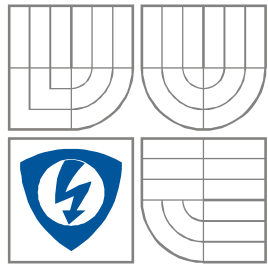


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**

**ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY
A ELEKTRONIKY**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC
ENGINEERING

ROZŠÍŘENÍ MOŽNOSTÍ OPTICKÉ DIAGNOSTIKY SPÍNACÍHO OBLOUKU

ENHANCEMENT OF OPTICAL DIAGNOSTICS OF THE SWITCHING ARC

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

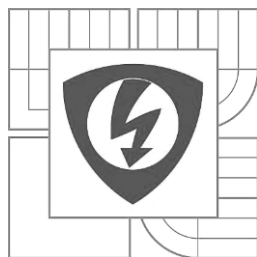
Bc. MATĚJ SAMOHEJL

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. JIŘÍ VALENTA, Ph.D.

BRNO, 2016



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika

Student: Bc. Matěj Samohejl
Ročník: 2

ID: 146946
Akademický rok: 2015/16

NÁZEV TÉMATU:

Rozšíření možností optické diagnostiky spínacího oblouku

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Zpracujte problematiku záření plazmatu.
2. Popište metodiku optické diagnostiky plazmatu pomocí vysokorychlostní kamery s laserovými světly.
3. Proveďte a vyhodnoťte pokusy v Laboratoři spínacích přístrojů na připraveném modelu.
4. Na základě výsledků navrhnete zlepšení optické diagnostiky plazmatu a uveďte možné rozšíření.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Havelka, O. a kol.: Elektrické přístroje, SNTL, 1985
- [2] Ovsyannikov, A. A.: Plasma Diagnostics, Cambridge Int Science Publishing, 2000
- [3] Boulos, M. I., Fauchais, P., Pfender, E.: Thermal Plasmas, Volume 1, Springer Science & Business Media, 1994

Termín zadání: 21. 9. 2015

Termín odevzdání: 24. 5. 2016

Vedoucí práce: Ing. Jiří Valenta, Ph.D.

Konzultanti diplomové práce:

Ing. Ondřej Vitek, Ph.D.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Anotace

Tato diplomová práce se zabývá stanovením metodiky optické diagnostiky spínacího oblouku s využitím vysokorychlostní kamery Photron SA-X2. Jsou zde zmíněné základní zákonitosti pro správné nastavení měřicího systému a pro nastavení expozice kamery. Měření bylo prováděno na prototypu parametrické zkušební komory, přičemž většina podkladů vycházela z požadavků praktické práce zkoumající pohyb elektrodových skvrn.

V práci je uveden postup pro prvotní nastavení kamery, možnosti úpravy záznamů pro prezentační účely a postup pro vytvoření 3D modelu spínacího oblouku v programu SketchUp Make. Je zde zmíněno porovnání vlivu spektrálního filtru a neutrálního šedého filtru na výsledný záznam. Výstupem práce je i 3D rekonstrukce oblouku a pomocný program na úpravu záznamů. Výsledky navíc ukazují míru chyby způsobené absencí třetího rozměru při diagnostice spínacího oblouku pouze z jednoho směru.

Klíčová slova

3D model oblouku; analýza oblouku; elektrický oblouk; oblouk; optická diagnostika oblouku; plazma; photron sa-x2; spínací oblouk; vysokorychlostní kamera; záření plazmatu

Abstract

This master's thesis is focused on determining methodology of optical diagnostics of the switching arc using the high-speed camera Photron SA-X2. The thesis contains basic rules for proper setup of the measurement system and the rules to adjust the camera exposure. The experiments were performed on the prototype of a parametric switching chamber, while the majority of source materials was derived from the requirements of another study which was aimed on the movement of the electrode spots.

The process of the first adjustment of the camera, a record edit options for the presentation purposes and the process of the 3D model design of the switching arc in SketchUp software was stated. Paper contains a comparison of the spectral filter effect and neutral density filter effect on the final record as well. The part of the work outputs are the 3D model of the switching arc and the supporting record editing software. The paper results show a degree of the inaccuracies in optical diagnostics made from only one direction caused by the lack of the information about third dimension.

Keywords

3D arc model; arc; arc analysis; electric arc; high-speed camera; optical diagnostic of the arc; photron sa-x2; plasma; plasma radiation; switching arc

Bibliografická citace

SAMOHEJL, M. Rozšíření možností optické diagnostiky spínacího oblouku. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. 56s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jiří Valenta, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Rozšíření možností optické diagnostiky spínacího oblouku jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

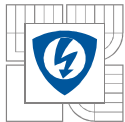
Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne Podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Jiřímu Valentovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne Podpis autora



OBSAH

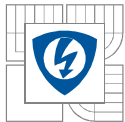
SEZNAM OBRÁZKŮ.....	8
SEZNAM TABULEK	10
ÚVOD	11
1 PLAZMA.....	11
1.1 ELEKTRICKÝ OBLOUK	11
1.1.1 VZNIK OBLOUKU V ELEKTRICKÝCH PŘÍSTROJÍCH	12
1.1.2 STATICKÁ A DYNAMICKÁ CHARAKTERISTIKA ELEKTRICKÉHO OBLOUKU.....	12
1.2 ZÁŘENÍ PLAZMATU	14
1.2.1 ČÁROVÉ ZÁŘENÍ.....	15
1.2.2 SPOJITÉ ZÁŘENÍ.....	16
1.2.3 INTENZITA ZÁŘENÍ.....	16
1.2.4 PŘENOS ENERGIE ZÁŘENÍM.....	17
2 MOŽNOSTI OPTICKÉ DIAGNOSTIKY PLAZMATU	19
2.1 OPTICKÁ EMISNÍ SPEKTROSKOPIE.....	19
2.2 OPTICKÁ ABSORPČNÍ SPEKTROSKOPIE A LASEREM INDUKOVANÁ FLUORESCENCE.....	20
3 DIAGNOSTIKA OBLOUKU POMOCÍ VYSOKORYCHLOSTNÍ KAMERY.....	21
3.1 OSTROST ZÁZNAMU	21
3.2 EXPOZICE ZÁZNAMU.....	23
3.3 OMEZENÍ JASU ZÁZNAMU	25
3.3.1 POUŽITÍ SPEKTRÁLNÍHO FILTRU S LASEROVÝMI SVĚTLY	25
3.3.2 POUŽITÍ NEUTRÁLNÍHO ŠEDÉHO FILTRU	27
4 POPIS MĚŘÍČÍHO PRACOVNÍHO MÍSTA	28
4.1 PARAMETRICKÁ ZKUŠEBNÍ KOMORA	28
4.2 VYSOKORYCHLOSTNÍ KAMERA PHOTRON SA-X2.....	30
4.3 LABORATOŘ SPÍNACÍCH PŘÍSTROJŮ	31
5 VÝSLEDKY MĚŘENÍ	32
5.1 NASTAVENÍ KAMERY PRO SNÍMÁNÍ	32
5.2 MOŽNOSTI ÚPRAVY ZÁZNAMU	35
5.2.1 VYUŽITÍ JASOVÝCH EKVIINTENZIT	39
5.3 ROZDÍL V POUŽITÍ SPEKTRÁLNÍHO A NEUTRÁLNÍHO ŠEDÉHO FILTRU	40
5.4 LOKALIZACE OBLOUKU.....	43
5.4.1 TROJROZMĚRNÁ REKONSTRUKCE OBLOUKU	45
5.5 NÁVRHY PRO ZLEPŠENÍ OPTICKÉ DIAGNOSTIKY	49



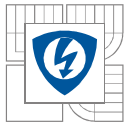
ZÁVĚR.....	51
LITERATURA	53
SEZNAM PŘÍLOH.....	54
PŘÍLOHA A – POPIS VYTVOŘENÉHO PROGRAMU V C#	55

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1.1 Charakteristika elektrických výbojů^[4]</i>	12
<i>Obr. 1.2 Náhradní schéma stejnosměrného obvodu s obloukem^[4]</i>	13
<i>Obr. 1.3 Grafické řešení stejnosměrného obvodu s obloukem^[4]</i>	13
<i>Obr. 1.4 Časový průběh obloukového napětí, proudu a jeho dynamická charakteristika^[2]</i>	14
<i>Obr. 1.5 Typy elektronových přechodů v atomu nebo iontu^[1]</i>	15
<i>Obr. 1.6 Pomocný element plazmatu</i>	17
<i>Obr. 2.1 Schématické zobrazení měřícího pracoviště pro optickou emisní spektroskopii^[6]</i>	19
<i>Obr. 3.1 Vliv nastavení clony, vzdálenosti a použitého objektivu na hloubku ostrosti</i>	21
<i>Obr. 3.2 Změna aktivní zóny snímače kamery Photron SA-X2 při zvyšování FPS</i>	22
<i>Obr. 3.3 Příklad vhodného histogramu pro sledování el. oblouku</i>	23
<i>Obr. 3.4 Experimentálně změřená převodní charakteristika snímače kamery Photron SA-X2</i>	24
<i>Obr. 3.5 Spektrální citlivost použité kamery s vyznačeným rozsahem filtru $807\text{nm} \pm 6\text{nm}$^[8]</i>	25
<i>Obr. 3.6 Vliv synchronizace světla s frekvencí snímání kamery</i>	26
<i>Obr. 4.1 Náhled parametrické zkušební komory bez vrchní části</i>	28
<i>Obr. 4.2 Boční řez parametrickou zkušební komorou s vyznačenými hlavními rozměry</i>	28
<i>Obr. 4.3 Fyzická realizace komory</i>	29
<i>Obr. 4.4 Úprava původního zapojení přívodů (nahore) novým pro zvýšení silových účinků</i>	29
<i>Obr. 4.5 Proporce vysokorychlostní kamery Photron SA-X2 bez objektivu^[8]</i>	30
<i>Obr. 4.6 Orientační schéma Laboratoře spínacích přístrojů</i>	31
<i>Obr. 5.1 Neupravený snímek</i>	35
<i>Obr. 5.2 Upravený snímek, nahore zvýšení kontrastu, dole snížení kontrastu</i>	35
<i>Obr. 5.3 Upravený snímek, nahore zvýšení jasu, dole snížení jasu</i>	36
<i>Obr. 5.4 Upravený snímek, nahore zvýšení gammy, dole snížení gammy</i>	36
<i>Obr. 5.5 Změna rozložení jasů (histogramu) při kombinaci nástrojů úprav</i>	37
<i>Obr. 5.6 Zásuvný modul Histogram programu PFV</i>	37
<i>Obr. 5.7 Ukázka použití panelu Cursor mode</i>	38
<i>Obr. 5.8 Podexponovaný snímek oblouku a jeho následná úprava pomocí převodní křivky</i>	38
<i>Obr. 5.9 Ukázka použití barevně odlišených jasových ekvivalencí</i>	39
<i>Obr. 5.10 Spektrální rozložení záření oblouku pro dva různé vypínací pochody</i>	40
<i>Obr. 5.11 Porovnání optických filtrů – neupravené snímky</i>	41
<i>Obr. 5.12 Rozdílný princip omezení světla u spektrálního a ND filtru</i>	41

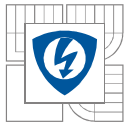


<i>Obr. 5.13 Reálné propustné pásmo ND filtru s vyznačenou spektrální UV zádrží</i>	<i>42</i>
<i>Obr. 5.14 Úprava parametrické komory pro snímání ve 3D</i>	<i>43</i>
<i>Obr. 5.15 Elektrický oblouk snímáný ze dvou na sebe kolmých směrů.....</i>	<i>43</i>
<i>Obr. 5.16 Určení polohy oblouku při snímání z jedné roviny (dole) a ze dvou rovin (nahore).....</i>	<i>44</i>
<i>Obr. 5.17 Naznačený problém se správným zaostřením při 3D rekonstrukci oblouku.....</i>	<i>45</i>
<i>Obr. 5.18 Zarovnání importovaných fotografií a následný odhad polohy jádra oblouku</i>	<i>47</i>
<i>Obr. 5.19 Ukázka sestavení výsledné čáry, představující přibližnou polohu jádra oblouku</i>	<i>47</i>
<i>Obr. 5.20 Výsledek 3D rekonstrukce oblouku.....</i>	<i>48</i>
<i>Obr. 5.21 Spojení obrazového výstupu rekonstrukce s daty z osciloskopu</i>	<i>49</i>
<i>Obr. 5.22 Snímky ohraničující interval výskytu napěťové špičky</i>	<i>49</i>



SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 3.1 Přehled běžně používaných ND filtrů</i>	<i>27</i>
<i>Tab 4.1 Závislost rozlišení videa na frekvenci snímání kamery.....</i>	<i>30</i>
<i>Tab. 5.1 Průměrné hodnoty expozice kamery pro jednotlivá měření a dané velikosti proudu</i>	<i>33</i>
<i>Tab. 5.2 Šířka záběru běžně používaných objektivů u kamery Photron SA-X2.....</i>	<i>34</i>
<i>Tab. 5.3 Významné spektrální čáry iontu mědi CU(I) podle [odkaz]</i>	<i>40</i>



ÚVOD

Spínací oblouk je velice rychlý komplexní děj. Pro jeho diagnostiku v dostatečném časovém rozlišení je potřebný měřicí systém s velkou frekvencí záznamu. V současné době se analýza elektrického oblouku udává spíše směrem počítačových simulací. Experimentálně se poté určují například koeficienty emise či absorpce pro dané složení plazmatu, potřebné pro výpočet toku energie zářením a vyřešení rovnice energetické bilance oblouku.

Tato diplomová práce je zaměřena na stanovení metodiky optické diagnostiky spínacího oblouku pomocí vysokorychlostní kamery, využitelné i pro jiná doplňková měření, kdy záznam z kamery slouží například pro lepší kontrolu prováděného pokusu. Je zde uveden krátký teoretický úvod do problematiky záření plazmatu, následovaný výčtem důležitých parametrů pro kvalitní snímání. Nechybí zde ani stručný popis měřicího pracoviště. Konec práce je zaměřen na vyhodnocení provedeného měření, vylepšení záznamů pro následnou prezentaci a na uvedení možností trojrozměrné rekonstrukce spínacího oblouku.

1 PLAZMA

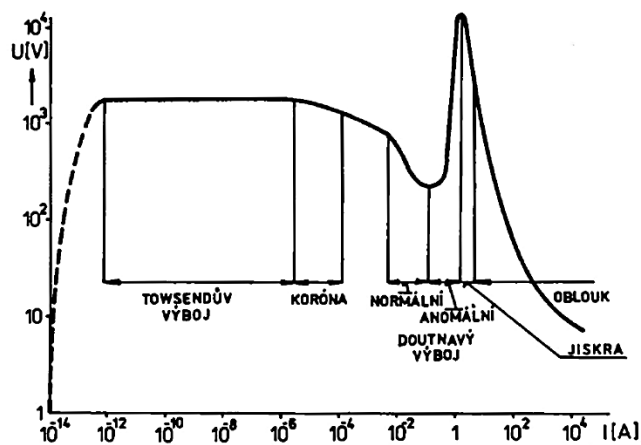
Plazma je látka ve čtvrtém skupenství hmoty. Přidáním dostatečného množství energie plynné látce dojde k rozpadávání jejích atomů (molekul) - ionizaci plynu. Určitou míru ionizace vykazuje každý plyn, proto je vhodné definovat plazma jako *kvazi-neutrální ionizovaný plyn vykazující kolektivní chování*. Kvazi-neutralitou rozumíme schopnost lehčích částic odstínit těžší nabitě částice, takže se plazma jeví z makroskopického pohledu jako neutrální. Kolektivní chování souvisí s elektrostatickými Coulombovými silami, díky kterým interaguje každá částice s velkým počtem dalších částic. Pohyb částic tak nezávisí jen na lokálním stavu systému, ale závisí i na stavu plazmatu v odlehlých oblastech.^[2]

Ve spínací technice se setkáváme nejčastěji s ionizací tepelnou a ionizací pomocí elektrického pole. To vede ke vzniku mnoha druhů výbojů, viz Obr. 1.1. Jedním z nich je i elektrický oblouk.

1.1 Elektrický oblouk

Elektrický oblouk je trvalý výboj hořící v plazmatu plynného média při atmosférickém nebo zvýšeném tlaku. Výbojovou drahou přitom tečou značné proudy (viz Obr. 1.1). S tím souvisí i velká teplota jádra výboje, vysoká koncentrace ionizovaných částic, malé napětí na oblouku a v neposlední řadě intenzivní vyzařování světla. Vysoká koncentrace částic vede k větší pravděpodobnosti srážek a tím i vyrovnávání termodynamických teplot rychlejších a pomalejších částic.^[4]

Existence elektrického oblouku v elektrických spínacích přístrojích je užitečná a zároveň škodlivá. Vysoká teplota oblouku opaluje a opotřebovává kontaktní systém. Naopak nám ale umožňuje zmařit naakumulovanou energii vypínaného obvodu v předem definovaném místě bez vzniku nebezpečného přepětí.



Obr. 1.1 Charakteristika elektrických výbojů^[4]

1.1.1 Vznik oblouku v elektrických přístrojích

Princip vzniku elektrického oblouku je rozdílný pro zapínací a vypínací pochod přístroje. V rozeprnutém stavu neteče přes kontakty žádný proud, jsou proto studené, výstupní práce elektronů z elektrod je vysoká a jejich emise do okolí je malá. Přibližováním elektrod roste mezi kontakty intenzita elektrického pole a dochází k ionizaci atomů (molekul). Lehčí částice jsou elektrickým polem urychlovány a po získání určité kinetické energie jsou schopny ionizovat další atomy (jedná se o tzv. nárazovou ionizaci), což vede ke vzniku elektronové laviny, která rychle přechází v oblouk.

Při rozeprnutí kontaktů je princip ionizace prostředí odlišný. V seprnutém stavu jsou kontakty ohřívány procházejícím proudem. Při rozeprnutí nejprve klesá přitlačná síla, což zvyšuje jejich teplotu ještě více. Žádný kontakt navíc není dokonale hladký, naopak má na svém povrchu drobné nerovnosti. Oddalování kontaktů způsobí, že v určitém okamžiku neteče vypínaný proud přes celou plochu kontaktů, ale je veden pouze přes výstupky na kontaktech. To má kromě zvýšení odpudivé síly za následek hlavně značný nárůst proudové hustoty v daných místech a tím i teploty kontaktů. Vlivem nízké výstupní práce elektronů z elektrod a odpařování materiálu je proto mezi kontakty, v době jejich oddalování, mnoho volných nosičů náboje.

1.1.2 Statická a dynamická charakteristika elektrického oblouku

Charakteristikou obloukového výboje rozumíme vztah mezi napětím na oblouku a proudem tekoucím obloukem. Elektrický oblouk může být napájen jak stejnosměrným (statická char.), tak střídavým proudem (dynamická char.).

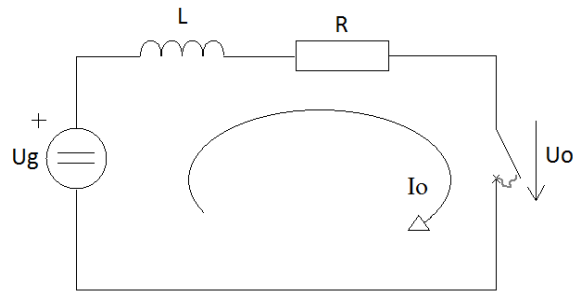
Tvar statické charakteristiky lze rozdělit do dvou částí, na klesající hyperbolu v oblasti menších proudů a stoupající přímku v oblasti velkých proudů. Stanovením charakteristiky v oblasti menších proudů se experimentálně zabývala Ayrtonová a odvodila vztah^[4]:

$$U_o = \alpha + \beta l_o + \frac{\gamma + \delta l_o}{I_o} \quad (1.1)$$

kde U_o je napětí oblouku, l_o délka oblouku, I_o proud tekoucí obloukem a α , β , γ , δ jsou experimentálně stanovené koeficienty podle Ayrtonové.

Známe-li charakteristiku oblouku, můžeme vzhledem k danému obvodu určit jeho stabilitu. Každý elektrický obvod má určitý vlastní odpor, indukčnost a kapacitu, které jsou nehomogenně rozložené po celé jeho délce.

Rozložíme-li obvod na prvky se soustředěnými parametry a zanedbáme-li kapacitu obvodu, která je typicky malá, můžeme obvod oblouku nahradit schématem na Obr. 1.2.



Obr. 1.2 Náhradní schéma stejnosměrného obvodu s obloukem^[4]

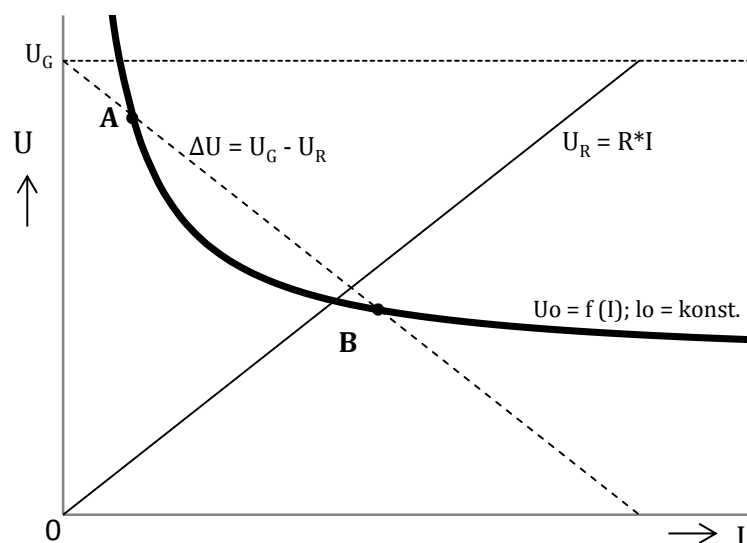
Ze statického hlediska lze indukčnost obvodu zanedbat. Grafické řešení zjednodušeného obvodu oblouku je patrné z Obr. 1.3. Oblouk může existovat jen v bodech A a B, přičemž stabilně jen v bodě B. To lze odvodit rovnou z grafu, nebo pomocí Kaufmannovy podmínky stability výboje, která určuje jeho stabilitu při platnosti vztahu^[4]:

$$\frac{dU_o}{dI} + \frac{dU_R}{dI} > 0 \quad (1.2)$$

Z toho je patrné, že pro stabilní hoření oblouku musí být přiváděný příkon do oblouku dostatečně veliký, aby vykryl energetické ztráty výboje a zároveň dodával energii umožňující převahu ionizačních pochodů nad rekombinačními. Přičemž energetické ztráty oblouku jsou reprezentovány především ztrátami v důsledku tepelné vodivosti oblouku a přenosu energie zářením. Pro uhašení oblouku je žádoucí navýšit jeho ztráty, což souvisí s navýšením obloukového napětí. Možnosti pro zvýšení ztrát vyplývají z rovnice (1.1), kterou lze zjednodušit na tvar:

$$U_o \cong \alpha + \beta I_o \quad (1.3)$$

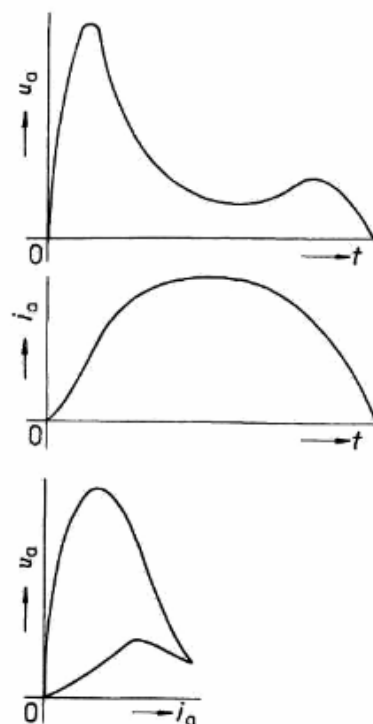
Koeficient α představuje úbytek napětí na elektrodách, koeficient β představuje gradient úbytku napětí na těle oblouku.



Obr. 1.3 Grafické řešení stejnosměrného obvodu s obloukem^[4]

Tvar dynamické charakteristiky je znázorněn na Obr. 1.4. Na začátku půlperrody je napětí na oblouku totožné s napětím zdroje. Po dosažení hodnoty napětí potřebné k zapálení oblouku poklesne na tzv. hořící napětí. Na konci půlperrody je v oblasti elektrod více nosičů náboje, než je potřeba k vedení okamžité hodnoty proudu. Není proto třeba dodávat energii potřebnou pro převahu ionizačních pochodů nad rekombinačními a zhášecí špička je proto menší než zapalovací.

Vypínání střídavého oblouku je řešeno dostatečným navýšením elektrické pevnosti mezi kontakty pomocí odvedení volných nosičů náboje v časové oblasti průchodu proudu nulou. Většina přístrojů nižších napěťových hladin jsou přitom konstruována tak, aby došlo k přerušení proudu ještě před jeho přirozenou nulou. Přístup k vypínání oblouku je tak shodný s vypínáním stejnosměrného proudu.^[2]



Obr. 1.4 Časový průběh obloukového napětí, proudu a jeho dynamická charakteristika^[2]

1.2 Záření plazmatu

Záření je obecně elektromagnetické vlnění, které lze charakterizovat intenzitou a frekvencí v nebo vlnovou délkou λ . Mezi těmito posledními veličinami platí vztah:

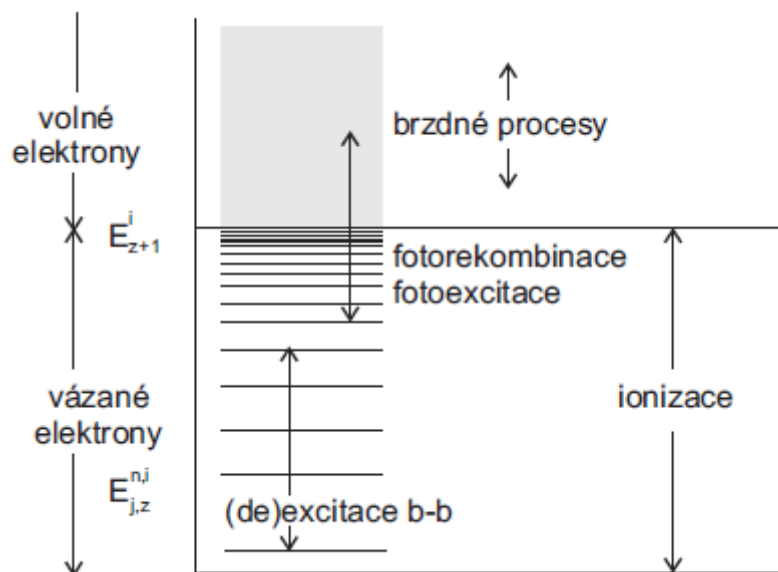
$$\lambda \nu = \frac{c_0}{n} \quad (1.4)$$

Přičemž index lomu n se ve vzduchu při atmosférickém tlaku většinou zanedbává ($n \cong 1$). Záření lze z kvantové mechaniky chápat jako soubor fotonů, jejichž energii lze stanovit pomocí Planckovy konstanty h podle:

$$E = h\nu = h \frac{c}{\lambda} \quad (1.5)$$

Ze zákona o zachování energie je patrné, že charakteristické hodnoty záření jsou úměrné energii, potřebné pro jeho emisi, případně energii dodané při absorpci. Vzhledem k mnoha různým principům vzniku fotonů má záření široký rozsah vlnových délek, přičemž ve viditelném spektru leží jen malá část tohoto rozsahu. (průměrný pozorovatel je schopen vidět záření v rozsahu vlnových délek od 380nm do 780nm).

Záření obecně vzniká při změně energie částic, neboli při přechodu částic z jednoho energetického stavu do druhého, například vlivem srážek s jinými částicemi, rekombinací apod. Přehled těchto přechodů, které jsou vzhledem k hmotnosti částic uskutečňovány výhradně elektrony, je na Obr. 1.5.



Obr. 1.5 Typy elektronových přechodů v atomu nebo iontu^[1]

Po předchozích úvahách lze pro rekapitulaci přepsat rovnici (1.5) do tohoto tvaru^[2]:

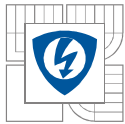
$$E_p - E_n = \Delta E = h\nu = h \frac{c}{\lambda} \quad (1.6)$$

ze kterého plyne, že frekvence záření je úměrná rozdílu energií daných částic před srážkou a po srážce. Vzhledem ke složení atomů a typu srážky může vzniknout záření čárové, nebo spojité.

1.2.1 Čárové záření

Čárové záření je takové záření, jehož frekvence může nabývat pouze diskretních hodnot. Vznik je zřejmý z kvantového modelu atomu, neboť i vázané elektrony mohou nabývat pouze diskretních energetických hladin. Pro daný prvek tedy existuje konečná množina změn energií ΔE a s tím související konečná množina vlnových délek λ , které může výsledné záření mít. To samé platí pro molekulární spektrum, které je ovšem díky většímu množství možných energetických hladin (elektronové, vibrační, rotační) mnohem složitější, než spektrum monoatomárního prvku.

Spektrální čára přitom není dokonale úzká a má svou konečnou šířku. To je dáno zákony statistické fyziky, ale třeba i závislostí na parametrech plazmatu. Mezi známé profily rozšíření spektrální čáry patří například *Dopplerovo rozšíření*, které uvažuje změnu frekvence záření vlivem pohybu vyzařujících částic, nebo *Starkovo rozšíření* způsobené elektrickým polem ostatních částic, uplatňující se při větších koncentracích. Tyto jevy mohou způsobit i posun spektrální čáry, a proto je uvažování a započítání těchto rozšíření nezbytné pro přesnou diagnostiku záření.^[1]



1.2.2 Spojité záření

V atomovém obalu jsou elektrony vázány k určitým energetickým hladinám. Při rekombinaci má ale volný elektron energii úměrnou jeho rychlosti, která může nabývat libovolných spojitých hodnot. Rozdíl energií před srážkou a po srážce už není kvantifikován a vzniklé záření může nabývat spojitého spektra, viz rovnice (1.7) uvedená pro rekombinaci iontu síry.

$$\frac{1}{2} m_e v_e^2 + \Delta E_S = h\nu = h \frac{c}{\lambda} \quad (1.7)$$

kde

$$\Delta E_S = E_{S^+}^I - E_{S_j} \quad (1.8)$$

přičemž $E_{S^+}^I$ je energie potřebná k ionizaci síry a E_{S_j} je energie excitované hladiny, na kterou je elektron zachycen.

Spojitě záření nemusí vzniknout výhradně při srážce dvou částic, vzniká i při změně kinetické energie volného elektronu vlivem Coulombovo pole kladných částic. Tomuto jevu se říká brzděné záření.^[1]

1.2.3 Intenzita záření

Kromě vlnové délky je záření charakterizováno i jeho intenzitou. Je to veličina, která makroskopicky popisuje složité procesy emise a absorpce záření. Jelikož jsou tyto koeficienty závislé na frekvenci záření, uvádí se tzv. spektrální intenzita záření I_ν , kdy se výsledná intenzita určí dle vztahu^[1]:

$$I = \int_0^\infty I_\nu d\nu \quad (1.9)$$

Dále lze stanovit spektrální hustotu záření neboli množství zářivé energie o dané frekvenci v jednotce objemu jako:

$$U_\nu = \frac{1}{c} \int_{4\pi} I_\nu d\Omega \quad (1.10)$$

kde c je rychlost světla a $d\Omega$ je element prostorového úhlu.

Při termodynamické rovnováze plazmatu při konstantní teplotě T je záření izotropní a závisí pouze na teplotě a na frekvenci záření. Vzorec pro výpočet spektrální hustoty záření pro tento případ odvodil Planck:

$$U_{\nu r} = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3 \left(e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1 \right)} \quad (1.11)$$

kde k je Boltzmannova konstanta.

Příčemž celková hustota záření lze stanovit opět integrací přes celý spektrální obor:

$$\begin{aligned}
 U_r &= \int_0^{\infty} U_{vr} dv = \int_0^{\infty} \frac{8\pi h\nu^3}{c^3 \left(e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1 \right)} dv \Bigg|_{x=\frac{h\nu}{kT}; dv=\frac{kT}{h} dx} = \\
 &= \frac{8\pi k^4 T^4}{c^3 h^3} \int_0^{\infty} \frac{x^3}{e^x - 1} dx = \frac{8\pi^5 k^4 T^4}{15c^3 h^3} = \frac{4\sigma T^4}{c}
 \end{aligned} \tag{1.12}$$

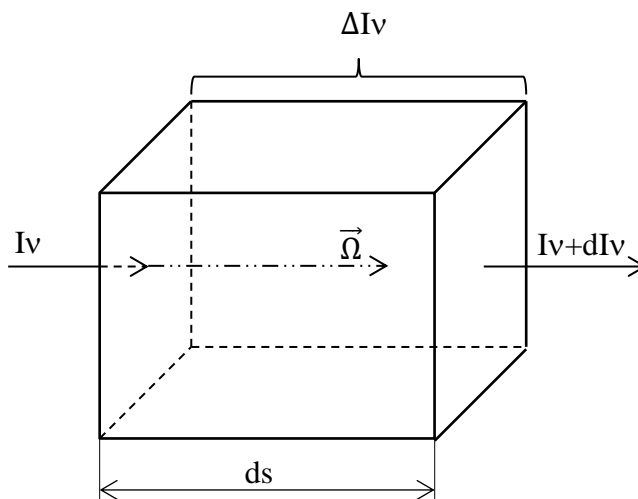
kde σ je Stefan-Boltzmannova konstanta.

V důsledku izotropie je potom intenzita záření stejná ve všech směrech a je rovna:

$$I_{vr} = B_\nu = \frac{cU_{vr}}{4\pi} = \frac{2h\nu^3}{c^2 \left(e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1 \right)} \tag{1.13}$$

1.2.4 Přenos energie zářením

Pro další vysvětlení problematiky budeme uvažovat element plazmatu, viz Obr. 1.6. Energie vcházející do krychle je I_ν , energie vystupující z krychle je $(I_\nu + dI_\nu)$, celkové množství zářivé energie v krychli je potom ΔI_ν . Uvažujeme pouze paprsky kolmé na boční strany krychle, ležící ve směru $\vec{\Omega}$ a určitý časový okamžik dt za který světlo urazí dráhu ds .



Obr. 1.6 Pomocný element plazmatu

Bude platit^[1]:

$$\Delta I_\nu = dI_\nu dt = \left(\frac{\partial I_\nu}{\partial t} dt + \frac{\partial I_\nu}{\partial s} ds \right) dt = \left(\frac{1}{c} \frac{\partial I_\nu}{\partial t} + \vec{\Omega} \text{grad} I_\nu \right) ds dt \tag{1.14}$$

Množství zářivé energie v krychli závisí na procesech emise a zeslabení záření.

Emise může být spontánní, nebo indukovaná. Spontánní emise nastává při přechodu elektronu z vyšší hladiny na nižší bez vnějšího působení. Indukovaná emise (vynucená) je způsobena ovlivněním kvantového stavu nabuzeného atomu dopadem fotonu, jehož frekvence je úměrná právě přechodu excitovaného elektronu.

Dochází tak k vynucené emisi záření (deexcitaci elektronu) o stejné frekvenci a směru, jako měl dopadnuvší foton, aniž by byl tento foton absorbován. Celkové množství vyzářené energie jednotkou objemu za jednotku času je vyjádřeno rovnicí (1.15), kde první člen odpovídá spontánní emisi a druhý člen odpovídá indukované emisi.

$$J_\nu = i_\nu + i_\nu \frac{c^2}{2h\nu^2} I_\nu \quad (1.15)$$

Zeslabením světla se míní jeho částečné pohlcení (absorpce) a rozptyl při průchodu určitou vrstvou o tloušťce dx . Míra zeslabení je úměrná intenzitě záření a geometrickým rozměrům uvažované vrstvy přes koeficient zeslabení

$$dI_\nu = -\kappa_\nu I_\nu dx \quad (1.16)$$

který je dán součtem koeficientů rozptylu a absorpce. Koeficient zeslabení $\kappa_\nu(\nu, T, p)$ je proměnná veličina, významně závislá na frekvenci záření, teplotě a tlaku.

Z rovnosti zářivé energie v krychli lze psát

$$\Delta I_\nu = \left(i_\nu + i_\nu \frac{c^2}{2h\nu^2} I_\nu - \kappa_\nu I_\nu \right) ds dt \quad (1.17)$$

Porovnáním rovnice (1.14) a (1.17) dostaneme vztah pro přenos energie zářením

$$\frac{1}{c} \frac{\partial I_\nu}{\partial t} + \vec{\Omega} \text{grad} I_\nu + \kappa_\nu I_\nu = i_\nu \left(1 + \frac{c^2}{2h\nu^2} I_\nu \right) \quad (1.18)$$

Vyřešením této rovnice lze získat radiální složku spektrálního toku záření z jednotky plochy válce jako

$$\vec{F}_{R\nu} = \int I_\nu \vec{\Omega} d\Omega \quad (1.19)$$

a nakonec vyřešit rovnici popisující energetickou bilanci oblouku ve tvaru

$$\frac{1}{\rho} E^2 = \nabla \vec{F}_R + \nabla \vec{F}_C \quad (1.20)$$

kde ρ je měrný elektrický odpor, člen na levé straně rovnice odpovídá energii přivedené do oblouku a člen \vec{F}_C odpovídá toku energie vedením. Pomocí toku záření lze takto nepřímo určit například teplotní profil oblouku.

Rovnice (1.20) je výrazně zjednodušená, jelikož zanedbává významné členy při přenosu energie z oblouku, jako je například člen odpovídající tepelným ztrátám vlivem relativního pohybu oblouku v okolním médiu. Další nepřesnost je dána předpokladem lokální termodynamické rovnováhy (LTR) v celém objemu plazmatu, která je do jisté míry splněna pouze v jádru oblouku. V okrajových částech oblouku nedosahuje teplota tak vysokých hodnot a nelze proto LTR uvažovat. To přináší řadu nepřesností s určením koeficientů emise a absorpce, které jsou nezbytné pro stanovení intenzity záření. Vzhledem ke komplexnosti dané problematiky jsou však podobné aproximace nezbytné.

Obecně lze říci, že při snižující se teplotě roste koeficient absorpce. Proto je větší část záření pohlceno právě na okrajových částech oblouku, kde je tato energie předávána chladnějším částicím okolního média. Záření se tak významně podílí na energetických ztrátách oblouku. ^{[1][3]}

2 MOŽNOSTI OPTICKÉ DIAGNOSTIKY PLAZMATU

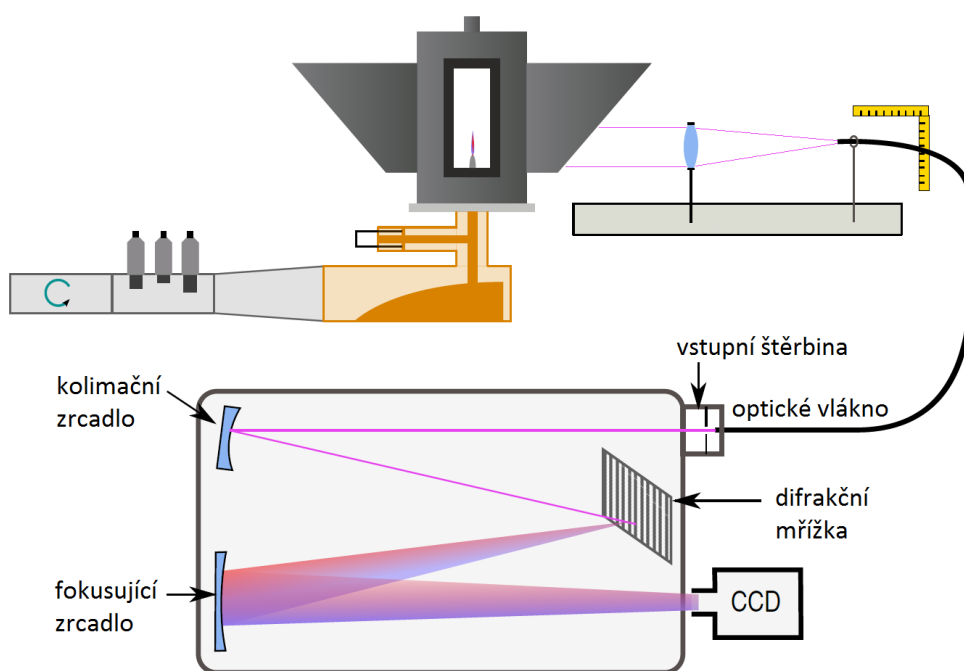
Optická diagnostika plazmatu má oproti starším metodám (jako je například Langmuirova sonda) velkou výhodu, neboť měření není invazivní. To znamená, že nedochází k ovlivnění podmínek pro hoření plazmatu a tím i naměřených dat. Metodiky a principy měření jsou různé pro jednotlivé druhy plazmatu a přinášejí různé nároky na měřicí aparaturu a vyhodnocení. Pro uvedení do problematiky zde můžeme popsat nejznámější a nejpoužívanější techniky pro diagnostiku plazmatu.

2.1 Optická emisní spektroskopie

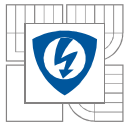
Emisní spektroskopie je pasivní metoda, při které se snímá světlo vyzářené plazmatem. Princip metody spočívá ve vyhodnocení spektrálního rozložení emitovaného záření s ohledem na intenzitu jednotlivých spektrálních čar a na jejich rozšíření. Tím lze získat informaci o složení a teplotě plazmatu.

K měření spektra postačí jednoduché zařízení obsahující disperzní mřížku, soustavu zrcadel a detektor. Možné rozložení měřícího pracoviště s použitím optického vlákna pro usnadnění přístupu ke zdroji záření je uvedeno na Obr. 2.1. Jako detektor lze použít CCD senzor nebo fotonásobič. Fotonásobiče jsou rychlejší a dokáží zesílit i slabý signál, avšak umožňují záznam pouze vybrané vlnové délky. Rychlost snímání u CCD prvků je dána rychlostí přenosu dat do/z paměti. Současné spektroskopické kamery dosahují rychlostí až 10 000 spekter za sekundu.

Důležitým parametrem měřícího zařízení je jeho přesnost, nebo přesněji hodnota spektrálního rozlišení. To je dáno jednotlivými prvky měřícího systému jako je rozlišení a velikost CCD snímače, počtem vrypů difrakční mřížky apod. Neméně důležitá je i správná kalibrace spektroskopického systému, prováděná pomocí spektrálních lamp a tabulek.^[2]



Obr. 2.1 Schématické zobrazení měřícího pracoviště pro optickou emisní spektroskopii^[6]



Rozsah zachycených vlnových délek závisí na provedení pracoviště. Nejčastěji se pracuje s rozsahem zhruba od 200nm do 1 μ m, který odpovídá viditelné oblasti vlnových délek rozšířené o UV a IR záření. Pro kratší vlnové délky už je zapotřebí použití vakuových měřicích systémů z důvodu absorpce záření ve vzduchu. Naopak pro delší vlnové délky je díky vysokému šumu tepelného pozadí zapotřebí nákladných detekčních zařízení.

K vyhodnocení naměřeného spektra lze použít tabulky spektrálních čar jednotlivých prvků, neboť každý prvek vyzařuje své charakteristické vlnové délky. Intenzita (výška) spektrální čáry odpovídá hustotě obsazení dané excitované hladiny uvažovaného prvku. Navíc se vyhodnocuje i tzv. pološířka spektrální čáry $\Delta\lambda_{FWHM}$ jako parametr profilu spektrální čáry. Hodnota $\Delta\lambda_{FWHM}$ je rovna šířce čáry v polovině jejího maxima a využívá se pro diagnostiku plazmatu s ohledem na různé mechanismy rozšíření spektrálních čar.^[2]

Optická emisní spektroskopie se uplatňuje převážně v diagnostice nízkoteplotního plazmatu, které se využívá například pro povrchovou úpravu materiálů nebo ve zdravotnictví. Mezi nejzákladnější diagnostické metody patří:

- Identifikace složení plazmatu

Pro diagnostiku složení plazmatu postačí kalibrovaný měřicí systém a spektrální tabulka vlnových délek atomů, iontů a molekul. Přičemž z principu metody je možné zaznamenat pouze částice, které září.

Při vyhodnocení změřeného spektra je třeba brát v úvahu Dopplerův jev, díky kterému dochází k posuvu spektrálních čar vlivem pohybu emitujících částic.

- Identifikace teploty plazmatu

Pokud předpokládáme dominantní vliv Dopplerova rozšíření spektrální čáry, lze pomocí změřené hodnoty $\Delta\lambda_{FWHM}$ určit i teplotu plazmatu. To lze uvažovat v plazmatu s nízkou hustotou elektronů hořícím ve slabém magnetickém poli. Ve vysokoteplotním plazmatu (oblouk) je nutné uvažovat ještě Starkovo a Zeemanovo rozšíření, které ovlivňují výsledný profil spektrální čáry.^[2]

2.2 Optická absorpční spektroskopie a laserem indukovaná fluorescence

Princip těchto metod je založen na průchodu světla o známé vlnové délce zkoumaným plazmatem. Jedná se o aktivní metody a vzhledem k jejich velice blízkému principu bývají používány současně. Jejich výhoda oproti emisní spektroskopii je převážně v možnosti detekce částic v základních a metastabilních stavech.

Měřicí pracoviště je oproti emisní spektroskopii nutné doplnit pouze o vhodný zdroj světla, kterým je nejčastěji laser a případně další detektor. Absorpční spektroskopie využívá schopnosti volných atomů absorbovat záření o určité vlnové délce, která odpovídá přechodům elektronů mezi energetickými hladinami atomu (inverzní princip emisní spektroskopie), zatímco princip laserem indukované fluorescence je excitace částic laserem a následné pozorování jejich fluorescence vlivem jejich de-excitace.^[7]

Uplatnění těchto metod spolu s podobnými metodami (založených např. na Thomsonově rozptylu) je významné převážně v oblasti nízkoteplotního plazmatu nebo při diagnostice plazmatu v tokamacích. Pro zkoumání spínacího oblouku jsou tyto metody méně vhodné.

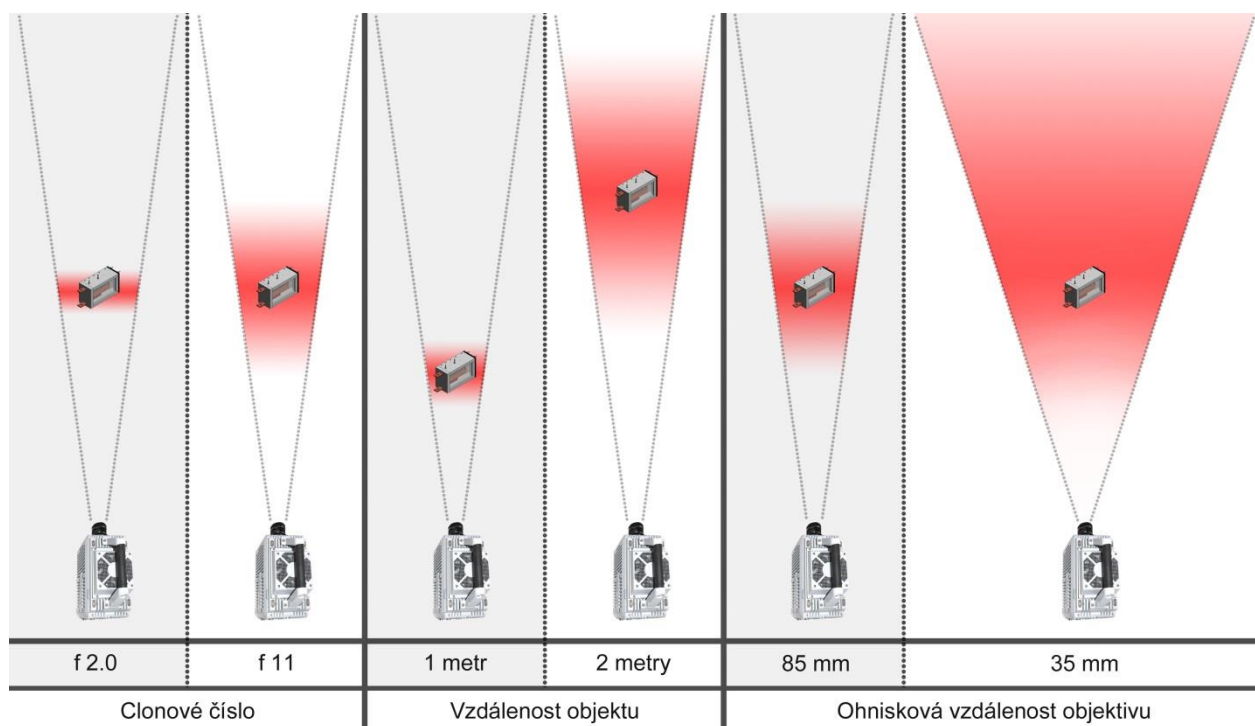
3 DIAGNOSTIKA OBLOUKU POMOCÍ VYSOKORYCHLOSTNÍ KAMERY

Pomocí vysokorychlostní kamery zaznamenávající prostý obraz nelze určit teplotu ani složení plazmatu spínacího oblouku, natož pak tok energie zářením. Její využití spočívá v diagnostice pohybu oblouku, spínacích kontaktů a dalších částí elektrických přístrojů. Přesnost těchto diagnostik úzce souvisí s kvalitou záznamu, proto se v této kapitole budeme věnovat všem parametrům ovlivňující výsledný obraz.

3.1 Ostrost záznamu

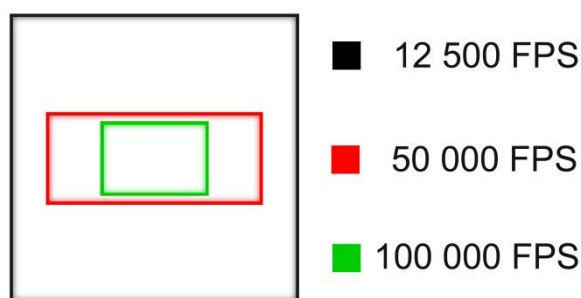
Dobrý záznam by měl být dostatečně ostrý. Ostrost záznamu je dána optickou kvalitou objektivu, jeho ohniskovou vzdáleností, rozměrovými parametry snímače atd. Velikost obrazového bodu vykresleného objektivem by měla být menší, než velikost světlocitlivé buňky snímače, určenou jeho velikostí a rozlišením. Snímače větších rozměrů s menším rozlišením mají mnohem menší nároky na použitou optiku a dosažení dobré ostrosti je snazší.

Další neméně důležitý parametr je hloubka ostrosti. Jedná se o vzájemnou vzdálenost nejbližšího a nejvzdálenějšího bodu v rovině snímače, které se v záznamu jeví jako ještě ostré. Lze ji ovlivnit clonou objektivu, jeho ohniskem a vzdáleností kamery od snímaného objektu, přičemž jen změna clony neovlivňuje velikost snímaného objektu ve výsledném záznamu. Vliv jednotlivých parametrů je znázorněn na Obr. 3.1.



Obr. 3.1 Vliv nastavení clony, vzdálenosti a použitého objektivu na hloubku ostrosti

U většiny kamer je velikost jejich snímače neměnná, vliv na výslednou hloubku ostrosti se řeší pouze při jejich výběru s ohledem na použití dané kamery. U vysokorychlostních kamer ale nastává problém s ukládáním dat při vysokých rychlostech snímání. Jejich nejvyšší možné frekvence jsou dány převážně rychlostí zápisu do interní mezipaměti. Tento problém se většinou řeší omezením velikosti dat snížením použitelného rozlišení záznamu, viz Tab 4.1. Záleží pak na použité kameře, zda zmenšuje své rozlišení vynecháním přebytečných světlocitlivých buněk na celé ploše snímače, nebo zda zmenšuje svou aktivní plochu snímače a tím uměle zmenšuje jeho rozměr. Při zvyšování rozlišení (volby pomalejší frekvence snímání) je proto nezbytné počítat i se změnou hloubky ostrosti, která může vést k neostrým částem snímku.



Obr. 3.2 Změna aktivní zóny snímače kamery Photron SA-X2 při zvyšování FPS

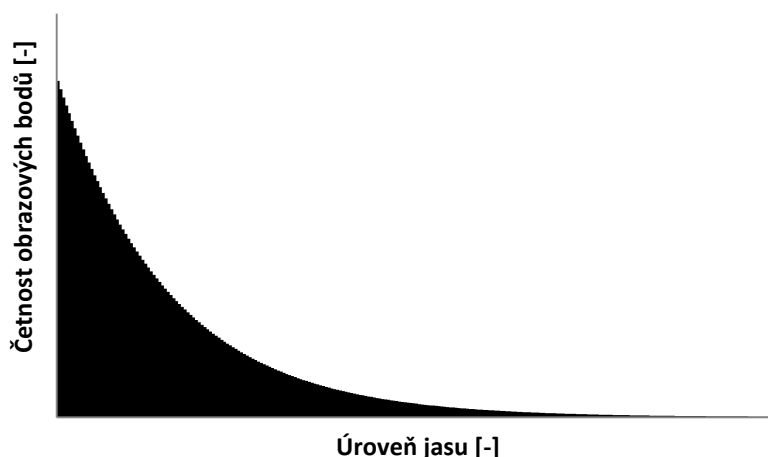
kde zkratka FPS odpovídá snímací frekvenci (z anglického výrazu *Frame Per Second*).

Posledním důležitým faktorem pro ostrý záznam je správné zaostření, které zajišťuje obsluha kamery. Je však nutné počítat s minimální zaostřitelnou vzdáleností použitého objektivu, danou konstrukčním uspořádáním jeho optických členů. Pod tuto vzdálenost již objektiv není schopen zaostřit a pro ostrý záznam je nezbytné použití speciální optiky, zvětšení vzdálenosti od snímaného objektu, nebo třeba použití mezikroužků mezi kameru a objektiv. Použití mezikroužků ovšem vede k snížení hloubky ostrosti.

Rovněž můžeme uvažovat vliv difrakce světla na lamelách clony objektivu, která při větších clonových číslech způsobuje rozšíření vykreslených obrazových bodů daným objektivem a napomáhá tak k snížení ostrosti. S ohledem na rozlišení a rozměr daného snímače je však tento vliv zanedbatelný.

3.2 Expozice záznamu

Kromě ostroty je důležité správné rozložení jasů záznamu. K jeho kontrole se používá tzv. histogram, graf znázorňující četnosti obrazových bodů jednotlivých jasových úrovní. Jeho tvar by měl v ideálním případě odpovídat požadovanému výstupu záznamu. Například pro sledování elektrického oblouku by se průběh histogramu měl blížit klesající exponenciální funkci, viz Obr. 3.3. Distribuce obsazenosti jednotlivých jasových úrovní závisí na snímaném objektu a na expozici kamery.



Obr. 3.3 Příklad vhodného histogramu pro sledování el. oblouku

Expozice je dána kombinací expozičního času, clony objektivu a citlivosti snímače. Clonové číslo lze spočítat podle vztahu:

$$f = \frac{\text{Ohnisko objektivu}}{\text{Průměr vstupní čočky}} \quad (3.1)$$

Citlivost snímače na světlo se značí číslem ISO, což je převzaté označení citlivostí analogických filmů. Expozičním časem se rozumí doba, po kterou snímač integruje dopadající světlo. Expozice se udává v tzv. expozičních hodnotách (EV), přičemž nulová hodnota expozice je definovaná při citlivosti snímače *ISO 100*, cloně *f/1.0* a času *1 s*. Lze ji spočítat jako:

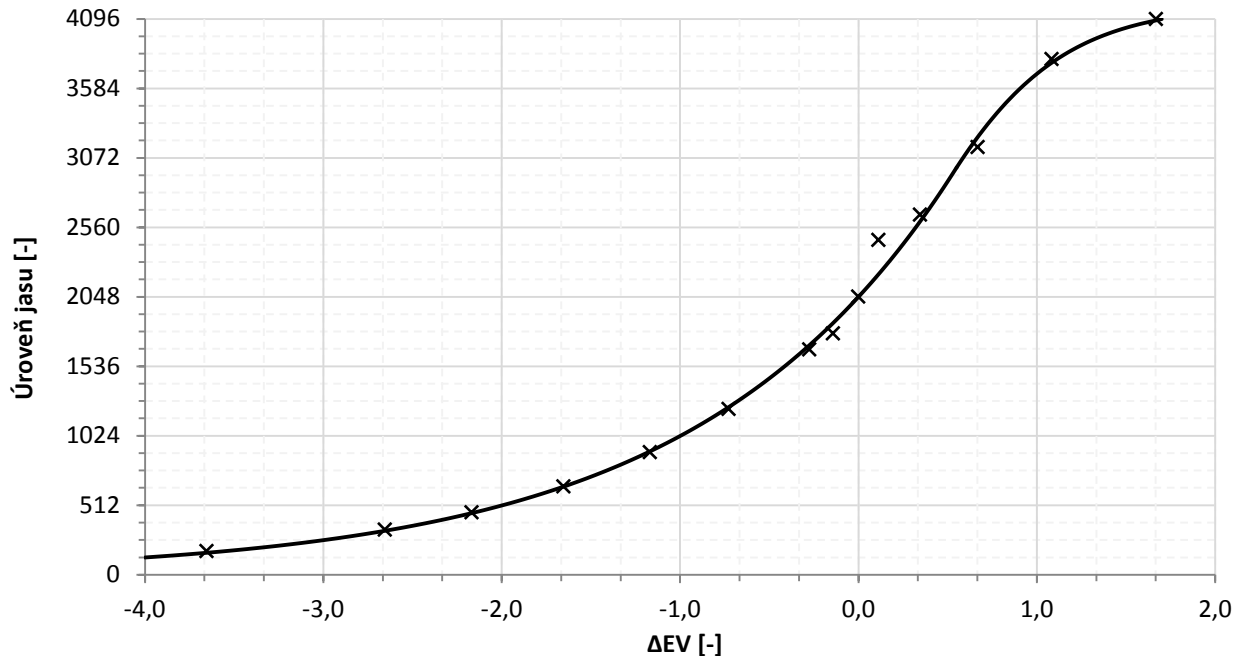
$$EV = 2 \log_2 f - \log_2 t - \log_2 \frac{ISO}{100} = \log_2 \frac{100 \cdot f^2}{ISO \cdot t} \quad (3.2)$$

kde *f* je hodnota clonového čísla a *t* expoziční čas. Z rovnice vyplývá, že posun o 1 EV odpovídá polovině (příp. dvojnásobku) propuštěného světla. Stejně expoziční hodnoty lze navíc dosáhnout různými kombinacemi výše uvedených parametrů.

Správně zvolená expozice kamery dává do rovnosti pravou stranu rovnice (3.2) s průměrnou expoziční hodnotou snímaného objektu, tedy:

$$\overline{EV_{\text{objektu}}} = EV_{\text{kamery}} \quad (3.3)$$

Přiřazení světelných bodů vykreslených objektivem k jednotlivým jasovým úrovním na výstupu snímače závisí na převodní charakteristice snímače. U většiny digitálních snímačů odpovídá její tvar funkci zvané sigmoida. Na Obr. 3.4 je uvedena experimentálně změřená převodní charakteristika kamery Photron SA-X2, přičemž osa x odpovídá světelnému vstupu snímače a osa y odpovídá digitálnímu výstupu snímače.



Obr. 3.4 Experimentálně změřená převodní charakteristika snímače kamery Photron SA-X2

Z jejího průběhu lze stanovit mnoho důležitých zákonitostí. Nejvyšší jasová rozlišitelnost (kontrast) je v okolí inflexního bodu křivky, tedy zhruba ve třetí čtvrtině jasového rozsahu daného snímače. S tím ovšem souvisí i mnohem menší dynamický rozsah scény v horní polovině jasových úrovní. To v praxi znamená, že lepší kontrast horní poloviny je vykoupen právě větším rizikem saturace obrazových bodů, vedoucí ke ztrátě detailů. Naopak spodní polovina jasových úrovní snímače poskytuje výrazně větší dynamický rozsah scény, ovšem s menším kontrastem.

Zajištění správné expozice po celou dobu snímání spínacího oblouku je bohužel jen těžko dosažitelné, neboť intenzita záření závisí na okamžitých energetických poměrech oblouku. Je proto vhodné přednastavit expozici upravenou na maximální hodnotu předpokládaného proudu, nebo na sledovaný úsek vypínacího průběhu.

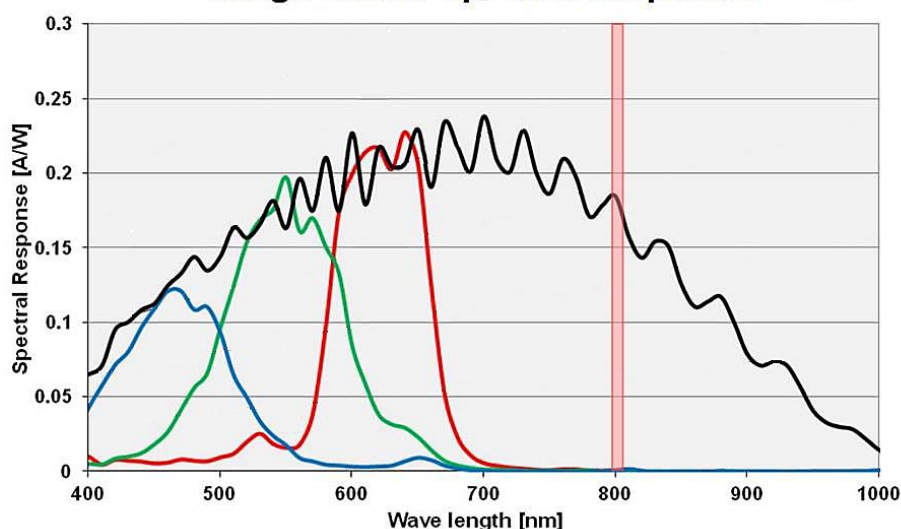
3.3 Omezení jasu záznamu

Vzhledem k výrazné intenzitě záření spínacího oblouku je příhodné světlo před dopadem na snímač kamery omezit. Tomu napomáhá velice krátký čas expozice, daný především velkým počtem snímků za vteřinu. Pro možnost natáčení i méně jasných objektů jsou ale vysokorychlostní kamery často vybaveny velice citlivými snímači, proto je nutné omezit množství světla ještě jiným způsobem. Takové omezení je vhodné provést tak, aby došlo k co nejmenšímu zásahu do snímaného zařízení. Tuto možnost poskytují optické filtry, které se šroubují na přední čočku objektivu kamery.

3.3.1 Použití spektrálního filtru s laserovými světly

Spektrální filtr propustí pouze světlo určité vlnové délky, nebo přesněji rozmezí vlnových délek. Na snímač tak dopadne jen zlomek světla oblouku zářícího v širokém spektrálním oboru, přičemž míra omezení propuštěného světla závisí právě na šířce pásma použitého spektrálního filtru a na spektrálním rozložení záření. Filtr navíc eliminuje vliv různé spektrální citlivosti snímače kamery Photron SA-X2, jak je znázorněno na Obr. 3.5.

Image Sensor Spectral Response:

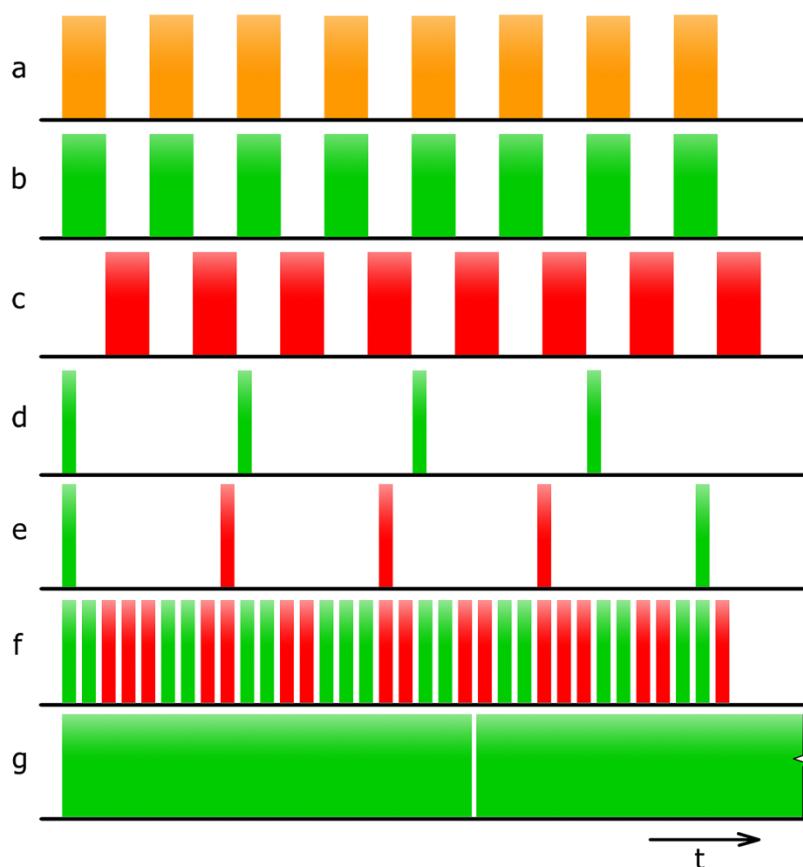


Obr. 3.5 Spektrální citlivost použité kamery s vyznačeným rozsahem filtru $807\text{nm} \pm 6\text{nm}$ ^[8]

Určení posunu expoziční hodnoty ΔEV spektrálního filtru je pro různá měření individuální a nezbývá, než ho určit experimentálně a pro každý druh měření zvlášť.

Takto upravený snímací systém dokáže zachytit jen oblouk a okolní části jím ozařované. Pro současné sledování nezářících částí (např. vybavovacího mechanismu u jističů) je nutné použití dostatečně silného laserového přísvisitu se světlem vlnové délky překrývající rozsah spektrálního filtru.

Je-li záření od světelných zdrojů nespojitě a přisvit je řešen pomocí krátkých světelných impulzů, je nezbytné tyto impulzy synchronizovat s nastavenou závěrkou kamery. Takto můžou být řešené výkonné světelné zdroje infračerveného záření, přičemž snímací zařízení pracující na menší frekvenci (např. 30 FPS) podobné problémy se synchronizací mít nemohou už jen z principu jejich činnosti. Pokud však bude frekvence světelných impulzů zdroje menší, než frekvence závěrky, objeví se v záznamu neosvětlené snímky a přisvit se bude jevit jako pulzující. U ekvivalentních frekvencí je nutná přesná synchronizace světla s kamerou, případně je nutné zvolit vhodnější frekvenci snímání. Problematika synchronizace světla s rychlostí závěrky je znázorněna na Obr. 3.6.



Obr. 3.6 Vliv synchronizace světla s frekvencí snímání kamery

kde řada *a* odpovídá laserovým světlům; řady *b* – *g* odpovídají závěrce kamery. Je patrné, že při shodné frekvenci (*b*, *c*) nevznikne efekt pulzace, pouze je zde riziko omezení účinnosti přisvitu. Stejný problém platí i pro řadu *d* navzdory menší frekvenci snímání, což je dáno možností kamery nastavit menší čas závěrky, než který odpovídá zvolené frekvenci. Pokud podobně zvolíme kratší čas závěrky spolu s neceločíselným násobkem frekvence kamery oproti světlům (*e*), je velká šance, že dojde k pulzacím světla, stejně jako v případě *f*, kde je frekvence snímání vyšší, než frekvence laserového přisvitu. Řada *g* ilustruje odolnost pomaleji pracujících snímacích zařízení na tento jev.

Nutno podotknout, že stejné opatření je potřebné provést nejen u laserového přisvitu, ale obecně u všech doplňkových světla, které výrazněji ovlivňují výsledný obraz.

3.3.2 Použití neutrálního šedého filtru

Neutrální šedý filtr propustí světlo všech snímatelných vlnových délek. Jeho funkce spočívá v omezení intenzity světla uvažovaných vlnových délek. Schopnost omezení udává optická hustota filtru, kterou lze určit z poměru intenzit propuštěného a dopadeného světla jako:

$$\frac{I}{I_0} = 10^{-d} \quad (3.4)$$

kde I je světlo propuštěné filtrem, I_0 je světlo dopadající na filtr a d je optická hustota filtru.

Neutrální šedé filtry se vyrábějí v širokých škálách optických hustot, většinou odstupňovaných o 1 expoziční hodnotu (EV), která z rovnice (3.4) odpovídá zhruba optické hustotě $d = 0,3$. V praxi se používá ještě jiné označení optické hustoty, určené podle vztahu:

$$d' = 2^{\Delta EV} \quad (3.5)$$

kde ΔEV je expoziční posun záznamu po použití filtru. Přehled běžně vyráběných neutrálních šedých filtrů je uveden v následující tabulce.

Optická hustota filtru		ΔEV	Propustnost
d'	d	[-]	[%]
2	0,3	1	0,5012
4	0,6	2	0,2512
8	0,9	3	0,1259
16	1,2	4	0,0631
32	1,5	5	0,0316
64	1,8	6	0,0158
128	2,1	7	0,0079
256	2,4	8	0,0040
512	2,7	9	0,0020
1024	3,0	10	0,0010

Tab. 3.1 Přehled běžně používaných ND filtrů

Pro dosažení většího omezení světla je možné řadit více neutrálních filtrů za sebe. Výsledná optická hustota takto spojených filtrů se počítá pro každé označení odlišně podle vztahů:

$$\begin{aligned} d' &= d'_1 \cdot d'_2 \\ d &= d_1 + d_2 \end{aligned} \quad (3.6)$$

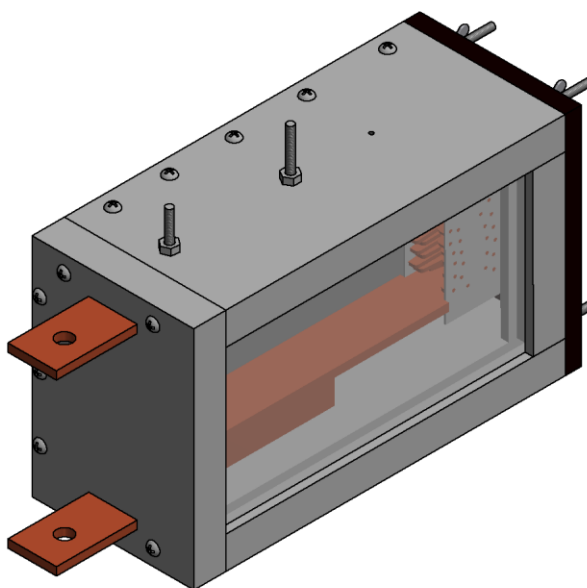
Při řazení filtrů za sebou však musíme dbát na tloušťku celkového systému filtrů, neboť u objektivů širších ohnisek mohou filtry vinětovat, což se projevuje snížením jasu v okrajových částech snímku.

4 POPIS MĚŘÍCÍHO PRACOVÍŠTĚ

V této kapitole je uveden přehled všech důležitých zařízení použitých při měření.

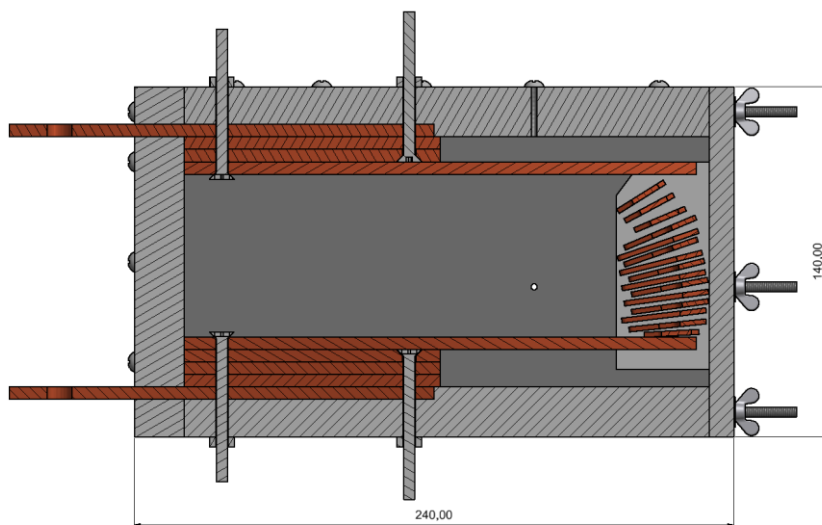
4.1 Parametrická zkušební komora

Konstrukce parametrické zkušební komory, ve které byl spínací oblouk pozorován, odpovídala požadavkům jiné závěrečné práce. Jednalo se o možnost změny vzdálenosti vodičů, zhášecí komory, tvaru výfukových otvorů atd. Komora byla dostatečně segmentovaná pro snadnou zaměnitelnost jednotlivých komponent, hlavně však čirého bočního krytu.



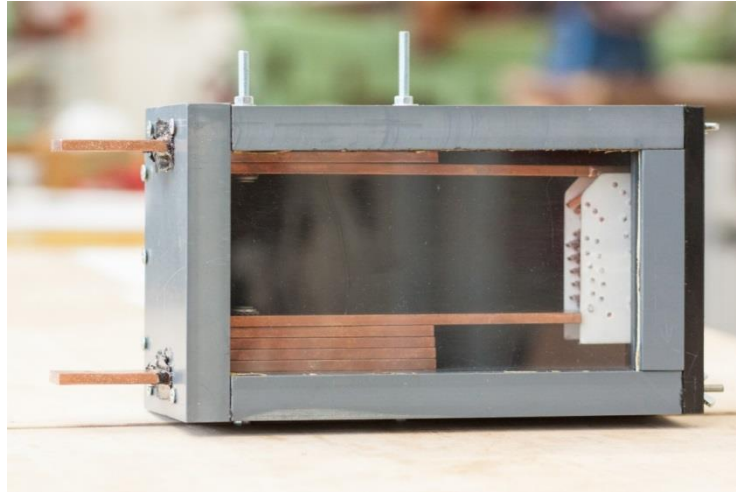
Obr. 4.1 Náhled parametrické zkušební komory bez vrchní části

Pro sledování pohybu oblouku ze dvou na sebe kolmých směrů bylo vyrobeno několik průhledných bočních krytů ze strany přípojníc. Dále byly zhotoveny otvory pro připojení tlakových snímačů. Boční řez a výsledná fyzická realizace komory je uvedena na Obr. 4.2 a Obr. 4.3.

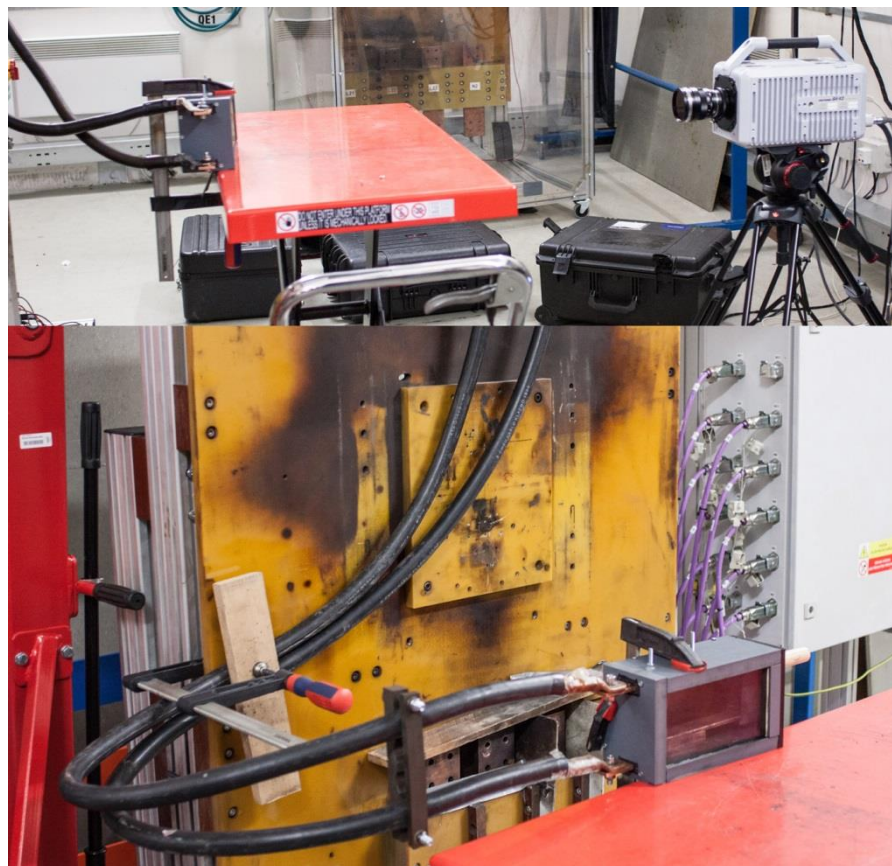


Obr. 4.2 Boční řez parametrickou zkušební komorou s vyznačenými hlavními rozměry

Zapálení elektrického oblouku bylo dosaženo přehořením slabého drátku, nataženého mezi obě elektrody v levé části komory. Silou proudového záhybu byl oblouk hnán do deionizační komory, která měla napomoci k jeho uhašení. Pro zvýšení silových účinků byl dodatečně upraven přívod elektrické energie podle Obr. 4.4. Mezi elektrody a vodivé podložky umožňující změnu vzdálenosti elektrod byla vložena tenká izolace.



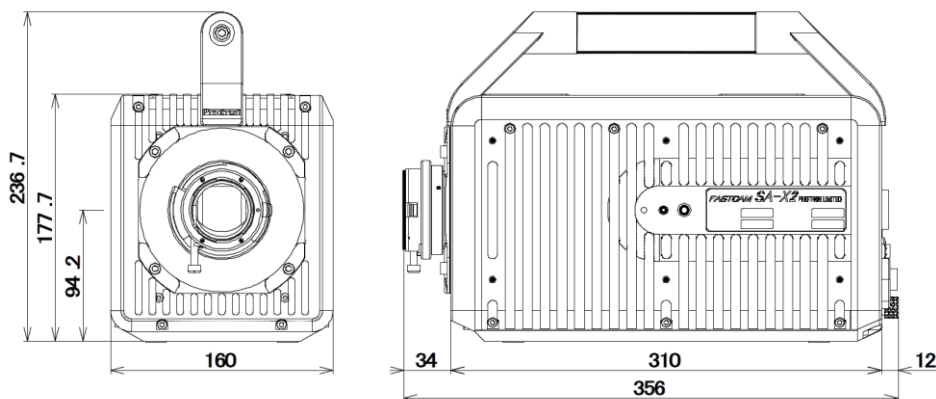
Obr. 4.3 Fyzická realizace komory



Obr. 4.4 Úprava původního zapojení přívodů (nahore) novým pro zvýšení silových účinků

4.2 Vysokorychlostní kamera Photron SA-X2

Pro snímání spínacího oblouku byla použita vysokorychlostní kamera Photron SA-X2. Podrobné technické údaje lze dohledat v [8].



Obr. 4.5 Proporce vysokorychlostní kamery Photron SA-X2 bez objektivu^[8]

Základní technické údaje:

Model:	1000K – monochromatické provedení; 16GB
Senzor:	CMOS, 1024x1024 pixelů, velikost pixelu 20 μ m, 12-bit
Citlivost ISO:	ISO 25000
Závěrka:	Elektronická s rychlostí až 293 ns
Rozlišení videa:	Závislé na frekvenci snímání, viz Tab 4.1
Použitý objektiv:	Zeiss Planar T* 85mm f/1.4 ZF.2

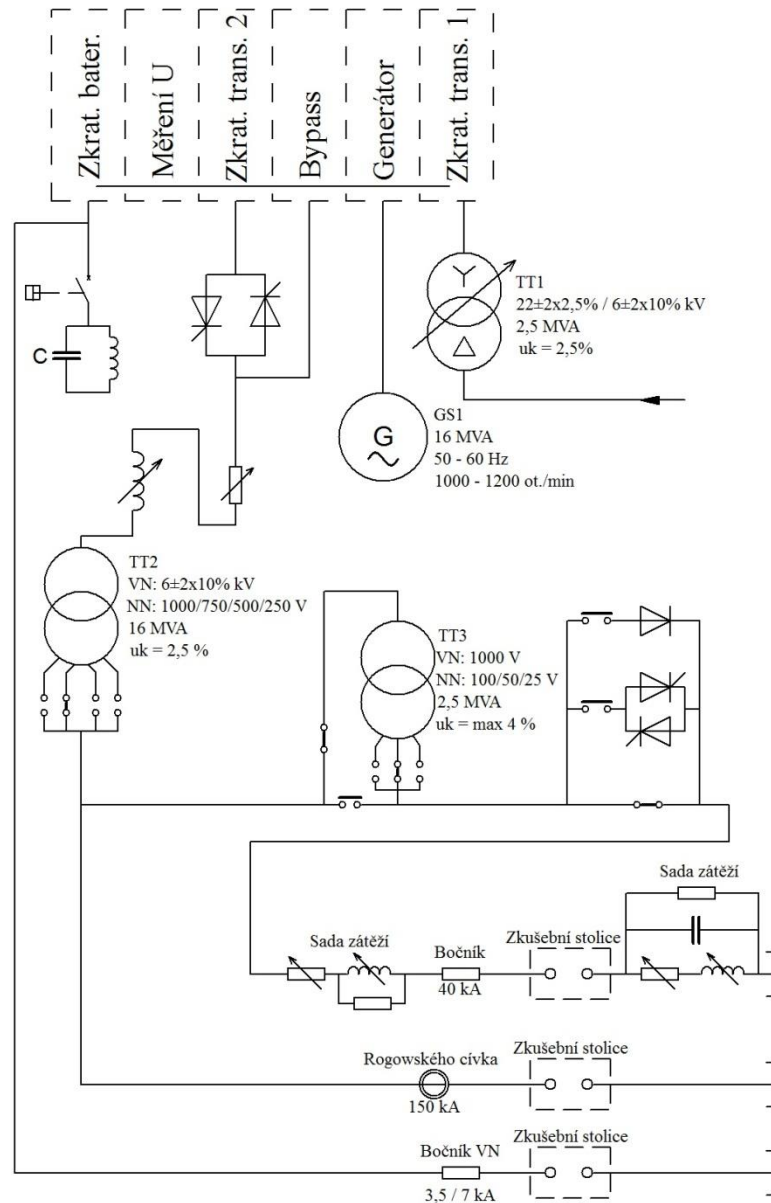
FRAME RATE (fps) *	MAXIMUM RESOLUTION		RECORD DURATION (12-BIT)							
			TIME (Sec.)				FRAMES			
			8GB	16GB	32GB	64GB	8GB	16GB	32GB	64GB
Model 480K										
1,000	1,024	1,024	5.45	10.91	21.83	43.68	5,455	10,916	21,839	43,684
2,000	1,024	1,024	2.72	5.45	10.91	21.84	5,455	10,916	21,839	43,684
5,000	1,024	1,024	1.09	2.18	4.36	8.73	5,455	10,916	21,839	43,684
10,000	1,024	1,024	0.54	1.09	2.18	4.36	5,455	10,916	21,839	43,684
12,500	1,024	1,024	0.43	0.87	1.74	3.49	5,455	10,916	21,839	43,684
13,500	1,024	1,000	0.41	0.82	1.65	3.31	5,586	11,178	22,363	44,733
18,000	896	848	0.41	0.83	1.67	3.34	7,529	15,066	30,140	60,287
22,500	768	768	0.43	0.86	1.72	3.45	9,699	19,408	38,827	77,663
40,000	640	468	0.45	0.91	1.83	3.66	18,320	36,656	73,327	146,670
45,000	512	512	0.48	0.97	1.94	3.88	21,827	43,672	87,363	174,744
50,000	640	384	0.46	0.93	1.86	3.72	23,282	46,584	93,187	186,394
75,000	512	296	0.50	1.00	2.01	4.03	37,756	75,543	151,116	302,262
100,000	384	264	0.56	1.12	2.25	4.51	56,445	112,934	225,912	451,868
200,000	256	152	0.73	1.47	2.94	5.88	147,058	294,227	588,564	1,177,238
400,000	256	48	1.16	2.32	4.65	9.31	465,690	931,724	1,863,791	3,727,926
480,000	384	24	1.29	2.58	5.17	10.35	62,091	1,242,299	2,485,056	4,970,569
Model 1000K										
720,000	256	8	3.88	7.76	15.53	31.06	2,794,152	5,590,355	11,182,760	22,367,571
900,000	128	8	6.20	12.42	24.85	49.70	5,588,307	11,180,712	22,365,523	44,735,144
1,000,000	128	8	5.58	11.18	22.36	44.73	5,588,307	11,180,712	22,365,523	44,735,144

* FPS=Frame Per Second

Tab 4.1 Závislost rozlišení videa na frekvenci snímání kamery^[8]

4.3 Laboratoř spínacích přístrojů

K měření a snímání bylo využito prostor Vědecko-technického parku profesora Lista, přesněji Laboratoře spínacích přístrojů, která je určena pro zkratové zkoušky elektrických strojů a přístrojů.



Obr. 4.6 Orientační schéma Laboratoře spínacích přístrojů

Jako zdroj energie jsme používali motor-generátor GS1. Samotná zkušební komora byla připojena mezi dvě fáze zkušební stolice určené pro měření menších proudů do hodnoty 40 kA. Data z měřicích čidel jsou ukládána s časovým rozlišením 0,02 μ s.

5 VÝSLEDKY MĚŘENÍ

Na zkušební parametrické komoře proběhlo bezmála 40 pokusů, během nichž jsme měnili parametry v rozsahu:

- Velikost zkratového proudu: $I_{max} = 2,8 - 7,6 \text{ kA}$
- Velikost napětí zdroje: $U_z = 220 - 550 \text{ V}$
- Vzdálenost elektrod: $l = 20 - 65 \text{ mm}$
- Plocha výfukových otvorů: $S = 0 - 3 \times 64 \text{ mm}^2$

přičemž na výslednou intenzitu záření oblouku měly výraznější vliv pouze parametry měnicí elektrický příkon do oblouku. Rovněž byly provedeny dva záznamy uzpůsobené pro pokus o trojrozměrnou rekonstrukci oblouku. Měření byla provedena s různými kombinacemi optických filtrů pro porovnání jejich vlivu na výsledný obraz.

Expoziční hodnota kamery zůstávala po celou dobu měření konstantní, určena nastavenými parametry:

- Expoziční čas: $1/3410526 \text{ s}$
- Clonové číslo objektivu: $f/16$
- Citlivost snímače: $\text{ISO } 25000$

kteřou lze vyčíslit podle rovnice (3.2) jako:

$$EV_{cam} = \log_2 \frac{100 \cdot f^2}{ISO \cdot t} = \log_2 \frac{100 \cdot 16^2}{25000 \cdot 0,293^{-12}} = 21,74 \quad (5.1)$$

Použitý spektrální filtr měl propustné pásmo rovné hodnotě $(807 \pm 6) \text{ nm}$. Pro dané měření byl experimentálně určen jeho expoziční posun na $\Delta EV_{\text{spekt}} \approx 4$.

V následujících podkapitolách budou uvedeny všechny důležité zákonitosti a postupy pro kvalitní snímání elektrického oblouku, vycházející z tohoto měření.

5.1 Nastavení kamery pro snímání

Nastavením kamery rozumíme její umístění, volbu expozice, objektivu a v neposlední řadě i zaostření. Toto nastavení se může měnit pro každé měření s ohledem na parametry snímaného objektu. Postupné nastavování stylem pokus-omyl však může zabrat spoustu času a nadbytečné opotřebení zkoušeného zařízení při tomto seřizování může ohrozit dokončení všech naplánovaných pokusů. Proto je vhodné pomocí předem známého postupu omezit počet zkušebních záznamů na minimum, což je cílem této podkapitoly.

- *Objektiv* (jeho ohnisko) volíme tak, abychom zajistili zobrazení celého zařízení s ohledem na jeho bezpečnou vzdálenost (viz Tab. 5.2). Zároveň je vhodné uvažovat vliv použitého ohniska na hloubku ostrosti. Každý objektiv může mít přitom různou hodnotu maximálního clonového čísla f , které je dáno jeho konstrukcí. Pro ulehčení následné diagnostiky by osa nasazeného objektivu měla být kolmá na jednu z rovin objektu.
- *Zaostření* je vhodné provádět s úplně odcloněným objektivem pro možnost přesnějšího umístění středu hloubky ostrosti.

- Nastavení *expozice* podle předpokládaných výkonových poměrů v oblouku už je složitější. Intenzita záření totiž nezávisí jenom na proudu tekoucí obvodem a nelze proto určit univerzální tabulku expozičních hodnot pro dané velikosti proudu. Z množství provedených měření však můžeme určit průměrné hodnoty expozice oblouku pro jednotlivá měření a dané velikosti proudu.

Měření č.1		Měření č.2		Měření č.3	
I_{\max}	EV_{arc}	I_{\max}	EV_{arc}	I_{\max}	EV_{arc}
[A]	[-]	[A]	[-]	[A]	[-]
3000	35,50	3500	39,4	4000	37,4
4000	36,07	6000	40,23	6000	37,8
5000	36,07	7600	40,74		
6000	36,24				

Tab. 5.1 Průměrné hodnoty expozice kamery pro jednotlivá měření a dané velikosti proudu

Tyto hodnoty byly určeny v souladu s rovnicí (3.3), kterou lze rozšířit o expoziční posuny použitých optických filtrů jako:

$$EV_{\text{arc}} = EV_{\text{cam}} + \Delta EV_{\text{filter}} \quad (5.2)$$

Za rovnost výše uvedené rovnice jsme považovali umístění nejsvětlejší oblasti záznamu v okolí inflexního bodu převodní křivky snímače, přičemž jsme uvažovali délku záznamu odpovídající době od zapálení oblouku k jeho prvnímu kontaktu s deionizační komorou. Nejvíce přitom září právě katodová skvrna, která je přibližně o 1-2 EV světlejší než tělo oblouku. Tento rozdíl závisí na průběhu vypínání a je pro každý vypínací pochod mírně odlišný.

Měření probíhalo ve třech různých termínech z důvodu oprav zkušební komory. Orientačně určené expoziční hodnoty oblouku mezi jednotlivými termíny měření, uvedené v Tab. 5.1, se ale výrazně liší. V rámci jednotlivých termínů je však odstupňování expozičních hodnot dle velikosti proudu přijatelné. Příčina konstantních jasových posunů mezi měřeními byla shledána ve výměně zadního krytu komory a tedy ve změně její odrazivosti. První měření bylo prováděno s černým, matným krytem, jak je možno vidět na Obr. 4.3. Ten však nevydržel tlakové poměry v komoře. Pro další měření jsme proto použili tlustší materiál, používaný i na boční stěny komory (šedivý, méně matný). Právě kombinace světlejšího a lesklejšího povrchu měla za následek výrazné zvýšení expoziční hodnoty oblouku. V posledním měření jsme měnili vzdálenost elektrod. Posun expoziční hodnoty proto mohl nastat vlivem zvýšení rychlosti pohybu pat oblouku spolu s postupnou desublimací částic hoření na površích uvnitř komory.

Je proto nezbytné uvažovat i odrazivost snímaných ploch, což jen ztěžuje prvotní nastavení expozice kamery. Hodnoty expozic uvedené v tabulce je tak třeba brát pouze orientačně, přičemž jen první měření dopovídá černému a matnému pozadí. Započítáme-li i vlastnosti průhledného krytu komory (viz kapitola 5.3), lze stanovit přibližnou hodnotu expozice elektrodových skvrn oblouku jako:

$$EV_{\text{arc}} (I=5 \text{ kA}) \approx 37,33 \quad (5.3)$$

platnou pro černé neodrazivé pozadí a čirý spektrálně neutrální průhledný kryt.

Z výše uvedených závěrů plyne, že k ideálnímu prvotnímu nastavení expozice kamery je většinou zapotřebí minimálně jeden iterační proces. Uvedeme příklad takového nastavení.

Mějme zařízení nízkého napětí, u kterého budeme chtít snímat elektrický oblouk, přesněji jeho tělo. Maximální velikost proudu by se měla pohybovat okolo hodnoty 10 kA. K zakrytování přístroje bude použito čirého neutrálního materiálu a pro omezení světla budou k dispozici pouze neutrální šedé filtry. Zadní stěna přístroje bude z šedého středně odrazivého materiálu. Postup při nastavení expozice může vypadat takto:

→ Z Tab. 5.1 a rovnice (5.3) určíme pravděpodobnou hodnotu expozice oblouku:

$$EV_{arc} = 37,33 + 1,33_{(\Delta I)} + 4_{(odraz)} - 1_{(t\acute{e}lo\ oblouku)} = \mathbf{41,66}$$

kteřá je zvolena pro mírné podexponování snímku z důvodu většího dynamického rozsahu ve spodních úrovních.

→ Zvolíme požadovanou frekvenci snímání, která pro účel synchronizace s daty z osciloskopu může být právě 50000 FPS. Podle velikosti přístroje zvolíme vhodné ohnisko objektivu s přihlédnutím k bezpečné vzdálenosti kamery od zařízení. Pro rychlejší orientaci můžeme uvést tabulku nejčastěji používaných objektivů:

Ohnisko objektivu [mm]	Diagonální úhel záběru ¹ [°]	Šířka záběru ve vzdálenosti 2 m [m]
35	44° 57'	1,17 x 1,17
50	32° 18'	0,82 x 0,82
85	19° 20'	0,48 x 0,48
105	15° 42'	0,39 x 0,39

Tab. 5.2 Šířka záběru běžně používaných objektivů u kamery Photron SA-X2

V živém režimu programu PFV objektiv zaostříme a zkontroluje hloubku ostroty přicloučením na maximální hodnotu.

→ Z maximálního clonového čísla vypočítáme expoziční hodnotu kamery. Čas závěrky zvolíme nejmenší možný (293 ns) pro omezení jasů záznamu. Nechť tedy hodnota expozice kamery činí známých $EV_{cam} = \mathbf{21,74}$.

→ K dostatečnému omezení světla budeme potřebovat ještě filtr, jehož optickou hustotu zvolíme podle rovnice (5.2). Potřebné hodnotě $\Delta EV_{filter} = \mathbf{19,92}$ bude podle Tab. 3.1 přibližně odpovídat kombinace filtrů ND 1024 + ND 1024, umístěných za sebe. Provedeme prvotní pokus.

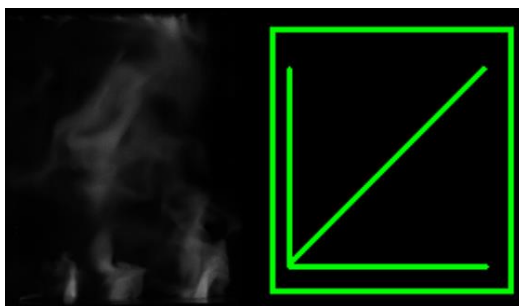
→ Kontrolu záznamu z hlediska jasového rozložení je možné uskutečnit už v programu **Photron Fastcam Viewer**, přesněji v doplňkovém modulu **Histogram**. Je pravděpodobné, že výsledný záznam nebude exponovaný ideálně (sledovaný úsek elektrického oblouku nebude ležet ve třetí čtvrtině jasového rozsahu snímače). Poté je vhodné provést korekci expozice systému kamera + optické filtry podle Obr. 3.4. Následné záznamy by už měli splňovat všechny požadavky pro maximalizaci informací pro následnou diagnostiku. Je ovšem nutné počítat se stochasticitou procesu hoření oblouku, proto nelze zajistit pozici uvažovaného úseku oblouku ve středu jasového rozsahu pro všechna měření. Vzhledem k rozsahu snímače je však posun o $\pm 0,66$ EV zanedbatelný.

¹ Hodnoty úhlů a šířky záběru platí pouze pro rozlišení obrazu 1024 x 1024 pixelů.

5.2 Možnosti úpravy záznamu

Konečný vzhled záznamu lze ovlivnit následnou editací v počítači. Tímto krokem už nelze zvýšit informační hodnotu snímku, můžeme pouze zpřehlednit data reprodukováná snímačem kamery. Efekt úpravy záznamu je závislý na správnosti nastavení expozice kamery.

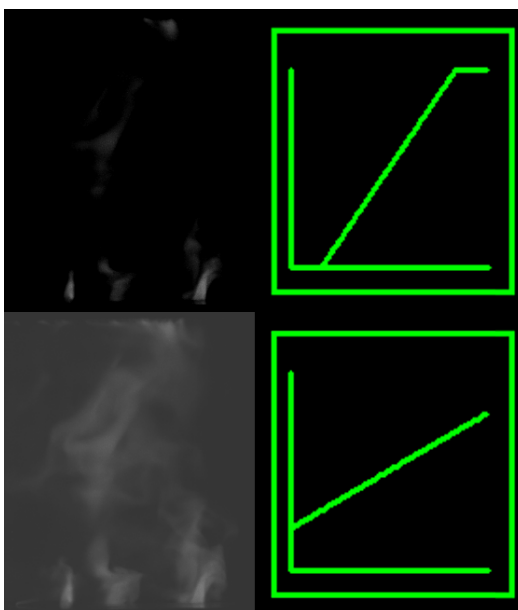
Pro editaci je možné využít již zmíněného programu *Photron Fastcam Viewer (PFV)*, určeného k obsluze kamery a ukládání snímků z její paměti do počítače. Jasové rozložení výstupu lze ovlivnit nástroji LUT (LookUp Table), kterými jsou kontrast, jas a gamma korekce. Jejich dopad na výsledný obraz lze určit už ze změny tvaru převodní charakteristiky jasových úrovní záznamu². Uvedeme příklad těchto úprav pro Obr. 5.1, představující výstupní snímek (neupravený) ze snímače kamery:



Obr. 5.1 Neupravený snímek

Kontrast:

Upravuje strmost převodní charakteristiky s ukotvením ve středu rozsahu. Použitím takové úpravy dochází ke změně rozestupu jednotlivých jasových úrovní, což vede k omezení celkového využitého rozsahu jasů vstupního (zvyšování kontrastu) nebo výstupního snímku (snižování kontrastu).

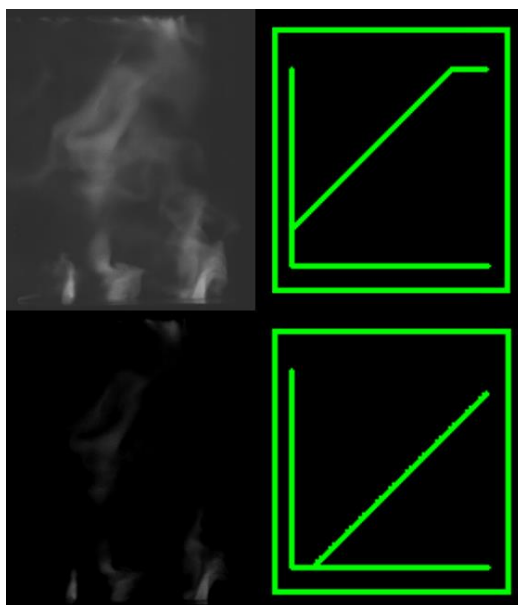


Obr. 5.2 Upravený snímek, nahoře zvýšení kontrastu, dole snížení kontrastu

² Jen pro upřesnění, převodní charakteristika snímače z Obr. 3.4 určuje vztah mezi digitálním výstupem snímače a intenzitou světla, zatímco převodní charakteristika jasových úrovní záznamu určuje vztah mezi vstupním neupraveným snímkem a výstupním snímkem (ukládaným do PC)

Jas:

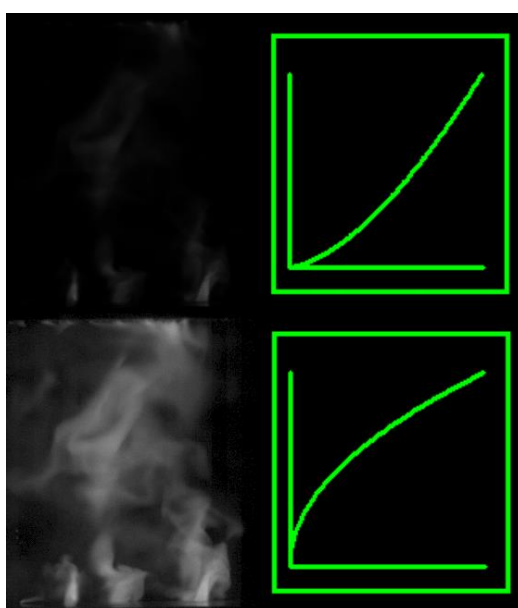
Na rozdíl od kontrastu, jas nemění strmost převodní charakteristiky, ale pouze její polohu vůči počátku posunem všech jasových úrovní o stejnou hodnotu níž (doprava) nebo výš (doleva).



Obr. 5.3 Upravený snímek, nahoře zvýšení jasu, dole snížení jasu

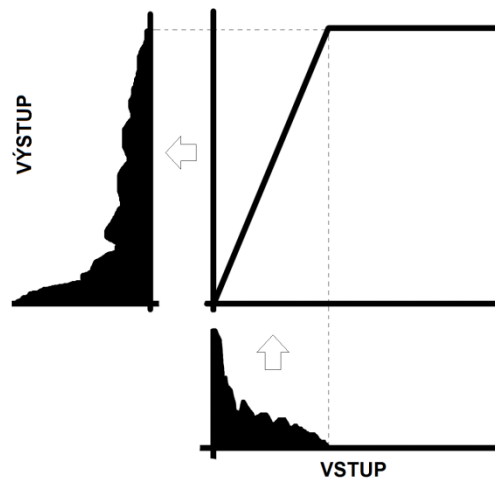
Gamma korekce:

Použití gamma korekce mění rozložení jasů výsledného snímku pomocí mocninné funkce v intervalu $< 0; 1 >$ s exponentem rovným hodnotě gamma. Proto tato úprava jako jediná nemění nejsvětlejší ani nejtmaší bod původního snímku. V programu PFV korekce více ovlivňuje nižší jasové úrovně, proto zde s prosvětlením obrazu dochází i k zvýraznění šumu snímače ($\text{gamma} < 1$), nebo ke ztrátě rozlišitelnosti tmavých částí se ztmavováním obrazu ($\text{gamma} > 1$).



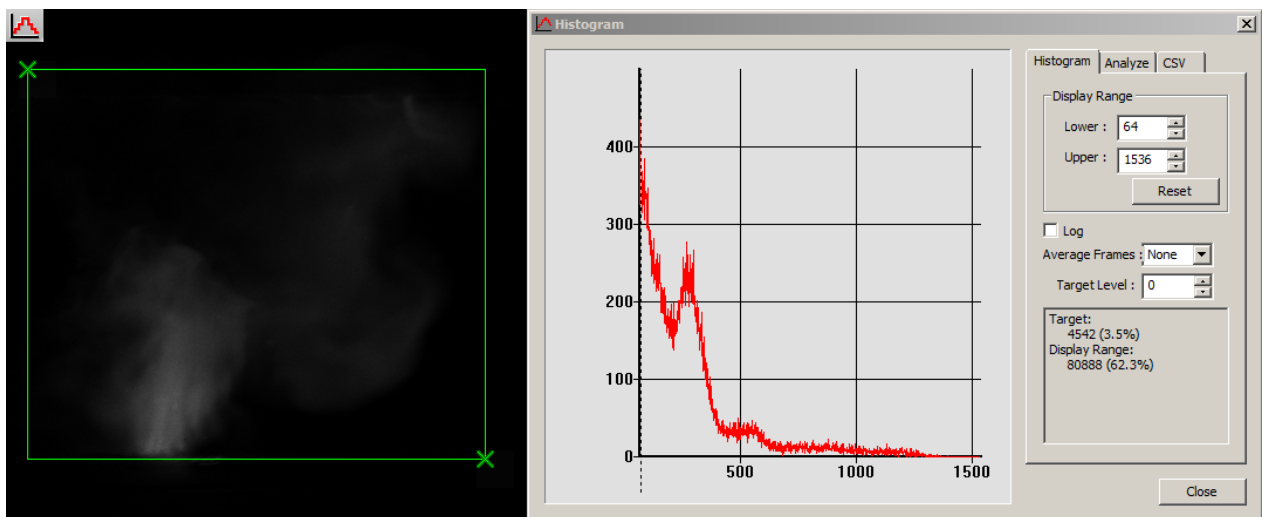
Obr. 5.4 Upravený snímek, nahoře zvýšení gammy, dole snížení gammy

Je patrné, že není vhodné provádět úpravu snímku pouze jedním nástrojem palety LUT. Naopak je výhodné tyto nástroje kombinovat způsobem, abychom zvýraznili užitečnou oblast původního snímku. Při podexponovaném snímku může taková kombinace úprav vypadat takto:



Obr. 5.5 Změna rozložení jasů (histogramu) při kombinaci nástrojů úprav

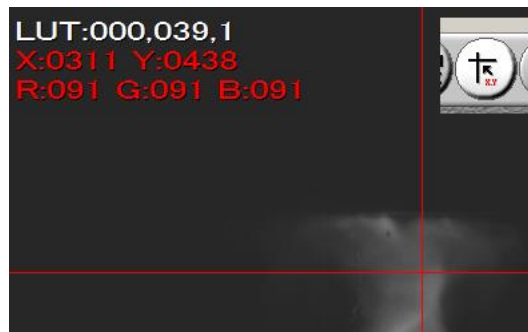
Úpravy v programu PFV mají několik nevýhod. Tou největší je nemožnost vrácení nastavení LUT po uložení záznamu. Je proto nutné uložit nejdříve originální záznam a až poté provádět jeho úpravy, přičemž editovaný záznam je nezbytné uložit jako kopii. Další nevýhodou může být nemožnost manuálního přizpůsobení převodní křivky daným potřebám, ale nutnost kombinace výše zmíněných nástrojů LUT. Zásuvný modul *Histogram* navíc zobrazuje pouze rozložení jasů vstupního snímku bez ohledu na provedené úpravy.



Obr. 5.6 Zásuvný modul *Histogram* programu PFV

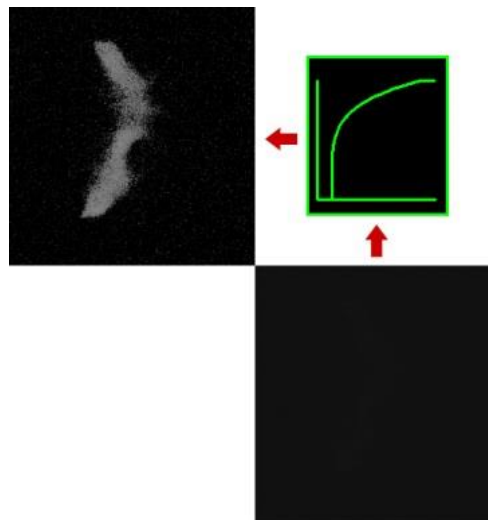
Použitelnost funkce *Histogram* je tak omezena pouze na kontrolu správnosti expozice, kdy lze z jeho průběhu určit požadovaný expoziční posun kamery. U zobrazeného průběhu je vhodné upravit rozsah jasů (Display Range), převážně tmavých oblastí.

Ke kontrole jasového rozložení po úpravě snímku je nutné použít funkci programu *Cursor mode*, která zobrazuje polohu a výslednou jasovou úroveň daného bodu. Ač je snímač 12 - ti bitový, zobrazovaný formát barevných kanálů RGB je pouze v jasové hloubce 8 bitů.



Obr. 5.7 Ukázka použití panelu *Cursor mode*

Úpravu podexponovaných snímků je vhodné provést podle Obr. 5.5, odpovídajícímu kombinaci zvýšení kontrastu a jasu záznamu. I u výrazně tmavých snímků lze vhodnou úpravou zachránit alespoň dílčí informace o poloze oblouku. Opačný případ je u přeexponovaných snímků, kde většina obrazových bodů disponuje saturem signálem a úpravou pouze tuto hodnotu ponížíme. To je jeden z důvodů, proč je vhodnější exponovat snímek spíše do levé části histogramu s umístěním nejsvětlejších míst do dvou třetin dynamického rozsahu snímače. Následné přidání kontrastu scény navíc rozšíří jasové úrovně lineárně, zatímco snahou o využití celého jasového rozsahu snímače bychom ve vyšších úrovních kontrast naopak snížili vlivem menší strmosti převodní charakteristiky snímače.



Obr. 5.8 Podexponovaný snímek oblouku a jeho následná úprava pomocí převodní křivky

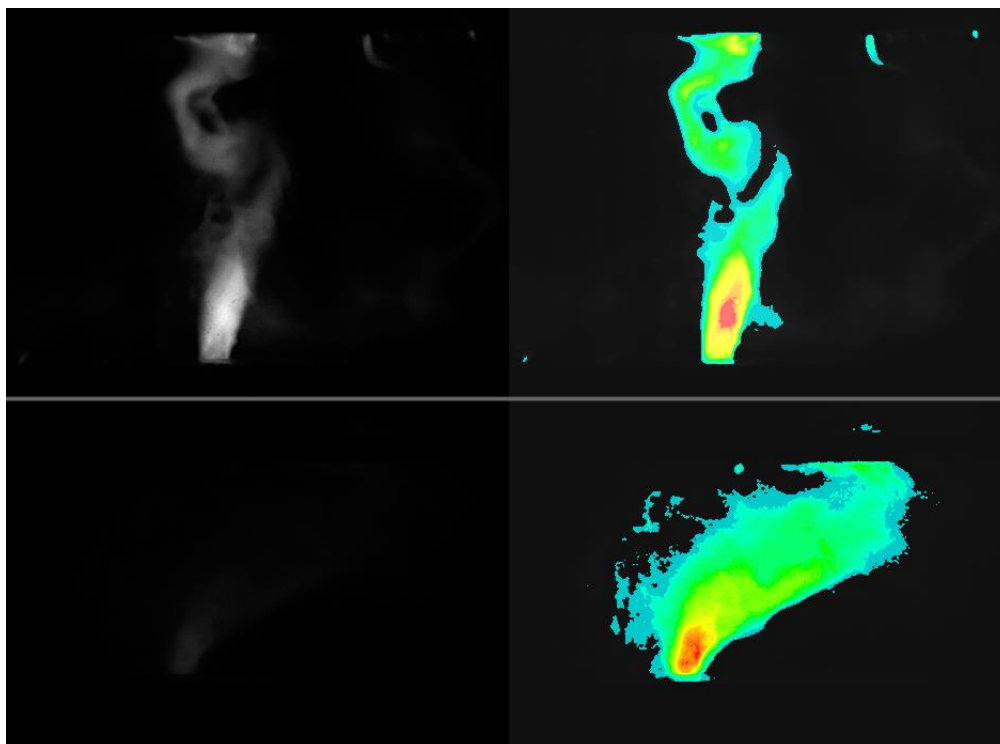
K editaci videa lze využít i jiných programů, specializovaných na úpravu videa a fotografií. Jejich výhodou je větší kontrola nad výsledným snímkem a bohatší paleta editačních nástrojů. Bohužel už samotná nutnost použití externího programu nevyrovná rozdíl v konečném vzhledu snímku a z časového hlediska postačí editační nástroje programu PFV.

Pro ukládání videa je vhodné použít nabízený formát MRAW s volbou bitové hloubky snímače (Real bit), případně formát TIFF (Real bit) pro ukládání jednotlivých snímků. Jiné formáty, jako například AVI, umožňují uložení záznamu jen v menší bitové hloubce 8-bit.

5.2.1 Využití jasových ekviintenzit

Ekviintenzita jasu je spojnice bodů se stejnou jasovou úrovní. Je zřejmé, že ve většině případů nelze zajistit spojitost ekviintenzit bez podvzorkování signálu, čímž se ale sníží jeho informační hodnota. Ztráta důležitých informací při šetrném podvzorkování je však velice nepravděpodobná. Vezmeme-li v potaz, jak široký rozsah jasů se musí rozložit v přechodu mezi tělem oblouku a okolím (řádově desítky pixelů), lze považovat 12-ti bitový signál za nadbytečný. Samotné ukládání v bitové hloubce snímače je tak spíše motivováno zajištěním originálního záznamu v nejvyšší možné kvalitě, než zpřesněním následné diagnostiky.

Výhoda ekviintenzit může být ve zlepšení přehlednosti, neboť 2^{12} jasových úrovní je pro lidské oko téměř nerozeznatelné, nehledě na maximální jasový rozsah běžných monitorů. Větší jasový rozestup s barevným odlišením tak může výrazně zrychlit orientaci v záznamu a zároveň eliminovat vliv různé reprodukce tónů u odlišných zobrazovacích zařízení. Efekt této úpravy je patrný z Obr. 5.9, rozděleného do 32 barevně odlišených úrovní, přičemž na spodním snímku byl zmenšen rozsah ekviintenzit podle maximální hodnoty jasu vstupního snímku.



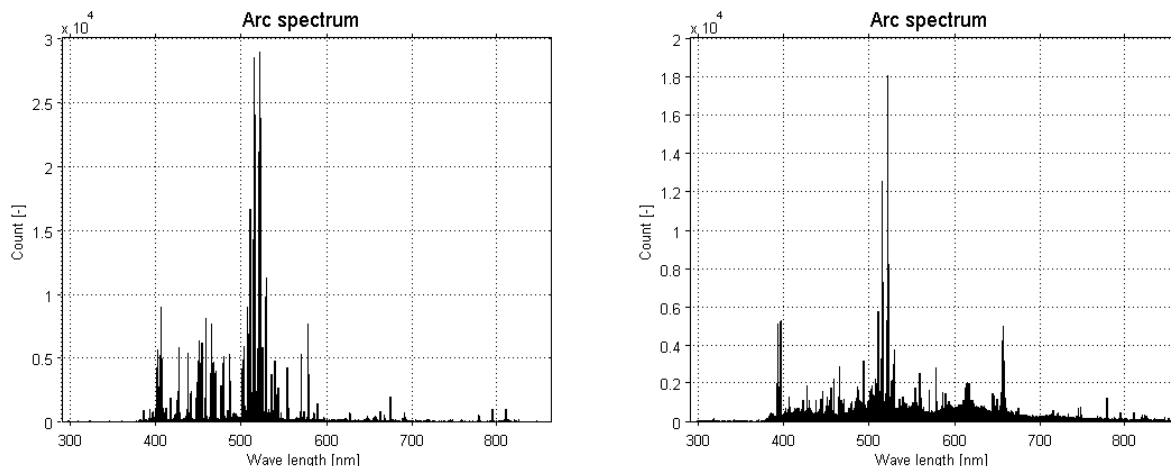
Obr. 5.9 Ukázka použití barevně odlišených jasových ekviintenzit

Barevné úrovně přitom nelze přirovnat k teplotnímu rozložení, neboť intenzita záření závisí na emisi a absorpci, které jsou samy o sobě složité funkce. Využití je tedy vhodné převážně pro prezentační účely.

Tuto úpravu už je nutné provádět v externím programu. V rámci práce byl vytvořen jednoduchý program *Samohejl_Ekvint_Maker.exe* pro tvorbu barevných ekviintenzit, který je vhodný i pro úpravu dávky souborů snímků, exportovaných např. z programu PFV. Vytvořený program je k dispozici v (Příloha B) a jeho podrobnější popis je uveden v (Příloha A)

5.3 Rozdíl v použití spektrálního a neutrálního šedého filtru

Jak už bylo zmíněno, k omezení intenzity světla dopadajícího na snímač dochází u těchto dvou optických filtrů odlišným způsobem. Pokud by byl elektrický oblouk zdrojem monochromatického záření, nemohli bychom žádný rozdíl v jejich použití pozorovat. Spektrální obor záření plazmatu je však mnohem bohatší, což je možné vidět ze spektrálního rozložení záření oblouku na Obr. 5.10, změřeného na našem přípravku.



Obr. 5.10 Spektrální rozložení záření oblouku pro dva různé vypínací pochody

Jedná se o spektra změřená ze dvou různých průběhů, přičemž se nejedná o spektrální rozložení záření celého průběhu zhášení oblouku, ale jen o krátký časový úsek určený integrační dobou snímacího zařízení, která byla rovna $0,1$ ms. Pro všechna měření se proto průběhy mohly mírně lišit, ne však o mnoho, jak ukazují výše zmíněné průběhy.

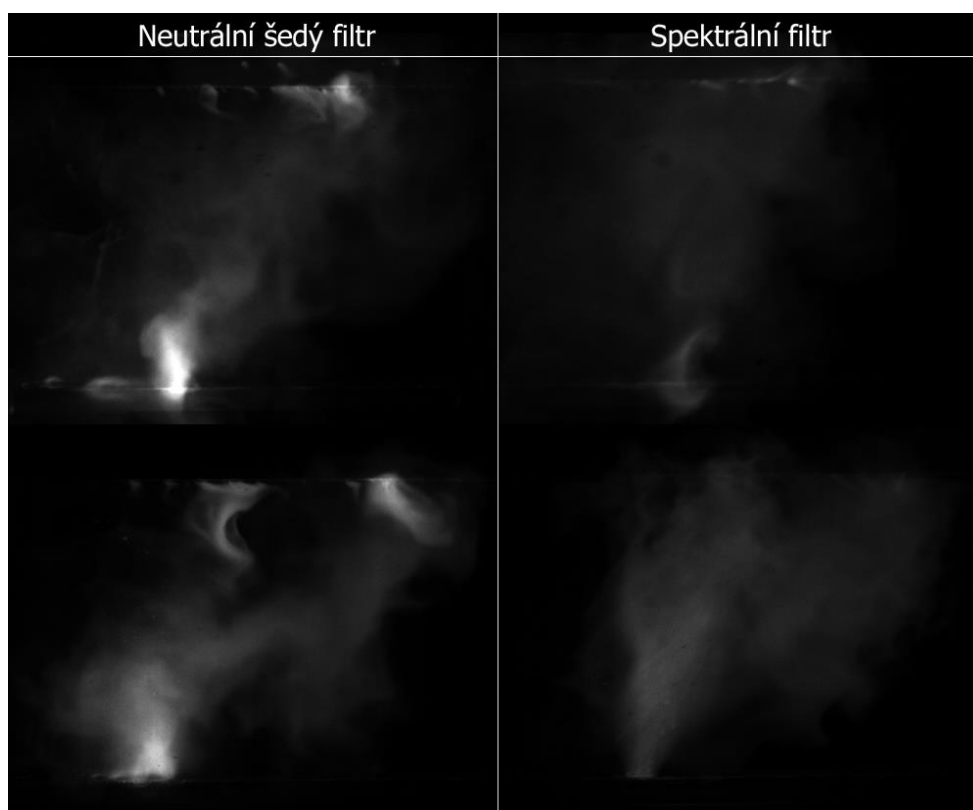
Podle [5] odpovídají nejsilnější špičky záření právě iontu mědi ($Cu(I)$, $Cu+$), který má významné spektrální čáry na hodnotách:

Ion $Cu(I)$, $Z = 29$	
Ritz Wavelength [nm]	Relative intensity [-]
324,7536	10000r
327,3952	10000r
406,2638	2000
427,5108	950
515,3238	1500
521,8202	2500
529,2524	1650

Tab. 5.3 Významné spektrální čáry iontu mědi $Cu(I)$ ^[5]

Přičemž absence výskytu vlnových délek blízkých ultrafialové oblasti může být způsobena povrchovou úpravou průhledného krytu komory, vyrobeného z polykarbonátového skla s UV filtrem.

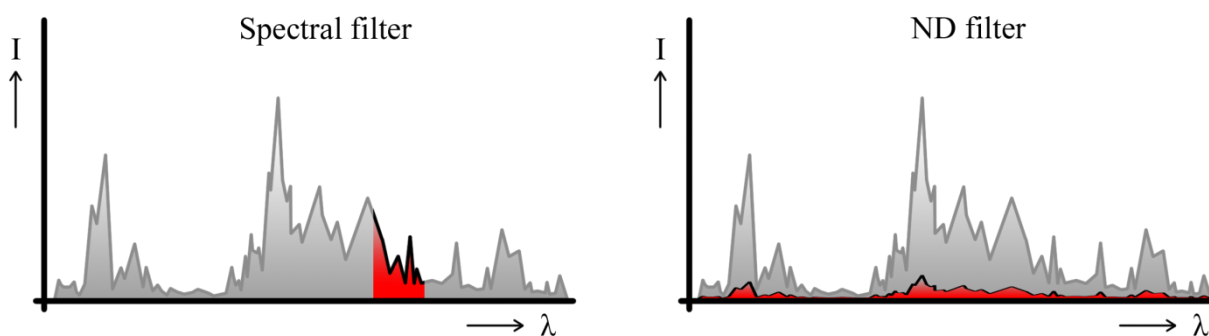
Při snímání oblouku jsme k omezení intenzity světla využili spektrální filtr celkem v sedmi případech (přesněji kombinaci spektrálního a ND filtru), ostatní pokusy byly provedeny s neutrálními šedými filtry. Porovnání mezi těmito záznamy je možné vidět na Obr. 5.11.



Obr. 5.11 Porovnání optických filtrů – neupravené snímky

Rozložení jasových úrovní záznamu s neutrálními šedými filtry odpovídá korelaci integrálu záření oblouku přes všechny vlnové délky se spektrální odezvou senzoru kamery. Lze konstatovat, že největší intenzitou září paty oblouku. Použitím spektrálního filtru dochází k výraznému omezení záření pat oblouku vlivem filtrace jim odpovídajících vlnových délek. Je pravděpodobné, že významné spektrální čáry z Obr. 5.10 odpovídají právě katodové a anodové skvrně. Tělo oblouku má v obou případech zhruba stejnou intenzitu. Z toho lze soudit, že září v mnohem širším spektru, než uvažované paty.

Tuto problematiku lépe ilustruje Obr. 5.12, znázorňující odlišný princip omezení světla u těchto filtrů. Při shodnosti vyznačených ploch bude omezovací schopnost obou filtrů z hlediska expozice záznamu zhruba stejná.

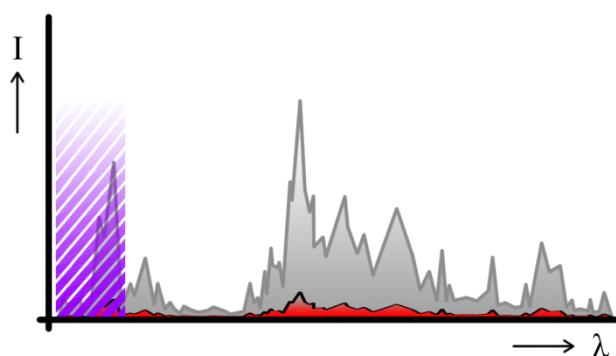


Obr. 5.12 Rozdílný princip omezení světla u spektrálního a ND filtru

Pro sledování elektrodoových skvrn oblouku je proto mnohem výhodnější použití šedého neutrálního filtru, neboť zde poskytuje lepší kontrast. Při dostatečné podexpozici nedochází k přesvětlení snímků a vypínací proces je dobře zřetelný. Při nastavení expozice pro sledování těla oblouku jsou jeho paty přesvětlené vlivem velkého kontrastu scény.

Tento problém řeší použití spektrálního filtru určité vlnové délky. Zvolením filtru vlnové délky odpovídající významné spektrální čáře těla oblouku bychom mohli dosáhnout lepšího jasového odstupňování mezi jádrem a okolním médiem. Potvrzení této hypotézy by mohlo být předmětem dalšího zkoumání. Námí použitý spektrální filtr neměl v propustném pásmu výraznější spektrální čáru. Lokalizace těla oblouku v tomto uspořádání proto není nijak výhodnější oproti neutrálnímu šedému filtru a po úpravě kontrastu snímku lze z hlediska jasového odstupňování považovat oba filtry za téměř totožné.

Na porovnání jednotlivých filtrů má vliv i fakt, že k zakrytování bylo použito průmyslově vyráběné polykarbonátové sklo s ochranným UV filtrem. Vezmeme-li v potaz, že nejvýznamněji zastoupený prvek ve složení oblouku září právě v ultrafialové oblasti, není vlastně ani samotné použití neutrálních šedých filtrů oproštěno o blokování záření, pohlcené zmíněnou povrchovou úpravou skla. Analogií by bylo použití čirého neutrálního materiálu k zakrytování přístroje spolu s přidáním filtru s pásmovou zádrží v UV oblasti na objektiv. Proto ani označení *použití neutrálních šedých filtrů* v tomto měření není úplně exaktní. Díky menší spektrální citlivosti snímače použité kamery na UV záření (Obr. 3.5) se však tento vliv mírně eliminuje.



Obr. 5.13 Reálné propustné pásmo ND filtru s vyznačenou spektrální UV zádrží

Další rozdíl v použití je ryze praktického charakteru. Neutrální šedé filtry jsou škálované podle své propustnosti, a proto lze rychleji určit jak prvotní nastavení expozice, tak dopad přidání či odebrání ND filtru. Míra omezení spektrálního filtru je však závislá na spektrálním složení záření. To ztěžuje určení expozice při změně vlnové délky filtru nebo pásma jeho propustnosti. Ze stejného důvodu může trvat déle i iterační proces při určování prvotního nastavení expozice.

5.4 Lokalizace oblouku

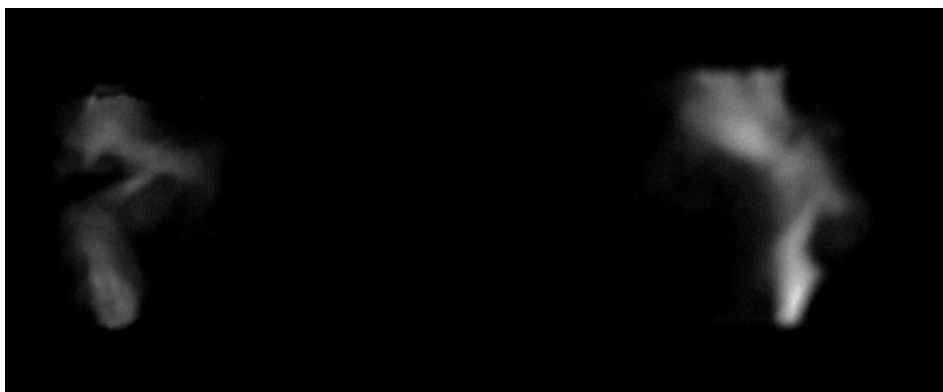
Přesnost lokalizace oblouku souvisí s vhodností nastavení kamery a volbou optického filtru. Vlivem výrazného záření vnějších vrstev oblouku spolu s párami ionizovaného média je však možnost určení polohy jeho jádra velice obtížná. Snímáním oblouku pouze z jednoho směru navíc získáváme jen kusé informace o jeho pravé poloze.

Laboratoř spínacích přístrojů disponuje pouze jedinou použitelnou vysokorychlostní kamerou, proto je možnost přidání třetího rozměru do záznamu trochu složitější. V našem případě jsme využili odrazu od zrcadla umístěného v rovině snímání, mezi přívodními přípojnými, viz Obr. 5.14. Boční kryt byl vyroben rovněž z polykarbonátového skla.



Obr. 5.14 Úprava parametrické komory pro snímání ve 3D

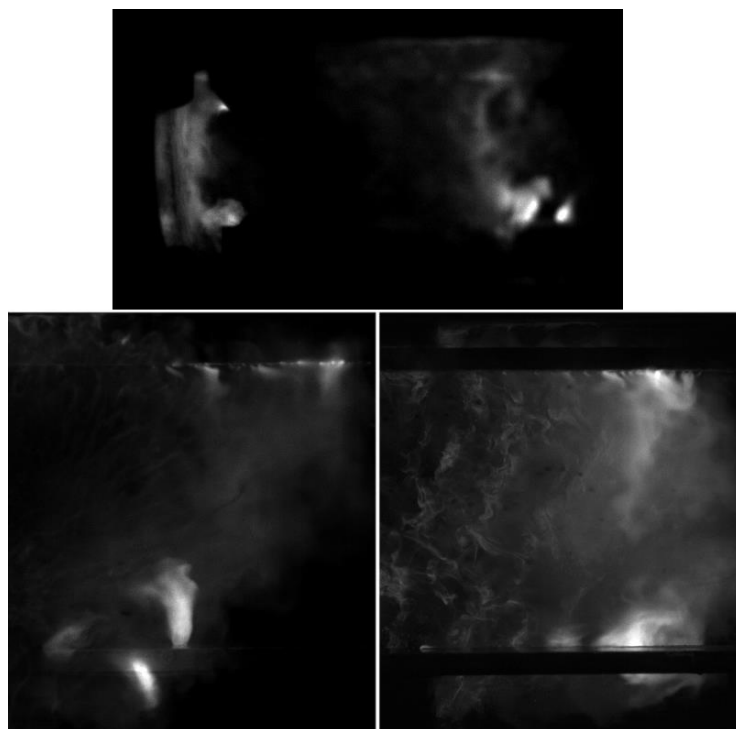
Snímek z takového uspořádání je možné vidět níže:



Obr. 5.15 Elektrický oblouk snímáný ze dvou na sebe kolmých směrů

kde je z rozdílu jasů jednotlivých obrazů oblouku patrný i vliv odrazivosti zadního krytu.

Snímek slouží jako názorná ukázka případné velké nepřesnosti při diagnostice vypínacího procesu pouze z jednoho směru. Z praktických měření vyplývá, že i pouhá orientační znalost polohy oblouku v další rovině (bez motivace následné 3D rekonstrukce) je velice přínosná z hlediska eliminace nežádoucích vlivů, které jsou ve 2D záznamu jen obtížně detekovatelné. Příklad takového nežádoucího vlivu byl spatřen například ve zvýšené vodivosti povrchů okolních krytů, po kterých se ve většině případů oblouk plazil, místo aby hořel volně mezi elektrodami. To je sice patrné i z jiných snímků, hypotéza o plazení oblouku z 2D záznamu je ale založena pouze na odhadu. Problém ilustruje Obr. 5.16. Hoření elektrického oblouku po površích komory navíc způsobilo časté rozostření záznamu.

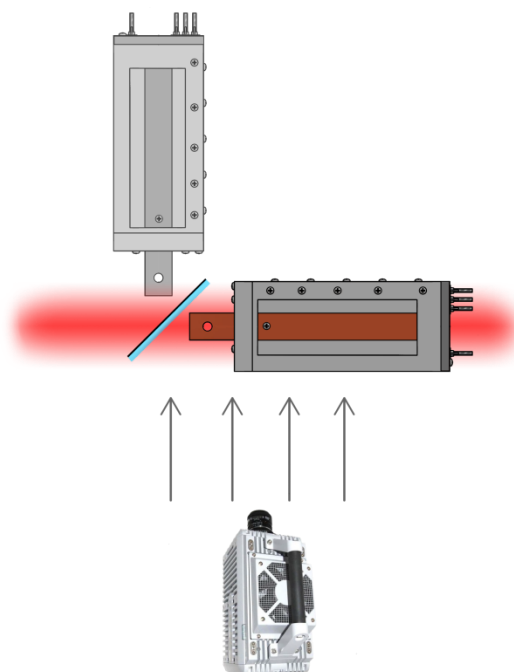


Obr. 5.16 Určení polohy oblouku při snímání z jedné roviny (dole) a ze dvou rovin (nahore)

Opomineme-li nepřesnost nastavení bočního zrcadla do ideální polohy, má toto uspořádání jednu zásadní nevýhodu. Ač je zrcadlo v rovině zaostření, jím reprodukováný, převrácený obraz leží mimo hloubku ostrosti, jak je názorně ilustrováno na Obr. 5.17. Běžnou optikou tak nelze zajistit ostrý obraz v obou snímaných osách zároveň, což zmenšuje přesnost následné 3D rekonstrukce. Při rozostření záznamu totiž kromě relativního zvětšení obrazu dochází i k splynutí jednotlivých jasových úrovní a tedy ztrátě detailů. V provedených pokusech bylo zaostřeno zhruba do středu intervalu mezi odraženým a reálným obrazem deionizační komory, míra rozostření v jedné ose oblouku byla ovšem přesto znatelná.

Řešení se zdá být pouze v simultánním snímání oblouku párem synchronizovaných vysokorychlostních kamer. V tomto uspořádání bude i přesto problém s pokrytím celého vypínacího procesu hloubkou ostrosti u kamery zachycující boční pohled oblouku (zastoupenou zrcátkem). Nastavení expozičních kamer přitom může být odlišné, závislé na objektech v záběru z jednotlivých směrů.

Z předešlých informací vyplývá, že snaha o trojrozměrnou rekonstrukci oblouku je jedním z hlavních cílů diagnostických metod, založených na použití vysokorychlostních kamer, z principu určených převážně pro sledování pohybu.



Obr. 5.17 Naznačený problém se správným zaostřením při 3D rekonstrukci oblouku

5.4.1 Trojrozměrná rekonstrukce oblouku

Počítačová 3D rekonstrukce oblouku spočívá ve spojení souvisejících snímků ze dvou odlišných směrů. Nejvýhodnější je přitom právě takové uspořádání, kdy budou uvažované směry snímání k sobě navzájem kolmé. K vytvoření modelu je nezbytné použití počítačového programu, který umožňuje 3D modelování. Takových programů je mnoho, mezi průmyslově nejpoužívanější patří například Autodesk Inventor, SolidWorks, aj. Porovnání všech použitelných programů s výběrem toho nejvhodnějšího by však bylo vzhledem k jejich četnosti velice zdoluhavé. Při výběru byl proto uvažován pouze jejich zlomek s přihlédnutím k blízkosti jejich ovládání se známějšími programy (především z důvodu rychlého sžití s ovládáním). V úvahu tedy připadaly programy:

- Autodesk Inventor (příp. SolidWorks)
- Google SketchUp Make (freeware)

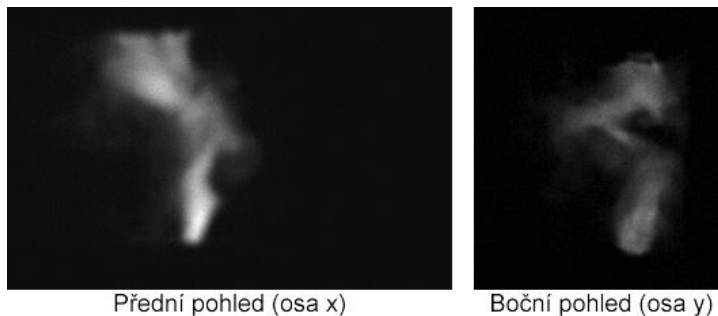
Ze vstupních snímků navíc vyplývá, že přesnost následné 3D rekonstrukce nezávisí tolik na použitém softwaru, jako spíše na přesnosti odhadu polohy oblouku, nastavení jednotlivých os při natáčení vypínacího procesu atd. Volbou jsme se proto soustředili hlavně na časovou náročnost tvorby 3D modelu a následného exportu rastrových souborů pro jejich další využití. S ohledem ke všem těmto skutečnostem byl vybrán software *Google SketchUp Make*.

Představení programu SketchUp Make

Jedná se o velice jednoduchý a intuitivní 3D modelářský program. Využívají ho převážně architekti a projektanti ve stavebnictví, neboť umožňuje velice rychlé 3D skicování návrhů s velice dobrými prezentačními výstupy. Rychlost skicování je vykoupena méně technicky použitelnými výstupy, neboť jsou všechny nakreslené objekty duté a skládají se pouze z hran a ploch. SketchUp navíc neumí vytvářet oblé hrany a zakulacené povrchy je nutné tvořit pouze pomocí malých rovných segmentů. Tyto skutečnosti pro nás ale nejsou nijak důležité.

Postup při rekonstrukci oblouku

Na následujících řádcích bude stručně vysvětlen principiální postup při rekonstrukci těla oblouku pomocí snímků zachycujících obě roviny oblouku. Příklad vstupního snímku pro tvorbu 3D modelu je uveden na Obr. 5.15. Vstupní snímek je potřeba rozdělit a boční pohled zrcadlově převrátit. Upravené vstupní soubory potom vypadají takto:



přičemž je vhodné nahrávat jasově upravené snímky, případně snímky s barevně odlišenými jasovými ekviintenzitami.

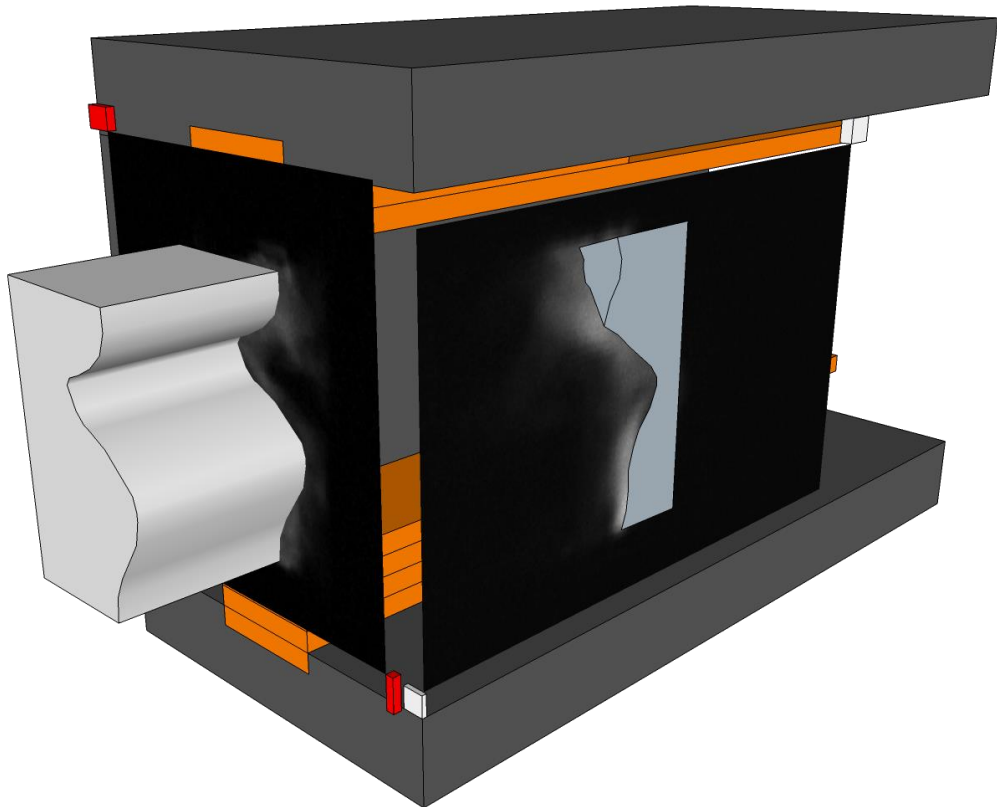
V programu SketchUp nakreslíme model důležitých částí komory v měřítku 1:1. Následuje jedna z nejdůležitějších částí samotné rekonstrukce, a to přiřazení vzdálenosti odpovídající jednomu pixelu zdrojového souboru. To lze provést například podílem známé vzdálenosti v záznamu (např. tloušťka přípojnice) počtem pixelů, které jí vykresluje. Program však nabízí i jinou, mnohem rychlejší a univerzálnější možnost, neboť do modelu lze importovat i rastrové soubory, se kterými lze manipulovat stejně, jako s ostatními plochami.

Přiřazení vzdáleností tedy proběhlo zvětšením / zmenšením importované fotografie tak, aby odpovídala nakreslenému modelu komory. Snímek byl zároveň vycentrován tak, aby jeho poloha souhlasila s polohou reálného obrazu oblouku, zachyceného kamerou. Přesnost přiřazení vzdálenosti touto metodou je vzhledem k přesnosti následného určení polohy jádra oblouku dostačující. Po zarovnání obou snímků byly vytvořeny pomocné zarážky, které sloužily pro uchycení všech následujících snímků.³ Možná chyba způsobená špatným zarovnáním byla proto pro celou rekonstrukci konstantní.

Na plochu jednotlivých snímků byla posléze načrtnuta odhadovaná poloha jádra oblouku. Tato křivka poté představovala jednu stranu pomocného objektu, vytvořeného pro každou osu oblouku zvlášť. Výsledná poloha jádra oblouku tak byla dána průnikem těchto ploch, po kterém byla vedena výsledná čára. Pomocné segmenty je po konstrukci této výslednice možné smazat. Celkový postup je ilustrován na Obr. 5.18, Obr. 5.19 a v krátkém instruktážním videu v příloze (Příloha B). Následující kroky už závisí na účelu 3D rekonstrukce.

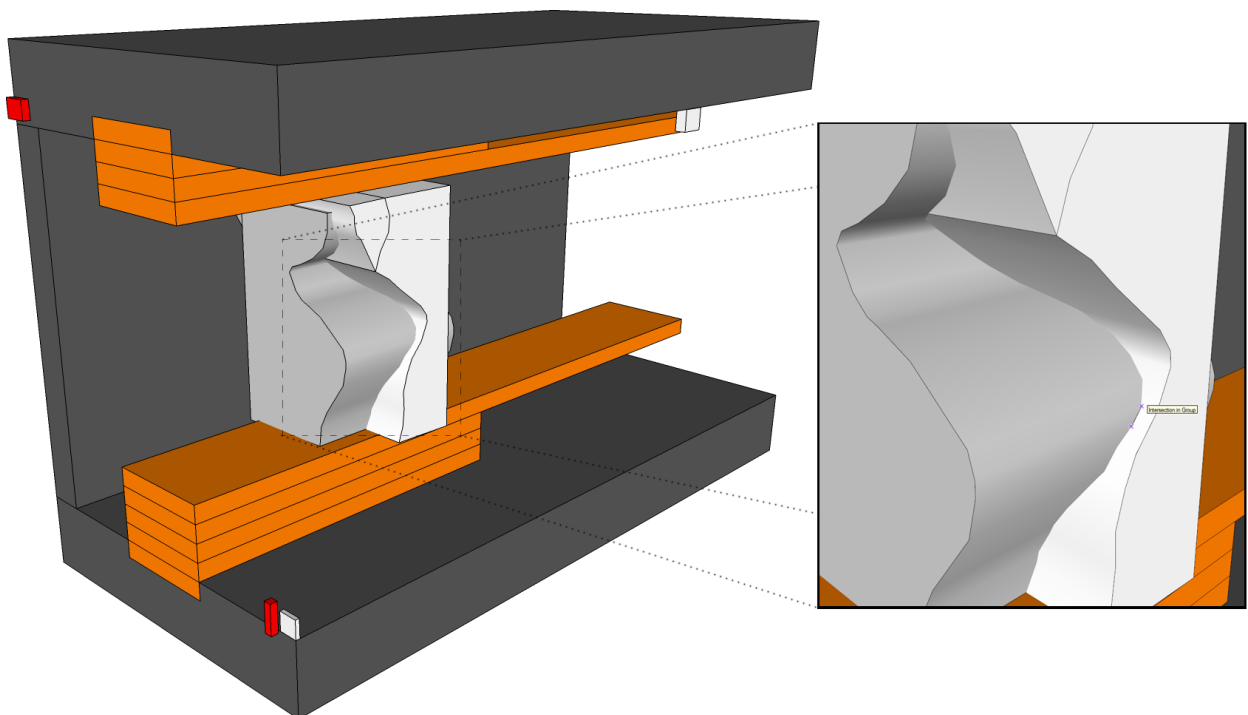
Pro diagnostiku vypínacího procesu je možné zjistit délku načrtnuté křivky ve vlastnostech vybrané entity. Čáru je poté možno sloučit do skupiny a zrušit její viditelnost. Do daného projektu je vhodné zakreslit další série snímků. Z rozestupu jednotlivých čar reprezentujících jádro oblouku lze následně stanovit jeho rychlost, zrychlení a uvést tyto parametry v souvislost například s napětím oblouku. Z tvaru lze rovněž stanovit přibližné silové působení na jednotlivé části oblouku s využitím známé okamžité hodnoty protékajícího proudu.

³ Snímky z bočního pohledu je nutno čas od času znovu přerovnat z důvodu zmenšení obrazu oblouku vlivem jeho větší vzdálenosti od kamery.



Obr. 5.18 Zarovnání importovaných fotografií a následný odhad polohy jádra oblouku

Za účelem prezentace vypínacího procesu je vhodné okolo výslednice vytvořit mnohoúhelník a využít funkce *Follow Me*, umožňující sledování cesty (čáry) vybranou plochou.

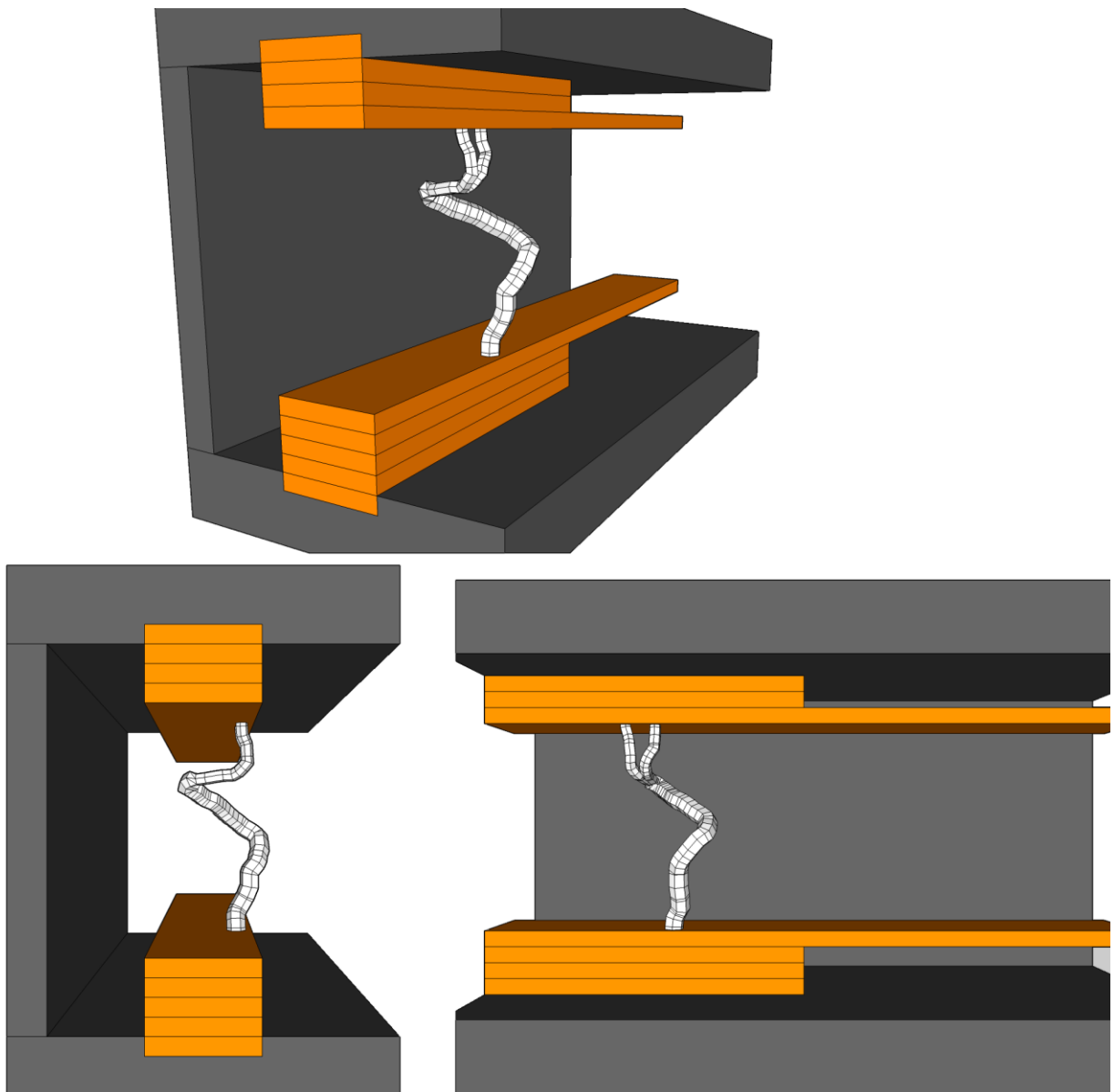


Obr. 5.19 Ukázka sestavení výsledné čáry, představující přibližnou polohu jádra oblouku

Jednou z hlavních výhod tohoto programu je i široká nastavitelnost předdefinovaných pohledů (kamer), jako je například ohnisko imaginárního objektivu, formát snímáče atd. Nastavení kamer je bohužel přístupné pouze v placené verzi *SketchUp Pro*, ve freeware verzi lze jejich nastavení vyřešit použitím kombinace defaultních pohledů (*Isometric, Front, Back ...*) a funkcí *Zoom Extends* vyplňující aktuální pohled nakresleným objektem. Neměnná poloha kamer je velice důležitá pro opětovné vytvoření videa z rekonstruovaných obrazů.

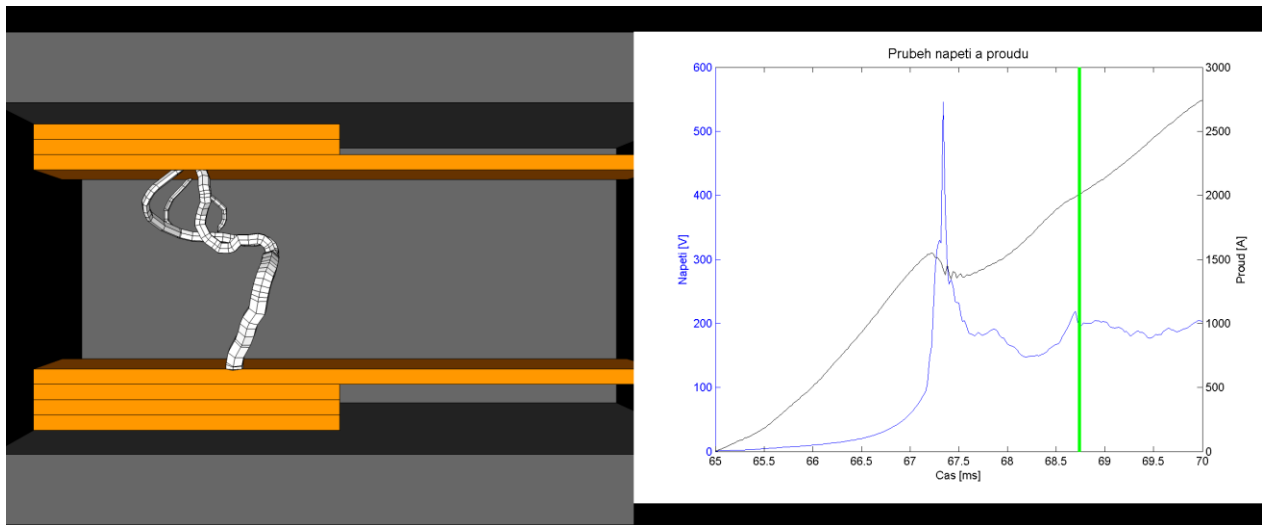
Výsledek 3D rekonstrukce oblouku

Jednotlivé modely oblouku byly exportovány ve třech různých směrech v rastrovém formátu *.png*. Pohledy ze směrů shodných se zdrojovými snímky jsou od nich vizuálně odlišné díky přidání efektu perspektivy.



Obr. 5.20 Výsledek 3D rekonstrukce oblouku

Synchronizací s daty z osciloskopu lze navíc lépe ilustrovat závislost mezi proudem, napětím na oblouku a jeho polohou, viz Obr. 5.21. Z obrazového výstupu rekonstrukce bylo vytvořeno video, obsažené v příloze (Příloha B).

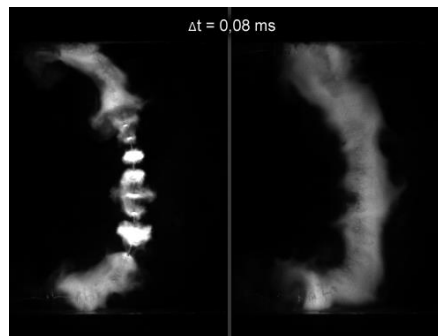


Obr. 5.21 Spojení obrazového výstupu rekonstrukce s daty z osciloskopu

5.5 Návrhy pro zlepšení optické diagnostiky

V průběhu měření jsme se setkali s množstvím menších či větších problémů a nedokonalostí, zhoršujících přesnost měření a prodlužujících čas pro následnou diagnostiku. Soupis možných vylepšení optické diagnostiky, obsahující i návrh pro zlepšení konstrukce zkušební komory vypadá takto:

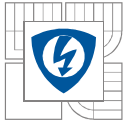
- Zlepšit synchronizaci optického záznamu s daty pořízenými osciloskopem. Přiřazení naměřených hodnot k daným snímkům nelze provést jinak, než odhadem. V našem měření byla synchronizace založena na odhadu okamžiku souvisejícího s napěťovou zapalovací špičkou. Na Obr. 5.22 je ilustrativně uveden okamžik (přesněji interval mezi snímky), odpovídající napěťové špičce.



Obr. 5.22 Snímky ohraničující interval výskytu napěťové špičky

Nepřesnost způsobená špatným přiřazením se přitom projeví více u signálů s velkými místními strmými (napětí). Výhodnějším řešením by byla jednotná synchronizace souhlasným trigovacím signálem.

- Při plánovaném využití spektrálních filtrů je vhodné provést alespoň jedno měření spekter oblouku. Tím lze získat přehled o míře omezení světla daného filtru, vhodnosti jeho použití atd. V našem měření bylo doplňkové snímání spekter oblouku prováděno pro jiné účely, avšak poskytnuté průběhy byly i pro naši diagnostiku velmi přínosné.



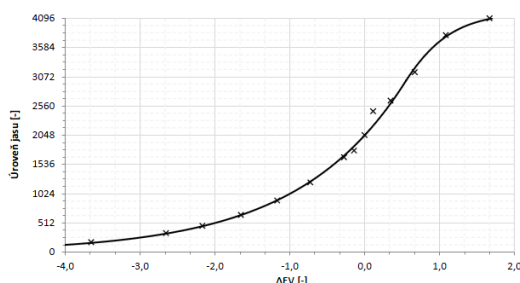
- Vodící elektrody je z hlediska přesnějšího zaostření vhodnější vyrobit užší. Nými použité elektrody byly z měděného profilu $5 \times 30 \text{ mm}$. Vzhledem k výraznější hodnotě intenzity elektrického pole na ostrých hranách hořel oblouk převážně na krajích profilu, a to zcela náhodně. Oblast možného výskytu oblouku tak byla větší, než hloubka ostroty snímacího zařízení. Tento problém by mohly vyřešit méně široké elektrody se zakulaceným povrchem.
- Důsledkem odpařování materiálu elektrod s jeho následným usazováním na stěnách komory se stával její vnitřní povrch každým testem vodivější. Vzhledem k vzdálenostem stěn a elektrod se stávalo, že se oblouk raději plazil po površích, než aby hořel volně. To lze vyřešit častějším čištěním vnitřku komory, případně prodloužením povrchové vzdálenosti mezi elektrodami. Při snaze o zachování malého objemu komory je však nutné dráhu prodloužit pomocí změny tvaru okolních ploch (např. žebrováním). To vede ovšem zase k nerovnoměrnému rozložení odrazivosti zadní stěny a konečnému ovlivnění výsledného záznamu.
- Pro účel 3D rekonstrukce je výhodnější použití druhé vysokorychlostní kamery, snímající oblouk z jiné strany. Provedení se zrcátkem je velice nepřesné a zdlouhavé. Potřebná je i úprava zkušební komory, neboť v našem měření nebylo možno provést rekonstrukci celého vypínacího procesu díky clonícímu bočnímu sloupku komory.

Je nutné si uvědomit, že komora byla postavena jako první prototyp, z čehož vyplývají i výše uvedené nedostatky. Je pravděpodobné, že v průběhu dalších měření budou odhaleny nové nedokonalosti prováděné diagnostiky, to už ovšem k experimentálním pokusům neodmyslitelně patří.

ZÁVĚR

Cílem práce bylo vylepšení optické diagnostiky spínacího oblouku. Byly zde stručně popsány vlastnosti a princip vzniku spínacího oblouku s krátkým úvodem do problematiky záření plazmatu. Zároveň zde byly uvedeny neznámější techniky pro diagnostiku plazmatu z parametrů jeho záření. Pro potřeby Laboratoře spínacích přístrojů byla ovšem největší pozornost věnována optické diagnostice pomocí vysokorychlostní kamery.

V kapitole č. 3 byly popsány všechny důležité parametry ovlivňující kvalitu výsledného záznamu s ohledem na použitou kameru Photron SA-X2. Z experimentálního měření byl zjištěn tvar převodní charakteristiky snímače, ze které lze určit vhodný posun expoziční hodnoty kamery pro dosažení správné expozice. Z převodní charakteristiky vyplývají i souvislosti mezi jasovým rozlišením a dynamickým rozsahem scény v určitých jasových intervalech výstupního snímku. Platí, že v nižších úrovních jasu lze zachytit signál s mnohem širším dynamickým rozsahem scény, ale s menší jasovou rozlišitelností.



Převodní charakteristika snímače kamery Photron SA-X2 (viz kapitola 3.2)

Na konci kapitoly jsou naznačeny možnosti omezení intenzity záření oblouku pomocí spektrálních a neutrálních šedých filtrů s upozorněním na nutnou synchronizaci případných doplňkových světél se závěrkou kamery.

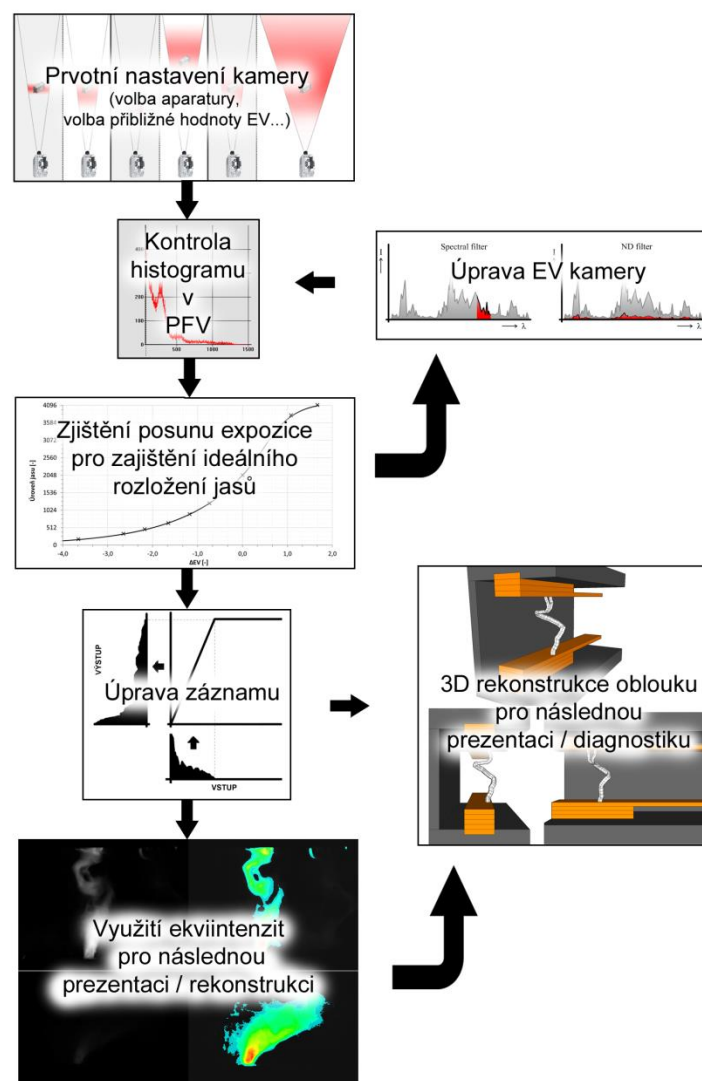
Podle výsledků praktických měření na zkušební parametrické komoře byl navrhnout postup pro prvotní nastavení kamery s důrazem na omezení počtu zkušebních snímků. Při určování průměrné expoziční hodnoty oblouku při různých velikostech procházejícího proudu byl zjištěn výrazný vliv odrazivosti zadního krytu komory. Pro černý, neodrazivý zadní kryt a spektrálně neutrální průhledný přední kryt byla stanovena přibližná hodnota expozice elektrodových skvrn oblouku při maximální velikosti procházejícího proudu 5 kA jako $EV_{arc(5kA)} \approx 37,33$.

Je zde rovněž uveden přehled úprav záznamu pomocí programu *Photron Fastcam Viewer*, především pro možnost získání dat ze špatně exponovaných snímků, nebo ovlivnění vzhledu záznamu pro případnou prezentaci. Výraznější vliv na konečný vzhled má ovšem vytvoření barevně odlišených jasových ekviintenzit. Pro tento účel byl vytvořen jednoduchý program *Samohejl_Ekvint_Maker* v programu C#, přizpůsobený pro využití v Laboratoři spínacích přístrojů.

Z porovnání vlivu použitých filtrů na výsledný záznam lze označit neutrální šedé filtry jako vhodnější pro sledování pat oblouku. Nastavení a změna expozice je u neutrálních filtrů rovněž jednodušší. Vzhledem k tomu, že jsme měli k dispozici pouze jeden spektrální filtr, nelze jednoznačně posoudit vhodnost jejich využití při diagnostice vysokorychlostní kamerou. Námí použitý filtr pro diagnostiku výrazně přínosnější nebyl.

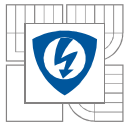
V závěru praktické části byl popsán problém lokalizace jádra oblouku. V rámci práce byl proveden jednoduchý pokus o 3D rekonstrukci oblouku, z kterého vyplynuly možné nedostatky při využití jediné vysokorychlostní kamery. Z hlediska co nejmenší časové náročnosti byl pro rekonstrukci vybrán program *SketchUp Make*, v němž byl podrobně popsán postup tvorby modelu jádra oblouku.

Výsledkem této práce je souhrnně popsaná metodika optické diagnostiky spínacího oblouku pomocí vysokorychlostní kamery. Její uplatnění je soustředěno pro využití při dalších měření v Laboratoři spínacích přístrojů, pro kterou byla záměrně upravena. Měření byla navíc provedena na prototypu zkušební parametrické komory, využívané souběžně pro měření jiné závěrečné práce. Metodika tak byla vytvářena a upravována i podle požadavků reálného měření. Blokové schéma postupu při této diagnostice je pro ilustraci uvedeno níže.



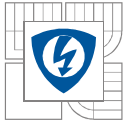
Postup při diagnostice spínacího oblouku pomocí vysokorychlostní kamery

Rozšíření optické diagnostiky spínacího oblouku má těžiště převážně v přidání třetího rozměru záznamu se současným měřením spektrálního rozložení záření, tlakových poměrů v přístroji a elektrických veličin z osciloskopu.



LITERATURA

- [1] AUBRECHT, Vladimír. *Radiační transport energie v plazmatu elektrického oblouku*. Brno, 1998. Habilitační práce. VUT, FEKT.
- [2] AUBRECHT, Vladimír. *Fyzika a diagnostika plazmatu*[online]. Brno: VUT, FEKT, 2007 [cit. 2015-11-10].
- [3] GRIEM, Hans. R. *Plasma Spectroscopy*. New York: McGraw-Hill Book Company, 1964.
- [4] HAVELKA, Otto. *Elektrické přístroje*. Praha: SNTL/ALFA, 1985, 440 s.
- [5] NIST Atomic Spectra Database. *National Institute of Standards and Technology* [online]. [cit. 2016-04-15]. Dostupné z: <http://www.nist.gov/pml/data/asd.cfm>
- [6] OBRUSNÍK, Adam. *Simulace a diagnostika vysokofrekvenčních výbojů pro syntézu nanomateriálů*. Brno, 2014. Diplomová práce. Masarykova Univerzita.
- [7] PEDREGOSA DELSERIEYS, Alice. *Optical diagnostics of laser plasmas*. English, Belfast, 2008. Queen's University, Physics.
- [8] PHOTRON LTD. *Fastcam SA-X2 technical datasheet*[online]. 2013 [cit. 2015-10-20]. Dostupné z: <http://www.proxis.cz/?i=1617/rada-sa>
- [9] SOJKA, Eduard, J. GAURA a M. KRUMNIKL. *Matematické základy digitálního zpracování obrazu*. Ostrava: Vysoká škola báňská, 2011.



SEZNAM PŘÍLOH

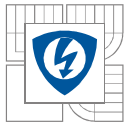
Příloha A

Popis vytvořeného programu v C#

Příloha B

CD obsahující:

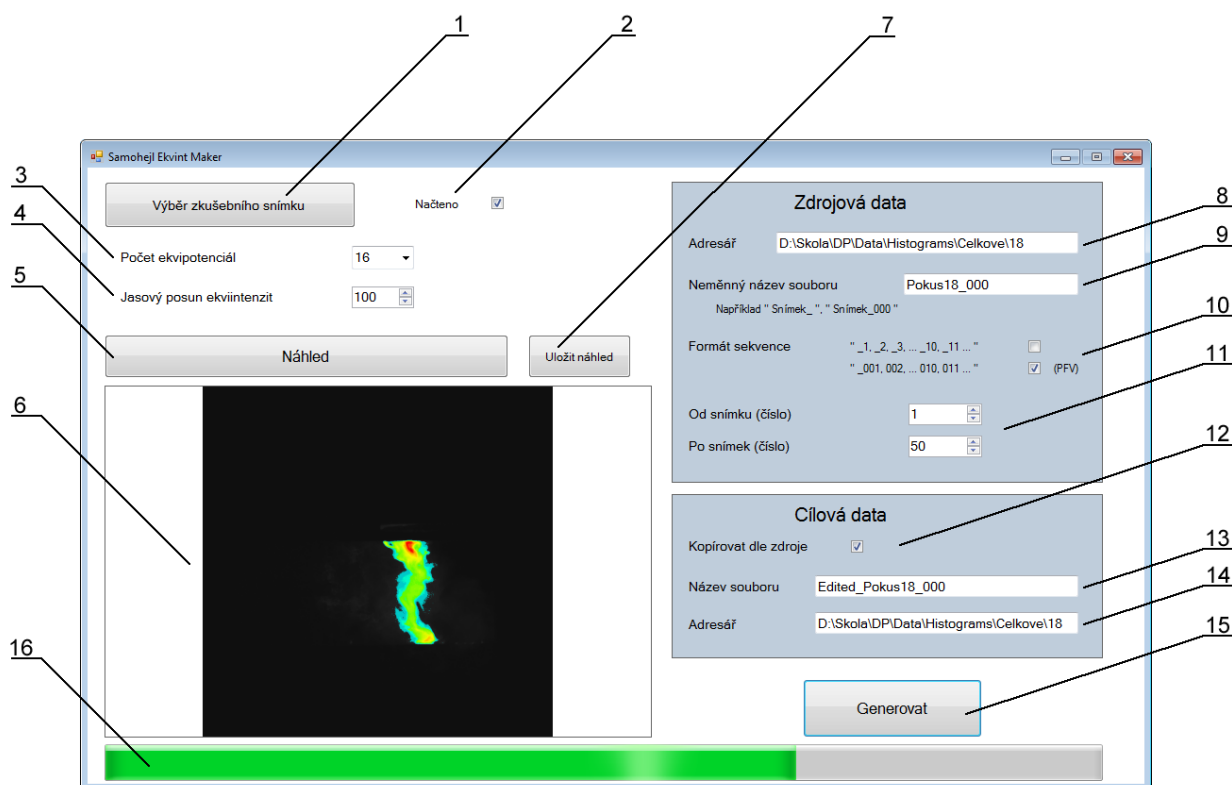
- Elektronickou verzi této práce
- Program Samohejl_Ekvint_Maker
- Instruktažní video z programu SketchUp
- Výstup 3D rekonstrukce oblouku (video, jednotlivé snímky, modely ve formátu .skp)



Příloha A – Popis vytvořeného programu v C#

Program *Samohejl_Ekvint_maker* byl vytvořen v programovacím jazyku C# pro možnost vytváření snímků s barevnými ekviintenzitami bez nutnosti použití jiných, více náročných externích programů (např. Matlab). Motivací pro jeho tvorbu bylo zjednodušení aplikace této úpravy pro možné budoucí využití.

Algoritmus programu má jednoduchou strukturu. Po výběru zdrojových snímků dojde k jejich přetypování na datový typ `Bitmap`, zjištění jasové úrovně jednotlivých pixelů zdrojového snímku pomocí funkce `Image.GetPixel(x, y)`, přiřazení barvy a následný zápis do výstupního snímku pomocí funkce `Image.SetPixel(x, y, NewColorRGB)`. Samotný výpočet probíhá na samotně vyhrazeném vlákne na pozadí programu. Výstupní snímek se ukládá v datovém typu shodném se zdrojovým snímkem v barevném neindexovaném formátu `PixelFormat24bppRgb`. Vzhled a použití programu je popsáno na následující straně.



- 1 Dialog pro výběr jednoho ze série snímků. Cesta ke snímku a jeho jméno se automaticky doplní do adresáře zdrojových dat. Lze načíst soubory typu .jpeg; .png; .bmp; .tif.
- 2 Indikátor načtení snímku. Program čeká, dokud soubor není plně načten.
- 3 Panel pro výběr požadovaného počtu ekvipotenciál. Je možno zvolit 8, 16 a 32 úrovní.
- 4 Panel pro posun ekviintenzit pro plné využití jejich rozsahu i při podexponovaných snímcích.
- 5 Vyvolání náhledu upraveného vybraného snímku.
- 6 Náhled efektu úpravy při daném nastavení parametrů. Při změně parametrů se náhled změní až po stisku tlačítka pro vyvolání.
- 7 Export vybraného upraveného snímku do zdrojového adresáře s defaultně nastaveným prefixem „Edited_“. Vhodné pro ukládání jednotlivých snímků.
- 8 Adresář zdrojových dat. Po načtení snímku pro náhled se automaticky vyplní.
- 9 Neměnný název souboru je řetězec znaků, shodných pro všechny snímky v požadované dávce. Po načtení snímku pro náhled se automaticky vyplní, je ovšem nutné smazat měnící se znaky (sekvenci), jinak program není schopný najít zdrojové snímky.
- 10 Volba formátu sekvence pro různé styly číslování vstupních souborů z různých programů.
- 11 Volba snímků pro úpravu v intervalu 1 – 999.
- 12 Nastavení cílové cesty výstupních souborů shodně se vstupními soubory.
- 13 Název výstupních souborů je automaticky vyplněn podle okna č. 9. Sekvence výstupních snímků se přiřadí v souladu s okny č. 11.
- 14 Volně nastavitelný výstupní adresář.
- 15 Spuštění editace vybrané dávky vstupních souborů. Doba úpravy jednoho snímku je přibližně rovna jedné vteřině.
- 16 Ukazatel aktuálního stavu vytvořených a dosud nevytvořených výstupních snímků.