

# **Sběr a zpracování dat při experimentálním stanovení minimální hasební koncentrace**

Ondřej Kolek

---

Bakalářská práce  
2014

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta aplikované informatiky

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta aplikované informatiky  
akademický rok: 2013/2014

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Ondřej Kolek**  
Osobní číslo: **A11025**  
Studijní program: **B3902 Inženýrská informatika**  
Studijní obor: **Bezpečnostní technologie, systémy a management**  
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Sběr a zpracování dat při experimentálním stanovení  
minimální hasební koncentrace**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte literární rešerši zaměřenou na hasební látky.
2. V literární rešerši se zaměřte na koncentraci hasební látky s ohledem na účinnost hasiva.
3. Navrhněte měřicí systém pro stanovení minimální hasicí koncentrace.
4. V práci se zaměřte také na návrh systému sběru experimentálních dat.

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

1. TROPEA, Cameron, Alexander L. YARIN a John F. (ed.). FOSS. Springer Handbook of Experimental Fluid Mechanics. 1. vyd. Berlin: Springer, 2007. ISBN 978-3-540-25141-5.
2. NFPA 2001. Standard for Clean Agent Fire Extinguishing Systeme. Quincy: National Fire Protection Association, 2008.
3. SENEAL, J.A. Flame extinguishing in the cup-burner by inert gases. Fire Safety Journal [online]. 2005, 40, s. 579 - 591, [cit. 2011-02-22].
4. TAKAHASHI, F.; LINTERIS, G.T.; KATTA, V.R. Extinguishment mechanisms of coflow diffusion flames in a cup-burner apparatus. Proceedings of the Combustion Institute [online]. 2007, 31, s. 2721 - 2729 [cit. 2011-02-22]. Dostupný z WWW: <http://fire.nist.gov/bfrlpubs/fire07/PDF/f07046.pdf>.

Vedoucí bakalářské práce:

**doc. Mgr. Milan Adámek, Ph.D.**  
Ústav bezpečnostního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce:

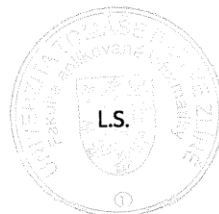
**7. března 2014**

Termín odevzdání bakalářské práce:

**10. června 2014**

Ve Zlíně dne 7. března 2014

prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.  
*děkan*



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

## PROHLÁŠENÍ AUTORA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že:

- odevzdáním bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby<sup>1</sup>;
- bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému,
- na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3<sup>2</sup>;
- podle § 60<sup>3</sup> odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;

---

<sup>1</sup> zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47b Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevydělčně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlázení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

<sup>2</sup> zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacího zařízení (školní dílo).

<sup>3</sup> zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:


(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

- podle § 60<sup>4</sup> odst. 2 a 3 mohou užít své dílo – bakalářskou práci - nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- pokud bylo k vypracování bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské práce využít ke komerčním účelům.

Prohlašuji, že:

- jsem bakalářskou práci zpracoval samostatně a použité informační zdroje jsem citoval;
- odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně 9.6.2014



<sup>4</sup> zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

- (2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.
- (3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlídně k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

## **ABSTRAKT**

Bakalářská práce se zabývá možnostmi automatizace a integrace prvků experimentální měřicí sestavy pro stanovení minimální hasicí koncentrace u plynných hasiv. Teoretická část práce je zaměřena na charakteristiku, princip CCD čipů a stanovení hasební koncentrace plynných hasiv. Praktická část je věnována návrhu automatizovaného postupu měřicí sestavy a sběru dat s ohledem na možnost jejich následné efektivní analýzy.

Klíčová slova: hasiva, minimální hasicí koncentrace (MEC), pohárkový hořák, nejistoty měření, CCD, EMCCD, iCCD, analýza obrazu

## **ABSTRACT**

The bachelor thesis deals with the possibilities of automation and integration of elements of the experimental set-up to determine the minimum concentration for gaseous fire extinguishing agents. The theoretical part focuses on the characteristics, the principle of CCD chips and determination extinguishing concentration of gaseous extinguishing agents. The practical part is devoted to the design of an automated assembly of measurement procedure and data collection with a view to their subsequent effective analysis.

Keywords: extinguishing agents, minimum extinguishing concentration (MEC), cup burner, measurement uncertainty, CDD, EMCCD, iCCD, image analysis

Rád bych poděkoval vedoucímu své bakalářské práce doc. Mgr. Milanu Adámkovi, Ph.D. za možnost vlastního výběru tématu a volnosti při psaní této práce. Za pomoc při řešení problémů a odborné konzultace bych rád poděkoval Ing. Petrovi Bitalovi, Ph.D. a Ing. Václavu Nevrlému, Ph.D.

Za velkou podporu, trpělivost a pomoc bych rád poděkoval rodičům a všem mým přátelům.

# OBSAH

|  |           |
|--|-----------|
| <b>ÚVOD</b> .....  | <b>10</b> |
| <b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....                                       | <b>11</b> |
| <b>1 HASIVA</b> .....  | <b>12</b> |
| 1.1 MECHANISMUS ÚČINKU HASICÍCH LÁTEK.....                           | 12        |
| 1.1.1 Hašení chladícím účinkem hasiva.....                           | 13        |
| 1.1.2 Hašení zřed'ovacím účinkem hasiva .....                        | 14        |
| 1.1.3 Hašení antikatalytickým účinkem hasiva.....                    | 14        |
| 1.2 STANOVOVÁNÍ HASICÍ KONCENTRACE PLYNNÝCH HASIV .....              | 15        |
| 1.2.1 Hodnocení hasicí koncentrace v ČR .....                        | 16        |
| 1.2.2 Zkušební zařízení .....  | 17        |
| 1.3 POSTUP STANOVOVÁNÍ HASICÍ KONCENTRACE PRO HOŘLAVÉ KAPALINY ..... | 19        |
| 1.4 POSTUP STANOVOVÁNÍ HASICÍ KONCENTRACE PRO HOŘLAVÉ PLYNY .....    | 20        |
| <b>2 CHARAKTERISTIKA CCD ČIPŮ</b> .....                              | <b>21</b> |
| 2.1 PRINCIP ČINNOSTI CCD ČIPŮ.....                                   | 21        |
| 2.2 ZPŮSOBY PŘENOSU NÁBOJE PO CCD ČIPU .....                         | 23        |
| 2.2.1 Čtyřfázová technika (4Φ).....                                  | 23        |
| 2.2.2 Třífázová technika (3Φ).....                                   | 24        |
| 2.2.3 Technika pseudo dvoufázová (P2Φ).....                          | 24        |
| 2.2.4 Technika pravá dvoufázová (T2Φ) .....                          | 24        |
| 2.2.5 Technika virtuální fáze (VΦ) .....                             | 24        |
| 2.3 FORMÁTY SNÍMÁNÍ OBRAZU.....                                      | 25        |
| 2.3.1 Bodové snímání.....  | 25        |
| 2.3.2 Lineární snímání.....  | 25        |
| 2.3.3 Plošné snímání .....   | 25        |
| 2.4 KONSTRUKCE CCD .....   | 26        |
| 2.4.1 Lineární CCD .....   | 26        |
| 2.4.2 Maticové (plošné) CCD .....                                    | 26        |
| 2.4.2.1 Full-Frame (FF) .....  | 26        |
| 2.4.2.2 Frame-Transfer (FT).....                                     | 27        |
| 2.4.2.3 Inter-Line (IL).....   | 27        |
| 2.5 EMCCD.....   | 28        |
| 2.5.1 Fyzikální princip EMCCD .....                                  | 29        |
| 2.6 ICCD .....   | 30        |
| 2.7 DYNAMICKÝ ROZSAH .....   | 31        |
| 2.7.1 Odstup signálu od šumu (SNR).....                              | 32        |
| 2.8 SROVNÁNÍ CCD, EMCCD A ICCD.....                                  | 32        |
| 2.9 CHLAZENÍ KAMERY .....  | 33        |
| 2.10 SLUČOVÁNÍ PIXELŮ (BINNING).....                                 | 33        |
| <b>3 NĚKTERÉ METODY ANALÝZY OBRAZU</b> .....                         | <b>35</b> |



|           |  |           |
|-----------|--|-----------|
| 3.1       | ZPRACOVÁNÍ OBRAZU .....  | 35        |
| 3.2       | PRINCIP SEGMENTACE .....   | 36        |
| 3.3       | ROZDÍLOVÁ METODA.....  | 36        |
| 3.4       | METODA OPTICKÉHO TOKU .....  | 37        |
| <b>4</b>  | <b>STANOVENÍ CHYB A NEJISTOT MĚŘENÍ.....</b>                               | <b>38</b> |
| 4.1       | CHYBY MĚŘENÍ .....   | 38        |
| 4.2       | NEJISTOTY MĚŘENÍ.....  | 38        |
| 4.2.1     | Standartní nejistota typu A.....   | 39        |
| 4.2.2     | Standartní nejistota typu B .....  | 39        |
| 4.2.3     | Kombinovaná standardní nejistota $-u_C$ .....                              | 40        |
| 4.2.4     | Rozšířená nejistota $U_{(x)}$ .....  | 40        |
| <b>II</b> | <b>PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>  | <b>41</b> |
| <b>5</b>  | <b>LABORATORNÍ SESTAVA PRO STANOVENÍ ÚČINNOSTI<br/>PLYNNÝCH HASIV.....</b> | <b>42</b> |
| 5.1       | EXPERIMENTÁLNÍ USPOŘÁDÁNÍ A POSTUP MĚŘENÍ .....                            | 42        |
| 5.1.1     | Popis měřicí sestavy (současný stav) .....                                 | 43        |
| 5.1.1.1   | Pohárkový hořák .....  | 43        |
| 5.1.1.2   | Systém regulace průtoku a přívodu medií .....                              | 44        |
| 5.1.1.3   | Systém měření teploty porézní vrstvy .....                                 | 45        |
| 5.1.1.4   | Systém snímání a zaznamenávání obrazu.....                                 | 45        |
| 5.1.2     | Nedostatky měřicí sestavy.....   | 46        |
| 5.2       | NÁVRH MODIFIKOVANÉ EXPERIMENTÁLNÍ SESTAVY A POSTUPU MĚŘENÍ .....           | 46        |
| 5.2.1     | Rozbor nedokonalostí a návrh řešení .....                                  | 46        |
| 5.2.2     | Návrh dalších úprav prvků experimentální sestavy .....                     | 49        |
| 5.2.2.1   | Integrace termočlánků do řídicího procesu.....                             | 49        |
| 5.2.2.2   | Rozhodovací algoritmus .....   | 50        |
| 5.2.2.3   | Automatizace řízení procesu v prostředí Matlab .....                       | 51        |
| 5.2.3     | Interpretace výsledků měření .....   | 52        |
|           | <b>ZÁVĚR .....</b>   | <b>53</b> |
|           | <b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>                                      | <b>54</b> |
|           | <b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>                             | <b>60</b> |
|           | <b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>  | <b>61</b> |
|           | <b>SEZNAM TABULEK.....</b>   | <b>62</b> |

## ÚVOD

Metoda stanovování minimální hasicí koncentrace (dále jen MEC) pomocí pohárkového hořáku má poměrně dlouhou historii. Standardizovaná experimentální sestava se nachází v laboratoři č. 211 Fakulty bezpečnostního inženýrství VŠB-TUO, jenž byla sestrojena za účelem zkoumání chemických a fyzikálních jevů přítomných u procesů hoření a hašení. Představuje model nepředmíseného plamene, což přibližuje fyzikální podobnost u požárů. Studii jevů vzniklých při testování MEC u plynných hasiv lze dojít k zásadním poznatkům aplikovatelných do praxe.

Cílem práce je teoretické seznámení se s typy hasiv a stanovováním jejich MEC. Bližší porozumění měřicí sestavy a konstrukčního provedení pohárkového hořáku. Také by zde měla být nastíněná problematika systému snímání obrazu a sběru dat využitím rozdílných druhů čipů. Tato práce si neklade za cíl provést jakákoliv měření, neboť jejím cílem je návrh systému v teoretické rovině.

Praktická část by měla být zaměřena na návrh modifikace sestavy v souladu s normami. Hlavním cílem navržených úprav je docílit automatizace a integrace dílčích prvků sestavy. To by mělo mít za následek minimalizování nejistot měření, urychlení procesu stanovování MEC, efektivnější schopnost pořizování snímků a jejich následnou analýzu.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

## 1 HASIVA

Za hasiva lze obecně označit látky využívané pro protipožární zásah nebo eliminaci rizik souvisejících se vznikem požáru, výbuchu nebo mimořádné události v případě technologických zařízení. Ve smyslu kategorizace hasiv lze využít celé řady způsobů. Nejjednodušším ze způsobů dělení hasiv je dle fyzikálního skupenství a to následovně:

- kapalné,
- pevné,
- plynné,
- heterogenní (směsi).

Uvedený způsob klasifikace přitom vychází z posouzení fyzikálního skupenství hasiva za normálních podmínek tj. při pokojové teplotě a atmosférickém tlaku (20°C, 101 325 Pa).

Zmiňovaný způsob klasifikace však z praktického pohledu není příliš využíván. Mnohem častěji jsou hasiva klasifikována na základě jejich použitelnosti pro hašení požáru dle fyzikálního skupenství hořlavých látek (tj. třídy požárů) a to následovně [1], [2]:

- požáry třídy A – požáry pevných látek,
- požáry třídy B – požáry kapalin nebo látek přecházejících do kapalného skupenství,
- požáry třídy C – požáry plynů,
- požáry třídy D – požáry kovů,
- požáry třídy F – požáry rostlinných nebo živočišných olejů a tuků používaných na (v) kuchyňských spotřebičích.

Uvedený způsob klasifikace hasiv přitom odráží rovněž vlastnosti hasiva, jako jsou mísitelnost s hořlavou látkou, vznik nežádoucí reakce hasiva s hořlavou látkou, schopnost odolávat účinkům hořlavé látky apod. Dle výše diskutovaného způsobu dělení jsou přitom hasiva použitelná buď pro konkrétní třídu požáru, nebo jejich kombinaci.

### 1.1 Mechanismus účinku hasicích látek

Účinkem působení tepla na hořlavé materiály dochází k řadě paralelních i postupných fyzikálních procesů a chemických reakcí. Za přítomnosti oxidačního prostředku při určitých limitních podmínkách začíná proces hoření. Hoření je označováno jako oxidační děj probíhající za vývoje světla a tepla. Hoření však vzniká a probíhá pouze za určitých podmínek. Pro jeho průběh je vždy zapotřebí přítomnost hořlavé látky, oxidačního prostředku a iniciačního zdroje.

Pro přerušení hoření, tedy stačí narušit jednotlivé složky, případně je vzájemně eliminovat např. zabránit vzniku hořlavých plynných produktů, zabránit přísunu oxidačního prostředí nebo snížit jeho koncentraci, snížit teplotu hořlavých látek, snížit množství tepla uvolňované reakcí hoření apod. Uvedených účinků lze v případě přerušení hoření v případě požáru dosáhnout s využitím hasicích látek a jejich účinků. Ve smyslu účinků hasicích látek při hašení jde především o následující:

- využití chladícího účinku hasiva,
- využití zředovacího účinku hasiva,
  - snížení koncentrace oxidačního prostředí účinkem hasivem,
  - snížení koncentrace hořlavé látky účinkem hasiva,
  - oddělením hořlavé látky od oxidačního prostředí účinkem hasiva,
- využití antikatalytického účinku hasiva.

### 1.1.1 Hašení chladícím účinkem hasiva

Jedná se o způsob přerušení reakce hoření při požáru v důsledku narušení tepelné bilance reakce hoření. V případě aplikace hasiva jde o využití schopnosti hasiva odebírat z ohniska požáru a jeho okolí teplo, jenž vede k ochlazení hořlavých látek pod teplotu vznícení nebo vzplanutí. Ochlazení přitom může probíhat některým z níže uvedených způsobů nebo jejich kombinací a to [18]:

- zahřátím hasiva bez změny skupenství,
- změnou skupenství hasiva v důsledku zahřátí,
  - táním,
  - vypařováním,
  - sublimací,
- disociací (štěpením na ionty),
- tepelným rozkladem.

Množství tepla, které je hasivo schopné odvést z ohniska požáru i jeho okolí je závislé na fyzikálních parametrech konkrétní hasicí látky tj. například měrné tepelné kapacitě, měrném skupenském teple tání, měrném skupenském teple výparném apod. Z praktického pohledu jsou v případě hašení požáru podstatné především procesy související se zahříváním a vypařováním hasiva. Ve smyslu konkrétních hasiv jde především o využití vody a těžké pěny při hašení.

### 1.1.2 Hašení zřed'ovacím účinkem hasiva

Rychlost všech chemických reakcí, a tedy i hoření, je vždy závislá na koncentraci výchozích látek. Tuto závislost obecně popisuje Guldberg-Waaguv zákon. Při hašení požáru dochází v důsledku přidavku hmoty tj. atomů nebo molekul hasiva k ředění reaktantů (hořlavé látky nebo oxidačního prostředku). Snížení koncentrace reaktantů vede k menšímu počtu efektivních srážek reaktantů, a tedy i rychlosti reakce hoření. Vlivem přidavku hasiva a změně rychlosti reakce klesá rovněž množství uvolněného tepla a tudíž i teplota v ohnisku požáru. Při aplikaci dostatečného množství hasicí látky, lze tedy docílit snížení koncentrace reaktantů do takové míry, že dojde k přerušení reakce hoření [19].

Ve smyslu aplikace hasiv při hašení požáru může jít například o využití zřed'ovacího efektu vody u polárních kapalin, izolačního efektu u pěny nebo snížení koncentrace oxidačního prostředku u plynných hasiv nebo vodní páry.

### 1.1.3 Hašení antikatalytickým účinkem hasiva

Skutečný průběh chemických reakcí probíhajících v prostředí plamene je mnohem složitější, než jak jej zjednodušeně popisuje rovnice jednostupňové oxidace (dokonalého spalování). Moderní teorie hoření (oxidace hořlavin) popisují průběh hoření formou řetězových radikálových reakcí ve třech stupních. První stupeň reakce je označován jako iniciace. Při iniciaci dochází vlivem dodání energie molekulám přítomných látek ke štěpení vazeb za vzniku jednoelektronových útvarů označovaných jako radikály. Každý ze vzniklých radikálů (není-li zlikvidován) vstupuje do druhého stupně reakce, kde zahájí a následně rozvine svou vlastní reakci. Podle jejího průběhu přitom může jít o reakci nerozvětvenou, rozvětvenou nebo degenerativní. Třetí a poslední fázi řetězových reakcí je terminace. Je to fáze, kdy dochází k zániku radikálů, které různou formou buď zbavíme energie, nebo vyčerpáme koncentraci reagujících látek. Při hašení požáru hasicí látkou, jde ve smyslu hasicího účinku o omezení nebo zabránění tvorby radikálů. Toho lze docílit buď homogenní nebo heterogenní inhibicí hasivem. V případě homogenní inhibice dochází při hašení vlivem působení tepla k rozpadu hasiva na radikály. Radikály hasiva následně reagují s radikály hořlavé látky, které vznikly hořením. Při vzájemné reakci se radikály hasiva spojují s radikály paliva a požár je uhašen obvykle ve velmi krátkém čase. Hašení homogenní inhibicí je typické pro halogenderiváty uhlovodíků. Druhou z možností přerušení řetězové reakce, je zabránit tvorbě radikálu heterogenní inhibicí. V tomto případě dochází k odbírání energie radikálům vzniklých hořením tak, že jsou vázány na povrch

hasicí látky. Hasicí látka tak odebírá energii radikálům paliva a zpomaluje reakci hoření. Hašení heterogenní inhibicí je příznačné pro hasicí prášky, kdy jsou radikály vzniklé hořením vázány na povrch hasicích prášků [20].

## 1.2 Stanovování hasicí koncentrace plyných hasiv

Způsob hodnocení hasicí schopnosti plyných hasiv je založen na využití metody kelímkového/pohárkového hořáku (cup-burner method). Hasicí schopnost plyných hasiv je přitom prezentována hodnotou minimální hasicí koncentrace plyného hasiva vyjádřena hodnotou MEC (minimum extinguishing concentration). Hodnota MEC představuje nejnižší koncentraci plyného hasiva ve vzduchu, která učiní směs nezpůsobitou podporovat hoření. Hodnota MEC hasicí látky je přitom závislá na několika proměnných zahrnující jak vlastnosti paliva, tak i hasicí látky.

Metoda pohárkového hořáku využívaná pro hodnocení hasicí schopnosti plyných hasiv má poměrně dlouhou historii. Průkopnickou práci je v případě zmiňované metody práce Hirsta a Bootha [3] z roku 1977. V roce 1993 publikoval Saso a kol. [4] práci o vlivu měřítka na stanovování minimální hasicí koncentrace. Preece a kol. [5] v roce 2003 představil práci zabývající se parametrickou analýzou faktorů ovlivňujících stanovení hodnoty minimální hasicí koncentrace při využití metody pohárkového hořáku u inertních plynů. Detailní hodnoty MEC pro inertní plyny, jejich směsi i halogenderiváty uhlovodíků lze dnes nalézt v pracích celé řady autorů například Dlugogorski a kol. [6], Saito a kol. [7], Moore a kol. [8], Sheinson a kol. [9] a další. Významné práce ve smyslu studia plamene a vlivu hasiv na hašení plamene pohárkového hořáku publikoval v letech 2003 – 2007 rovněž Takahashi a kol. [10], [11], [12]. V případě zmiňovaných prací od Takahashiho a kol., je navíc problematika stanovování MEC doplněna o modelování a rozbor procesů hašení plamene za využitím detailních výpočetních modelů fluidní dynamiky při zohlednění reakční kinetiky a mechanismů přenosu tepla a hmoty.

Některé z hodnot MEC vybraných plyných hasiv stanovené v rámci experimentálního hodnocení plyných hasiv pro referenční palivo v podobě n-heptanu, jsou včetně příslušných odkazu prezentovány v Tab. 1. Hodnota minimální hasicí koncentrace uvedená v Tab. 1 je prezentována v objemových procentech hasicí látky ve vzduchu pro referenční palivo v podobě n-heptanu [17].

Tab. 1 – Hodnoty MEC stanovené metodou kelímkového/pohárkového hořáku  
[17]

| Hasivo <sup>a</sup> | NFPA 2001<br>[14] | AS 4214<br>[15] | ISO 14 520<br>(2000)<br>[13] | ISO 14 520<br>(návrh 2003)<br>[14] | Hirst a<br>Booth [3] | Sheinson<br>a kol. [10] | Dlugogorsk<br>i a kol. [6] | Saito<br>a kol.<br>[7] | Moore<br>a kol.<br>[8] |
|---------------------|-------------------|-----------------|------------------------------|------------------------------------|----------------------|-------------------------|----------------------------|------------------------|------------------------|
| IG-01               | 42                | x               | 37,5                         | 39,2                               | x                    | 41                      | 39                         | 43,3                   | 38                     |
| IG-55               | 35                | 32,3            | 32,3                         | 36,5                               | x                    | x                       | x                          | x                      | 28                     |
| IG-541              | 31                | 33,8            | 33,8                         | 31,7                               | x                    | x                       | 32                         | 35,6                   | x                      |
| IG-100              | 31                | x               | 33,6                         | 33,6                               | 30,2                 | 30                      | 29                         | 33,6                   | 30                     |
| CO <sub>2</sub>     | x                 | x               | x                            | x                                  | 20,5                 | 21                      | x                          | 22                     | 20,4                   |

<sup>a</sup> Hasivo složení: IG-01: argon; IG-55: 50% argon, 50% dusík; IG-541: 52% dusík, 40% argon, 8% oxid uhličitý;  
IG-100: dusík

Ve smyslu národních nebo mezinárodních standardů a norem např. [13], [14], [15], je hodnocení hasicí schopnosti plyných hasiv s využitím metody kelímkového/pohárkového hořáku využíváno především pro účely návrhu a dimenzování plynových stabilních hasicí zařízení. V případě České republiky je postup hodnocení hasicí schopnosti plyných hasiv prostřednictvím hodnoty MEC popsán v Příloze B ČSN EN 15 004-1 jako tzv. „Stanovení hasicí koncentrace plyných hasiv metodou uhašení plamen v kelímkovém hořáku“. Uvedený postup stanoví hasicí koncentrace (MEC) dle [16] je detailně popsán v následující kapitole.

### 1.2.1 Hodnocení hasicí koncentrace v ČR

V České republice je způsob hodnocení hasicí koncentrace plyných hasiv s využitím metody tzv. kelímkového hořáku zapracován v Příloze B ČSN EN 15 004-1 [16]. Uvedená procedura stanovování hasicí koncentrace hasiv, je v případě zmiňované normy rozdělena na stanovování hasicí koncentrace pro:

- hořlavé kapaliny,
- hořlavé plyny.

Ve smyslu této normy je přitom prezentovaný postup stanovování hasicí koncentrace využitelný pro hasiva uvedená v Tab. 2 [16].

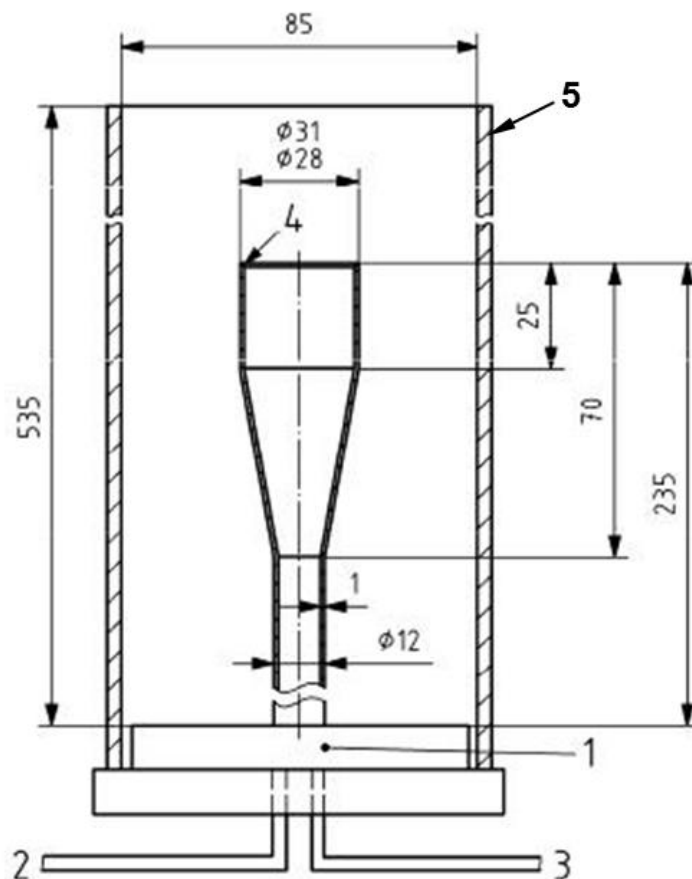


Tab. 2 – Přehled hasiv [16]

| Hasivo      | Chemikálie   | Vzorec   | č. CAS     | EN       |
|-------------|--|--|------------|----------|
| FK-5-1-12   | 1, 1, 1, 2, 2, 5, 5, 5-nonafluor-4-(trifluormethyl)pentan-3-on | $\text{CF}_3\text{CF}_2\text{C}(\text{O})\text{CF}(\text{CF}_3)_2$ | 756-13-8   | 15004-2  |
| HCFC Směs A |  |  |            |          |
| HCFC-123    | 1,1,1-trifluor-2,2-dichlorethan                                | $\text{CHCl}_2\text{CF}_3$   | 306-83-2   | 15004-3  |
| HCFC-22     | chlordifluormethan   | $\text{CHClF}_2$   | 75-45-6    |          |
| HCFC-124    | 1, 1, 1, 2-tetrafluor-2-chlorethan                             | $\text{CHClFCF}_3$   | 2837-89-0  |          |
| HFC 125     | 1-methyl-4-isopropenylcyklohex-1-en                            | $\text{C}_{10}\text{H}_{16}$                                       | 5989-27-5  |          |
| HFC 125     | pentafluorethan  | $\text{CHF}_2\text{CF}_3$  | 354-33-6   | 15004-4  |
| HFC 227ea   | 1, 1, 1, 2, 3, 3, 3-heptafluorpropan                           | $\text{CF}_3\text{CHF}_2\text{CF}_3$                               | 2252-84-8  | 15004-5  |
| HFC 23      | trifluormethan   | $\text{CHF}_3$   | 75-46-7    | 15004-6  |
| IG-01       | argon  | Ar   | 74040-37-1 | 15004-7  |
| IG-100      | dusík  | $\text{N}_2$   | 7727-37-9  | 15004-8  |
| IG-55       | dusík (50 %)   | $\text{N}_2$   | 7727-37-9  | 15004-9  |
|             | argon (50 %)   | Ar   | 74040-37-1 |          |
| IG-541      | dusík (52 %)   | $\text{N}_2$   | 7727-37-9  | 15004-10 |
|             | argon (40 %)   | Ar   | 74040-37-1 |          |
|             | Oxid uhličitý (8 %)  | $\text{CO}_2$  | 124-38-9   |          |

### 1.2.2 Zkušební zařízení

Zkušební zařízení určené pro stanovení hasicí koncentrace výše uvedených plynných hasiv metodou kelímkového hořáku ilustruje Obr. 1 [16]. V případě všech uváděných rozměrů zkušebního zařízení, je přípustná tolerance max. 5 % (není-li normou specifikováno jinak).



#### Legenda

- 1 difuzér
- 2 přívod vzduchu/hasiva
- 3 přívod paliva
- 4 kelímek (vnitřní plocha kelímku sražená pod úhlem 45°)
- 5 komínek

Obr. 1 – Zkušební zařízení pro zkoušku metodou kelímkového hořáku [16]

Specifikace jednotlivých částí zkušebního zařízení, jsou co do konstrukčního provedení a použitých materiálu uvedeny v následujícím textu.

#### Kelímek

Kelímek musí být kruhový o vnějším průměru od 28 do 31 mm, s tloušťkou stěny od 1 do 2 mm. Horní hrana kelímku musí být sražená pod úhlem 45°. Kelímek musí být vyrobený ze skla nebo oceli. Ve vzdálenosti 2 až 5 mm pod horním okrajem musí být možné měřit teplotu paliva uvnitř kelímku. V případě kelímku pro plynná paliva přitom musí zajišťovat rovnoměrný průtok paliva v horním okraji kelímku. Jenž lze realizovat vyplní kelímku např. porézním žáruvzdorným materiálem [16].

### **Komínek**

Komínek musí být kruhový, ze skla nebo křemene. Vnitřní průměr komínku musí být  $85 \pm 5$  mm s tloušťkou stěny 2 až 5 mm a výškou  $535 \pm 5$  mm [16].

### **Difuzér**

Difuzér musí být konstruován tak, aby umožňoval připojení ke spodnímu okraji komínku. Konstrukčně přitom musí být řešen tak, aby rovněž umožňovat realizaci napojení na přívod předem předmíseného proudu směsi vzduchu a hasiva a jeho rovnoměrnou distribuci v celém průřezu komínku [16].

### **Přívod paliva**

Přívod kapalného paliva musí zajišťovat dodávku paliva do kelímku a přitom udržovat stálou, ale nastavitelnou výšku hladiny kapalného paliva v kelímku.

U plynného paliva musí přívod paliva zajišťovat dodávku plynného paliva s konstantním průtokem a možností jeho regulace [16].

### **Přívod hasiva/vzduchu**

Přívod směsi hasiva a vzduchu musí zajišťovat konstantní dodávku homogenní, předmísené a definované směsi hasiva a vzduchu do difuzoru s možností regulace vzájemného poměru ve smyslu hasiva a vzduchu [16].

## **1.3 Postup stanovování hasicí koncentrace pro hořlavé kapaliny**

Stanovení hasicí koncentrace plynných hasiv u hořlavých kapalin je prováděno dle následujícího níže uvedeného postupu:

1. Hořlavá kapalina (palivo) se umístí do zásobníku přiváděného paliva.
2. Palivo se přivede do kelímku a hladina kapaliny v kelímku se nastaví tak, aby byla 5 až 10 mm od horního okraje kelímku.
3. Proud vzduchu se přivede do difuzéru a jeho průtok se seřídí tak, aby bylo dosaženo konstantního objemového průtoku  $40 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ .
4. Palivo se zapálí a nechá rozhořet po dobu 60 s., během níž se hladina kapaliny v kelímku nastaví tak, aby byla do 1 mm od okraje kelímku.
5. V průběhu stanovování hasicí koncentrace hasiva se postupně zvyšuje podíl hasiva ve směsi se vzduchem na úkor přiváděného vzduchu. Objemový průtok směsi

hasiva a vzduchu přiváděné do difuzoru, musí mít po celou dobu trvání zkoušky konstantní objemový průtok  $40 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$ .

6. Množství přiváděného hasiva se postupně zvyšuje do okamžiku, kdy dojde k uhašení plamene. Postupné zvyšování paliva přitom musí mít za následek zvýšení koncentrace ve směsi se vzduchem vždy nejvýše o 3 % předchozí hodnoty. Po změně koncentrace hasiva ve směsi následuje vždy čekací (pozorovací) doba 10 s. Jestliže dojde k uhašení plamene v průběhu pozorovacího času, výsledná hodnota se zaznamená jako množství hasicí látky potřebné k uhašení plamene.
7. Při dosažení koncentrace hasiva, která způsobí uhašení plamene, se zaznamenají průtoky hasiva a vzduchu.
8. Hasicí koncentrace hasiva se následně vypočítá nebo určí z naměřených hodnot.

#### 1.4 Postup stanovování hasicí koncentrace pro hořlavé plyny

1. Proud vzduchu se přivede do difuzéru a jeho průtok se seřídí tak, aby bylo dosaženo konstantního objemového průtoku  $40 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$ .
2. Plynné palivo se přivede do kelímku a zapálí.
3. Průtok paliva kelímkem se nastaví tak, aby bylo dosaženo pozorovací výšky plamene přibližně 80 mm.
4. Palivo se nechá rozhořet po dobu 60 s.
5. V průběhu stanovování hasicí koncentrace hasiva se postupně zvyšuje podíl hasiva ve směsi se vzduchem na úkor přiváděného vzduchu. Objemový průtok směsi hasiva a vzduchu přiváděné do difuzoru, musí mít po celou dobu trvání zkoušky konstantní objemový průtok  $40 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$ .
6. Množství přiváděného hasiva se postupně zvyšuje do okamžiku, kdy dojde k uhašení plamene. Postupné zvyšování paliva přitom musí mít za následek zvýšení koncentrace ve směsi se vzduchem vždy nejvýše o 3 % předchozí hodnoty. Po změně koncentrace hasiva ve směsi následuje vždy čekací (pozorovací) doba 10 s. Jestliže dojde k uhašení plamene v průběhu pozorovacího času, výsledná hodnota se zaznamená jako množství hasicí látky potřebné k uhašení plamene.
7. Při dosažení koncentrace hasiva, která způsobí uhašení plamene, se zaznamenají průtoky hasiva a vzduchu.
8. Hasicí koncentrace hasiva se následně vypočítá nebo určí z naměřených hodnot.

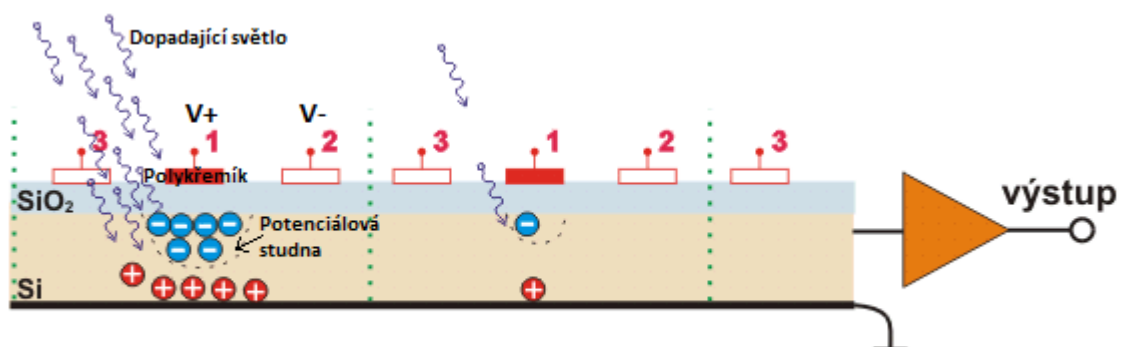
Bližší popis postupu provádění zkoušek, lze nalézt v Příloze B ČSN EN 15 004-1 [16].

## 2 CHARAKTERISTIKA CCD ČIPŮ

Abychom porozuměli principu sběru dat, je nutné osvětlit problematiku a princip činnosti CCD čipu. Z jehož základů vychází EMCCD čip použitý v kameře Luca S 658M.

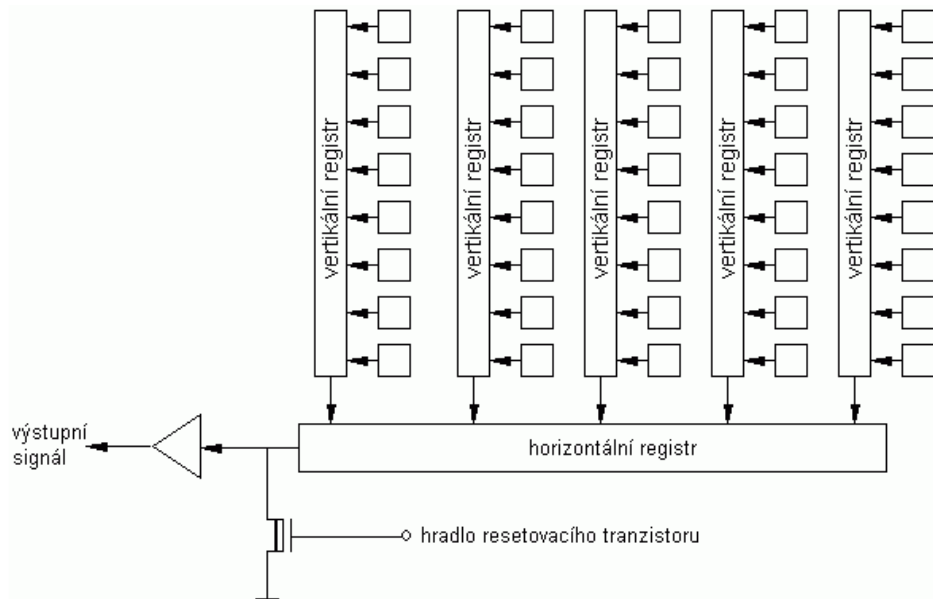
### 2.1 Princip činnosti CCD čipů

Obecně princip činnosti je v případě CCD čipů založen na fyzikálním jevu označovaném jako fotoefekt. Čip je složen z několika vrstev. Hlavní vrstvu tvoří polovodičová fotoaktivní oblast (epitaxní vrstva křemíku) a elektrony nepropustná vrstva oxidu křemičitého. Fotony dopadají na povrch křemíku, excitují elektrony (elektrický náboj), který je přímo úměrný intenzitě dopadajícího světla a také expoziční době. Po elektronech zbydou v polovodiči tzv. díry, které vůči svému okolí vykazují kladný náboj. Svislé negativní potenciálové valy (odpuzející elektrony) vytvořené na čipu zabraňují volnému pohybu elektronů. Systém vodorovných elektrod, rovněž s negativním nábojem, vytváří na čipu mřížku tzv. „potenciálových studní“, z nichž elektrony nemohou uniknout. Každá potenciálová studna reprezentuje jeden obrazový bod (pixel) [21], [27]. Kladně nabitá elektroda, jenž je umístěná pod každým pixelem a oddělená od křemíku izolační vrstvou křemene, zachycuje takto uvolněné elektrony. Dopadne-li na CCD čip větší množství fotonů, vytváří se obraz, v němž jasné oblasti odpovídají pixelům, z nichž se uvolnilo více elektronů [22].



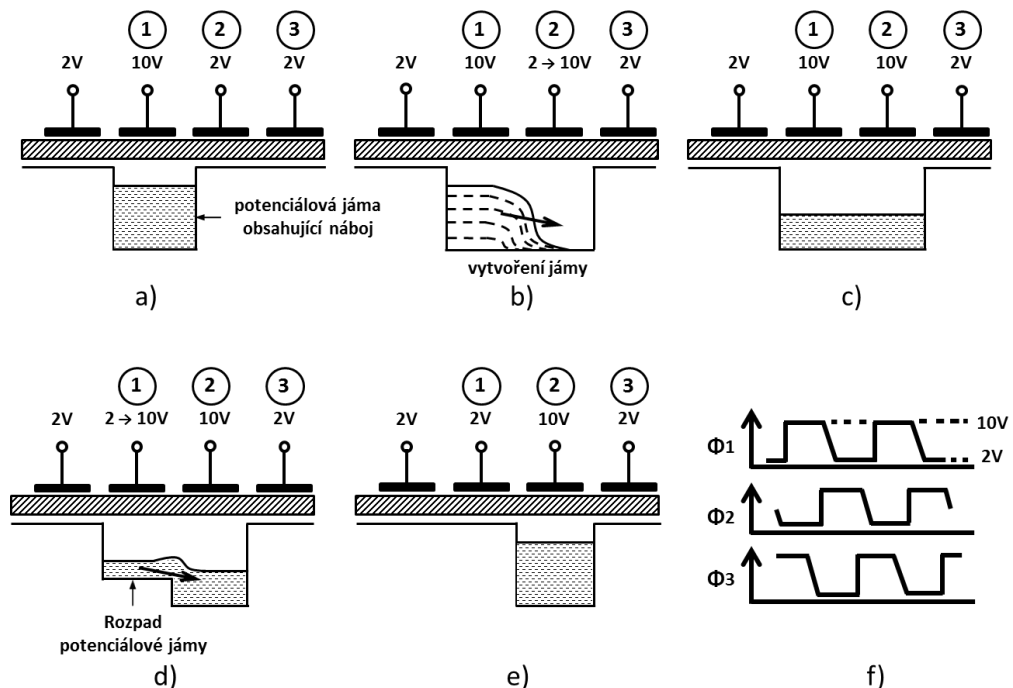
Obr. 2 – Průřez CCD čipem [26]

Následně je nutné náboje z těchto elementů zpracovat. K tomuto účelu jsou přímo na čip mimo výše zmíněných buněk při výrobě implementovány další analogové bloky. Jde o vertikální a horizontální paměťové registry (u některých typů čipů jen horizontální), resetovací tranzistor, operační zesilovač a další součásti [23].



Obr. 3 – Blokové schéma CCD čipu [23]

Po uzavření uzávěrky je na elektrody přivedeno vhodně tvarované napětí. Tím vznikají postupně posunuté potenciálové jámy a elektrony jsou „přelévány“ ve směru napětí z jedné nábojové studny do sousední, zatímco se na předchozí elektrodě napětí souběžně snižuje. Tímto způsobem jsou elektrony přesouvány po ploše čipu [21].



Obr. 4 – Pohyb potenciálu řízeného třífázovou technikou [25]

Nesmí při tom docházet ke ztrátám, jelikož náboj je analogovým modelem obrazu, který je úrovnově digitalizován až na výstupu v analogově-digitálním převodníku. Teprve

digitalizovaný signál je rezistentní vůči možným poruchám. Je nezbytné brát v úvahu, že objem potenciálové jámy je omezen a tudíž po jejím „naplnění“ nelze akumulovat další signál, obraz je v tomto místě nasycen (bílý). V případě dopadu velkého množství světla na pixel, může dojít k přetečení jeho kapacity a přebytečné elektrony se následně přelíjí do sousedních elementů. Dochází k jevu blooming, který se projeví nežádoucím zvýšením jasu sousedních elementů, takže okolo přesvětleného místa vzniknou na fotografii rovnoběžné čárky nepravidelných délek [33].

Až účinně převede všechny elektrony do jednoho krajního pixelu k výstupnímu zesilovači. Tento zesilovač pak převede elektrický náboj odpovídající počtu nachytaných elektronů na napětí. Napětí se objeví na výstupním pinu CCD čipu. Elektronika kamery pak musí toto napětí změřit (převést na číslo pomocí analogově/digitálního převodníku) pro každý pixel. Informace o náboji akumulovaném v každém pixelu (a tedy o množství světla, která do každého pixelu dopadlo) tvoří datový soubor reprezentující obrázek [21].

## 2.2 Způsoby přenosu náboje po CCD čipu

Jakmile je na pixel zachycen a uchováván náboj lokálními hranicemi, existují různé metody přenosu naakumulovaného náboje po ploše CCD čipu k fyzicky oddělenému zesilovači od pixelů. V dnešní době je používáno pět základních technik přenosu náboje. Důležité je mít na paměti, že níže vysvětlené způsoby přenosu probíhají na všech pixelech zároveň, spojené daným řádkem, nebo sloupcem [24].

### 2.2.1 Čtyřfázová technika ( $4\Phi$ )

Uspořádání posuvných registrů CCD čipu jsou tvořena takovým způsobem, jakým jsou sestaveny jednotlivé polykřemíkové elektrody, které vytvářejí dlouhý řetěz bran podél jedné z os tvořící sloupec posunu náboje. Přivede-li se vysoké napětí na jednu z těchto bran, dojde pod ní k vytvoření potenciálové jámy, zatímco nízké napětí se zde jeví jako potenciálová překážka. K vymezení jednoho pixelu se využívají čtyři brány. Po přivedení vyššího napětí na brány  $\Phi_1, \Phi_2$  a při zachování nízkého napětí na  $\Phi_3$  a  $\Phi_4$ , může dojít k vytvoření potenciálových jam. Tyto jámy se mohou propojit a shromažďují fotoindukované náboje pixelu  $P_n$ . Pokud však přivedeme napětí na brány  $\Phi_1, \Phi_3$  a poté se změni jejich polarita (tzn. Na bráně  $\Phi_1$  od vysokého napětí k nízkému a  $\Phi_2$  od nízkého k vysokému), náboj je následně elektrostatikou donucen k pohybu pod  $\Phi_2$  a  $\Phi_3$ . Brány  $\Phi_2$  a  $\Phi_4$  následně obrátí své polarity a náboj se přelévá dál do jam vytvořených elektrodami  $\Phi_3$

a  $\Phi_4$ . Tento proces probíhá tak dlouho, dokud se náboje nepřenesou pod brány  $\Phi_1$  a  $\Phi_2$  následujícího pixelu  $p_{n+1}$ , který zakončuje jeden cyklus přenosu. Cyklus se opakuje do té doby, než se přenesou všechny náboje k výstupu [24], [35].

### 2.2.2 Třífázová technika ( $3\Phi$ )

Třífázová technika je podobná čtyřfázové, avšak rozdílný je zde počet potenciálových jam. U této techniky je jeden pixel sestaven ze třech bran. Potenciálová jáma se objevuje pouze pod branou  $\Phi_1$ , zatímco brány  $\Phi_2$  a  $\Phi_3$  tvoří potenciálové bariéry. Pohyb náboje probíhá stejně, jako tomu bylo u 4 fázové techniky. Postupně dochází ke zvyšování napětí na bránách a přelivu od jedné k následující. Jeden cyklus přenosu končí v případě, že se náboj přelije z brány  $\Phi_1$  na bránu  $\Phi_1$  následujícího pixelu. Výhodou této techniky je využití pouze třech bran pro vymezení jednoho pixelu, což umožňuje větší hustotu (a vyšší rozlišení) CCD čipu. Nevýhodou třífázové techniky se jeví složitější časování, které musí být generováno k řízení zařízení [24], [35].

### 2.2.3 Technika pseudo dvoufázová ( $P2\Phi$ )

Tato techniky napodobuje  $\Phi_4$  techniku s tím rozdílem, že k řízení přenosu využívá pouze dvou fází. Na pixel připadají 4 brány (kontakty). Každá elektroda je spojena se dvěma branami místo jedné. K zajištění správného pořadí přenosu mezi pixely, je pod jednou branou z každé elektrody umístěn materiál snižující potenciál elektrostatického pole, což vede k vyspádování jámy. Jakmile je dosaženo korektní kontinuity, může dojít k přenosu pouze pomocí dvou elektrod a tím snížení složitosti čipu. Nevýhodou je však složitější výroba [24], [35].

### 2.2.4 Technika pravá dvoufázová ( $T2\Phi$ )

Technika podobná  $P2\Phi$ , nicméně navíc redukuje i počet bran na pixel. Správné funkce je dosaženo tím, že opět využívá materiálu snižujícího potenciál. Na rozdíl však od  $P2\Phi$  má schopnost vysoké hustoty a velmi vysokého rozlišení [24], [35].

### 2.2.5 Technika virtuální fáze ( $V\Phi$ )

Pro tuto techniku je charakteristická pouze jedna brána a elektroda na každém pixelu. Využívá se zde třech různých materiálů způsobující postupně měnící potenciál. To má za následek vznik strmé jámy, stupňovitého charakteru a přesun náboje pomocí velkého napětí. Absence vrstvy polykřemíku na bráně  $1\Phi$  zapříčiňuje větší světelnou citlivost



(zejména v oblasti modré), protože odstraněná vrstva jindy částečně odráží a absorbuje světlo. Pomocí této techniky může být dosaženo vysoké hustoty pixelů, velké propustnosti mezi kontakty. Nicméně k nevýhodám patří časové výkyvy vyžadované  $1\Phi$  a degradace výkonu [24], [35].

### 2.3 Formáty snímání obrazu

Snímání obrazu lze provádět pomocí třech základních technik. V závislosti na technice snímání rozeznáváme následující způsoby:

- Bodové,
- Lineární,
- Plošné.

S ohledem na možnosti jejich využití v rámci praktické části, jsou jednotlivé způsoby v následujících podkapitolách stručně okomentovány.

#### 2.3.1 Bodové snímání

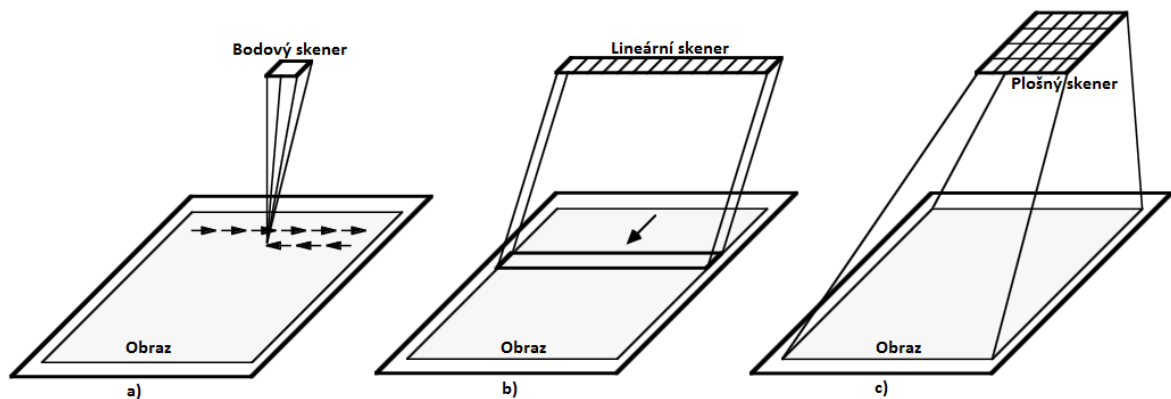
Využitím jediné buňky snímače nebo jediného pixelu, může být obraz snímán postupně. Výhodou tohoto způsobu snímání je vysoké rozlišení a rovnoměrnost snímané scény stejné pro celý obraz. Způsob snímání je zobrazen na Obr. 5a) [24].

#### 2.3.2 Lineární snímání

Řetězec detektorů je umístěn podél osy  $x$  a snímání probíhá po řádcích v ose  $y$ . Nejdříve je nasnímán obraz v podobě jednoho řetězce, následně proběhne odečtení těchto informací a proběhne přechod na další řádek. Fyzická délka lineárního CCD je omezena pouze velikostí křemíkové destičky použité pro výrobu čipu (Obr. 5b). Tento způsob snímání je mnohem rychlejší než bodové snímání. Mezi další výhody patří poměrně vysoké rozlišení a méně sofistikovaný skenovací mechanismus [24].

#### 2.3.3 Plošné snímání

Tvoří ho dvourozměrné pole detektorů a celý obraz je zachycen pouze s jedinou expozicí, čímž eliminuje potřebu jakéhokoliv pohybu detektoru nebo snímače. Tento způsob snímání je schopen probíhat s nejvyšší snímkovací frekvencí a největší přesností mezi pixely. Nevýhodou je omezení rozlišení v obou osách a nízký odstup signálu od šumu. Plošné snímání je zachyceno na Obr. 5c) [24].



Obr. 5 – Způsoby snímání [24]

## 2.4 Konstrukce CCD

V dnešní době existují různé varianty provedení CCD čipů. Nejvyužívanější konstrukcemi jsou: Full-Frame Transfer, Frame-Transfer, jenž využívají MOS kondenzátory jako detektory. Dále pak Interline Transfer, který využívá fotodiody a foto kondenzátory [24]. Konstrukce nám udávají uspořádání pixelů na čipu, které mohou být organizovány několika způsoby [21]:

### 2.4.1 Lineární CCD

Tvoří jej jediná řada pixelů. Lineární CCD bývají používány v případech kdy je zapotřebí snímat pouze jednorozměrný obraz (např. při detekci spektra). I dvourozměrný obraz ale může být vytvořen pomocí lineárního snímače — stačí, aby se detektor nebo cílový objekt pohyboval a obraz je vytvořen postupným snímáním řádek po řádku [21].

### 2.4.2 Maticové (plošné) CCD

Pixely akumulující světlo jsou v maticových CCD organizovány do sloupců a snímání probíhá najednou. Využívají se v digitálních fotoaparátech, kamerách a také v astronomických CCD kamerách. Nejčastějšími architekturami jsou FF, FT, IL.

#### 2.4.2.1 Full-Frame (FF)

Čip vystavuje celou svou plochu světlu [21]. Jde o nejjednodušší konstrukci jak na výrobu, tak k aplikaci. Skládá se z paralelního a sériového CCD posuvného registru a zesilovače signálu. Obraz je opticky promítnut na paralelní pole, které funguje jako obrazová rovina. Zařízení následně rozdělí obraz mezi diskrétní prvky definované počtem pixelů, neboli provede kvantování scény. Výsledné řádky informací scény jsou posunuty do paralelního

registru a následně do sériového, který poté posouvá řadu informací na výstup jako sériový proud dat. Tento proces se opakuje, dokud nejsou všechny řádky přeneseny mimo čip. Kde je následně celý obraz rekonstruován [24]. Viz Obr. 6a). Vzhledem k tomu, že je paralelní registr použit pro detekci scény a čtení, je nezbytné použít mechanickou závěrku, nebo synchronizované osvětlení bleskem. V odlišném případě by dopadající světlo rozmazalo čtený obraz.

Jednoduchost konstrukce FF dovoluje CCD snímat s nejvyšším rozlišením a největší hustotou pixelů. Proto se jeví jako nejvhodnější ke snímání slabých zdrojů světla v astronomii, protože snímají světlo největší plochou. Všechny CCD čipy se skutečně vysokou kvantovou účinností jsou FF čipy [21], [24].

#### **2.4.2.2 *Frame-Transfer (FT)***

FT CCD se skládá ze dvou oblastí, avšak principem je velmi podobná FF architektuře. Odlišnost spočívá v přidaném identickém paralelním registru – ukládací sekce (Viz Obr. 6b), která však není fotosenzitivní. Je překryta neprůhlednou vrstvou. Jakmile je expozice ukončena, proběhne rychlý přesun zachyceného obrazu z fotocitlivého pole (obrazová sekce) do ukládací sekce. Následně relativně pomalu probíhá čtení z ukládací sekce do horizontálního registru, jak je popsáno v FF konstrukci. Zde však nehrozí nebezpečí rozmazání dopadajícím světlem. Tato vlastnost je také nazývána „elektronická závěrka“. Nicméně tento způsob vyčítání má své limity. Především elektronická závěrka nedovoluje exponovat temné snímky — kamera musí být vybavena mechanickou závěrkou v každém případě, jinak nebude schopna pořizovat temné snímky automaticky, bez obtěžování pozorovatele zakrýváním tubusu (což může být u otevřeného tubusu dost velký problém) [21], [24].

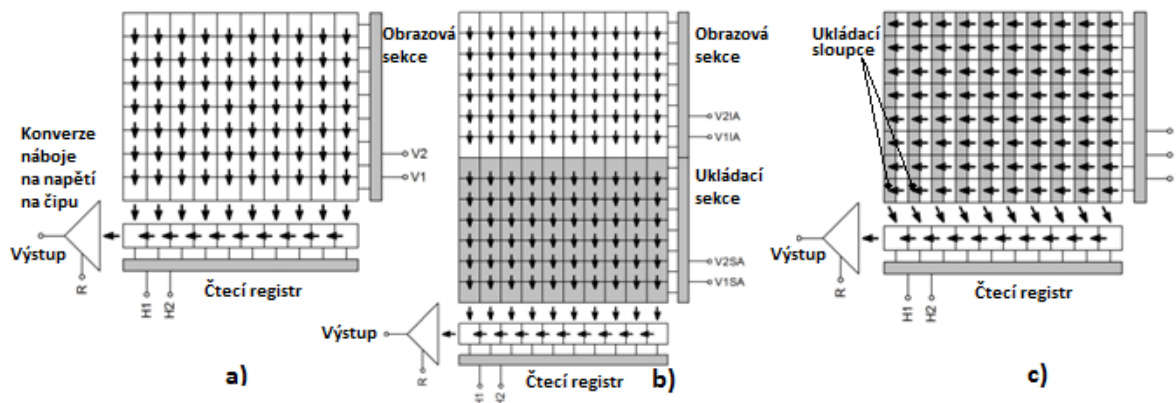
Negativní vlastností FT čipů je zejména jejich cena. Výroba velkých křemíkových čipů bez vadných pixelů je velmi nákladná a FT čipy mají dvojnásobnou plochu ve srovnání s FF čipy. To je také jeden z důvodů proč se výroba FT čipů postupně opouští [24].

#### **2.4.2.3 *Inter-Line (IL)***

Tento typ konstrukce CCD pracuje podobně jako FT (také je vybaven elektronickou závěrkou), ale jeho zacloněná plocha je prokládána s aktivní foto citlivou plochou. Každý lichý sloupec akumuluje světlo, sudé sloupce jsou překryty neprůhlednou vrstvou. Jakmile

expoziční době skončí, liché sloupce jsou velice rychle přesunuty do pozic sudých sloupců. Ty jsou pak postupně přesouvány do horizontálního registru a digitalizovány (Obr. 6c) [24].

Prokládání aktivních a neaktivních sloupců redukuje plochu, kterou čip shromažďuje světlo. Tento jev může být částečně kompenzován pokročilými výrobními postupy (např. aplikací mikročoček) [24]. Další nevýhodou IL je jejich složitost, což vede k vysokým cenám.

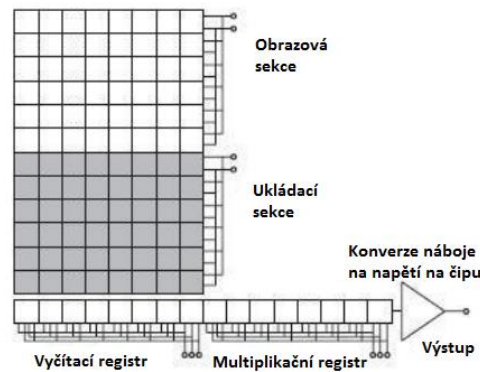


Obr. 6 – Typy konstrukcí maticového CCD [zdroj: vlastní zpracování]

## 2.5 EMCCD

Jde o kvantitativní technologii digitálních kamer, která je schopna detekovat jednotlivé fotony při zachování vysoké QE (kvantové účinnosti – jedná se o pravděpodobnost, s jakou bude foton absorbován vrstvou křemíku). Zásadní omezení vychází z podstaty nábojového zesilovače CCD. Na rozdíl od běžných CCD čipů, EMCCD není limitován šumem vzniklým při čtení z výstupního zesilovače, a to dokonce i při čtení ve velké rychlosti. Je-li vyžadován vysokorychlostní chod, šířka pásma nábojového zesilovače musí být tak široká, jak jen je to možné. Avšak platí základní zásada, stupeň šumu stoupá spolu s šířkou pásma zesilovače. Pomalé skenování CCD je způsobeno relativně malou šířkou pásma, a proto mohou být data čteny pouze při mírné rychlosti zpravidla menší než 1 MHz. EMCCD kamery jsou schopny vyhnout se takovému to omezení. Zesílením nábojového signálu je dosaženo přidáním multiplikačním registrem (elektronový násobič - EM) za klasický sériový registr (viz Obr. 7). Tento registr nám dovoluje multiplikovat slabé signály ještě předtím, než nějaký šum vlivem výstupního zesilovače vznikne, a tak jsme schopni zachovat bezprecedentní citlivost při vysokých rychlostech [28], [29].

Většina EMCCD využívá plošné konstrukce FT, znázorněna na Obr. 7. Proces snímání obrazu probíhá téměř identicky, jako tomu bylo u výše popsaného zpracování FT na CCD čipu [29].



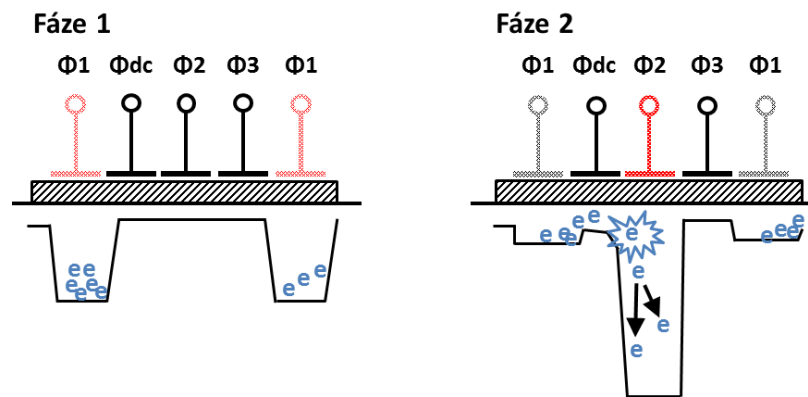
Obr. 7 – Schéma EMCCD čipu [29]

### 2.5.1 Fyzikální princip EMCCD

K amplifikaci signálu dochází v multiplikačním registru (Obr. 8), který obsahuje několik set fází. K procesu zesílení dochází v každé z nich prostřednictvím jevu známého jako časově indukovaný náboj (CIC), ke kterému běžně dochází v každém CCD čipu. Časově indukovaný náboj je běžně považovaný za veličinu, která by měla být co nejmenší, ne však ve spojitosti s EMCCD čipy. Při průchodu skrze registr je zde velmi malá, ale určitá pravděpodobnost, že elektrický náboj bude schopen vytvořit další elektron vlivem elektronové ionizaci [29].

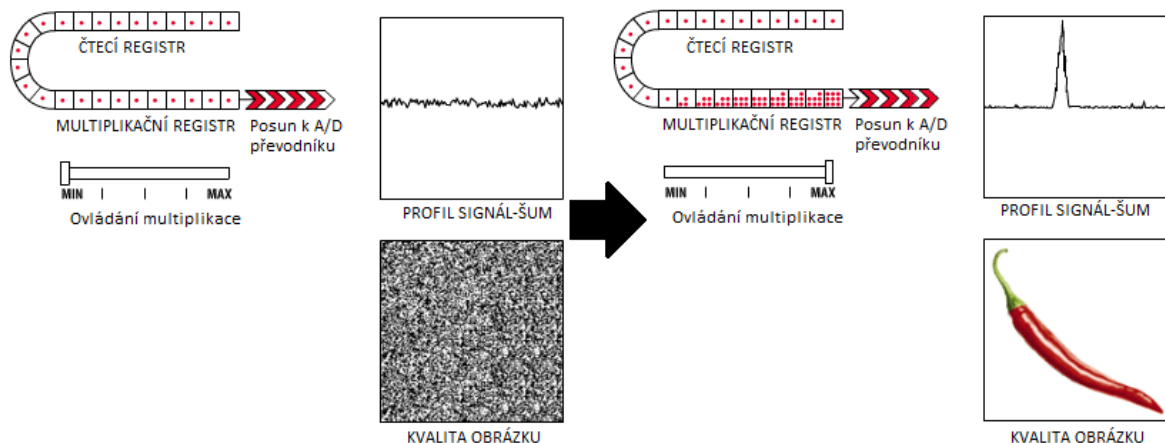
**Elektronová ionizace:** dochází k ní v případě, že má elektrický náboj dostatečnou energii k vytvoření další pár elektron-díry. Jak kolidující, tak nově generovaný elektron se dále pohybují v pásmu vodivosti a nabývají energie, kterou mohou uplatnit v dalších kolizích. Tímto způsobem dochází k zesílení. Aby docházelo k tomu to jevu, EMCCD čipy jsou přizpůsobeny dvěma způsoby:

1. Pravděpodobnost, že elektrický náboj vytvoří jakékoliv další elektrony, je zvýšena dodáním větší počáteční energie v podobě vyššího napětí.
2. EMCCD čip je navržen se stovkami fází. V každé z nich může dojít k ionizaci, a přestože pravděpodobnost amplifikace nebo multiplikace v jedné z fází je malá, tak v porovnání s celým registrem je šance na kolizi velmi vysoká. Takto lze dosáhnout zesílení v řádech tisíců [29].



Obr. 8 – Vznik sekundárního elektronu [zdroj: vlastní zpracování]

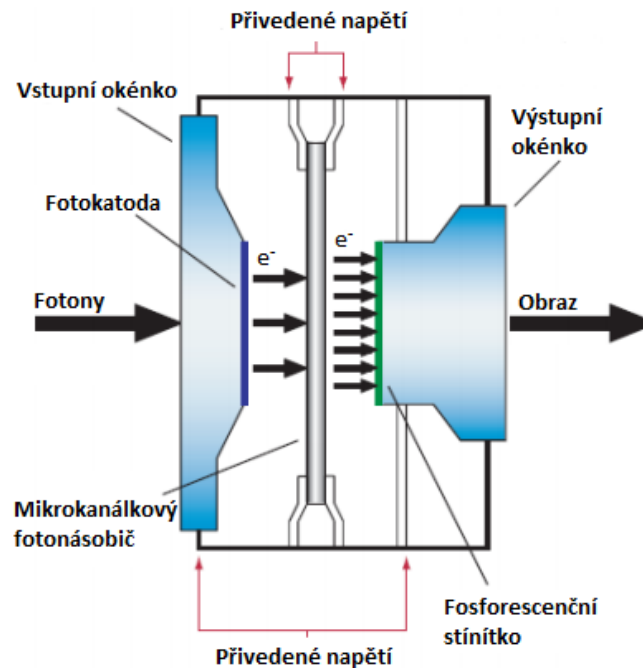
Pravděpodobnost multiplikace náboje se mění v závislosti na teplotě. Čím nižší je teplota, tím vyšší je pravděpodobnost a tudíž i zesílení EMCCD. Pravděpodobnost můžeme rovněž zvýšit s rostoucím napětím vstupujícího do registru. Vhodným nastavením teploty a napětí působící na senzor EMCCD kamery, tedy zvýšením napětí z  $\sim 20\text{V}$  na  $25\text{-}50\text{V}$  je možné dosáhnout zesílení v řádech tisíců (viz Obr. 9), na základě typu použitého snímači.



Obr. 9 – Ukázka před a po zesílení signálu [zdroj: vlastní zpracování]

## 2.6 ICCD

Tento typ čipu se skládá ze dvou částí. První je chlazený CCD čip, před který je umístěn fosforescenční stínítko a intenzifikátor (speciální násobič intenzity dopadajícího světla). Přidaný násobič zde zastává funkci stejného principu, jako běžný dynodový fotonásobič, ovšem v miniaturních rozměrech. Celé zařízení lze ve zkratce popsat jako fotokatodu, mikrokanálkový fotonásobič (MCP) přidaný před CCD čip a fosforescenční stínítko [31], [36].



Obr. 10 – Schéma ICCD čipu [32]

Schematicky je celý ICCD čip zachycen na Obr. 10. Na vstupu dopadají jednotlivé fotony na fotokatodu a dochází k emisi elektronů. Následně dochází k urychlení elektrickým polem, obvykle dvou za sebou zařazené mikrokanálových destiček, kde dochází k multiplikaci. Destičky jsou vyrobené z materiálu s vysokou rezistivitou a mají voštinovou konstrukci tvořící velice malé mikrokanálky. Pro zajištění dopadu elektronů na stěnu mikrokanálků, bývá osa těchto mikrokanálků obvykle mírně odkloněná od osy destičky. Vzniklý shluk elektronů potom dopadem na fosforescenční stínítko vygeneruje optický záblesk. Ten je snímán z obrazovky nízkošumovým CCD čipem. Zesílení iCCD je způsobeno pevným napětím na MCP. Toto elektrické napětí je přivedeno na celou destičku, takže elektrony jsou urychlovány ve směru osy destičky. Během svého letu dochází k nárazům do stěny kanálku a vyrážejí z nich tak další elektrony. Ve výsledku vzniká stejný násobící efekt, jako v dynodovém fotonásobiči. Použití dvou destiček odkloněných v různých směrech je z toho důvodu, že nabývají při stejném přivedeném napětí větší multiplikační efekt. Tento jev je dán větší pravděpodobností dopadu elektronů na stěnu v místě přechodu mezi destičkami [31], [36].

## 2.7 Dynamický rozsah

Za dynamický rozsah CCD, ale i CMOS je považován poměr mezi nejvyšší mezivrcholovou hodnotou  $U_{vmax}$  napětí obrazového signálu (obvykle nazývané *saturační*

napětí) k nejmenšímu rozlišitelnému napětí  $U_{vmin}$  na impedančně uzpůsobeném výstupu snímače. Velikost  $U_{vmin}$  může být definována např. jako  $k$ -násobek souhrnu všech rušivých signálů  $\sum U_{ruš}$  při nulovém osvětlení snímače. Jelikož každý snímač je schopen zachytit pouze určitý rozsah jasů. Nejjasnější bod tohoto rozsahu bývá označován jako *bílý bod* a nejtmaší bod je nazýván *černý bod*. Dynamický rozsah je formulován jako bezrozměrná veličina, dána následujícím vztahem (1) [34]:

$$DR = \frac{U_{vmax}}{U_{vmin}} = \frac{U_{vs}}{k \sum U_{ruš}} \quad (1)$$

Konstanta  $k$  závisí od užití a může se pohybovat v rozsahu 1-10. Pro možnost srovnání dynamických vlastností odlišných snímačů je vhodné určit maximální dosažitelný  $DR_{max}$  (viz vztah (2)) pro  $k = 1$  [34].

$$DR_{max} = \frac{U_{vs}}{\sum U_{ruš}} \quad (2)$$

Výpočet dynamického rozsahu EMCCD čipů je o něco složitější a to příznivým ovlivněním EM zesílení, které má dopad na detekční limity. Dynamický rozsah jde zde dán součtem maximální kapacity potenciálové jámy a zesílením registru čipu.

### 2.7.1 Odstup signálu od šumu (SNR)

Je definován poměrem síly signálu a součtu výkonů šumů na pozadí, které jsou v signálu obsaženy. Maximální hodnota  $SNR_{max}$  (definovaná vztahem (3)) je dána podobně jako dynamický rozsah, avšak dosahuje značně vyšších hodnot, protože se ve jmenovateli vyskytují pouze šumová napětí. Hodnota SNR klesá se zmenšováním obrazového signálu  $U_v$ . Největší je tedy pro saturační napětí  $V_{vs}$

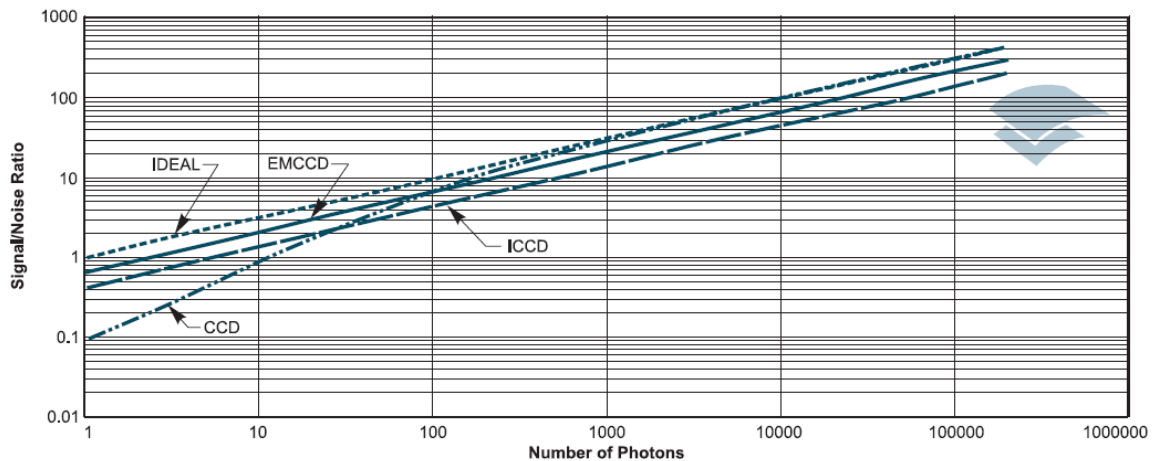
$$DR = \frac{U_{vs}}{\sum U_{š}} \quad (3)$$

Kde  $U_{vs}$  představuje saturační napětí snímače na jeho výstupu vyjádřené ve [V] nebo také počtem elektronů v plně naplněné potenciálové jámě snímače při tzv. *saturační expozici*.  $\sum U_{š}$  pak představuje souhrn šumových signálů různého charakteru [34].

## 2.8 Srovnání CCD, EMCCD a ICCD

Porovnání jednotlivých čipů je možné na základě SNR k počtu fotonů. Viz následující Obr. 11.





Obr. 11 – Srovnání čipů [38]

Nicméně z výše uvedeného grafu nelze usuzovat, že pouze jeden z čipů bude nejvhodnější pro jakoukoliv aplikaci v měření. Pro silné signály se jeví nejvhodnější CCD čip. Pro slabé signály s možnou tolerancí šumu poté EM-CCD a pro velmi slabé signály iCCD.

## 2.9 Chlazení kamery

Všechny typy CCD čipů profitují z nízkých teplot okolí. Samotná tepelná energie stačí na to, aby vlivem jejího působení excitovaly nadbytečné elektrony do obrazových pixelů, které již nelze odlišit od skutečných obrazových foto-elektronů. Tento proces vede ke vzniku tzv. temného šumu. Při ochlazení o každých 6 - 7°C, dochází k dvojnásobnému snížení celkové míry temného šumu. Tento jev má však také své meze. Většina CCD čipů není schopna správně pracovat pod teplotou -120°C [27].

Kamera Andor Luca S 658M využívá termoelektrického chlazení, jenž je založeno na Peltierově efektu. Díky tomu to jevu lze soustředit chladící účinek na velmi malou plochu a teplota se dá regulovat změnou velikosti napájecího proudu.

## 2.10 Slučování pixelů (Binning)

Jedna z významných vlastností CCD čipů je schopnost „slévat“ náboje okolních pixelů během vyčítání (anglicky označováno slovem binning). Digitalizovaný náboj ve výstupním uzlu pak představuje součet osvětlených pixelů slitých dohromady [21].

Pixely je možné slučovat v horizontálním i vertikálním směru. Horizontální binning vznikne, v případě kdy je horizontální registr posunut vícekrát, aniž by byl mezi jednotlivými posuny inicializován výstupní bod čipu. Vertikální binning vzniká vertikálním posunutím obrazu do horizontálního registru, aniž by byl mezi posuny

horizontální registr vyčten. Kombinace těchto dvou metod binningu vede k nahrazení čtverce nebo obdélníku sousedních pixelů jediným bodem obrazu [21].

V případě binningu  $2 \times 2$  dochází ke kombinaci  $2 \times$  vertikálního a  $2 \times$  horizontálního binningu. Neboli nastává paralelní vyčítání náboje, které je prováděno ze dvou řad pixelů a následně přeléváno do sériového registru. Tyto náboje jsou posléze sloučeny do potenciálové jámy. Náboj je posunut do výstupního zesilovače, kde se přemění na napětí ještě předtím, než je odveden z čipu k dalšímu zesílení a digitalizaci. Maximální počet pixelů, které je možno sloučit, zpravidla závisí na elektronice kamery a na jejím firmwaru. Kamera Luca S 658M, použita ke sběru dat nabízí binning v kombinacích  $1 \times 1$ ,  $2 \times 2$  a  $4 \times 4$ . Viz Tab. 3 [21], [30].

Tab. 3 – Snímková frekvence (fps) [zdroj: vlastní zpracování]

| Binning | Velikost rozlišení |           |           |
|---------|--------------------|-----------|-----------|
|         | 658 × 496          | 256 × 256 | 128 × 128 |
| 1 × 1   | 37,2               | 69        | 127,2     |
| 2 × 2   | 70,7               | 126,4     | 218,8     |
| 4 × 4   | 128,7              | 216,5     | 341,3     |

Mezi výhody vyčítání CCD čipu s binningem patří rozlišení výsledného obrazu (počet pixelů), které je menší, ale citlivost čipů výrazně roste. Dochází k lepšímu odstupu signálu od šumu. V případě binningu  $2 \times 2$  představuje každý bod obrazu sloučení 4 pixelů a signál je tedy  $4 \times$  vyšší. Binning může být velmi výhodný, pokud jsou pixely kamery podstatně menší než nejmenší detail, který daný objektiv dokáže zobrazit. Například z důvodu dlouhé ohniskové vzdálenosti apod. Binning v takovém případě zmenší objem dat, zrychlí digitalizaci a zvýší citlivost, aniž by omezil úhlové rozlišení — obraz v plném rozlišení by byl zbytečně převzorkovaný [21].

### 3 NĚKTERÉ METODY ANALÝZY OBRAZU

Detekce rozličných tvarů nebo objektů ve snímku je důležitým elementem veškerých operací zahrnující práci s obrazem. Předmětem zpracování a případné detekce obrazu se jeví obrazová informace snímané scény, která do počítače vstupuje nejčastěji kamerou. Cílem je porozumění obsahu obrazu.

#### 3.1 Zpracování obrazu

Proces zpracování a rozpoznávání obrazu nasnímané scény lze obvykle rozdělit do několika základních fází:

- Snímání a digitalizace obrazu,
- Předzpracování obrazu,
- Segmentace obrazu,
- Porozumění obsahu obrazu [42], [43].

Prvním fází zpracování obrazu lze označit *snímání a digitalizace* obrazu. Získaný obraz je v číselné formě uložen do zařízení (např. počítače). Vstupní informací může být jas (z kamery), nebo při barevném snímání několik spektrálních složek (nejčastěji červená, zelená a modrá). Digitalizací se rozumí převod vstupního analogového signálu do diskrétního tvaru. Vstupní signál lze popsat funkcí  $f(x,y)$  dvou proměnných (souřadnic) specifických pro konkrétní obraz. Při procesu digitalizace je vstupní signál vzorkován a kvantován. Výsledkem je pak matice čísel popisujících *digitální obraz*. Jeden prvek matice bývá označován jako obrazový element, neboli *pixel* [42].

Druhá základní fáze se označuje jako *předzpracování* obrazu. Její cílem je potlačit šum a zkreslení vzniklé při digitalizaci a přenosu obrazu. Jindy je možné pomocí předzpracování zvýraznit určité rysy obrazu, podstatné pro následné zpracování [42].

Třetí a asi nejtěžší fází postupu zpracování je *segmentace*. Ta umožňuje v obraze detekovat jednotlivé objekty. Objektem je možno považovat tu část obrazu, která je z hlediska dalšího zpracování zajímavá [42].

Kvalitní segmentace je klíčová pro *pochopení obsahu obrazu* a většinu sofistikovaných metod zpracování obrazu. K dokonalé segmentaci je potřeba porozumění obsahu obrazu, neboli alespoň částečně tušit, co se na obraze nachází. Takto dojde k rozdělení obrazu na části, které úzce souvisí s oblastmi reálného světa, případně mají společné vlastnosti (např.

barva, tvar, textura). Soubor vzájemně se nepřekrývajících oblastí je pak výsledkem segmentace [42], [43].

### 3.2 Princip segmentace

K nejstarším a nejjednodušším metodám segmentace patří tzv. prahování (thresholding). Tato metoda je řazena mezi cenově nenáročnou a z hlediska výpočtu i mezi rychlé metody. Využití má spíše v jednodušších případech detekce (např. předměty na bílém pozadí). Většina objektů, oblastí obrazu je charakterizováno konstantní odrazivostí či pohltivostí svého povrchu. Takto lze využít určené jasové konstanty prahu k oddělení objektů od pozadí [43].

Důležitou roli u této metody hrají *histogramy*. Příkladem může být obraz v odstínech šedi, ze kterého vznikne histogram intenzity. Osa  $x$  udává stupně intenzity (např. 0-255) a osa  $y$  počet pixelů odpovídajících danému stupni šedi. Pro oddělení objektů od pozadí, je zapotřebí stanovit práh, který rozdělí obraz na barvu pozadí a barvu objektu. Následně každý bod, který má menší hodnotu než daný práh, je zařazen mezi body objektu a ostatní body lze nazvat body pozadí. Pro stanovený práh následně platí vztah (4):

$$g(i, j) = \begin{cases} 1, & f(i, j) < T \\ 0, & f(i, j) \geq T \end{cases} \quad (4)$$

kde  $T$  představuje práh. Prahováním se otestují všechny pixely  $(i, j)$  obrazu  $f$ . Body, jenž mají po segmentaci hodnotu 1, představují objekty. Hodnota 0 náleží pixelům pozadí [43].

Existuje několik způsobů využití principu prahování. Nejznámější z nich je *globální prahování*. U něhož je určený práh stejný pro celý obraz. Dále se využívá *lokální práh, prahování s více prahy* a nebo *poloprahování*.

### 3.3 Rozdílová metoda

Jde o jednoduchou metodu pro detekci pohybu v obraze, jenž využívá rozdílů mezi jednotlivými snímky pořízenými v odlišném časovém horizontu. Existují-li dva obrazy  $f_1$  a  $f_2$ , poté po jejich odečtení vzniká rozdílový obraz  $d$  dán vztahem (5). Jak znázorňuje vzorec níže, hodnotě 0 přísluší sobě odpovídající místa v obrazech  $f_1$  a  $f_2$ , které neprojevují výraznou změnu jasových úrovní mezi dobou pořízení obou obrazů [44].

$$d = \begin{cases} 0 & \text{pro } |f_1(x, y) - f_2(x, y)| < e \\ 1 & \text{pro } |f_1(x, y) - f_2(x, y)| \geq e \end{cases} \quad (5)$$

Zde  $e$  představuje kladné číslo, které určuje práh rozdílu jasových hodnot.

### 3.4 Metoda optického toku

Metoda zachycuje všechny změny obrazu v čase. Každému bodu je přiřazen  $n$ -rozměrný vektor, který má vypovídající hodnotu o jeho směru a velikosti rychlosti pohybu v daném místě [45].

Obecně lze dynamický obraz popsat jasovou funkcí času a polohy  $f(x,y,t)$ . Rozlišuje se pohyb v časoprostorové doméně a pohyb ve Fourierově doméně. Máme-li nasnímanou sekvenci složenou z 2D obrázků, pak ji lze chápat jako jeden 3D časoprostorový obrázek. Rozvojem do Taylorovy řady a zanedbání členů vyšších řádů, lze vypočítat rychlost následovně (6) [44], [45]:

$$r = (dx/dt, dy/dt)^T \quad (6)$$

## 4 STANOVENÍ CHYB A NEJISTOT MĚŘENÍ

Jakékoliv měření, ať již extenzivních nebo intenzivních veličin je zatíženo určitou nepřesností, která je způsobena nejrůznějšími negativními vlivy vyskytující se v měřicím procesu. Tyto vlivy se projeví odchylkou mezi naměřenou a skutečnou hodnotou sledované veličiny. Výsledek měření tak musíme hledat v určitém pravděpodobném rozsahu (tzv. chybovém intervalu), o který se může skutečná hodnota veličiny odlišovat od naměřené. Nejistoty měření tak substituuji vyjádření přesnosti měření pomocí chyb měření [40].

Ke zpracování výsledků ve fyzikálních a technických měřeních lze volit různé přístupy. Pro určení nepřesnosti měření existují dva základní postupy: určování přesnosti měření prostřednictvím relativních chyb přístrojů a absolutních a relativních chyb, avšak novějším a komplexnějším vyhodnocením se jeví stanovení pomocí nejistot měření [40], [41].

### 4.1 Chyby měření

Tato koncepce stanovení chybového intervalu byla kdysi jedinou možností jeho stanovení, nyní je jednou ze součástí zpracování nejistot měření. Chyby měření byly rozděleny následovně:

1. **Chyby systematické** – nevyplývá z metody měření (chyby soustavné, způsobené stárnutím a nepřesnostmi jednotlivých částí měřicího řetězce, měřicí metodou a chybou pozorovatele a byly obvykle alespoň částečně odstranitelné korekcí, kompenzací apod.)
2. **Chyby náhodné** – (chyby časově nahodile proměnné jak ve velikosti, tak ve znaménku). Náměr musí být vícenásobný, nelze je stanovit z jednoho měření.
3. **Chyby hrubé** – většinou způsobeny výjimečnou příčinou (závadou na některé části měřicího řetězce, nevhodnou měřicí metodou, nepozorností obsluhy). Takto naměřená hodnota se značně liší od ostatních [40], [41].

### 4.2 Nejistoty měření

*Nejistota měření je parametr přiřazený k výsledku měření, charakterizující rozptyl hodnot, které lze důvodně (racionálně a s určitou pravděpodobností) přiřazovat k měřené veličině [41].*

Nejistoty měření lze dělit dle způsobu vyhodnocení:

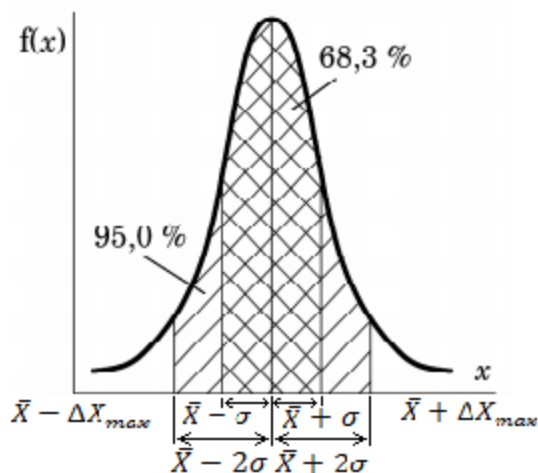
- Standardní nejistota typu A označovaná symbolem  $u_A$ ,
- Standardní nejistota typu B označovaná symbolem  $u_B$ ,
- Kombinovaná standardní nejistota označovaná symbolem  $u_C$ ,
- Rozšířená standardní nejistota označována symbolem  $U_{(X)}$ .

#### 4.2.1 Standardní nejistota typu A

Příčiny této nejistoty souvisejí s náhodným charakterem měřeného parametru. Statistickou analýzou série naměřených hodnot získaných opakovaným měřením veličiny  $X_i$  (je-li počet měření  $n$  alespoň 10) lze stanovit hodnotu výběrového aritmetického průměru  $\bar{X}$ . Na základě výběrového aritmetického průměru je možné určit standardní nejistotu typu A jako hodnotu směrodatné odchylky  $\sigma(\bar{X})$  dané vztahem (7):

$$u_A(x) = \sigma(\bar{X}) = \sqrt{D(\bar{X})} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n(n-1)}} \quad (7)$$

Pak  $D(\bar{X})$  představuje výběrový rozptyl (disperze) aritmetického průměru. Statistické rozložení (rozdělení) odchylek od výběrového průměru, tj. rozptyl hodnot, odpovídá v technické praxi nejčastěji rozdělení normálnímu (Gaussovu) [41].



Obr. 12 – Hustota pravděpodobnosti [40]

#### 4.2.2 Standardní nejistota typu B

Tento typ nejistot nejeví známky náhodného charakteru. Proto při opakovaném měření na sebe upozorní trvalým výskytem. Lze ji stanovit z charakteru měření, bez statistického výpočtu zpracovaných dat. Standardní nejistoty typu B jsou stanoveny na základě všech

možných informací a odhadnutelných příčin vzniku (nejistoty dané tolerancí součástí, vlivy stárnutí čidel, technickými parametry) [41].

#### 4.2.3 Kombinovaná standardní nejistota $-u_C$

Jedná se o sumaci nejistot typu A a B. V případě ohodnocení výsledku touto nejistotou, není nutné rozlišovat nejistoty typu A a B. Tato nejistota udává interval, ve kterém se s poměrně velkou pravděpodobností může vyskytovat skutečná hodnota měřené veličiny. [1]

#### 4.2.4 Rozšířená nejistota $U(x)$

Zavádí koeficient rozšíření  $k$  v případě potřeby zajištění ještě větší pravděpodobnosti správného výsledku měření. V technické praxi se nejčastěji volí hodnota koeficientu  $k = 2$ , jenž pro normální rozdělení odpovídá intervalu spolehlivosti 95% [40], [41]. Lze ji definovat vztahem (8):

$$U(x) = ku_C(x) \quad (8)$$

Kde  $u_C(x)$  je standardní nejistota.

Za rozšířené nejistoty lze považovat ty, pokud interval nejistot  $u_A$  vynásobíme konstantou rozšíření  $k$ . Pro rozšíření  $k = 2$  spadají hodnoty 95% z  $n$  měření (viz Obr. 12) a pro  $k = 3$  se uvažuje 99,7% [40].

Výpočet nejistot je považován za neoddelitelnou část zpracování výsledků měření a je zásadně zaokrouhlován na dvě platná místa (přednostně nahoru).



## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 5 LABORATORNÍ SESTAVA PRO STANOVENÍ ÚČINNOSTI PLYNNÝCH HASIV

Díky pokročilým technologiím lze v současné době demonstrovat a následně analyzovat chování plamene hořících paliv za přítomnosti hasiv v laboratorních podmínkách. Mezi nejčastěji sledované parametry patří oscilační kmitočet, intenzita vyzařování a barva plamene. Pro možnost sledování těchto veličin, byla zkonstruována experimentální sestava, která byla navržena a sestavena tak, aby umožňovala analýzu nepředmíseného plamene za přesně definovaných podmínek laboratorního měření. Tato metoda je podrobně popsána normami ISO 14520, NFPA 2001 [14]. Sestava byla navržena pro možnost sledování, sběru i následného vyhodnocování procesu hašení v časové návaznosti jednotlivých druhů hasiv pro stanovení MEC. Nachází se v laboratoři č. 211 Fakulty bezpečnostního inženýrství VŠB-TUO (dále jen FBI VŠB-TUO).

Předchozí měření realizovaná v laboratořích FBI VŠB-TUO prokázala, že hodnoty MEC stanovené pomocí metody pohárkového hořáku jsou v dobré shodě s daty publikovanými v zahraniční literatuře [46]. Nicméně lze konstatovat, že stanovení nejistot těchto měření a potřeba následné interpretace výsledků vyžaduje dodatečné úpravy metodiky sběru a zpracování dat. V rámci této bakalářské práce jsem proto navrhl modifikaci experimentální sestavy, jejímž účelem bylo zefektivnit postup stanovení MEC, umožnit získání důležitých informací o parametrech a chování plamene při aplikaci hasicí látky a kvantifikaci nejistoty měření.

### 5.1 Experimentální uspořádání a postup měření

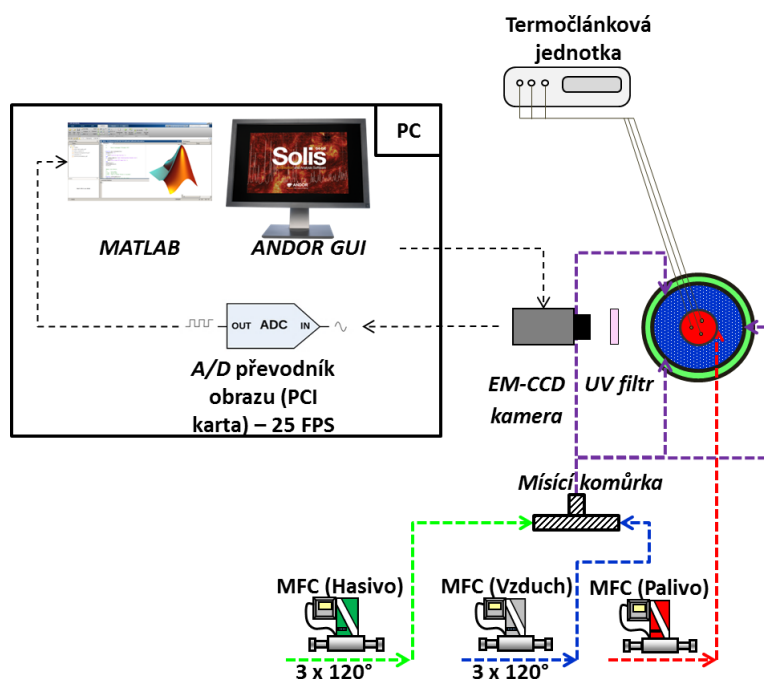
Při experimentálním měření je využíván standardizovaný postup blíže specifikovaný v NFPA 2001 a ISO 14520-1, viz kapitola 1.4. Sestava umožňuje nezávislou regulaci průtoku plyných médií (vzduchu, hasicí látky a paliva) o požadované čistotě. Rovněž je eliminován vliv okolního prostředí, zejména přísávání či proudění okolního vzduchu. Stanovení MEC je obvykle založeno na vizuálním pozorování, což zanáší do výsledku další chybu měření v podobě lidského faktoru. Zhašení plamene je však dynamickým procesem, který ovlivňuje řada fyzikálních a chemických jevů. V rámci experimentálních měření a stanovení MEC plyných hasicích látek, bylo proto sledováno také chování jednotlivých parametrů plamene v závislosti na změně koncentrace hasiv přidávaných do

obtoku pohárkového hořáku. Výsledkem experimentu jsou tedy poznatky, které by mohly být využity pro stanovení vlivu aplikace zvolených hasicích látek při skutečných požárech.

### 5.1.1 Popis měřicí sestavy (současný stav)

Dosavadní měření probíhala na experimentální sestavě popsané na Obr. 13, kterou je možné rozdělit na několik základních částí:

1. Modifikovaný pohárkový hořák, který je fyzikálním modelem požáru simulující nepředmísený (difuzní) plamen. Je velmi blízký plameni skutečného požáru.
2. Systém regulace průtoku a přívodu plyných médií. Jako média jsou zde označovány hasicí látky, paliva a vzduch.
3. Systém měření teploty porézní vrstvy.
4. Systém snímání a zaznamenávání obrazu.



Obr. 13 – Současná skladba sestavy [zdroj: vlastní zpracování]

#### 5.1.1.1 Pohárkový hořák

Konstrukční řešení pohárkového hořáku je plně v souladu s normativními doporučeními, viz Obr. 1, přičemž kelímek je vyroben z běžné oceli. Tento pohárek (kelímek) je vyplněn skleněnými kuličkami o průměru 3 mm, které jsou shora překryty nerezovým sítkem s velikostí ok 0,4 mm. Tyto kuličky měly zajistit rovnoměrné proudění plynu hořákem.

S přihlédnutím na charakter prováděných měření bylo snahou přiblížit se k ideálnímu stavu prostorově rovnoměrnému a laminárnímu proudění homogenní směsi vzduchu a hasicí látky při obtékání plamene. Proto bylo přistoupeno k úpravě přívodu plynných medií. Samotná modifikace tkví ve způsobu přívodu hasiva a vzduchu do difuzoru pohárkového hořáku. Do difuzoru byly instalovány 3 kusy hadicových násadců z mosazi o rozteči 120°. Způsob takto provedené obměny je v souladu s výše zmíněnými standardy. Dále byla v souladu s výše zmíněnými standardy provedena obměna difuzoru, který byl vyplněn vrstvou skleněných kuliček o průměru 6 mm (s výškou vrstvy 25 mm) umístěny na vrstvě drátěného síta z nerezové oceli s velikostí oka 0,3 mm.

K minimalizaci negativních vlivů okolního prostředí, byl instalován komínek z křemenného skla SIMAX s výškou 530 mm a tloušťkou stěny 2 mm, který je v souladu s ISO 14520-1.

#### ***5.1.1.2 Systém regulace průtoku a přívodu medií***

Prostředky přívodu dílčích medií lze rozdělit na systém přívodu plynného paliva a systém přívodu směsi (vzduchu a hasicí látky) do difuzoru pohárkového hořáku. O regulaci rychlosti průtoků pro zajištění konstantní rychlosti proudění medií, se staraly hmotnostní průtokoměry.

#### **Systém regulace průtoku:**

K dosažení konstantní rychlosti jednotlivých složek proudících do pohárkového hořáku bylo docíleno pomocí třech různých hmotnostních průtokoměrů. Volba daného typu byla závislá na vlastnostech proudící látky. Celkem byly využity tyto hmotnostní průtokoměry:

- F-201CV-1K0-ABD-33-V pro regulaci paliva,
- 202AV-M10-ABD-44V k regulaci vzduchu,
- F-202EV-ABD-33-K k řízení hasiva.

#### **Systém přívodu vzduchu a hasicí látky:**

Pro vytvoření směsi (vzduchu, hasicí látka), která byla přivedena přes mísící komůrku do difuzoru, použit filtrovaný vzduch z centrálního rozvodu laboratoře Fakulty BI skrze tlakovou polyamidovou hadici s vnitřním průměrem 10 mm. Vzduch byl řízen přes hmotnostní průtokoměr 202AV-M10-ABD-44V firmy Bronkhorst. K regulaci hasicí látky z tlakové láhve bylo použito měřidlo hmotnostního průtoku F-202EV-ABD-33-K a přívod do mísící komůrky se realizoval s pomocí tlakových polyetylenových hadiček.

**Systém přívodu paliva:**

Distribuce paliva probíhala z tlakových lahví. Dle metodiky stanovené samotnými standardy bylo použito palivo o požadované čistotě 99,95%. Přívod plynného paliva (metanu) byl uskutečněn za pomoci tlakových polyetylenových hadiček. Pro řízení průtoku plynného paliva bylo použito měřidlo hmotnostního průtoku firmy Bronkhorst F-201CV-1K0-ABD-33-V. Nominální přesnost použitého hmotnostního průtokoměru byla udávána dle kalibračního protokolu  $\pm 0,8\%$  odečtu + 0,2% celkového rozsahu. K ovládání a napájení měřidla byla využita digitální programovatelná elektronická jednotka Bronkhorst. Jako palivo byl využit metan, který byl do hořáku přiveden z tlakové láhve.

**5.1.1.3 Systém měření teploty porézní vrstvy**

Při změně poměru hasicí látky a vzduchu, dochází k nárazové změně prostředí v pohárkovém hořáku. Pro zachování kontinuity měření je nezbytné počkat na stabilizaci jevu hoření. Proto bylo nezbytně nutné monitorovat a hlídat výkyvy teplot v samotném centru hoření. K tomu byly použity termočlánky typu K, které jsou tvořeny Cr-Al (chromel-alumen). Jejichž pracovní citlivost se pohybuje v rozsahu -200 – 1250°C.

**5.1.1.4 Systém snímání a zaznamenávání obrazu**

K monitorování emise plamene a změny jeho charakteru bylo využito kamery Andor Luca S 658M, která disponuje EMCCD čipem. Díky lepší schopnosti světlocitlivého snímání, se jeví jako vhodný prvek pro sběr dat. Před kameru byl navíc umístěn optický filtr s minimální změnou propustnosti, který propouštěl pouze konkrétní část emitovaného spektra. Kameru lze propojit s počítačem skrze dvě různá rozhraní. Pro současné snímání a sběr dat je využíváno analogového propojení s počítačem pomocí karty NI-PCI 1410. Toto spojení je realizované pomocí BNC konektoru nacházejícího se na kartě. Komunikace probíhá spolu s kamerou přes stíněný koaxiální kabel o impedanci 75  $\Omega$ . Karta je osazena A/D převodníkem o rozlišení 10-bitů, jelikož však hodnoty rozsahu nejsou plynule měnitelné, je zde možnost převodu na 8-bitový režim. Druhým rozhraním bylo propojení kamery společně s počítačem pomocí USB kabelu a ovládání kamery skrze GUI Andor Solis.

### 5.1.2 Nedostatky měřící sestavy

V souladu s již provedenými měřeními v bakalářské a diplomové práci [46], [47] na výše popsané sestavě (Obr. 13), byly objeveny nedostatky měřící sestavy. Tyto nedostatky jsou dále rozebrány a je k nim navrženo patřičné řešení.

## 5.2 Návrh modifikované experimentální sestavy a postupu měření

Na základě informací z teoretických poznatků při praktické činnosti, jsou navrženy možné varianty úprav experimentální sestavy a systému sběru experimentálních dat, za účelem eliminovat tyto objevené nedokonalosti sestavy:

### 5.2.1 Rozbor nedokonalostí a návrh řešení

1. V případě měření **diplomové práce [46]** byly zpozorovány tyto nedokonalosti měřící soustavy:
  - a) **Stanovování MEC, bylo založeno na vizuálním pozorování pohárkového hořáku měřící osobou.**
  - b) **Ovládání průtokoměrů bylo prováděno manuálně a nezávisle jednoho na druhém.**

**Ad a)** Stanovování MEC daných paliv pouze vizuálním pozorováním plamene v pohárkovém hořáku, se nejeví jako objektivní rozhodovací technika. Při vysokých koncentracích hasiva, totiž dochází k abnormálnímu chování plamene. Plamen si nezachovává běžný tvar a emise vyzařování v oblasti viditelného spektra slábne. Zvláště pak v neoptimálních světelných podmínkách je zde vysoké riziko mylného stanovení uhasnutí plamene.

**Řešení:** Pořizování série snímků pomocí kamery Luca S, která disponuje lepší schopností světlocitlivého snímání. Pořízené snímky by byly vyhodnoceny na základě analýzy obrazu.

### Vyhodnocování obrazu

Proces vyhodnocování obrazu je nezbytně důležitým prvkem celého postupu měření. Jedině vhodným výběrem způsobu analýzy obrazu, je možné dosáhnout přesného stanovení MEC. Logické vyhodnocení série měření může probíhat na základě jedné ze zmíněných metod v kapitole 3 teoretické části. Většina postupů videodetekce plamene u provedených měření, byla založena na metodě detekce kouře pomocí rozdílové metody.

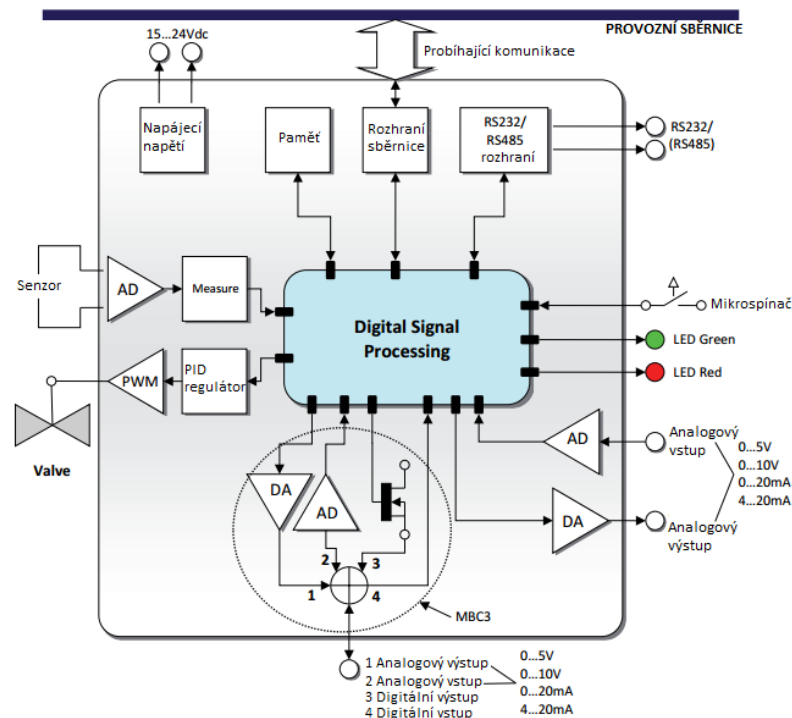
Jiná vyhodnocení probíhala na základě pulsace plamene a prahové intenzity signálu. Jinde využití techniky jsou blíže popsány v práci [37].

**Ad b)** Dosud používané průtokoměry je nutno ovládat manuálně a nezávisle jednoho na druhém. Tento fakt zapříčiňuje chvilkovou nestabilitu stavu plamene v pohárkovém hořáku.

**Řešení:** Instalací Multibus (MBC3) zařízení od firmy Bronkhorst na každý průtokoměr, lze dospět k možnosti automatizovaného ovládání všech průtokoměrů současně. Tuto možnost zajistí další zařízení Digilent Analog Discovery, pomocí kterého jde realizovat komunikaci mezi průtokoměry a počítačem.

### Sjednocení ovládání průtokoměrů

**Zařízení Multibus (MBC3)** má zabudovaný 72 MHz 32 bitový NXP ARM procesor a obsahuje A/D, D/A převodníky, díky nimž ovládá průtokoměry s minimálním zpožděním. Pomocí mikrokontrolérů je schopno komunikovat s periferním zařízením. Naměřený signál je digitalizován a zpracován přímo na senzoru pomocí firmwaru. Zpracované hodnoty se objeví na výstupu zařízení, kterým může být analogové rozhraní, digitální komunikace po lince RS232, nebo případně rozhraní sběrnice. Schéma rozšíření Multibus MBC3 je zobrazeno na Obr. 14.



Obr. 14 – Základní schéma [48]

Digitální přístroj je možné ovládat pomocí:

- Analogového rozhraní (0-5Vdc, 0-10Vdc, 0-20mA, 4-20mA)
- RS232 rozhraní (připojené k portu COM)
- FLOW-BUS
- PROFIBUS-DP
- DeviceNet
- Modbus
- EtherCAT

Ovládání skrze analogové rozhraní, RS232 a sběrnici je možné současně. Pomocí speciálního parametru *control mode* se dá nastavit preferované rozhraní ke komunikaci.

**Digilent Analog Discovery** je DAQ zařízení. Využívá kombinaci modulárního hardwaru a softwaru transformující počítač na uživatelem definovaný měřicí a řídicí systém. Díky tomuto prvku je možné propojit počítač se zařízením Multibus a řídit tak systém průtokoměrů z rozhraní MATLAB.

2. V rámci měření **bakalářské práce [47]** byly vyzorovány následující nedostatky.
  - a) **Omezené možnosti využití systému snímání.**
  - b) **Program Andor Solis neumožňuje komunikaci s dalším softwarem.**

**Ad a)** Sběr dat byl realizován pomocí karty NI-PCI 1410, která značně omezuje možnosti využití EMCCD kamery Luca S.

**Řešení:** Nahrazením nezbytné komunikace po koaxiálním kabelu (vyžadované kartou NI-PCI 1410) komunikací po USB rozhraní, dojde k eliminaci omezení snímkovací frekvence.

### **Úprava systému sběru a zpracování obrazu**

Navrhnutý způsob komunikace kamery s počítačem přináší několik výhod. Pro přenos obrazu se využívá analogového standardu PAL, který umožňuje přenášet prokládaný obraz o 50 pulsů, tedy s maximální snímkovací frekvencí 25 fps. Připojením kamery po USB rozhraní, lze dosáhnout 37,2 fps při maximálním rozlišení. Na základě vyšší snímkovací frekvence a vztahu pro vzorkování signálu je následně možná kvalitnější analýza oscilace plamene díky 18,6 snímcům za sekundu.



Napojením kamery napřímo do portu USB počítače se odstraní další zdroj chyb měření v podobě karty NI-PCI 1410. Samotný přístroj je osazen A/D převodníkem s rozlišením 14-bitů, který mu umožňuje dosáhnout mnohem vyšší linearity převodu při vysokém rozlišení. Díky specializovaným knihovnám v programu MATLAB, se tak naskýtá možnost přizpůsobení rozlišení kamery a binningu v závislosti na potřebné rychlosti snímání (fps). Díky tomu to připojení je možné dosáhnout následujících hodnot (Tab. 4), které jsou vyšší než při komunikaci s kartou NI-PCI 1410.

Tab. 4 – Parametry kamery Luca S 658 M [zdroj: vlastní zpracování]

| Luca S 658 M                      | USB         | NI-PCI 1410 |
|-----------------------------------|-------------|-------------|
| Rozlišení [pixelů]                | 658 x 496   | 658 x 496   |
| Velikost pixelu [ $\mu\text{m}$ ] | 10 x 10     | 10 x 10     |
| Velikost detektoru [mm]           | 6,58 x 4,96 | 6,58 x 4,96 |
| Snímková frekvence [FPS]          | 37,2        | 25          |

#### **Ad b) Absence propojení Andor Solis s dalšími perifériemi a programy.**

**Řešení:** Rozhraní USB přináší další výhodu v podobě ovládání kamery bez použití proprietárního softwaru Andor Solis. Zásadou využití USB rozhraní, lze dosáhnout zautomatizování a integrace dosud vícero používaných programů do jednoho softwarového rozhraní programu MATLAB.

### **5.2.2 Návrh dalších úprav prvků experimentální sestavy**

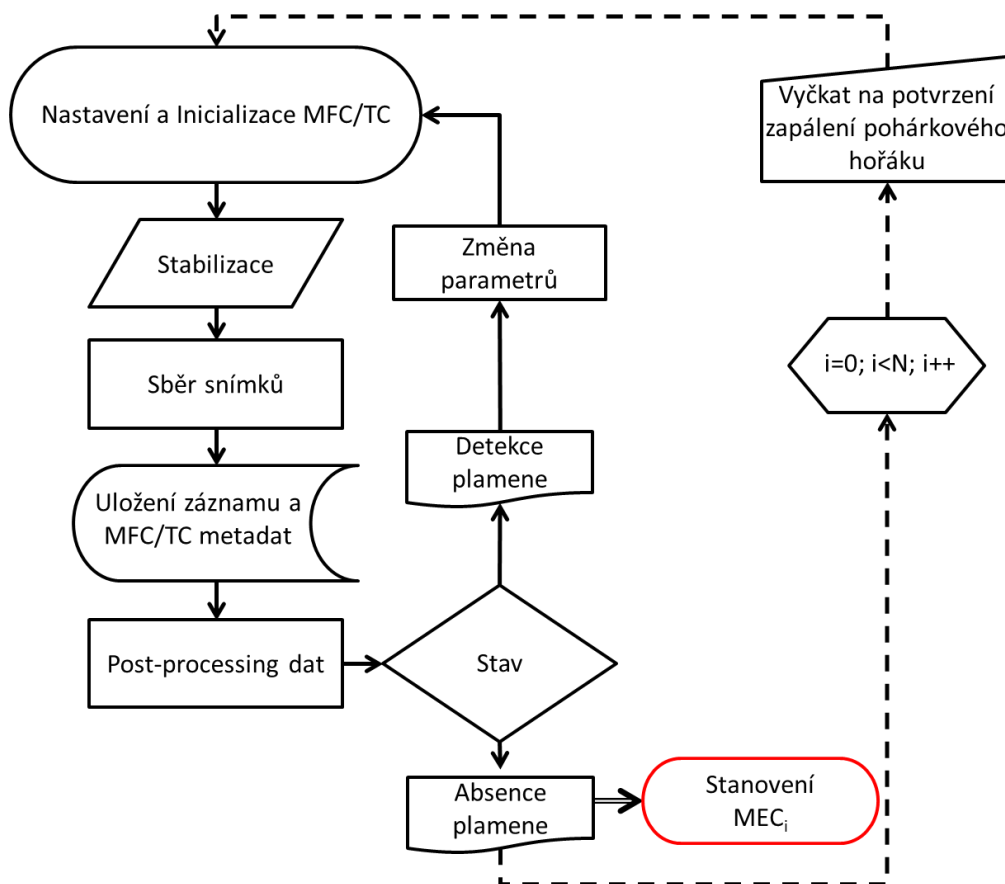
Pro ještě efektivnější využití experimentální sestavy jsou navrženy následující modifikace:

#### **5.2.2.1 Integrace termočlánků do řídicího procesu**

Začlenění termočlánku do procesu měření je jedním z důležitých parametrů pro zachování konstantních výchozích hodnot a urychlení procesu měření. Díky integraci do rozhodovacího algoritmu, lze urychlit samotný proces dosažení rovnovážného stavu a ustálení teploty porézni vrstvy pohárkového hořáku. Takto dojde k odstranění potenciačních chyb, které by mohly vzniknout v případě rozhodování člověka na základě pozorování.

### 5.2.2.2 Rozhodovací algoritmus

Veškeré navrhované úpravy měřicí sestavy je nakonec nutné sjednotit a integrovat do jednotného rozhodovacího algoritmu, skrze který bude možné řídit průběh měření. Navrhnutý vývojový diagram znázorněn na Obr. 15 má demonstrovat možné řešení, které je nutno naprogramovat v prostředí MATLAB. Pomocí vývojového diagramu lze sledovat postup programu.



Obr. 15 – Vývojový diagram skriptu [zdroj: vlastní zpracování]

#### Průběh programu:

V první fázi dochází k inicializaci zařízení a nastavení počátečních hodnot. Následuje stabilizace jednotlivých prvků měření. Dále je pořízena série snímků a uložení spolu s metadaty. Proběhne post-processing dat (neboli vyhodnocení), na jehož základě se určí stav plamene (hoří/nehoří). V případě, že je plamen detekován, dochází k přenastavení hodnot (zvýšení koncentrace hasiva). Tento postup se opakuje do té doby, než plamen zhasne. Jakmile se tak stane, vyhodnotí se MEC dané látky a celé měření se opakuje podle zadané hodnoty  $N$ .

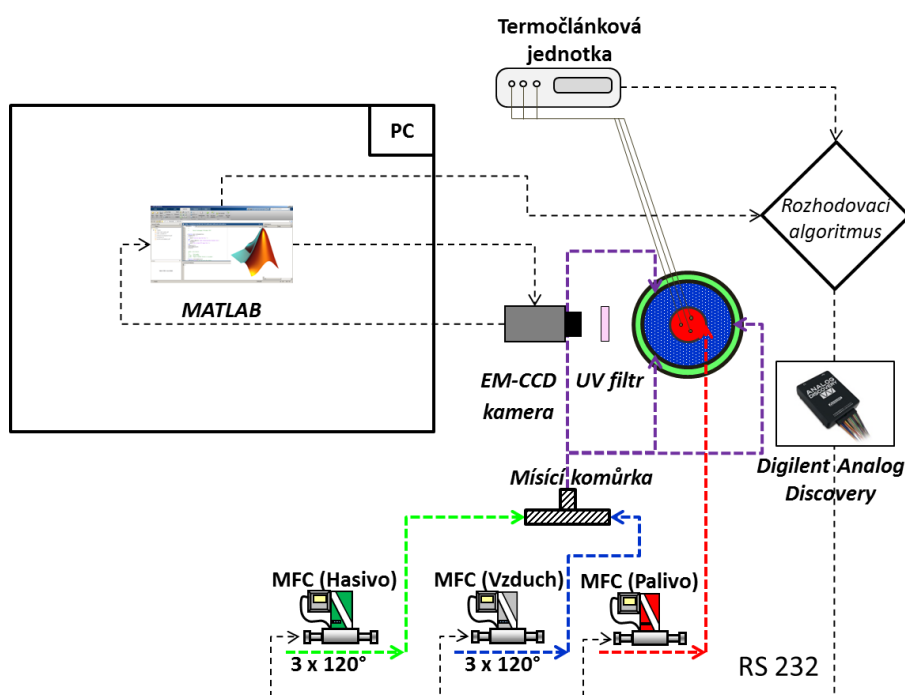
### 5.2.2.3 Automatizace řízení procesu v prostředí Matlab

Pro zautomatizování a integraci dosud používaných programů a prvků hardwaru, bylo navrženo použít softwarové rozhraní programu MATLAB. Jedná se o vysoce výkonný nástroj pro technické výpočty, umožňující počítačové simulace, měření, zpracování signálu a také prezentaci dat. Díky rozsáhlé databázi specializovaných knihoven (tzv. toolboxů), dovoluje uživateli přidávat další funkce. Spolu s programem Andor Solis (disponující grafickým rozhraním) určeného k ovládání kamery, byl dodán také systémový vývojový nástroj (Andor SDK) pro prostředí MATLAB. Pomocí tohoto prostředí lze dosáhnout rozsáhlejšího využití. Bude tak možné zastoupit jednotlivé dílčí funkce, dosud manuálně vykonávané na jednotlivých rozhraních.

Vytvořením skriptu (Obr. 15) pro prostředí MATLAB s využitím specializovaných knihoven dodaných ke kameře a zařízení digilent analog discovery bude možné nastavit požadované vstupní hodnoty, inicializovat a následně uvést do chodu všechny prvky sestavy současně bez zbytečných prodlev. Další výhodou je podpora ovládání chlazení kamery v tomtéž programu.

Stejně tak toolbox umožňuje ukládat a zpracovávat snímky ve formátu SIF. Takto pořízená série snímků má mnohem vyšší potenciál využití při následném analyzování.

Výsledná modifikace experimentální sestavy je zobrazena na Obr. 16.



Obr. 16 – vize skladby sestavy [zdroj: vlastní zpracování]

### 5.2.3 Interpretace výsledků měření

Na základě opakovaného stanovení MEC dle výše popsané procedury je možné výsledky navrženého měření prezentovat ve formě obecného vztahu  $\bar{X} \pm 2\sigma(\bar{X})$ , což charakterizuje hodnotu minimální hasicí koncentrace včetně a nejistoty (typu A) v intervalu spolehlivosti 95%. Kvantifikace nejistot typu B by vyžadovala provedení doplňujících analýz i experimentů, které přesahují rámec této bakalářské práce.

## ZÁVĚR

Hasicí látky lze rozdělit do několika kategorií, avšak tou nejdůležitější se jeví klasifikace na základě hodnocení hasicí schopnosti. Takto cílená měření byla v minulosti demonstrována na měřicí sestavě na Fakultě bezpečnostního inženýrství VŠB-TUO. Seznámil jsem se proto s jednotlivými prvky experimentální měřicí sestavy a problematikou měření. Určování hodnoty minimální hasicí koncentrace plyných hasiv, pro kterou byla experimentální sestava vybudována, zastupuje nejmenší množství hasicí látky v okolí plamene, kdy je možné hořící látku uhasit.

V první teoretické části této práce byla vypracována rešerše na téma hasebních látek se zaměřením na koncentraci hasiv s ohledem na jejich účinnost. K hlubšímu porozumění systému sběru dat, byla další pasáž teoretické části zaměřená na principy CCD čipů a jejich použití pro konkrétní aplikace. Jednou z důležitých vlastností pro sběr dat se jeví způsob analýzy obrazu, které byla věnována samostatná kapitola.

Cílem praktické části této práce bylo navrhnout měřicí systém pro stanovení MEC a také se zaměřit na návrh systému sběru dat. Pro naplnění tohoto cíle mi posloužila experimentální sestava nacházející se v laboratoři 211 VŠB-TUO. Na základě v minulosti provedených měření, jsem rozebral možné nedokonalosti této sestavy. Následně na to jsem navrhl možná řešení, která mají za cíl odstranit zpozorované nedokonalosti sestavy. Prostřednictvím návrhu vize takto realizované sestavy, tedy integrace jednotlivých dílčích částí, automatizovaného sběru dat pomocí navrženého algoritmu a analýzu vyhodnocování snímaného obrazu, lze předpokládat částečnou eliminaci nejistot měření a rychlejší sběr dat.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] ČSN EN 2 *Třídy požárů*. Praha: Český normalizační institut, 1994.
- [2] ČSN EN 2 ZMĚNA A1 *Třídy požárů*. Praha: Český normalizační institut, 2005.
- [3] HIRST, R a K BOOTH. Measurement of flame-extinguishing concentrations. *Fire Technology*. 1977, roč. 13, č. 4, s. 296 - 315.
- [4] SASO, Yuko, Saito NAOSHI a Yusaku IWATA. Scale effect of cup burner on flame-extinguishing concentrations. *Fire Technology*. 1993, roč. 29, č. 1, s. 22-33.
- [5] PREECE, Stephen, Paul MACKAY a Adam CHATTAWAY. The cup burner method - a parametric analysis of the factors influencing the reported extinguishing concentrations of inert Gases. [online]. 2003, s. 1-13 [cit. 2014-06-02]. Dostupné z: [http://www.nist.gov/el/fire\\_research/upload/R0301577.pdf](http://www.nist.gov/el/fire_research/upload/R0301577.pdf)
- [6] DLUGOGORSKI, B, KENNEDY, E a K. MORRIS. Thermal behaviour of cup burners. In: INTERFLAM PROCEEDINGS: *International fire science and engineering conference*. 1996, s. 445 - 458. ISBN 0951632094.
- [7] SAITO, Naoshi, Yoshio OGAWA, Yuko SASO, Chihong LIAO a Ryuta SAKEI. Flame-extinguishing concentrations and peak concentrations of N<sub>2</sub>, Ar, CO<sub>2</sub> and their mixtures for hydrocarbon fuels. *Fire Safety Journal*. 1996, vol. 27, issue 3, s. 185-200. DOI: 10.1016/S0379-7112(96)00060-4. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0379711296000604>.
- [8] MOORE, Ted A, Carrie A WEITZ a Robert E. TAPSCOTT. An update on NMERI cup-burner test results. [online]. 1998, 551 - 564 [cit. 2014-06-02]. Dostupné z: [http://www.glb.nist.gov/el/fire\\_research/upload/R0301090.pdf](http://www.glb.nist.gov/el/fire_research/upload/R0301090.pdf).
- [9] SHEINSON, Ronald S., James E. PENNER-HAHN a Doren INDRITZ. The physical and chemical action of fire suppressants. *Fire Safety Journal*. 1989, vol. 15, issue 6, s. 437-450. DOI: 10.1016/0379-7112(89)90015-5. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0379711289900155>.
- [10] TAKAHASHI, F.; LINTERIS, G.T.; KATTA, V.R. Extinguishment mechanisms of coflow diffusion flames in a cup-burner apparatus. *Proceedings of the Combustion Institute*. 2007, 31, s. 2721 – 2729.

- [11] TAKAHASHI, Fumiaki, Gregory T. LINTERIS a Viswanath R. KATTA. SUPPRESSION OF CUP-BURNER FLAMES. [online]. 2003, 1 - 10 [cit. 2014-06-02]. Dostupné z: <http://fire.nist.gov/bfrlpubs/fire03/PDF/f03095.pdf>
- [12] TAKAHASHI, Fumiaki, Gregory LINTERIS a Viswanath KATTA. Extinguishment Of Cup-Burner Flames In Low Gravity. 43rd AIAA *Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*. Reston, Virigina: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2005-01-10, s. -. DOI: 10.2514/6.2005-711. Dostupné z: <http://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/6.2005-711>.
- [13] ISO 14520 - 1. *Gaseous fire-extinguishing systems - Physical properties and system design*. Geneve: International Organization for Standardization, 2006.
- [14] NFPA 2001. *Standard for Clean Agent Fire Extinguishing Systeme*. Quincy: National Fire Protection Association, 2008.
- [15] AS 4214. *Gaseous fire extinguishing systems*, Standards Australia International. Sydney, NSW, Australia, 2002.
- [16] ČSN EN 15 004-1 *Stabilní hasicí zařízení – Plynová hasicí zařízení - Část 1: Návrh, instalace a údržba*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [17] SENEAL, Joseph A. Flame extinguishing in the cup-burner by inert gases. *Fire Safety Journal*. 2005, vol. 40, issue 6, s. 579-591. DOI: 10.1016/j.firesaf.2005.05.008. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0379711205000548>.
- [18] BALOG, Karol. *Hasiace látky a jejich technológie*. 1. vyd. Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2004, 171 s. ISBN 80-866-3449-3.
- [19] KOZUBKOVÁ, M., E. KOZUBEK, V. NEVRLÝ, P. BITALA, O. ŠTĚPÁNEK, J. DLABKA, M. VAŠINEK, M. BOJKO, Z. ZELINGER, P. KUBÁT a E. GRIGOROVÁ. The Effect of Nitrogen and Argon Dilution on Methane Oxidation in Laminar Flames. *Procedia Engineering*. 2012, vol. 42, s. 1826-1839. DOI: 10.1016/j.proeng.2012.07.578. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1877705812029852>.
- [20] ORLÍKOVÁ, Kateřina. *Hasební látky*. 1. vyd. Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 1995, 90 s. ISBN 80-902-0010-9.

- [21] Úvod do techniky CCD čipů. *Moravské přístroje CCD kamery pro astronomii* [online]. Zlín-Malenovice, 2011, 21.9.2011 [cit. 2014-06-04]. Dostupné z: <http://www.gxccd.com/art?id=303&lang=405>
- [22] REICHL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA. CCD - základní princip: MEF. In: [online]. [cit. 2014-06-04]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/748-ccd-zakladni-princip>
- [23] HORÁK, Karel a Ilona KALOVÁ. Řízení expoziční doby CCD kamery. *Řízení expoziční doby CCD kamery* [online]. 2006, roč. 2006, č. 19, 6.4.2006 [cit. 2014-06-04]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/06019/index.html>
- [24] Kodak CCD Primer. In: *PHYS 3154: Observational Astrophysics* [online]. Rochester New York [cit. 2014-06-08]. Dostupné z: <http://www.phys.vt.edu/~jhs/phys3154/KodakCCDPrimer.pdf>
- [25] CCDs for Material Scientists. THE ELECTRONIC UNIVERSE PROJECT. *Evolving Towards The Perfect CCD* [online]. 1994 [cit. 2014-06-08]. Dostupné z: <http://zebu.uoregon.edu/ccd.html>
- [26] Princip CCD čipu. *Pohyb* [online]. 3. 4. 2014 [cit. 2014-06-08]. Dostupné z: <http://www.umelevne.cz/picture/reference/flash/ccd.html>
- [27] What Is A CCD?- charge coupled device. SPECTRAL INSTRUMENTS, Inc. *What Is A CCD?* [online]. USA [cit. 2014-06-08]. Dostupné z: [http://www.specinst.com/What\\_Is\\_A\\_CCD.html](http://www.specinst.com/What_Is_A_CCD.html)
- [28] What Is EMCCD Technology And How Is It Used. *What Is EMCCD Technology* [online]. 2001 [cit. 2014-06-08]. Dostupné z: [http://www.emccd.com/what\\_is\\_emccd/](http://www.emccd.com/what_is_emccd/)
- [29] Electron Multiplying CCD Cameras - The technology behind EMCCDs. ANDOR TECHNOLOGY LTD. *Electron Multiplying CCD Cameras* [online]. 2001 [cit. 2014-06-08]. Dostupné z: <http://www.andor.com/learning-academy/electron-multiplying-ccd-cameras-the-technology-behind-emccds>
- [30] Photometrics Research Imaging Learning Zone: Camera Binning. *Binning* [online]. [cit. 2014-06-08]. Dostupné z: <http://www.photometrics.com/resources/learningzone/binning.php>
- [31] KLOC, Petr. *Studium vlastností bariérových výbojů ve směsích plynů* [online]. Brno, 2012 [cit. 2014-06-08]. Dostupné z:



- [http://is.muni.cz/th/98524/prif\\_d/kloc\\_2012.pdf](http://is.muni.cz/th/98524/prif_d/kloc_2012.pdf). Disertační práce. Masarykova Univerzita. Vedoucí práce prof. RNDr. David Trunec, CSc.
- [32] Intensified CCD Cameras - The technology behind ICCDs. ANDOR TECHNOLOGY LTD. *Intensified CCD Cameras: The technology behind ICCDs* [online]. 2001 [cit. 2014-06-08]. Dostupné z: <http://www.andor.com/learning-academy/intensified-ccd-cameras-the-technology-behind-iccds>
- [33] JIRÁČEK, Milič. Snímací obvody CCD. *Snímací obvody CCD* [online]. s. 3 [cit. 2014-06-08]. Dostupné z: [http://www.tippman.cz/casopis-font-clanky/f53\\_snimace\\_ccd.pdf](http://www.tippman.cz/casopis-font-clanky/f53_snimace_ccd.pdf)
- [34] *Dynamický rozsah obrazových snímačů (B)CCD* [online]. 2010 [cit. 2014-06-08]. ISSN 1213-1539. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/cz/clanky/ostatni-1/20/dynamicky-rozsah-obrazovych-snimacu--b-ccd-1/>
- [35] HADERKA, Ondřej. Detekce světla. In: *Úvod do fotometrie* [online]. Olomouc, 2009 [cit. 2014-06-08]. Dostupné z: <http://jointlab.upol.cz/haderka/bzdf/detekce.pdf>
- [36] ČERNOCH, Antonín a Ondřej HADERKA. *Detekce světla na úrovni jednotlivých fotonů*. 1. vyd. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2012, 33 s. ISBN 978-80-244-3113-0. Dostupné z: [http://fyzika.upol.cz/system/files/slo/rcptm/texty/Cernoch,Haderka-Detekce\\_svetla.pdf](http://fyzika.upol.cz/system/files/slo/rcptm/texty/Cernoch,Haderka-Detekce_svetla.pdf)
- [37] BITALA, Petr. *Některé aspekty detekce požáru z pohledu integrace požárně-bezpečnostních zařízení* [online]. Ostrava, 2012 [cit. 2014-06-08]. Disertační práce. Vysoká škola Báňská - Technická univerzita Ostrava. Vedoucí práce prof. Dr. Ing. Aleš Dudáček.
- [38] CCD, EMCCD and ICCD Comparisons. *CCD, EMCCD and ICCD Comparisons - Difference between the sensors?* [online]. 2001 [cit. 2014-06-08]. Dostupné z: <http://www.andor.com/learning-academy/ccd,-emccd-and-iccd-comparisons-difference-between-the-sensors>
- [39] Fakulta Strojní: ČVUT. *Nejistoty měření* [online]. Praha, 2009 [cit. 2014-06-08]. Dostupné z: <http://www1.fs.cvut.cz/cz/u12110/tem/nejistoty/nejistoty1.pdf>
- [40] SCHOVÁNEK, Petr a HAVRÁNEK. Moderní technologie ve studiu aplikované fyziky: Chyby a nejistoty měření. *Portál moderní fyziky* [online]. [cit. 2014-06-08].

- Dostupné z: <http://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/texty/pext2-nejistoty.pdf>
- [41] KREIDL, Marcel. *Měření teploty: senzory a měřicí obvody*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2005, 239 s. Senzory neelektrických veličin. ISBN 80-730-0145-4.
- [42] ŠPANĚL, Michal a Vítězslav BERAN. *Obrazové segmentační techniky: Přehled existujících metod. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ* [online]. 2005, 2006 [cit. 2014-06-08]. Dostupné z: <http://www.fit.vutbr.cz/~spanel/segmentace/>
- [43] Aktuality pro veřejnost: Fakulta biomedicínského inženýrství. *Metody rozpoznání objektů v obraze* [online]. 2011 [cit. 2014-06-08]. Dostupné z: <http://www.fbmi.cvut.cz/files/predmety/3528/public/Metody%20rozpozn%C3%A1n%C5%AF%20v%20obrazu.pdf>
- [44] ZÍTKA, Michal. *Detekce pohybu v obraze* [online]. Brno, 2008 [cit. 2014-06-08]. Dostupné z: [https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/13859/xzitka04\\_BP.pdf?sequence=2](https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/13859/xzitka04_BP.pdf?sequence=2). Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Karel Horák.
- [45] WIESNER, David. *Implementace výpočtu ideálních odezev filtrů optického toku na GPU* [online]. Brno, 2012 [cit. 2014-06-08]. Dostupné z: [http://is.muni.cz/th/255597/fi\\_b/BP\\_Wiesner.pdf](http://is.muni.cz/th/255597/fi_b/BP_Wiesner.pdf). Bakalářská práce. Masarykova univerzita. Vedoucí práce Pavel Karas.
- [46] FLORČINSKÝ, Martin. *Stanovení minimální hasicí koncentrace plynné hasicí látky pro směs plynu a par kapaliny* [online]. Ostrava, 2013 [cit. 2014-06-09]. Dostupné z: [http://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/100062/FLO12\\_FBI\\_N3908\\_3908T005\\_2013.pdf?sequence=1](http://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/100062/FLO12_FBI_N3908_3908T005_2013.pdf?sequence=1). Diplomová práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.
- [47] MOŠTĚK, Vlastimil. *Monitorování chemiluminescence v plameni* [online]. Ostrava, 2013 [cit. 2014-06-09]. Dostupné z: [http://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/101453/MOS0012\\_FBI\\_B3908\\_3908R005\\_2013.pdf?sequence=1](http://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/101453/MOS0012_FBI_B3908_3908R005_2013.pdf?sequence=1). Bakalářská práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.

- [48] Operational instruction for digital Multibus: Mass flow / Pressure Instruments. In: *Instruction manual* [online]. 2013 [cit. 2014-06-09]. Dostupné z: [http://www.bronkhorst.com/files/downloads/manuals\\_english/917023\\_operation\\_instructions\\_digital\\_instruments.pdf](http://www.bronkhorst.com/files/downloads/manuals_english/917023_operation_instructions_digital_instruments.pdf)

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

|         |   |
|---------|---|
| A/D     | Analogově/digitální převodník   |
| CCD     | Charge Coupled Device   |
| CIC     | Časově indukovaný náboj - Clock-Induced Charge                          |
| DAQ     | Měření a sběr dat elektrických a fyzikálních veličin - Data Acquisition |
| DR      | Dynamický rozsah  |
| EM      | Electron Multiplying  |
| EMCCD   | Electron Multiplying Charge Coupled Device                              |
| FBI     | Fakulta bezpečnostního inženýrství                                      |
| fps     | Snímky za sekundu - frame per second                                    |
| GUI     | Grafické uživatelské rozhraní - graphical user interface                |
| ICCD    | Intensified Charge-Coupled Device                                       |
| MCP     | Mikrokanálový fotonásobič   |
| MEC     | Minimální hasební koncentrace - minimal exhausting concentration        |
| QE      | Kvantová účinnost - Quantum Efficiency                                  |
| SNR     | Odstup signálu od šumu - Signal to noise ration                         |
| VŠB-TUO | Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava                      |

**SEZNAM OBRÁZKŮ**

|  |    |
|--|----|
| Obr. 1 – Zkušební zařízení pro zkoušku metodou kelímkového hořáku [16] ..... | 18 |
| Obr. 2 – Průřez CCD čipem [26] .....   | 21 |
| Obr. 3 – Blokové schéma CCD čipu [23] .....                                  | 22 |
| Obr. 4 – Pohyb potenciálu řízeného třífázovou technikou [25].....            | 22 |
| Obr. 5 – Způsoby snímání [24] .....  | 26 |
| Obr. 6 – Typy konstrukcí maticového CCD [zdroj: vlastní zpracování].....     | 28 |
| Obr. 7 – Schéma EMCCD čipu [29].....   | 29 |
| Obr. 8 – Vznik sekundárního elektronu [zdroj: vlastní zpracování].....       | 30 |
| Obr. 9 – Ukázka před a po zesílení signálu [zdroj: vlastní zpracování] ..... | 30 |
| Obr. 10 – Schéma ICCD čipu [32] .....  | 31 |
| Obr. 11 – Srovnání čipů [38] .....   | 33 |
| Obr. 12 – Hustota pravděpodobnosti [40] .....                                | 39 |
| Obr. 13 – Současná skladba sestavy [zdroj: vlastní zpracování] .....         | 43 |
| Obr. 14 – Základní schéma [48] .....   | 47 |
| Obr. 15 – Vývojový diagram skriptu [zdroj: vlastní zpracování].....          | 50 |
| Obr. 16 – vize skladby sestavy [zdroj: vlastní zpracování] .....             | 51 |

**SEZNAM TABULEK**

|   |    |
|---|----|
| Tab. 1 – Hodnoty MEC stanovené metodou kelímkového/pohárkového hořáku [17]..... | 16 |
| Tab. 2 – Přehled hasiv [16].....  | 17 |
| Tab. 3 – Snímková frekvence (fps) [zdroj: vlastní zpracování] .....             | 34 |
| Tab. 4 – Parametry kamery Luca S 658 M [zdroj: vlastní zpracování].....         | 49 |