



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

# **Senzory bezpečnostních systémů na bázi elektromagnetického záření**

## **Sensors Security Systems Based on Electromagnetic Radiation**

**Dizertační práce**

**Autor:** **Ing. Rudolf Drga**

**Obor:** **Inženýrská informatika**

**Školitel:** **prof. Ing. Dagmar Janáčová, CSc.**

Zlín, 2013

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji lidem, kteří mi pomohli při práci na dizertační práci. Zejména děkuji své školitelce prof. Ing. Dagmar Janáčové, CSc. za odborné vedení, cenné rady, podnětné připomínky, pomoc a vytvoření dobrých podmínek pro vypracování dizertační práce.

Děkuji také pracovníkům Ústavu bezpečnostního inženýrství a Ústavu elektroniky a měření z Fakulty aplikované informatiky. Dále pak Ing. Hance Charvátové, PhD. a Ing. Janu Antošovi za pomoc a spolupráci při provádění experimentů, které jsou nedílnou součástí této práce.

## **ABSTRAKT**

Tato práce je zaměřena na problematiku testování senzorů bezpečnostních systémů v oblasti infračerveného záření a jeho využití v bezpečnostním průmyslu, přičemž výstupy práce mohou být také využity v předmětech Technické prostředky bezpečnostního průmyslu, Elektronické bezpečnostní systémy, které jsou náplní výuky na Ústavu bezpečnostního inženýrství Fakulty aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně.

Obsahem práce je seznámení se s principy činnosti senzorů elektromagnetického záření, pracujících v infračervené (IČ) oblasti. Jedná se především o termočlávkové, thermopile a pyroelektrické senzory a jejich použití v oblasti bezpečnostního průmyslu. V práci je proveden teoretický rozbor problematiky elektromagnetického záření v rozsahu vlnových délek 8  $\mu\text{m}$  až 14  $\mu\text{m}$  v uzavřeném prostoru s ohledem na jeho využití u PIR detektorů (passive infrared radiation). Pro tepelnou bilanci detektoru byl navržen matematický model, rovněž byly provedeny simulace tepelného chování senzorů v prostředí COMSOL Multiphysics, s následnou verifikací navrženého matematického modelu. Na základě teoretických závěrů a matematického popisu z předchozích kapitol byl realizován laboratorní interiér pracoviště IČ záření, kde byla provedena konkrétní měření vlastností zdrojů záření a senzorů a kde je rovněž možno změřit prostorové charakteristiky PIR detektorů.

**Klíčová slova:** PIR detektor, sdílení tepla, elektromagnetické záření, infračervené záření, matematický model

## **ABSTRACT**

This work is focused on testing sensors security systems in the infrared region and its application in the security industry, and outputs work can be used in courses Technological equipment of security industry, Electronic security systems, which are subjects of teaching at the Department of Security Engineering Faculty of Applied Informatics Tomas Bata University in Zlin.

The aim is to explain the principles of electromagnetic radiation sensors operating in the infrared region. This is essentially a thermocouple, thermopile and pyroelectric sensors and their application in the security industry. The work is a theoretical analysis of the problems of electromagnetic radiation in the wavelength range 8 micron to 14 micron in an enclosed space focused on its use in PIR detectors (passive infrared detector). The mathematical model was designed for the thermal balance of the detector, also were simulated the thermal behavior of sensors in the environment COMSOL Multiphysics, followed by verification of the proposed mathematical model. Based on theoretical findings and mathematical description of the previous chapter was implemented laboratory interior IR radiation workplace, where was a specific measurement of radiation sources and sensors where is also possible to measure the spatial characteristics of PIR detectors.

**Keywords:** PIR detector, heat exchange, electromagnetic radiation, infrared radiation, mathematic model.



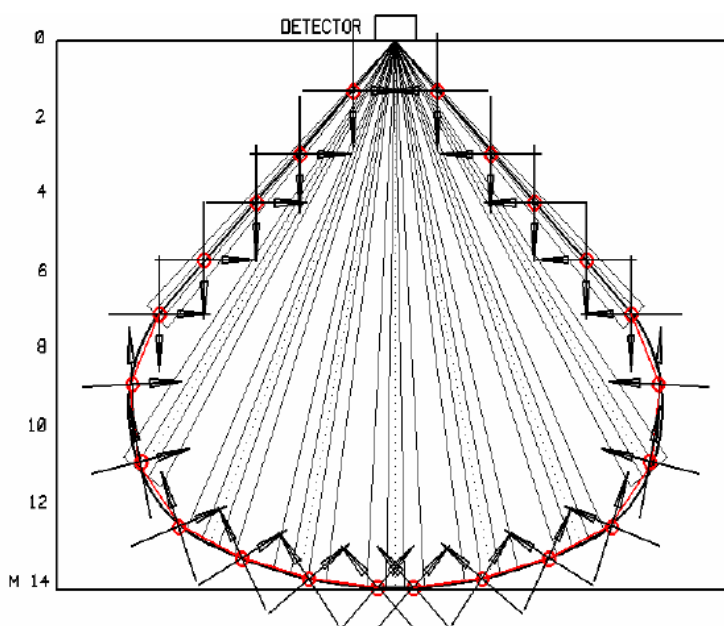
## OBSAH

1	ÚVOD .....	7
2	SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY .....	9
2.1	Rozdělení senzorů IČ záření .....	9
2.2	IČ závory a bariéry .....	10
2.3	IČ kamery .....	12
2.3.1	Nechlazené IČ kamery s maticí bolometrů .....	13
2.3.2	Chlazené IČ kamery s fotodetektory .....	14
2.3.3	Přenosné kamery .....	16
2.3.4	Fixní kamery .....	18
2.4	Kamery s IČ přísvitem .....	20
2.5	Požární hlásiče optické .....	20
2.5.1	Hlásiče kouře bodové optické .....	20
2.5.2	Hlásiče plamene – bodové, array .....	22
2.5.3	Lineární kouřové hlásiče .....	26
2.5.4	Lineární teplotní hlásič s optickými vlákny .....	28
2.5.5	Nasávací hlásiče kouře .....	29
2.6	Noktovize .....	30
2.7	PIR detektory .....	31
2.8	Zhodnocení literární studie .....	34
3	CÍLE DIZERTAČNÍ PRÁCE .....	35
4	TEORETICKÁ ČÁST .....	36
4.1	Fyzikální podstata IČ záření .....	36
4.2	Bilance vyzářené energie .....	37
4.3	Emisivita materiálů .....	40
4.4	Bilance energie přicházející do senzoru u PIR detektorů .....	41
5	NÁVRH MATEMATICKÉHO MODELU POPISUJÍCÍHO OHŘEV SENZORU RADIACÍ ....	43
6	ŘEŠENÍ MATEMATICKÉHO MODELU V PROSTŘEDÍ MAPLE .....	46
7	SIMULACE A VERIFIKACE NAVRŽENÉHO MODELU V PROSTŘEDÍ COMSOL MULTIPHYSICS .....	49
7.1	Simulace rozložení teploty a hustoty tepelného toku v místě povrchu pyroelektrického elementu .....	49
7.2	Výpočet teplotních polí v programu Maple .....	56
7.3	Porovnání teoretických výsledků se simulacemi .....	61
8	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST .....	63
8.1	Měření zdrojů IČ záření v blízké oblasti a ve viditelném spektru .....	63
8.1.1	Měření charakteristik LED diod ve vizuální a blízké infračervené oblasti .....	64
8.1.2	Měření spektrálních charakteristik zdrojů přísvitů pro bezpečnostní kamery .....	66
8.1.3	Měření dosahu přísvitů .....	68
8.2	Měřicí pracoviště pro střední oblast IČ záření .....	72

8.2.1	Zdroje a senzory IČ záření – popis a vlastnosti .....	72
8.2.2	Mechanické provedení pracoviště .....	75
8.2.3	Elektrické zapojení a měřicí přístroje .....	76
8.3	Měření intenzity IČ záření, prostorových a dynamických vlastností .....	77
8.4	Testovacího pracoviště pro PIR detektory .....	81
8.4.1	Zdroj záření pro vzdálenou oblast .....	82
8.4.2	Clona .....	85
8.4.3	Chopper .....	88
8.4.4	Pozicionér .....	91
8.4.5	Software .....	94
8.4.6	Rušivé záření na pracovišti a jejich odstranění .....	99
8.4.7	Realizace pracoviště .....	102
8.4.8	Výsledky měření .....	118
9	DISKUSE K VÝSLEDKŮM .....	122
10	ZÁVĚR .....	123
10.1	Využitelnost výsledků dizertační práce v praxi .....	126
11	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ .....	127
12	SEZNAM ZKRATEK .....	131
13	SEZNAM OBRÁZKŮ .....	132
14	SEZNAM TABULEK .....	135
15	LITERATURA .....	136
16	SEZNAM PUBLIKACÍ AUTORA .....	140

# 1 ÚVOD

V důsledku rychlého vývoje bezpečnostních technologií se ukázalo, že není v současné době kladen u výrobců dostatečný důraz na teoretický a matematický popis funkce bezpečnostních zařízení. Následkem je pak skutečnost, že je velmi složité objasnit příčiny vzniku falešných poplachů a jiných nefunkčních stavů. Příčina spočívá ve velké obtížnosti nebo nemožnosti zde uplatnit standardní techniky diagnostiky. Problém začíná již v oblasti přesných definic parametrů bezpečnostních detektorů PZTS (poplachová zabezpečovací a tísňová zařízení), především v určení dosahu konkrétních detektorů a možnosti ověření jejich správné činnosti po instalaci. Nejjednodušším dokladem tohoto tvrzení je PIR detektor, jehož charakteristika se v praxi dle normy ověřuje chůzí na hraně charakteristiky dosahu (Obr. 1) a jeho funkčnost se testuje metodou „detekuje nebo nedetekuje pohyb“ indikací LED diodou na detektoru [1].



Obr. 1: Detekční pokrytí na hranici detekčního prostoru [1]

Podobná situace existuje v oblasti IČ přísvisu u bezpečnostních kamer, kde lze velmi obtížně ověřit maximální dosah, protože výstupní obrazová informace je závislá na mnoha vlastnostech jak externích, tak i interních, např. přenosové cestě obrazu k vlastnímu záznamovému zařízení nebo k dohledu na zobrazovacích monitorech [2].

Z výše uvedeného vyplývá, že není dostatečně popsána funkce těchto systémů a chybí simulační a testovací zařízení, které by tyto vlastnosti kvalitně a rychle prověřilo, případně umožnilo změřit prostorové charakteristiky bezpečnostních detektorů [3], [18].

Cílem předložené dizertační práce je provést na základě platných fyzikálních zákonů v teorii elektromagnetického záření, záření těles v prostoru a jejich emisivity analýzu záření různých zdrojů IČ záření, porovnat nabídky různých senzorů typu - pyroelektrických, thermopile a bolometrických, realizovat sestavu pro měření a kalibraci záření v oblasti ultrafialového, viditelného a infračerveného spektra (UF, VI, IČ) včetně zdrojů, uskutečnit projekt laboratorního interiéru, navrhnout matematický model popisující teplotní pole a intenzitu tepelného toku snímače a verifikovat v simulačním prostředí COMSOL Multiphysics. Dále pak prostudovat technické detaily detektorů poplachových zabezpečovacích a tísňových systémů (PZTS), vyvinout a realizovat měřicí pracoviště pro IČ zdroje a senzory.

## 2 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

### 2.1 Rozdělení senzorů IČ záření

Pro měření množství dopadajícího záření používáme detektory, které lze rozdělit dle funkce na detektory s přímou přeměnou záření na elektrickou energii a nepřímou.

#### **Přímá přeměna energie**

Fotodetektory s přímou přeměnou energie se dále dělí dle principu na dvě základní skupiny podle fotoelektrického jevu [8], [9], který využívají:

**vnější fotoelektrický jev:** fotonky, fotonásobiče,

**vnitřní fotoelektrický jev:** fotorezistory, fotodiody, fototranzistory, MSM fotodetektory.

#### **Detektory s nepřímou přeměnou energie**

Tyto detektory jsou založeny na přeměně energie záření na teplo. Změny teploty ovlivňují elektrické vlastnosti detektoru [14]. Typickými zástupci této kategorie jsou:

Termočláňkové baterie – thermopile

Pyroelektrické detektory

Bolometry

Oblasti průmyslu, kde se využívá přímo měření infračerveného záření a jeho fyzikálních vlastností, lze rozdělit následovně:

Měření povrchových teplot ve strojírenské, hutním a elektrotechnickém průmyslu, technologii budov apod. [4]

Spektroskopie v chemickém průmyslu, ochraně životního prostředí, detekce koncentrace prvků apod.

Detekce poplachových stavů v bezpečnostním průmyslu a technologiích, u poplachových systémů pro detekci narušitele, jeho zobrazení a záznam, u požárních systémů pro včasné zjištění požáru a měření fyzikálních vlastností prostředí provázejících jeho vznik.

Typickými zástupci z oblasti bezpečnostních technologií jsou:

detektory PZTS[18]

PIR detektory

optické IČ závory a bariéry

požární hlásiče [19], [20], [21]

hlásiče plamene – maticové hlásiče plamene

hlásiče kouře bodové

lineární kouřové hlásiče

IČ kamery [17]

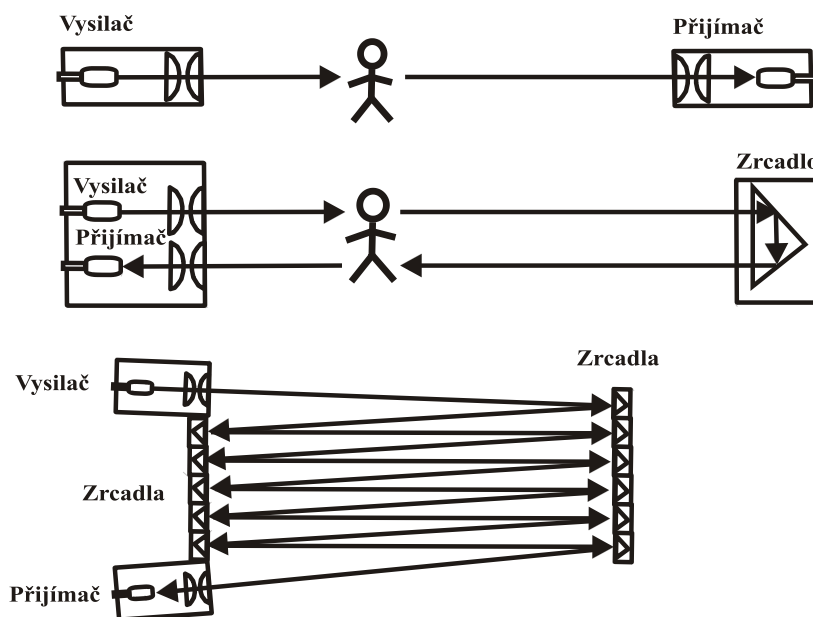
noktovize

kamery s infra přísvitem

IČ skenery pro rozpoznávání obličeje.

## **2.2 IČ závory a bariéry**

Technické řešení infrazávora je podobné jako při použití IČ lineárních hlásičů, ale účel a funkce jsou jiné, jak je zobrazeno na Obr. 2. Nedetekuje se zde postupné snižování intenzity vlivem kouře, ale úplné přerušení paprsku narušitelem na určitou dobu. První varianta využívá oddělený vysílač a přijímač, varianta druhá používá odraz paprsku zrcadlem a vysílač a přijímač má v jednom bloku. Třetí varianta se používá na malé vzdálenosti pro zabezpečení otvorů do budov a sestává se z jednoho vysílače, zrcadlových ploch a přijímače s tím, že pomocí odražených paprsků je pak chráněna celá plocha například vstupních dveří. Dosah IČ závora je největší u první varianty a pro nejvýkonnější systémy je až 300 m. IČ závory používají jen jeden svazek záření, zatímco bariéry využívají větší množství paprsků prostorově různě sestavených.



Obr. 2: Princip činnosti infračervených závor a bariér

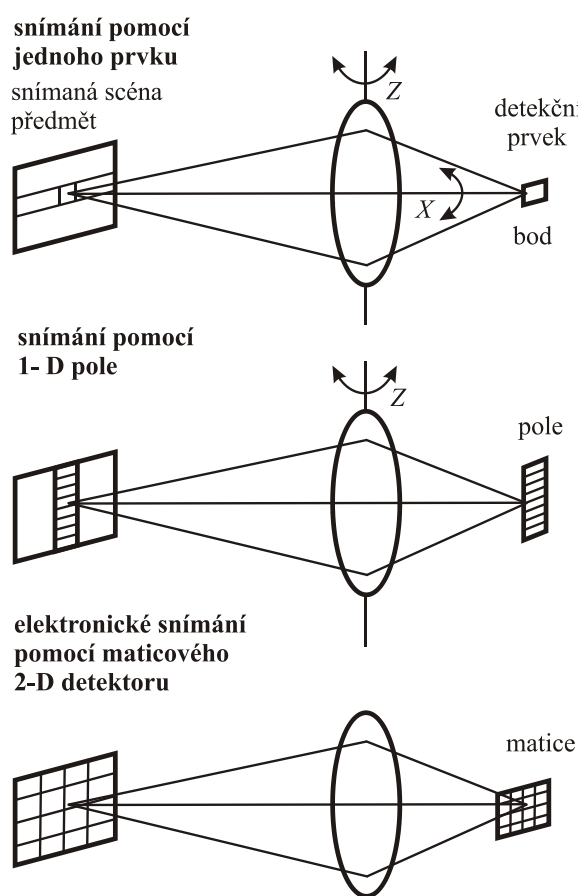
Při použití IČ závor a bariér u perimetrických systémů ve venkovním prostředí se zde uplatňují negativní vlivy počasí. Mezi základní příčiny planých poplachů patří:

- pohyb velkého množství objektů, které jsou sice fyzicky menší než narušitel (člověk), ale i tyto mohou za určitých podmínek detekovány,
- absorpce a rozptyl paprsku. Z tohoto důvodu je spektrum záření zdrojů umístěno do oblasti s vlnovou délkou kolem 2,8  $\mu\text{m}$  nebo 6,8  $\mu\text{m}$ , kde je absorpce vodními parami minimální, jak je vidět na Obr. 17. Odstranění skutečného zaclonění paprsku menšími předměty se řeší tak, že je zde nastaven maximální čas, po který může být paprsek zacloněn, aniž by byl vyvolán poplach a tento čas odpovídá průletu malých předmětů určitou rychlostí. Pokud je paprsek zacloněn na delší dobu, je vyhlášen poplach. Při použití více paprsků pro vytvoření bariéry jsou pak jednotlivé paprsky rozlišeny buď frekvenční, nebo impulsní modulací. Problémy s maskingem nebo simulací klidového stavu lze řešit náhodným šifrováním vysílaného paprsku na principu plovoucího kódu nebo propojením vysílače a přijímače za účelem přesné definice šifrování vysílaného a dešifrování přijímaného paprsku.

Tyto systémy jsou většinou doplněny kamerovými nebo jinými systémy z důvodu zvýšení spolehlivosti detekce narušení a zpětné verifikace poplachu.

## 2.3 IČ kamery

Vývoj IČ kamer bývá klasifikován do první, druhé a třetí generace dle etap vývoje, jak je ukázáno na Obr. 3. První generace používá jen jeden detektor a optický systém směřuje přicházející záření podle osy  $X$  a podle osy  $Z$  tak, aby detektor přijal záření jednotlivých bodů snímané scény. Lineární (1-D array) pole je použito u druhé generace takovým způsobem, že optický systém vychyluje přijímané záření jen kolem osy  $Z$ . Třetí generace používá plošné pole (2-D array), kde není třeba vychylovat záření obrazu optickým systémem. Tento optický systém je mechanicky výrazně jednodušší, zařízení je kompaktní a lehké.



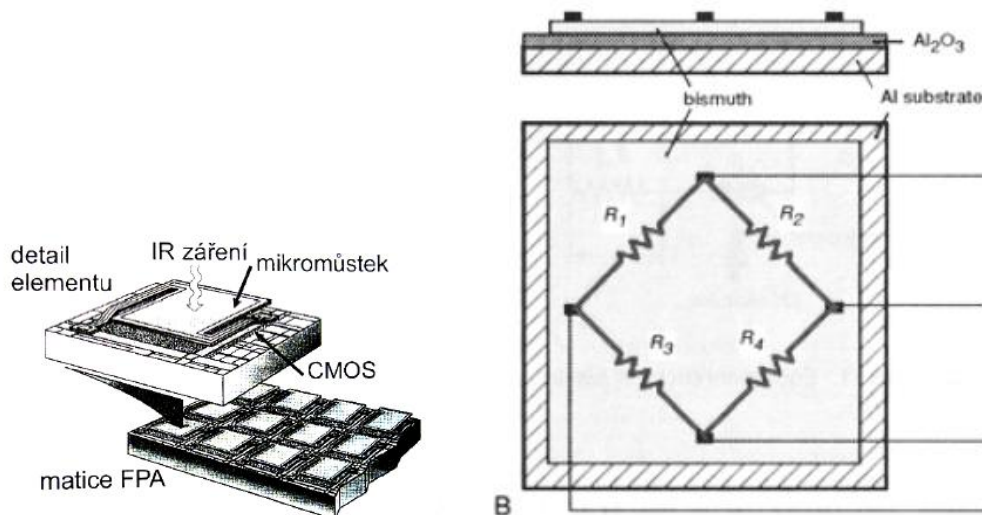
Obr. 3: Schematické znázornění snímání scény u IČ kamer [25]

Současná řešení IČ kamer pak využívají buď nechlazené IČ kamery se snímací maticí bolometrických prvků nebo chlazené IČ kamery s fotodetektorem, kde se snímání obrazového bodu provádí pomocí jednoho prvku.



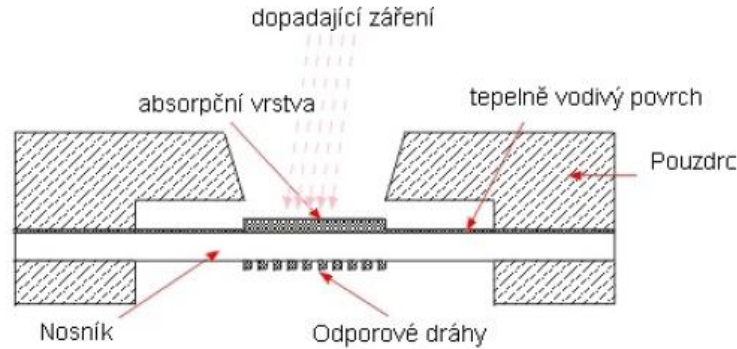
### 2.3.1 Nechlazené IČ kamery s maticí bolometrů

Základem je matice bolometrů využívající nepřímé měření pomocí odporových můstků. Na Obr. 4 je ukázán základní stavební prvek infrakamery a to je integrovaný můstek bolometru, sestavený do mikrobolometrické matice FPA.



Obr. 4: Mikrobolometrická matice FPA a integrovaný můstek bolometru [46]

Vlastní princip činnosti jednoduchého bolometru je naznačen na Obr. 5. Záření dopadne na absorpční vrstvu, která pohlcuje až 95% energie (zlatá fólie) a zde se přemění na teplo a to zahřeje přes tepelně vodivou vrstvu teplotně závislý odpor, jehož hodnota je přímo závislá na množství dopadající energie. U Wheatstoneova integrovaného můstku bolometru, který bývá realizován formou oxidů na hliníkové desce, se další odpory můstku využívají jako kompenzační nebo referenční. Vlastní mikrobolometrická matice (mikrobolometrické pole) je integrována do senzoru a realizována jako křemíkový obvod, kde se jako odporový materiál nejčastěji používá oxid vanadičný V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> nebo nitrid křemíku Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>. Na části matice mimo vlastní absorpční vrstvy je reflexní vrstva. Aby byla dodržena konstantní teplota mikrobolometru (v rozmezí 0,1 °C), využívá se pro chlazení Peltierův články. Vlastní organizace jednotlivých prvků FPA pak může být řádková nebo sloupcová a z toho se odvíjí vlastní způsob zpracování obrazové informace. Infrakamery pracují nejčastěji v režimu Short Wave (3,5 – 5 μm) nebo v režimu Long Wave (8 – 14 μm) [46].



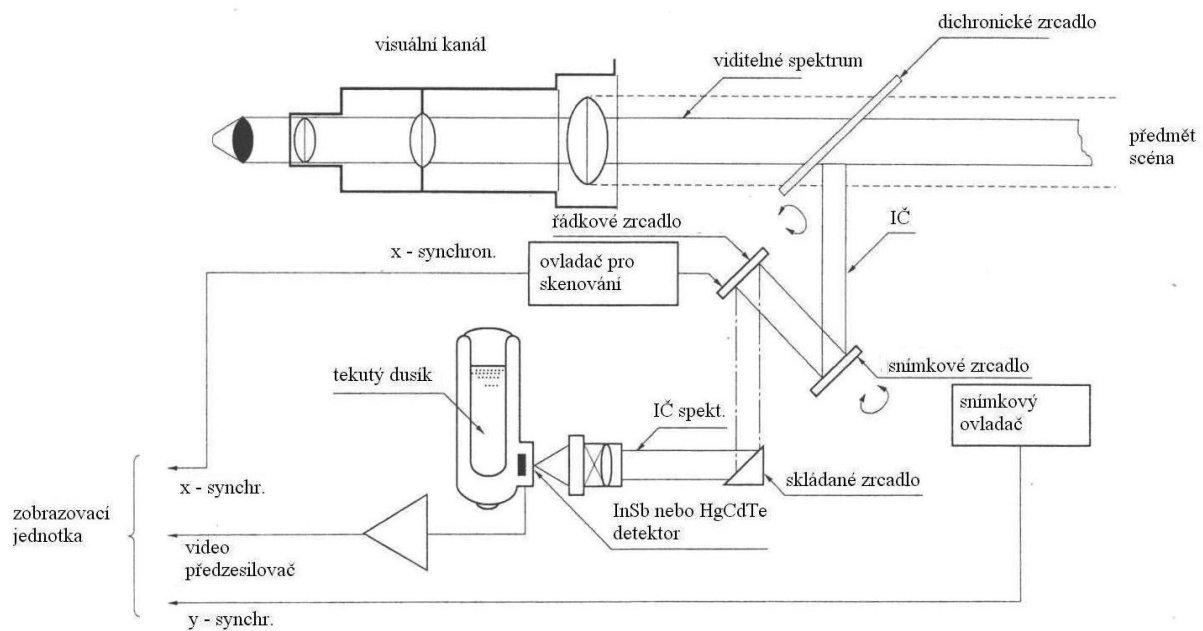
Obr. 5: Princip činnosti jednoduchého bolometru [46]

Po převodu bodů matice na určitou hodnotu a pro zpětné zobrazení těchto bodů a vytvoření obrazu se používají různé palety barev nebo stupně šedi, kde každá barva nebo stupeň šedi bodu odpovídá určité teplotě snímaného objektu. Vlastní obrazový signál je pak zpracován pro přenos do analogového signálu PAL (NTSC) nebo je obraz dále přenášen v digitální podobě např. přes kanál USB a obraz je pak zpracován pomocí software dodávaného výrobcem kamery.

Tyto kamery lze použít v široké škále technologických a bezpečnostních aplikací, kde je třeba detekovat zvýšené oteplení součástek, případně vyhodnotit objekt nebo narušitele, jehož teplota je vyšší, než teplota okolí. Dosah nebo viditelnost je přímo závislá na konstrukci objektivu. V každém případě při použití v bezpečnostních aplikacích musíme vzít v úvahu absorpci IČ záření plyny a vodní parou a zvolit pásmo filtrovaného vstupního záření do kamery tak, aby záření sledovaného objektu v tomto pásmu nebylo pohlceno atmosférou nebo vodní parou, vyskytující se mezi objektem a kamerou, jak je ukázáno na Obr. 17.

### 2.3.2 Chlazené IČ kamery s fotodetektory

Jak již bylo zmíněno, jedná se o snímání scény pomocí jednoho prvku s mechanickým systémem pro směřování záření bodu ze snímané scény na detektor.



Obr. 6: Příklad konfigurace chlazené IČ kamery [25]

Záření scény nebo sledovaného předmětu přichází zprava, kde jeho viditelná část spektra projde přes dichronické zrcadlo přímo do optiky pro zpracování ve viditelném spektru, zatímco IČ záření je odraženo na další snímkové zrcadlo, jehož úkolem je směřovat paprsek bodu v ose  $Y$  obrazu a je řízeno snímkovým ovladačem s pohonem. Záření pak dále pokračuje za řádkové zrcadlo, které pomocí ovladače a pohonu skenování směřuje záření v ose  $X$  obrazu a posílá paprsek přes skládané zrcadlo a okénko na chlazený detektor (InSb nebo HgCdTe dle oblasti IČ spektra). Vlastní detektor je chlazený tekutým dusíkem. Po zesílení signálu z detektoru pomocí video předzesilovače a synchronizace  $X$  a  $Y$  lze zobrazit všechny body na zobrazovací jednotce [25].

Dle použití se dále dělí na kamery:

Přenosné – tyto kamery mají v sobě zabudovaný zdroj skládající se ze speciálních lithiových baterií s vysokou kapacitou. Obraz je ukládán na paměťové médium vysoké kapacity, většinou SD karty. Tyto kamery jsou doplněny rozsáhlým softwarovým vybavením pro analýzu termografického obrazu.

Fixní – mají pevné umístění, jsou napájeny pomocí vodičů, obrazová informace je přenášena pro další zpracování formou analogového signálu nebo formou IP paketů přes ethernet. Tyto typy se používají především v bezpečnostním průmyslu a jsou realizovány v levnější variantě jako nechlazené s bolometrickou maticí pro hlídání perimetru a objektů,

zatímco velmi drahé chlazené IČ kamery se používají ve vojenské technice především na ostrahu státních hranic. Dosah těchto kamer se díky kvalitní optice pohybuje běžně v jednotkách kilometrů.

### 2.3.3 Přenosné kamery

Na Obr. 7 je zobrazena IČ kamera typu TP8 se základními ovládacími prvky. Obraz je možné sledovat v optickém hledáčku nebo na dotykovém displeji pro aplikace v terénu, případně po připojení k počítači online na monitoru pro dlouhodobé sledování objektů a stabilní aplikace, kdy můžeme kameru upevnit na stativ. Obraz je zaznamenáván jako fotografie na SD kartu pro přenosné aplikace nebo na počítači přes USB rozhraní pro záznam dlouhotrvajících tepelných dějů. Dle rozložení teplot sledované scény je nutno definovat vhodný filtr a nastavit teplotní rozsah  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  až  $+250\text{ }^{\circ}\text{C}$  pro filtr 1 nebo  $+200\text{ }^{\circ}\text{C}$  až  $+800\text{ }^{\circ}\text{C}$  pro filtr 2 [27].



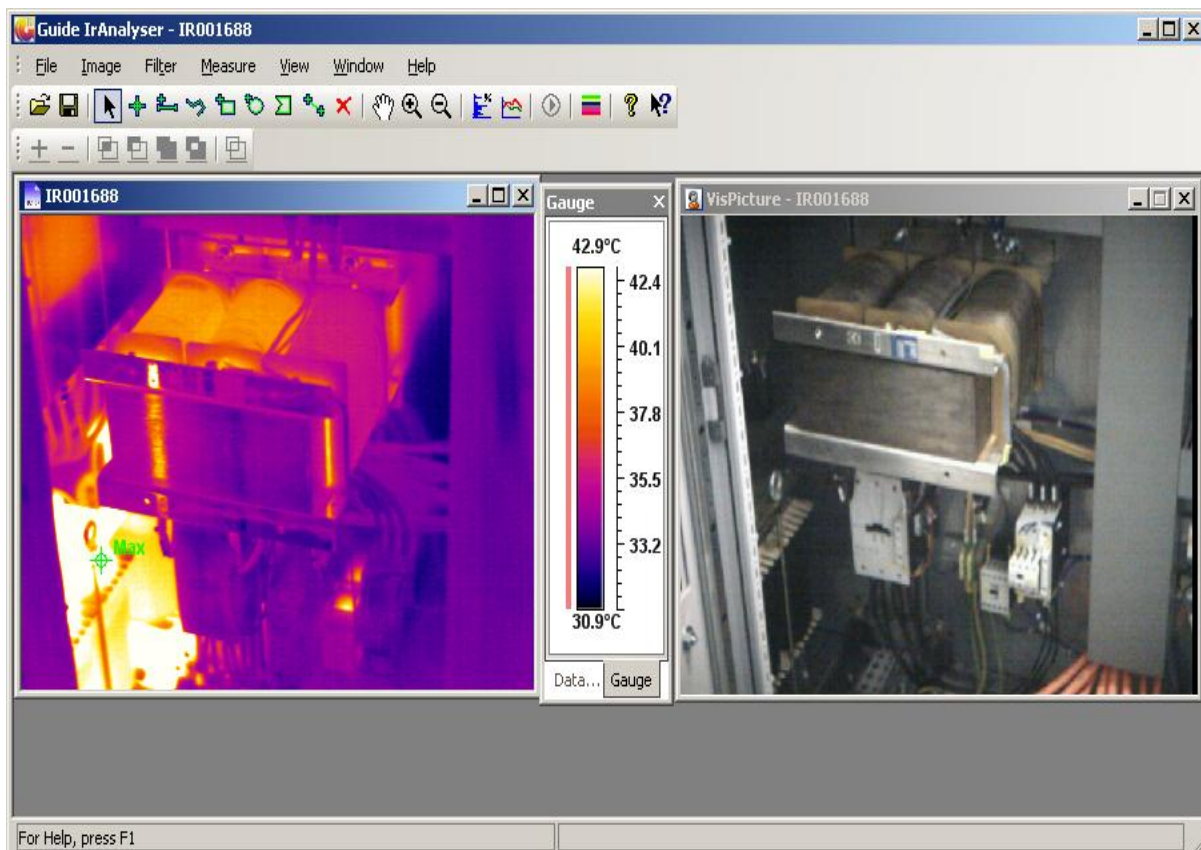
1 - optický hledáček, 2 - mikrofon pro nahrávání hlasové poznámky, 3 - F1-F4 funkční tlačítka a tlačítko napájení, 4 - stavový displej USB, Bluetooth a paměťové karty SD, stav indikátor napájení, 5 – joystick, 6 – tlačítka S, C a A pro základní funkce jako uložení obrazu, zmrazení obrazu, kalibrace apod., 7 - bluetooth okno, 8 – CMOS kamera, 9 – laserový lokátor

Obr. 7: IČ kamera TP8 a její základní ovládací prvky

Tabulka I. Základní technické parametry IČ kamery TP8

typ detektoru	nechlazená mikrobolometrická matice (FPA) 384 x 288 pixelů, 35 μm
spektrální rozsah	8 – 14 μm
teplotní citlivost	0,08 °C na 30 °C
zorný úhel/obj.	22° x 16°/35 mm
vizuální detektor	CMOS Sensor, 1280 x 1024 pixelů
externí displej	color VGA - 3,5", LCD 640 x 480 pixelů, dotyková obrazovka
hledáček	color VGA - 0,6" zabudovaný OLED 640 x 480 pixelů
teplotní rozsah pro filtr 1, filtr 2	-20 °C - +250 °C, +200 °C - +800 °C
přesnost	filtr 1: ±1 °C, filtr 2: ±2 °C
korekce emisivity	proměnná od 0,01 do 1,00 (krok 0,01)
laserový lokátor	třída 2 polovodičový laser
volitelné objektivy	7,7° x 5,8°/100 mm, 45,6° x 35°/16 mm
automatické nebo ruční funkce	kalibrace mikrobolometru, volba teplotního rozsahu
další volby	volba teplotního filtru, volba palety barev
další funkce	zaostření scény, zoom, zobrazení histogramu, zobrazování a ukládání snímků na SD kartu

K infракameře TP8 je dodáván program Guide IrAnalyzer, který umožňuje provádět podrobnou analýzu IČ obrazu pomocí široké nabídky softwarových nástrojů (např. průměrnou teplotu dané oblasti, průběh teploty po křivce, interpolace grafů apod.) a lze zde na současně uloženém snímku ve viditelném spektru lokalizovat skutečné rozmístění zdrojů tepla, včetně zobrazení bodu s maximální teplotou, s možností nastavit z voleb barevnou paletu, protože základní obraz je ve stupních šedi a není vždy přehledný dostatečně. Grafické rozhraní programu Guide IrAnalyzer je ukázáno na Obr. 8 [28].



*Obr. 8: Grafické rozhraní programu Guide IrAnalyzer*

### **2.3.4 Fixní kamery**

Příkladem fixních IČ kamer jsou bezpečnostní kamery řady Sarix TI od firmy Pelco, která patří do koncernu Schneider. Tato kamera je ukázána na Obr. 9 a její vlastnosti jsou uvedené v Tabulka II.



*Obr. 9: IČ kamera řady Sarix TI*

Tabulka II. Základní technické parametry infračervené kamery Sarix TI [26]

nechlazený mikrobolometr z amorfního křemíku - model 1 (velikost pixelu 17 um)	efektivní rozlišení 640x480 pixelů (307.000 )
model 2 (velikost pixelu 25 um)	efektivní rozlišení 384x288 pixelů (110.592)
spektrální odezva	7.5 až 13.5μm, LWIR
jednotka pro Otáčení/Náklon	ESPRIT
IP a analogové výstupy	citlivost pod NETD <50 mK při f/1.0
komprese	H264 a MJPEG , až 2 simultánní video toky
formáty zobrazení	horká bílá, horká černá a duhová
napájení	24 VAC nebo 120/230 VAC 50/60 Hz
<b>další pokročilé funkce:</b>	vestavěná Inteligentní Analýza obrazu
360° - kontinuální rotace	vnitřní závěrka, obrázek videa na 0.3 sek
rozsah naklonění +33 ° až -83 ° od vodorovné osy	proměnná rychlost otáčení 0,1 ° až 100 °/sek s proporcionálním otáčením
přednastavené polohy, vzory a více režimů snímání	bezpřevodová úprava, minimální údržba

IČ kamery se využívají v mnoha oborech lidské činnosti. Mezi hlavní patří průmyslové využití především pro měření povrchových teplot v průmyslu strojírenském, hutním, elektrotechnickém (tepelné zpracování oceli, neželezných kovů, pryže, papíru apod., testy a kontroly výroby těchto materiálů, destrukční zkoušky litiny, svařovaných a pájených dílů, testy a zobrazení desek s plošnými spoji, testy výkonu motorů automobilů, letadel, apod., údržba a inspekce generátorů, spojů a napájecích kabelů, sledování tepla a vedení tepla u ložisek, řezání, válcování apod.) a v oblasti technologie budov pro měření tepelných ztrát.

Další významnou skupinou jsou bezpečnostní systémy pro ochranu majetku a osob, požární systémy, systémy pro bezpečnost při práci a bezpečnostní systémy automobilů, do kterých jsou v současné době investovány velké prostředky s cílem vyvinout levné systémy pro detekci osob za špatných viditelných podmínek, které by byly použitelné u vozidel střední cenové kategorie.

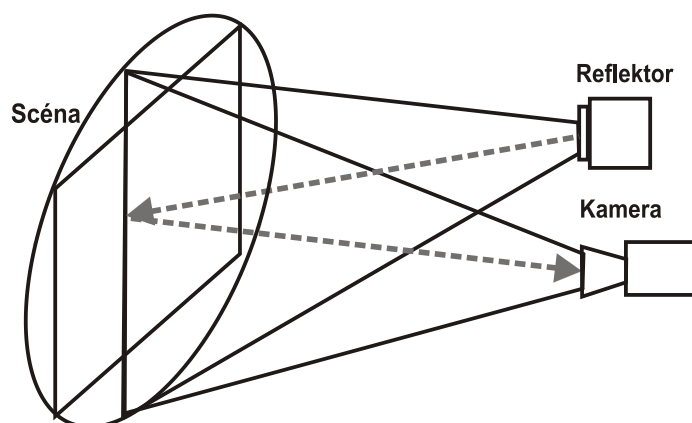
Ve zdravotnictví se využívá infračervená diagnostika a zdravotní termografie. V oblasti znečištění životního prostředí se pomocí satelitů s infračervenými kamerami kontroluje znečištění mořské vody ropou apod. Ve vědeckém výzkumu se IČ kamery používají pro sledování vlastností půdy, vodních zdrojů, vodních proudů, vulkánů,

meteorologických jevů apod. Zvláštní skupinu tvoří využití v námořnictví při lovu ryb a v zemědělství pro zjištění napadení území škodlivým hmyzem [27].

## 2.4 Kamery s IČ přísvitem

Tyto kamery využívají tu vlastnost, že moderní snímací čipy za dne snímají v oblasti viditelného spektra a v noci, díky čipům s vysokou citlivostí, mají schopnost zpracovat záření, vyskytující se v blízké oblasti za viditelným spektrem, tj. na počátku infračervené oblasti, v pásmu mezi 800 nm a 900 nm. Princip použití je ukázán na

Obr. 10. IČ reflektor vysílá IČ záření a kamery snímají odraz od objektů na scéně. Výsledný obraz je ve stupních šedi. Zajímavá je skutečnost, že objekty snímané černobílou kamerou při denním osvětlení, mohou být při IČ osvětlení inverzní, což je způsobeno tím, že odrazivost materiálů je závislá na vlnové délce, která je různá pro stejný materiál v oblasti viditelného záření a v oblasti blízké IČ. Dosah použitelného ozáření scény je dán výkonem vysílacích diod a pohybuje se v rozsahu od 10 m do 30 m.



Obr. 10: Kamerový přísvit - osvětlení scény

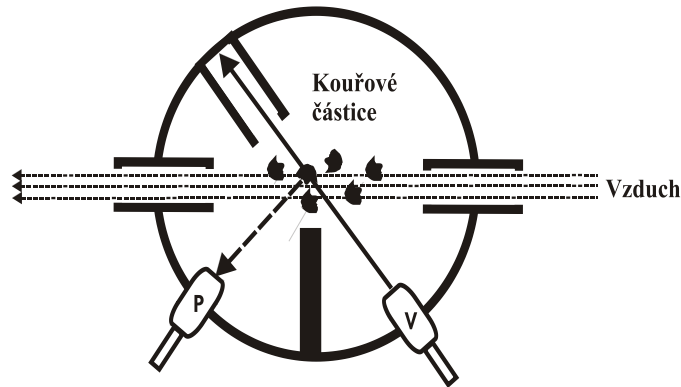
## 2.5 Požární hlásiče optické

### 2.5.1 Hlásiče kouře bodové optické

Kouřové hlásiče bodové (smoke detectors) pracují na principu vysílače a přijímače infračerveného záření, kdy tyto na sebe nevidí a jsou odděleny přepážkou a teprve v okamžiku, kdy se v tomto prostoru vyskytnou kouřové částice, které vznikly hořením, dojde



k odrazu paprsku od těchto částic, paprsek dopadne na přijímací diodu a systém vyhlásí s určitou časovou prodlevou požární poplach, jak je schematicky znázorněno na Obr. 11.



Obr. 11: Kouřový hlásič

Dle normy [19] je možno popsat jednotlivé metody zkoušek.

### **Kouřový tunel pro měření prahové hodnoty reakce**

Následující popis určuje ty vlastnosti kouřového tunelu, které jsou nejdůležitější pro zajištění opakovatelných a reprodukovatelných měření prahové hodnoty reakce hlásičů kouře. Avšak přesto, že není praktické určovat a měřit všechny parametry, které mohou ovlivňovat měření, musí být vzaty v úvahu základní informace z přílohy normy, pokud je kouřový tunel určen k provádění měření v souladu s touto normou.

Kouřový tunel musí mít horizontální pracovní sekci, která obsahuje pracovní prostor. Pracovní prostor je určená část pracovní sekce, ve které jsou teplota a proud vzduchu v rozmezí požadovaných zkušebních podmínek. Soulad s těmito požadavky musí být pravidelně kontrolován za statických podmínek měřením v dostatečném počtu bodů rozprostřených uvnitř imaginárních hranic pracovního prostoru. Pracovní prostor musí být dostatečně velký, aby zcela pokryl zkoušený hlásič a snímací části měřicího zařízení. Pracovní sekce musí být navržena tak, aby bylo umožněno do ní vložit zařízení pro zkoušku oslněním, která je popsána v příloze normy. Zkoušený hlásič musí být připevněn ve své běžné pracovní poloze na spodní straně rovné desky a vystaven proudu vzduchu v pracovním prostoru. Deska musí mít takové rozměry, aby její okraje přesahovaly nejméně o 20 mm každou část hlásiče. Provedení montáže hlásiče nesmí příliš bránit proudění vzduchu mezi deskou a stropem tunelu.

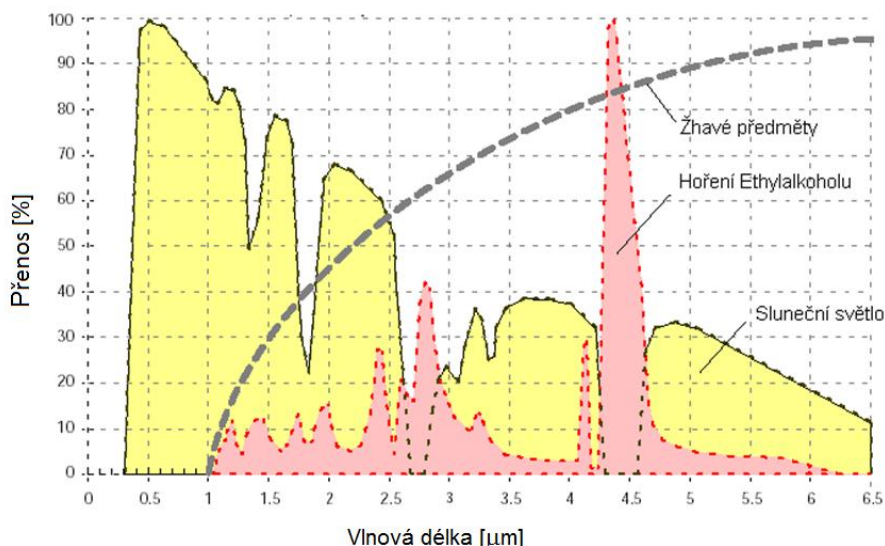
Musí být zajištěno vytvoření laminárního proudění vzduchu při požadovaných rychlostech (tj.  $(0,2 \pm 0,04) \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  nebo  $(1,0 \pm 0,2) \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) v pracovním prostoru. Musí být

umožněno kontrolovat požadované hodnoty teploty a zvyšovat teplotu rychlostí, která nepřesáhne  $1 \text{ K} \cdot \text{min}^{-1}$  do  $55 \text{ }^\circ \text{C}$ . Rovněž musí být zajištěno, aby koncentrace aerosolu v pracovním prostoru byla homogenní.

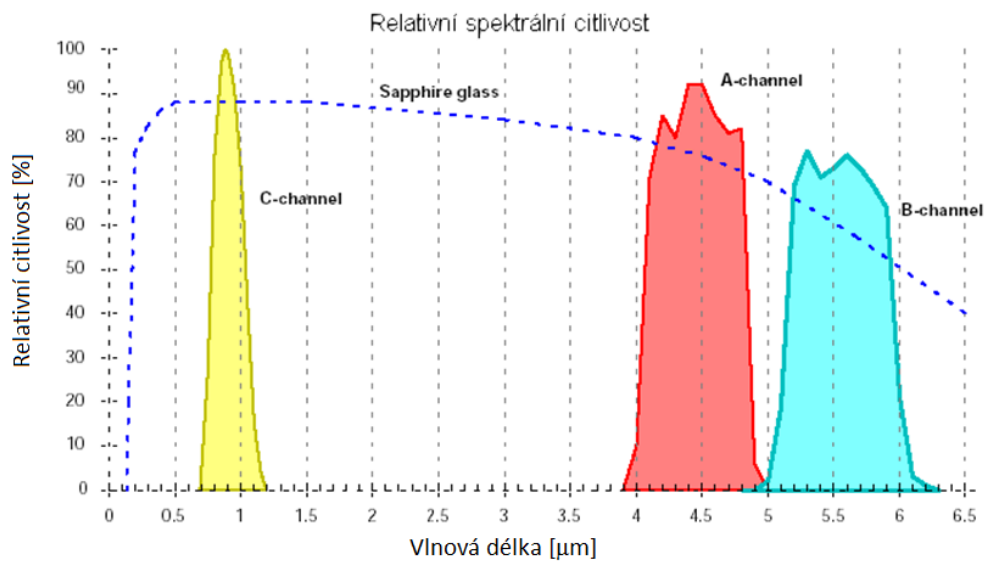
V tunelu může být umístěn pouze jeden hlásič, pokud není současným měřením více hlásičů prokázáno, že tyto výsledky jsou shodné s výsledky při měření jednotlivých hlásičů. V případě sporu se akceptuje hodnota získaná jednotlivým měřením [19].

### 2.5.2 Hlásiče plamene – bodové, array

Na Obr. 12 je ukázána spektrální charakteristika skutečných zdrojů infračerveného záření, které se vyskytují v našem okolí, a mohou tedy způsobovat chyby ve funkci detektoru. Charakteristika, pod kterou je oblast vybarvena žlutě, představuje intenzitu slunečního záření na vlnových délkách od oblasti viditelné až do oblasti  $6,5 \text{ } \mu\text{m}$ . Dále se v okolí hlásiče mohou vyskytovat předměty, které byly vyhřáté buďto sluncem nebo lidskou činností. Jejich spektrální charakteristiku představuje přerušovaná čára. Záření, které chceme detekovat, představuje charakteristika hoření etylalkoholu a je v grafu označena červenou přerušovanou čarou. Plocha pod čarou je také červená. Vliv slunečního záření a žhavých předmětů je nutno potlačit a naopak hoření etylalkoholu je žádoucí detekovat. Na Obr. 13 je zobrazena spektrální charakteristika citlivosti hlásiče plamene, kde se vyskytují pásma, která musí být v základní sestavě pomocí tří senzorů zpracována.

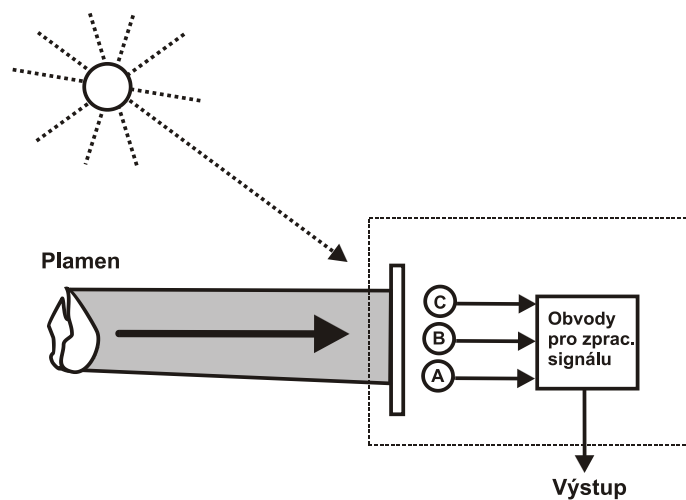


Obr. 12: Spektrální charakteristika různých zdrojů vyzařování [47]



Obr. 13: Relativní spektrální citlivost hlásiče plamene [47]

Na Obr. 14 je znázorněno vlastní provedení hlásiče. Skládá se ze senzorů A, B a C. Pyroelektrický senzor A slouží na detekci infračerveného hoření plamene, většinou s charakteristikou záření CO<sub>2</sub> ležícím ve spektrálním rozsahu mezi 4,0 μm až 4,8 μm. Pyroelektrický senzor B měří infračervené vyzařování zdrojů interference v rozsahu mezi 5,1 μm a 6 μm. Křemíková fotodioda C měří sluneční záření v rozsahu 0,7 μm až 1,1 μm.



Obr. 14: Princip bodového hlásiče plamene

Obvody pro zpracování naměřených hodnot jsou poměrně složité a jejich funkce spočívá ve správném vyhodnocení poplachových signálů z kanálu A a B a naopak potlačení

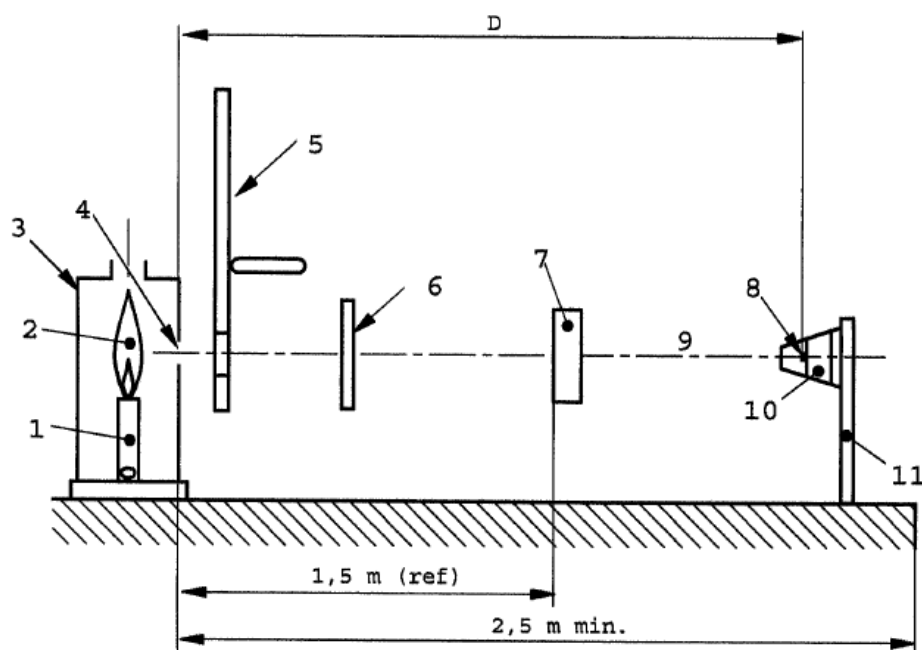
okolních vlivů záření, především slunečního záření z kanálu C. Velkou výhodou tohoto řešení pak je to, že správnou volbou spektrální charakteristiky senzorů A a B (většinou vstupním optickým filtrem), lze přesně zvolit oblast citlivosti hlásiče na hoření plamene určitého druhu materiálu.

Norma [20] pak specifikuje určení bodu reakce dle Obr. 15, která umožní nastavení vzdálenosti mezi zdrojem a hlásičem, přičemž je udržováno vzájemné nasměrování optických os zdroje a hlásiče. Vzhledem k odlišnostem v bodu reakce musí mít lavice skutečnou pracovní délku, nejméně 2,5 m. Montážní podstavce používané pro vzorek a pro další části zkušebního zařízení se musí pohybovat ve směru, který je rovnoběžný s osou lavice. Musí být zajištěno měření vzdálenosti mezi individuálně namontovanými prvky lavice s přesností  $\pm 10$  m. Montážní podstavec hlásiče musí dovolit nastavení výšky a orientace hlásiče tak, že jeho optická osa se musí krýt s optickou osou zdroje. Montážní podstavec hlásiče musí také dovolit, aby se mohl hlásič otáčet kolem své optické osy a nezávisle kolem druhé osy kolmé k optické ose a procházel průsečíkem optické osy a roviny citlivého prvku (nebo prvků) hlásiče. Musí být zajištěno měření úhlových vychýlení přesností  $\pm 5^\circ$ .

Záření musí být vytvořené plynovým hořákem, hořícím metanem s minimální čistotou 98%, jehož plamen vydává ustálené záření (bez mihotání) v pracovním vlnovém pásmu zkoušeného hlásiče. Mihotání v těchto pásmech musí být měřené použitím vhodných metod. Efektivní hodnota amplitudové modulace záření nesmí přesáhnout 6%. Účinný výstup záření musí být nastavený štěrbinou umístěnou před plamenem v takové pozici, že celá plocha štěrbiny je vyplněna plamenem, pokud je sledován z kterékoliv vhodné pozice zkoušeného hlásiče. Pro účely této zkušební metody musí být štěrbinová považována za zdroj záření. Kolmá osa, která prochází středem štěrbiny, musí být považována za optickou osu zdroje. Závěrka musí zajistit zastínění vzorku před zdrojem záření a musí umožnit ovládání trvání expozice hlásiče zdrojem s přesností  $\pm 2$  s.

Záření ze zdroje musí být modulované vhodnými prostředky (např. rotačním přerušovacím diskem) k zajištění tvaru modulace určené výrobcem pro zkoušený hlásič. Určená modulační frekvence může být nulová. Pokud výrobce neurčí modulaci, potom se musí měření provádět na namátkou vybraném vzorku k určení frekvence odpovídající vrcholu reakce hlásiče. Tato frekvence musí být zaznamenána a užita ve všech následujících měřeních. K monitorování ozáření vytvořeného zdrojem musí být k dispozici radiometr. Citlivý prvek radiometru musí být umístěn v bodě na optické ose zdroje ve vzdálenosti v rozsahu 1400 mm až 1600 mm od štěrbiny. Radiometr musí být upevněn na stojanu na

optické lavici tak, že vzdálenost od štěrbinu může být nastavena uvnitř určeného rozsahu s reprodukovatelností  $\pm 5$  mm. Odezva vlnové délky radiometru musí být odpovídající zkoušenému hlásiči a může být určena výrobcem. Pokud výrobce neurčí rozsah vlnové délky, potom musí radiometr reagovat pouze na záření v rozsahu  $4,0 \mu\text{m}$  až  $4,8 \mu\text{m}$  pro IČ hlásiče a  $160 \text{ nm}$  až  $280 \text{ nm}$  pro UF hlásiče [42].



1 – plynový metanový hořák, 2 – plamen, 3 – kryt hořáku, 4 – štěrbina, 5 – modulátor (disk přerušovače), 6 – závěrka, 7 – radiometr, 8 – citlivý prvek (prvky), 9 – optická osa, 10 – hlásič, 11 – stojan pro hlásič

Obr. 15: Uspořádání optické lavice

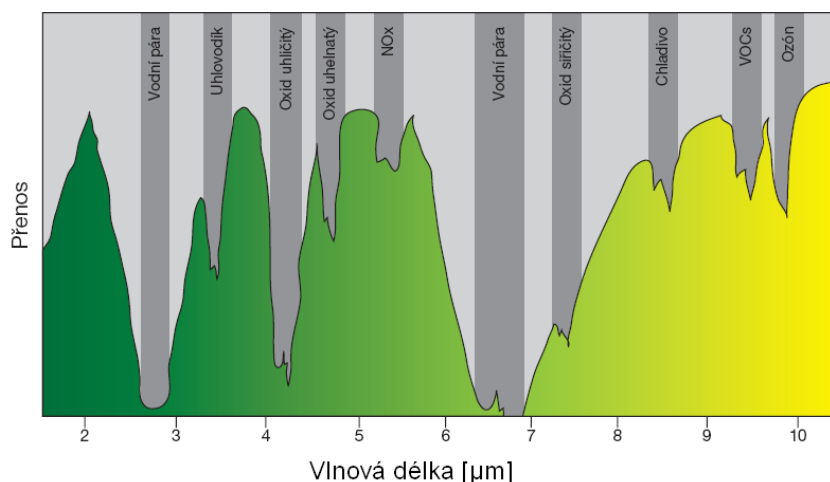
Maticové hlásiče plamene pak představují další vývojový typ bodových hlásičů a vyznačují se tím, že elementy, které jsou citlivé na podobná spektra jako u bodových hlásičů, jsou umístěny v matici (16 x 16 elementů) a díky tomu jsou schopny určit prostorový úhel a směr, odkud přichází záření plamene a při spojení s kamerovým systémem a vhodným softwarem jsou schopny přímo detekovat a označit místo ve výhledu snímáče, kde požár vzniká, což je velmi důležité pro určení takových požárů, kde vlnová délka záření plamene není v oblasti viditelného spektra. Příklad maticového hlásiče plamene je uveden na Obr. 16. Výrazně vyšší spolehlivost tohoto hlásiče je dána především způsobem zpracování signálů, tedy nejen, že detekuje přítomnost záření plamene na určité vlnové délce, ale navíc je schopen vyhodnotit změny záření mezi jednotlivými vedlejšími pixely matice a tím tak spolehlivě určit blikající plamen.



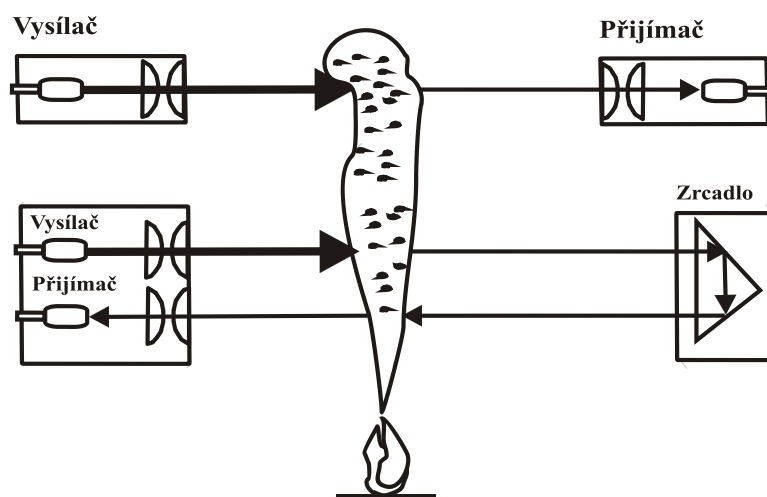
Obr. 16: Maticový hlásič plamene FlameVision FV311SC [23]

### 2.5.3 Lineární kouřové hlásiče

Na Obr. 17 je znázorněna charakteristika pohlcování infračerveného záření různými plyny v závislosti na jeho vlnové délce. Vlastní princip lineárního hlásiče je schematicky zobrazen na Obr. 18 a spočívá v tom, že při výskytu kouřových částic nebo látek vyskytujících se v místě hoření, dojde ke snížení intenzity záření, která je vyhodnocena na přijímací straně. Následkem je vyhlášení předpoplachu nebo přímo poplachu. Při porovnání s předcházející charakteristikou absorpce záření plyny, je zřejmé, že se může volit spektrum záření tak, aby bylo necitlivé na vodní páru, která není následkem požáru, ale naopak při volbě spektra do oblasti  $\text{CO}_2$ , které doprovází vývin požáru a lze tak detekovat zvýšený podíl jeho částic ve vzduchu. Vlastní částice kouře jsou pevné a nezáleží tedy na spektru vysílaného paprsku. Výhodou je velký dosah – okolo 100 m a tím pádem i pokrytí poměrně velké plochy pod paprskem. Nevýhodou je znečistvení hlásiče při jeho zaprášení, což se řeší softwarem v řídicí logice hlásiče nebo požární ústředny.

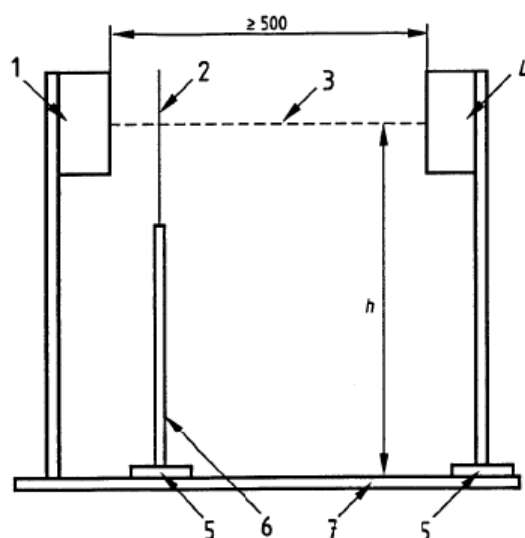


Obr. 17: Absorpce infračerveného záření různými plyny [47]



Obr. 18: Princip lineárního kouřového hlásiče

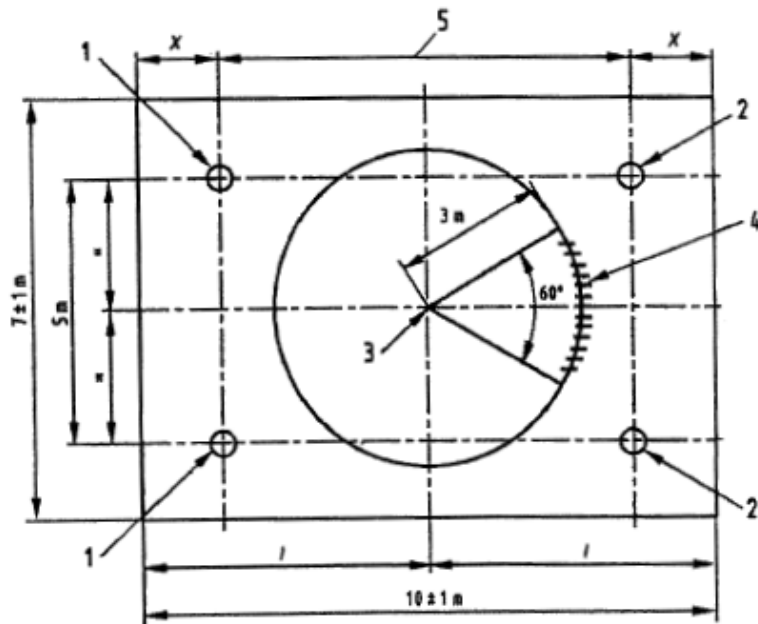
Dle normy [21] se provádí měření prahu a rychlosti reakce vyhlášení poplachu hlásičem využitím kouře, který je vytvořen doutnajícím dřevem, doutnající bavlnou, hořením plastů, a hořením kapalin ve zkušební požární místnosti za definovaných podmínek ohniště a místnosti. Pro napodobení účinku kouře se také využívá filtru, který zcela zakryje optiku přijímače hlásiče, jak je uvedeno na Obr. 19. Paprsek je zeslaben před dopadem na přijímací detektor pomocí definovaných filtrů – zeslabovače - 2, které musí být neutrální vzhledem ke spektrálním pásmům vlnových délek, které hlásič využívá. Cílem tohoto měření je ověřit maximální vzdálenost mezi přijímačem – 1 a vysílačem – 4.



1 – přijímač nebo vysílač-přijímač, 2 – zeslabovač, 3 – osa paprsku, 4 – vysílač nebo reflektor, 5 – nastavení výšky, 7 – nosník,  $h$  – výška osy paprsku nad nosníkem

Obr. 19: Lavice pro měření prahové hodnoty reakce [42]

Vlastní rozmístění objektů v požární zkušební místnosti je na Obr. 20.



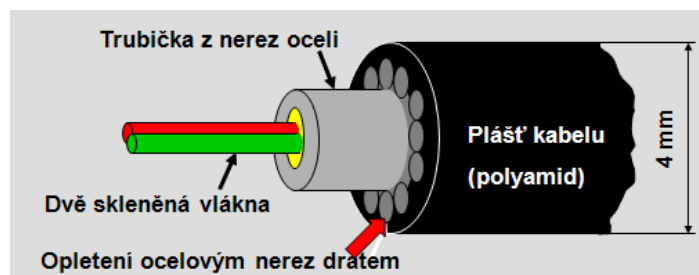
1 – vysílač nebo vysílač-přijímač, 2 – přijímač nebo reflektor, 3 – zkušební požár, 4 – měřicí přístroje,  
5 –  $8 \pm 0,5\text{m}$  nebo maximální dosah

Obr. 20: Rozmístění detektorů, místa požáru a měřicích přístrojů [21]

#### 2.5.4 Lineární teplotní hlásič s optickými vlákny

Využívá dvouvláknový, multimódový optický kabel, kde lze na principu Ramanova rozptylu světla v optickém vlákně kabelu určit úsek, na kterém došlo ke zvýšení teploty. Pomocí vyhodnocovacích jednotek a vizualizačního software je možné pak zobrazovat teplotní profil v chráněném objektu, vývoj teploty v čase ve zvoleném úseku nebo aktuální teplotu v jednotlivých detekčních zónách. Jako vysílače používá laserovou diodu o vlnové délce  $\lambda = 980 \text{ nm}$  a výkonu  $150 \text{ mW}$  [42]. Využívá se především pro silniční tunely, železniční tunely, kabelové kanály, pásové dopravníky, obecně pro málo přístupné a dlouhé prostory do délky až 4 km.



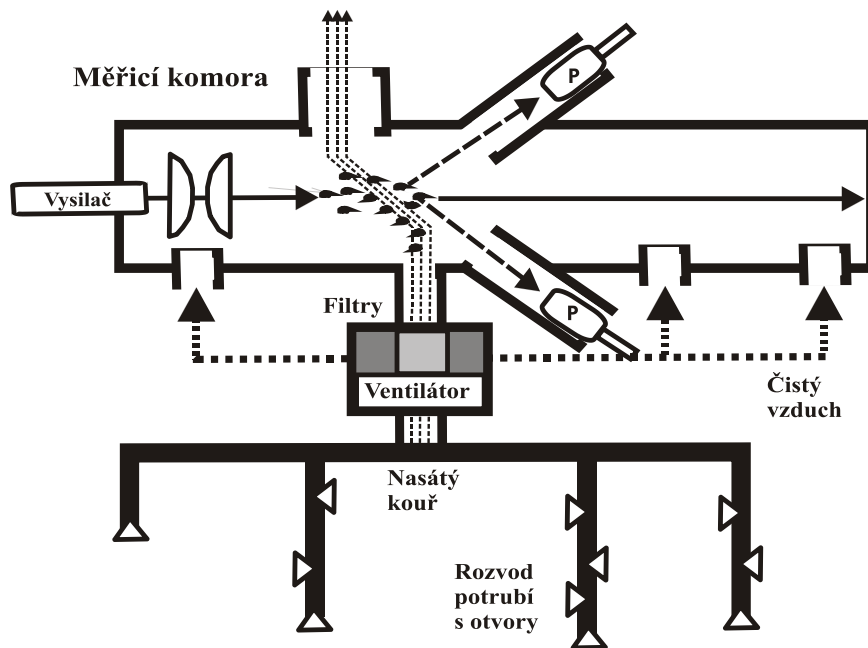


Obr. 21: Lineární teplotní hlásič s optickými vlákny [42]

### 2.5.5 Nasávací hlásiče kouře

Pracují na podobném principu jako kouřové hlásiče tzn., že detekují kouř pomocí odrazu paprsku od kouřových částic. Většinou však využívají laserový paprsek, jak je znázorněno na Obr. 22. Velkou výhodou však je, že se vzduch nebo kouř pohybuje nuceně pomocí ventilátoru potrubím, které je dotaženo na místo, kde provádíme sledování výskytu kouře. Toto místo je definováno přesným otvorem nebo zakončením trubky. Je zde sice dopravní zpoždění, ale kouřové částice jsou za tuto dobu spolehlivě dopraveny z místa sledování do měřicí komory, kde se provádí přesná detekce jejich výskytu velmi malých množství kouřových částic. Důležitou částí tohoto systému je ventilátor a filtry, které umožňují vyčistit nasátý vzduch od hrubých nečistot, rozdělit vzduch na čistý a s kouřovými částicemi, ten pak změřit v měřicí komoře. Čistý vzduch se ještě používá k čistění vnitřního prostoru a optiky laseru od prachu. Vnitřní prostor měřicí komory je uzavřený a nelze provádět žádná nastavení, na řídicí jednotce se nastaví citlivost na kouřové částice.

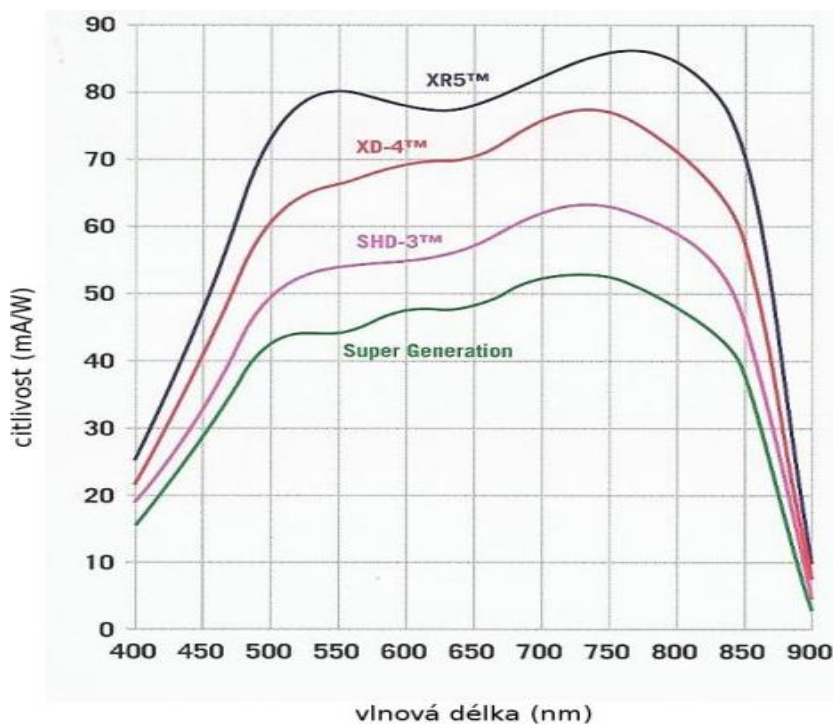
Dle normy [21] se pak provádí měření prahu a rychlosti reakce v rámci specifikace výrobce pomocí kouře, který je generován doutnajícím dřevem, doutnajícím bavlnou, hořením plastů, a hořením kapalin ve zkušební požární místnosti za definovaných podmínek jak ohniště, tak místnosti.



Obr. 22: Nasávací systémy - laserová komora [22]

## 2.6 Noktovize

Pracuje na principu velkého zesílení záření snímané scény, která je osvětlena zbytkovým zářením z měsíce a hvězd, tedy zdrojů o nízkém výkonu. Podobně jako u inftrakamery je signál zobrazen v monochromatické formě. Použití je především ve vojenských aplikacích, kde je obraz sledován a vyhodnocován přímo člověkem, většinou za účelem vedení bojové činnosti v noci. Hlavní problém pro automatické bezpečnostní aplikace spočívá především v nedefinovaných podmínkách osvětlení scény (světlice, osvětlení od reflektorů vozidel, mraky), které způsobuje rychlé změny jasových podmínek obrazu. Dle citlivosti se přístroje rozlišují na několik generací, jak je uvedeno na Obr. 23.



Obr. 23: Spektrální citlivost noktovizoru

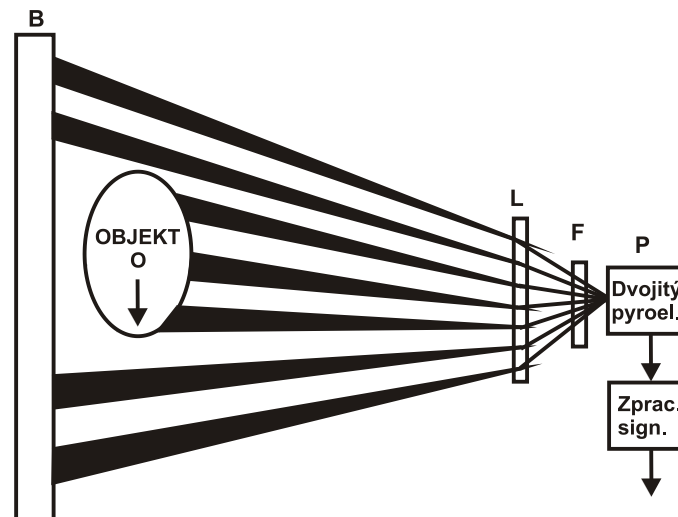
## 2.7 PIR detektory

Pasivní infračervené (passive infrared radiation – PIR) detektory využívají základní vlastnost živých teplokrevných živočichů, jejich teplotu a to, že vysílají tepelné záření v definovaném rozsahu.

Dle Wienova zákona o posunu maximální spektrální hustoty zářivého toku ke kratším vlnovým délkám s rostoucí teplotou povrchu, lze odvodit, že při teplotě těla 38 °C (tj. 273,15+38 K) je vlnová délka maxima záření, které emituje tkáň organismu, tj.  $\lambda = 8,24 \mu\text{m}$ . Na tuto vlnovou délku v pásmu okolo 9  $\mu\text{m}$  je nastaven filtr F, jak je zobrazeno na Obr. 24. Vlastní princip činnosti spočívá v tom, že pozadí B emituje záření z předmětů různých teplot a tedy dle Wienova zákona s různými maximy spekter v infračervené oblasti. Toto všesměrové záření je z určitého segmentu S pomocí Fresnelovy čočky L nebo s použitím speciálního zrcadla nasměrováno na infračervený filtr F a dopadne na dvojitý pyroelement P. Průchodem emitovaného záření přes filtr F se ostatní složky záření odfiltrují a na pyroelement dopadne jen záření z oblasti okolo 9  $\mu\text{m}$ , které emituje objekt O.

Z hlediska principu je důležité rozdělení hlídaného prostoru na segmenty S, ve kterých je objekt O při pohybu díky Fresnelovým čočkám (nebo zrcadlům) viděn, anebo je mimo oblast segmentu a je tedy neviditelný. Záření objektu dopadá nebo nedopadá na pyroelement

P, který má vysokou citlivost na změnu celkového množství přijímané energie, takže pokud objekt při pohybu v segmentech vidíme a mimo segmenty nevidíme, tak dochází rychlým změnám dopadajícího záření a objekt O je detekován. Oblast mimo pásmovou propust filtru F je pro detektor neviditelná, takže okolní zdroje záření s jinou povrchovou teplotou se neuplatní.

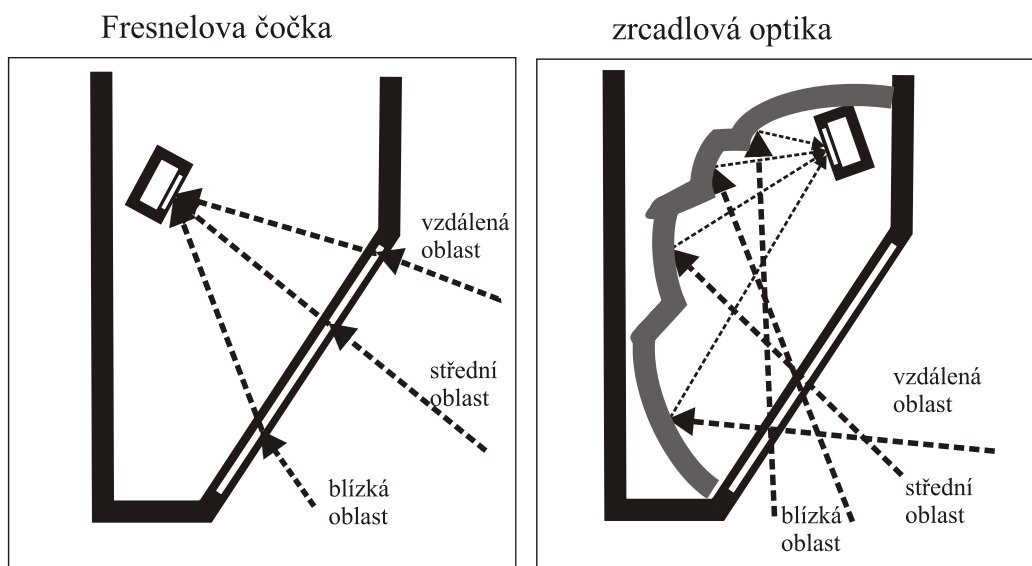


Obr. 24: Principiální schéma detekce PIR detektoru [43]

Vlastní objekt O představuje člověka, jehož povrchová teplota není všude stejná, a protože člověk má na sobě většinou oděv, tak v případě, že je teplota pozadí B přibližně stejná jako teplota člověka, dochází k jeho detekci, protože způsobuje zaclonění záření pozadí B a i tento úbytek dopadajícího množství energie je schopný detektor vyhodnotit.

Z uvedeného je zřejmé, že schopnost detekovat objekt je přímo úměrná odkryté ploše kůže člověka a vzdálenosti od detektoru, dále pak záleží na rozložení a geometrii segmentů, které jsou realizovány buď Fresnelovou čočkou nebo černým zrcadlem, jak je ukázáno na Obr. 25. Levý obrázek ukazuje optiku, složenou z Fresnelových čoček. Záření, přicházející zprava, je po průchodu přes plastické Fresnelovy čočky s využitím lomu nasměřováno na kovové pouzdro detektoru, kde po průchodu přes filtr dopadne na pyroelement. Dle umístění čoček na plastové ploše lze přicházející záření rozlišit na oblast, která hlídá vzdálenou, střední a blízkou zónu. V pravé části Obr. 25 je pak zrcadlová optika. Dopadající záření je pomocí lomených zrcadel odraženo opět na pyroelement (v kovovém pouzdře) a podle tvaru a umístění zrcadel je hlídaná oblast rozlišena na vzdálenou, střední a blízkou zónu. Povrch černých zrcadel je potažen kovovou vrstvou, která pohlcuje sluneční záření, má selektivní

spektrální vlastnosti pro odraz a chová se podobně jako filtr na vstupu do pouzdra pyroelementu.



Obr. 25: Optika s využitím Fresnelových čoček a zrcadel [44]

Mezi hlavní výhody PIR detektoru patří jeho nízké výrobní náklady a v definovaných prostorách poměrně vysoká spolehlivost.

Nevýhod PIR detektoru je poměrně mnoho:

**Zamaskování PIR detektoru** – zakrytí hlídané scény překážkou neprostupnou pro infra záření. Toto se řeší funkcí antimasking, která je realizovaná tak, že součástí detektoru je vysílací a přijímací dioda, která ve spektru okolo 900 nm vyšle záření určité energie a pokud je v blízkosti maskovací překážka, dojde k odrazu záření, toto přijme přijímací dioda, což detektor vyhodnotí jako poplach a sepne výstupní relé ANTIMASKING a ústředna PZTS toto vyhodnotí jako pokus o zamaskování detektoru.

**Možnost zakrytí záření** objektu, tj. zabránění vyzařování člověka, např. zakrytím polystyrénovou deskou, je takový objekt pro PIR detektor neviditelný, pokud na pozadí není zdroj záření, aby došlo k přerušení záření pozadí.

**Falešné poplachy** vznikají především výskytem tepelných zdrojů, jejichž povrchová teplota odpovídá teplotě lidského těla, a proto v prostorách, kde používáme PIR detektory, by měly být definované podmínky. Neměla by zde být pohybující se zvířata, a pokud ano, musí být upravena charakteristika detektoru, případně snížena jeho citlivost tak, aby objekty menší velikosti systém detektoru nedetekoval. Citlivost na jiné zdroje tepla není v současné době tak

kritická, protože standardní zdroje tepla pro vytápění nabíhají pomalu a jejich změna záření do prostoru je tak malá, že ji systém nedetekuje.

Celkové řešení **odstranění nevýhod** spočívá v konstrukci duálních detektorů nebo kombinovaných řešení, kde kromě sledování prostoru v infračervené oblasti, lze monitorovat tuto oblast pomocí mikrovlnného záření nebo snímat a vyhodnocovat viditelný obraz kamerou. Lze také použít ultrazvukové detektory pohybu, případně kombinovat PIR detektor s jinými bezpečnostními systémy [43].

## **2.8 Zhodnocení literární studie**

Literární studie byla zaměřena především na nalezení prací, které popisují fyzikální principy zařízení používaných v bezpečnostním průmyslu nebo takových prací, které jsou podkladem pro návrh kvantitativního popisu infračerveného záření, jako podklad pro vytvoření matematického modelu a pracoviště pro měření PIR detektorů. Zabývá se jednotlivými bezpečnostními systémy, které využívají IČ záření a podrobně vysvětluje jejich principy a definuje vlnové délky, na kterých tyto systémy pracují. Dále jsou zde vysvětleny výhody a nevýhody zařízení z hlediska praktického použití.

### 3 CÍLE DIZERTAČNÍ PRÁCE

Cílem dizertační práce je provést teoretický popis IČ záření, provést rozbor měření IČ záření, popsat zdroje IČ záření, senzory použitelné pro měření záření a vytvořit laboratorní pracoviště pro ověření jejich parametrů. Jednotlivé dílčí cíle jsou rozepsány v níže uvedených podkapitolách, které lze shrnout do následujících bodů:

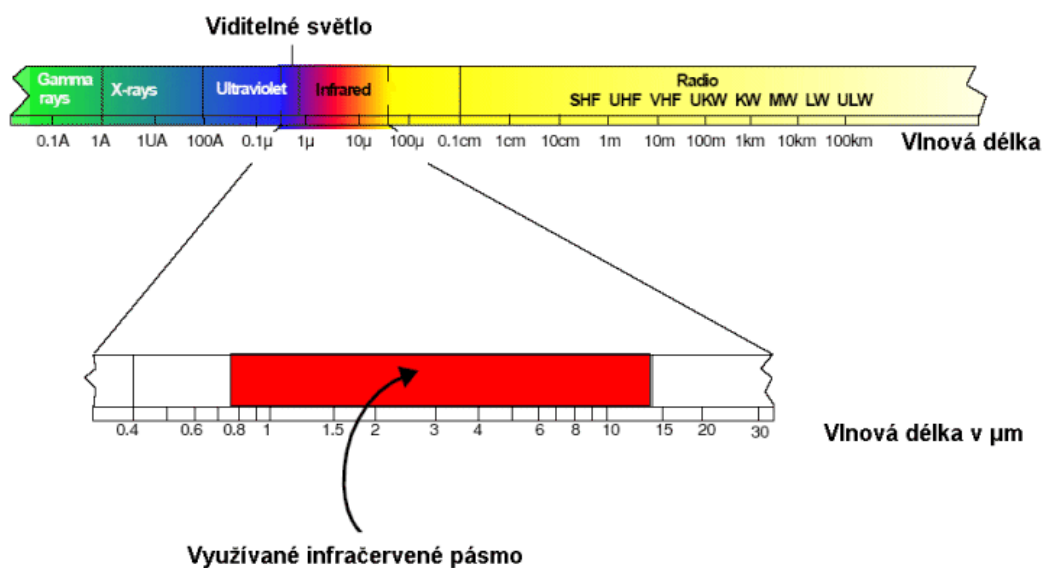
- a) Vytvoření pracoviště pro měření IČ záření. Naměření prostorových a dynamických charakteristik vlastností záření a reálné teploty zdroje pro verifikaci navrženého tepelného modelu.
- b) Návrh matematického modelu ohřevu tělesa radiací pro kvantitativní popis rozložení teploty v ohřívaném senzoru.
- c) Provedení simulace navrženého matematického modelu v prostředí COMSOL Multiphysics a jeho verifikace na pracovišti IČ.
- d) Vytvoření pracoviště pro testování PIR detektorů s využitím navrženého matematického modelu.

Přínosem práce bude možnost použití pracoviště pro další výzkum v oblasti senzorů IČ záření a také pro potřeby výuky. Vybudované pracoviště umožní studentům pochopit problematiku IČ záření a seznámit je s nejmodernějšími technologiemi testování dle nejnovějších trendů.

## 4 TEORETICKÁ ČÁST

### 4.1 Fyzikální podstata IČ záření

Elektromagnetické záření je součástí našeho života a člověk se setkává s jeho vlivy na každém kroku. Základními smysly, kterými můžeme vnímat a rozpoznat toto záření, je schopnost vidění v oblasti viditelného spektra [15] a schopnost kůže vnímat sálající teplo. Infračervené záření je mimo oblast viditelného spektra, jak je vidět na Obr. 26.

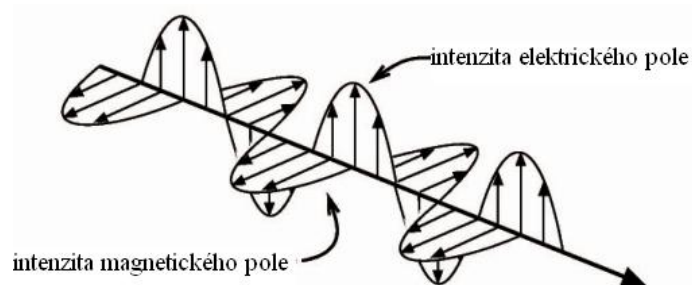


Obr. 26: Infračervené záření ve spektru elektromagnetického záření [11]

Zatímco viditelné spektrum začíná od vlnové délky 380 nm a končí na vlnové délce 750 nm, oblast infračerveného záření začíná na vlnové délce 0,75  $\mu\text{m}$  a končí na vlnové délce 1000  $\mu\text{m}$ . Podle vžitě konvence pro infračervenou spektroskopii a z praktických důvodů se dělí vlnové délky záření na oblast blízkou (A - NIR z angl. near infrared) 750-900 nm, střední (B-MIR z angl. middle infrared) 1,55-1,75  $\mu\text{m}$  a dalekou (C - FIR z angl. far infrared) 10,4 – 12,5  $\mu\text{m}$  dle oboru použití.

Tělesa, která mají vyšší teplotu, než je absolutní nula, vyzařují do okolí množství energie ve formě elektromagnetických vln, jak je uvedeno na Obr. 27.



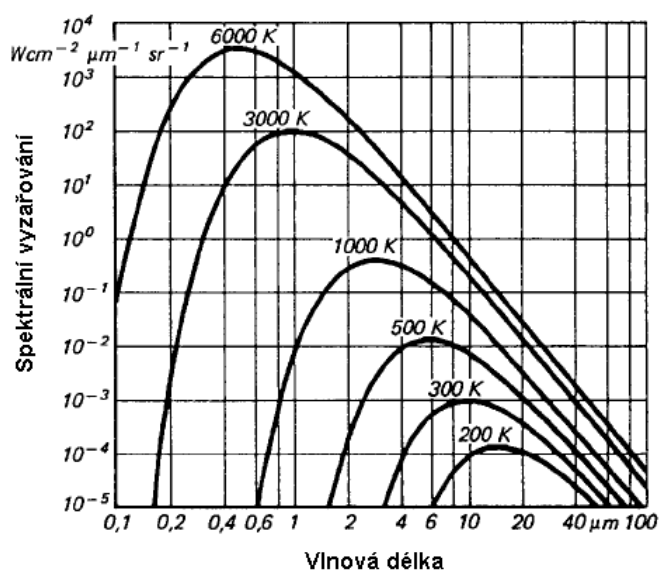


Obr. 27: Šíření elektromagnetických vln

Příčinou IČ záření je vnitřní mechanický pohyb molekul, atomů a elektronů. Intenzita tohoto pohybu závisí na teplotě objektu. Protože pohyb představuje přemísťování náboje, je vyzařováno elektromagnetické záření (fotonové částice). Tyto fotony se pohybují rychlostí světla a chovají se dle známých optických zákonů. Mohou být odkláněny, soustředěny čočkami nebo odráženy různými povrchy.

#### 4.2 Bilance vyzářené energie

Každá hmota o teplotě vyšší než je absolutní nula ( $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), vysílá infračervené záření, jehož intenzita odpovídá jeho teplotě. Diagram na Obr. 28 ukazuje charakteristiky vyzařování tělesa při různých teplotách. Z grafu je vidět, že tělesa při vysokých teplotách vyzařují malé množství viditelného záření. Proto můžeme vidět tyto předměty při vysokých teplotách (nad  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) v barvách mezi červenou a bílou (zkušeni taviči dovedou dle barvy odhadnout dosti přesně teplotu).



Obr. 28: Vyzařovací charakteristiky absolutně černého tělesa v závislosti na jeho teplotě [7]

Od r. 1930 se používaly v ocelárnách a železárnách vizuální pyrometry s mizícím vláknem. Neviditelná část spektra však obsahuje až 100 000 krát více energie. Na této skutečnosti založena infračervená technologie. Na diagramu je rovněž vidět, že maximum vyzařování se posunuje směrem ke stále kratším vlnovým délkám, když roste teplota měřeného objektu a že křivky tělesa se při různých teplotách nepřekrývají.

Vyzařovaná energie v celém vlnovém rozsahu (plocha pod každou křivkou) roste se čtvrtou mocninou teploty dle Stefan-Boltzmannova zákona (1) a je zřejmé, že z vlnové délky maxima vyzařované energie lze jednoznačně určit teplotu.

$$Q_0 = H_0 \cdot S_l = \delta_0 \cdot T_l^4 \cdot S_l, \quad (1)$$

kde  $Q_0$  je celková vyzářená energie za jednotku času z jednotkové plochy absolutně černého tělesa (W),  $H_0$  je celková intenzita radiace ( $\text{W}/\text{m}^2$ ),  $S_l$  je plocha černého tělesa,  $T_l$  je absolutní teplota tělesa a  $\delta_0$  je Stefan-Boltzmannova konstanta  $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ (W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4})$  [16].

Z Obr. 28 je patrné, že ideální by bylo nastavit infračervený teploměr na co nejširší možné vlnové pásmo, aby získal co nejvíce energie (odpovídající ploše pod křivkou), neboli signálu z měřeného tělesa. Jsou však určité případy, v kterých to není vždy výhodné. Například na diagramu intenzita vyzařování při  $2 \mu\text{m}$  roste mnohem více se zvyšováním teploty než při  $10 \mu\text{m}$ . Čím větší je rozdíl vyzařované energie při určitém teplotním rozdílu tělesa, tím přesněji infračervený teploměr pracuje, jak vyplývá z Wienova zákona posunu - rovnice (2), který vyjadřuje, že s rostoucí teplotou zářiče se posouvá maximální hodnota spektrální hustoty zářivého toku ke kratším vlnovým délkám. Pak odpovídá rozsah vlnových délek měřicímu teplotnímu rozsahu pyrometru.

$$\lambda_{\max} = \frac{b_w}{T_l}, \quad (2)$$

kde  $\lambda_{\max}$  je vlnová délka maxima vyzařování,  $T_l$  je teplota tělesa a  $b_w$  je Wienova konstanta, jejíž hodnota je přibližně  $b_w = 2,898 \text{ mmK}$ .

Spektrální hustota záření v tomto maximu je přitom úměrná páté mocnině teploty,

$$W_l = \text{konst} \cdot T_l^5 \quad (3)$$

Při nízkých teplotách infračervený teploměr pracující při 2  $\mu\text{m}$  by přestával pracovat pod 600  $^{\circ}\text{C}$  a nezměřil by téměř nic, neboť by bylo příliš málo vyzařované energie. Dalším důvodem pro výrobu přístrojů s různými vlnovými rozsahy jsou vlastnosti emisivity některých materiálů známých jako "ne-šedá tělesa" (např. sklo, kovy a plastové povlaky). Diagram na Obr. 28 zachycuje vyzařování ideálního, tzv. "černého tělesa". Mnoho těles však emituje při stejné teplotě méně energie. Vztah mezi skutečnou vyzařovanou energií a energií vyzařovanou černým tělesem stejné teploty je znám jako emisivita  $\varepsilon$  a může mít maximální hodnotu 1 (vyzařování tělesa by pak odpovídalo ideálnímu černému tělesu) a minimální hodnotu 0. Tělesa s emisivitou menší než 1 se nazývají šedá tělesa. Tělesa, jejichž emisivita závisí na teplotě, ale také na vlnové délce se nazývají ne-šedá tělesa (non-gray bodies) (Obr. 30).

Celková bilance záření skutečného tělesa je uvedena na

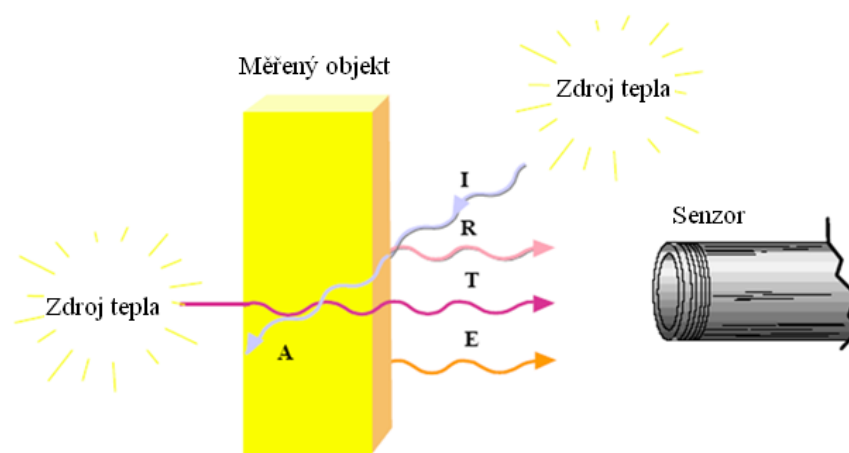
Obr. 29. Celkové množství vyzařované energie je složeno ze záření emitovaného vlastním tělesem  $E$ , zde přibývá záření odražené  $R$  od zdroje tepla  $I$  před měřeným objektem a záření procházejícího skrz měřený objekt  $T$  od zdroje tepla umístěného za měřeným objektem. Dle rovnice (4) je celkový součet poměrné emisivity, odrazivosti a prostupnosti záření roven 1.

$$E + R + T = 1 \quad (4)$$

U pevných těles není žádné procházející záření v infračerveném pásmu ( $T = 0$ ). Výsledkem je, že pro emisi platí vztah 5.

$$E + R = 1 \quad (5)$$

Ideální černé těleso má také nulovou odrazivost ( $R = 0$ ), takže  $E = 1$ .



$I$  – dopadající záření,  $R$  – odražené záření,  $T$  – procházející záření,  $E$  – emitované záření,  $A$  - absorpce

Obr. 29: Celková bilance záření reálného tělesa [11]

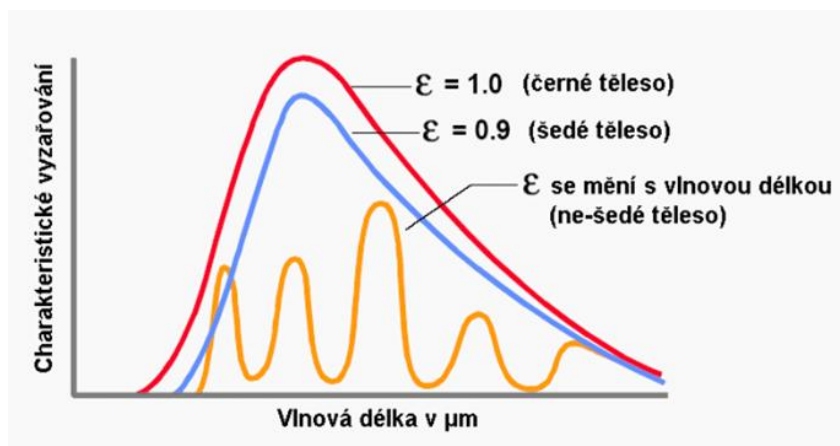
### 4.3 Emisivita materiálů

Skutečné těleso na rozdíl od absolutně černého tělesa není schopné vyzářit všechnu energii  $Q_s$ , což je vyjádřeno vztahem (6):

$$Q_s = \varepsilon \cdot Q_0 = \varepsilon \cdot H_0 \cdot S_1 = \varepsilon \cdot \delta_0 \cdot T_1^4 \cdot S_1 \quad (6)$$

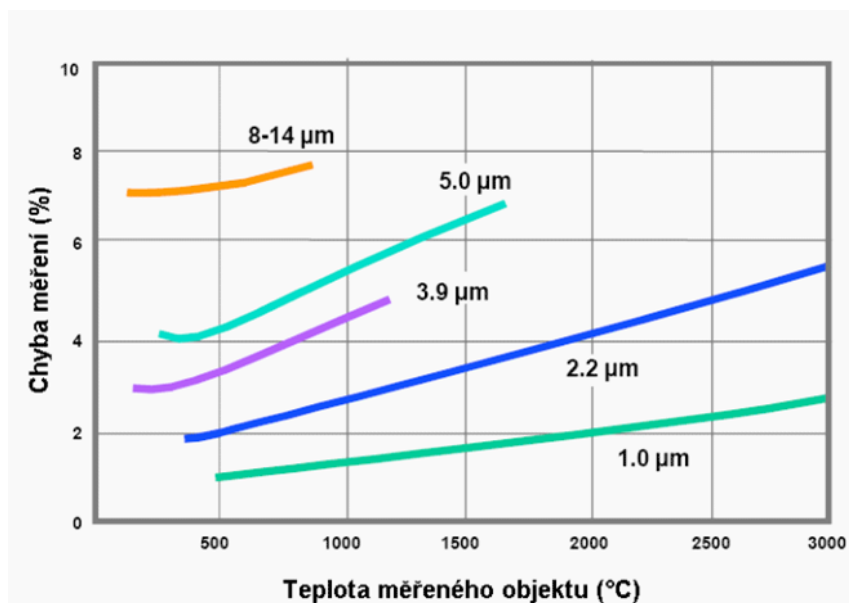
kde  $\varepsilon$  je emisivita objektu.

Emisivita objektu je rovna poměru intenzit záření reálného povrchu a povrchu absolutně černého tělesa. Skutečná tělesa představují většinou ne-šedá tělesa, která mají charakteristiku vyzářené energie závislou na vlnové délce, jak je znázorněno na Obr. 30 žlutou čarou. Mnoho nekovových materiálů jako je dřevo, plasty, pryž, organické materiály, kámen nebo beton mají povrch, který odráží velmi málo, a proto mají vysokou emisivitu mezi 0,8 a 0,95. Naopak kovy, zvláště s leštěným nebo lesklým povrchem, mají emisivitu kolem 0,1, zrcadlo má emisivitu, která se blíží 0. Tato nepřesnost je kompenzována nastavením faktoru emivity. Tento jev se prakticky řeší tak, že se na měřený povrch nalepí samolepka, jejíž povrch má emisivitu blízkou se emivitě absolutně černého tělesa, oblast samolepky je změřena a potom je teploměr naměřen na oblast mimo samolepku a nastaven koeficient emivity tak, aby teplota odpovídala původně změřené teplotě.



Obr. 30: Vyzářování ne-šedých těles [11]

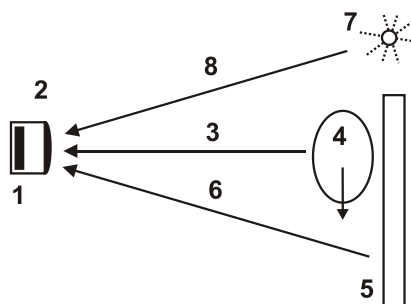
Emisivita kovů je přímo závislá na vlnové délce a teplotě materiálu a proto, pokud je na vstupu přístroje filtr na určitou vlnovou délku, lze se dopustit chyby měření, což vysvětluje Wienův zákon o posunu spektra (2) a je ukázáno na Obr. 31.



Obr. 31: Chyby měření teploty kovů způsobené různou emisivitou materiálů [11]

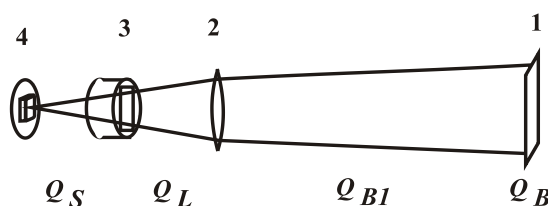
#### 4.4 Bilance energie přicházející do senzoru u PIR detektorů

Záření dopadající na PIR detektor jsou naznačena na Obr. 32. Vlastní senzor 1 je umístěn uvnitř detektoru 2. Na tento detektor dopadá záření 8 od slunce 7, dále pak záření 6 způsobené pozadím objektu 5 a užitečné záření 3, které je emitováno narušitelem 4, kterého je žádoucí detekovat.



Obr. 32: Zdroje záření ovlivňující PIR detektor

U PIR detektoru s Fresnelovými čočkami dle Obr. 33 objekt 1 vysílá záření, které projde přes čočku 2, optický filtr 3 a toto záření dopadne na vlastní pyroelement 4.



Obr. 33: Celá cesta energie u PIR detektoru s Fresnelovými čočkami

Ze vztahu (6) je následně vyplývá:

$$Q_B = \delta_0 \cdot S_1 \cdot (\varepsilon_1 \cdot T_1^4), \quad (7)$$

kde  $\varepsilon_1$  je koeficient emisivity tělesa 1.

Energie, která pak dopadne na Fresnelovu čočku

$$Q_{B1} = \delta_0 \cdot S_1 \cdot (\varphi_1 \cdot \varepsilon_1 \cdot T_1^4), \quad (8)$$

kde  $\varphi_1$  je úhlový součinitel osálení.

Energie, která projde Fresnelovou čočkou

$$Q_L = \delta_0 \cdot S_1 \cdot (\tau_1 \cdot \varphi_1 \cdot \varepsilon_1 \cdot T_1^4), \quad (9)$$

kde  $\tau_1$  je koeficient průniku plastickou čočkou 2.

Energie procházející přes filtr pak

$$Q_F = \delta_0 \cdot S_1 \cdot (\tau_2 \cdot \tau_1 \cdot \varphi_1 \cdot \varepsilon_1 \cdot T_1^4), \quad (10)$$

kde  $\tau_2$  je koeficient průniku filtru 3,

a konečně

$$Q_M = Q_F \cdot (\alpha + \rho + \tau_S + \delta_0 \cdot S_2 \cdot \varepsilon_S \cdot T_S^4), \quad (11)$$

kde  $Q_M$  je metodická energie,  $\alpha$  je koeficient polarizace pyroelementu,  $\rho$  je koeficient reflexe,  $\tau_S$  je koeficient průniku a  $\delta_0 \cdot S_2 \cdot \varepsilon_S \cdot T_S^4$  je energie vyzářená zpět do prostoru.

Napětí na výstupu pyroelementu pak je

$$U_{out} = k_{pe} \cdot Q_M, \quad (12)$$

kde  $k_{pe}$  je konstanta citlivosti pyroelementu ( V/W) [1], [2].

Dále se v dizertační práci zabývám návrhem matematického modelu, popisujícího teplotní pole v zahříváném tělese a to s využitím výše uvedených rovnic a taktéž s využitím Fourier-Kirchhoffovy rovnice vedení tepla s cílem kvantifikovat množství tepla ze zářiče dopadajícího na povrch měřícího senzoru.

## 5 NÁVRH MATEMATICKÉHO MODELU POPISUJÍCÍHO OHŘEV SENZORU RADIACÍ

Tepelné záření dopadající na senzor je částečně odraženo a určitá část je senzorem pohlcena, čímž dochází k tomu, že naměřená teplota na počátku měření neodpovídá zcela skutečné teplotě. Cílem v této kapitole je vytvoření a řešení matematického modelu nestacionárního sdílení tepla vedením v senzoru ohříváného radiací.

Tento případ se nejčastěji vyskytuje u plošných materiálů, při ustalovacích procesech působením tepla nebo působením tepla a mechanického napětí. Matematický popis je možno aplikovat na ohřev snímače radiací. Nejprve je nutno vyjádřit hustotu tepelného toku  $q$  mezi jednotlivými povrchy [16]:

$$q(\tau) = \sigma \cdot C(T_2^4 - T_1^4), \quad (13)$$

kde  $\sigma$  je Stefan-Boltzmannova konstanta, konstanta  $C$  charakterizuje emisní a geometrické vlastnosti povrchů,  $t_2$  je teplota zdroje,  $t_1$  teplota ohříváného povrchu, tj. v našem případě teplota povrchu desky. Rovnice je pak určitou modifikací vztahu, který se používá při sdílení tepla zářením.

Ve většině případů vyskytujících se ve zpracovatelské praxi je teplota zdroje záření značně vyšší, než teplota povrchu ohříváného tělesa a možno tedy psát:

$$q(\tau) = \sigma \cdot C(T_2^4 - T_1^4) \simeq C T_2^4 = konst. = q. \quad (14)$$

Okrajová podmínka druhého druhu se pak zjednoduší, neboť tepelný tok je zde konstantní. Nestacionární teplotní pole je pak možno problému popsat následovně:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (15)$$

$$\left( \frac{\partial T}{\partial \tau} \right)_{x=0} = 0 \quad (15a)$$

$$\lambda \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x=b} = q \quad (15b)$$

$$T = T_p \quad \text{pro} \quad \tau = 0 \quad (15c)$$

$b$  – poloviční tloušťka senzoru,  $x$  – směrová souřadnice.

Laplaceovou transformací rovnice (15) je pak odvozen vztah  $sT_L - T_p = aT_L$ , jehož integrál za platnosti transformované podmínky osové symetrie je pak možno psát v následujícím tvaru

$$T_L = A \cdot \cosh\left(x\sqrt{\frac{s}{a}}\right) + \frac{T_p}{s} \quad (16)$$

Obraz okrajové podmínky (15b) je:

$$\lambda \left( \frac{\partial T_L}{\partial x} \right)_{x=0} = \frac{q}{s} \quad (17)$$

Dosazením okrajové podmínky do (16) je určena integrační konstanta A, pro kterou platí

$$A = \frac{q}{s \cdot \lambda \cdot \sqrt{\frac{s}{a}} \sinh\left(b \cdot \sqrt{\frac{s}{a}}\right)} \quad (18)$$

Dosazením do vztahu (16) je odvozeno:

$$T_L = \frac{\cosh\left(x\sqrt{\frac{s}{a}}\right)}{s \cdot \lambda \cdot \sqrt{\frac{s}{a}} \cdot \sinh\left(b \cdot \sqrt{\frac{s}{a}}\right)} + \frac{T_p}{s} \quad (19)$$

Dalším řešením s použitím vztahů dle Lykova [45]:

1) pro nultý člen platí

$$T_{n=0} = \frac{\tau q a}{\lambda b} + \frac{q x^2}{2 \lambda b} - \frac{q b}{6 \lambda} \quad (20)$$

2) pro  $n$ -tý člen zpětné transformace plyne

$$T_{n \neq 0} = - \frac{2 q b \cos\left(\frac{x}{b} p_n\right) e^{(-F o p_n^2)}}{\lambda p_n^2 \cos(p_n)} \quad (21)$$

Konečné řešení je pak dáno:

$$T = \frac{q}{\lambda} \left[ \frac{a \tau}{b} + \frac{x^2}{2 b} - \frac{b}{6} - 2 b \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos\left(\frac{x}{b} p_n\right) e^{(-F o p_n^2)}}{p_n^2 \cos(p_n)} \right] + T_p \quad (22)$$

kde  $p_n = n\pi$  a  $F o = \frac{a \tau}{b^2}$ .

Řešení (22) je vhodné přenést do bezrozměrného vztahu zavedením Kirpičevova kritéria  $K_i$

$$K_i = \frac{q b}{\lambda (T_c - T_p)} \quad (23)$$



kde  $T_c$  je střední teplota zářiče.

Násobením rovnice (22) Kirpičevovým kriteriem a mírnou úpravou je odvozeno konečné řešení nestacionárního teplotního pole pro symetricky ohřivanou desku radiací.

$$\frac{T - T_p}{T_c - T_p} = K_i \left[ Fo + \frac{1}{2} \left( \frac{x}{b} \right)^2 - \frac{1}{6} - 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos \left( \frac{x}{b} p_n \right)}{p_n^2 \cos p_n} e^{(-Fop_n^2)} \right] \quad (24)$$

Podle tvaru řešení (24) je zřejmé, že se zvětšujícím se časem zahřívání vliv členu nekonečné řady klesá, tj. můžeme očekávat také Fourierovo kritérium  $Fo$ , kdy vliv nekonečné řady možno zanedbat a pro  $Fo > Fo_k$  bude teplota v libovolném místě stěny prakticky lineární funkcí času a teplotní profil napříč deskou (ve směru osy  $x$ ) je parabola. Z výsledku je zřejmé, že ohřev zářením je při velké teplotě zdroje velmi intenzivní.

### Výpočtová část

Teoretický výpočet teplotních polí v zahříváném senzoru lze provést na základě analytického řešení (24) matematického modelu popsaného rovnicemi (15), (15 a - c), kde hodnota Kirpičevova kritéria  $K_i$ , se určí podle vztahu (23). Fourierovo kritérium  $Fo$ , které představuje bezrozměrnou dobu ohřevu, se vypočítá podle rovnice (25)

$$Fo = \frac{a\tau}{b^2} \quad (25)$$

kde  $b$  je poloviční tloušťka senzoru,  $\tau$  je doba ohřevu,  $a$  je teplotní vodivost senzoru

$$a = \frac{\lambda \rho}{c_p} \quad (26)$$

$\lambda$  je součinitel tepelné vodivosti senzoru,  $\rho$  je hustota materiálu senzoru,  $c_p$  je měrná tepelná kapacita materiálu senzoru.

## 6 ŘEŠENÍ MATEMATICKÉHO MODELU V PROSTŘEDÍ MAPLE

Výše popsaný výpočet teplotních polí jsem provedl v programu Maple. Programová aplikace provádí automatický výpočet teplotních polí pro zadané vstupní hodnoty. Zdrojový kód vypadá následovně:

*Nadefinování vstupních hodnot:*

```
> q:=1;
> b:=0.005;
> lambda:=4.6;
> tc:=36;
> tp:=20;
> rho1:=7450;
> cp:=250;
> a:=lambda/(rho1*cp);
> Fo:=a*tau/b^2;
```

$a := 0.000002469798658$   
 $Fo := 0.09879194632 \tau$

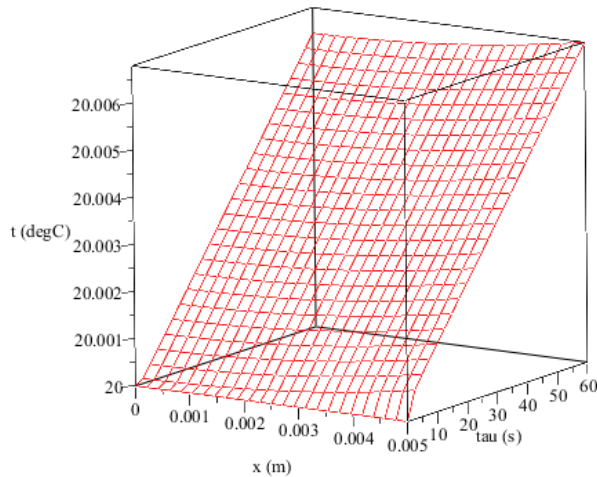
*Výpočet kořenů p:*

```
> for i from 1 to 300 do
p[i]:=evalf(Pi*i)
end do;
```

$p_1 := 3.141592654$   
 $p_2 := 6.283185308$   
 $p_3 := 9.424777962$   
⋮

*Výpočet 3D teplotních polí na základě analytického řešení (24):*

```
> with(plots):
> grafreal:=plot3d((q/lambda*(a*tau/b+x^2/(2*b)-(b/6))-
2*q*b/lambda*Sum(cos(x/b*p[n])*exp(-
(a*tau/b^2)*p[n]^2)/(p[n]^2*cos(p[n])),n=1..300))+tp,x=0..b,tau=0..60,
axes=box,style=wireframe,color=red,labels=["x (m)", "tau (s)", "t
(degC)"]);
> display(grafreal);
```



Obr. 34: 3D teplotní pole v zahřivaném senzoru vypočtené v Maple

Výpočet teplotních polí ve 2D na základě analytického řešení (24):

```

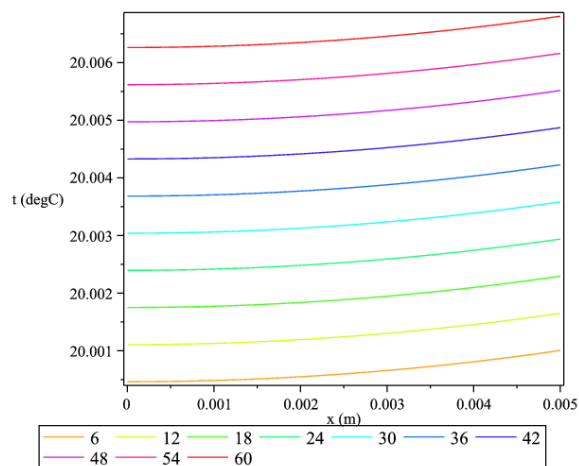
> for j from 1 to 10 do
fce2D[j] := q/lambda * (a*tau[j]/b + x^2 / (2*b) - (b/6)) -
    2*b/lambda * Sum(cos(x/b*p[n]) * exp(-
    (a*tau[j]/b^2) * p[n]^2) / (p[n]^2 * cos(p[n])), n=1..300) + tp
end do;

> for k from 1 to 10 do
tau[k] := 6*k
end do;

tau_1 := 6
tau_2 := 12
tau_3 := 18
⋮

> graf1 := plot(fce2D[1], x=0..b, legend=tau[1], axes=box, color=COLOR(HUE, .1));
> graf2 := plot(fce2D[2], x=0..b, legend=tau[2], axes=box, color=COLOR(HUE, .2));
> graf3 := plot(fce2D[3], x=0..b, legend=tau[3], axes=box, color=COLOR(HUE, .3));
> graf4 := plot(fce2D[4], x=0..b, legend=tau[4], axes=box, color=COLOR(HUE, .4));
> graf5 := plot(fce2D[5], x=0..b, legend=tau[5], axes=box, color=COLOR(HUE, .5));
> graf6 := plot(fce2D[6], x=0..b, legend=tau[6], axes=box, color=COLOR(HUE, .6));
> graf7 := plot(fce2D[7], x=0..b, legend=tau[7], axes=box, color=COLOR(HUE, .7));
> graf8 := plot(fce2D[8], x=0..b, legend=tau[8], axes=box, color=COLOR(HUE, .8));
> graf9 := plot(fce2D[9], x=0..b, legend=tau[9], axes=box, color=COLOR(HUE, .9));
> graf10 := plot(fce2D[10], x=0..b, legend=tau[10], axes=box, color=COLOR(HUE, 1));
> display(graf1, graf2, graf3, graf4, graf5, graf6, graf7, graf8, graf9, graf10);

```



Obr. 35: 2D teplotní pole v zahřívaném senzoru vypočtené v Maple

Výpočet teploty senzoru v požadovaném místě a čase:

```
> x[zvol] := 0.002;
                                     xzvol := 0.002
> tau[zvol] := 550;
                                     τzvol := 550
> evalf((q/lambda*(a*tau[zvol]/b+x[zvol]^2/(2*b) - (b/6)) -
2*b/lambda*Sum(cos(x[zvol]/b*p[n])*exp(-
(a*tau[zvol]/b^2)*p[n]^2)/(p[n]^2*cos(p[n])),n=1..300)+tp));
                                     20.05896620
```

Výstupem programové aplikace jsou grafické závislosti zobrazující 3D a 2D reálná teplotní pole v zahřívaném senzoru pro požadované vstupní hodnoty. 3D teplotní pole znázorňuje rozložení teploty pro zvolenou dobu ohřevu senzoru (Obr. 34). 2D teplotní pole zobrazuje průběhy teplot v senzoru v požadovaných časech ohřevu (Obr. 35). Aplikace zároveň provádí výpočet teploty senzoru v daném místě a čase, jak je ukázáno v poslední části výše uvedeného zdrojového souboru.

## 7 SIMULACE A VERIFIKACE NAVRŽENÉHO MODELU V PROSTŘEDÍ COMSOL MULTIPHYSICS

Protože nebylo možné určit veškerá potřebná data experimentálně, použil jsem pro posouzení tepelného chování senzorů software COMSOL Multiphysics, který je vhodný pro simulaci fyzikálních dějů a je určen hlavně vývojářům, výzkumným i vědeckým pracovníkům. Uživatelé mají možnost prostřednictvím tohoto software názorně pronikat do podstaty fyzikálních procesů. Do řešení je možné zahrnout několik fyzikálních vlivů současně, tzv. multifyzikální úlohy, a tak provádět komplexnější analýzu modelu. Obecně jsou úlohy parciálních diferenciálních rovnic řešitelné na základě definice prostředí, které tato rovnice popisuje a zadáním okrajových podmínek na plochách, hranách nebo bodech v daném geometrickém modelu. Uživatel musí vědět, jaké fyzikální vlivy na zobrazenou geometrii působí. COMSOL Multiphysics obsahuje knihovny parciálních diferenciálních rovnic, které definují různé aplikační režimy. Výběrem režimu se uživateli v grafickém editoru automaticky zobrazují příslušná dialogová okna pro zadávání vlastností oblastí a okrajových podmínek. Hlavní výhodou COMSOLu je možnost kombinace několika aplikačních režimů do jednoho modelu. [52]

### 7.1 Simulace rozložení teploty a hustoty tepelného toku v místě povrchu pyroelektrického elementu

Cílem simulace bylo určit rozložení teploty a hustoty tepelného toku v místě povrchu pyroelektrického elementu v závislosti na vzdálenosti narušitele od detektoru. Pro simulaci jsem použil „Heat Transfer Module“, prostředí „Surface-to-Surface Radiation“. Velikost narušitele simuluje zářící plocha o velikosti 2 m x 0,5 m, vlastnosti detektoru představuje pyroelement o velikosti 5 mm x 2,3 mm x 0,2 mm. Simulaci jsem provedl za podmínek:

teplota povrchu narušitele 36 °C,

teplota okolního vzduchu 20 °C,

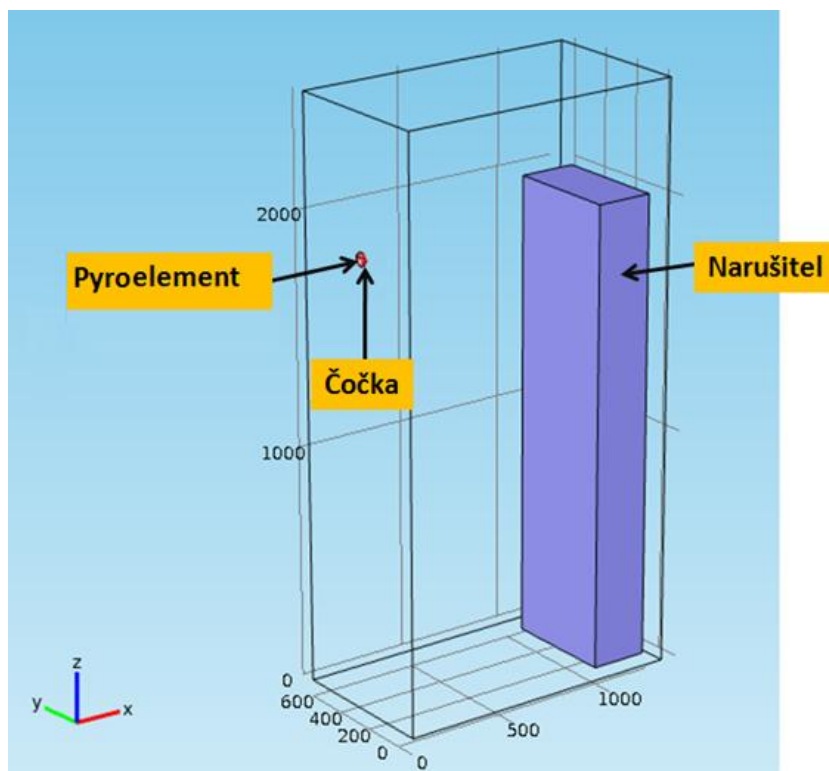
relativní sálavost povrchu pyroelektrického elementu 0,9,

relativní sálavost narušitele 0,97,

teplotní vodivost pyroelektrického elementu  $2,255 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ,

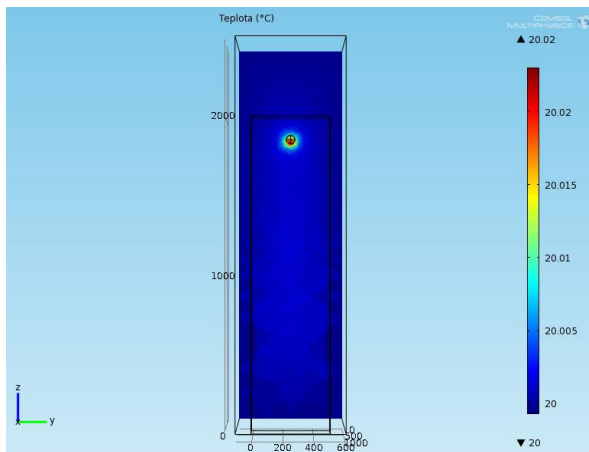
teplotní vodivost narušitele  $1,484 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ ,

teplotní vodivost vzduchu  $2,14 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ .

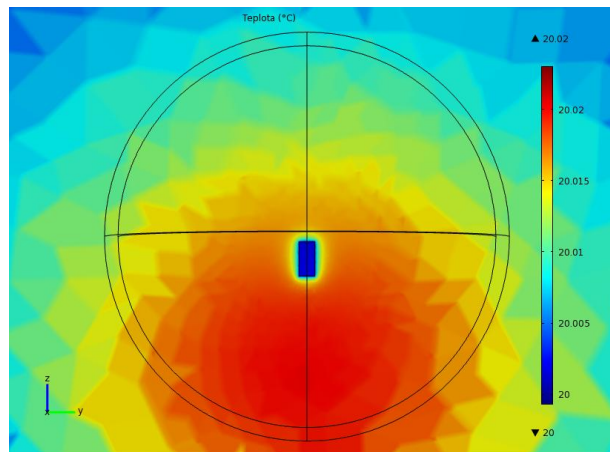


*Obr. 36: Geometrický náčrt situace*

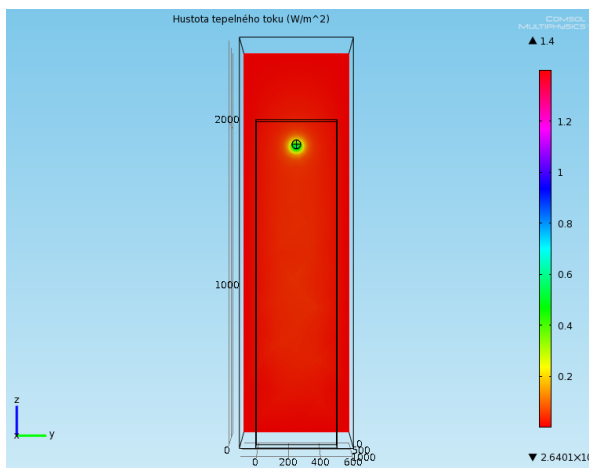
Následující obrázky zachycují výsledky simulace, tj. rozložení teploty a hustoty tepelného toku v místě povrchu pyroelektrického elementu pro vzdálenosti narušitele od detektoru 1 m až 5 m.



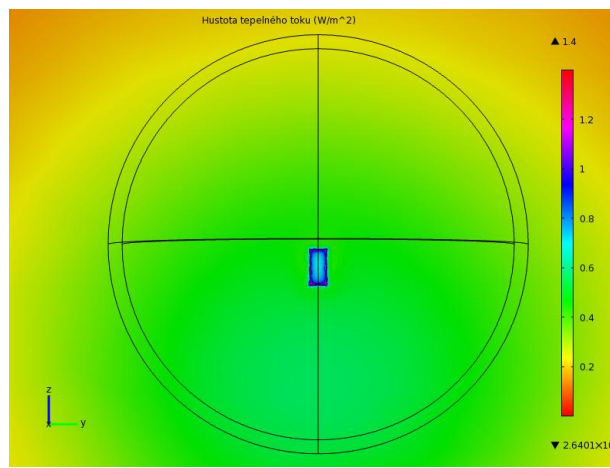
*Rozložení teploty v řezu v místě povrchu pyroelektrického elementu*



*Rozložení teploty v řezu v místě povrchu pyroelektrického elementu – detail v místě detektoru*



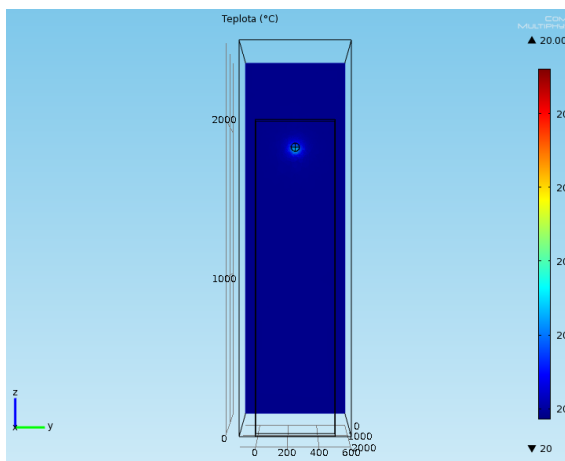
*Rozložení hustoty tepelného toku v řezu v místě povrchu pyroelektrického elementu*



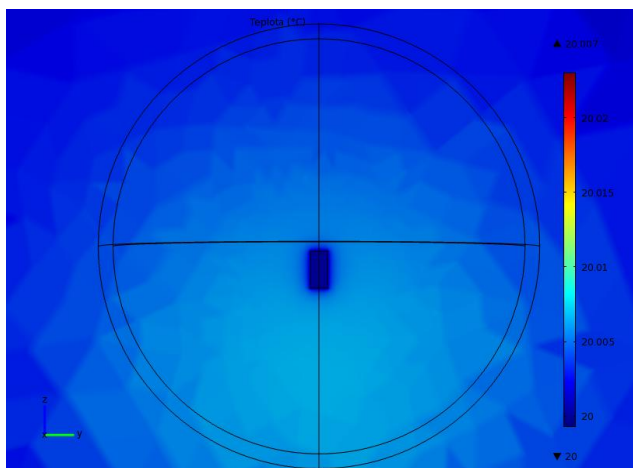
*Rozložení hustoty tepelného toku v řezu v místě povrchu pyroelektrického elementu – detail v místě detektoru*

*Obr. 37: Vzdálenost detektor – narušitel 1 m*

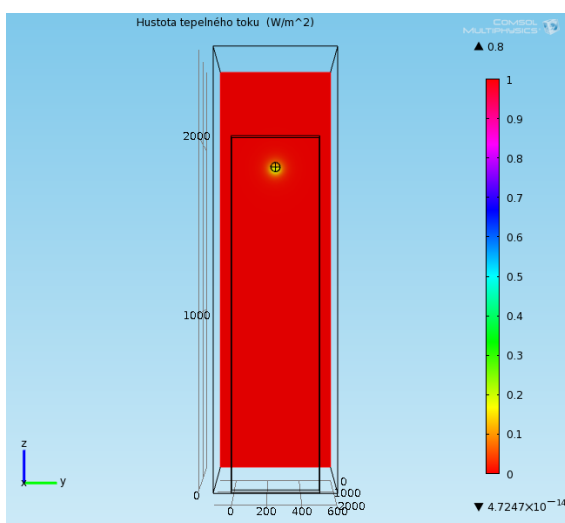
Obr. 37 vlevo nahoře ukazuje řez znázorňující rozložení teploty v místě povrchu pyroelementu pro vzdálenost detektoru od narušitele 1 m. Na obrázku vpravo nahoře je pak zobrazen detail rozložení teploty v blízkosti pyroelementu. Je zřejmé, že v blízkém okolí pyroelementu dochází ke zvyšování teploty vzduchu vzhledem k teplotě ve větší vzdálenosti od detektoru. Na levém dolním obrázku je znázorněno rozložení hustoty tepelného toku v řezu v místě povrchu pyroelementu, na pravém obrázku je pak detail rozložení hustoty tepelného toku v blízkosti pyroelementu. V blízkosti pyroelementu se hustota tepelného toku zvyšuje, až dosáhne hodnoty přibližně o  $0,5 \text{ W/m}^2$  vyšší vzhledem k okolí.



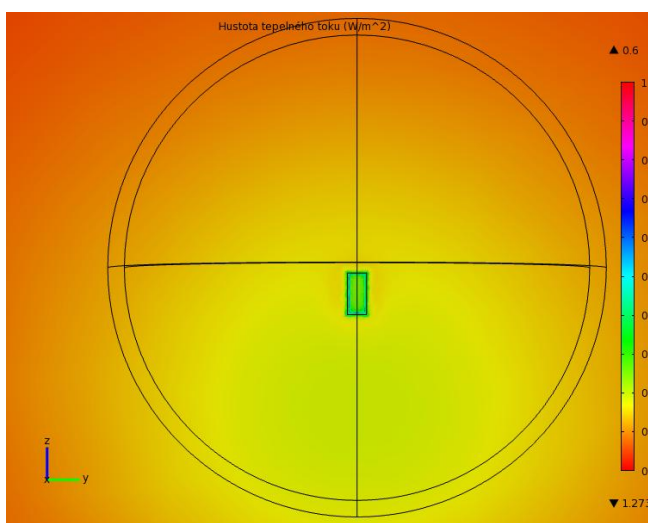
Rozložení teploty v řezu v místě povrchu pyroelektrického elementu



Rozložení teploty v řezu v místě povrchu pyroelektrického elementu – detail v místě detektoru



Rozložení hustoty tepelného toku v řezu v místě povrchu pyroelektrického elementu

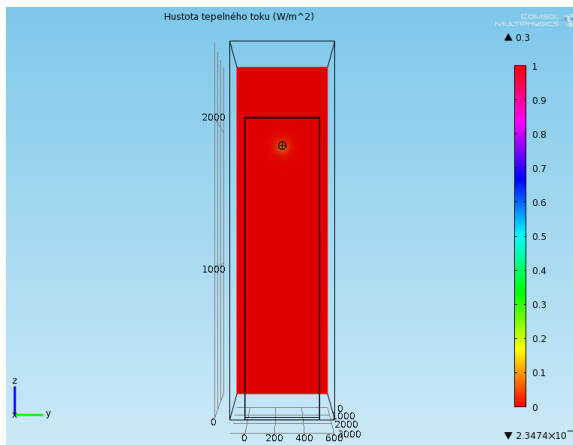


Rozložení hustoty tepelného toku v řezu v místě povrchu pyroelektrického elementu – detail v místě detektoru

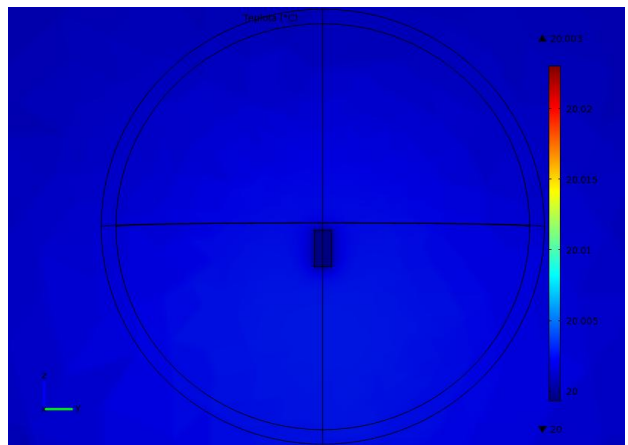
Obr. 38: Vzdálenost detektor – narušitel 2 m

Na Obr. 38 je uveden výsledek simulace pro vzdálenost detektoru od narušitele 2 m. Stejně jako v předchozím případě dochází v blízkosti pyroelementu k mírnému zvýšení teploty a hustota tepelného toku je přibližně o  $0,3 \text{ W/m}^2$  vyšší vzhledem k okolí.

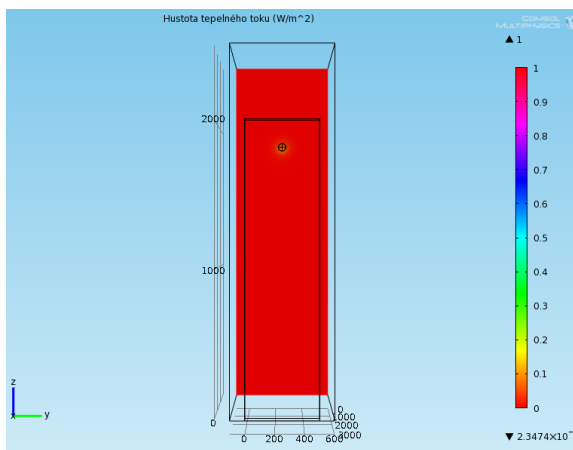




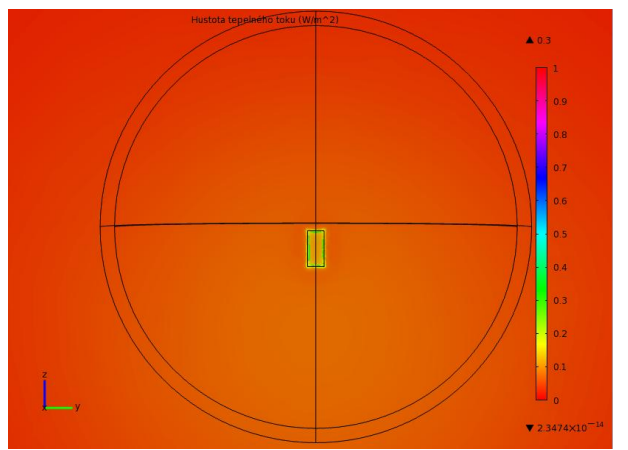
Rozložení teploty v řezu v místě povrchu pyroelektrického elementu



Rozložení teploty v řezu v místě povrchu pyroelektrického elementu – detail v místě detektoru



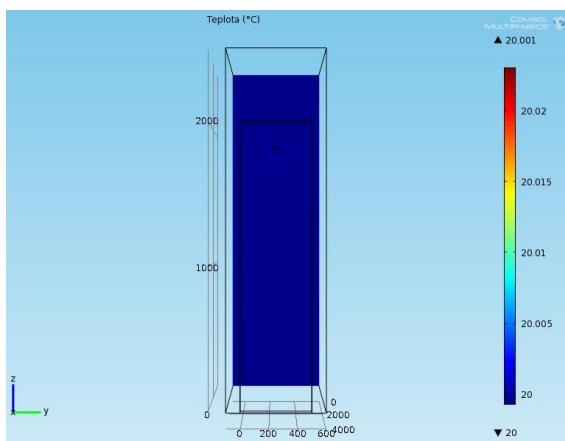
Rozložení hustoty tepelného toku v řezu v místě povrchu pyroelektrického elementu



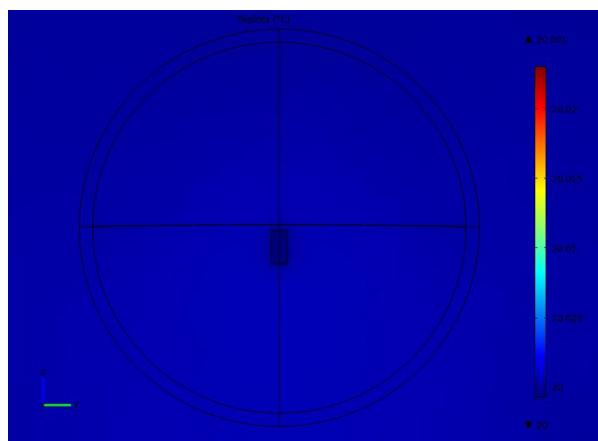
Rozložení hustoty tepelného toku v řezu v místě povrchu pyroelektrického elementu – detail v místě detektoru

Obr. 39: Vzdálenost detektor – narušitel 3 m

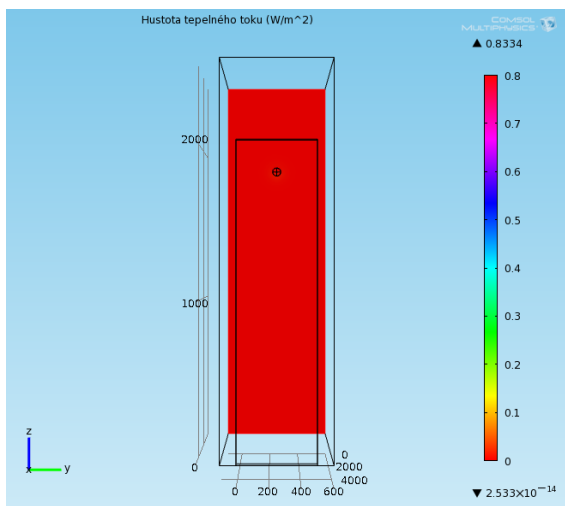
V případě vzdálenosti detektoru od narušitele 3 m došlo k poklesu hustoty tepelného toku na hodnotu cca 0,24 W/m<sup>2</sup> a zároveň k dalšímu poklesu teploty povrchu pyroelementu, jak je vidět na Obr. 39.



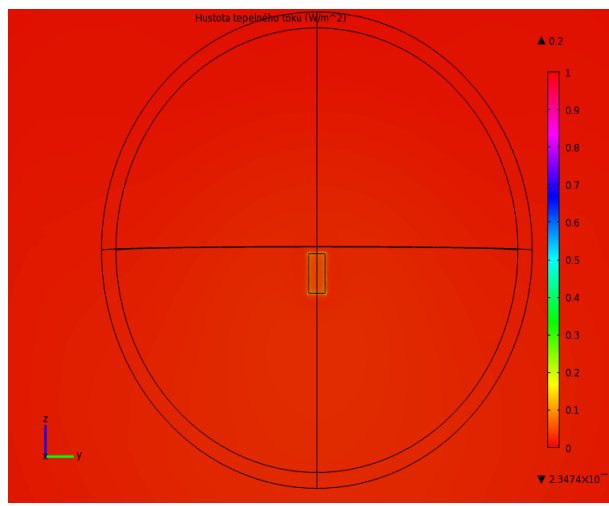
Rozložení teploty v řezu v místě povrchu pyroelektrického elementu



Rozložení teploty v řezu v místě povrchu pyroelektrického elementu – detail v místě detektoru



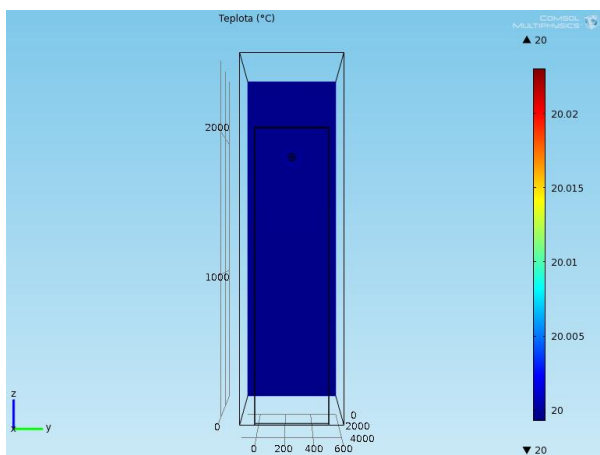
Rozložení hustoty tepelného toku v řezu v místě povrchu pyroelektrického elementu



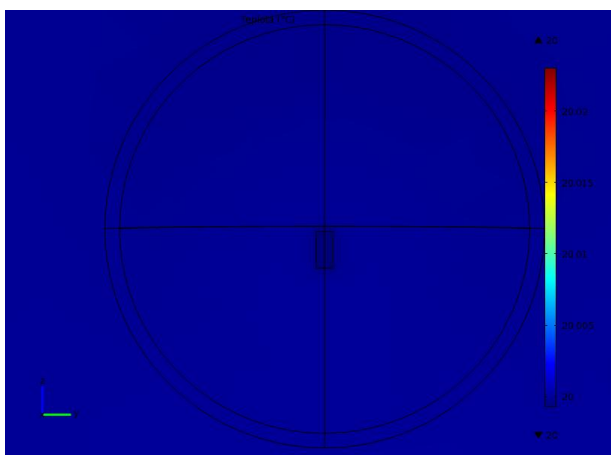
Rozložení hustoty tepelného toku v řezu v místě povrchu pyroelektrického elementu – detail v místě detektoru

Obr. 40: Vzdálenost detektor – narušitel 4 m

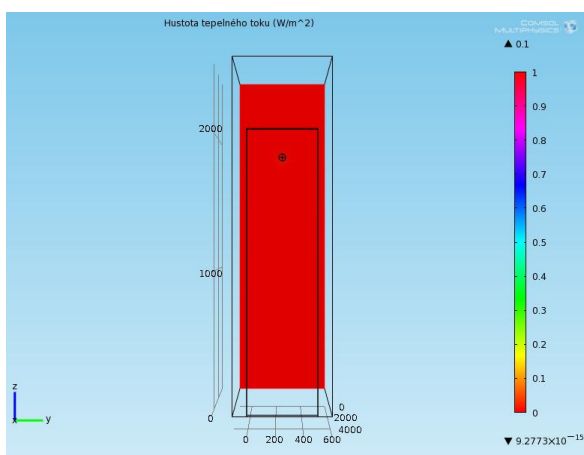
V situaci, kdy byl narušitel vzdálen od detektoru 4m, dopadlo na povrch pyroelementu záření o velikosti hustoty tepelného toku pouze přibližně  $0,035 \text{ W/m}^2$ . Teplota povrchu pyroelementu byla jen o  $0,001 \text{ }^\circ\text{C}$  vyšší než teplota okolí, jak je ukázáno na Obr. 40.



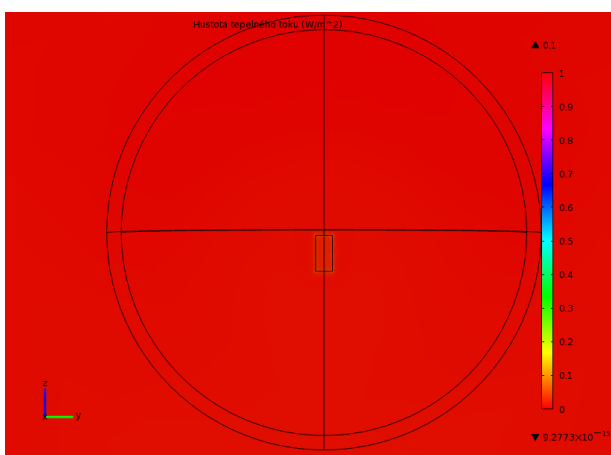
Rozložení teploty v řezu v místě povrchu pyroelektrického elementu



Rozložení teploty v řezu v místě povrchu pyroelektrického elementu – detail v místě detektoru



Rozložení hustoty tepelného toku v řezu v místě povrchu pyroelektrického elementu



Rozložení hustoty tepelného toku v řezu v místě povrchu pyroelektrického elementu – detail v místě detektoru

Obr. 41: Vzdálenost detektor – narušitel 5 m

Na Obr. 41 vidíme výsledek simulace pro vzdálenost detektoru od narušitele 5 m. V blízkém okolí pyroelementu již ke změně teploty i hustoty tepelného toku téměř nedochází.

Stanovené hodnoty hustoty tepelného toku a teploty na povrchu pyroelementu dle výsledků simulace v programu COMSOL Multiphysics podrobněji uvádím v následující tabulce. Uvedené hodnoty odpovídají místu středu elementu.

Tabulka III. Hustoty tepelného toku na povrchu pyroelektrického elementu – výsledky simulace v programu COMSOL Multiphysics

Vzdálenost detektoru od narušitele [m]	Hustota tepelného toku [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]	Teplota [ $^{\circ}\text{C}$ ]
1	0,750	20,0230
2	0,380	20,0076
3	0,245	20,0012
4	0,035	20,0010
5	0,020	20,0004

Z tabulky vyplývá, že se zvyšující vzdáleností klesá hustota tepelného toku na povrchu pyroelementu z původních  $0,75 \text{ W}/\text{m}^2$  na  $0,02 \text{ W}/\text{m}^2$ . Zároveň dochází ke snížení teploty povrchu pyroelementu z hodnoty  $20,023 \text{ }^{\circ}\text{C}$  na  $20,0004 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .

## 7.2 Výpočet teplotních polí v programu Maple

Hodnoty hustoty tepelného toku, které jsem získal simulací v programu COMSOL Multiphysics, jsem použil pro výpočet nestacionárních teplotních polí v pyroelementu podle analytického řešení (24) modelu (15), (15 a - c). Pro výpočet teplotních polí jsem použil tyto hodnoty:

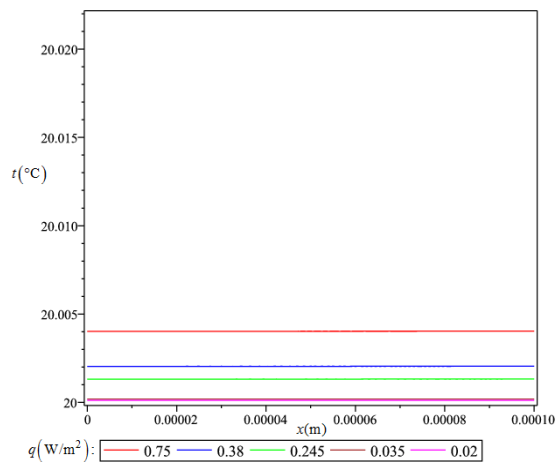
tloušťka elementu  $0,2 \text{ mm}$ ,

počáteční teplota pyroelektrického elementu  $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,

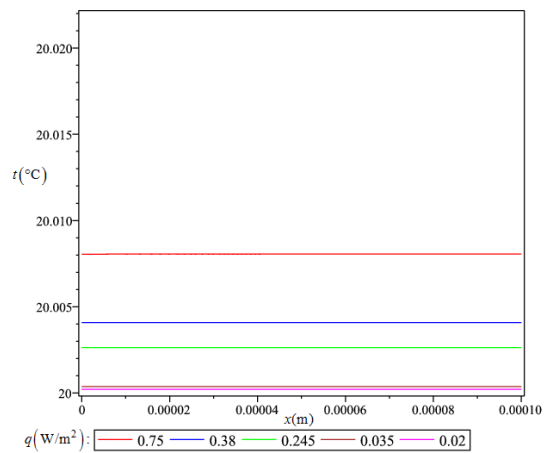
teplota povrchu narušitele (zdroje)  $36 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Následující obrázky zachycují průběhy teplotních na povrchu pyroelementu při hodnotách hustoty tepelného toku od  $0,75 \text{ W}/\text{m}^2$  do  $0,02 \text{ W}/\text{m}^2$ , což odpovídá vzdálenosti detektoru od narušitele  $1 \text{ m}$  až  $5 \text{ m}$ .

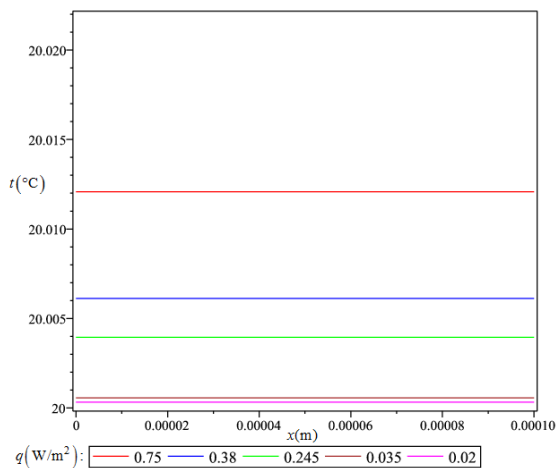
**Doba tepelného působení: 1 sekunda**



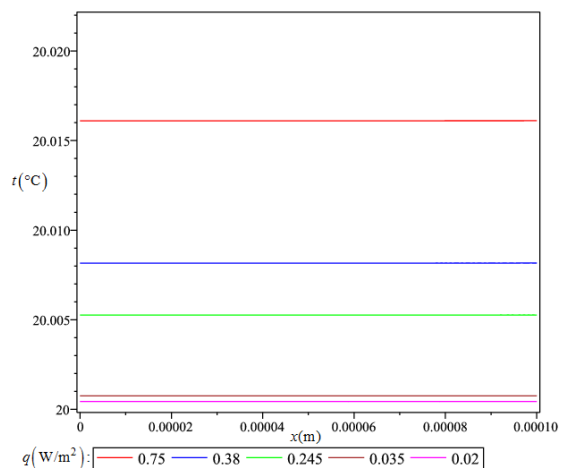
**Doba tepelného působení: 2 sekundy**



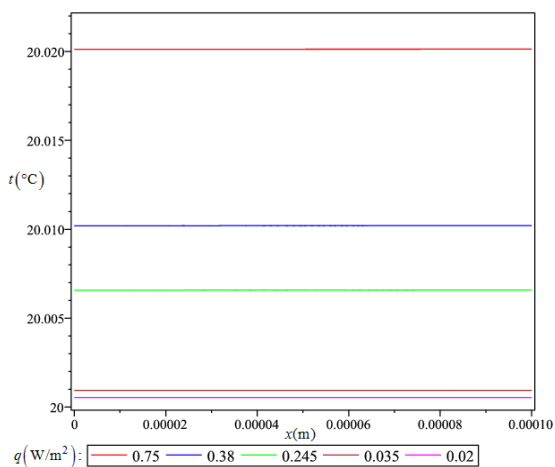
**Doba tepelného působení: 3 sekundy**



**Doba tepelného působení: 4 sekundy**



**Doba tepelného působení: 5 sekund**



**Obr. 42: Průběh teplotního pole v pyroelementu v závislosti na hustotě tepelného toku na povrchu elementu**

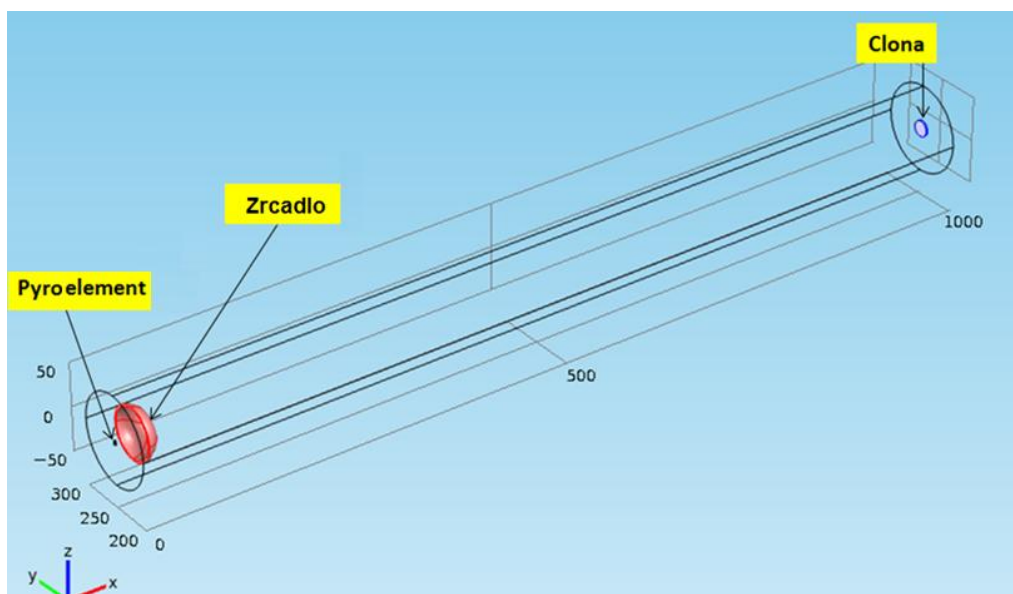
Z grafů je zřejmé, že pro dobu tepelného působení 1 až 5 sekund pro dopadající záření o hustotě  $0,75 \text{ W/m}^2$  se teplota pyroelementu zvýšila o  $0,015 \text{ }^\circ\text{C}$ , zatímco pro dopadající záření o hustotě  $0,02 \text{ W/m}^2$  se teplota pyroelementu téměř nezvýšila.

Z uvedených výpočtů a simulací rozložení teploty v ohřívaném pyroelementu rovněž vyplývá, že i při nízkých hodnotách hustoty tepelného toku je v daném čase teplota na povrchu pyroelementu téměř stejná jako teplota v celé jeho tloušťce (teplotní pole nejsou strmá). To dokazuje, že pyroelement není zatížen chybou. Lze tedy konstatovat, že už v prvních fázích měření vyhodnocuje pyroelement správnou teplotu a laboratorní měření je tedy i v počátečních fázích dostatečně přesné.

### Stanovení dolní meze detekce pyroelementu

Cílem testování bylo stanovit minimální teplotu zdroje záření, při níž je detektor schopen za daných podmínek zaregistrovat zářivý tok a zároveň pro tuto teplotu určit hodnotu hustoty tepelného toku dopadajícího na pyroelement.

Testování bylo provedeno na pracovišti pro měření PIR detektorů a je ukázáno na Obr. 96, kde vidíme přímo izolační tunel z tubexu. Vzdálenost pyroelementu, na který dopadá tepelné záření, je 1 metr. Geometrický náčrt aparatury využitý pro simulaci rozložení teploty a hustoty tepelného toku dopadajícího na povrch pyroelementu, je uveden na Obr. 43. Stanovení bylo provedeno pro clonu č. 6, clonu č. 7 a clonu č. 8. Teplota okolního vzduchu byla  $24 \text{ }^\circ\text{C}$ .



Obr. 43: Geometrický náčrt aparatury pro testování meze detekce zařízení

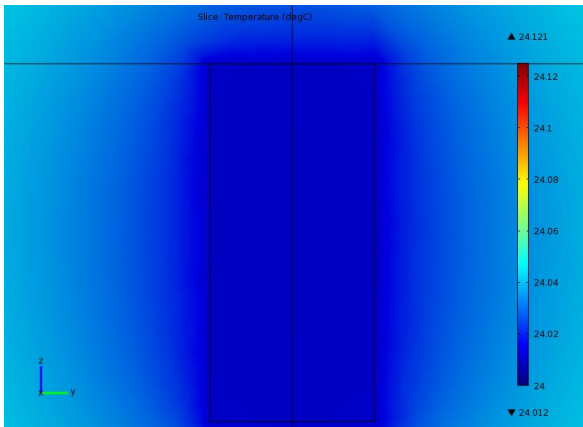
Minimální teploty zdroje, při nichž detektor zaznamenal zářivý tok dopadající na povrch pyroelektrického elementu, byly stanoveny experimentálně. Hustoty tepelného toku a rozložení teploty na povrchu pyroelektrického elementu byly za daných podmínek určeny simulací v programu COMSOL Multiphysics. Výsledky testování uvádí Tabulka IV.

*Tabulka IV. Hustota tepelného toku v místě clony při mezní teplotě zdroje záření*

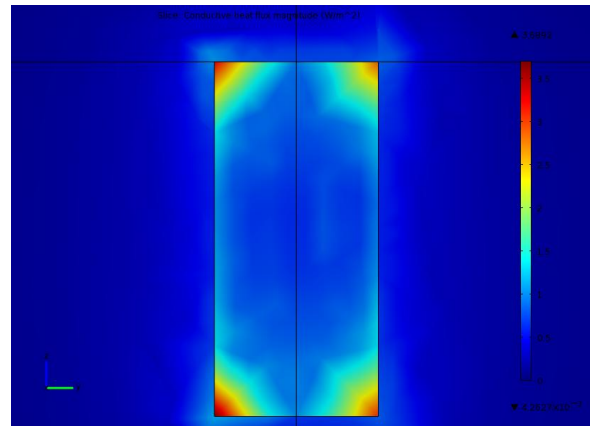
Testovaná clona	Průměr clony [mm]	Minimální teplota zdroje záření, při dochází k detekci [°C]	Teplota vzduchu [°C]	Hustota tepelného toku určená simulací <sup>1)</sup> [W/m <sup>2</sup> ]
6	18	44	24	0,37
7	25	37	24	0,28
8	32	35	24	0,26

<sup>1)</sup> Hustota tepelného toku byla odečtena ve středu pyroelementu

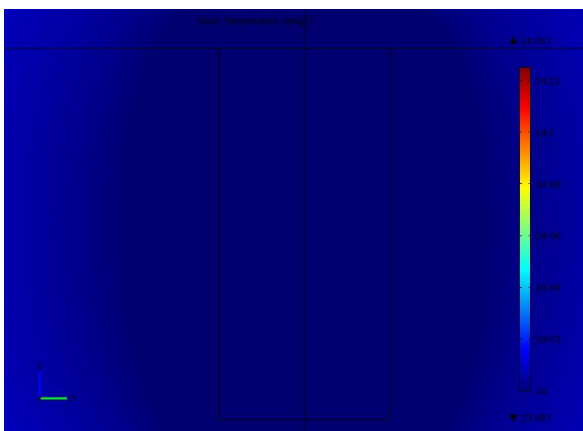
Hustoty tepelných toků byly odečteny v místě středu pyroelementu. Rozložení teploty a hustoty tepelného toku na povrchu pyroelementu při mezní teplotě zdroje záření získané simulací v programu COMSOL Multiphysics zachycuje Obr. 44.



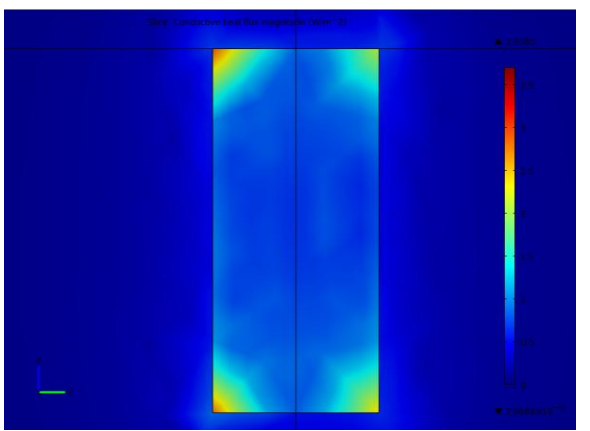
Clona 6, průměr 18 mm - rozložení teploty na povrchu pyroelementu při teplotě zdroje 44 °C



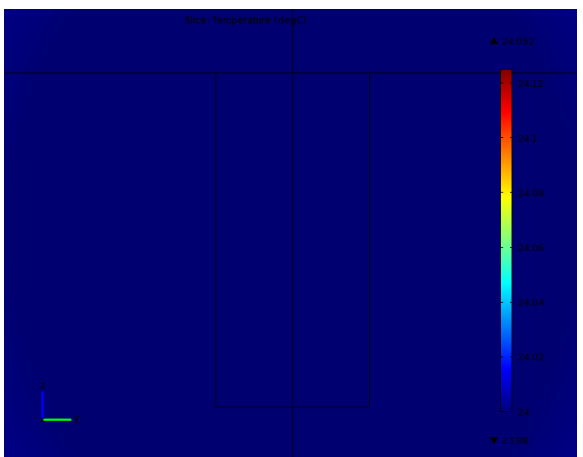
Clona 6, průměr 18 mm - hustota tepelného toku na povrchu pyroelementu při teplotě zdroje 44 °C



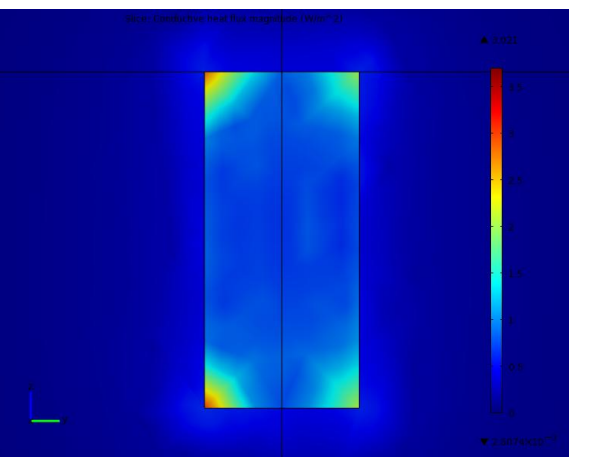
Clona 7, průměr 25 mm - rozložení teploty na povrchu pyroelementu při teplotě zdroje 37 °C



Clona 7, průměr 25 mm - hustota tepelného toku na povrchu pyroelementu při teplotě zdroje 37 °C



Clona 8, průměr 32 mm - rozložení teploty na povrchu pyroelementu při teplotě zdroje 35 °C



Clona 8, průměr 32 mm - hustota tepelného toku na povrchu pyroelementu při teplotě zdroje 35 °C

Obr. 44: Rozložení teplot a hustota tepelného toku na povrchu pyroelementu



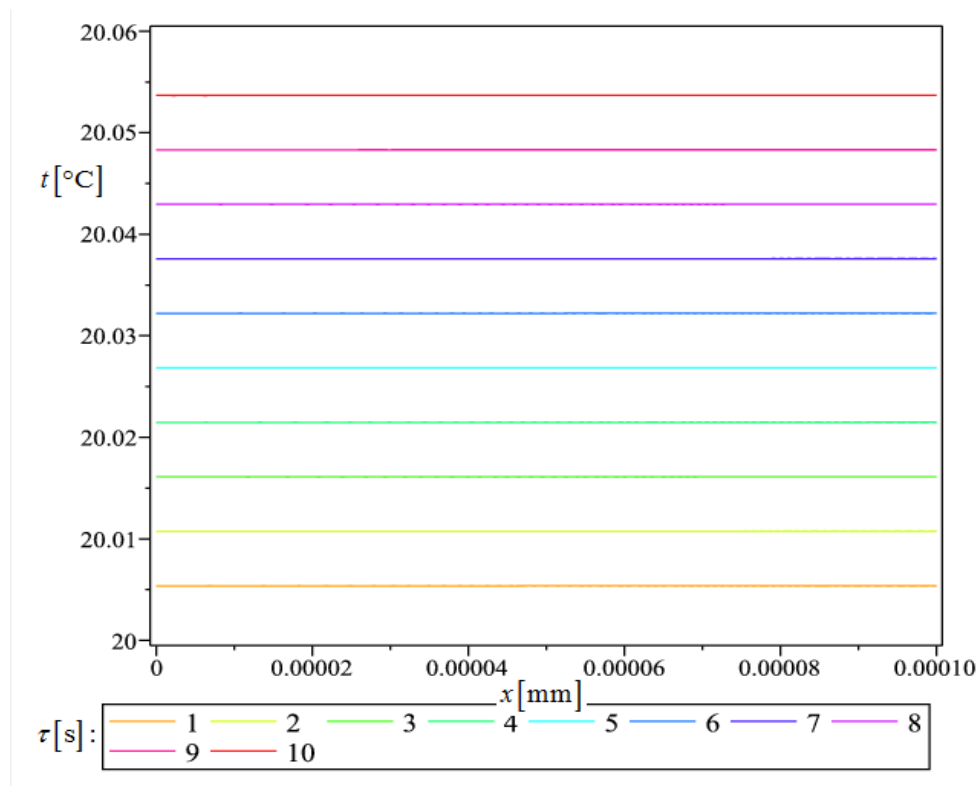
Výsledky simulace potvrdily, že při vyšší teplotě zdroje záření postačí k aktivaci detektoru nižší plocha zdroje, tedy menší clona. Naproti tomu při nižší teplotě zdroje je nutno pro aktivaci detektoru zvětšit plochu zdroje (zářící plocha narušitele), což ukazuje také Tabulka IV, kde pro clonu 6 se detektor aktivuje při tepelném toku  $0,37 \text{ W/m}^2$ , zatímco pro clonu 8 je minimální tepelný tok pro aktivaci detektoru jen  $0,26 \text{ W/m}^2$ .

### 7.3 Porovnání teoretických výsledků se simulacemi

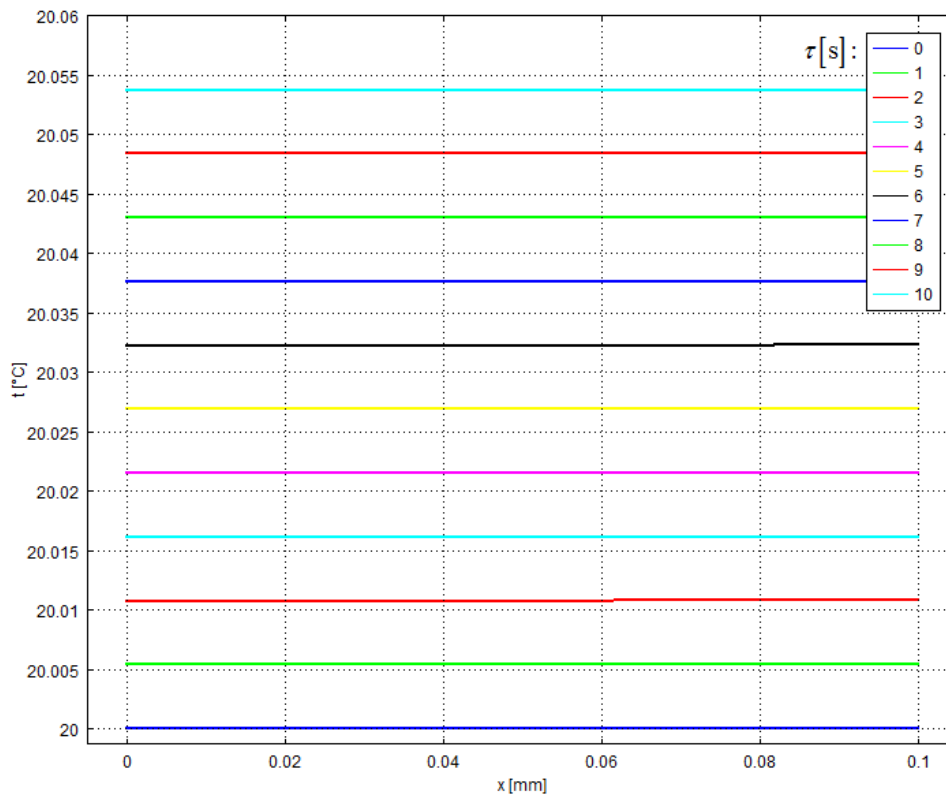
#### Simulace rozložení teploty v pyroelementu

Verifikaci matematického modelu popsaného v kapitole 5 jsem provedl porovnáním teplotních polí v pyroelementu vypočítaných v programu Maple na základě analytického řešení popsaného rovnicí (24) s výsledky simulace teplotních polí v programu COMSOL Multiphysics.

Na Obr. 45 a Obr. 46 jsou znázorněny průběhy teplotních polí za těchto podmínek: střední teplota zdroje  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ , počáteční teplota pyroelementu  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ , hustota tepelného toku dopadajícího na povrch pyroelementu  $1 \text{ W/m}^2$ , teplotní vodivost pyroelementu  $2,255 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ , tloušťka pyroelementu  $0,2 \text{ mm}$ .



Obr. 45: Teplotní pole v pyroelementu vypočtená v Maple pro dobu tepelného působení 10 sekund



*Obr. 46: Teplotní pole v pyroelementu získaná simulací v programu COMSOL Multiphysics pro dobu tepelného působení 10 sekund*

Obr. 45 zobrazuje teplotní pole v pyroelementu, které jsem vypočítal v programu Maple. Obr. 46 zachycuje teplotní pole v pyroelementu, které jsem obdržel simulací v programu COMSOL Multiphysics. Je patrné, že se průběhy teplotních polí vypočítané v Maple shodují s průběhy teplotních polí získanými simulací v programu COMSOL Multiphysics.

## 8 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Pro vybudování IČ pracoviště jsem provedl průzkum podobných pracovišť a zařízení, která by bylo možné použít pro měření IČ senzorů. V dalším kroku byl vybrán zdroj IČ záření vhodný pro bezpečnostní aplikace. Dále bylo realizováno pomocí mechanických dílů speciální pracoviště, které umožňuje definované podmínky zdroje IČ záření a senzoru s možností provádět různé typy úloh. Pracoviště bylo doplněno o měřicí přístroje a další dotykové teploměry s možností ukládání naměřených hodnot do počítače pomocí aplikací PC View a Agilent IntuiLink Multimetr. Byly provedeny měření teploty zářiče a prostorových vlastností senzoru.

Pro kalibraci infračervených bezkontaktních teploměrů (pyrometrů) se používají jako zdroje IČ záření technicky realizované modely, které se blíží hodnotou relativní emisivity „absolutně černým tělesům“. V průmyslovém provedení dosahují emisivity 0,95 a v laboratorním provedení až 0,995. Jejich cena je však poměrně vysoká a pohybuje se od dvaceti tisíc korun až po milión korun. Vlastní zařízení, používaná pro bezkontaktní měření teploty jsou buďto pyrometry pro měření teploty, nebo spektroskopy pro měření spektra vlnových délek přijímaného záření, jejichž cena může dosáhnout dva milióny korun.

Pro vlastní testování senzorů však neexistuje kompaktní pracoviště, které by umožnilo provádět výzkum a měření jak zdrojů IČ záření, tak senzorů různých typů a výrobců z důvodu, že vyžaduje jak přesné mechanické provedení celého pracoviště, tak speciální přístrojové vybavení pro měření malých napětí.

### 8.1 Měření zdrojů IČ záření v blízké oblasti a ve viditelném spektru

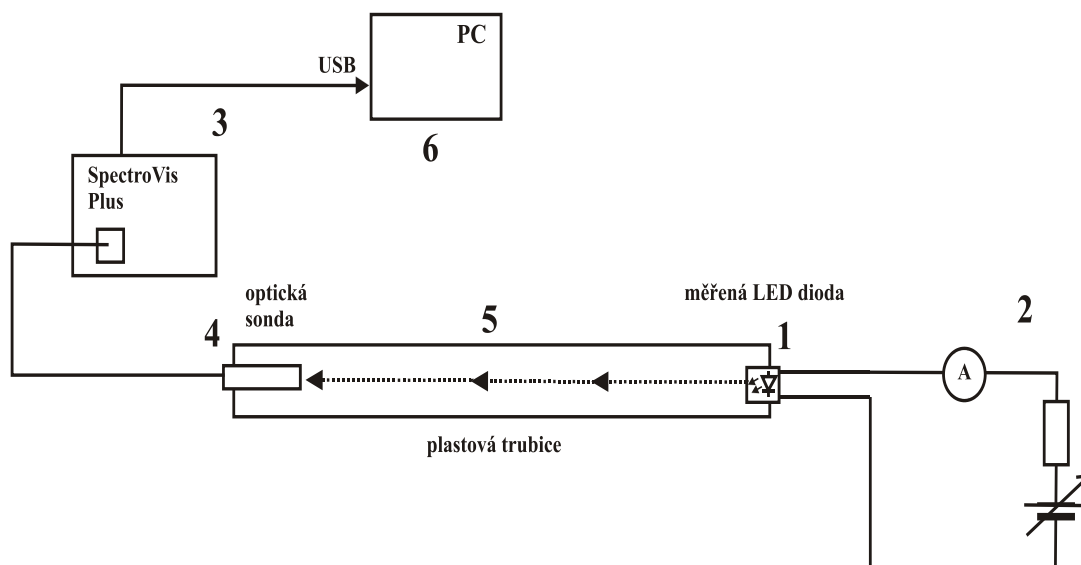
Pro měření spektrálních charakteristik zdrojů záření byl použit spektroskop SpectroVis Plus od firmy Vernier s optickou sondou, který je ukázán na Obr. 47.



Obr. 47: Spektroskop a optická sonda

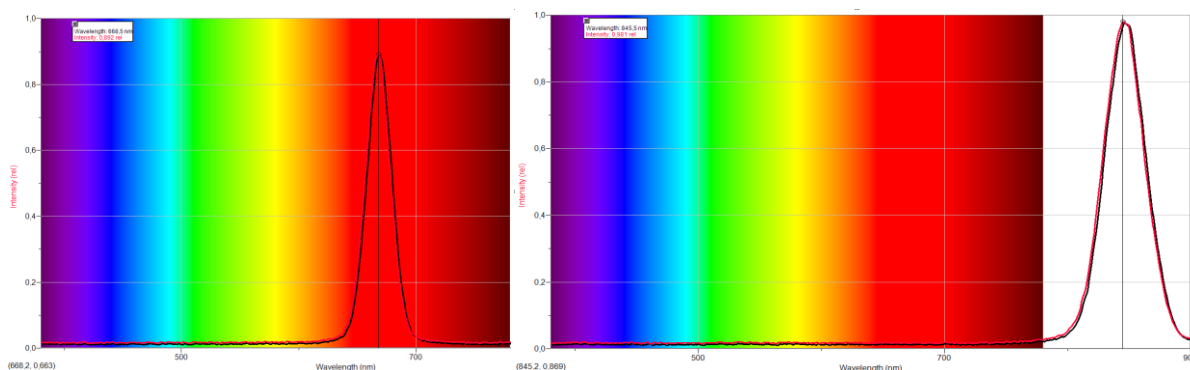
### 8.1.1 Měření charakteristik LED diod ve vizuální a blízké infračervené oblasti

Pro měření LED diod bylo vytvořeno pracoviště ukázané na Obr. 48. Pracoviště se skládá ze zdroje proudu 2 pro měřenou LED diodu 1, který slouží pro nastavení jmenovité hodnoty proudu dle katalogového listu. Emitované záření diody dopadá na optickou sondu 4, která toto pomocí optického vlákna přenáší do spektrometru 4 a naměřená hodnota se přenáší přes sběrnici USB do počítače, kde je výsledek zobrazen pomocí softwarové aplikace. Optická sonda a měřená LED dioda jsou upevněny do přesné a neprůhledné plastové trubice 5 z důvodu rušení okolním světlem a zářením.



Obr. 48: Pracoviště pro měření spektra diod

Na Obr. 49 jsou zobrazeny spektrální charakteristiky LED diod s nejnižší a nejvyšší vlnovou délkou.



Obr. 49: Charakteristiky spektra diod s maximem záření na vlnové délce 600 nm a 850 nm

Výsledky měření maxim všech 17 diod jsou zobrazeny v Tabulce V.

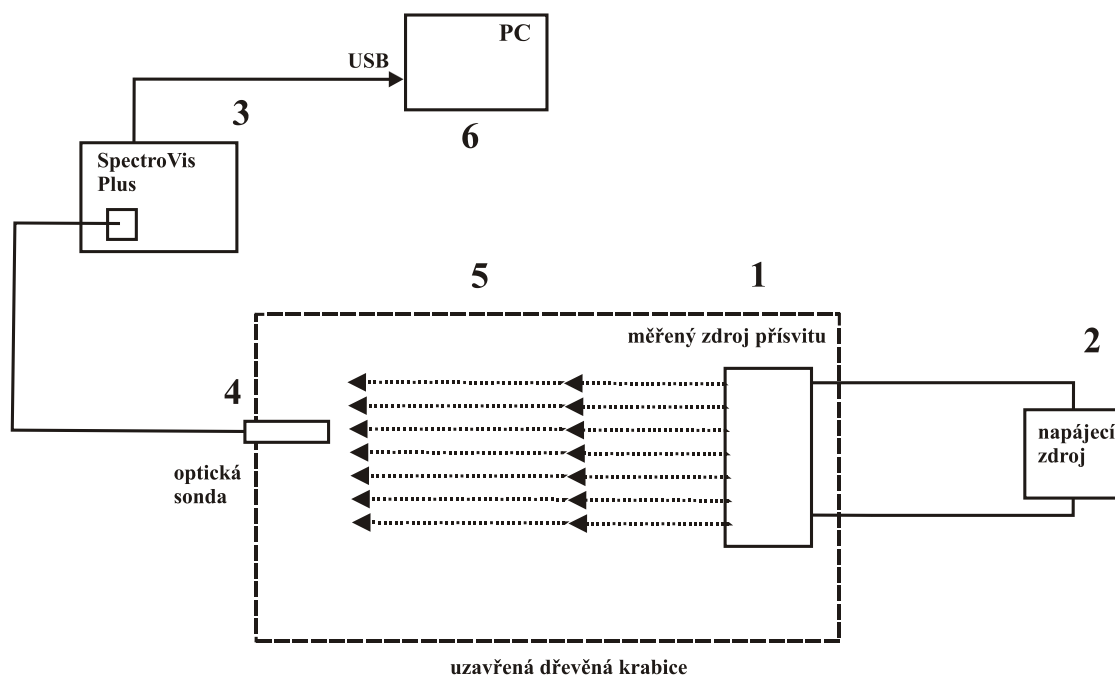
Tabulka V. Naměřená spektrální maxima pro LED diody a IČ diody

Poz.	Jmenovitá vlnová délka [nm]	Maximální vlnová délka [nm]	Maxim. intenzita [ 1]	Vlnová délka pro $I_{min1}$ [nm]	Vlnová délka pro $I_{min2}$ [nm]	Rozpětí vyzářovaných vln. délek [nm]	Odchylka od jmen. hodnoty [nm]	Odchylka od jmen. hodnoty [%]
1	670,00	668,50	0,89	654,40	699,10	44,70	-1,50	0,22
2	680,00	677,70	0,94	644,00	706,80	62,80	-2,30	0,34
3	690,00	695,30	0,97	655,90	724,20	68,30	5,30	0,77
4	700,00	700,60	0,98	664,00	728,20	64,20	0,60	0,09
5	720,00	717,10	0,98	683,00	747,20	64,20	-2,90	0,40
6	724,00	724,20	0,95	686,90	758,30	71,40	0,20	0,03
7	730,00	729,00	0,99	688,40	764,70	76,30	-1,00	0,14
8	740,00	742,50	0,97	694,50	777,40	82,90	2,50	0,34
9	750,00	756,00	0,94	709,10	786,90	77,80	6,00	0,80
10	770,00	772,60	0,94	734,50	806,00	71,50	2,60	0,34
11	780,00	786,90	0,98	748,80	822,60	73,80	6,90	0,88
12	790,00	795,60	0,97	754,40	833,00	78,60	5,60	0,71
13	800,00	796,40	0,96	756,00	833,90	77,90	-3,60	0,45
14	810,00	811,50	0,98	763,10	854,40	91,30	1,50	0,19
15	820,00	820,20	0,97	770,20	862,50	92,30	0,20	0,02
16	840,00	840,10	0,96	792,50	885,50	93,00	0,10	0,01
17	850,00	845,50	0,98	795,60	892,60	97,00	-4,50	0,53

Z naměřených hodnot je patrné, že skutečné hodnoty maxima záření neodpovídají jmenovitým hodnotám uvedených v katalogových listech, nicméně lze velmi snadno realizovat zdroj záření od oblasti červené až do oblasti blízké infračervené (NIR) s diodami nejlépe jedné výrobní šarže.

### 8.1.2 Měření spektrálních charakteristik zdrojů přisvitu pro bezpečnostní kamery

Pro měření LED diod bylo vytvořeno pracoviště, které je ukázáno na Obr. 50. Pracoviště se skládá z napájecího zdroje 2 (většinou 220 V ze sítě spínaného pomocí relé zabezpečovacích systémů) a vlastního zdroje záření 1 - přisvitu. Záření zdroje dopadá na optickou sondu 4, která toto pomocí optického vlákna přenáší na zpracování do spektrometru 3 a naměřená hodnota se předá přes sběrnici USB do počítače, kde je výsledek zobrazen pomocí softwarové aplikace LoggerPro. Optická sonda a měřený zdroj přisvitu jsou umístěny do neprůhledné dřevěné krabice potažené laminátem 5, aby nedocházelo k nepřesnostem měření vlivem okolního světla a tepelného záření.

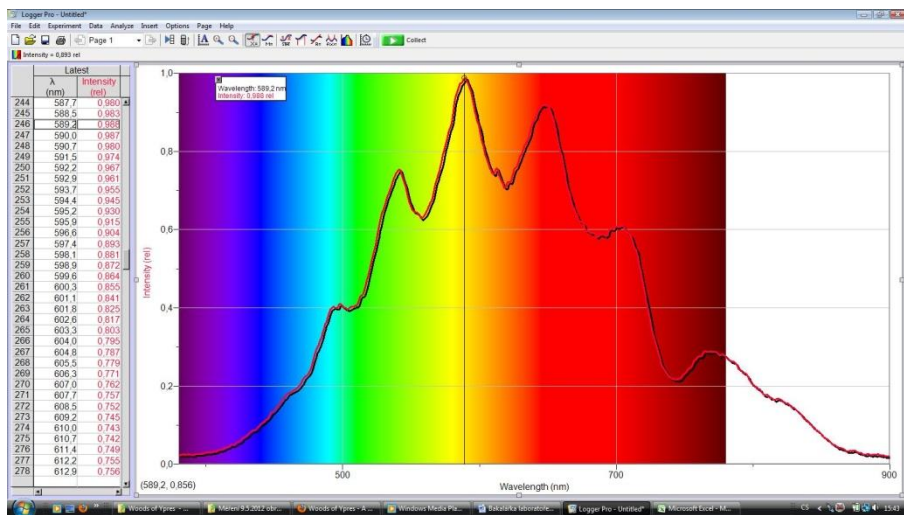


Obr. 50: Pracoviště pro měření spektra zdrojů přisvitu

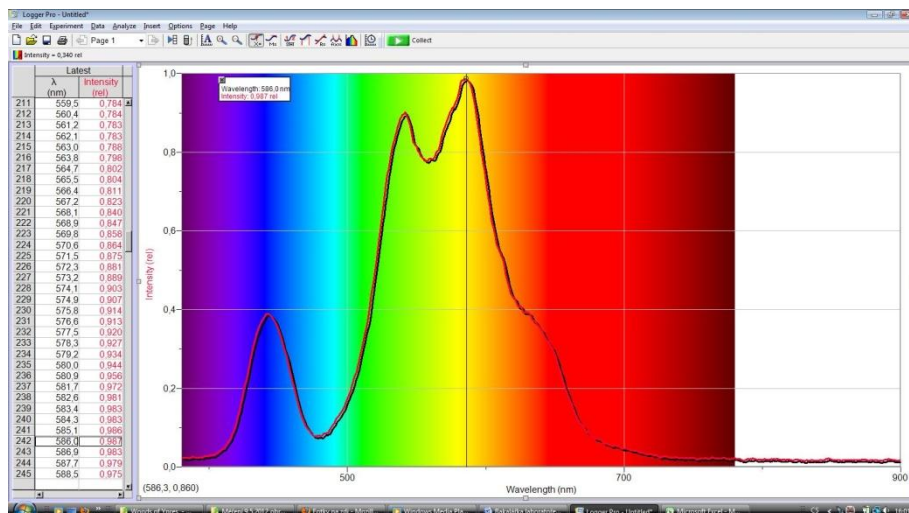
Měření bylo prováděno s těmito zdroji záření:

- bodové halogenové nábytkové světlo KANLUX SALUT DL-138RA, 12 V
- halogenové světlo, MEROX Technics Halogenbaustrahler 120W
- halogenové světlo, reflektor venkovní B-7 500W
- bodové LED světlo bílé Lastra venkovní 24xLED 230V IP54
- Reflektor LED PACO 45 ks LED 4W, 230 V IP44
- LED Infrared Illuminator 12VDC IR-880/12

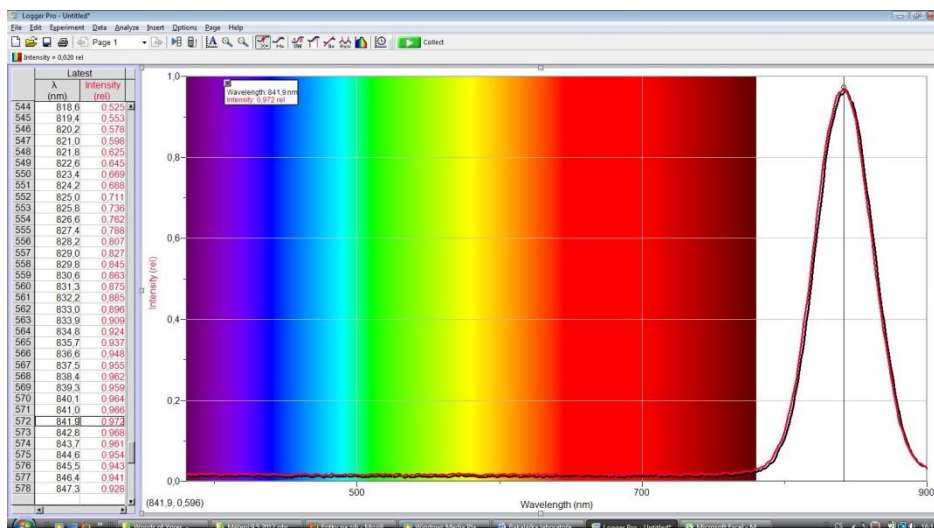
Ukázky charakteristik jsou uvedeny na následujících obrázcích:



Obr. 51: Spektrální charakteristika halogenového svítidla 120 W



Obr. 52: Spektrální charakteristika LED reflektoru



Obr. 53: Spektrální IR LED reflektoru

Výsledky měření všech zdrojů jsou uvedeny v Tabulce VI.

Tabulka VI. Naměřené vlastnosti reflektorů pro přisvit

Druh reflektoru	Šířka pásma intenzity >0,04 [nm]	Min. vlnová délka 1 [nm]	Max. vlnová délka 2 [nm]	Bod 1 s intenzitou > 0,9 [nm]	Intenzita v bodě 1 [1]	Bod 2 s intenzitou > 0,9 [nm]	Intenzita v bodě 2 [1]
Bodové halogenové světlo	456,9	416,1	873,0	590,7	0,923	650,0	0,994
Halogen. reflektor 120 W	451,4	413,6	865,0	589,2	0,988	648,5	0,920
Halogen. reflektor 500 W	456,8	411,8	868,6	590,0	0,991	647,7	0,951
Bodové světlo LED	247,9	416,1	664,0	454,4	0,995		
LED reflektor	301,5	407,6	709,1	586,0	0,987	541,6	0,902
IR LED reflektor	111,0	786,9	897,9	841,9	0,972		

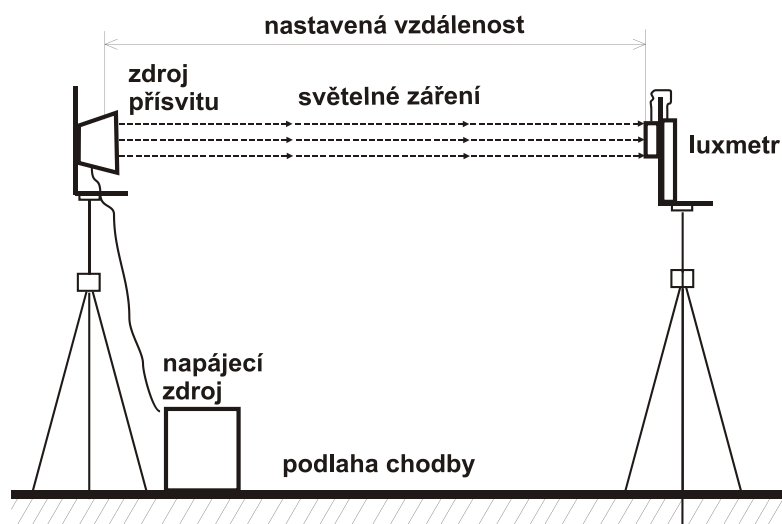
### 8.1.3 Měření dosahu přisvitu

Pro měření dosahu byly zvoleny 2 metody. První metoda spočívala v měření dosahu pomocí luxmetru a druhou metodou je měření dosvitu pomocí obrazu bezpečnostních kamer.

#### Měření dosvitu přisvitu pomocí luxmetru

Pro měření přisvitu byl použit ALMEMO 2290-3 se sondou typu FL A613-VL. Vzdálenosti pro měření byly zvoleny v jednotkách metrů takto: 1, 2, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 a 40 dle Obr. 54.



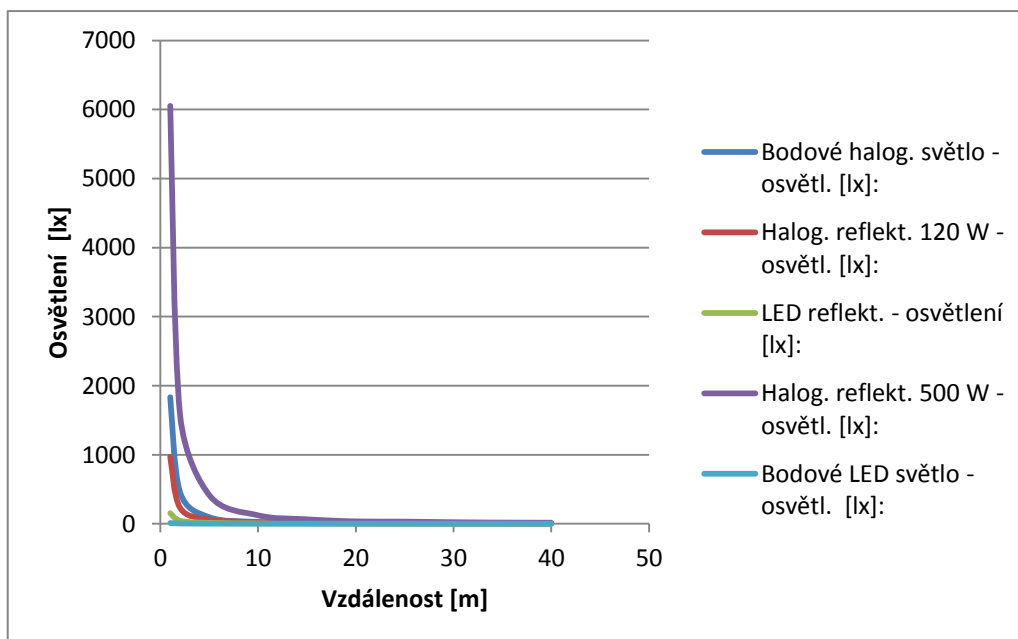


Obr. 54: Pracoviště pro měření osvětlení přisvitom pomocí luxmetru

Tabulka VII. Naměřené hodnoty osvětlení při různých vzdálenostech

Nastavená vzdálenost	Bodové halogenové světlo osvětlení	Halogenový reflektor 120W osvětlení	LED reflektorové osvětlení	Halogenový reflektor 500 W osvětlení	Bodové LED světlo osvětlení
[m]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]	[lx]
1	1834	970	157	6054	11
2	457	235	47	1584	6
5	94	66	15	413	4
10	26	22	7	121	4
15	17	12	5	63	4
20	11	9	4	33	4
25	9	7	4	30	4
30	7	6	4	21	4
35	6	5	4	16	4
40	5	4	4	14	4

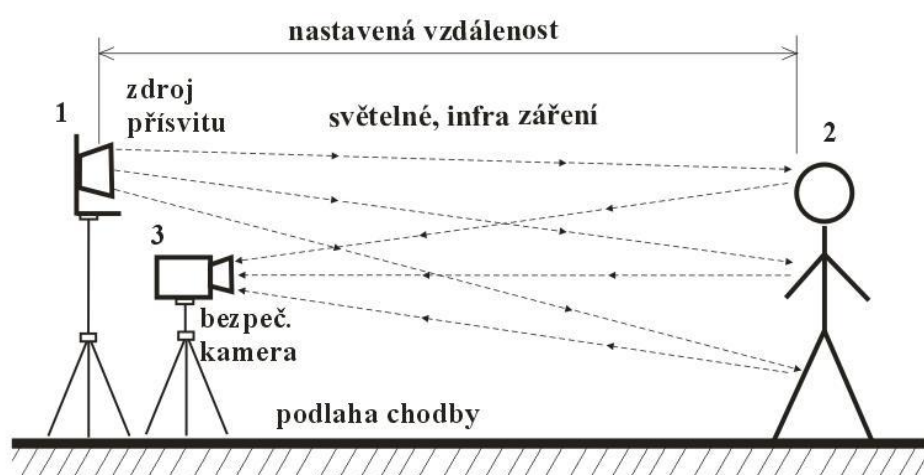
Z Obr. 55, kde jsou výsledky měření osvětlení zdrojů přisvitu převedeny do grafu, je patrné, že jako nejlepší se jeví halogenový reflektor 500 W, což odpovídá předpokladům, ale ne vždy je to nejlepší způsob osvětlení scény v bezpečnostních aplikacích a toto osvětlení je také energeticky nejnáročnější.



Obr. 55: Závislost osvětlení na vzdálenosti od světelného zdroje

### Měření dosvitu pomocí bezpečnostních kamer

Na Obr. 56 je ukázka pracoviště pro měření dosvitu. Zdroj přísvitu 1 je umístěn na stativu a po připojení k napájecímu zdroji vysílá záření do chodby, kde se nachází člověk 2, který představuje objekt – narušitele v přesně definované vzdálenosti. Od něho se záření odrazí zpět a toto záření pak zpracuje bezpečnostní kamera 3, která je připojena k počítači, kde dojde k uložení obrazu. Použité zdroje přísvitu jsou uvedené v Tabulce VII.



Obr. 56: Pracoviště pro měření osvitu přísvitem pomocí luxmetru

Pro vlastní snímání záření odraženého od narušitele byly použity tyto kamery:

1. Černobílá dome kamera Pelco s 1/3" CCD čipem FB38845
2. Barevná válcová kamera s 1/3" CCD čipem KPC S230CWX
3. Barevná kamera SHARP s 1/4" CCD čipem CA-4
4. Barevná kamera PELCO s čipem 1/3" CCC5100H-6A

Na Obr. 57 jsou zobrazeny jednotlivé snímky pro kameru Pelco a přísvit 500W (halogenový světlo) a různé vzdálenosti objektu.



*Obr. 57: Reflektor 500 W halogenový – barevná kamera PELCO*

Podobně byly realizovány snímky pro ostatní kombinace přísvitů a kamer.

Z hlediska hodnocení kvality přísvitů je výsledek tento:

1. 500 W halogenový reflektor
2. 120 W halogenový reflektor
3. Bodové halogenové svítidlo 50 W
4. LED reflektor
5. Bodové LED světlo
6. IR LED reflektor

V celkovém hodnocení kamer se nejlépe umístila kamera č. 1 černobílá kamera Pelco, barevné kamery byly výrazně horší i po přepnutí do černobílého módu. V oblasti infračerveného přísvitu byla použitelná rovněž jen černobílá kamera Pelco, barevné kamery byly použitelné jen ve velmi blízké vzdálenosti.

Závěrem lze říci, že v prvním kroku je třeba vyhodnotit snímanou scénu a vlastnosti objektů, které chceme zaznamenat kamerovým systémem. V druhém kroku je třeba zvolit vhodný přísvit dle aplikace, jak bylo uvedeno v kapitole 1 dle účelu kamerového systému. Ve třetím kroku kromě rozlišení, které je určeno tím, zda chceme v nejjednodušším případě scénu jen monitorovat, v nejnáročnější aplikaci provádět rozpoznávání objektů, je třeba definovat spektrální vlastnosti kamery a její citlivost. Výrobci často neuvádí údaje citlivosti kamer právě v oblasti infračervené, která je velmi důležitá pro kamerové systémy, které chceme realizovat tak, aby nebyly snadno identifikovatelné. Obecně platí, že systémy přísvitů je lepší předimenzovat, než naopak, protože při nesprávné volbě kamer a přísvitů je výsledkem nefunkční systém.

## **8.2 Měřicí pracoviště pro střední oblast IČ záření**

V prvním kroku bylo třeba definovat možné realizovatelné zdroje záření a použitelné senzory.

V druhém kroku bylo třeba navrhnout mechanické prvky, které by měly dostatečnou variabilitu.

Ve třetím kroku bylo třeba doplnit skutečnou sestavu o definované zdroje napětí a proudu, měřicí techniku pro zdroj IČ záření a senzor a další kontaktní - bodové měření teploty na vybraných prvcích mechanické sestavy.

### **8.2.1 Zdroje a senzory IČ záření – popis a vlastnosti**

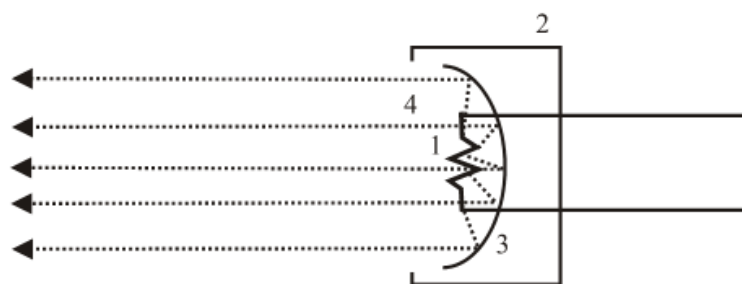
Pro definované IČ záření je nutno použít umělý zdroj, jehož charakteristika je dopředu známá. Tyto zdroje lze rozdělit na zdroje laboratorní a komerční. Je třeba vyloučit zdroje přírodní (slunce, hvězdy) a umělé zdroje IČ záření způsobené zařízeními, které jsou produktem naší civilizace (dopravní prostředky, vojenské prostředky, budovy apod.).

Mezi laboratorní zdroje patří různé typy wolframových lamp, křemíko-halogenových lamp, vláknových lamp, lamp plněných plynem apod. Mezi komerční zdroje patří plynové lasery, optické parametrické oscilátory, IČ teplotní lampy, polovodičové zdroje.

Pro podmínky laboratorních měření jsou využitelné malé IČ teplotní lampy, u kterých je širší spektrum vyzařovaných vlnových délek a lze po kalibraci definovat spektrální vlastnosti záření pro testování senzorů. Optické zdroje na bázi polovodičových diod mají úzké spektrum a proto pro širší rozsah vlnových délek, především pro testování PIR detektorů, nejsou vhodné. Ostatní zdroje jsou především pro vysokou cenu nevhodné.

### IČ teplotní lampy

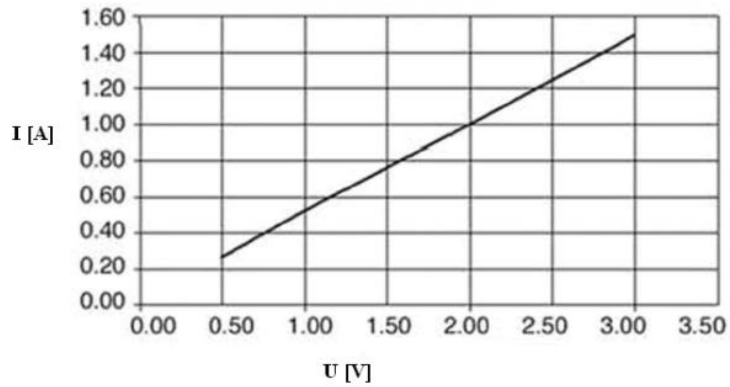
Vlastní konstrukce je zobrazena na Obr. 58 a skládá se z kovového pouzdra 2, ve kterém je na držácích upevněna spirála z kantalového drátu 1, za kterou je umístěno pokovené zrcadlo 3. Záření, vysílané rozžhavenou spirálou, je po odrazu od zrcadla usměrněno a vystupuje rovnoběžně otvorem pouzdra 4. U některých typů je otvor (okno) zakryt průhledným materiálem, který má vlastnosti optického filtru.



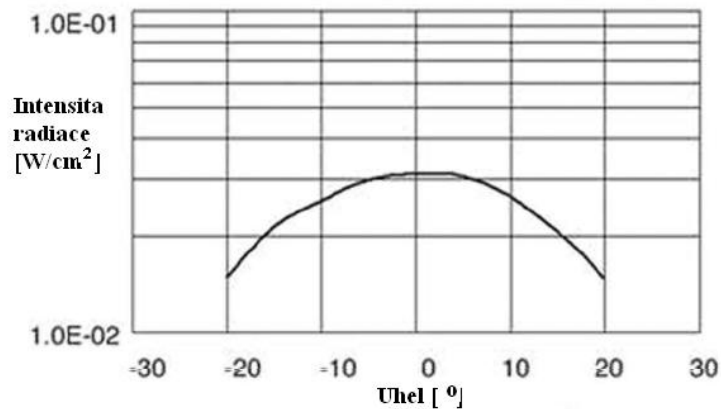
Obr. 58: Teplotní IČ zdroj

Mezi nejznámější výrobce těchto zdrojů patří firmy PerkinElmer, Helioworks. Tyto zdroje pracují v širokém spektru vlnových délek závislém na teplotě zdroje.

Pro IČ pracoviště byl pro svou příznivou cenu použit zdroj EK-8520, který se vyznačuje tím, že zdrojem záření je kantalové vlákno, které může dosáhnout teploty až 950 °C, nemá žádné okénko (filtr), vlastní povrch paraboly je pozlacený a je realizován v pouzdru TO-8. Proudová charakteristika je na Obr. 59 a přesně definuje výkon, který se přemění na teplo a vyzářenou energii. Vyznačuje se tím, že je lineární a má vlastnosti jako odpor. Úhlová charakteristika záření je na Obr. 60 a lze podle ní určit úhlové vlastnosti záření v případě umístění zářiče ve volném prostoru.



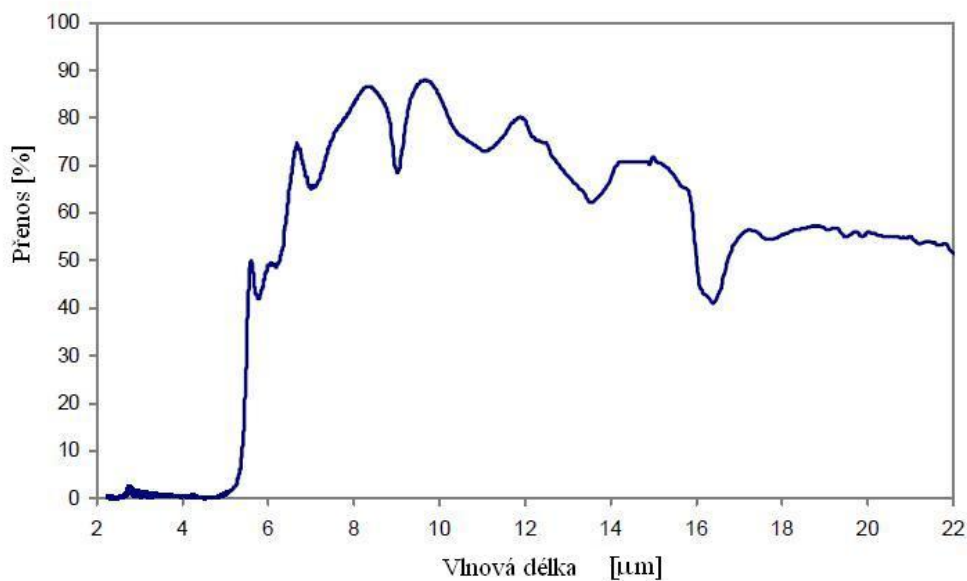
Obr. 59: Proudová charakteristika EK-8520 [5]



Obr. 60: Úhlová charakteristika záření [5]

## Thermopile

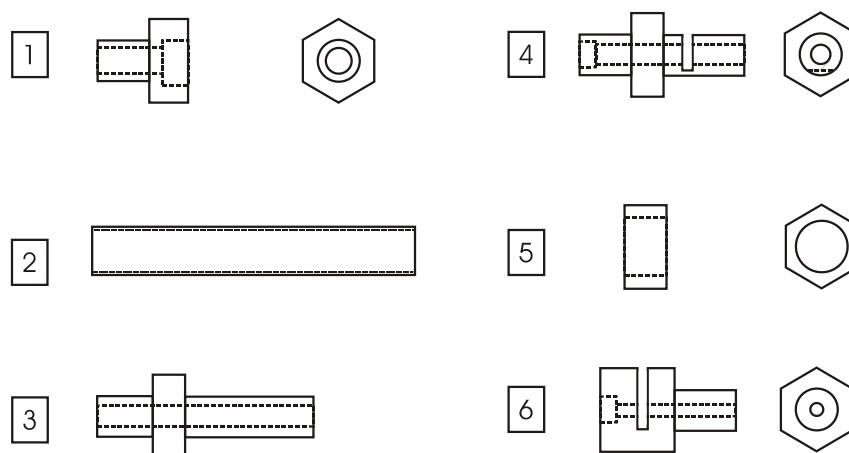
Pro měření dopadajícího záření se jeví jako nejvhodnější vzhledem k nízké ceně thermopile TPS334 od firmy PerkinElmer. Nevýhodou tohoto senzoru je skutečnost, že na vstupu záření do pouzdra je materiál, který má charakter filtru, který je závislý na vlnové délce záření. Jeho charakteristika je uvedena na Obr. 61 [6]. Pro vlastní testování PIR detektorů pak budou použity kompletní sestavy detektorů od jednotlivých výrobců poplachových systémů.



Obr. 61: Charakteristika optického filtru TPS334 [6]

### 8.2.2 Mechanické provedení pracoviště

Základní mechanické díly jsou nakresleny Obr. 62.



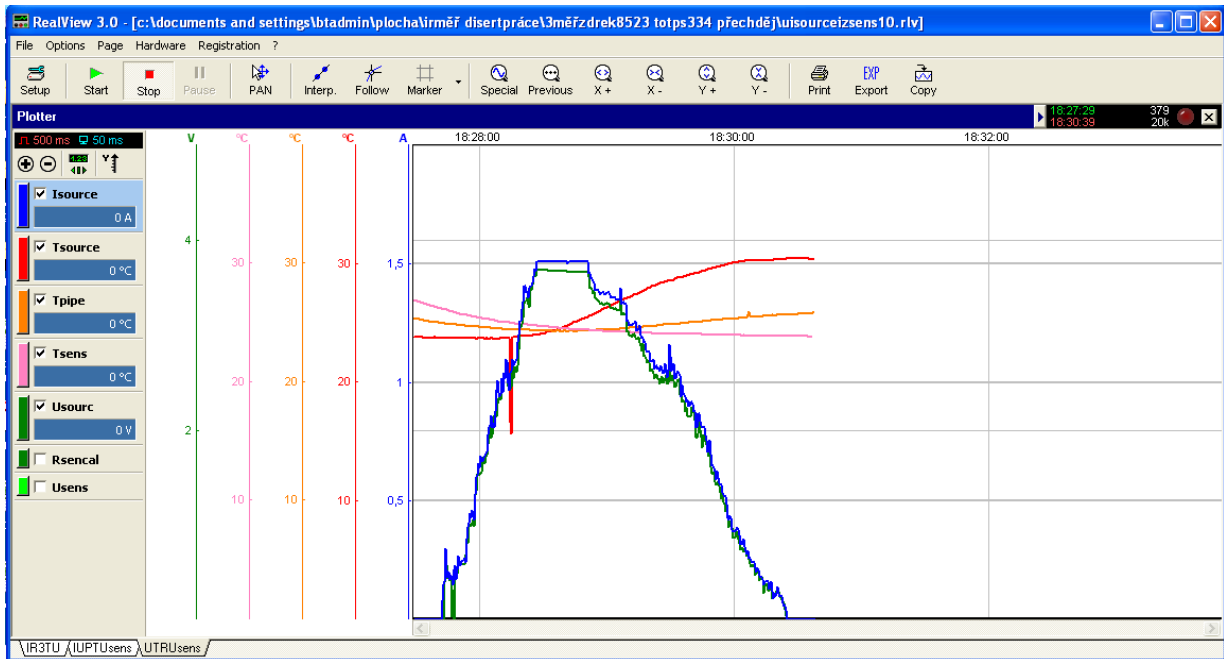
1 - držák zdroje IČ záření, 2 - spojovací trubice, 3 - spojovací člen izolovaný, 4 - držák senzoru 1, držák filtru a spojovací člen, 5 - podkládací šestihran, 6 - držák senzoru 2 s výřezem pro chopper

Obr. 62: Základní mechanické díly IČ pracoviště

Jednotlivé díly jsou realizovány tak, že jsou vysoustruženy z mosazné tyčoviny o průřezu šestihranu, což umožňuje přesné sestavení pracoviště na rovné (skleněné) podložce bez používání dalších podstavců pro zpřesnění polohy. Souosost je zajištěna přesným vyvrtáním děr a obrobením vnějších válcových tvarů.

### 8.2.3 Elektrické zapojení a měřicí přístroje

Program RealView slouží pro sběr a zpracování měřených hodnot. Vlastní grafické rozhraní je na Obr. 63. Pomocí funkce SETUP provádíme konfiguraci kanálů instalací ovladačů z knihoven dodavatele a pak definici názvů veličin, jednotek, rozsahů měřených hodnot a rychlosti vzorkování.



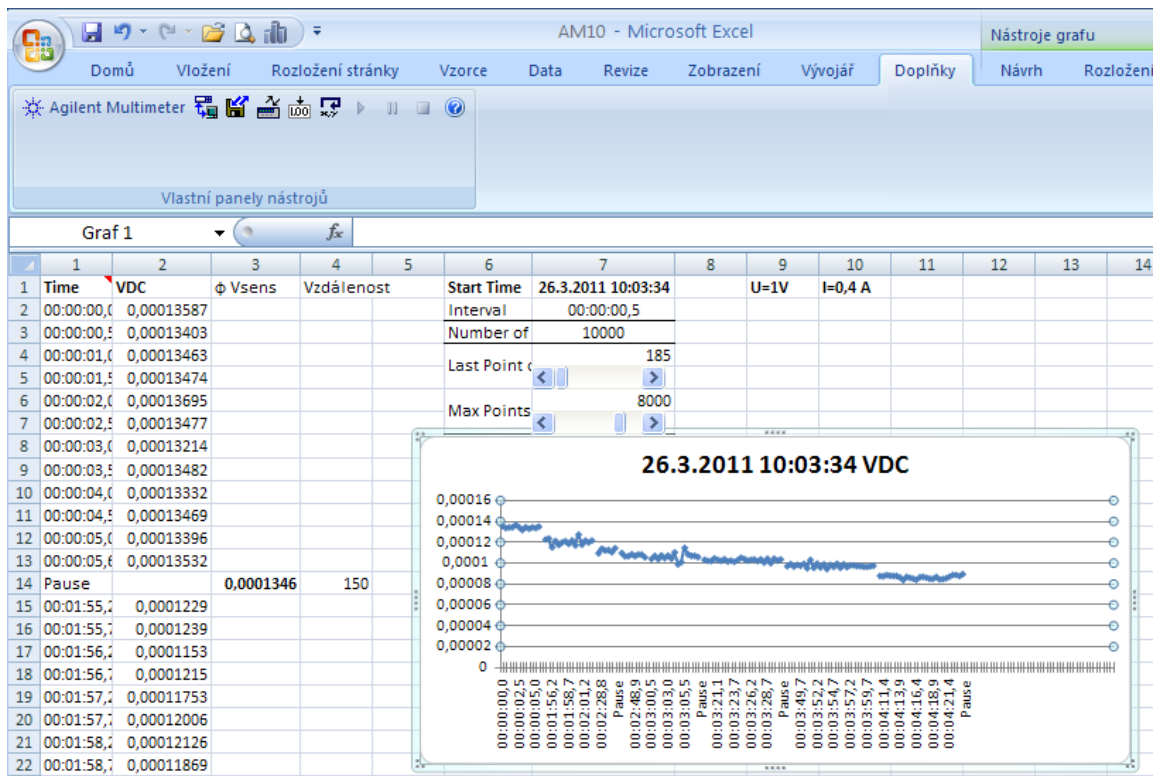
Obr. 63: Grafické rozhraní programu RealView 3.0

Vlastní měření se ručně pomocí tlačítka START spustí a zastaví pomocí tlačítka STOP, případně lze pozastavit tlačítkem PAUSE.

Hodnoty jsou v průběhu měření vizualizovány v grafech a po ukončení měření lze tyto pomocí dalších nástrojů zpracovat a exportovat pro jinou aplikaci

Prostředí Agilent IntuiLink Multimeter pracuje, jak bylo výše zmíněno, jako doplněk programu Excel (Obr. 64).



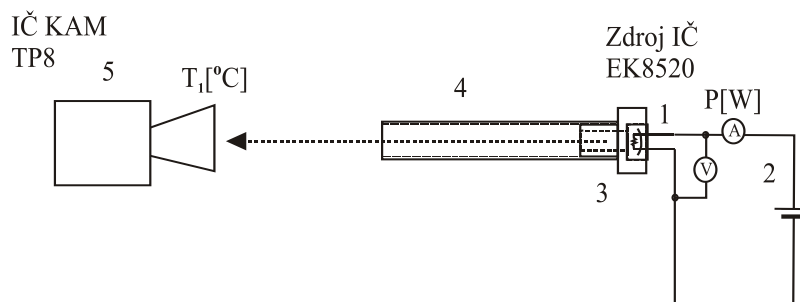


Obr. 64: Grafické rozhraní Agilent IntuiLink Multimeter

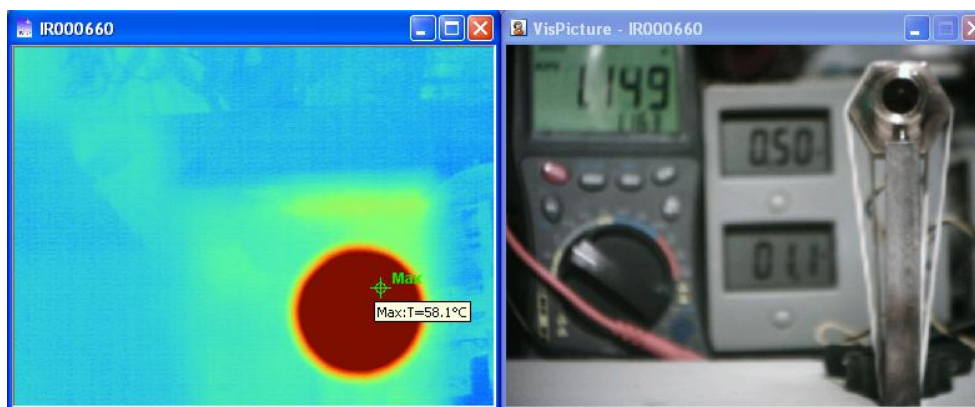
Podobně jako u předchozího programu je zde konfigurace komunikace na připojený přístroj, tlačítka START, STOP a PAUSE. Naměřená hodnota se plní do tabulky včetně času vzorku.

### 8.3 Měření intenzity IČ záření, prostorových a dynamických vlastností

Aby bylo možné definovat teplotu zdroje IČ záření EK8520, provedl jsem měření rozložení povrchové teploty pomocí IČ kamery. Vlastní pracoviště je schematicky znázorněno na Obr. 65 a termogram vlastní IČ obraz pak na Obr. 66.

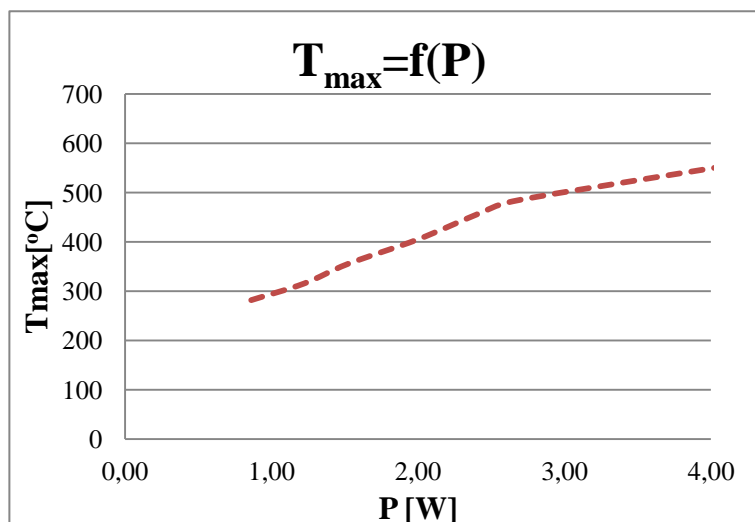


Obr. 65: Pracoviště pro měření teploty zdroje IK8520 IČ kamerou



Obr. 66: Měření maximální hodnoty teploty zářiče

Výsledkem měření je závislost  $T_{max}=f(P)$  na Obr. 67. Graf je pro filtr 2 IČ kamery, který je pro rozsah teplot od +200 až +800 °C.



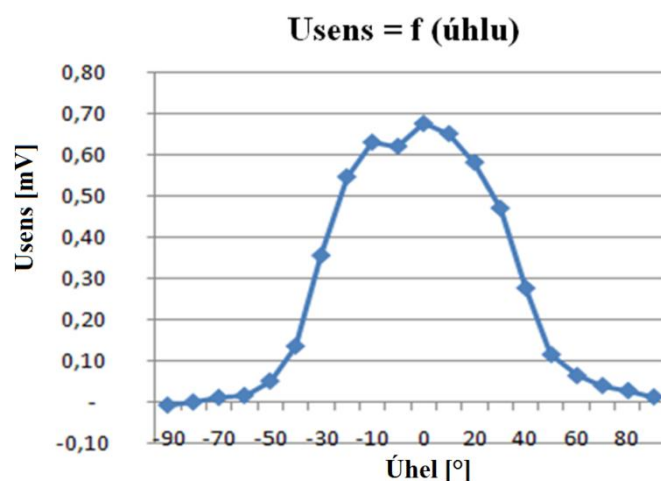
Obr. 67: Závislost  $T_{max}=f(P)$  zářiče

Další charakteristikou je závislost napětí senzoru na úhlu dopadajícího záření. Zdroj IČ záření má nastavené napětí  $U_1 = 1,2$  V při proudu  $I_1=0,48$  A a dle předchozích měření IČ kamerou je teplota zářiče  $T_1= 57$  °C.

Tabulka VIII. Naměřené hodnoty napětí  $U_{sens}=f(\text{úhlu})$

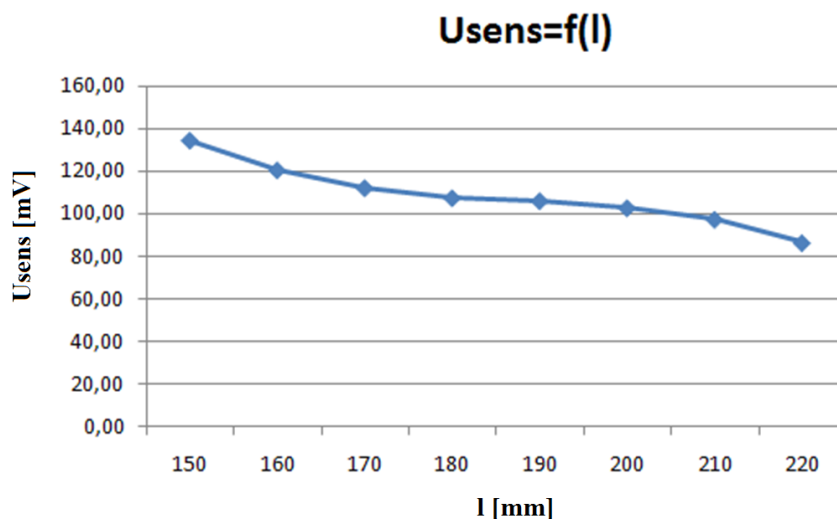
Usens [mV]	Úhel [°]	Usens [mV]	Úhel [°]
-0,01	-90	0,68	0
0,00	-80	0,65	10
0,01	-70	0,58	20
0,02	-60	0,47	30
0,05	-50	0,28	40
0,14	-40	0,11	50
0,36	-30	0,06	60
0,55	-20	0,04	70
0,63	-10	0,03	80
0,62	0	0,01	90

Grafická závislost naměřených dat z tabulky je na Obr. 68.



Obr. 68: Závislost napětí senzoru na úhlu dopadu záření

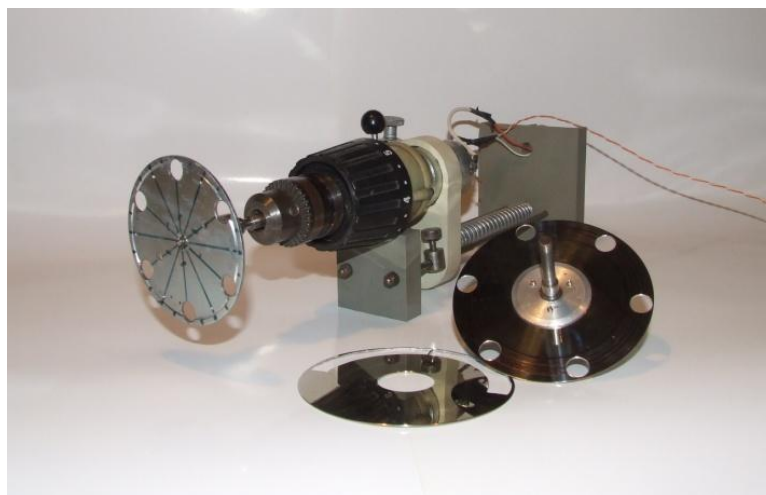
Další zajímavou charakteristikou je závislost změřeného napětí senzoru na vzdálenosti od zdroje záření  $U_{sens}=f(l)$  při  $P = konst.$  a je na Obr. 69.



Obr. 69: Závislost napětí senzoru na vzdálenosti od zdroje záření

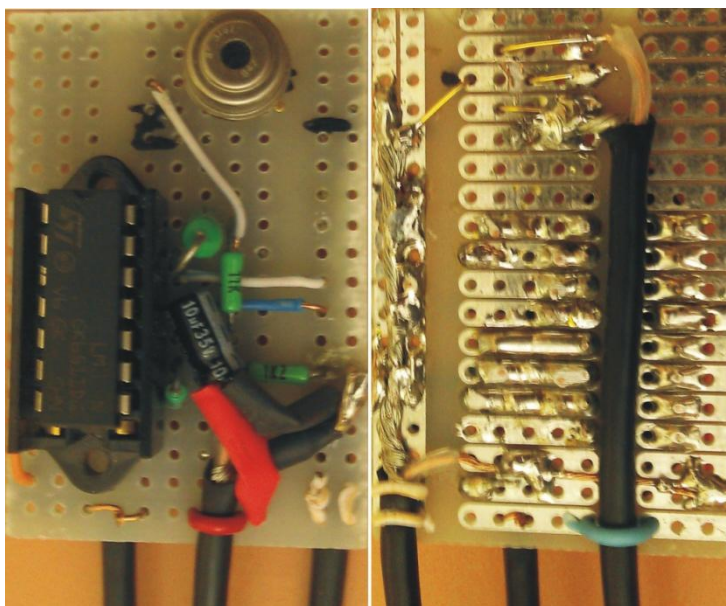
### Další zařízení

Pro měření dynamických vlastností senzoru s možností přerušovat záření jsem dále vyrobil chopper s výměnnými kotouči a pohonem, jehož otáčky jsou ručně řízeny napětím z regulovaného zdroje řady HY, jak je ukázáno na Obr. 70.



Obr. 70: Chopper pro přerušování záření

Pro měření rychlých přechodových a impulsních dějů jsem realizoval zesilovač malých napětí termopilu, který je zobrazen na Obr. 71, především z důvodu rušení okolními zdroji a hlavně krátké periody vzorkování, která může být v případě přerušování paprsku velmi dlouhá. Odezvu senzoru lze pak zobrazit na digitálním osciloskopu, jehož perioda vzorkování je mnohonásobně vyšší.

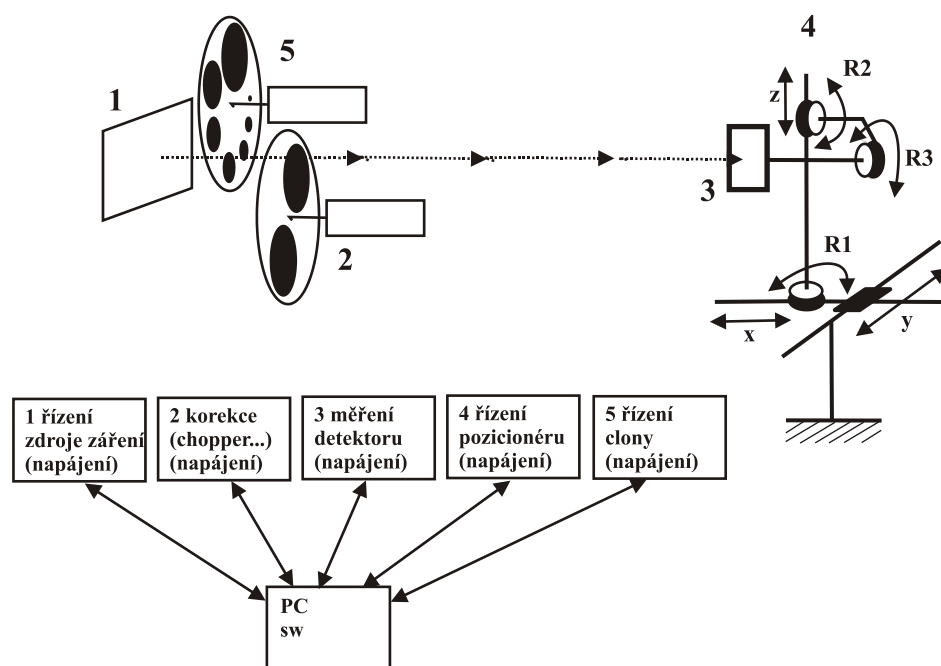


*Obr. 71: Zesilovač malých napětí*

#### **8.4 Testovacího pracoviště pro PIR detektory**

Základním problémem při realizaci pracoviště byl časový skluz dodávky pozicionéru, ke kterému došlo vlivem schvalování veřejné zakázky. Základní technické informace, obchodní podmínky a ceny jsem kompletně zajistil na začátku roku 2012.

Celková hardwarová koncepce pracoviště je ukázána na Obr. 72. Pracoviště se skládá ze zdroje záření 1, kde je požadováno, aby se jeho emisivita blížila 1 a byla zde možnost přesně nastavit jeho teplotu. Toto záření pak pokračuje přes clonu 5, kde si můžeme nastavit plochu zdroje záření. Dále pak pokračuje přes chopper 2, jehož úkolem je přerušovat tok záření, aby docházelo k definovaným změnám, které potřebuje pro správnou funkci pyroelement. Záření pak dopadá na vlastní PIR detektor 3, jehož polohu můžeme přesně nastavit pomocí pozicionéru 4.



Obr. 72: Hardwarová koncepce pracoviště

#### 8.4.1 Zdroj záření pro vzdálenou oblast

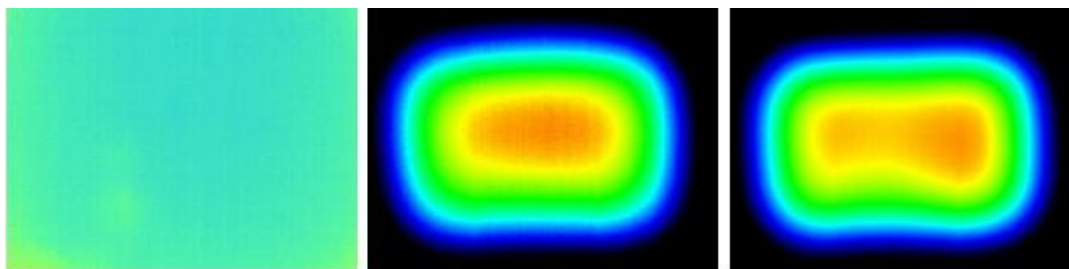
##### Sálavé panely

Jednou z variant, jak realizovat zdroj záření pro vzdálenou IČ oblast, je možnost využít sálavý panel GR 300, vyráběný s bezdrátovou regulací BPT-SP + SP2 společností FENIX Trading s.r.o., který je ukázán na Obr. 73:



Obr. 73: Skleněný sálavý panel GR 300, přijímač BPT-SP2 a termostat BPT-SP [40]

Aby bylo možné nastavovat přesně teplotu povrchu panelu, bylo nutno nahradit prostorovou regulací teploty v místnosti přímo regulací teploty povrchu skleněného panelu.

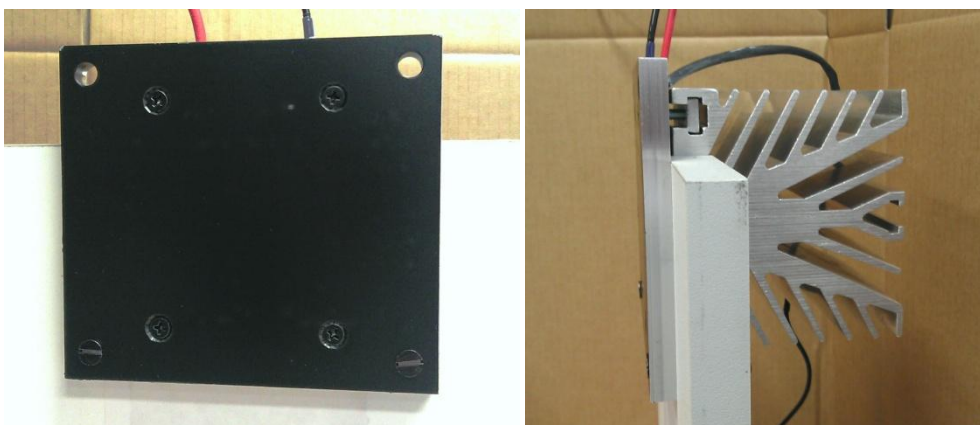


*Obr. 74: Snímky vyzařování panelu – vlevo vypnutý, uprostřed při teplotě 40° C, vpravo na maximální teplotě*

Toto řešení bylo zamítnuto, především z důvodu velkých rozměrů panelu, které nejsou vhodné pro laboratorní měření a také velkého rozdílu povrchových teplot ve středu a na okraji panelu, jak je vidět na Obr. 74.

### **Peltierův článek**

Druhou dostupnou variantou, která je vhodnější pro laboratorní podmínky je použití Peltierova článku, který se vyznačuje menšími rozměry a možností přesnější regulace, protože vlastní teplo se rozvádí vedením do celé plochy chladiče, který je realizován z hliníkové slitiny s vysokou tepelnou vodivostí, jak je ukázáno na Obr. 75.



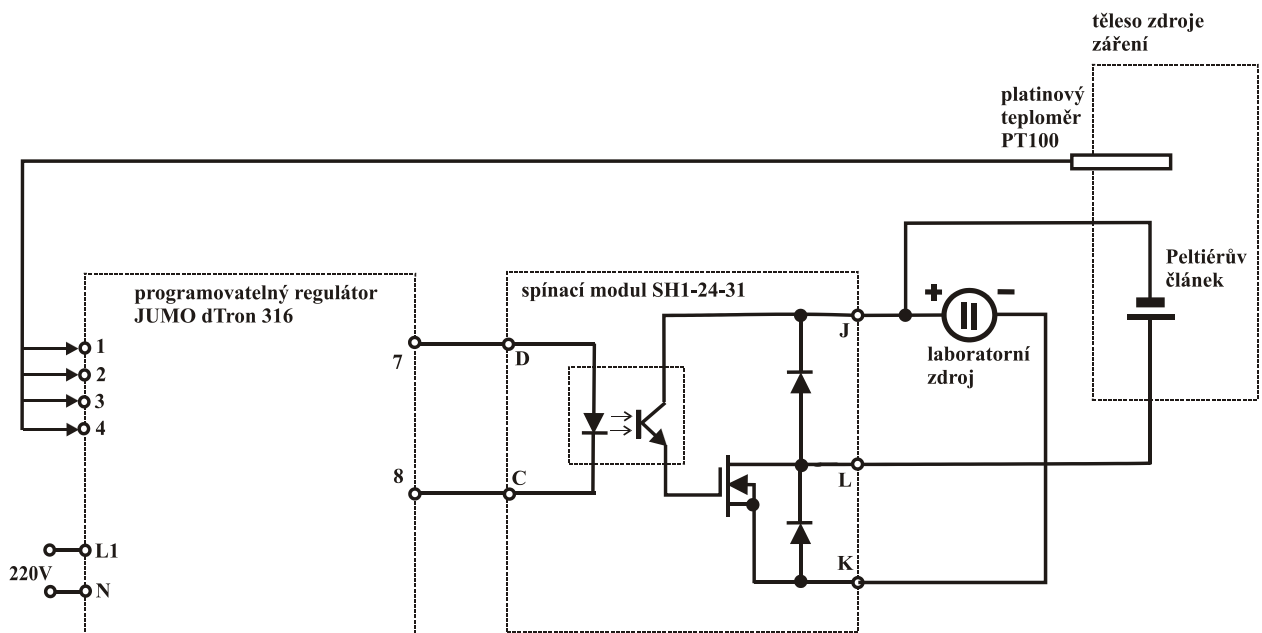
*Obr. 75: Peltierův článek*

Kromě snadné dostupnosti na trhu a snadné realizace topidla má Peltierův článek další výhody. Je to hlavně jeho nízká setrvačnost, krátká odezva na regulační zásah, tedy přesnější



regulace a navíc možnost v případě potřeby i chladit okolní plochu, kde nechceme, aby docházelo k tepelnému záření.

Na Obr. 76 je nakresleno schéma zapojení ohřevu zářící plochy. Skládá se z Peltierova článku, který je jednou stěnou tepelně spojen s hliníkovou plochou zářiče a druhou stěnou s chladičem, který odvádí chlad do okolí. Proud do Peltierova článku je spínán spínacím modulem SH1-24-31. Obvod je napájen laboratorním zdrojem HY1803D. Teplota zářící plochy je měřena platinovým teploměrem PT100 (čtyřvodičové zapojení) a je řízena programovatelným regulátorem JUMO dTron 316.



Obr. 76: Schéma zapojení řízení ohřevu zářící plochy

Programovatelný regulátor JUMO obsahuje široké možnosti nastavení, v mém případě po zapojení byl spuštěn režim TUNE, kdy si regulátor změnil vlastnosti odezvy celé sestavy, sám si nastavil parametry řízení a vlastní regulaci pak provádí tak, aby kolísání bylo nejmenší, jak je vidět na Obr. 77.



Obr. 77: Regulátor JUMO dTRON 316



## Odporový článek

Na trhu není vhodný typ především co do velikosti, který by byl vhodný pro laboratorní úlohu. Další nevýhodou odporového článku je velká setrvačnost topidla.

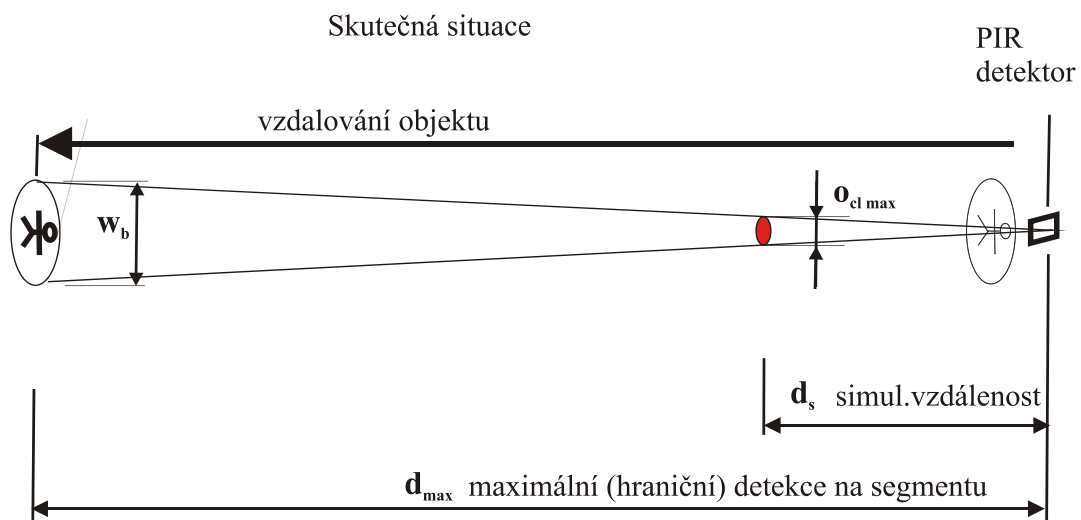
### 8.4.2 Clona

Hlavním úkolem kotouče, který jsem nazval clona, je zaclonit, neboli zakrýt zdroj tepelného záření tak, aby zůstala otevřená přesně definovaná plocha kruhového tvaru, jak jsem naznačil na Obr. 78. Pro zjednodušený výpočet největšího průměru clony předpokládám tyto základní údaje:

$d_{max} = 10 \text{ m}$	maximální vzdálenost člověka od detektoru,
$w_b = 0,5 \text{ m}$	maximální šířka objektu narušitele,
$d_{sim} = 1 \text{ m}$	simulovaná vzdálenost,
$o_{cl} = 0,05$	největší průměr otvoru clony,

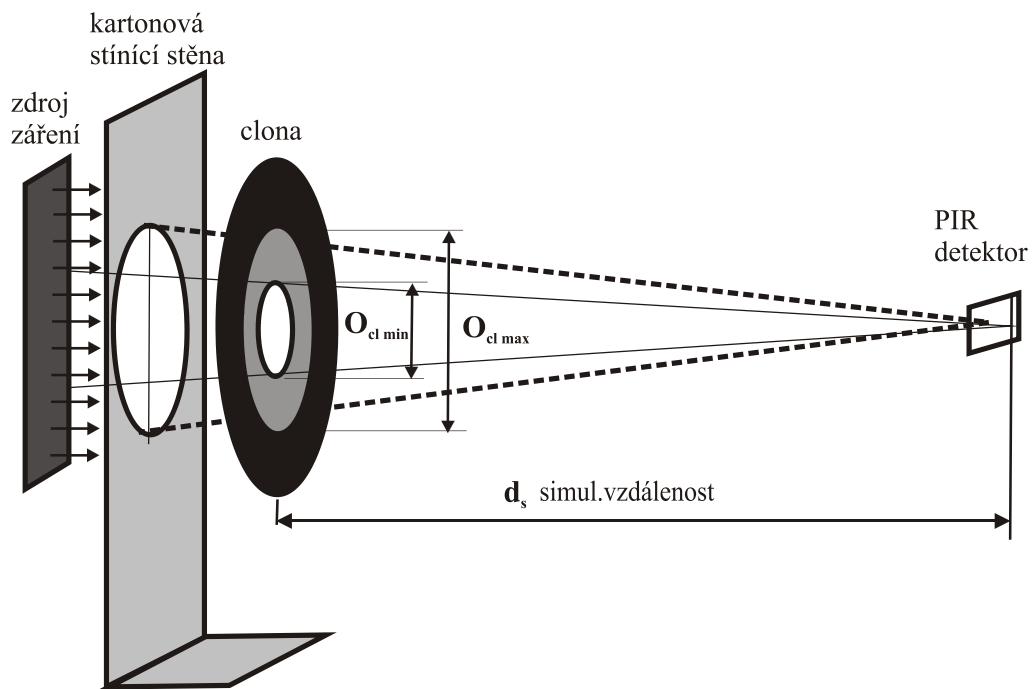
$$o_{cl} = \frac{w_b}{d_{max}} \cdot d_s \quad (27)$$

Po dosazení hodnot pak  $o_{cl} = 0,05 \text{ m}$ , což reprezentuje největší požadovaný průměr otvoru clony.



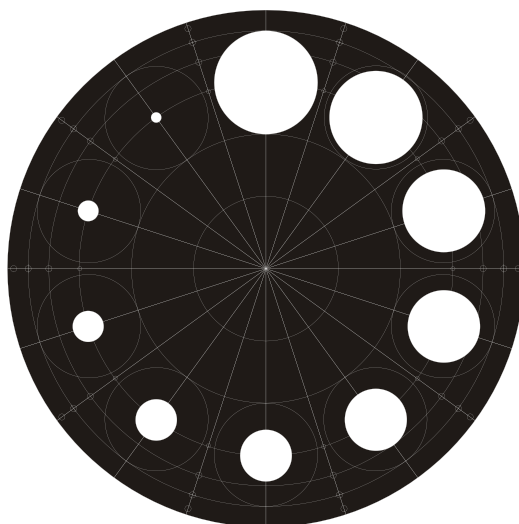
Obr. 78: Výpočet největší velikosti otvoru clony

Pro další simulaci vzdalování objektu potřebuji clonu zmenšovat a dále pak otvor zmenšit na minimální hodnotu tak, aby zdroj záření představoval úzký paprsek, pomocí kterého by se dala určit hranice jednotlivých segmentů, jak je ukázáno na Obr. 79. Vzdálenost mezi zdrojem záření a kartonovou stěnou je v rámci možností co nejmenší a jako simulační vzdálenost pak počítám se vzdáleností clony od detektoru.



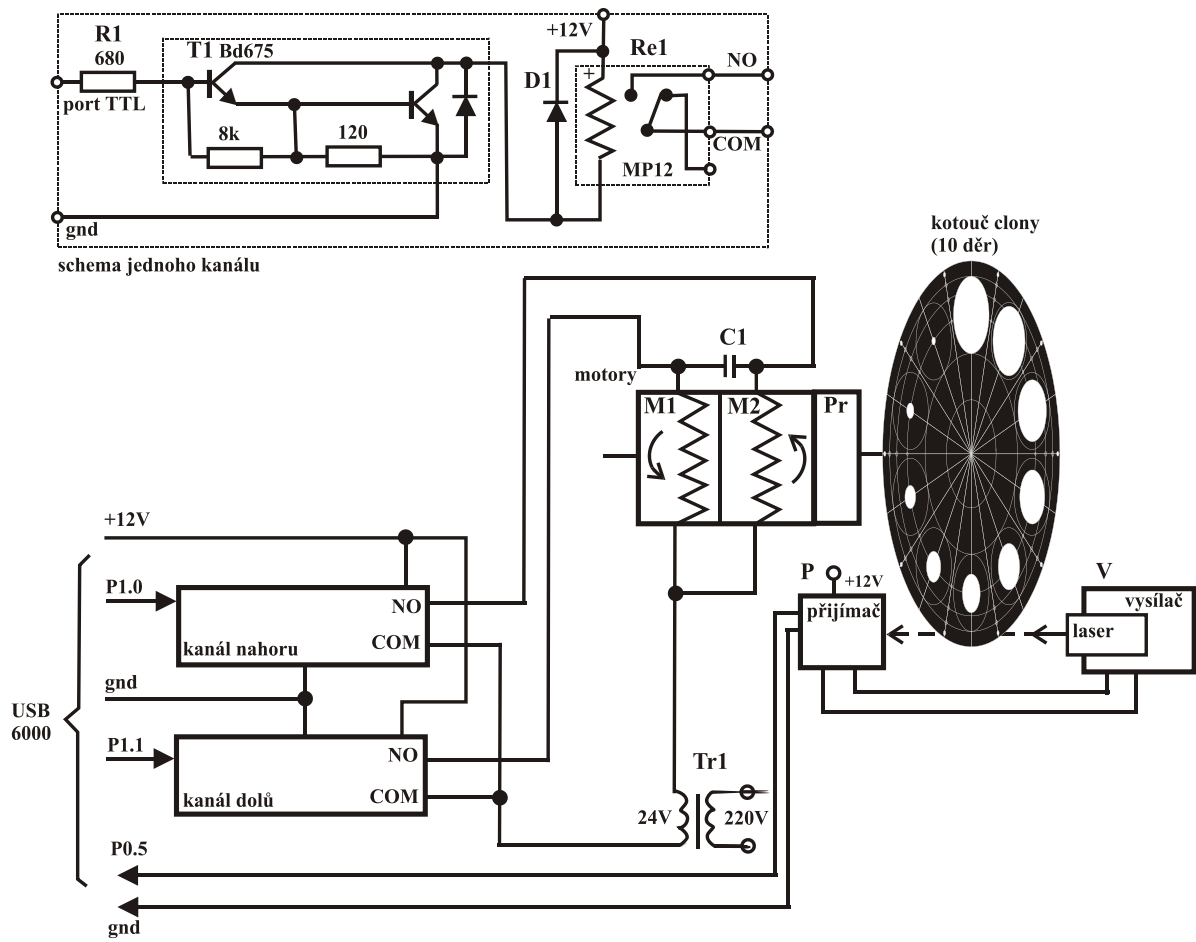
Obr. 79: Změna průměru plochy zdroje záření

Výsledkem předchozích výpočtů a návrhu je výroba polohovatelného kotouče s proměnnou velikostí otvorů na kruhové dráze. Tento jsem vyrobil z kuprextitu, je nastříkán černou matovou barvou, aby nedocházelo k odrazům záření od jiných zdrojů, jak je ukázáno na Obr. 80. Největší otvor má průměr 50 mm a nejmenší 4 mm. Existuje profesionální clona s přesným motorickým ovládáním velikosti otvoru programově přes LabView od firmy Standa, avšak kvůli vysoké ceně nebyla použita.



*Obr. 80: Kotouč clony*

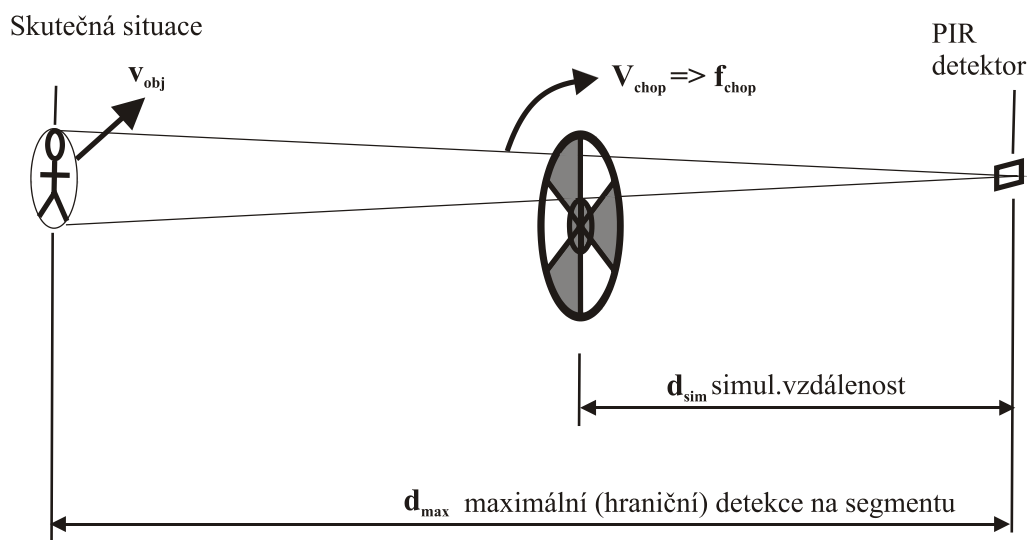
Vlastní ovládání nastavení otvoru clony je nakresleno na Obr. 81. Kotoučem clony přes převodovku Pr otáčí 2 motory M1 a M2 – každý je pro jeden směr otáčení, napájené střídavým napětím 24V přes transformátor Tr1. Do motorů je střídavý proud spínán přes kanál nahoru (dolů), kde je ovládán úrovní TTL signálu ze zařízení USB6008 ovládané programem z LabView. Úroveň signálu je zesílena pomocí tranzistoru T1 a aktivuje cívku polarizovaného relé Re1 (cívka relé je chráněna diodou D1) a sepne kontakty NO a COM pro kanál buďto nahoru nebo dolů pro zvětšení nebo zmenšení, otvoru clony. Kotouč clony se začne otáčet a je zastaven, až paprsek laseru vysílaný z vysílače V, prosvítí štěrbinu na obvodu kotouče, přijímač P na svém výstupu sepne úroveň na log 0, tento signál zpracuje na vstupním portu P0.5 zařízení USB6008 a software provede vypnutí otáčení nahoru přes port P1.0 (nebo dolů – port P1.1) a kotouč clony je pak přesně nastaven na požadovaný otvor (pozici) clony.



Obr. 81: Schéma ovládní clony

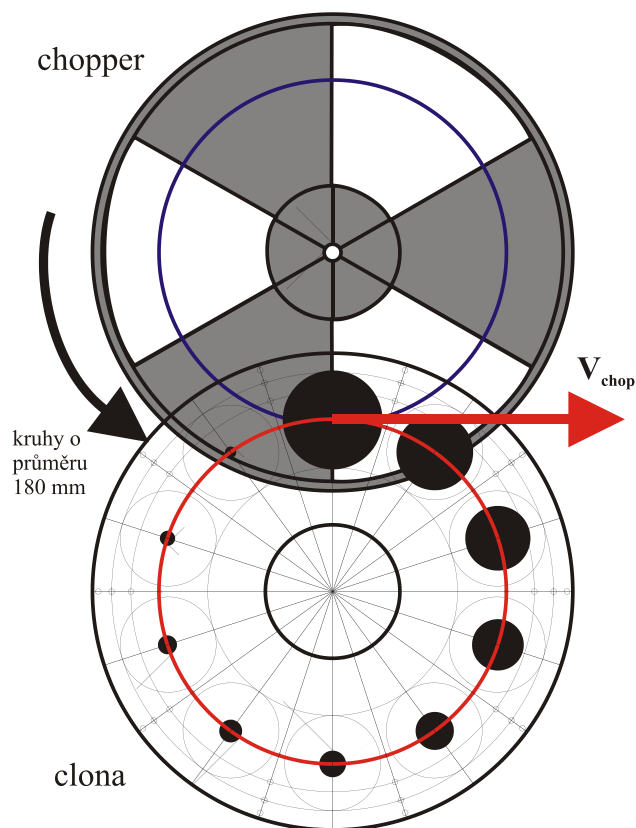
### 8.4.3 Chopper

Chopper je otáčející se kotouč, který slouží pro přerušování toku záření ze zdroje tak, aby na vlastní detektor v rámci segmentu docházelo ke změnám dopadajícího záření, protože vlastní pyroelement je citlivý právě na změnu dopadajícího záření. Pro výpočet rychlosti otáčení chopperu jsem použil skutečnou situaci, která je zobrazena na Obr. 82 a Obr. 83, kde je vidět vzájemná poloha chopperu a clony.



Obr. 82: Výpočet rychlosti otáčení choleru

Pro výpočet jsou důležité podmínky v oblasti maximálního dosahu detektoru. Dle katalogových parametrů výrobce známe rychlost pohybu detekovaného objektu – narušitele  $v_{obj}$  a známe vzdálenost  $d_{max}$  od detektoru, stejně tak jako simulační vzdálenost  $d_{sim}$ .



Obr. 83: Kotouč chopperu a clony

Kruhová dráha, na které dochází k přerušování paprsku, je na průměru 130 mm, kde mne zajímá obvodová rychlost  $v_{chop}$ .

$$d_{max} = 10 \text{ m}$$

$$v_{obj \ min} = 0,2 \text{ m/sec}$$

$$v_{obj \ max} = 3 \text{ m/sec}$$

$$d_{sim} = 1 \text{ m}$$

$$v_{chop} = \frac{v_{obj}}{d_{max}} \cdot d_{sim} \quad (28)$$

Po dosažení hodnot  $v_{obj \ min}$  a  $v_{obj \ max}$  jsem získal tyto hodnoty:

$$v_{chop \ min} = 0,02 \text{ m/sec} \text{ a } v_{chop \ max} = 0,333 \text{ m/sec}$$

bod umístěný na průměru  $D_{chop} = 180 \text{ mm}$  vykoná za jednu otáčku kruhovou dráhu

$$s_{chop} = \pi \cdot D_{chop} = v_{chop} \cdot t_{ot} = v_{chop} \cdot \frac{1}{f_{ot}} \Rightarrow f_{ot} = \frac{v_{chop}}{\pi \cdot D_{chop}} \quad (29)$$

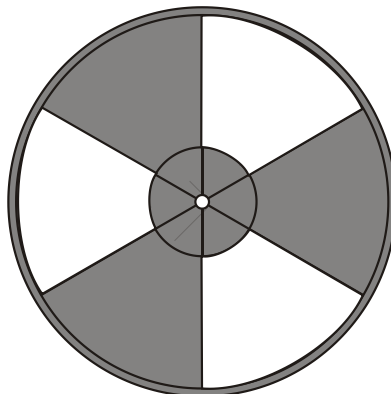
po dosažení reálných hodnot jsem obdržel:

$$f_{ot \ min} = 0,035 \text{ ot/sec} \text{ a } f_{ot \ max} = 5,89 \text{ ot/sec}$$

Jak je zobrazeno na Obr. 84, kotouč je rozdělený na 6 výsečí a má tedy 3 otvory a tak platí:

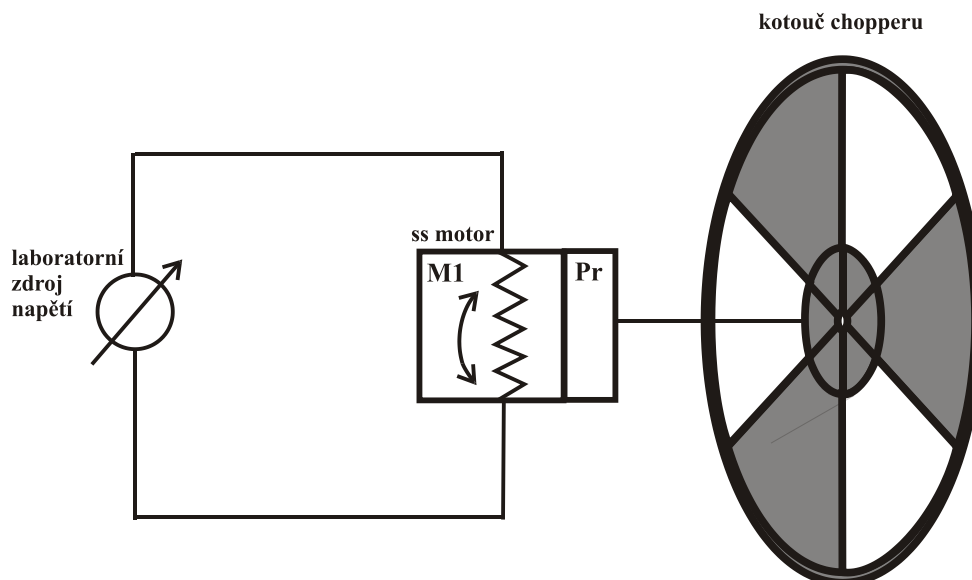
$$f_{imp} = 3 \cdot f_{ot} \Rightarrow f_{ot} = f_{imp} / 3$$

kde  $f_{imp}$  je počet přerušení zářivého toku a  $f_{ot}$  je počet otáček kotouče chopperu.



Obr. 84: Kotouč chopperu

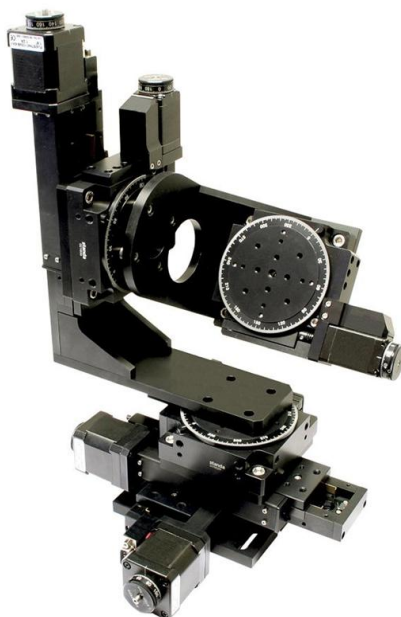
Vnější průměr kotouče je 250 mm s povrchovou úpravou matová čern, aby kotouč záření pohlcoval a neodrážel, vlastní pohon je realizován stejnosměrným motorem s převodovkou, řízeným napětím laboratorního zdroje, které je nastaveno ručně, jak je zobrazeno na Obr. 85.



*Obr. 85: Schéma pohonu chopperu*

#### **8.4.4 Pozicionér**

Pozicionér je šestiosý manipulátor s velmi přesným nastavením polohy a jeho konstrukce je vidět na Obr. 86.



*Obr. 86: Pozicionér – šestiosý manipulátor motoricky ovládaný*

Pro lepší vysvětlení funkce jeho jednotlivých pohonů a znázornění os pohybů, které ovládají, je vhodnější následující Obr. 87. Skládá se ze 3 pohonů lineárních, ovládajících pohyb v osách X, Y a Z. Dále pak ze 3 pohonů rotačních, ovládajících rotaci kolem osy R1, R2 a R3. Celková vzdálenost lineárního pohybu je 50 mm a je pohon ji překoná pomocí 20 000 kroků. Počet kroků u rotačního pohybu, potřebný k otočení o 360°, je 36 000 kroků. Protože pozicionér typu 8MT175-50XYZ-8MR191-28-3 od firmy STANDA z Litvy je stavebnice 3 lineárních a 3 rotačních polohovacích zařízení, je přesnost jednotlivých os určena přesností jednotlivých polohovacích zařízení a jejich údaje znázorňuje Tabulka IX a Tabulka X Základní specifikace celého zařízení zobrazuje Tabulka XI.

*Tabulka IX. Specifikace rotačního polohovacího zařízení 8MR 191-28*

rozsah rotace	360°
rozlišení na plný krok	0,6 arcmin (0,01°)
max. rychlost rotace	8 ot/min
vůle	0 μm
kmitání	0,5 arcmin
výstřednost	10 μm
nosnost horizontální	10 kg
nosnost radiální	2 kg
moment	1 Nm
váha	0,65 kg

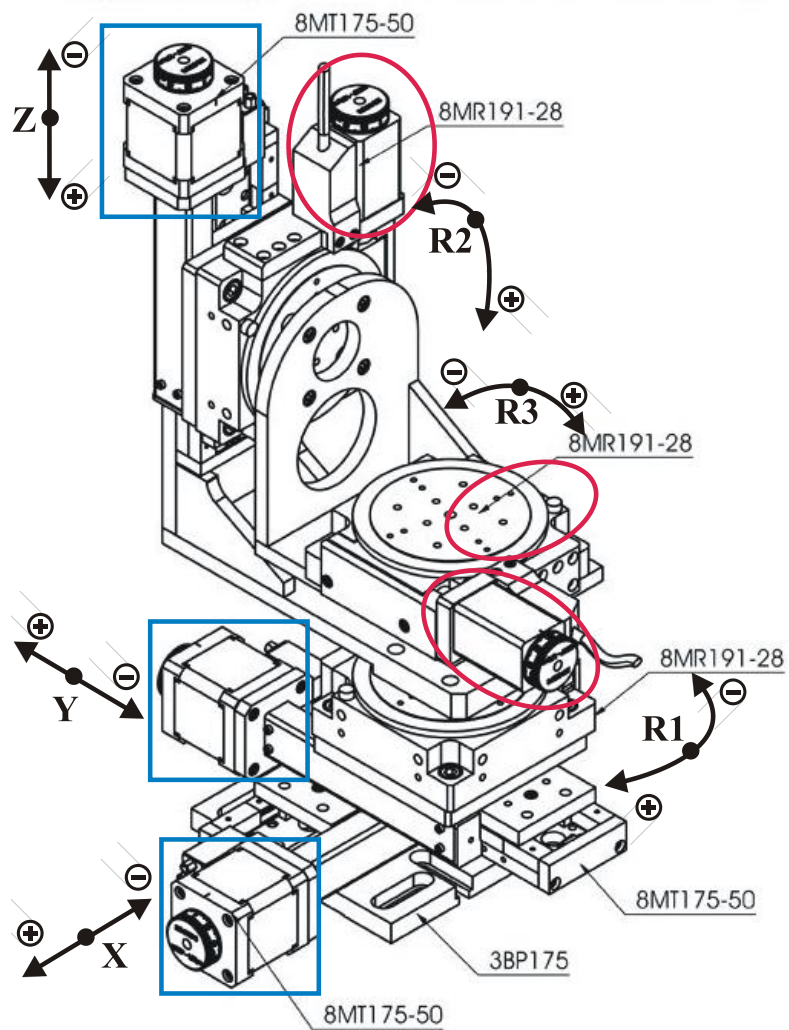
*Tabulka X. Specifikace podélného polohovacího zařízení 8MT 175-50*

rozsah pohybu	50 mm
rozlišení na plný krok	2,5 μm
max. rychlost	10 mm/sec
nosnost horizontální	8 kg
nosnost vertikální	3 kg
moment	1 Nm
váha	1 kg



Tabulka XI. Základní přesnosti pozicionéru 8MT175-50XYZ-8MR191-28-3

přesnost na plný krok při posuvu	2,5 $\mu\text{m}$
přesnost na plný krok rotace	0,01°
vůle posuvu	0,6 $\mu\text{m}$
vůle rotace	0,5 arcmin
opakovatelnost nastavení polohy posuvu jednosměrná	0,6 $\mu\text{m}$
opakovatelnost nastavení polohy posuvu obousměrná	0,8 $\mu\text{m}$
opakovatelnost nastavení rotace	150 $\mu\text{Rad}$



Obr. 87: Pozicionér – pohony a jejich směry pohybu

#### **8.4.5 Software**

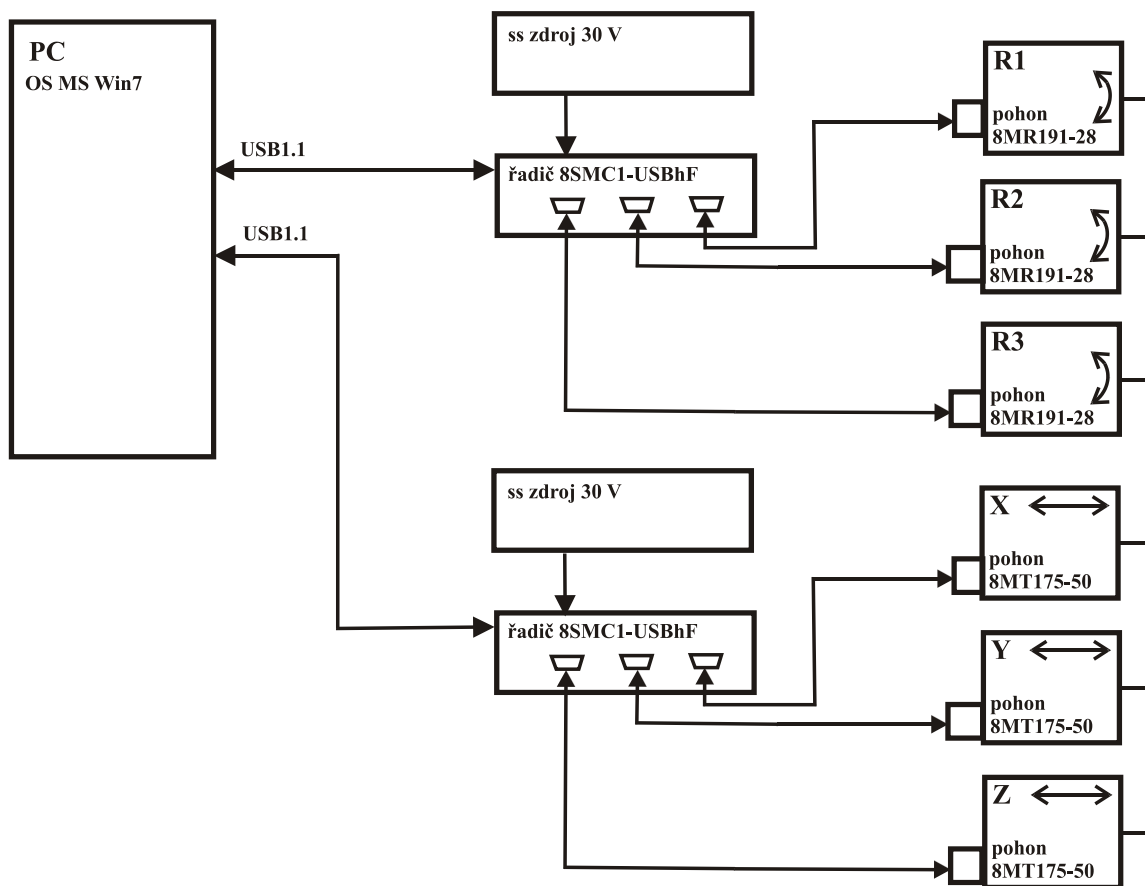
Základním požadavkem byla softwarová podpora a ovladače pohonů ve vhodném vývojovém prostředí. Firma STANDA nabízí SW development kit v prostředí MS Visual Basic 6.0 a LabView verze 8.2.1. a verze 2011. Zvolil jsem SW development kit od LabView, zajistil si vývojovou verzi LabView verze 2009, kterou jsem zvýšil na verzi 2010 s rozsáhlou komunikací na podporu National Instruments (NI).

V dalším kroku bylo potřeba zajistit hardwarové zařízení pro měření, příp. ovládání celého pracoviště. Za tím účelem jsem zapůjčil z ústavu Elektroniky a měření měřicí přístroje včetně sběrnice GPIB. Součástí dodávky SW LabView byl modul USB 6000, který obsahuje vstupně výstupní porty a bude dále popsán.

Ke všem zařízením byly postupně nainstalovány ovladače, což u firmy National Instruments není vždy jednoduché, protože na jedné straně existují ovladače od dodavatelů hardware a na straně druhé od NI a jejich funkčnost lze ověřit až po spuštění příkladu nebo ve vlastní aplikaci.

#### **Uživatelský manuál 8SMC1-USBhF – řadiče krokových motorů**

Uživatelský manuál je poměrně rozsáhlý a popisuje kontroler, neboli ovládací řadič mezi počítačem a vlastními pohony – krokovými motory. Jeho umístění je zřejmé z Obr. 88. Pozor, zde nelze zaměnit řadiče typu 8SMC1-USBhF-B2 mezi sebou, protože přestože to jsou stejné typy, mají od výrobce uvnitř nastavený odpor proud do pohonů, který je různý pro pohony lineární a rotační a v případě záměny by došlo k jejich poškození. Od výrobce je tato vlastnost označena zespodu a z důvodu záruky nelze odpory, umístěné uvnitř, měnit.



Obr. 88: Blokové schéma ovládnání pohonů mikrořadičem

V části obecné informace poskytuje přehled základních parametrů, jejich popis, aplikace a kompatibilitu s operačními systémy.

V části funkční popis se manuál zabývá hardwarovou stavbou jednotlivých komponentů, popisem desky řadiče, konfiguračních propojek, odporů, až na nejnižší úroveň k pohonům, kde jsou vysvětlené způsoby ovládnání krokových motorů, zapojení jejich fází, měřením úhlu otočení hřídele, včetně zapojení a popisu konektorů, signálů a zdrojů. Důležitou částí jsou koncové spínače, jejich konfigurace a zapojení. Součástí textu jsou varování před poškozením a poznámky, neboli výzvy k opatrnosti, při hardwarových změnách. Jako zajímavé se jeví možnosti synchronizace pohonů mezi sebou, což jsem z důvodu složitosti nevyužil.

V části specifikace jsou uvedeny elektrické parametry pohonů, mechanické možnosti krokování pohonů a vzdálené řízení přes sběrnici USB 1.1.

Další část manuálu se zabývá instalací softwarových ovladačů, programu SMCView, spolupráce s operačními systémy a možnostmi vzdáleného ovládnání z prostředí internetu.

Aplikaci SMCView se věnuje další kapitola a část tohoto programu, kterou jsem využil, bude popsána zvlášť při nastavování počáteční polohy pozicionéru..

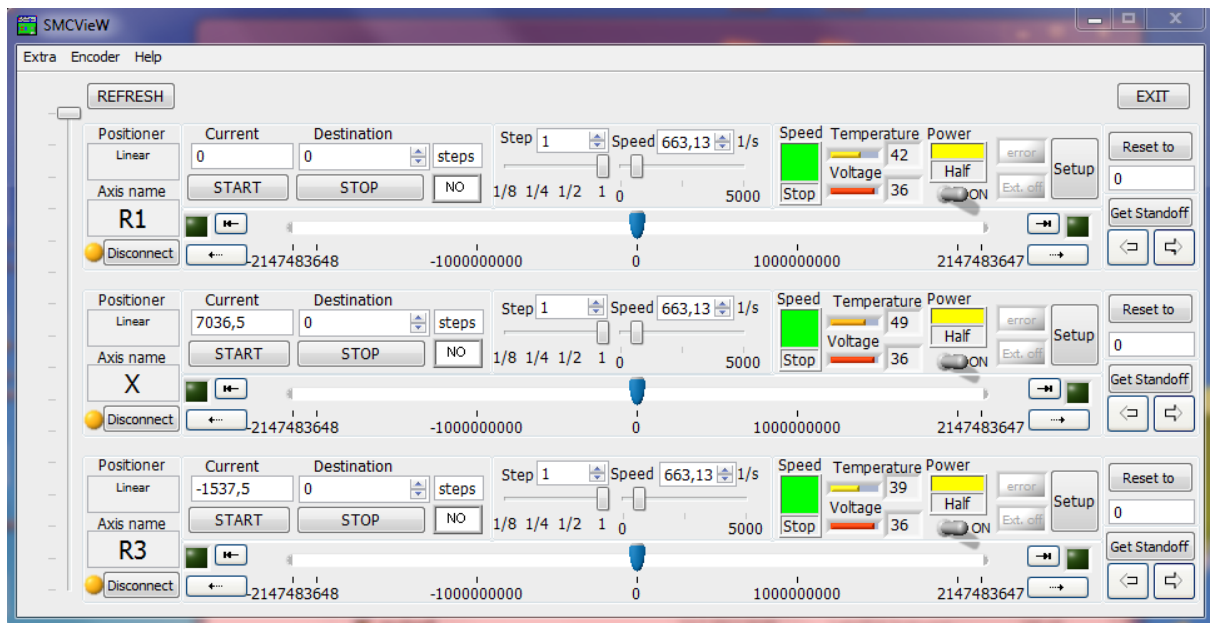
Dále je zde popsána knihovna objektů VIs (virtual instruments) z prostředí LabView verze 7.1.1 a vyšší od firmy National Instruments, která je součástí dodávky na CD, včetně příkladů.

Dále pak odkaz na knihovnu USMCDLL.dll pro Win2000/XP pro programování v C++, včetně příkladů.

Poslední část pak tvoří odkaz na knihovnu USMCDLL.dll pro WM pro vzdálený přístup a ovládání pomocí mobilních zařízení využívajících operační systém Microsoft Windows Mobile 5.0 a vyšší, včetně příkladů v C++.

## **Program SMCView**

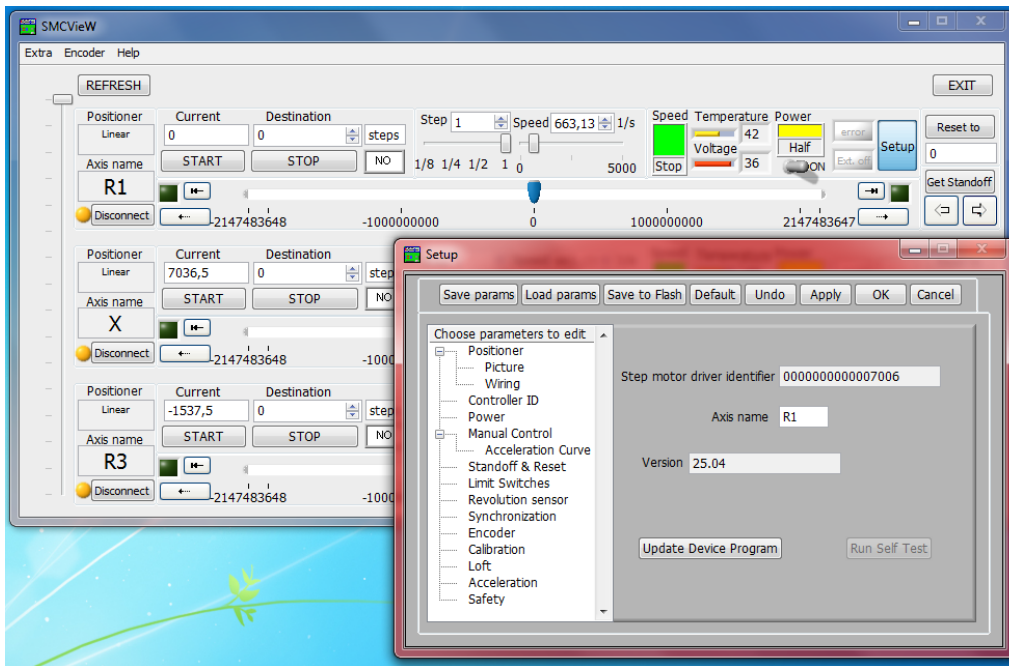
Základní okno programu je ukázáno na Obr. 89. Po spuštění programu dojde k načtení všech řadičů krokových motorů, což odpovídá funkci, která se spustí zmáčknutím tlačítka REFRESH. V mém případě provedl načtení šesti pohonů (připojených přes 2 řadiče), včetně jejich identifikátorů. Svislým posuvníkem vlevo si zobrazíme požadované pohony. Dále jsem si fyzicky označil na pozicionéru jednotlivé osy a stejné jména jsem přiřadil pomocí funkce Setup k jednotlivým pohonům (R1, R2, R3, X, Y, Z). Do pole Destination se zapisuje počet kroků k dosažení cílové pozice, zatímco pole Current ukazuje aktuální pozici na své dráze. Tlačítkem START se spouští krokování do cílové pozice, tlačítkem STOP je možné krokování okamžitě zastavit. Kromě příkazových tlačítek jsou zde ještě realizované měření a indikace rychlosti – zelené pole Speed, teploty – žlutý sloupcový diagram a číslo označený Temperature, měření napětí – červený diagram a číslo označené Voltage a žluté pole zdroje označené Power s možností v případě havárie zdroj odpojit pomocí přepínače označeného ON, čímž se odpojí napájení krokových motorů a pohonem lze ručně pohybovat pomocí otočných noní. Rychlost (Speed) a přesnost krokování (Step) jsem nechal výchozí a mohl jsem začít testovat.



Obr. 89: Základní okno aplikace SMC View

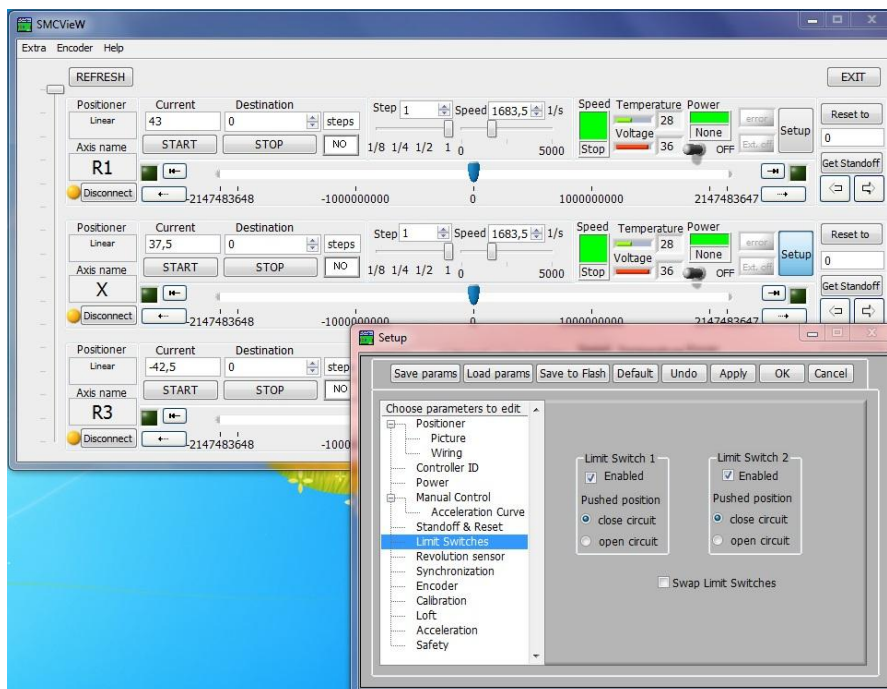
První pokusy byly problematické, neboť v základním nastavení programu nebyly správně nakonfigurovány koncové spínače (Limit Switch) a pohony v plné rychlosti najely do krajní polohy, kde se mechanicky zasekly, aniž by byly zastaveny po detekci koncové polohy lineárních os. Na tuto skutečnost neupozorňuje ani manuál, ale vlastní program SMCView tuto volbu umožňuje. Toto byl hlavně problém u lineárních pohonů, kde musela být nastavena funkce Enable a CloseCircuit, zatímco u rotačních pohonů pak funkce SWAP bez Enable a pohon se zaseknout nemůže, protože se unášec pohybuje do kruhu.

Pomocí volby Setup lze volit základní vlastnosti jednotlivých pohonů, jak je naznačeno na Obr. 90. Na obrázku je ukázána volba Controller ID, která zobrazuje identifikátor a přiřazené jméno osy, jak již bylo zmíněno. Volba Picture ukazuje obrázek pohonu, Wiring pak zapojení krokového motoru. Z dalších voleb je zajímavá volba akcelerační křivky (Acceleration Curve), kde lze definovat úrovně rychlostí při zrychlování na rychlost maximální (steps/sec). Funkci Standoff & Reset budu podrobně vysvětlovat v části **Nastavení počáteční polohy detektoru**.



Obr. 90: Podokno Setup

Funkce Limit Switches slouží nastavení vypnutí po dojezdu na koncový vypínač a její správné nastavení je ukázáno na Obr. 91. V nastavení od programu byla zapnuta (zaškrtnuta) funkce Swap, která měla za následek SW prohození spínačů na začátku a konci lineární dráhy, což mělo za následek havárii pozicionéru a bylo nutno se ručně otáčením noniů vrátit ze zaseknuté polohy do polohy volné.

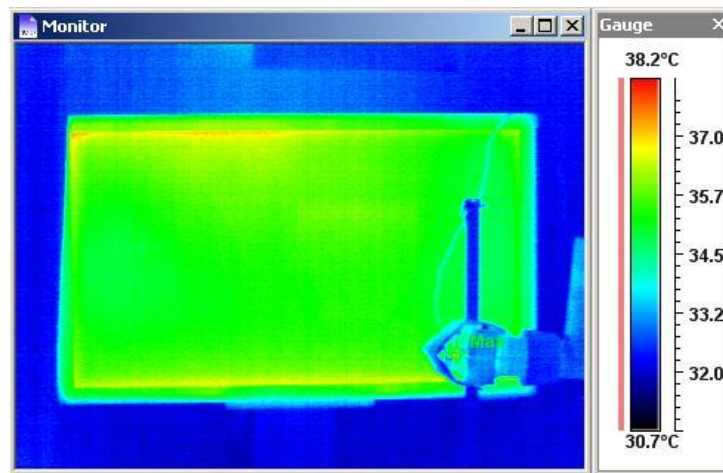


Obr. 91: Funkce Limit Switches v Setupu

Ostatní funkce a vlastnosti Setupu slouží k synchronizaci pohonů mezi sebou, zvýšení přesnosti polohování hřídele krokového motoru, kalibrace, vymezení vůlí apod., což jsem v této verzi SW nepoužíval.

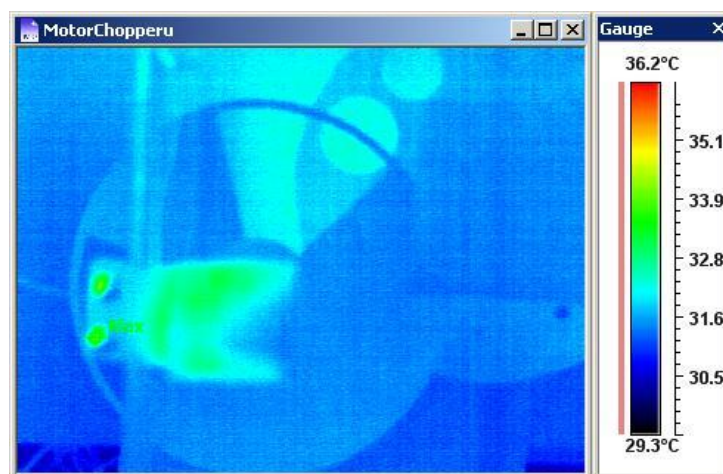
#### 8.4.6 Rušivé záření na pracovišti a jejich odstranění

Na pracovišti se vyskytly zdroje záření, které jsem v návrhu nepředpokládal a byly zjištěny pomocí IČ kamery. Prvním zdrojem záření byl LCD monitor, jak je ukázáno na Obr. 92, přestože byl původně umístěn za izolační stěnou tak, aby nebyl ve výhledu detektoru. Problém způsobovaly odrazy od tohoto zdroje a ty už pak ve výhledu detektoru byly. Řešení bylo jednoduché, monitor se umístil mimo měřenou oblast o patro výše na polici.



Obr. 92: Tepelné záření LCD monitoru

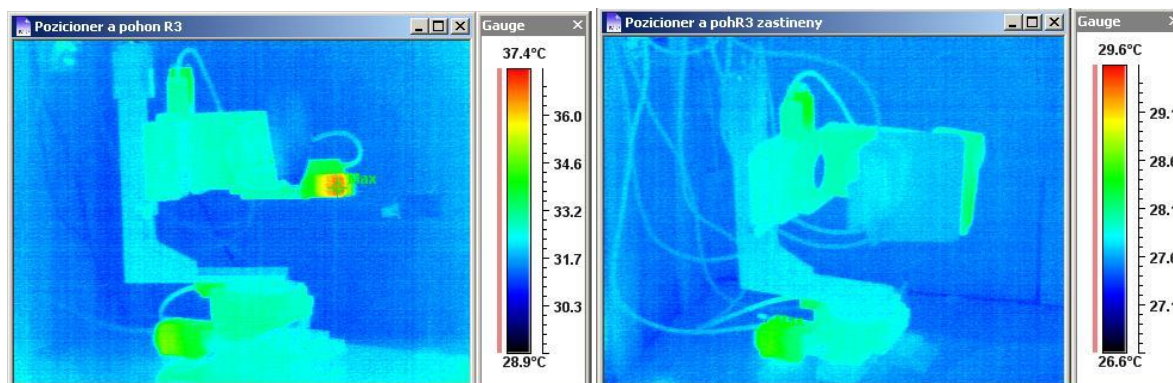
Dalším rušivým zdrojem záření byl motor chopperu, což je ukázáno na Obr. 93. Nejdříve jsem jej zastínil kartonovou krytkou, potom jsem provedl zastínění plechovými kryty, které budou zmíněny níže.



Obr. 93: Tepelné záření motoru chopperu

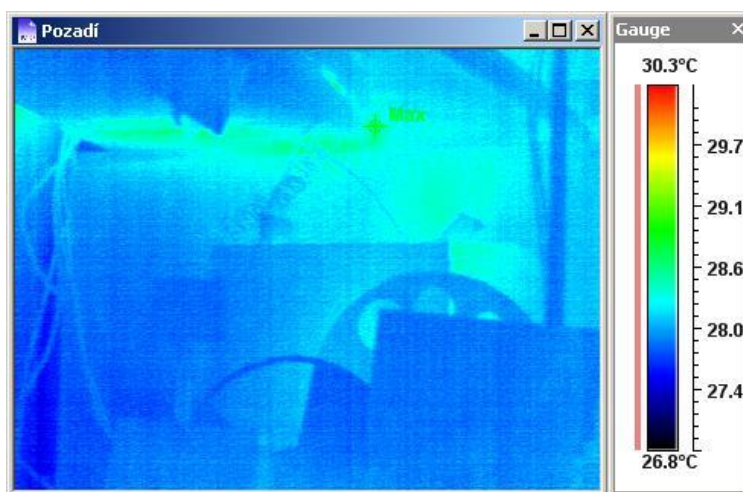


Dalším zdrojem záření byl motor pohonu R3 pozicionéru, který je umístěný přímo v blízkosti upevněného detektoru a jeho teplota je velmi vysoká, jak je ukázáno na Obr. 94. Jeho zastínění jsem provedl nejdříve na tělese motoru hliníkovým plechem, ale vedením se zde dostávalo velké množství tepla, tak jsem provedl zastínění na straně detektoru, jak je ukázáno na pravém obrázku. Toto řešení již bylo vyhovující. Nabízí se další možné řešení a to je změna mechanické konfigurace a umístění detektoru na pozicionéru tak, aby všechny motory byly vzadu, z hlediska výhledu detektoru, což jsem zatím nerealizoval.



Obr. 94: Tepelné záření motoru R3 pozicionéru

Jak je ukázáno na Obr. 95, dalším problémem by mohlo být i záření pozadí pracoviště, kde při vyšší teplotě okolí dochází ke kumulaci teplého vzduchu, který vzniká od zdroje záření – Peltierova článku a pohonů chopperu (clona se netočí trvale). Toto je vyřešeno izolačním tunelem z tubexu, jak je ukázáno na následujícím Obr. 96. Tento je složen ze 3 dílů tak, že jsou do sebe zasunuty a světlost dílu vpravo s nejmenším průměrem je větší, než největší průměr clony a to je 50 mm.



Obr. 95: Pozadí za Peltierovým zdrojem záření





*Obr. 96: Izolační tunel z tubexu*

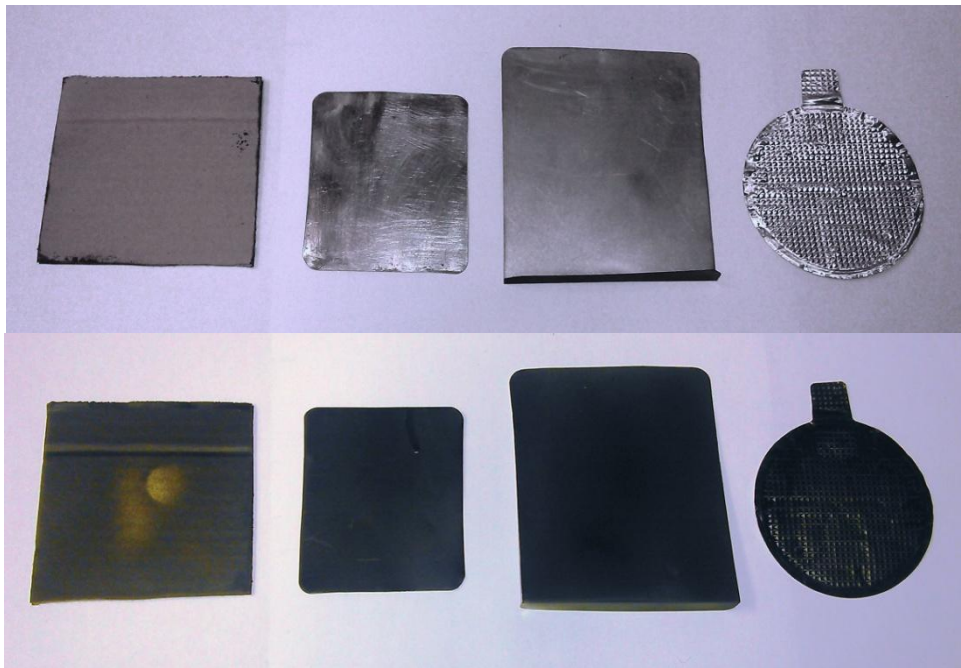
Dalším úkolem bylo odstínění pracoviště od obsluhy, což jsem realizoval pomocí stěny z tmavého plexiskla, jak je ukázáno na Obr. 97. Výhodou tohoto řešení je to, že můžeme sledovat pohyb detektoru ve viditelném spektru, zatímco záření od obsluhy stěnou neprosteupí a nezpůsobí detekci člověka. Možným rizikem je odraz zdroje záření uvnitř pracoviště, ale po kontrole obrazu IČ kamerou jsem zjistil, že teplota záření zdroje po odrazu je přibližně na úrovni okolí a navíc chybu vylučuje použití izolačního tunelu.



*Obr. 97: Stínící plocha z plexiskla*

Pro odstínění se mi osvědčily tři základní druhy materiálů, jak je ukázáno na Obr. 98. Vlevo je karton, který pokud je nastříkaný matovou barvou, záření pohlcuje, ale pro stínění výkonnějších zdrojů záření není schopný teplo rozvést a dochází v něm ke kumulaci tepla.

Jako druhý zleva je tenký železný plech, z jedné strany poniklovaný a z druhé strany černěný. Jeho výhodou je, že lesklou stranou teplo odráží, absorbované teplo rozvádí a vyzařuje do okolí a černou stranou záření neodráží, jen pohlcuje. Další výhodou je, že se dá pomocí silných permanentních magnetů snadno umístit kamkoli na tělesa z železa (ne na materiál z nerezové oceli). Podobně lze využít i tenké plechy z hliníku, jak je vidět na obrázku vpravo. Výhodou je rovněž jejich vysoká odrazivost na straně lesklé, nízká na straně černěné, velká tepelná vodivost, nízká hmotnost. Pomocí permanentních magnetů je lze umístit dle potřeby na železné předměty, protože magnetické pole hliníkem prostupuje.



*Obr. 98: Základní materiály pro odstínění rušivého záření*

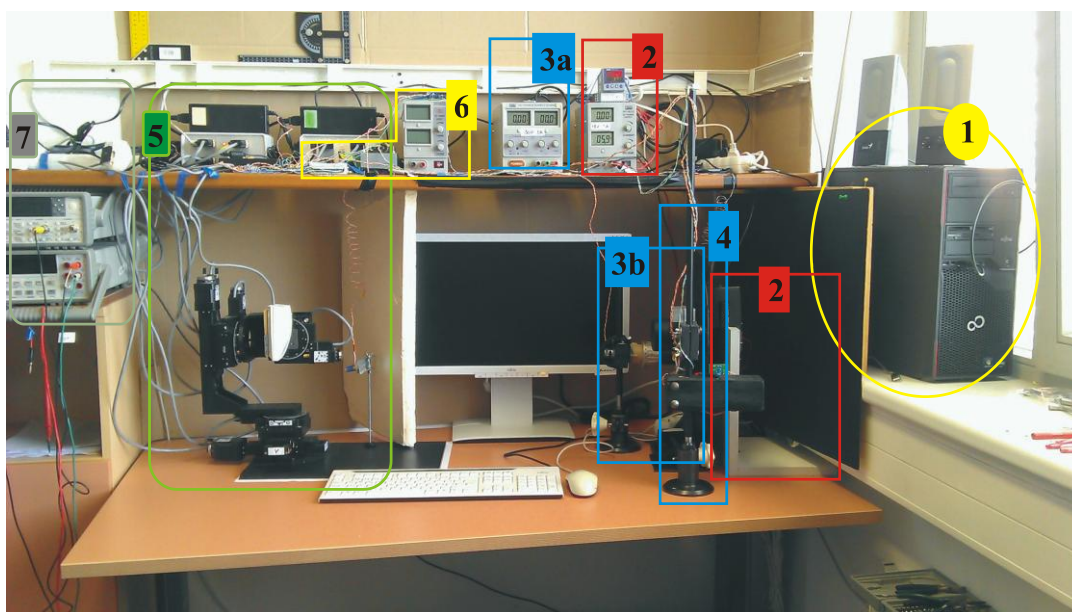
S každou změnou v mechanické sestavě pracoviště je nutno provést snímky s IČ kamerou pro kontrolu rušivých zdrojů záření, aby nedošlo ke znehodnocení výsledků měření.

#### **8.4.7 Realizace pracoviště**

Na Obr. 99 je fotografie celého pracoviště, které odpovídá hardwarovému návrhu na Obr. 72. Na pravé straně je vidět řídicí počítač 1, na kterém pod operačním systémem Microsoft Windows 7, běží aplikace vytvořené v prostředí NI LabView. Tento je propojen pomocí sběrnice USB se dvěma řídicími jednotkami pro řízení pohonů pozicionéru, na obrázku je to skupina 5, kde jsou vidět 2 zdroje, 2 řídicí jednotky a od každé jednotky jdou 3

kabely k jednotlivým pohonům, přičemž jednotka vlevo je určena pro pohyby podélné a jednotka vpravo pro pohyby rotační, tedy celkem 6 pohonů.

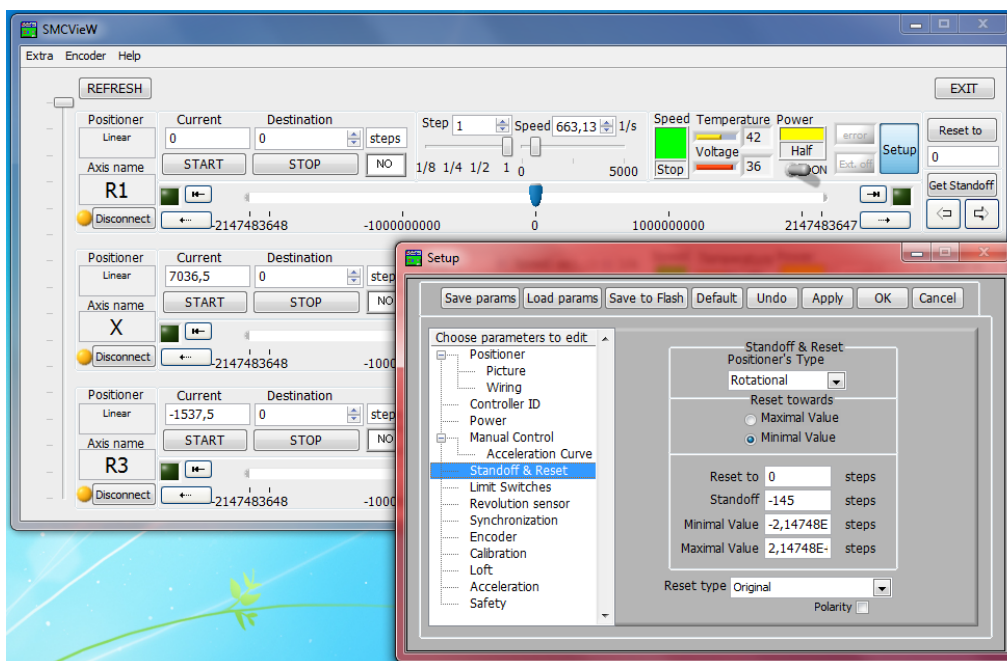
Na pozicionéru je umístěn detektor, jehož výstup jde do jednotky USB6008, která je na obrázku umístěna v oblasti 6. Pomocí této jednotky, lze pak dále ovládat funkci clony, snímat zaměření laserového paprsku a další funkce. Zdroj 3a slouží pro řízení otáček chopperu, který je včetně pohonu fyzicky umístěn na podstavci na stole - oblast 3b. V oblasti 4 je umístěna clona – pohon, kotouč clony a optické nastavování polohy, což již bylo vysvětleno, stejně tak jako řízení teploty zdroje záření 2, Peltierův článek.



*Obr. 99: Pohled na pracoviště pro měření PIR detektorů*

### **Nastavení počáteční polohy detektoru**

Pro nastavení počáteční polohy jsem s výhodou použil program SMC View, protože má funkce Standoff a Reset, která je nejdůležitější z hlediska nastavení počáteční polohy tím, že umožňuje přesné nastavení polohy vzhledem ke koncovým spínačům (Limit Switch), což je ukázáno na Obr. 100.



Obr. 100: SMCView okno Setup volba Standoff & Reset

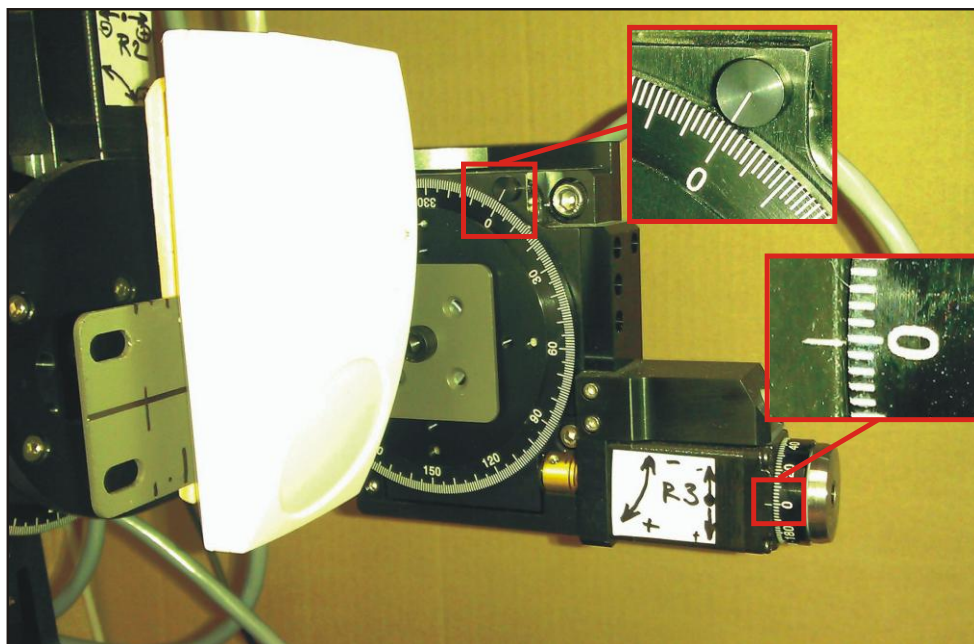
Funkce **Reset to** najde na Limit Schwitch (dle definice směru – Reset towards), dle hodnoty Standoff najde na tuto pozici (dle obrázku – 145 kroků) a vynuluje hodnoty pozic Current a Destination.

Funkce **Get Standoff** ze své pozice najde na Limit Schwitch, odpočítává si počet kroků, tuto hodnotu **zapiše do veličiny Standoff** v Setupu a vrátí se na původní pozici, svou pozici nevynuluje.

Prakticky to znamená, že pomocí programu SMCView je třeba ručně najet do požadované polohy ve všech osách pohybu a potom postupně spustit každého pohonu funkcí Get Standoff a Reset to a program SMCView můžeme opustit.

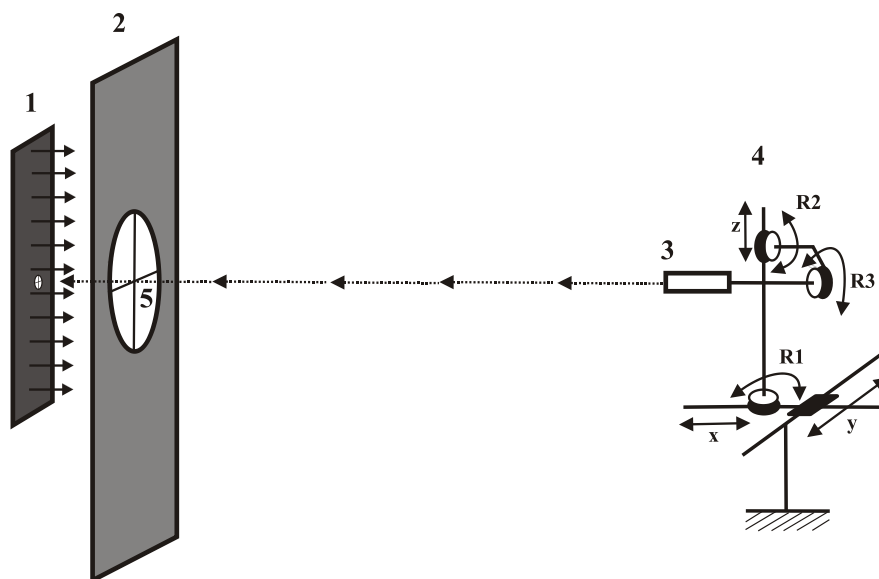
Ve vlastní aplikaci je pak nutno si před měřením vynulovat počáteční hodnoty všech pozic v jednotlivých osách. Rotační pohony jsou najety do nulové polohy dle mechanických měřidel (noniů), aby byla zajištěná kolmost všech ploch pozicionéru, jak je ukázáno na Obr. 101.





*Obr. 101: Počáteční nastavení polohy dle mechanických měřidel*

K tomu, abych nastavil pozicionér kolmo na plochu zdroje záření a aby byly středy zdroje a pozice detektoru v ose, vyrobil jsem si zařízení pro laserové zaměřování na střed nitkového kříže zdroje záření, jak je ukázáno na Obr. 102. Na pozicionér jsem na držák, upevněný na plochu ovládanou pohonem osy R3, umístil pomocí magnetu ve tvaru válce laserový vysílač 3, čímž je přesně definovaná poloha zdroje laserového paprsku vzhledem k pozicionéru. Dalším úkolem, jak již bylo naznačeno, je nastavit pozicionér a jeho osy pomocí programu SMCView tak, aby byl paprsek zaměřen přesně na střed nitkového kříže 5 kartonového stínění 2 zdroje tepelného záření 1. Toto je provedeno pouze posuvy v osách Y a Z, ne však rotací pohonů R1, R2 a R3. Tyto jsou nastaveny na počáteční nulovou polohu, aby byla zajištěna kolmost zdroje záření 1 vzhledem k ploše, na které bude umístěn testovaný detektor.



Obr. 102: Laserové zaměřování počáteční polohy

Výsledkem předchozí práce je Tabulka XII jednotlivých os s hodnotami Standoff posunů počáteční polohy od polohy koncových spínačů v celých krocích pohonů při přesném zaměření laserového paprsku na nitkový kříž a nastavení rotačních pohybů do nulových poloh.

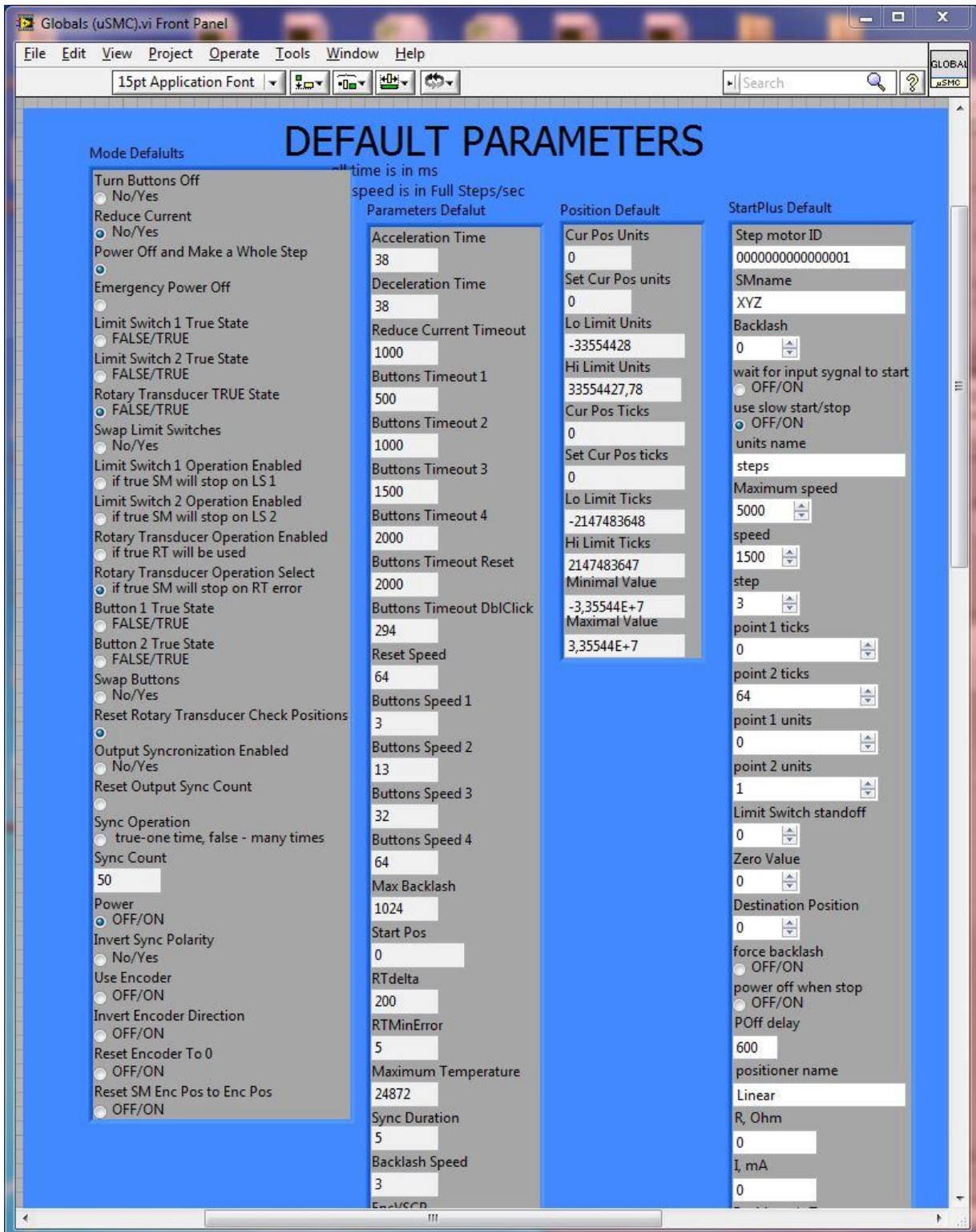
Tabulka XII. Posuny Standoff v počáteční poloze pozicionéru

Identifikátor zařízení na sběrnici USB	Přiřazená osa	Posun Standoff proti počátku (Limit Switch) v krocích pohonů
0000000000006659	X	+7 288
0000000000007006	R1	-116
0000000000006994	R2	-199
0000000000006664	Z	-9 778
0000000000007005	R3	-1 000
0000000000006629	Y	+7 460

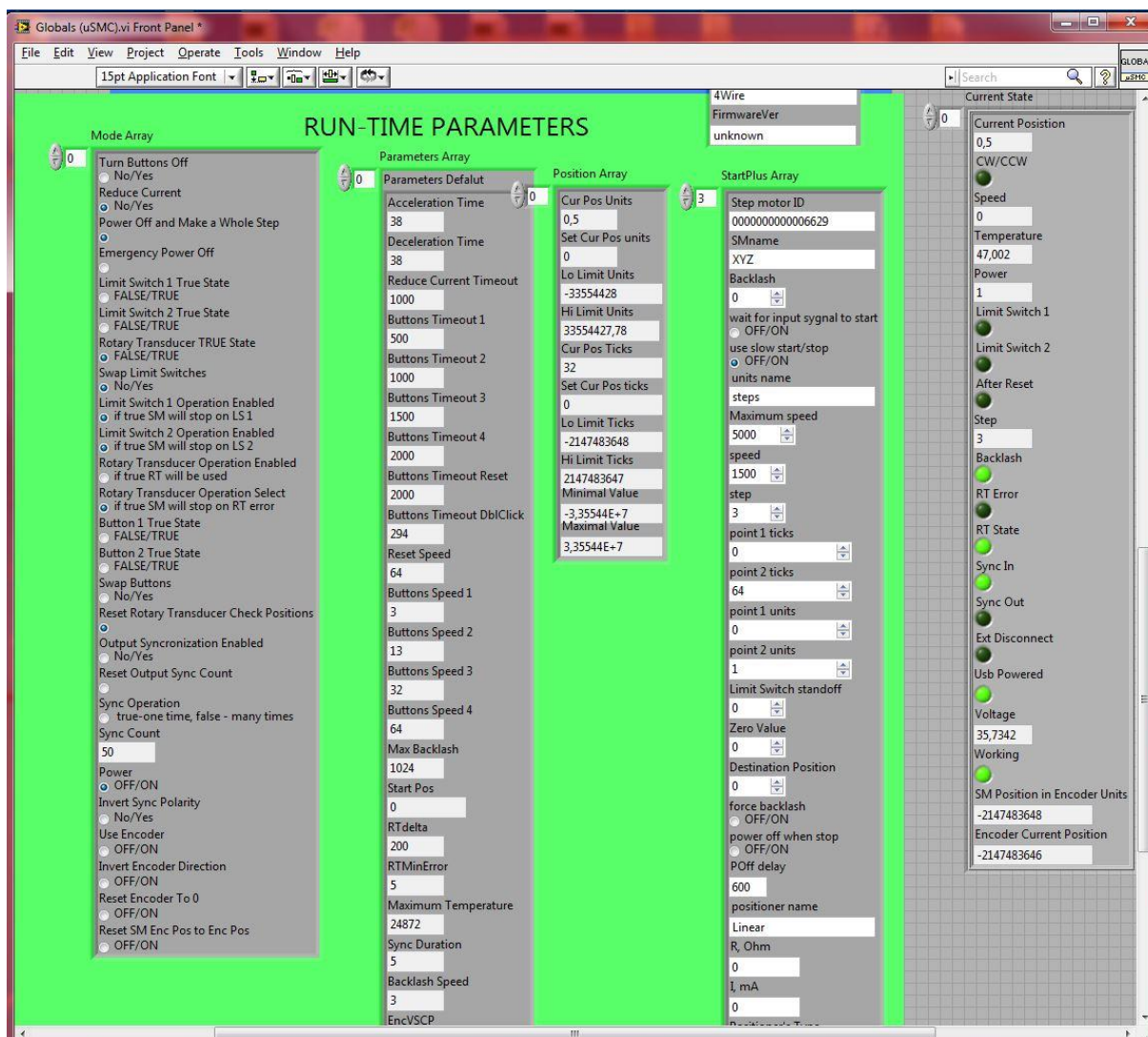
### Program Measure PIR Detector

Hlavním úkolem programu je urychlit měření tím, že zrychlí nastavování všech parametrů měření, protože při ručním nastavování parametrů by měření jednoho detektoru trvalo minimálně týden.

Pro ovládání základních pohybů pozicionéru jsem převzal program Example.vi, který pro svou funkci využívá globální proměnnou, jak je ukázáno na Obr. 103 a Obr. 104.



Obr. 103: Globals - Default Parameters



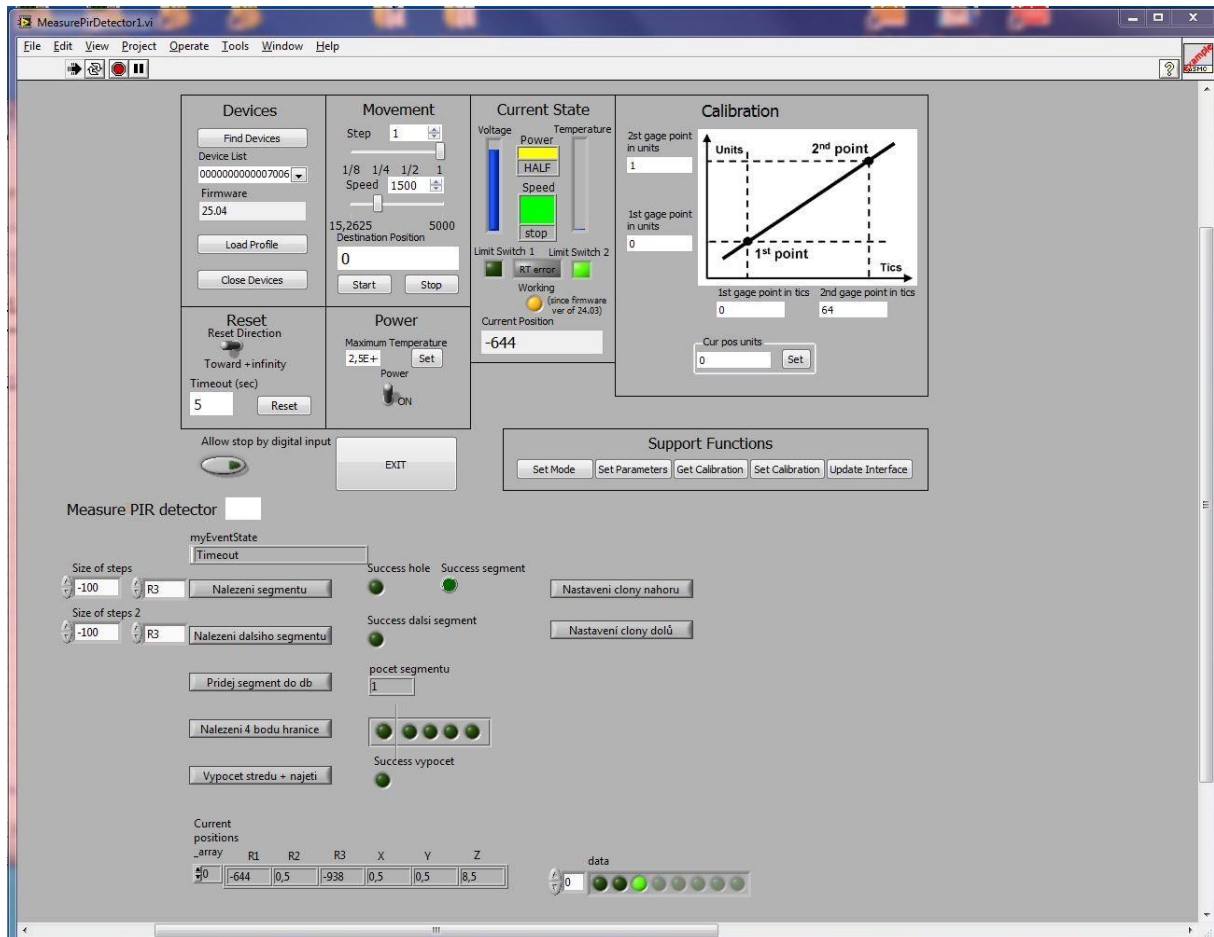
Obr. 104: Globals – Run Time Parameters

V globálních proměnné v sekci Defaut Parametrs jsou základní parametry, které použije program pro základní nastavení, zatímco v Run Time Parameters jsou již konkrétní (změněné) parametry pro jednotlivé (indexované) pohony. Jednotlivé parametry a jejich význam jsou popsány v uživatelském manuálu 8SMC1-USBhF. O nejdůležitějších jsem se zmínil v popisu programu SMCView a podrobně je zde nebudu vysvětlovat, protože jsou vysvětleny v manuálu programu.

Na Obr. 105 je ukázáno okno vývojové verze programu MeasurePirDetector, kde v horní části vidíme (podobně jako u runtime verze programu SMCView) tlačítka pro realizaci příkazů pro ovládání jednotlivých pohonů a ve spodní části pak příkazová tlačítka pro vlastní měření. Po spuštění programu je nejdůležitější akcí aktivace tlačítka Find Devices, protože teprve pak dojde k přiřazení VISA adres jednotlivých pohonů a k indexaci pohonů dle

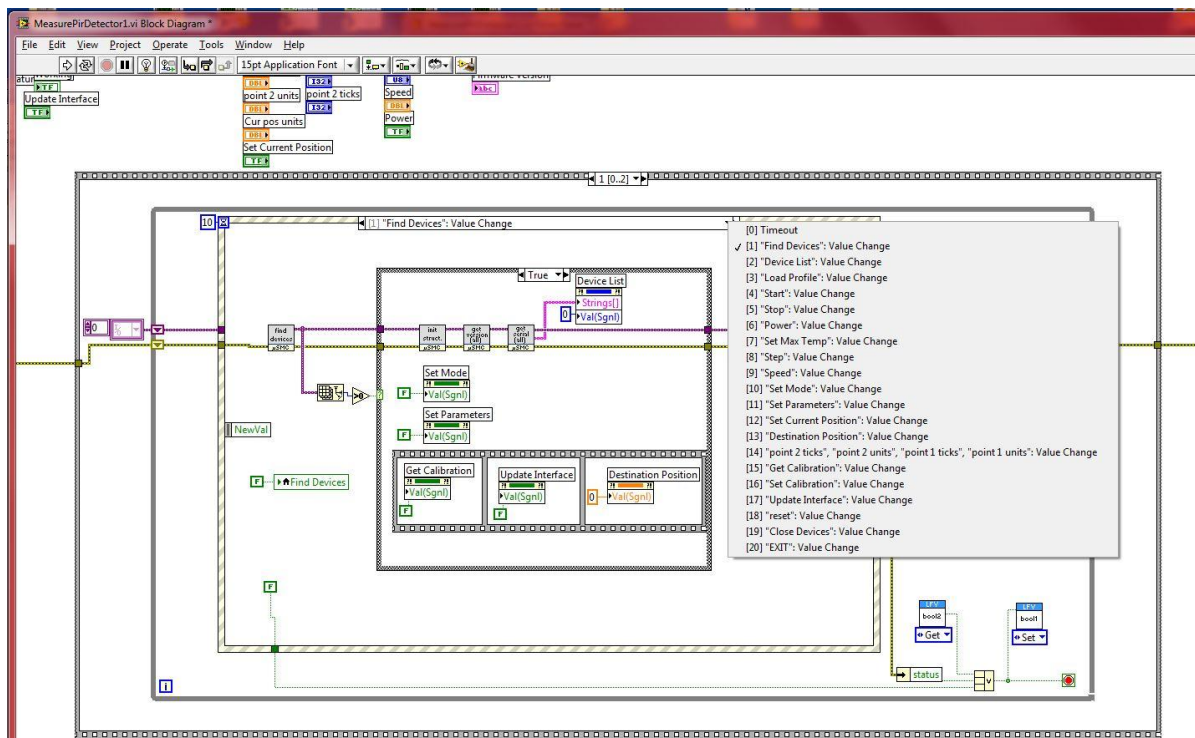


identifikátorů (Device List) jednotlivým osám pozicionéru a mohou být spouštěny vyhledávací algoritmy. Při znalosti identifikátorů jednotlivých pohonů (Device List) lze i zde ručně nastavovat polohu pozicionéru a nulovat počet kroků v poli aktuální polohy (Current Position).



Obr. 105: Front panel programu Example a měření PIR detektoru

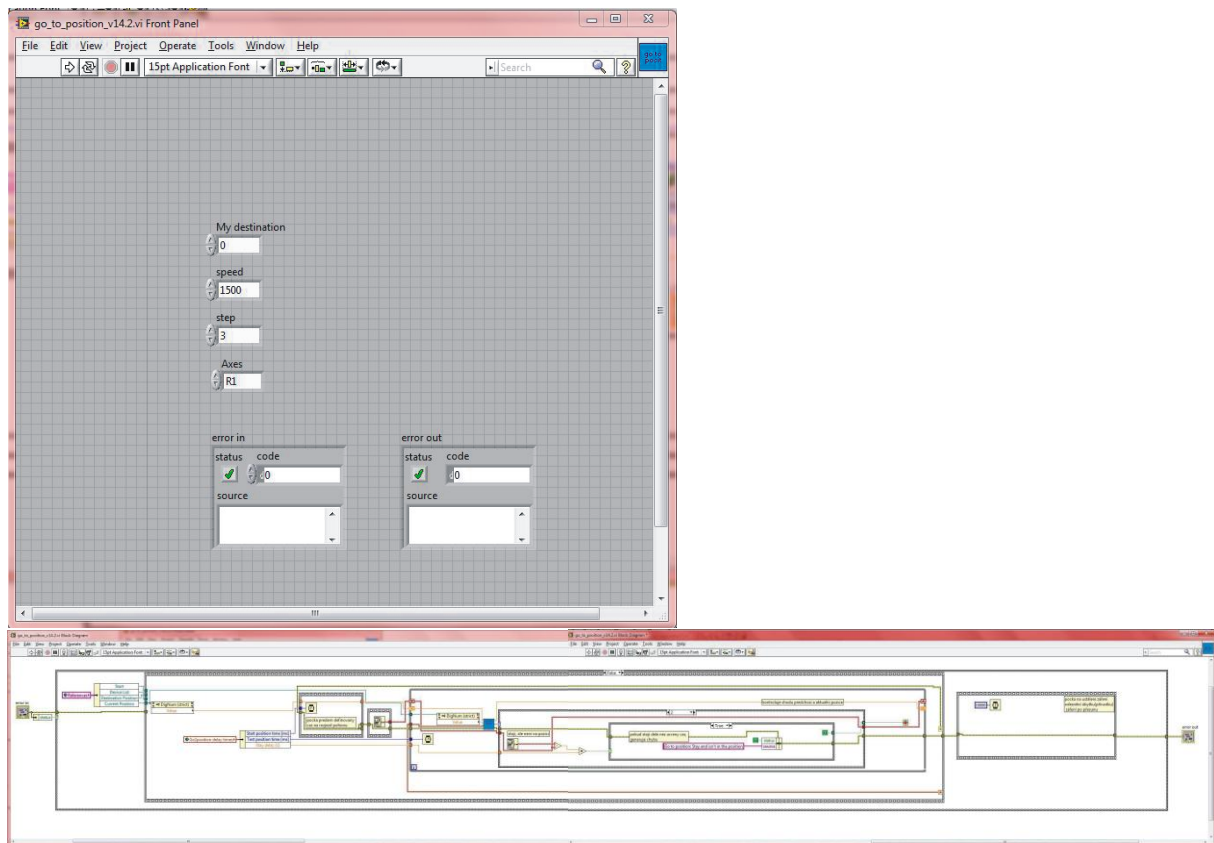
Vlastní program Example.vi pracuje na principu odchycení na události (Events), které jsou vygenerovány změnou hodnoty tlačítka na panelu aplikace, a po odchycení je provedena daná obsluha události. Vlastní program ovládání pohonů je ukázán na Obr. 106. Zde je vidět Event struktura, pomocí které jsou realizovány obsluhy jednotlivých událostí.



Obr. 106: Ovládání pohonů z původního programu

Základním úkolem je možnost provádět změny polohy pomocí modulu subVI označeného jako `go_to_position`, který umožňuje nastavení polohy určeného pohonu do určité polohy a je ukázán na Obr. 107. Tento jsem získal analýzou původního software od výrobce a představuje můstek mezi programem Measure PIR detektor a programem Example.vi.

Při návrhu programu jsem zvolil architekturu Master-Slave, kdy jsem k původnímu programu přidal další smyčku (Master) a jednotlivé subVI ovládající Slave smyčku pomocí generování událostí, příslušejících k jednotlivým controls front panelu. SubVI `go_to_position` tedy ve skutečnosti realizuje sekvenci změn jednotlivých controls původního programu, čímž je zajištěno zachování původní funkčnosti. Při zavolání `go_to_position` pro konkrétní pohon tedy dojde k přiřazení indexu vybraného pohonu a nastavení příslušného indexu do enum controlu Device list, nastavení parametrů přesunu (krok, rychlost, cílová pozice), odstartování události a kontrola stavu dle požadované, aktuální a předchozí hodnoty dané souřadnice dle stavu pohonu – stojí na pozici, běží, stojí a není na pozici.



Obr. 107: SubVI - go\_to\_position

Hlavní část Front panelu - programu Measure PIR detector je ukázán na Obr. 108. V horní části panelu je indikátor označený myEventState a slouží k výpisu právě prováděné operace obsluhy událostí v Master smyčce, Timeout je stav, kdy se neprovádí žádná pohybová operace (obsluhuje se událost uběhnutí zadaného časového intervalu, například 15ms) a pozicionér je v klidu. Nyní stručně popíšu funkci jednotlivých tlačítek, indikátorů a jejich funkcí:

**Nastavení clony nahoru a dolů** představují dvě tlačítka umístěné vpravo nahoře a slouží ke změně otvoru clony.

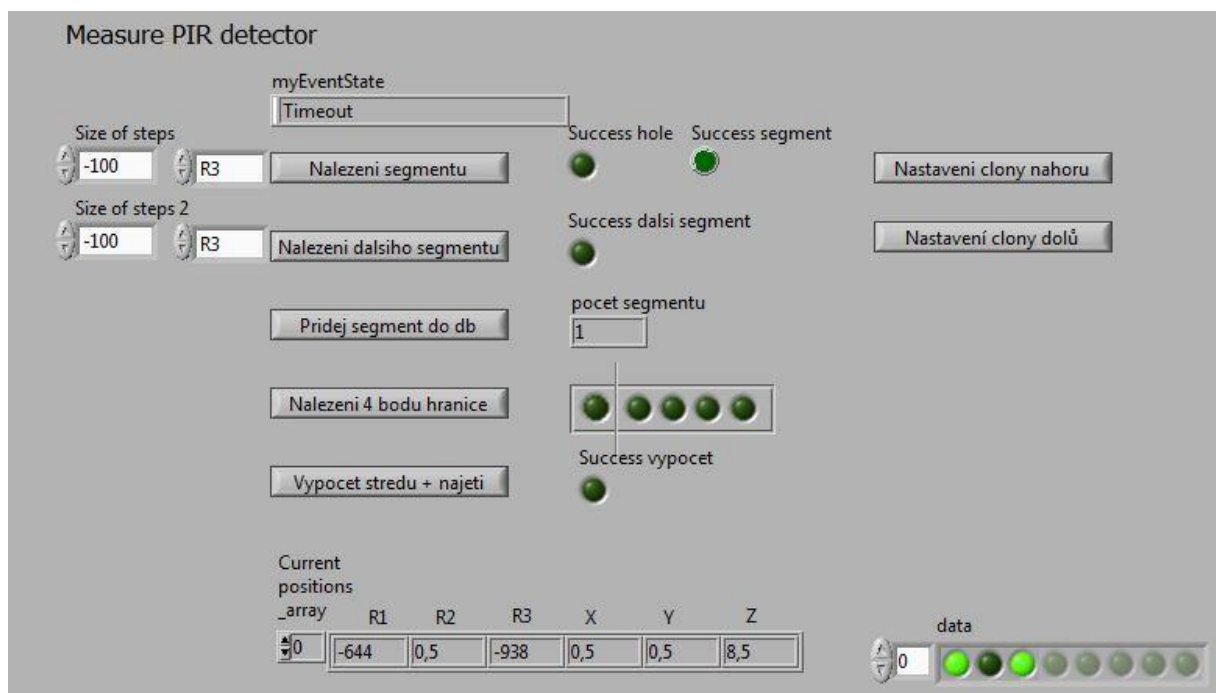
**Nalezení segmentu** je další tlačítko, umístěné ve druhém řádku a spouští funkci hledání segmentu. V okně vlevo se volí počet kroků pro další pozici, ve druhém okně je název osy, příslušející směru hledání segmentu a vpravo od tlačítka jsou indikace úspěšného nalezení otvoru clony a úspěšného nalezení segmentu.

**Nalezení dalšího segmentu** je tlačítko, umístěné ve třetím řádku a spouští funkci hledání dalšího segmentu, kde se předpokládá, že startuje z pozice uvnitř platného segmentu. Po nalezení segmentu tento stav zobrazuje indikátorem vpravo.

**Přidej segment do db** - přidá další (prázdný) prvek pole do struktury databáze bodů.

**Nalezení 4 bodů hranice** - předpokládá, že se startovací bod vyskytuje uvnitř segmentu a provádí vyhledání rohových bodů segmentu, postupně rozsvěcuje LED indikátory, jak nalézá jednotlivé rohové body segmentu.

**Výpočet středu a najetí** - zde provede program výpočet středu segmentu dle rohových bodů posledního segmentu a pozicionér najede na jeho střed, pokud je výpočet úspěšný (segment musí obsahovat všechny rohy a musí být správně rozmístěny), rozsvítí se indikátor.



*Obr. 108: Program Měření PIR detektoru*

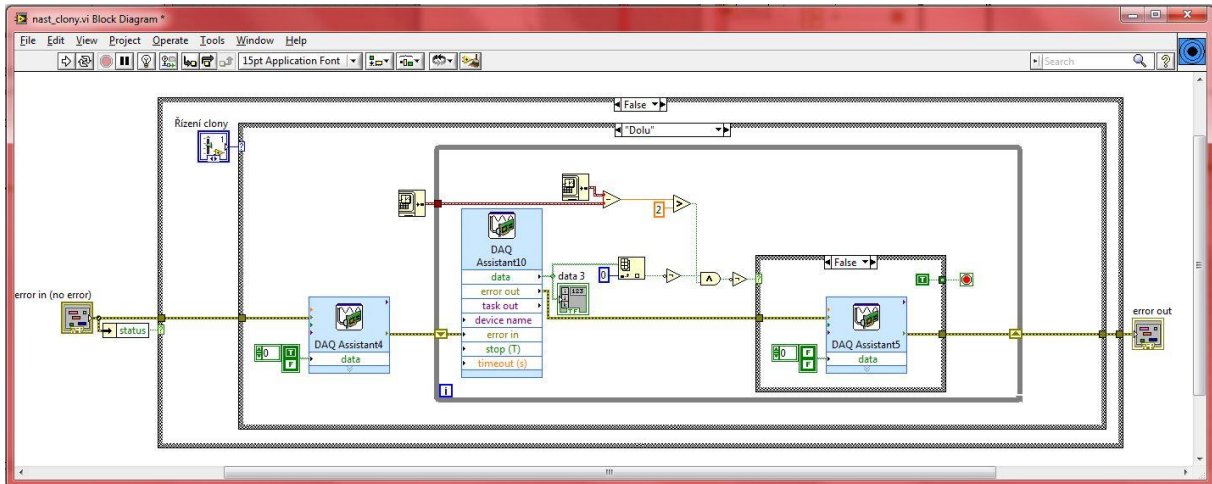
V poli pod tlačítky je Current positions \_array, což je zobrazené pole pozice jednotlivých pohonů od počáteční polohy v krocích. LED indikátory, označené data, vpravo zobrazují stav vstupů, na nulté pozici je zobrazen stav kontaktu výstupního relé detektoru.

Dále budou stručně popsány jednotlivé obsluhy událostí, které reagují na změnu jednotlivých tlačítek.

### **Nastavení clony nahoru (dolů)**

Toto subVI má za úkol změnit polohu kotouče na pozicích 1 až 10 směrem nahoru nebo dolů. Pomocí modulu DAQ Assistent se provede příkaz (aktivace výstupu) pro zapnutí

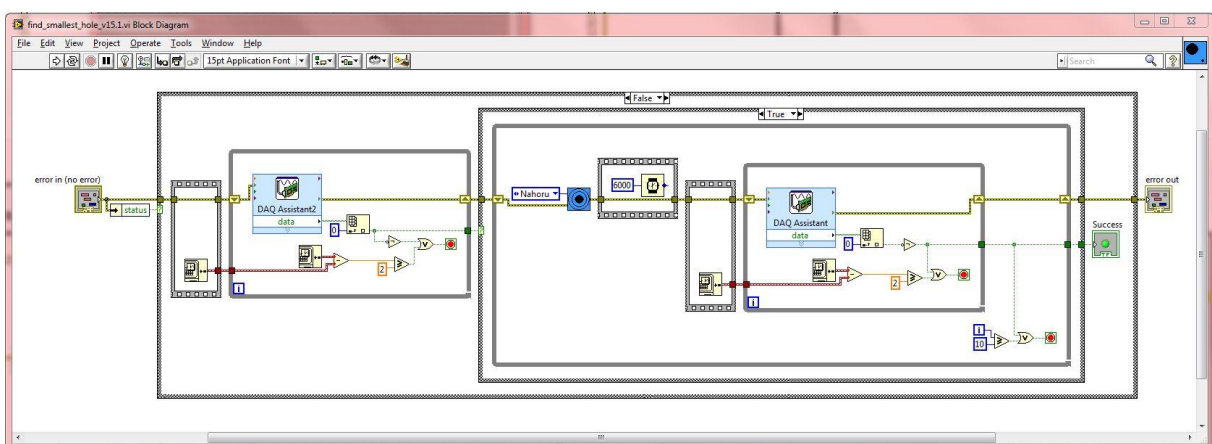
pohonu clony M1 (M2) a čeká se aktivaci přijímače laserového snímače polohy pomocí vstupu modulu DAQ Assistant. Pak se pohon M1 (M2) vypne na pozici nové clony.



Obr. 109: SubVI Nastavení clony nahoru (dolů)

## Nalezení segmentu

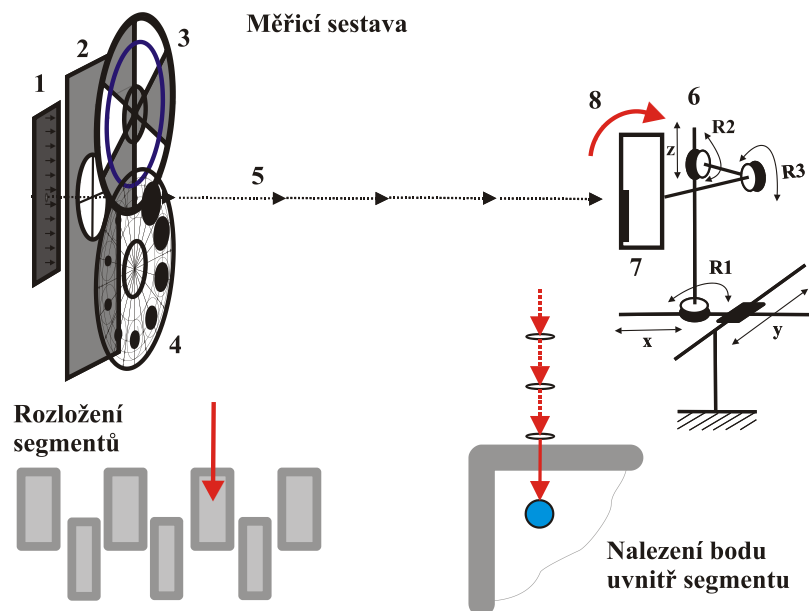
Prvním úkolem je nalezení nejmenší clony pomocí subVI `find_smallest_whole`, která je ukázána na Obr. 110. Zde využívá druhý laserový snímač polohy, který se aktivuje při pozici 1 - nejmenší clona tzn., že nejdříve pomocí modulu DAQ Assistant přečte stav snímače polohy, pokud není aktivní, provede pomocí subVI nastavení clony změnu clony a znovu pomocí modulu DAQ Assistant otestuje stav snímače. Toto ukončí na poloze 1 – nejmenší clona, což detekuje LED indikátorem Success whole.



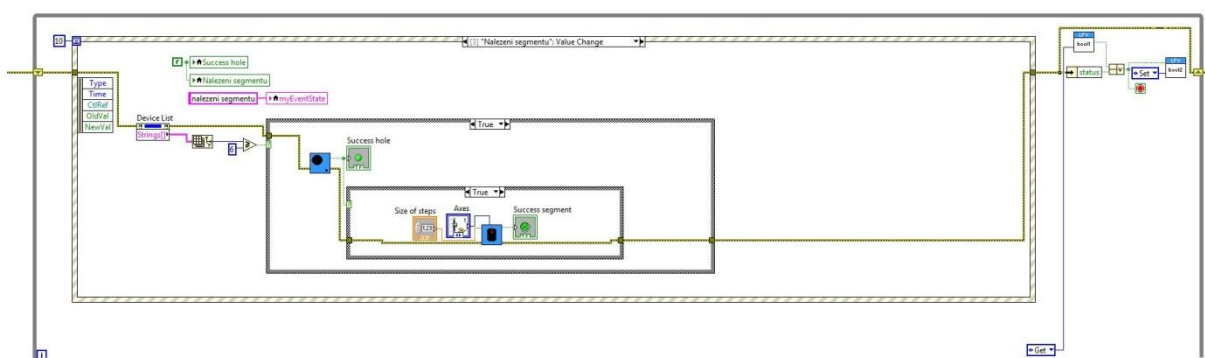
Obr. 110: SubVI – `find_smallest_whole`

Tato SubVI je součástí hlavní SubVI Nalezení segmentu, jak je ukázáno na Obr. 112, ve které je nejdůležitější SubVI `find_segment`, která provádí kroky, které jsou ukázány na Obr. 111.

Po odstartování provádí změnu pozice v počtu kroků a ose, která je nastavená na Front panelu (v základním přednastavení je počet kroků -100 a osa R3). Zdroj záření 1 vysílá přes zástěnu 2 clonu 4 záření 5, které je přerušované chopperem 3. Toto záření dopadá na detektor 7, který je umístěný na pozicionéru 6. Pozicionér provádí naklání ve směru šipky 8, což má za následek, že poloha bodu se blíží předpokládanému segmentu, jak je ukázáno na obrázku vpravo dole. Po každé změně pozice program čeká přednastavený čas, aby pak provedl otestování výstupu detektoru, je-li aktivní. Jakmile je výstup aktivní, relé detektoru pravidelně spíná, jsou souřadnice nalezeného bodu uvnitř segmentu, rozsvítí se LED indikátor Success segment a SubVI nalezení segmentu je ukončena.



Obr. 111: Nalezení bodu uvnitř segmentu

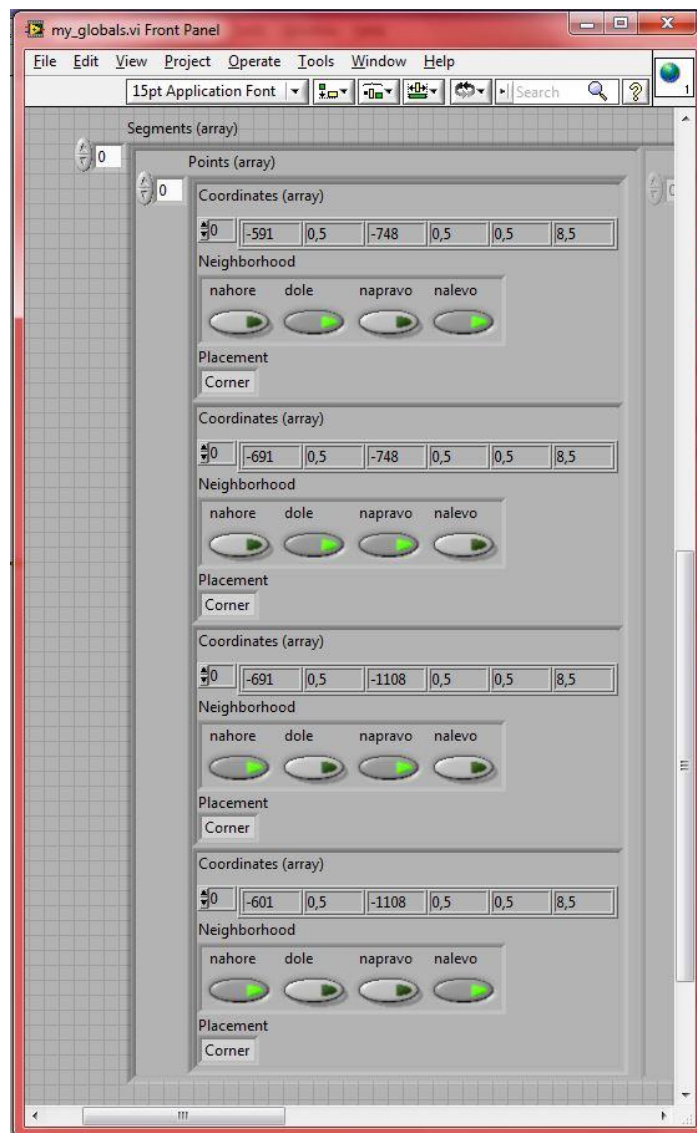


Obr. 112: SubVI Nalezení segmentu



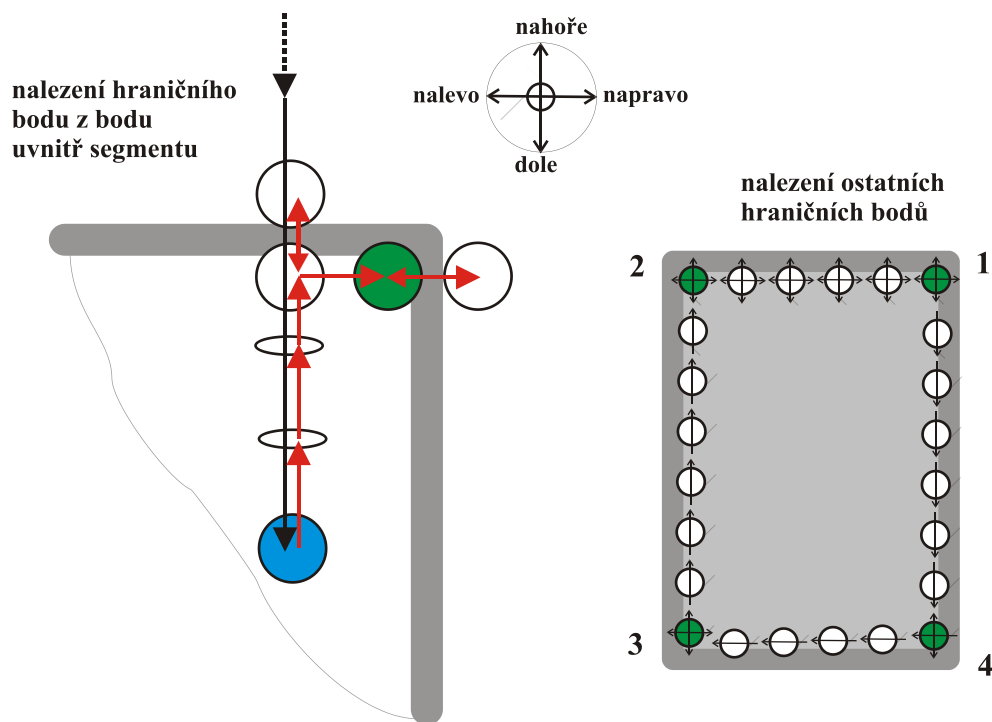
## Nalezení 4 bodů hranice segmentu

Pro nalezení hranice segmentu je třeba nejdříve definovat vlastnosti hraničních bodů. Za tím účelem byla vytvořena proměnná MyGlobals, která je zobrazena na Obr. 113 a má strukturu, která obsahuje Segments (array), což je pole segmentů, kde prvkem pole je Segment. V něm je cluster Segment, obsahující pole bodů Points (array), kde prvkem pole je Point. Ten obsahuje cluster Point, skládající se z pole souřadnic Coordinates (array), Neighborhood a Placement, kde prvkem pole Coordinates (array) je souřadnice příslušného pohonu (datový typ double). Neighborhood je cluster obsahující přepínače – nahore, dole, napravo, nalevo (typu Boolean, 1 znamená uvnitř segmentu, 0 mimo segment) a Placement je enum datové typu, který má stavy Inner, Edge, Corner, Center, Outer. Struktura MyGlobals je připravena pro další výzkum a nebyly využity všechny její varianty.



Obr. 113: MyGlobals – struktura dat

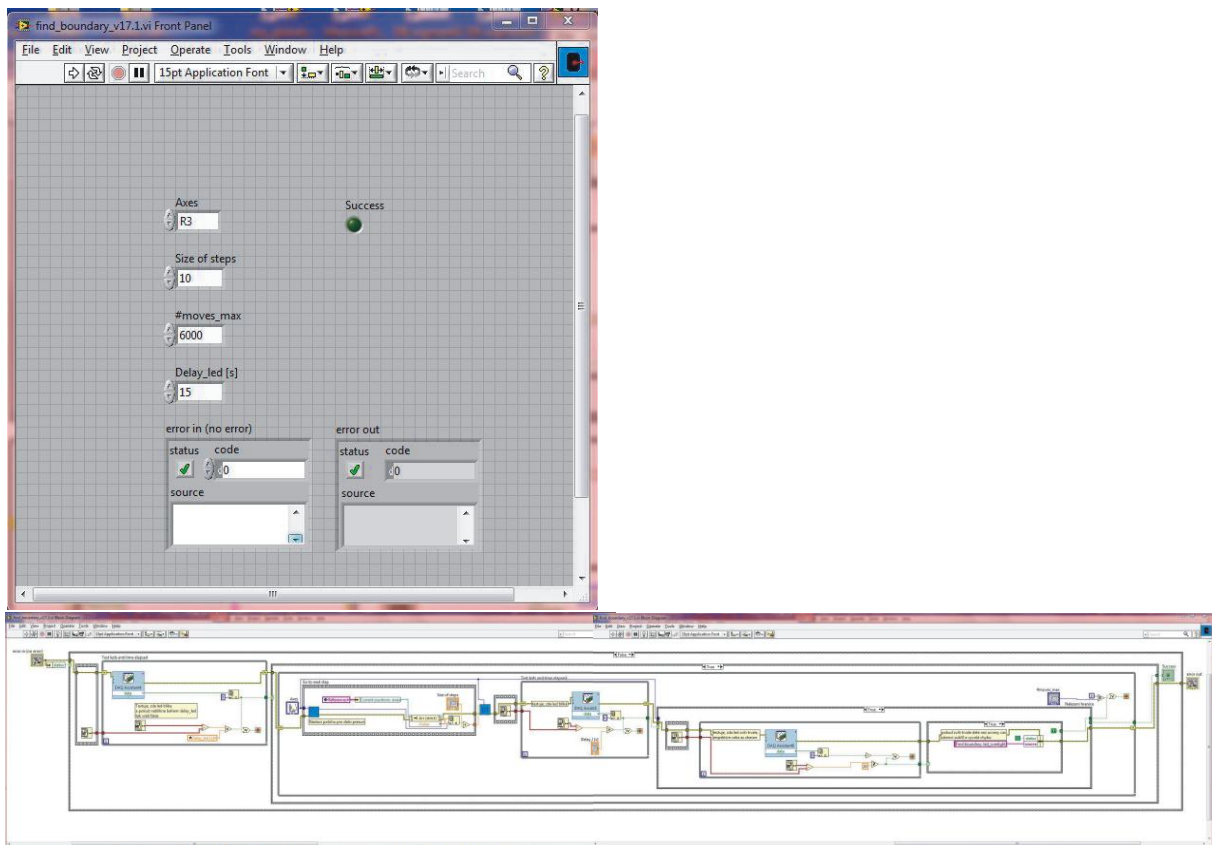
Základním úkolem funkce **Nalezení 4 bodů hranice** je najít a zaznamenat 4 rohové body segmentu. Postup jejich nalezení je ukázán na Obr. 114. a subVI `find_boundary` na Obr. 115.



Obr. 114: Nalezení hraničních bodů segmentu

Program provede Test přítomnosti paprsku uvnitř hranice, tj. testuje se, zda LED blikne po dobu `Delay_leds`. Pokud ano, provede přičtení `Size_of_steps` k aktuální pozici a zavolání `go_to_position`. Pak následuje test blikání LED – aktivace detektoru. Pokud bliká, počkáme, až odezní změna pozice a pokračujeme další změnou pozice. Pokud neblinká (pozice bodu je mimo segment), vrátí se program o nastavený počet kroků (1) zpět. Totéž provede program pro druhou osu a bod s těmito souřadnicemi je zaznamenán jako hraniční rohový, vpravo nahore. Toto provede pro další body vpravo vlevo nahore, vlevo dole a vpravo dole.

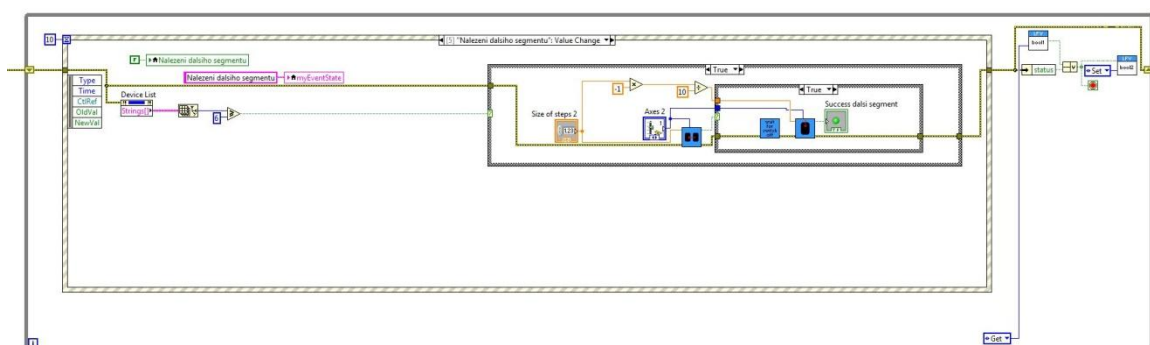




Obr. 115: SubVI – find\_boundary

### Nalezení dalšího segmentu

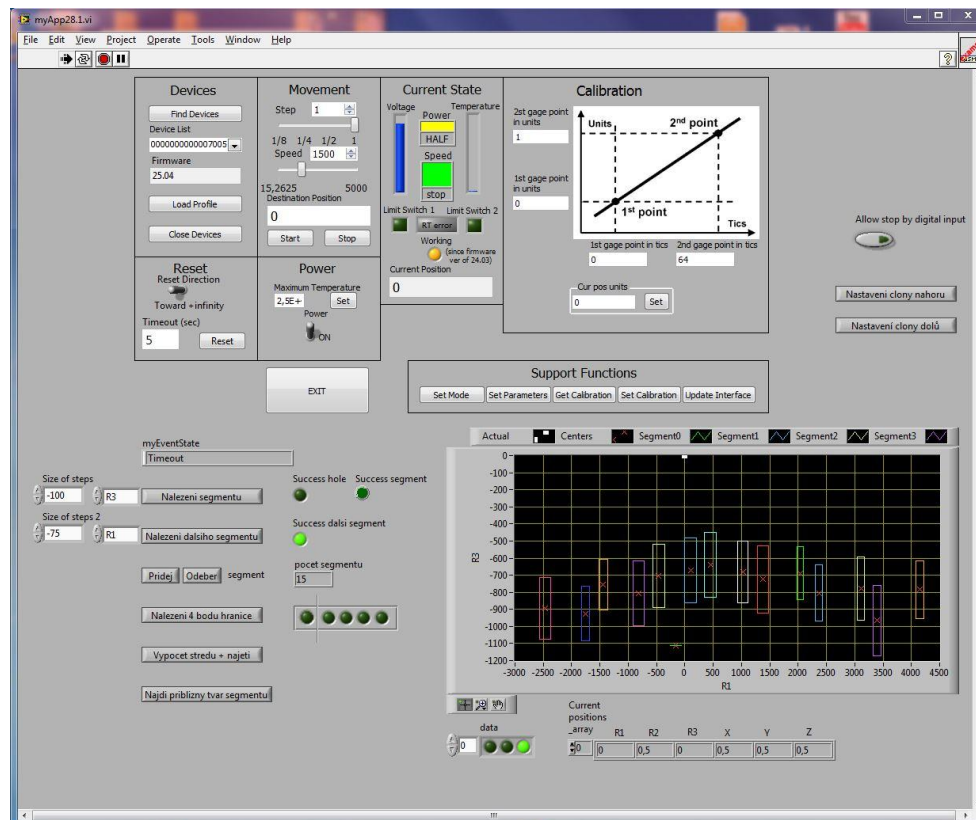
SubVI find\_next\_segment je zobrazena na Obr. 116. Tato subVI je velmi podobná subVI find\_segment, s tím rozdílem, že musí začínat na pozici paprsku uvnitř segmentu a v první části hledá v přednastaveném směru oblast mimo segment tak dlouho, až LED přestane po určený čas blikat – detektor je pasivní. Pak podprogram postupuje stejně jako subVI find\_segment.



Obr. 116: SubVI Nalezení dalšího segmentu

## Nová verze programu Measure PIR detector

V průběhu měření vznikla potřeba výrazně vylepšit původní program. Výsledkem je nová verze programu, jejíž Front panel je ukázán na Obr. 117. Základním rozdílem proti staré verzi je vizualizace polohy bodu zdroje záření v grafu předdefinovaných os R1 a R3. Pohyb bodu je zobrazován při hledání segmentu, při hledání hraničních bodů segmentu a po jejich uložení do databáze, jsou segmenty zobrazeny, včetně vypočítaných středů segmentů. Dále jsem zde přidal nový příkaz (SubVI) Najdi přibližný tvar segmentu, který nevyhledává rohové body, ale hledá a dopočítává středový bod segmentu tím způsobem, že se pohybuje v kříži tak, že nejdříve najde hranici v ose  $X$  (vpravo, vlevo) a dopočítá střed, podobně pak v ose  $Y$  a to tolikrát, kolikrát je zadáno v MyGlobals (implicitně 3x). Nalezené hodnoty průběžně zobrazuje na grafu a zaznamenává do MyGlobals.

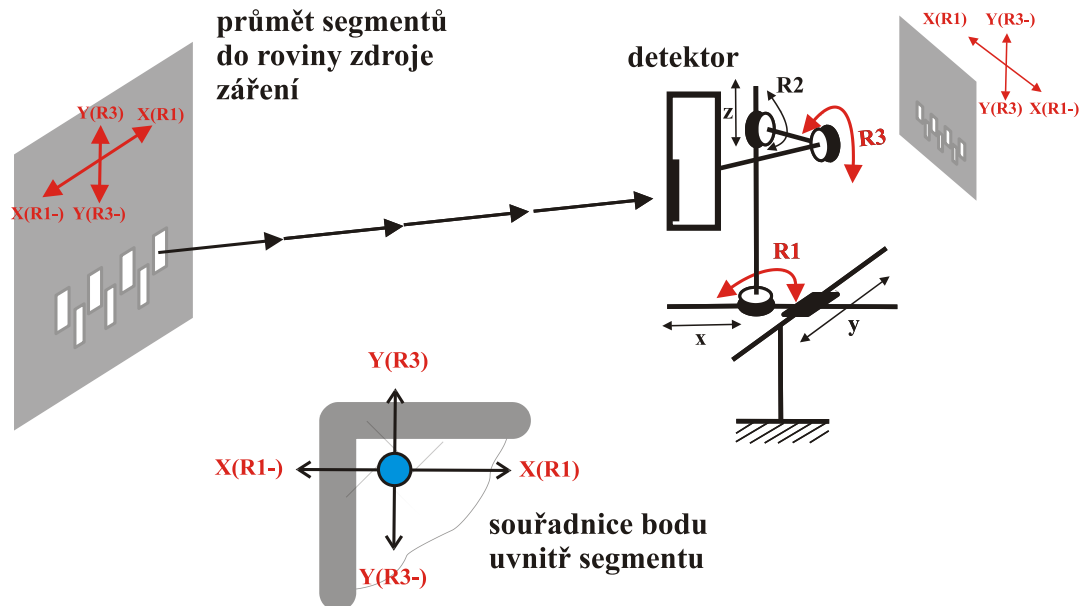


Obr. 117: Front panel nové verze Measure PIR detector

### 8.4.8 Výsledky měření

Z výchozí polohy o souřadnicích  $R1 = 0$ ,  $R3 = 0$  se začne pozicionér pohybovat do záporných hodnot pohonu  $R1$  tak, aby našel první segment. S použitím funkcí programu se postupně vytvoří souřadnice hraničních bodů segmentů, které jsou zapsány v Tabulce XIII.

Obraz segmentů 2 se sice vytváří na straně pozicionéru 1 pomocí jeho kroků pohonů, ale ve skutečnosti představuje důsledek dopadu přerušovaného paprsku ze zdroje záření ve vzdálenosti 1 m od detektoru, takže si můžeme segmenty představit jako jejich průmět do roviny vzdálené 1 m od detektoru a pozicionéru.



Obr. 118: Tvorba prostorové charakteristiky detektoru

Hodnoty v tabulce jsou seřazeny v takovém pořadí, jak se při měření vytvářely. První polohu představuje počáteční bod o souřadnicích  $X(R1)=0$ ,  $Y(R3)=0$ , který se nastaví ještě před spuštěním programu Měření PIR detektoru dle návodu, jak je ukázáno na Obr. 102. První příkazem po spuštění programu a aktivaci pohonů (FindDevices) je Nalezení segmentu. Ten ukončí hledání v bodu v 1. segmentu o souřadnicích 0, -1000. Pak následuje příkaz Nalezení 4 bodů hranice. Jeho výsledkem je nalezení 4 bodů o souřadnicích 210, -800; 20, -800; 20, -1060; 210, -800. Pak následuje příkaz Výpočet středu + najetí (na střed), kdy pozicionér najede na nové souřadnice, u prvního segmentu na pozici 109, -938. Pak se spustí funkce Nalezení dalšího segmentu, kde je předvolen směr R1 a počet kroků -70. Po nalezení dalšího segmentu se postup opakuje pro všechny segmenty kvadrantu, nebo pro polorovinu.

Tabulka XIII. Naměřené hodnoty prostorových bodů

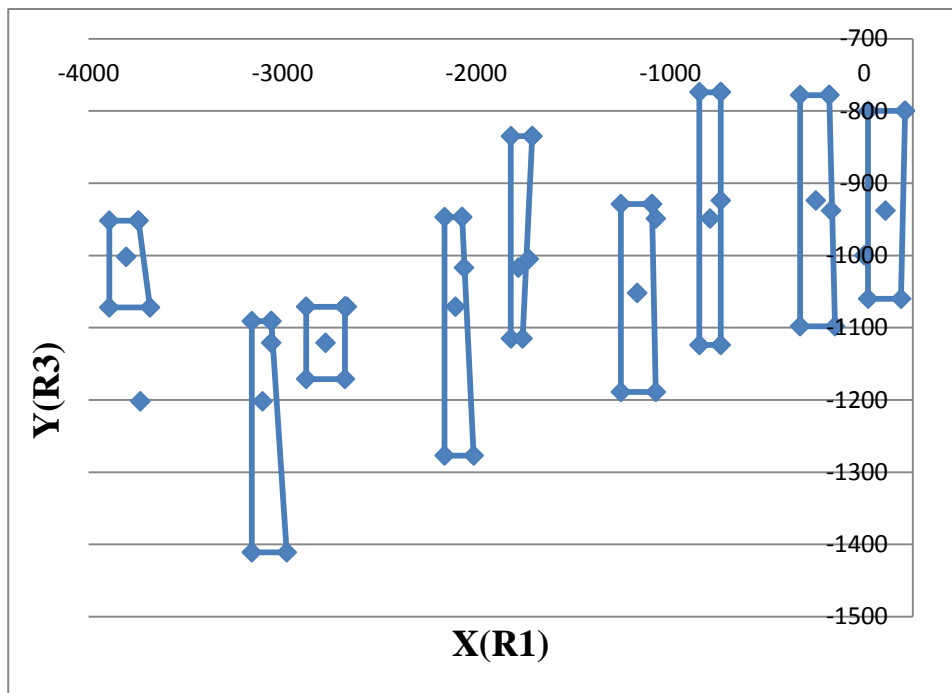
Příkaz pro změnu pozice tlač. programu, poloha	Clona číslo	x (R1) [krok]	y (R3) [krok]
počáteční poloha	1	0	0
Nalezení segmentu	1		
bod v 1. segmentu	7	0	-1000
Nalezení 4 bodů hranice	7		
pravý horní bod 1.s.	7	210	-800
levý horní bod 1.s.	7	20	-800
levý dolní bod 1.s.	7	20	-1060
pravý dolní bod 1.s.	7	190	-1060
přid. b. pro uzavř.s.	7	210	-800
Vypočet středu + najetí	7		
pozice středu 1. segm.	7	109	-938
Nalez.dalš.segm. (R1= -70)	7		
bod v 2. segmentu	7	-171	-938
Nalezení 4 bodů hranice	7		
pravý horní bod 2.s.	7	-181	-778
levý horní bod 2.s.	7	-331	-778
levý dolní bod 2.s.	7	-331	-1098
pravý dolní bod 2.s.	7	-151	-1098
přid. b. pro uzavř.s.	7	-181	-778
Vypočet středu + najetí	7		
pozice středu 2. segm.	7	-250	-924
Nalez.dalš.segm. (R1= -70)	7		
bod v 3. segmentu	7	-740	-924
Nalezení 4 bodů hranice	7		
pravý horní bod 3.s.	7	-740	-774
levý horní bod 3.s.	7	-850	-774
levý dolní bod 3.s.	7	-850	-1124
pravý dolní bod 3.s.	7	-740	-1124
přid. b. pro uzavř.s.	7	-740	-774
Vypočet středu + najetí	7		
pozice středu 3. segm.	7	-795	-949
Nalez.dalš.segm. (R1= -70)	7		
bod v 4. segmentu	7	-1075	-949
Nalezení 4 bodů hranice	7		
pravý horní bod 4.s.	7	-1095	-929
levý horní bod 4.s.	7	-1255	-929
levý dolní bod 4.s.	7	-1255	-1189
pravý dolní bod 4.s.	7	-1075	-1189
přid. b. pro uzavř.s.	7	-1095	-929
Vypočet středu + najetí	7		
pozice středu 4. segm.	7	-1171	-1052
Nalez.dalš.segm. (R1= -70)	7		
bod v 5. segmentu	7	-1730	-1005
Nalezení 4 bodů hranice	7		
pravý horní bod 5.s.	7	-1712	-835
levý horní bod 5.s.	7	-1822	-835
levý dolní bod 5.s.	7	-1822	-1115
pravý dolní bod 5.s.	7	-1762	-1115
přid. b. pro uzavř.s.	7	-1712	-835

Příkaz pro změnu pozice tlač. programu, poloha	Clona číslo	x (R1) [krok]	y (R3) [krok]
Vypočet středu + najetí	7		
poz.středu 5. segm	7	-1784	-1017
Nalez.dalš.segm.(R1=-70)	7		
bod v 6. segmentu	7	-2064	-1017
Nalezení 4 bodů hranice	7		
pravý horní bod 6.s.	7	-2074	-947
levý horní bod 6.s.	7	-2164	-947
levý dolní bod 6.s.	7	-2164	-1277
pravý dolní bod 6.s.	7	-2014	-1277
přid. b. pro uzavř.s.	7	-2074	-947
Vypočet středu + najetí	7		
poz.středu 6. segm	7	-2108	-1071
Nalez.dalš.segm.(R1=-70)	7		
bod v 7. segmentu	7	-2668	-1071
Nalezení 4 bodů hranice	7		
pravý horní bod 7.s.	7	-2678	-1071
levý horní bod 7.s.	7	-2878	-1071
levý dolní bod 7.s.	7	-2878	-1171
pravý dolní bod 7.s.	7	-2678	-1171
přid. b. pro uzavř.s.	7	-2678	-1071
Vypočet středu + najetí	7		
poz.středu 7. segm	7	-2778	-1121
Nalez.dalš.segm. (R1=-70)	7		
bod v 8. segmentu	7	-3058	-1121
Nalezení 4 bodů hranice	7		
pravý horní bod 8.s.	7	-3058	-1091
levý horní bod 8.s.	7	-3158	-1091
levý dolní bod 8.s.	7	-3158	-1411
pravý dolní bod 8.s.	7	-2978	-1411
přid. b. pro uzavř.s.	7	-3058	-1091
Vypočet středu + najetí	7		
poz.středu 8. segm	7	-3103	-1202
Nalez.dalš.segm. (R1=-70)	7		
bod v 9. segmentu	7	-3733	-1202
Nalezení 4 bodů hranice	7		
pravý horní bod 9.s.	7	-3743	-952
levý horní bod 9.s.	7	-3893	-952
levý dolní bod 9.s.	7	-3893	-1072
pravý dolní bod 9.s.	7	-3683	-1072
přid. b. pro uzavř.s.	7	-3743	-952
Vypočet středu + najetí	7		
poz.středu 9. segm	7	-3806	-1002

Po převedení naměřených hodnot do grafu vznikne prostorová charakteristika detektoru vyjádřená v krocích, která je zobrazena na Obr. 119. Na vodorovné ose X (R1) je počet kroků pohon R1, na svislé ose Y (R3) pak počet kroků pohonu R3.

Dle výrobce jsem provedl otestování přesnosti a ověřil jsem, že pro rotační pohyb platí:

$$360^\circ = 2\pi[\text{arc}] = 36\,000 \text{ kroků} \Rightarrow 1 \text{ krok} = 0,017453293 [\text{arc}] = 36 \text{ sec.}$$



*Obr. 119: Prostorová charakteristika detektoru*

Souřadnice hraničních bodů segmentů jsou uvedeny v krocích pohonů. Dle výrobce jsem provedl otestování přesnosti a ověřil jsem, že pro rotační pohyb platí:

$$360^\circ = 2\pi[\text{arc}] = 36\,000 \text{ kroků} \Rightarrow 1 \text{ krok} = 0,017453293 [\text{arc}] = 36 \text{ sec.}$$

## 9 DISKUSE K VÝSLEDKŮM

Výsledkem měření je prostorová charakteristika detektoru vyjádřená v krocích pohonů R1 a R3. Z grafu je zřejmé, že detektor obsahuje zrcadlovou optiku, která je rozdělena na jednotlivá zrcadla, pomocí kterých se vytváří prostorové segmenty. Tím vytváří oblasti, kde pyroelement „vidí“ (oblast, kde detekuje změnu záření) a oblasti mimo segmenty, kde „nevidí“ (nedetekuje změnu záření). Segmenty jsou horizontálně poměrně blízko sebe, což v krocích představuje průměrnou hodnotu 200 kroků, což odpovídá úhlu  $7\ 200$  sekund, to jsou 2 stupně a jsou velmi úzké, což v krocích představuje průměrnou hodnotu 200 kroků, což odpovídá úhlu  $7\ 200$  sekund, to je 120 minut a to jsou 2 stupně. Při cloně 7, průměru clony 25 mm a vzdálenosti 1 m od zdroje záření je prostorový úhel zdroje záření (clony) 90 sekund, což představuje 2,5 kroku v horizontálním směru a lze pak toto záření srovnat se zářením paprsku. Ve vertikálním směru jsem našel jen jednu skupinu segmentů, zatímco jsem původně předpokládal dle tvaru zrcadel, že segmenty mohou být umístěny nad sebou v ose Y(R3). Tento je lze vysvětlit tím, že zdroj záření je ve vzdálenosti 1 m od detektoru a graf pak představuje průmět segmentů do roviny vzdálené 1 m od detektoru. Při zvětšování vzdálenosti se pak segmenty nepřekrývají, ale vytváří hranaté prostorové výseče, které jsou umístěny horizontálně vedle sebe.

## 10 ZÁVĚR

Abych mohl vyřešit úkoly dizertační práce, musel jsem se v literární části zaměřit na studium fyzikálních principů zařízení, které se používají v bezpečnostním průmyslu a nastudovat takové práce, které jsou podkladem pro návrh kvantitativního popisu infračerveného záření, ze kterých jsem čerpal při vytváření matematického modelu a pracoviště pro měření PIR detektorů. Dále sem se zaměřil na bezpečnostní systémy, které využívají IČ záření a podrobně popisují jejich principy včetně definic vlnových délek, na kterých tato zařízení pracují. Z hlediska praktického použití jsem vyhodnotil výhody a nevýhody aplikace těchto zařízení v bezpečnostních systémech.

V teoretické části jsem se zabýval fyzikální podstatou IČ záření, bilancí vyzářené energie těles s různou emisivitou pro určení množství energie, která dopadá do PIR detektoru. V další části jsem navrhnul matematický model popisující ohřev senzoru radiací s použitím Fourier-Kirchhoffovy rovnice vedení tepla a Stefan-Boltzmannova zákona. Pomocí Laplaceovy transformace jsem obdržel analytické řešení, které popisuje rozložení teploty v ohřívaném senzoru.

Protože nebylo možné určit veškerá data potřebná pro výpočet teplotních polí experimentálně, provedl jsem simulace pro posouzení tepelného chování pyroelementu v programovém prostředí COMSOL Multiphysics. Na jejich základě jsem určil průběhy teplotních polí a hustot tepelného toku na povrchu a pod povrchem pyroelementu pro vybrané vzdálenosti narušitele od tohoto detektoru. Získaná data jsem následně porovnal s teoretickými výsledky získanými řešením modelu prostřednictvím programové aplikace, vytvořené v prostředí Maple. Z výpočtů a simulací rozložení teploty v ohřívaném pyroelementu vyplynulo, že i při nízkých hodnotách hustoty tepelného toku je v daném čase teplota na povrchu pyroelementu téměř stejná jako teplota v celé jeho tloušťce, což potvrdilo, že už v prvních fázích měření vyhodnocuje pyroelement správnou teplotu a laboratorní měření je tedy i v počátečních fázích dostatečně přesné.

Abych zjistil minimální teplotu zdroje záření, při níž je detektor schopen za daných podmínek zaregistrovat zářivý tok vyslaný narušitelem a zároveň mohl určit velikost hustoty tepelného toku dopadajícího na pyroelektrický element, bylo nutné provést experimentální měření na pracovišti pro měření PIR detektorů, které jsem za tímto účelem vytvořil.

Při definované vzdálenosti pyroelektrického elementu, na který dopadá tepelné záření, jsem provedl simulaci rozložení teploty a hustoty tepelného toku na povrchu

pyroelementu pro clonu o průměru 18 mm, 25 mm a 32 mm. Minimální teploty zdroje, při nichž detektor zaznamenal zářivý tok dopadající na povrch pyroelementu, byly stanoveny experimentálně. Výsledky simulace potvrdily, že při vyšší teplotě zdroje záření postačí k aktivaci detektoru nižší plocha zdroje, tedy menší clona, naproti tomu při nižší teplotě zdroje je nutno pro aktivaci detektoru zvětšit plochu zdroje.

V experimentální části jsem provedl měření IČ LED diod a zdrojů IČ záření v blízké oblasti pomocí spektroskopu Vernier, včetně měření dosahu zdrojů přísvitu pro bezpečnostní kamery. V další části jsem realizoval pracoviště pro měření IČ záření střední oblasti, kde jsem provedl měření intenzity záření, měření prostorových a dynamických charakteristik pomocí zdroje záření EK-8520 a TPS334. Toto IČ pracoviště nebylo vhodné pro vzdálenou oblast, protože používá teploty, které jsou výrazně vyšší, než teploty používané v bezpečnostních technologiích.

V poslední části práce jsem realizoval pracoviště pro měření ve vzdálené oblasti IČ záření pro testování PIR detektorů. V první části experimentů jsem provedl měření různých zdrojů záření a výsledkem byla volba Peltierova článku upevněného na měděné podložce. Tento zdroj záření má v zapojení s regulátorem JUMO dTRON 316 a platinovým teploměrem nejpresnější regulaci teploty, rozložení teploty v měděné podložce je homogenní a nabízí další možnosti pro konstrukci zářící oblasti. Dále jsem navrhl přerušovač záření - chopper, kde největším problémem bylo nastavení nejmenších otáček, protože použité pohony se při nízkých otáčkách zastavovaly. Pro další experimenty by byl vhodný krokový motor s řízením otáček a polohy. Dále jsem realizoval zařízení, které jsem nazval „clona“, které provádí nastavování otvoru zdroje záření na velikost od průměru 4 mm do 50 mm v deseti krocích. Zde jsem po testování různých pohonů nakonec použil pohony z elektricky ovládaných servopohonů Komexterm včetně převodovky, kde doba přestavení mezi vedlejšími clonami je 6 sec a poloha otvoru clony je přesně nastavena opticky pomocí štěrbin na obvodu kotouče clony.

Nejzajímavější částí pracoviště je pozicionér s přesností rotace 36 sec na plný krok a 2,5  $\mu\text{m}$  na jeden krok u přímých pohonů. Tato vysoká přesnost umožňuje pozicionéru, na kterém je upevněný detektor, přesné nastavení polohy detektoru vzhledem ke zdroji záření. Ve spojení s programem Measure PIR detector, který jsem vytvořil, tak vzniklo unikátní pracoviště, pomocí kterého lze měřit odezvu detektoru, který snímá přerušované záření z přesně definovaného směru. Výsledky jsou zpracovány do grafu, ve kterém je přehledně vidět rozložení segmentů v krocích polohovacího mechanismu.



V průběhu sestavování pracoviště se vyskytly problémy především s parazitním zářením nežádoucích zdrojů, které jsem zobrazil pomocí IČ kamery, jak je uvedeno v podkapitole 8.4.6. Většinu z nich se podařilo úspěšně odstínit. Nejvýznamnějším nežádoucím zdrojem záření je motor pohonu R3, který je umístěný v blízkosti vlastního detektoru, a jehož teplota se blíží hodnotě 40 °C. Pro úplné vyřešení tohoto problému by bylo vhodné umístit detektor tak, aby před detektorem byl jen měřený zdroj záření a motory pohonů pozicionéru byly umístěny vzadu za detektorem, kam detektor „nevidí“, což lze v budoucnu řešit změnou mechanické konfigurace pozicionéru.

Nejnovější verze programu umožňuje přímou vizualizaci nalezených segmentů a polohy zdroje záření a usnadňuje tak vyhledávání dalších nenalezených segmentů, což je ukázáno na Obr. 117. Je zřejmé, že v oblasti vývoje programu jsou zde ještě obrovské možnosti, například vyhledání přesného tvaru segmentu, skenování oblastí, další vizualizace, exporty dat a podobně.

Do vlastního měření detektoru vstupuje velké množství parametrů, které ovlivňují vlastní měření a mohou způsobovat chyby měření nebo dokonce nemožnost měření provést. Mezi základní parametry, jak již bylo zmíněno, patří teplota zdroje záření, velikost clony, teplota okolí a také časy odezvy detektoru, kde se jako nejzákladnější jeví vnitřní zpracování signálu z pyroelementu. Zde se signál digitálně zpracuje a pak se provádí jeho analýza pomocí speciálních algoritmů, které mohou způsobit to, že detektor periodický zdroj záření vyhodnotí jako „nepoplachový“ a neaktivuje se. V nejnovější verzi program je v proměnné MyGlobals tabulka nastavení časů pro jednotlivé měřicí funkce program a lze je měnit pro jednotlivé typy detektorů dle výsledků měření.

Úkolem práce bylo vytvoření testovacího zařízení pro přesnou identifikaci elektronických bezpečnostních systémů, jako jsou např. PIR detektory, IČ závory, IČ přísvit kamer. Z uvedených cílů disertační práce se mi podařilo všechny body zadání splnit.

## 10.1 Využitelnost výsledků dizertační práce v praxi

IČ pracoviště s vytvořeným programem lze využít po vhodných úpravách pro měření zařízení bezpečnostních technologií, které jsou definovány prostorovou charakteristikou. V první řadě jsou to optické systémy, které využívají přímo optické principy detekce jako například IČ závory, přísvit IČ kamer, lineární optické hlásiče apod.

Měřicí systém je variabilní a při znalosti programování v prostředí LabView umožňuje poměrně snadné rozšíření pracoviště o další přístroje, které komunikují s programem pomocí sběrnice GPIB. Pro většinu kvalitních měřicích přístrojů existují knihovny funkcí, které lze snadno aplikovat do nového programu.

Z dalších aplikací, které lze pak realizovat pomocí pozicionéru, vhodného programového a přístrojového vybavení, lze pak jmenovat pracoviště pro měření mikrovlnných detektorů (MW detektor), ultrazvukových detektorů (US detektor) a měření charakteristik anténních systémů.

## 11 SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

<i>Symbol</i>	<i>Jednotka</i>	<i>Význam</i>	<i>Meaning</i>
$\alpha$	1	Koeficient polarizace	Polarization coefficient
$E$	1	Koeficient emisivity	Emissivity coefficient
$\varepsilon_l$	1	Koeficient emisivity skutečného tělesa	Emissivity coefficient of real body
$\varepsilon_s$	1	Koeficient emisivity senzoru	Emissivity coefficient of sensor
$\lambda_{max}$	m	Vlnová délka maxima vyzařování	Wavelength of maximum emission
$l$	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	Součinitel tepelné vodivosti	Thermal Conductivity
$\delta_0$	$\text{W m}^{-2} \text{K}^{-4}$	Stefan-Bolzmannova konstanta	Stefan-Bolzmann constant
$\delta_y$	1	Relativní chyba	Relative error
$\Delta_y$	dle měřené veličiny	Absolutní chyba	Absolute error
$\rho$	1	Koeficient reflexe	Reflectivity coefficient
$\rho_l$	$\text{kg.m}^{-3}$	Hustota materiálu	Density
$\tau$	s	Čas	Time
$\tau_l$	1	Koeficient průniku čočkou	Penetration coefficient of lens
$\tau_2$	1	Koeficient průniku filtrem	Penetration coefficient of filter
$\tau_s$	1	Koeficient průniku filtrem	Penetration coefficient of filter
$\varphi_l$	1	Úhlový součinitel osálení	Angle coefficient of irradiance
$\sigma$	$\text{W m}^{-2} \text{K}^{-4}$	Stefan-Bolzmannova konstanta	Stefan-Bolzmann constant
$a$	$\text{m}^2.\text{s}^{-1}$	Tepelná vodivost	Thermal conductivity
$A$	1	Relativní pohltivost	Relative absorption
$b$	m	Poloviční tloušťka	Half thickness
$b_w$	mmK	Wienova konstanta	Wien constant
$C$	1	Konstanta charakterizující emisní a geometrické vlastnosti povrchů	Constant characterizing emission and geometric properties of surfaces
$c_p$	$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	Měrná tepelná kapacita	Specific heat capacity
<i>Symbol</i>	<i>Jednotka</i>	<i>Význam</i>	<i>Meaning</i>

$d_{max}$	m	Maximální vzdálenost člověka od detektoru	Maximum distance a person from detector
$d_{sim}$	m	Simulovaná vzdálenost	Simulated distance
$D_{chop}$	m	Průměr chopperu	Diameter of chopper
$E$	1	Relativní emisivita	Relative emissivity
$f_{imp}$	1	Počet přerušení zářivého toku	Number of breaks radiant flux
$f_{ot}$	ot/sec	Frekvence	Frequency
$f_{ot min}$	ot/sec	Minimální frekvence	Minimum frequency
$f_{ot max}$	ot/sec	Maximální frekvence	Maximum frequency
$FO$	1	Fourierovo kritérium	Fourier criterion
$I$	A	Proud teplotní lampou	Current temperature lamp
$k_{pe}$	V/W	Konstanta citlivosti pyroelementu	Constant sensitivity of pyroelement
$l$	m	Vzdálenost	Distance
$K_i$	1	Kirpičevovo kritérium	Kirpic criterion
$H_0$	W/m <sup>2</sup>	Intenzita radiace	Intensity of radiation
$n$	1	Pořadí členu posloupnosti	The order of the sequence
$o_{cl}$	m	Největší průměr otvoru clony	The largest diameter of the aperture
$p$	1	Kořen rovnice	Root of equation
$P$	W	Příkon teplotní lampy	Power lamp temperature
$q$	W m <sup>-2</sup>	Hustota zářivého toku	Power density
$Q_0$	W	Zářivý tok absolutně černého tělesa	Radiant flux absolutely black body
$Q_B$	W	Zářivý tok skutečného tělesa	Radiant flux real body
$Q_{Bl}$	W	Zářivý tok dopadající na Fresnelovu čočku	Radiant flux incident on Fresnel lens
$Q_F$	W	Zářivý tok za filtrem	Radiant flux behind filter
$Q_L$	W	Zářivý tok za Fresnelovou čočkou	Radiant flux behind Fresnel lens
$Q_M$	W	Metodická energie	Methodological energy
$Q_S$	W	Zářivý tok absolutně černého tělesa	Radiant flux absolutely black body

<i>Symbol</i>	<i>Jednotka</i>	<i>Význam</i>	<i>Meaning</i>
$R$	1	Relativní odrazivost	Relative reflectivity
$s$	1	Laplaceův operátor	Laplace operator
$s_{chop}$	m	Dráha chopperu	track chopper
$S_1$	m <sup>2</sup>	Plocha černého tělesa	Area black body
$S_2$	m <sup>2</sup>	Plocha senzoru	Area of sensor
$t$	°C	Teplota	Temperature
$t_{ot}$	s	Doba otáčky	Time speed
$T$	1	Relativní prostupnost	Relative transmittance
$T_c$	K	Střední teplota zářiče	Mean temperature of the source
$T_L$	K	Teplota po Laplaceově transformaci	Temperature after Laplace transformation
$T_{max}$	°C	Maximální teplota teplotní lampy	Maximum temperature heat lamps
$T_p$	K	Počáteční teplota senzoru	Start temperature of sensor
$T_S$	K	Teplota senzoru	Temperature of sensor
$T_0$	K	Absolutní teplota tělesa	Absolute temperature of body
$T_1$	K	Teplota povrchu reálného tělesa	Temperature of real body
$T_2$	K	Teplota zdroje	Temperature of source
$U$	1	Nejistota	Uncertainty
$U$	V	Napětí na teplotní lampě	Voltage on temperature lamp
$U_{OUT}$	V	Napětí na výstupu pyroelementu	Output voltage of pyroelement
$U_{sens}$	V	Napětí na senzoru	Voltage on sensor
$w_b$	m	Maximální šířka objektu narušitele	Maximum width of object intruder
$v_{chop}$	m.s <sup>-1</sup>	Obvodová rychlost chopperu	Peripheral speed chopper
$v_{chop max}$	m.s <sup>-1</sup>	Maximální obvodová rychlost chopperu	Maximum peripheral speed chopper
$v_{chop min}$	m.s <sup>-1</sup>	Minimální obvodová rychlost chopperu	Minimum peripheral speed chopper
$v_{obj}$	m.s <sup>-1</sup>	Rychlost pohybu detekovaného objektu	Velocity of detected object
$v_{obj min}$	m.s <sup>-1</sup>	Minimální rychlost pohybu detekovaného objektu	Minimum velocity of detected object

<i>Symbol</i>	<i>Jednotka</i>	<i>Význam</i>	<i>Meaning</i>
$v_{obj\ max}$	$m.s^{-1}$	Maximální rychlost pohybu detekovaného objektu	Maximum velocity of detected object
$W_l$	$W.m^{-1}$	Spektrální hustota vyzařování	Spectral density
$x$	1	Směrová souřadnice	Space coordination
$x_s$	dle měřené veličiny	Skutečná hodnota	Real value
$y_M$	dle měřené veličiny	Změřená hodnota	Measured value
$\bar{y}$	dle měřené veličiny	Aritmetický průměr	Arithmetic average

## 12 SEZNAM ZKRATEK

CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
CO <sub>2</sub>	oxid uhličitý
FPA	Focal Plane Array
H264	standard pro kompresi videa
HgCdTe	telurit rtuti - kadmia
InSb	antimonid india
IČ	infra červené
ID	identifier
IP	Internet Protocol
LCD	Liquid Crystal Display
LED	Light Emitting Diode
MJPEG	standard pro kompresi videa
NTSC	National Television System Committee
OLED	Organic Light Emitting Diode
PAL	Phase Alternating Line
PIR	Passive Infrared
PZTS	poplachové zabezpečovací a tísňové zařízení
SD card	Secure Digital memory card
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	nitrid křemíku
TTL	tranzistorově vázaná logika
UF	ultra fialové
USB	Universal Serial Bus
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	oxid vanadičný
VI	viditelné
VI <sub>s</sub>	virtual instruments
WM	Windows Mobile 5.0

## 13 SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1: Detekční pokrytí na hranici detekčního prostoru [1]</i> .....	7
<i>Obr. 2: Princip činnosti infračervených závor a bariér</i> .....	11
<i>Obr. 3: Schematické znázornění snímání scény u IČ kamer [25]</i> .....	12
<i>Obr. 4: Mikrobolometrická matice FPA a integrovaný můstek bolometru [46]</i> .....	13
<i>Obr. 5: Princip činnosti jednoduchého bolometru [46]</i> .....	14
<i>Obr. 6: Příklad konfigurace chlazené IČ kamery [25]</i> .....	15
<i>Obr. 7: IČ kamera TP8 a její základní ovládací prvky</i> .....	16
<i>Obr. 8: Grafické rozhraní programu Guide IrAnalyzer.</i> .....	18
<i>Obr. 9: IČ kamera řady Sarix TI</i> .....	18
<i>Obr. 10: Kamerový přísvit - osvětlení scény</i> .....	20
<i>Obr. 11: Kouřový hlásič</i> .....	21
<i>Obr. 12: Spektrální charakteristika různých zdrojů vyzařování [47]</i> .....	22
<i>Obr. 13: Relativní spektrální citlivost hlásiče plamene [47]</i> .....	23
<i>Obr. 14: Princip bodového hlásiče plamene</i> .....	23
<i>Obr. 15: Uspořádání optické lavice</i> .....	25
<i>Obr. 16: Maticový hlásič plamene FlameVision FV311SC [23]</i> .....	26
<i>Obr. 17: Absorpce infračerveného záření různými plyny [47]</i> .....	26
<i>Obr. 18: Princip lineárního kouřového hlásiče</i> .....	27
<i>Obr. 19: Lavice pro měření prahové hodnoty reakce [42]</i> .....	27
<i>Obr. 20: Rozmístění detektorů, místa požáru a měřicích přístrojů [21]</i> .....	28
<i>Obr. 21: Lineární teplotní hlásič s optickými vlákny [42]</i> .....	29
<i>Obr. 22: Nasávací systémy - laserová komora [22]</i> .....	30
<i>Obr. 23: Spektrální citlivost noktovizoru</i> .....	31
<i>Obr. 24: Principiální schéma detekce PIR detektoru [43]</i> .....	32
<i>Obr. 25: Optika s využitím Fresnelových čoček a zrcadel [44]</i> .....	33
<i>Obr. 26: Infračervené záření ve spektru elektromagnetického záření [11]</i> .....	36
<i>Obr. 27: Šíření elektromagnetických vln</i> .....	37
<i>Obr. 28: Vyzařovací charakteristiky absolutně černého tělesa v závislosti na jeho teplotě [7]</i> .....	37
<i>Obr. 29: Celková bilance záření reálného tělesa [11]</i> .....	39
<i>Obr. 30: Vyzařování ne-šedých těles [11]</i> .....	40
<i>Obr. 31: Chyby měření teploty kovů způsobené různou emisivitou materiálů [11]</i> .....	41
<i>Obr. 32: Zdroje záření ovlivňující PIR detektor</i> .....	41
<i>Obr. 33: Celá cesta energie u PIR detektoru s Fresnelovými čočkami</i> .....	41
<i>Obr. 34: 3D teplotní pole v zahříváném senzoru vypočtené v Maple</i> .....	47
<i>Obr. 35: 2D teplotní pole v zahříváném senzoru vypočtené v Maple</i> .....	48
<i>Obr. 36: Geometrický náčrt situace</i> .....	50
<i>Obr. 37: Vzdálenost detektor – narušitel 1 m</i> .....	51
<i>Obr. 38: Vzdálenost detektor – narušitel 2 m</i> .....	52
<i>Obr. 39: Vzdálenost detektor – narušitel 3 m</i> .....	53
<i>Obr. 40: Vzdálenost detektor – narušitel 4 m</i> .....	54
<i>Obr. 41: Vzdálenost detektor – narušitel 5 m</i> .....	55
<i>Obr. 42: Průběh teplotního pole v pyroelementu v závislosti na hustotě tepelného toku na povrchu elementu</i> .....	57
<i>Obr. 43: Geometrický náčrt aparatury pro testování meze detekce zařízení</i> .....	58
<i>Obr. 44: Rozložení teplot a hustota tepelného toku na povrchu pyroelementu</i> .....	60
<i>Obr. 45: Teplotní pole v pyroelementu vypočtená v Maple pro dobu tepelného působení 10 sekund</i> .....	61



<i>Obr. 46: Teplotní pole v pyroelementu získaná simulací v programu COMSOL Multiphysics pro dobu tepelného působení 10 sekund .....</i>	<i>62</i>
<i>Obr. 47: Spektroskop a optická sonda .....</i>	<i>64</i>
<i>Obr. 48: Pracoviště pro měření spektra diod .....</i>	<i>64</i>
<i>Obr. 49: Charakteristiky spektra diod s maximem záření na vlnové délce 600 nm a 850 nm .....</i>	<i>65</i>
<i>Obr. 50: Pracoviště pro měření spektra zdrojů přisvitu .....</i>	<i>66</i>
<i>Obr. 51: Spektrální charakteristika halogenového svítidla 120 W .....</i>	<i>67</i>
<i>Obr. 52: Spektrální charakteristika LED reflektoru .....</i>	<i>67</i>
<i>Obr. 53: Spektrální IR LED reflektoru.....</i>	<i>68</i>
<i>Obr. 54: Pracoviště pro měření osvitu přisvitom pomocí luxmetru .....</i>	<i>69</i>
<i>Obr. 55: Závislost osvětlení na vzdálenosti od světelného zdroje.....</i>	<i>70</i>
<i>Obr. 56: Pracoviště pro měření osvitu přisvitom pomocí luxmetru .....</i>	<i>70</i>
<i>Obr. 57: Reflektor 500 W halogenový – barevná kamera PELCO.....</i>	<i>71</i>
<i>Obr. 58: Teplotní IČ zdroj.....</i>	<i>73</i>
<i>Obr. 59: Proudová charakteristika EK-8520 [5].....</i>	<i>74</i>
<i>Obr. 60: Úhlová charakteristika záření [5] .....</i>	<i>74</i>
<i>Obr. 61: Charakteristika optického filtru TPS334 [6].....</i>	<i>75</i>
<i>Obr. 62: Základní mechanické díly IČ pracoviště .....</i>	<i>75</i>
<i>Obr. 63: Grafické rozhraní programu RealView 3.0 .....</i>	<i>76</i>
<i>Obr. 64: Grafické rozhraní Agilent IntuiLink Multimeter .....</i>	<i>77</i>
<i>Obr. 65: Pracoviště pro měření teploty zdroje IK8520 IČ kamerou .....</i>	<i>77</i>
<i>Obr. 66: Měření maximální hodnoty teploty zářiče .....</i>	<i>78</i>
<i>Obr. 67: Závislost <math>T_{max}=f(P)</math> zářiče .....</i>	<i>78</i>
<i>Obr. 68: Závislost napětí senzoru na úhlu dopadu záření .....</i>	<i>79</i>
<i>Obr. 69: Závislost napětí senzoru na vzdálenosti od zdroje záření .....</i>	<i>80</i>
<i>Obr. 70: Chopper pro přerušování záření .....</i>	<i>80</i>
<i>Obr. 71: Zesilovač malých napětí .....</i>	<i>81</i>
<i>Obr. 72: Hardwarová koncepce pracoviště .....</i>	<i>82</i>
<i>Obr. 73: Skleněný sálavý panel GR 300, přijímač BPT-SP2 a termostat BPT-SP [40] .....</i>	<i>82</i>
<i>Obr. 74: Snímky vyzářování panelu – vlevo vypnutý, uprostřed při teplotě 40° C, vpravo na maximální teplotě.....</i>	<i>83</i>
<i>Obr. 75: Peltierův článek.....</i>	<i>83</i>
<i>Obr. 76: Schéma zapojení řízení ohřevu zářící plochy .....</i>	<i>84</i>
<i>Obr. 77: Regulátor JUMO dTRON 316.....</i>	<i>84</i>
<i>Obr. 78: Výpočet největší velikosti otvoru clony.....</i>	<i>85</i>
<i>Obr. 79: Změna průměru plochy zdroje záření.....</i>	<i>86</i>
<i>Obr. 80: Kotouč clony.....</i>	<i>87</i>
<i>Obr. 81: Schéma ovládní clony.....</i>	<i>88</i>
<i>Obr. 82: Výpočet rychlosti otáčení choleru .....</i>	<i>89</i>
<i>Obr. 83: Kotouč chopperu a clony.....</i>	<i>89</i>
<i>Obr. 84: Kotouč chopperu .....</i>	<i>90</i>
<i>Obr. 85: Schéma pohonu chopperu.....</i>	<i>91</i>
<i>Obr. 86: Pozicionér – šestiosý manipulátor motoricky ovládaný.....</i>	<i>91</i>
<i>Obr. 87: Pozicionér – pohony a jejich směry pohybu.....</i>	<i>93</i>
<i>Obr. 88: Blokové schéma ovládní pohonů mikrořadičem.....</i>	<i>95</i>
<i>Obr. 89: Základní okno aplikace SMC View.....</i>	<i>97</i>
<i>Obr. 90: Podokno Setup .....</i>	<i>98</i>
<i>Obr. 91: Funkce Limit Switches v Setupu .....</i>	<i>98</i>
<i>Obr. 92: Tepelné záření LCD monitoru .....</i>	<i>99</i>
<i>Obr. 93: Tepelné záření motoru chopperu.....</i>	<i>99</i>

<i>Obr. 94: Tepelné záření motoru R3 pozicionéru.....</i>	<i>100</i>
<i>Obr. 95: Pozadí za Peltierovým zdrojem záření .....</i>	<i>100</i>
<i>Obr. 96: Izolační tunel z tubexu.....</i>	<i>101</i>
<i>Obr. 97: Stínící plocha z plexiskla .....</i>	<i>101</i>
<i>Obr. 98: Základní materiály pro odstínění rušivého záření.....</i>	<i>102</i>
<i>Obr. 99: Pohled na pracoviště pro měření PIR detektorů .....</i>	<i>103</i>
<i>Obr. 100: SMCView okno Setup volba Standoff &amp; Reset.....</i>	<i>104</i>
<i>Obr. 101: Počáteční nastavení polohy dle mechanických měřidel .....</i>	<i>105</i>
<i>Obr. 102: Laserové zaměřování počáteční polohy .....</i>	<i>106</i>
<i>Obr. 103: Globals - Default Parameters .....</i>	<i>107</i>
<i>Obr. 104: Globals – Run Time Parameters .....</i>	<i>108</i>
<i>Obr. 105: Front panel programu Example a měření PIR detektoru.....</i>	<i>109</i>
<i>Obr. 106: Ovládání pohonů z původního programu.....</i>	<i>110</i>
<i>Obr. 107: SubVI - go_to_position.....</i>	<i>111</i>
<i>Obr. 108: Program Měření PIR detektoru.....</i>	<i>112</i>
<i>Obr. 109: SubVI Nastavení clony nahoru (dolů) .....</i>	<i>113</i>
<i>Obr. 110: SubVI – find_smallest_whole .....</i>	<i>113</i>
<i>Obr. 111: Nalezení bodu uvnitř segmentu .....</i>	<i>114</i>
<i>Obr. 112: SubVI Nalezení segmentu .....</i>	<i>114</i>
<i>Obr. 113: MyGlobals – struktura dat.....</i>	<i>115</i>
<i>Obr. 114: Nalezení hraničních bodů segmentu.....</i>	<i>116</i>
<i>Obr. 115: SubVI – find_boundary.....</i>	<i>117</i>
<i>Obr. 116: SubVI Nalezení dalšího segmentu .....</i>	<i>117</i>
<i>Obr. 117: Front panel nové verze Measure PIR detector.....</i>	<i>118</i>
<i>Obr. 118: Tvorba prostorové charakteristiky detektoru .....</i>	<i>119</i>
<i>Obr. 119: Prostorová charakteristika detektoru.....</i>	<i>121</i>

## 14 SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka I. Základní technické parametry IČ kamery TP8 .....</i>	<i>17</i>
<i>Tabulka II. Základní technické parametry infračervené kamery Sarix TI [26] .....</i>	<i>19</i>
<i>Tabulka III. Hustoty tepelného toku na povrchu pyroelektrického elementu – výsledky simulace v programu COMSOL Multiphysics .....</i>	<i>56</i>
<i>Tabulka IV. Hustota tepelného toku v místě clony při mezní teplotě zdroje záření .....</i>	<i>59</i>
<i>Tabulka V. Naměřená spektrální maxima pro LED diody a IČ diody .....</i>	<i>65</i>
<i>Tabulka VI. Naměřené vlastnosti reflektorů pro přísvit.....</i>	<i>68</i>
<i>Tabulka VII. Naměřené hodnoty osvětlení při různých vzdálenostech .....</i>	<i>69</i>
<i>Tabulka VIII. Naměřené hodnoty napětí <math>U_{sens}=f(\text{úhlu})</math>.....</i>	<i>79</i>
<i>Tabulka IX. Specifikace rotačního polohovacího zařízení 8MR 191-28.....</i>	<i>92</i>
<i>Tabulka X. Specifikace podélného polohovacího zařízení 8MT 175-50 .....</i>	<i>92</i>
<i>Tabulka XI. Základní přesnosti pozicionéru 8MT175-50XYZ-8MR191-28-3.....</i>	<i>93</i>
<i>Tabulka XII. Posuny Standoff v počáteční poloze pozicionéru.....</i>	<i>106</i>
<i>Tabulka XIII. Naměřené hodnoty prostorových bodů.....</i>	<i>120</i>

## 15 LITERATURA

- [1] ČSN EN 50131-2-2. *Poplachové systémy: Poplachové zabezpečovací a tísňové systém – Část 2-2: Detektory narušení – Pasivní infračervené detektory*, Praha: Český normalizační institut, 2005, 40 s.
- [2] ČSN EN 50132-7. *Poplachové systémy – CCTVP sledovací systémy pro použití v bezpečnostních aplikacích – Část 7: Pokyny pro aplikaci*, Praha: Český normalizační institut, 1999, 28 s.
- [3] ČSN CLC/TS 50131-2-3. *Poplachové systémy: Elektrické zabezpečovací systémy – Část 2-3: Požadavky na mikrovlnné detektory*, Praha: Český normalizační institut, 2005, 36 s.
- [4] HRUŠKA, F. (2003). *The Specific Measurement of Medium Radiant Temperature*. In: Proceedings of the 14th International Conference on Process Control '03, p. 269. ISBN 80-227-1902-1
- [5] Helioworks, technická specifikace EK-8520 , 1 str., 2010.
- [6] PerkinElmer, technická specifikace TPS334, 10 str., 2010.
- [7] VINCENT, J., D. (1990). *Fundamentals of infrared detector operation and testing*. USA – Texas: WILEY, 1990, ISBN 0-471-50272-3
- [8] KNOLL G., F. (2000). *Radiation detection and measurement*. USA – Texas: WILEY 2000, ISBN 978-0-471-07338-3
- [9] SALEH, B., E., A., Teich, M. C. (2007). *Fundamentals of photonics*. USA – Texas: WILEY 2007, ISBN 978-0-471-35832-9
- [10] *Nejistoty měření* [on line] [cit. 2013-08-12] dostupné na WWW: <http://www.fs.cvut.cz/tem/nejistoty/nejistoty1.pdf>.
- [11] *Princip bezdotykového měření teploty*[on line] [cit. 2011-08-10] dostupné na WWW: <http://www.qtest.cz/bezdotykove-teplomery/bezdotykove-mereni-teploty.htm>.
- [12] HRUŠKA, F. *Measuring of medium radiant temperature*. Jemná mechanika a optika, roč. 47, 2002, č. 4, s.102-106. Praha: Fyzikální ústav Akademie věd České republiky, 2002. ISSN 0447-6441

- [13] HRUŠKA, F. *Technické prostředky automatizace IV. Snímače, převodníky, regulátory, průmyslová výpočetní technika, ovládací jednotky*. Zlín: Universita Tomáše Bati ve Zlíně, 2001, ISBN 80-7318-026-X
- [14] HRUŠKA, F. *Technické prostředky automatizace III. Senzory, jejich principy a funkce*. Zlín: Universita Tomáše Bati ve Zlíně, 2002, ISBN 80-7318-053-7
- [15] RYBÁR, P. *Denní osvětlení a oslunění budov*. Praha: Era, 2002: ISBN 80-86517-33-0
- [16] KOLOMAZNÍK, K. *Teorie technologických procesů III*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 1978, ISBN 55-588-78
- [17] JHA, A., R. . *Infrared technology*. USA – Texas: WILEY, 2006. ISBN 0-471-35033-8
- [18] ČSN CLC/TS 50131-2-5. *Poplachové systémy: Elektrické zabezpečovací systémy – Část 2-5: Požadavky na kombinované pasivní infračervené a ultrazvukové detektory*, Praha: Český normalizační institut, 2005, 40 s.
- [19] ČSN EN 54-7. *Elektrická požární signalizace – Část 7: Hlásiče kouře – Hlásiče bodové využívající rozptýleného světla, vysílaného světla nebo ionizace*, Praha: Český normalizační institut, 2001, 48 s.
- [20] ČSN EN 54-10. *Elektrická požární signalizace – Část 7: Hlásiče plamene – Bodové hlásiče*, Praha: Český normalizační institut, 2002, 36 s.
- [21] ČSN EN 54-12. *Elektrická požární signalizace – Část 12: Hlásiče kouře- Hlásiče lineární využívající optického světelného paprsku*, Praha: Český normalizační institut, 2003, 40 s.
- [22] Tyco Fire & Integrated Solutions, katalogový list Vesda Kouřové nasávací hlásiče, 40 str., 2012.
- [23] Tyco Fire & Integrated Solutions, katalogový list ZX SensorLaser Plus Hlásič tepelný lineární, 2 str., 2012.
- [24] HOZT C. HOTTEL, ADEL F. SAROFIM. Přenos tepla zářením. SNTL Praha, str. 501, překlad 1979, typové číslo: L13-B3-IV-41/22517.
- [25] *Characteristics and use of infrared detectors* [online]. HAMAMATSU PHOTONICS K.K., Solid State Division, 2011 [cit. 2013-03-25]. Dostupné z: [https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/infrared\\_techinfo\\_e.pdf](https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/infrared_techinfo_e.pdf).
- [26] Pelco by Schneider Electric, katalogový list Termální Poziční IP systém, 6 str., 2012

- [27] Wuhan Guide Infrared Technology Co., Ltd., ThermoPro™ TP8 IR Thermal Camera - User Manual, 97 str., 2006.
- [28] Wuhan Guide Infrared Technology Co., Ltd., Guide IrAnalyser® V1.7 - User Manual, 62 str., 2005.
- [29] GRYGAR, V. *Modelování sušicího procesu pro materiály tvaru válce*. Diplomová práce. Universita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky, 2011.
- [30] KOLOMAZNÍK, K., *Modelování zpracovatelských procesů*, 1. vydání, Brno: Vysoké učení technické v Brně, 1990, 191s. ISBN 80-214-01141
- [31] ŠNITA, D. *Chemické inženýrství I.*, 1. vyd., VŠCHT Praha, 2006, 318s., ISBN 80-7080-589-7
- [32] FÁBRY, J. *Matematické modelování*, 1. vyd. Praha, Nakladatelství Oeconomica v Praze, 146s., ISBN 978-80-245-1266-2
- [33] UNIVERZITA TOMÁŠE BATI VE ZLÍNĚ, Fakulta aplikované informatiky. *Řízení technologických procesů* [online]. [cit. 2013-04-02]. Dostupné z: <http://rtp.webzdarma.cz/>.
- [34] VYSOKÁ ŠKOLA CHEMICKO-TECHNOLOGICKÁ V PRAZE, Ústav počítačové a řídicí techniky. *Modelování a simulace* [online]. [cit. 2013-04-02]. Dostupné z: <http://uprt.vscht.cz/kminekm/mrt/F2/F2-ram.htm>.
- [35] ČSN EN 54-20. *Elektrická požární signalizace – Část 20: Nasávací hlásiče*, Praha: Český normalizační institut, 2007, 60 s.
- [36] Tyco Fire & Integrated Solutions, katalogový list FlameVision S300 Plamenný hlásič, 2 str., 2012.
- [37] FRŇKA, Tomáš. *Bezdotykové měření povrchových teplot ve strojírenství*. Brno, 2009. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
- [38] KRUMPHANZL, Jiří. *Optimalizace zářivého přenosu tepla v elektrotepelné technice*. Praha, 2005. Dizertační práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická.
- [39] ROGALSKI, CHRZANOWSKI. *Infrared device and techniques*. Warsaw, Poland, 2002, Opto-electronics review 10, Military University of Technology, Institut of Applied Physics.

- [40] GR Set 300 White | Fenix. *Fenix* [online]. © 2007 [cit. 2013-03-25]. Dostupné z: <http://shop.fenixgroup.cz/z4083-gr-set-300-white>
- [41] Standa, katalog – manual – software, CD.
- [42] Siemens, Building Technologies, katalogový list, Sensorový kabel FibroLaser so SNV, 4 str., 2011.
- [43] DRGA, Rudolf. *Infračervené záření a jeho využití v bezpečnostních technologiích*, Mezinárodní konference Bezpečnostní technologie Systémy a Management 2009, Zlín, 2009, 1-5, ISBN 978-80-7318-864-1
- [44] PLÁŠEK, Ondřej. *Vliv pozadí snímané scény na PIR detektor*. Zlín, 2012. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky. Dostupné z: <http://portal.utb.cz>.
- [45] LYKOV, A, V. *Teoria teploprovodnosti. Vysšaja škola, Moskva* (in Russian), 1967
- [46] ICELA, Jakub. *Infrakamera a její využití v BT*. Zlín, 2008. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky. Dostupné z: <http://portal.utb.cz>.
- [47] *Měření kvality vzduchu – moderní senzory CO<sub>2</sub>* [online] [cit. 2013-02-15]. Dostupné z: <http://centraline.com/inc/pdf/cz/centraline-energy-co2-0608-cz.pdf>.

## 16 SEZNAM PUBLIKACÍ AUTORA

### Impaktované časopisy

JANÁČOVÁ, Dagmar, CHARVÁTOVÁ, Hana, KOLOMAZNÍK, Karel, VAŠEK, Vladimír, MOKREJŠ, Pavel, DRGA, Rudolf. Computer Simulation of Bound Component Washing To Minimize Processing Costs. *Acta Montanistica Slovaca*, 2011, roč. 16, č. 1, s. 39-46. ISSN 1335-1788.

### Recenzované časopisy

DRGA, R., JANÁČOVÁ, D., CHARVÁTOVÁ, H.: Infrared camera measurement of source. *International Journal of Circuits, Systems and Signal Processing*, 2011, roč. 2011, č. 5, s. 589-596. ISSN 1998-4464.

DRGA, R., VOJÁČEK, L. Platební karty a jejich zabezpečení. *Security magazin*, 2011, roč. 2011, č. 5, s. 57-61. ISSN 1210-8723.

DRGA, R., VOJÁČEK, L. Bankovní transakce a způsoby jejich provádění. *Security magazin*, 2011, roč. 2011, č. 6, s. 46-52. ISSN 1210-8723.

JANÁČOVÁ, D., CHARVÁTOVÁ, H., KOLOMAZNÍK, K., VAŠEK, V., MOKREJŠ, P., DRGA, R.: Computer Simulation of Washing Processes, *International Journal of Mathematical Models and Methods in Applied Sciences*. Issue 6, Volume 5, 2011, p. 1094-1101. ISSN: 1998-0140.

IVANKA, J., DRGA, R. Využití spektrálních analyzátorů WI-SPY v průmyslu komerční bezpečnosti. *Alarm security magazin*, 2011, roč. XIII, č. 3/2011, s. 10-13. ISSN 1335-504X.

CHARVÁTOVÁ, H., JANÁČOVÁ, D., KOLOMAZNÍK, K., VAŠEK, V., MOKREJŠ, P., DRGA, R. Simulation of Washing Process Course by Using Maple Software Tools. *Strojárstvo extra*, 2012, roč. 16, č. 5, s. 1-7. ISSN 1335-2938.

JANÁČOVÁ, D. CHARVÁTOVÁ, H., KOLOMAZNÍK, K., VAŠEK, V., MOKREJŠ, P., DRGA, R. Study of Non-stationary Heat Transfer in Semi-infinite Region. *Strojárstvo extra*, 2012, roč. 16, č. 5, s. 1-5. ISSN 1335-2938.



CHARVÁTOVÁ, H., JANÁČOVÁ, D., MOKREJŠ, P., VAŠEK, V., DRGA, R., PARAVANOVÁ, G. Comparison of Analytical and Numerical Mathematical Methods for Computing of Non-stationary Temperature Fields in a Semi-infinite Wall. *Manufacturing and Industrial Engineering*, 2012, roč. XI, č. 2, s. 34-37. ISSN 1335-7972.

DRGA, R., JANÁČOVÁ, D. PIR detector measurement using thermal cameras. *Strojárstvo extra*, 2012, roč. 2012, č. máj-kveten, s. 281 - 286. ISSN 1335-2938.

JANÁČOVÁ, D., CHARVÁTOVÁ, H., KOLOMAZNÍK, K., VAŠEK, V., MOKREJŠ, P., DVOŘÁK, Z., DRGA, R. Study of non-stationary temperature fields in printed circuit boards during separation by cutting. *International Journal of Circuits, Systems and Signal Processing*, 2012, roč. 6, č. 1, s. 122-129. ISSN 1998-4464.

CHARVÁTOVÁ, H., JANÁČOVÁ, D., DRGA, R., LÍŠKA, O., VAŠEK, V., ZÁLEŠÁK, M. Computer Modeling of Heat Balance in Counterflow Tube Heat Exchanger. *Journal of Mathematical Models and Methods in Applied Sciences* (v tisku)

### **Příspěvky na konferencích**

DRGA, R., LUKÁŠ, L.: *Laboratoř pokročilých bezpečnostních technologií*, Mezinárodní konference Bezpečnostní technologie Systémy a Management 2007, Zlín, UEM, ISBN 978-80-7318-606-7

DRGA, R.: *Infračervené záření a jeho využití v bezpečnostních technologiích*, Mezinárodní konference Bezpečnostní technologie Systémy a Management 2009, Zlín, 2009, 1-5, ISBN 978-80-7318-864-1

JANÁČOVÁ, D., VAŠEK, V., KOLOMAZNÍK, K., CHARVÁTOVÁ, H., DOLINAY, J., DOSTÁLEK, P., DRGA, R., MOKREJŠ, P.: *Optimalizace recyklačních technologií*, DIMART, Sborník přednášek z 6. technické konference Automatizace, regulace a procesy, Praha, 2010, 55-66, ISBN-ISSN 978-80-903844-5-3.

HRUŠKA, F., DRGA, R.: *Applied theory of electromagnetic radiation in infra detectors of security systems*, Tribun EU, Summaries volume 9th International Conference Process Control 2010, Brno, 2010, 85, ISBN 978-80-7399-951-3.

DRGA, R., JANAČOVÁ, D.: *Infrared radiation, sensor, source and infrared camera measurement*, Proceedings of the 13th WSEAS International Conference on Automatic Control, Modelling & Simulation (ACMOS '11) , WSEAS Press, Lanzarote, Canary Islands, Spain, May 27-29, 2011, p. 362 – 364, ISBN: 978-1-61804-004-6.

JANAČOVÁ, D., CHARVÁTOVÁ, H., KOLOMAZNÍK, K., VAŠEK, V., MOKREJŠ, P., DRGA, R.: Cost Function Determination of Washing of Bound Component, 12th International Carpathian Control Conference (ICCC 2011), Velké Karlovice, Czech Republic, 25-28 May 2011.

JANAČOVÁ, D., CHARVÁTOVÁ, H., KOLOMAZNÍK, K., VAŠEK, V., DOLINAY, J., DOSTÁLEK, P., DRGA, R., MOKREJŠ, P.: Diffusion Model of Washing Process, *Proceedings of the 13th WSEAS International Conference on Automatic Control, Modelling & Simulation (ACMOS '11)* , WSEAS Press, Lanzarote, Canary Islands, Spain, May 27-29, 2011, p. 226 – 230, ISBN: 978-1-61804-004-6.

JANAČOVÁ, D., CHARVÁTOVÁ, H., KOLOMAZNÍK, K., VAŠEK, V., DVOŘÁK, Z., MOKREJŠ, P., DRGA, R. Modeling of Printed Circuit Boards Separation by Cutting. *In Mathematical Methods and Techniques in Engineering and Environmental Science*. Venice : WSEAS Press (IT), 2011, s. 359-362. ISBN 978-1-61804-046-6.

DRGA, R. Využití infra kamery pro měření vlastností PIR detektoru při narušení hlídaného prostoru. In *Bezpečnostní technologie, systémy a management 2011*. Zlín : Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2011, s. 110-119. ISBN 978-80-7454-111-7.

CHARVÁTOVÁ, H., VAŠEK, V., DRGA, R., KŘENEK, J. Software application for solving of non-stationary temperature fields in two-layer plate. In *Annals of DAAAM for 2011 & Proceedings of the 22nd International DAAAM Symposium "Intelligent Manufacturing & Automation: Power of Knowledge and Creativity"*. Vienna : DAAAM International Vienna, 2011, s. 359-360. ISSN 1726-9679. ISBN 978-3-901509-83-4.

JANAČOVÁ, D., VAŠEK, V., MOKREJŠ, P., KŘENEK, J., DRGA, R. Temperature fields solving in two-layer plate with COMSOL Multiphysics software. In *Annals of DAAAM for 2011 & Proceedings of the 22nd International DAAAM Symposium "Intelligent Manufacturing & Automation: Power of Knowledge and Creativity"*. Vienna : DAAAM International Vienna, 2011, s. 115-116. ISSN 1726-9679. ISBN 978-3-901509-83-4.

CHARVÁTOVÁ, H., JANÁČOVÁ, D., VAŠEK, V., MOKREJŠ, P., KOLOMAZNÍK, K., DRGA, R. Verification of delimiting mathematical model. In *Proceedings of the 14th WSEAS International Conference on Mathematical Methods, computational Techniques and Intelligent Systems*. Faro : WSEAS Press (PT), 2012, s. 252-255. ISSN 2227-4588. ISBN 978-1-61804-106-7.

JANÁČOVÁ, D., CHARVÁTOVÁ, H., VAŠEK, V., KOLOMAZNÍK, K., DRGA, R. Computer Modeling of Non-stationary Temperature Fields in Semi-infinite Region. In *Automatizácia a riadenie v teórii a praxi*. Košice : Technická univerzita v Košiciach, 2012, s. cd. ISBN 978-80-553-0835-7.

DRGA, R. Nepřesnosti při měření teploty zdroje IR záření termovizní kamerou. In *Automatizácia a riadenie v teórii a praxi*. Košice : Technická univerzita v Košiciach, 2012, s. 19.1 - 19.8. ISBN 978-80-553-0835-7.

CHARVÁTOVÁ, H., JANÁČOVÁ, D., VAŠEK, V., KOLOMAZNÍK, K., DRGA, R. Programming of computer application for study of bound component washing with Maple. In *Automatizácia a riadenie v teórii a praxi*. Košice : Technická univerzita v Košiciach, 2012, s. 1-11. ISBN 978-80-553-0835-7.

DRGA, R. Zdroje pro přísvit bezpečnostních kamer a jejich vlastnosti. In *Automatizácia a riadenie v teórii a praxi*. Košice : Technická univerzita v Košiciach, 2013, s. 35-1. ISBN 978-80-553-1330-6.

DRGA, R. Zvýšení spolehlivosti detekce PIR detektoru využitím tepelného pozadí. In *Automatizácia a riadenie v teórii a praxi*. Košice : Technická univerzita v Košiciach, 2013, s. 52-1 – 52-17. ISBN 978-80-553-1330-6.

JANÁČOVÁ D., CHARVÁTOVÁ H., MOKREJŠ P., VAŠEK V., KOLOMAZNÍK K., DRGA R. Matematický model dlouhodobého sušení materiálu. In *Automatizácia a riadenie v teórii a praxi*. Košice: Technická univerzita v Košiciach, 2013, s. 60-1 – 60-13. ISBN 978-80-553-1330-6.

CHARVÁTOVÁ H., JANÁČOVÁ D., DRGA R. LÍŠKA, O., ZÁLEŠÁK, M., VAŠEK, V. Software Application to Determine the Heat Balance in Counterflow Shell Heat Exchanger. In *Proceedings of the 17th International Conference on Systems*. 2013, s. 111-114. ISBN 978-960-474-314-8.

## **Sborníky vědeckých prací**

LUKÁŠ, L. a kol. Bezpečnostní technologie systémy a management I, Drga, R. autor kapitol: Trendy v elektrické požární signalizaci, Dohledová a poplachová přijímací centra a jejich další vývoj, str. 140-156, Zlín, 2011.

## **Ostatní publikace**

DRGA, R.: Využití infračerveného záření v měřicích technikách, FAMily media, s. r. o., Security magazin, Praha, 2010, 42, ISSN 1210-8723, s. 42-49.

DRGA, R., VOJÁČEK, L.: Platební karty a jejich zabezpečení. Magazin Security. 2011.

IVANKA, J., DRGA, R.: Využití spektrálních analyzátorů WI-SPY v průmyslu komerční bezpečnosti. Alarm security magazin, Bratislava, 2011, ISSN 1335-504, s. 4-7.

## **Projekty**

DRGA, R., LUKÁŠ, L., ŠEFČÍK V.: Laboratoř pokročilých bezpečnostních technologií, realizovaný Projekt FRVŠ č. 2127/2007

DRGA, R., LUKÁŠ, L.: Laboratoř biometrických technologií, podaný projekt FRVŠ 4/2011, UTB, Zlín.

## **Ostatní aktivity**

LUKÁŠ, L., ADÁMEK, M., DRGA, R.: Perspektiva vysokoškolského vzdělávání v oblasti bezpečnosti., Bezpečnostní workshop, Pragoalarm 2007, Výstaviště Praha, 12. dubna 2007

KŘESÁLEK, V., LAUCKÝ, V., ŠTEFKA, V., LUKÁŠ, L., ADÁMEK, M., DRGA, R.: Bezpečnostní technologie, systémy a management, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně (příprava konference)

LUKÁŠ, L., DRGA, R.: Mezinárodní bezpečnostní konference „Perspektivní bezpečnostní technologie ochrany majetku“, BVV Brno, 15. května 2008.

LUKÁŠ, L., DRGA, R.: Vliv technologií inteligentních budov na zajištění bezpečnosti objektů, Bezpečnostní workshop, Pragoalarm 2009, Výstaviště Praha, 26. února 2009.

