: 10.1016/B978-0-12-374722-8.00032-3. ISBN 9780123747228. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780123747228000323>
- [3] FUKÁTKO, Jaroslav, Jiří ŠINDELKA a Tomáš FUKÁTKO. *Teplo a chlazení v elektronice*. Praha: BEN - technická literatura, 1997. ISBN 80-860-5624-4.
- [4] HAGART-ALEXANDER, C. *Temperature Measurement. Instrumentation Reference Book* [online]. Elsevier, 2010, s. 269 [cit. 2017-01-14]. DOI: 10.1016/B978-0-7506-8308-1.00021-8. ISBN 9780750683081. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780750683081000218>
- [5] HAVENS, Kirk J. a Edward J. SHARP. *Thermal Imagers and System Considerations. Thermal Imaging Techniques to Survey and Monitor Animals in the Wild* [online]. Elsevier, 2016, s. 101 [cit. 2017-03-01]. DOI: 10.1016/B978-0-12-803384-5.00007-5. ISBN 9780128033845. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780128033845000075>
- [6] CHUDÝ, Vladimír. *Meranie technických veličín*. V Bratislave: Slovenská technická univerzita v Bratislave, 1999. Edícia vysokoškolských učebníc. ISBN 8022712752.
- [7] KREIDL, Marcel. *Měření teploty: senzory a měřicí obvody*. Praha: BEN - technická literatura, 2005. Senzory neelektrických veličín. ISBN 80-730-0145-4.
- [8] KREIDL, Marcel a Radislav ŠMÍD. *Technická diagnostika: senzory, metody, analýza signálu*. Praha: BEN - technická literatura, 2006. Senzory neelektrických veličín. ISBN 80-730-0158-6.
- [9] LIRA, Ignacio. *Evaluating the measurement uncertainty: fundamentals and practical guidance*. Philadelphia, Pa.: Institute of Physics Pub., 2002. ISBN 978-075-0308-403.
- [10] PATIENCE, Gregory S. *Temperature. Experimental Methods and Instrumentation for Chemical Engineers* [online]. Elsevier, 2013, s. 145 [cit. 2017-01-14]. DOI: 10.1016/B978-0-444-53804-8.00005-8. ISBN 9780444538048. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780444538048000058>
- [11] SOUKUP, Josef a Jan SKOČILAS. *Technická měření*. 2., opr. a dopl. vyd. Ústí n. L.: Univerzita J.E. Purkyně v Ústí nad Labem, 2014. ISBN 978-80-7414-730-2.
- [12] VAVŘIČKA, Roman. *Bezkontaktní způsoby měření teploty*. Praha: Společnost pro techniku prostředí, 2013. Sešit projektanta - pracovní podklady. ISBN 978-80-02-02515-3.

- [13] ZICHOS, Horst a EDITORS. *Handbook of technical diagnostics fundamentals and application to structures and systems*. Berlin: Springer, 2013. ISBN 36-422-5850-6.
- [14] MAYR, Josef, Jerzy JEDRZEJEWSKI, Eckart UHLMANN, et al. Thermal issues in machine tools. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* [online]. 2012, **61**(2), 771-791 [cit. 2017-01-15]. DOI: 10.1016/j.cirp.2012.05.008. ISSN 00078506. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0007850612002077>
- [15] PAVELEK, M. Termomechanika: 19. Přenos tepla zářením [online]. 2006 [cit. 2012-05-09]. Dostupné z: [http://ottp.fme.vutbr.cz/users/pavelek/termo/19\\_Zareni.pdf](http://ottp.fme.vutbr.cz/users/pavelek/termo/19_Zareni.pdf)
- [16] PAVELEK, M. 2.2 Planckův vyzařovací zákon. PAVELEK, M, JANOTKOVÁ, E., ŠTĚTINA, J. Vizualizační a optické měřicí metody [online]. 2. vyd. 2007 [cit. 2012-05-09]. Dostupné z: <http://ottp.fme.vutbr.cz/~pavelek/optika/0202.htm>
- [17] PAVELEK, Milan a Eva JANOTKOVÁ. Vizualizační a optické měřicí metody: Termovizní systémy [online]. Brno, 2001 [cit. 2017-03-01]. Dostupné z: <http://ottp.fme.vutbr.cz/skripta/vlab/optika/0700.htm>
- [18] STRNAD, Radek. Možnosti kalibrace dotykových sond pro měření teploty povrchu. *Automa* [online]. 2011, č. 08 [cit. 2012-05-25]. Dostupné z: [http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id\\_document=44583](http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=44583)
- [19] STOKER, Mark R. Measuring temperature. *Anaesthesia & Intensive Care Medicine* [online]. 2005, **6**(6), 194-198 [cit. 2017-01-15]. DOI: 10.1383/anes.6.6.194.65780. ISSN 14720299. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1472029906700765>
- [20] ŠKORPÍK, Jiří. Přenos energie elektromagnetickým zářením, *Transformační technologie*, 2011-05, [last updated 2014-08]. Brno: Jiří Škorpík, [on-line] pokračující zdroj, ISSN 1804-8293. Dostupné z <http://www.transformacni-technologie.cz/prenos-energie-elektromagnetickym-zarenim.html>
- [21] WILLIAMS, David. Measuring temperature including heat and thermodynamics. *Anaesthesia & Intensive Care Medicine* [online]. 2012, **13**(3), 111-115 [cit. 2017-01-15]. DOI: 10.1016/j.mpaic.2011.12.014. ISSN 14720299. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1472029911003055>
- [22] Využití termografie v průmyslu: Informační příručka o aplikacích termografie v průmyslu. Flir [online]. 2012 [cit. 2017-03-01]. Dostupné z: [http://www.flirmedia.com/MMC/THG/Brochures/T820264/T820264\\_CZ.pdf](http://www.flirmedia.com/MMC/THG/Brochures/T820264/T820264_CZ.pdf)
- [23] FLIR TOOLS. *FLIR DODAVATEL TERMOKAMER* [online]. Praha: Workswell [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: <https://www.termokamery-flir.cz/software-flir-tools/>
- [24] FRŇKA, T., FRŇKA, V., MANGL, P. a FIŠER, T. Bezdotykové měření: Stanovení emisivity. *Zobrazování v IR* [online]. [cit. 2012-05-09]. Dostupné z: [http://www.infrazareni.wz.cz/92\\_bezdotykové/emivity.htm](http://www.infrazareni.wz.cz/92_bezdotykové/emivity.htm)
- [25] *Funkce termokamery* [online]. [cit. 2017-03-12]. Dostupné z: <http://www.termokamera.cz/princip-a-funkce/funkce-termokamery/>

- [26] *TERMOKAMERA FLIR T420, T440, T460* [online]. Praha: Workswell [cit. 2017-05-06]. Dostupné z: [http://www.termokamery-flir.cz/termokamery-flir-t4x0/?utm\\_source=adwords&utm\\_medium=ppc&utm\\_content=tk-flir-t4x0-cr&utm\\_campaign=x-tk-flir-t-cr-20.10.14&gclid=COLJ\\_7Do2tMCFQwo0wodsokPQQ](http://www.termokamery-flir.cz/termokamery-flir-t4x0/?utm_source=adwords&utm_medium=ppc&utm_content=tk-flir-t4x0-cr&utm_campaign=x-tk-flir-t-cr-20.10.14&gclid=COLJ_7Do2tMCFQwo0wodsokPQQ)

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

$e$	[J]	Velikost kvant energie
$E_{o\lambda}$	[W·cm <sup>-3</sup> ]	Hustota zářivého toku dokonale černého tělesa
$f$	[Hz]	Frekvence záření
$h$	[J·s <sup>-1</sup> ]	Planckova konstanta
$k_u$	[-]	Koeficient rozšíření
$M$	[W·m <sup>-2</sup> ]	Intenzita vyzařování
$n$	[-]	Počet naměřených veličin
$s_{\bar{x}}$	[-]	Standartní nejistota typu A
$U$	[-]	Rozšířená nejistota
$u_B$	[-]	Nejistota typu B
$u_C$	[-]	Kombinovaná standartní nejistota
$\bar{x}$	[-]	Aritmetický průměr
$x_i$	[-]	Naměřená hodnota
$\alpha$	[-]	Pohltivost v úhrnném spektru
$\lambda$	[m]	Vlnová délka