

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

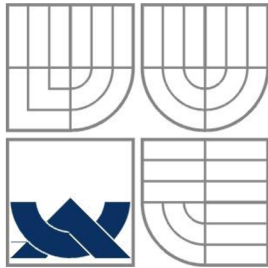
VYUŽITÍ VYSOKORYCHLOSTNÍ KAMERY V OBLASTI ZHÁŠENÍ
SPÍNACÍHO OBLOUKU

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

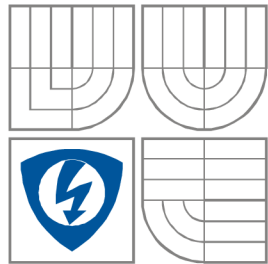
MATĚJ SAMOHEJL

BRNO 2014



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

VYUŽITÍ VYSOKORYCHLOSTNÍ KAMERY V OBLASTI ZHÁŠENÍ SPÍNACÍHO OBLOUKU

USAGE OF HIGH-SPEED CAMERA IN THE AREA OF SWITCHING ARC

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

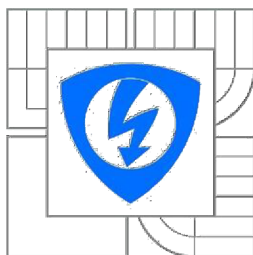
MATĚJ SAMOHEJL

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. JIŘÍ VALENTA, Ph.D.

BRNO, 2014



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor

Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika

Student: Matěj Samohejl

ID: 146946

Ročník: 3

Akademický rok: 2013/2014

NÁZEV TÉMATU:

Využití vysokorychlostní kamery v oblasti zhášení spínacího oblouku

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Provedte rozbor vzniku a principy zhášení spínacího oblouku.
2. Provedte potřebná měření za pomoci vysokorychlostní kamery v laboratoři spínacích přístrojů.
3. Získané výsledky analyzujte a souhrnně vyhodnoťte z hlediska vlivu jednotlivých parametrů.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Havelka, O. a kol.: Elektrické přístroje, SNTL, 1985
[2] Sborníky z konferencí Fyzika spínacího oblouku (FSO)

Termín zadání: 27.9.2013

Termín odevzdání: 2.6.2014

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

Konzultanti bakalářské práce:

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské 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.

Abstrakt

Tato bakalářská práce je zaměřena na optimalizaci záznamu pro analýzu elektrického spínacího oblouku v magnetických vypínačích pomocí vysokorychlostní kamery. Měření byla prováděna na jističi 10B s otvorem v bočním krytu, který byl následně zakrytovaný neutrálním šedým filtrem. Průběh napětí a proudu na kontaktech jističe byl snímán měřícím systémem Laboratoře spínacích přístrojů. Zdrojem energie byl motor-generátor o nominálním výkonu 16 MVA a zkušební stolice, skládající se z kondenzátorové baterie a tlumivky, které byly vyladěny na rezonanční kmitočet 50 Hz.

Vyhodnocení měření bylo provedeno s ohledem na rozložení jasových úrovní záznamu. Výsledky ukázaly, že se střední hodnota jasu mění s druhou mocninou procházejícího proudu. Pro správnou lokalizaci elektrického oblouku je nutné vhodně nastavit expozici kamery. Většinou je hlavním problémem dostatečně ztmavit celou scénu. Bylo zjištěno, že je třeba brát ohled na nelineární závislost změny jasové úrovně na expoziční posun. V práci je uveden návrh pro určení expozičního posunu záznamu a možnost využití vysokorychlostní kamery pro určení rozložení teplot v oblouku za pomoci jasových ekvivalentů. Jsou zde zmíněné návrhy pro zlepšení snímání oblouku v jističi, hlavně v uspořádání optických částí zařízení.

Klíčová slova

Analýza oblouku; elektrický oblouk; jistič; magnetický vypínač; oblouk; omezovací vypínač; spínací oblouk; vysokorychlostní kamera

Abstract

This bachelor's thesis is focused on optimizing recording of electrical switching arc in magnetic switches by high-speed camera. Measurements were performed on the circuit breaker 10B without removed side case, which was subsequently covered by neutral density filter. The voltage and current of the circuit breaker contacts were acquired by measuring system of the Laboratory of switching arc diagnostics. The energy source was motor-generator with a nominal power 16 MVA and test bench consisting of a capacitors and inductors, which have been tuned to the resonance frequency of 50 Hz.

Evaluation of the measurements was taken with regard to the brightness distribution levels of the record. Results showed that the mean brightness value varies on the square of the current passing through. For proper localization of the arc, it is necessary to appropriately set the camera exposure. The main problem usually is to darken the scene enough. It was found that it is necessary to take into account that brightness level change depends nonlinear on the exposure offset. The thesis gives a proposal to determine the exposure shift of the record. The possibility of usage high-speed camera to determine the temperature distribution in the arc using the brightness equintensities was also designed. There are mentioned suggestions how to improve recording of the arc in circuit breakers, especially in the arrangement of the optical parts.

Keywords

Arc; arc analysis; circuit breaker; current-limiting breaker; electric arc; high-speed camera; magnetic breaker; switching arc

Bibliografická citace

SAMOHEJL, M. Využití vysokorychlostní kamery v oblasti zhášení spínacího oblouku. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 38s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jiří Valenta, Ph.D

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Využití vysokorychlostní kamery v oblasti zhášení spínacího oblouku jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské 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 bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské 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

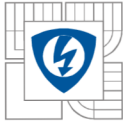
Podpis autora

Poděkování

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

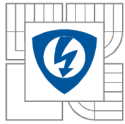
V Brně dne

Podpis autora



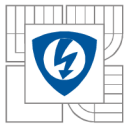
Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	8
SEZNAM TABULEK	9
PŘEHLED POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZNAČEK	10
ÚVOD.....	11
1 VZNIK A PRINCIPY ZHÁŠENÍ SPÍNACÍHO OBLOUKU	11
1.1 VZNIK A VLASTNOSTI ELEKTRICKÉHO OBLOUKU	11
1.1.1 VZNIK OBLOUKU PŘI ZAPÍNÁNÍ	12
1.1.2 VZNIK OBLOUKU PŘI VYPÍNÁNÍ.....	13
1.1.3 VLASTNOSTI ELEKTRICKÉHO OBLOUKU	13
1.2 PRINCIPY ZHÁŠENÍ ELEKTRICKÉHO OBLOUKU	15
1.2.1 MAGNETICKÉ VYPÍNAČE	16
2 VYSOKORYCHLOSTNÍ KAMERA PHOTRON SA-X2.....	19
2.1 TECHNICKÁ SPECIFIKACE A VLASTNOSTI.....	19
2.2 MOŽNOSTI ANALÝZY OBLOUKU POMOCÍ VYSOKORYCHLOSTNÍ KAMERY	21
3 LABORATOŘ SPÍNACÍCH PŘÍSTROJŮ.....	22
4 MĚŘENÍ SE ZÁZNAMEM.....	24
4.1 MĚŘENÍ NA KONDENZÁTOROVÉ ZKUŠEBNÍ STOLICI	24
4.1.1 MĚŘENÍ S NAPĚTÍM ZDROJE $U = 50 \text{ V}$	24
4.1.2 MĚŘENÍ S NAPĚTÍM ZDROJE $U = 150 \text{ V}$	26
4.1.3 VYHODNOCENÍ.....	27
4.2 MĚŘENÍ V LABORATOŘI SPÍNACÍCH PŘÍSTROJŮ	27
4.2.1 ÚPRAVA JISTÍCIHO PŘÍSTROJE A POŘÍZENÝCH DAT	27
4.2.2 NASTAVENÍ KAMERY PRO OPTIMÁLNÍ SNÍMÁNÍ URČITÉ VELIKOSTI PROUDU	29
4.2.3 POUŽITÍ EKVIINTENZIT JASU ZÁZNAMU OBLOUKU	33
5 ZÁVĚR	36
LITERATURA	37
PŘÍLOHY	38



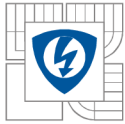
SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1 Princip elektronové laviny^[1].....</i>	<i>12</i>
<i>Obr. 2 Náhradní schéma obvodu s obloukem</i>	<i>14</i>
<i>Obr. 3 Voltampérová charakteristika obvodu s el. obloukem.....</i>	<i>14</i>
<i>Obr. 4 Obloukový výboj v příčném řezu; a) v proudu vzduchu, b) pod vlivem magnet. pole^[1]</i>	<i>16</i>
<i>Obr. 5 Zhášecí komora s izolačním roštem (vlevo), štěrbinová (vpravo)^[1].....</i>	<i>17</i>
<i>Obr. 6 Desky ocelového roštu s výřezy^[1]</i>	<i>17</i>
<i>Obr. 7 Princip vzniku vťahovací síly na ocelové desce roštu^[1].....</i>	<i>18</i>
<i>Obr. 8 Průběh napětí a proudu na kontaktech omezovacího jističe při vypínání nadproudu^[2] ...</i>	<i>19</i>
<i>Obr. 9 Spektrální citlivost obrazového senzoru kamery^[3]</i>	<i>20</i>
<i>Obr. 10 Proporce vysokorychlostní kamery Photron AS-X2 bez nasazeného objektivu^[3]</i>	<i>21</i>
<i>Obr. 11 Orientační schéma laboratoře spínacích přístrojů.....</i>	<i>23</i>
<i>Obr. 12 Průběh napětí a proudu na kontaktech jističe při napětí zdroje $U = 50\text{ V}$.....</i>	<i>24</i>
<i>Obr. 13 Pohyb elektrického oblouku mezi vodícími plechy jističe</i>	<i>25</i>
<i>Obr. 14 Snímek ze záznamu při napětí $U = 50\text{ V}$; a) 2,9 ms; b) 4 ms.....</i>	<i>25</i>
<i>Obr. 15 Průběh napětí a proudu na kontaktech jističe při napětí zdroje $U = 150\text{ V}$.....</i>	<i>26</i>
<i>Obr. 16 Snímky ze záznamu při napětí $U = 150\text{ V}$; a) 2,9 ms; b) 3,2 ms.....</i>	<i>26</i>
<i>Obr. 17 Míra poškození diskety při průchodu proudu o velikosti: a) 1000 A, b) 1200 A.....</i>	<i>28</i>
<i>Obr. 18 Závislost změny úrovně jasu na změnu expozice při konstantním obrazu</i>	<i>29</i>
<i>Obr. 19 Průběh napětí a proudu při vypínání zkratového proudu 5 kA</i>	<i>30</i>
<i>Obr. 20 Průběh napětí a proudu při vypínání zkratového proudu 7,5 kA</i>	<i>30</i>
<i>Obr. 21 Vliv velikosti procházejícího proudu na jas záznamu při konstantním nastavení vysokorychlostní kamery</i>	<i>31</i>
<i>Obr. 22 Porovnání rozložení jasů snímků pořízených s rozdílnou hodnotou procházejícího proudu</i>	<i>32</i>
<i>Obr. 23 Ekviintenzity el. oblouku pro snímek A</i>	<i>33</i>
<i>Obr. 24 Ekviintenzity el. oblouku pro snímky B a C</i>	<i>34</i>



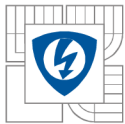
SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Závislost rozlišení a délky snímání na frekvenci snímání ^[3]20



PŘEHLED POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZNAČEK

α [V], β [V/m], γ [W], δ [W/m]	..... experimentálně stanovené koeficienty podle Ayrtonové
EV	..... expoziční hodnota (angl. exposure value)
fps	..... snímky za vteřinu (angl. frame per second)
ISO	..... citlivost snímače na světlo
I_o [A]	..... proud protékající obloukem
MRAW	..... datový formát obsahující minimálně zpracovaná data z obrazového snímače (angl. movie raw)
ND	..... neutrálně šedý (angl. neutral density)
l_o [m]	..... délka oblouku
TIFF	..... obrazový souborový formát (angl. tagged image file format)
TTL	..... tranzistorově-tranzistorová logika
U_o [V]	..... obloukové napětí



ÚVOD

Práce je zaměřena na problematiku využití vysokorychlostní kamery při snímání vzniku a zhášení spínacího oblouku v magnetických vypínačích s kovovou deionizační komorou. Magnetické vypínače jsou používány téměř ve všech nízkonapětových spínacích přístrojích, ve kterých je nutné při spínání uhasit elektrický oblouk. Jsou zde uvedeny nejdůležitější vlastnosti vysokorychlostní kamery a popis laboratoře spínacích přístrojů. Pro demonstraci možností využití kamery jsou zde analyzovány výsledky měření na nízkonapětovém jističi typu 10B.

1 VZNIK A PRINCIPY ZHÁŠENÍ SPÍNACÍHO OBLOUKU

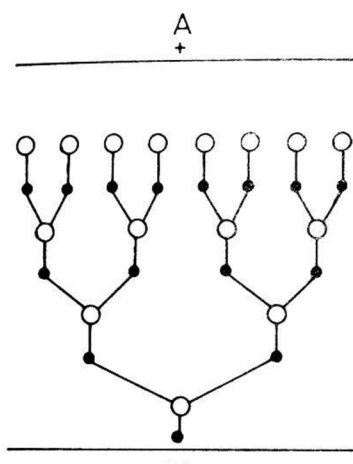
Elektrické spínací přístroje se používají k ovládání či jištění elektrických obvodů a zařízení. Jejich hlavní funkcí je zapnout, nebo vypnout příslušný obvod a přerušit tok energie do něj dodávané. Při těchto pochodech dochází ke změně energetického stavu obvodu a tudíž k přechodnému jevu, který je často doprovázen vnikem elektrického výboje, jemuž se budeme věnovat na následujících řádcích.

1.1 Vznik a vlastnosti elektrického oblouku

Vznik elektrického výboje v dielektrickém prostředí je podmíněn přivedením nebo vytvořením elektricky nabitých částic mezi dvě místa s různým potenciálem. Z hlediska velikosti napětí na výboji a proudu jím procházejícím rozlišujeme několik druhů výbojů. Nás bude zajímat především vznik koróny a následně jiskry či elektrického oblouku.

Pro vysvětlení vzniku výboje budeme uvažovat plynné prostředí mezi elektrodami. V něm se mohou náhodně pohybovat molekuly s vlastní rychlostí až 10^3 ms^{-1} . Molekuly na sebe narážejí, přičemž při nepružné srážce může dojít k disociaci molekul, tedy rozpadu na jednotlivé atomy. Ty zase rekombinují v molekuly, ale jejich doba existence umožňuje pravděpodobnost další srážky s jinou částicí, ať už s jinou molekulou, atomem nebo elektronem. Při nepružné srážce se atom může nabudit nebo ionizovat. Nabuzením se dostane valenční elektron atomu na nestabilní dráhu a při vracení vyzaří energii ve formě fotonu. Je-li energie dostačující k oddělení elektronu od atomu, vznikne kladný iont s volně pohybujícím se elektronem. Kladné a záporné ionty jsou urychlovány elektrickým polem mezi elektrodami. Elektrony jsou však menší a lehčí, tudíž jsou pohyblivější než kladné ionty. Při dostatečném urychlení nestačí rekombinovat a mohou opět ionizovat nebo disociovat ostatní částice. Pro vznik výboje musí převládat ionizační pochody nad rekombinačními, při stabilním hoření výboje jsou pak oba pochody v rovnováze.

Probíhají-li ionizační a budící pochody v bezprostřední blízkosti elektrod, jedná se o korónu. Z hlediska spínacích pochodů je však téměř nepostřehnutelná a uplatní se převážně v technice velmi vysokých napětí, kde se vyskytuje hlavně na ostrých hranách vodičů a izolátorů.



Obr. 1 Princip elektronové laviny ^[1]

Pokud je intenzita elektrického pole stejná nebo větší než elektrická pevnost dielektrika, mohou vznikat elektronové laviny a koróna může přejít v jiskru nebo oblouk. Princip elektronové laviny je zřejmý z Obr. 1. Urychlený elektron na své dráze uvolní ionizací 2 a více elektronů, které jsou schopné ionizovat další částice a dochází tak k lavinovému efektu. Následkem toho může při velké intenzitě elektrického pole vzniknout jiskra nebo oblouk.

Jiskra je charakteristická svou krátkou dobou existence, zatímco elektrický oblouk může existovat libovolně dlouhou dobu, dokud vnějším zásahem neporušíme rovnováhu mezi ionizací a rekombinací částic. Vodivé částice v hořícím oblouku vznikají hlavně nárazovou a tepelnou ionizací prostředí.

1.1.1 Vznik oblouku při zapínání

V rozepnutém 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, dochází ke vzniku koróny a následně elektronové laviny, která rychle přechází v oblouk. Díky nízké teplotě je prvotním mechanismem vzniku oblouku nárazová ionizace.

Při zapínání se kontakty pohybují směrem k sobě velikou rychlostí, oblouk existuje tedy jen krátkou dobu. Přesto musí být kontaktní systém navržen tak, aby oblouk nezahřál kontakty na teplotu tavení, kdy by s pomocí přitlačné síly došlo k jejich svaření a omezení či dokonce selhání hlavní funkce spínače. To je důležité především při zapínání obvodu do zkratu, jako například v systémech opětovného zapnutí u sítí vysokého napětí. Řešením může být vhodné rozdělení kontaktu na část z vodivého materiálu, která při zapnutém stavu vede proud obvodem, a na část z materiálu s vysokou teplotou tavení (např. Wolfram), která uskutečňuje přechod z vypnutého stavu do zapnutého a naopak.

Uvažujeme-li vzduch, je vzhledem k střední volné dráze emitovaných elektronů a k jeho elektrické pevnosti (3 kV/mm) výskyt oblouku při zapínání možný jen v případě, je-li napětí na elektrodách větší než je 300 V. Přítomnost oblouku může nastat i v případě špatného dosedu kontaktů, kdy dochází k jejich odskočení. Princip vzniku takového oblouku je shodný s principem u vypínacích pochodů.

1.1.2 Vznik oblouku při vypínání

Každý kontaktní systém má určitý přechodový odpor, způsobený mikronerovnostmi kontaktů, povrchovým znečištěním, typem styku, atd. Průchodem proudu zde vzniká Jouleovo teplo úměrné jeho druhé mocnině, které kontakty zahřívá. Při vypínání dochází nejprve k omezení přitlačné síly kontaktů, což má za následek zvětšení přechodového odporu a s ním spojené větší ohřívání kontaktních ploch. Proud může téci stále menšími plochami, až dosáhne v určitých místech takové hustoty proudu, která dokáže natavit materiál kontaktů, nebo ho částečně odpařit. Výstupní práce potřebná k emitování elektronů je vzhledem k teplotě kontaktů nízká, takže v okamžiku jejich oddálení je mezi nimi kromě vysoké intenzity elektrického pole plno volných nosičů náboje a oblouk může vzniknout i při poměrně malých hodnotách napětí. Prvotním mechanismem vzniku oblouku při vypínání je tepelná ionizace.

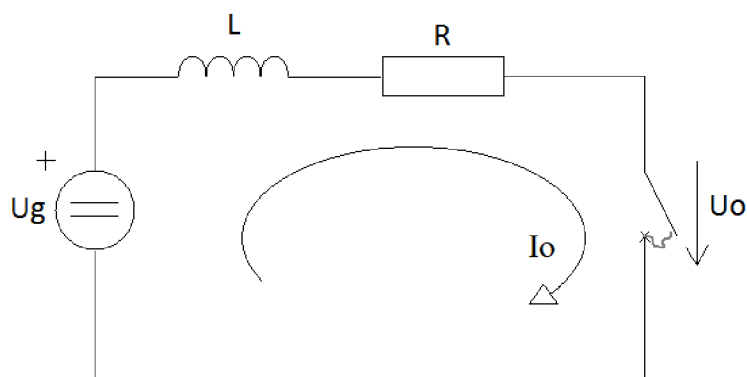
1.1.3 Vlastnosti elektrického oblouku

Elektrický oblouk je trvalý výboj hořící v plazmatu plynného média. Je to vysoce komplexní děj, který závisí na mnoha faktorech (materiálu a prostorovém uspořádání kontaktů, tlaku a médiu mezi kontakty, atd.), vyznačuje se vysokou teplotou jádra, malým odporem a intenzivním vyzařováním světla. Má negativní vliv na mechanické části elektrických spínacích přístrojů, jeho existence nám však umožňuje zmařit naakumulovanou energii obvodu v předem definovaném místě (mezi kontakty spínače) a omezit tak velikost přepětí při vypínání indukčních obvodů.

Z hlediska komplexnosti celého děje je zatím možné stanovit jednotlivé závislosti charakteristických veličin oblouku pouze experimentálně, jako to provedla *Ayrtonová* ^[1], která empiricky odvodila vztah, popisující statickou charakteristiku oblouku pro malé proudy a krátké oblouky:

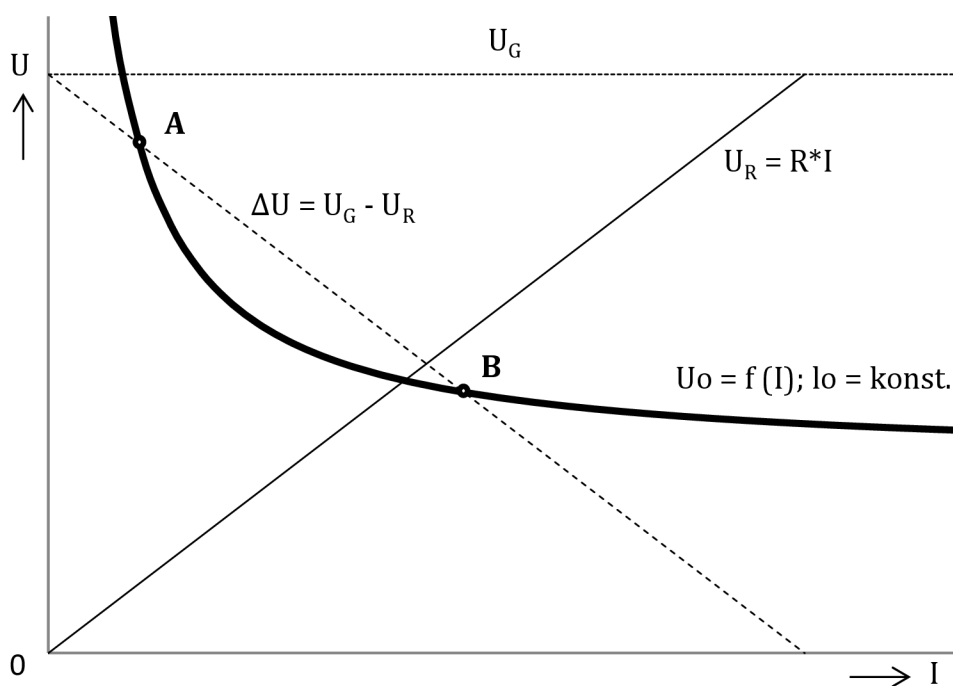
$$U_o = \alpha + \beta l_o + \frac{\gamma + \delta l_o}{I_o} \quad (1)$$

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. 2.



Obr. 2 Náhradní schéma obvodu s obloukem

Jestliže se budeme zabývat stabilním hořením oblouku, můžeme indukčnost obvodu zanedbat. Řešením napěťových poměrů v daném obvodu pak určíme body, ve kterých může elektrický oblouk existovat. V těchto bodech se součet úbytků napětí na odporu a na oblouku rovná napětí zdroje. Grafické řešení je patrné z Obr. 3:



Obr. 3 Voltampérová charakteristika obvodu s el. obloukem

Oblouk může existovat jen v bodech A a B, přičemž stabilně jen v bodě B. To lze logicky odvodit z grafického řešení volt-ampérových poměrů v obvodu. Snížení proudu v bodě A má za následek zvýšení výkonu potřebného k hoření oblouku, který zdroj nedokáže dodat a oblouk zanikne, zatímco zvýšením proudu v obvodu klesne napětí na oblouku, zdroj začne do oblouku dodávat výkon a hoření přejde do stabilního bodu B. Analogicky, snížíme-li v bodě B proud procházející obvodem, bude zdrojové napětí vyšší než součet úbytků napětí na prvcích obvodu, zdroj dodá do oblouku výkon a oblouk se vrátí do bodu B. Zvýšením proudu se zvýší i výkon potřebný k hoření oblouku, který ale zdroj nemůže dodat a proto se snížením proudu obvod opět

vrátí do bodu B. Výše uvedené úvahy potvrzuje tzv. Kaufmannova podmínky stability výboje^[1], která určuje stabilitu výboje při platnosti vztahu:

$$\frac{dU_o}{dl} + \frac{dU_R}{dl} > 0 \quad (2)$$

Při zhášení elektrického oblouku lze například zvyšováním jeho délky posouvat statickou charakteristiku oblouku výš, až body A a B splynou v jeden, označovaný jako mez stability výboje. Dalším zvyšováním délky oblouk uhasíná.

Ačkoliv rovnice (1) popisuje statickou charakteristiku pouze pro malé proudy a krátké oblouky, jsou možnosti z ní vyplývající pro zhášení oblouku všeobecně platné. Při uvažování velkých proudů lze rovnici zjednodušit na tvar:

$$U_o \cong \alpha + \beta l_o \quad (3)$$

kde koeficient α znázorňuje úbytek napětí na elektrodách a koeficient β znázorňuje gradient úbytku napětí na těle oblouku.

1.2 Principy zhášení elektrického oblouku

Elektrický oblouk je z hlediska vypínače jev nežádoucí, a to především pro jeho tepelné účinky na kontaktní systém přístroje. Proto se snažíme o co nejkratší dobu hoření oblouku, která ještě v obvodu nezpůsobí vysoké přepětí, nebezpečné pro izolační prvky dané sítě. Aby mohl oblouk uhasnout, musí převládat rekombinační pochody nad ionizačními. Rekombinace nastává nejčastěji díky radiální difúzi částic z teplejších vrstev u jádra oblouku do okolních studenějších vrstev. Jedná se o spontánní jev a rekombinace nastává nejčastěji potrojnou srážkou, kdy je energie uvolněná při rekombinaci předána jiné částici, případně je vyzářena jako světlo ve formě fotonu.

Spontánní deionizací jsme schopni uhasit oblouky malého výkonu řádově do jednotek ampér, při vypínání větších proudů musíme zajistit podporu deionizace ochlazováním oblouku, které pomáhá odvádět teplé částice z jeho povrchu. Při ochlazování oblouku paradoxně stoupá jeho teplota, neboť se zužuje výbojová dráha, zvětšuje se odpor oblouku a tím pádem vzniká větší teplo Jouleovými ztrátami. Pokud budeme schopni odvést zvýšené množství tepla zhášením, výbojová dráha se opět zúží a celý děj se opakuje až do úplného přerušení výbojové dráhy.

Zhášedla napomáhající přirozené deionizaci mohou pracovat na různých principech, základně je ale můžeme rozdělit na dvě skupiny:

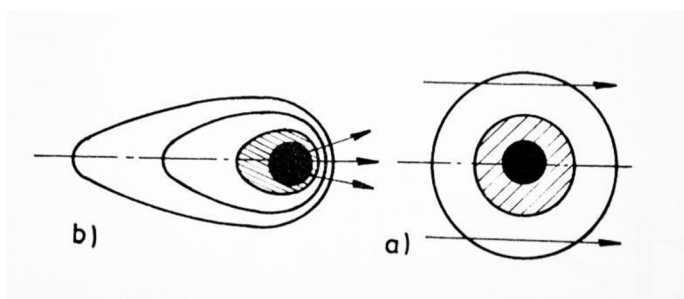
- *S vlastní energií* – pohyb výbojové dráhy v médiu je uskutečněn pomocí elektromagnetických cívek zapojených do obvodu vypínaného proudu, nebo pomocí tepla vzniklého v oblouku. Nevýhodou je horší zhášecí schopnost v oblasti středně velkých proudů, to však lze potlačit vhodnou konstrukcí vypínače.
- *S cizí energií* – nejčastěji dochází k pohybu média kolem výbojové dráhy pomocí naakumulované energie ve formě stlačeného vzduchu nebo pružiny mechanicky připojené na píst, který vhání médium do okolí kontaktů.

V naší práci se zaměříme na přístroje s magnetickým zhášením elektrického oblouku, používané v oblastech nízkého a vysokého napětí.

1.2.1 Magnetické vypínače

Magnetické vypínače patří do kategorie spínacích přístrojů s vlastní zhášecí energií. Hlavními částmi podílejícími se na přerušení elektrického oblouku je deionizační komora a budící cívka zapojená do série s kontakty. Princip činnosti spočívá v silovém působení magnetického pole vyvolaného proudem v obvodu na proudovodnou dráhu elektrického oblouku, jež má za následek vehnání oblouku do deionizační komory.

Kromě délky oblouku má na chlazení vliv i jeho rychlost, kterou se pohybuje v médiu mezikontaktního systému. Efektivnost chlazení při relativním pohybu oblouku v prostředí je mnohem větší, než například při ofukování stlačeným vzduchem, viz Obr. 4. Pokud je oblouk unášen proudem okolního média, je vzdálenost jeho jádra od vnějších vrstev stejná a takové chlazení má za následek pouze větší odvod teplých částic z povrchu oblouku. Zatímco působením magnetického pole je unášeno jádro oblouku v okolním prostředí, nechává za sebou ionizované plyny a dostává se tak do styku s větším počtem studených neionizovaných částic.



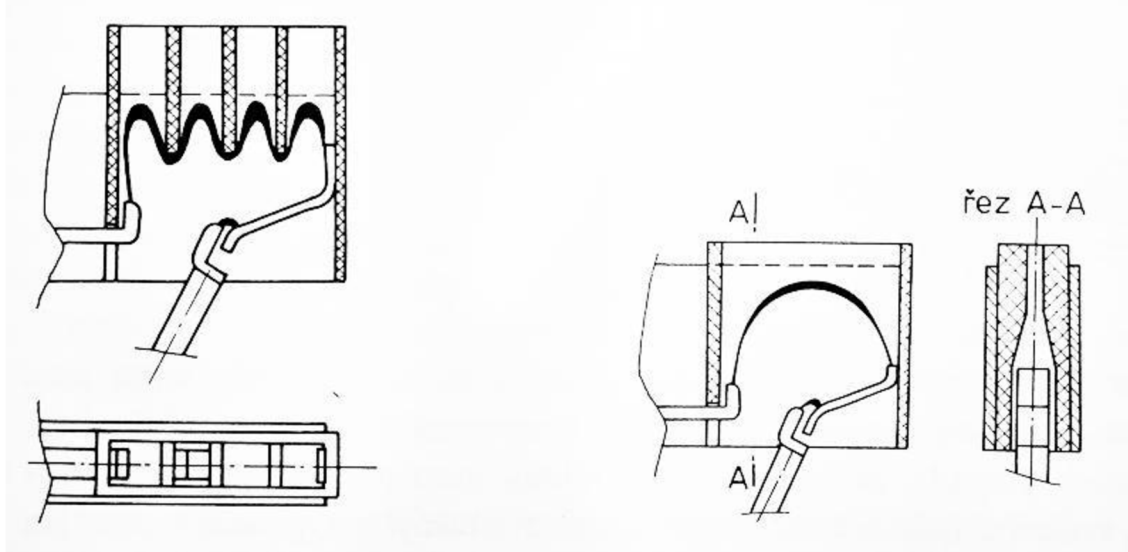
Obr. 4 Obloukový výboj v příčném řezu; a) v proudu vzduchu, b) pod vlivem magnet. pole ^[1]

Vypínací schopnost magnetických spínacích přístrojů se zvyšuje pomocí deionizační komory, která plynule navazuje na opalovací růžky kontaktů. Zhášecí komory mohou být buď z izolačního materiálu, nebo z kovu, přičemž každá funguje na trochu jiném principu.

Izolační zhášecí komory jsou zhotoveny z nevodivého materiálu a mohou být roštového, nebo štěrbinového provedení, znázorněného na Obr. 5.

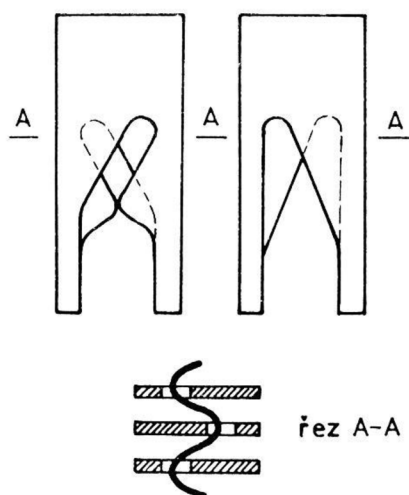
- Roštové zhášecí komory jsou složeny z žeber, mezi kterými se vlivem magnetického pole tvoří obloučky, prodlužuje se délka a tím i efektivní chladicí plocha oblouku. Elektricky nevodivé materiály mají ale zpravidla i horší tepelnou vodivost, a tak se hrany žeber zahřívají na vysokou teplotu a dochází k jejich opalování.
- Štěrbinové zhášecí komory jsou obecně výkonnější než roštové. Oblouk je hnán do zúženého prostoru, kterým postupuje vzhůru a přichází tak do styku s chladným materiálem, který napomáhá k odvodu tepla z jeho povrchu. Přitom se deformuje samotný průřez proudové dráhy a zvětšuje se chladicí plocha.

Izolační zhášecí komory se používaly pro obvody stejnosměrného zdroje napětí, u kterých je hlavním vypínacím mechanismem zvětšení odporu oblouku prodloužením jeho délky. Při vypínání obvodu střídavého zdroje napětí je díky velké délce oblouku kontaktní systém plný radiálně difundovaných ionizovaných částic, které zhoršují elektrickou pevnost mezi kontakty. Zotavené napětí tak může opakovaně zapálit oblouk i po průchodu proudem nulou. V dnešní době už se téměř nepoužívají, nahradily je komory kovové.



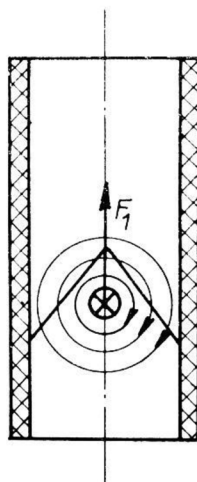
Obr. 5 Zhášecí komora s izolačním roštem (vlevo), štěrbinová (vpravo) ^[1]

Kovové zhášecí komory jsou z vodivých ocelových roštů. Hlavní funkcí takové komory není prodloužení oblouku, ale jeho rozdělení na několik samostatných sériově zapojených oblouků. To má za následek zvýšení obloukového napětí, jelikož se tím na každém žebru vytvoří anodový a katodový úbytek napětí, který je obecně vyšší než úbytek napětí na těle oblouku. Oblouk se brání rozdělení mezi žebra komory, jelikož se snaží zaujmout stav s nejnižší energií. Proto se nejdříve prodlouží podobně jako u izolačních komor a rozdělí se, až když je to pro něj energeticky výhodnější, než zvětšování své délky. Přechod mezi žebra usnadňuje uspořádání roštu podle Obr. 6.



Obr. 6 Desky ocelového roštu s výřezy ^[1]

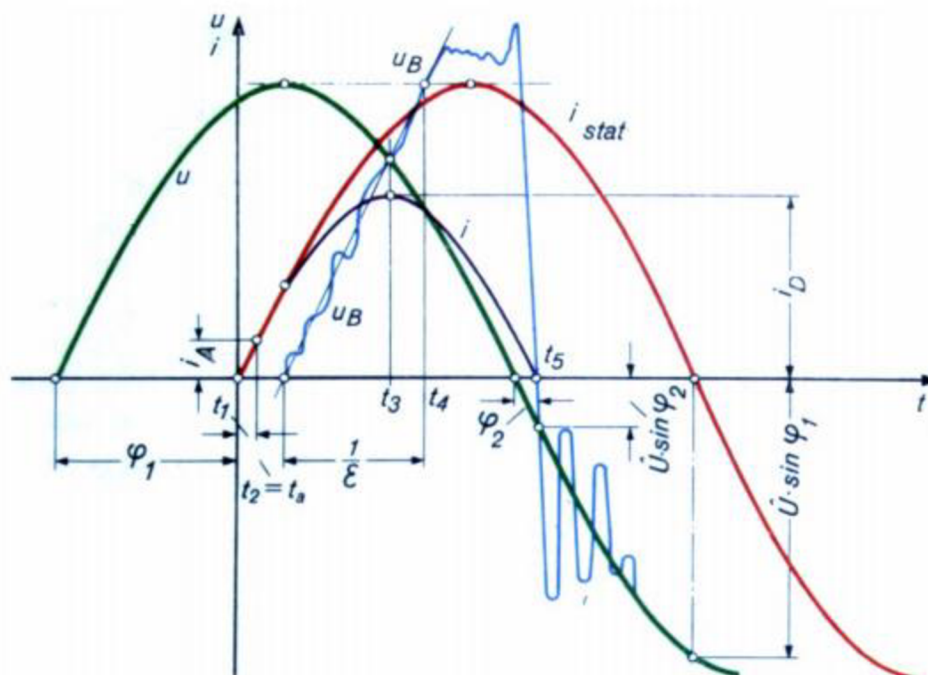
Zhášecí komory z kovových roštů se používají převážně pro přístroje nízkého napětí. Přitom se vylučuje použití vyfukovací cívky, jelikož je magnetické pole proudového záhybu dostatečně silné pro vehnání oblouku do deionizační komory. Ty jsou nejčastěji zhotoveny z oceli, která díky vyšší permeabilitě pomáhá oblouk vtáhnout mezi žebra a zároveň mu brání v opuštění komory. Princip je patrný z Obr. 7, jestliže je deska orientovaná příčně k ose oblouku, uzavírá se přes ni zčásti magnetický tok jím vyvolaným a pro zachování nejnižšího energetického stavu je oblouk vtahován silou F_1 mezi žebra.



Obr. 7 Princip vzniku vtahovací síly na ocelové desce roštu^[1]

Nejnepříznivější situací pro spínací přístroje je vypínání nadproudů a zkratových proudů. Je proto výhodné tyto proudy nejen přerušit, ale i omezit jejich velikost. Tuto funkci plní například pojistky se zrnitým hasivem, které proud přeruší dřív, než dosáhne své maximální hodnoty. U přístrojů s magnetickým zhášením se setkáváme s pojmem tzv. omezovacích vypínačů.

Omezovací vypínače jsou vybaveny prvky, které zrychlují oddalování pohyblivého kontaktu pomocí silového působení magnetického pole přerušovaného proudu, nebo pomocí energie z cizího zdroje, jako například z nabitých kondenzátorů, přičemž účinek prvního způsobu je přímo úměrný velikosti vypínaného proudu, zatímco druhý způsob se dá využít i pro jištění malých nadproudů, přepětí či podpětí. V obou případech je oblouk vehnán do deionizační komory v řádech jednotek milisekund od reakce příslušného čidla. Pokud je doba reakce spouště a doba, za kterou dojde k oddálení kontaktů, menší než čtvrtperioda vypínaného proudu, dojde díky rychlému zvyšování odporu oblouku k jeho omezení^[1], viz Obr. 8.



Obr. 8 Průběh napětí a proudu na kontaktech omezovacího jističe při vypínání nadproudu ^[2]

Proud tedy zaniká dříve, než ve své přirozené nule a nedosáhne své maximální hodnoty. Z toho je zřejmé, že vypínací pochod je stejný jako při vypínání stejnosměrného proudu.

2 VYSOKORYCHLOSTNÍ KAMERA PHOTRON SA-X2

Lidské oko vnímá obraz z kamery jako plynulý při frekvenci snímání 30 fps. Vysokorychlostní kamery dokáží zachytit okamžiky, které jsou normálním pozorovatelem nepostřehnutelné, jelikož pracují s mnohem vyšší frekvencí snímání. Využití takových kamer může být užitečné například v analýze sportovních úderů, kinematografii nebo v průmyslu, kde se kamery používají k zachycení a následné analýze rychlých dějů.

2.1 Technická specifikace a vlastnosti

Základní technické údaje:

Model:	1000K – monochromatické provedení; 16GB
Senzor:	CMOS, 1024x1024 pixelů, velikost pixelu 20μm
Citlivost ISO:	ISO 25000
Závěrka:	Elektronická s rychlostí až 293 ns
Externí spínání:	Trigger - TTL 5V; Gbit Ethernet
Možnosti snímání:	Provoz kamery v nekonečné smyčce s nastavením okamžiku snímání Výběr snímací oblasti (ROI – Region Of Interest) s krokem 8 pixelů
Objímka pro objektivy:	Nikon F – mount (G-typ kompatibilní), C – mount, S redukcí Canon EF

Rozlišení videa je závislé na rychlosti snímání, viz Tab. 1:

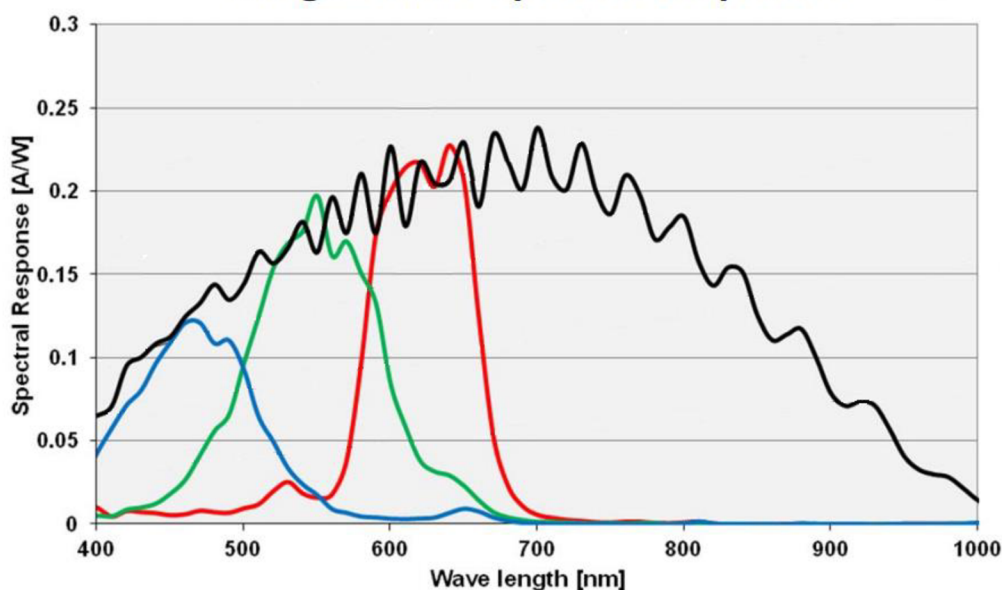
FRAME RATE (fps) *	MAXIMUM RESOLUTION		RECORD DURATION (12-BIT)							
			TIME (Sec.)				FRAMES			
	Horizontal	Vertical	8GB	16GB	32GB	64GB	8GB	16GB	32GB	64GB
Model 480K										
1,000	1,024	1,024	5.45	10.91	21.83	43.68	5,455	10,916	21,839	43,684
2,000	1,024	1,024	2.72	5.45	10.91	21.84	5,455	10,916	21,839	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. 1 Závislost rozlišení a délky snímání na frekvenci snímání ^[3]

Vzhledem k použitelné době záznamu je velmi důležitá synchronizace kamery se snímaným dějem. K tomu slouží TTL Trigger, díky němuž můžeme zapnout snímání v návaznosti například na vnější signál od jiné kamery nebo z čidla. Snímání můžeme zapnout i pomocí počítače, který je s kamerou propojen přes Gbit Ethernet. Maximální hodnota ISO je poměrně vysoká a umožňuje snímání i za horších světelných podmínek, jelikož při rychlých frekvencích snímání je pro správnou expozici potřeba, aby na snímač dopadlo poměrně velké množství světla. Záznam z kamery je možno uložit v maximální bitové hloubce 12bit.

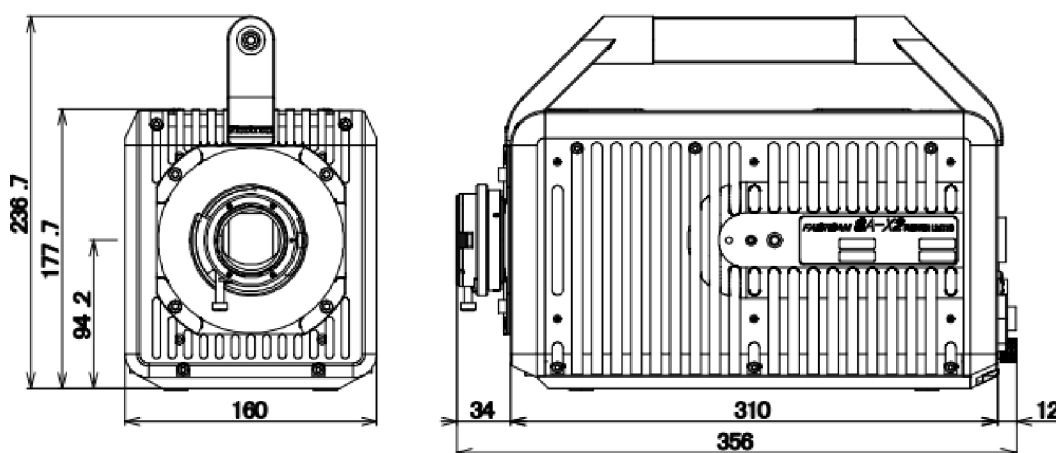
Image Sensor Spectral Response:



Obr. 9 Spektrální citlivost obrazového senzoru kamery ^[3]

Optická kvalita objektivů není pro výsledný výstup tolik určující, neboť při poměrně velkých světlocitlivých buňkách se jejich vady tolik neprojeví. Jejich vliv se projeví spíše v omezeném zvětšení obrazu. Každý objektiv má svojí minimální zaostřitelnou vzdálenost, která je dána konstrukcí optických členů objektivu a pod kterou už není schopen zaostřit. Kombinací vzdálenosti zaostřeného bodu od snímače a ohniska daného objektivu dostáváme tzv. poměr zvětšení, udávající poměr mezi obrazem skutečným a obrazem vykresleným na senzoru kamery. Z toho vyplývá, že s danými objektivy jsme schopni zachytit jen omezený detail, který lze zvětšit použitím speciálních mezikroužků, umístěných mezi objektiv a kameru, nebo použitím speciálního makro objektivu. Na poměru zvětšení je závislá i hloubka ostrosti, což je vzájemná vzdálenost nejbližšího a nejvzdálenějšího bodu, které se na výsledném obrazu jeví jako ještě ostré. Obecně platí, že se tato vzdálenost snižuje při snižování clony objektivu, se vzdáleností objektivu od snímaného objektu a s použitím objektivů s vyšší ohniskovou vzdáleností. Abychom byli schopni sledovat děj v dostatečné ostrosti, je nutné jeden z těchto parametrů změnit. Patrně nejvýhodnějším řešením je zvyšování clonového čísla. To má sice za následek snížení kvanta světla, které dopadá na snímač, ale vzhledem k tomu, že budeme snímat elektrický oblouk, je tento vliv spíše výhodou.

Výše uvedené je třeba respektovat, neboť předmětem naší analýzy budou převážně přístroje nízkého napětí, jejichž kontaktní systém s deionizační komorou je spíše menších rozměrů.

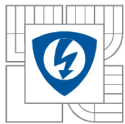


Obr. 10 Proporce vysokorychlostní kamery Photron AS-X2 bez nasazeného objektivu ^[3]

2.2 Možnosti analýzy oblouku pomocí vysokorychlostní kamery

Elektrický oblouk je komplexní děj, který zatím nejsme schopni přesně matematicky popsat. Z toho plyne, že většinu závislostí jsme nuceni získat experimentálně. Vysokorychlostní kamera nám díky vysoké frekvenci snímání umožní sledovat průběh oblouku v přístroji, přesněji jeho chování v mezikontaktním prostoru a posléze v deionizační komoře. Se současným měřením charakteristických veličin oblouku nám umožní jeho lepší diagnostiku.

Výstupem z kamery je dvourozměrný obraz, jehož hlavní charakteristickou vlastností je jas, respektive jeho rozložení v jednotlivých úrovních. Vhodným rozložením jasových úrovní obrazu lze následnou analýzou lépe lokalizovat jádro oblouku. Spolu s daty z osciloskopu lze určit působení sil na proudovodnou dráhu oblouku, nebo zjistit závislost velikosti obloukového napětí na délku a rychlost pohybu jádra oblouku. Přesnost takové diagnostiky je závislá právě na přesnosti lokalizace jádra oblouku.



Předmětem diagnostiky mohou být například odpínače nebo jističí přístroje pro nízké napětí určené pro menší nominální proudy, které se běžně používají například v domovních instalacích. Jističí přístroje větších vypínacích schopností už mají jinak řešené vnitřní uspořádání, kontakty jsou umístěny pod deionizační komorou a vzniklý oblouk do ní přechází bezprostředně po rozpojení kontaktů. Z hlediska snímání oblouku je výsledná scéna málo přehledná.

3 LABORATOŘ SPÍNACÍCH PŘÍSTROJŮ

K měření a snímání spínacích pochodů budeme využívat prostor Vědecko-technického parku profesora Lista, přesněji Laboratoř spínacích přístrojů, která je určena pro zkratové zkoušky elektrických strojů a přístrojů. Dosažitelné parametry zkratového proudu jsou:

Střídavý proud, 0,2 s:

- 150 kA / 250 V
- 100 kA / 500 V
- 60 kA / 750 V
- 40 kA / 1000 V

Střídavý proud, 3 s:

- 40 kA / 50, 100 V

Stejnoseměrný proud, 0,2 s:

- 50 kA / 1000 V

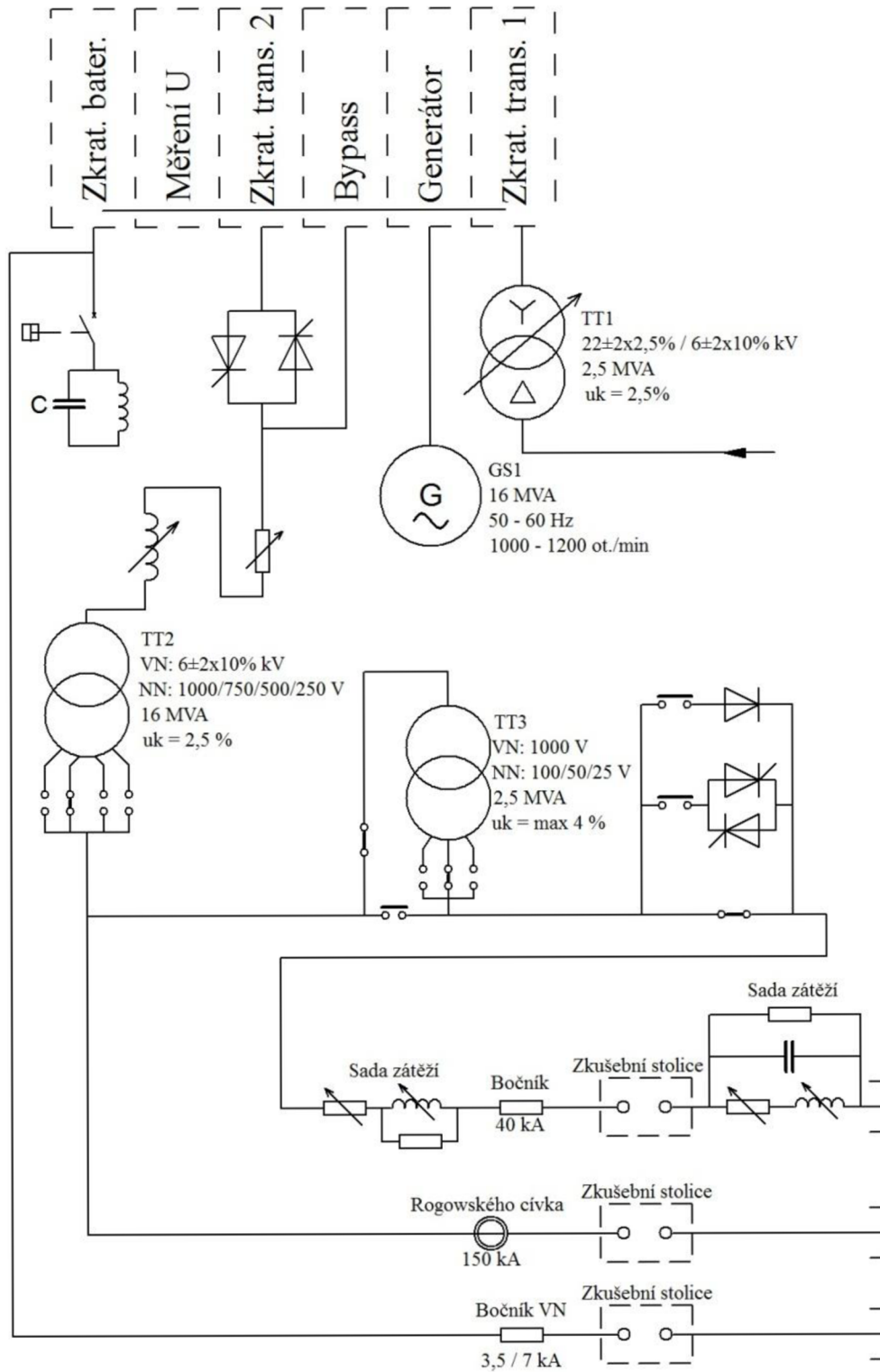
Zdroje zkratového proudu:

- *Zkratový transformátor 2,5 MVA* – použitelný pro menší zkratové proudy (do 10 kA) a zkoušky při nominálním chodu. Pro dosažení co největších proudů má velmi malou hodnotu napětí nakrátko $u_{k\%} = 2,5 \%$. Na vstupu i výstupu má přepínatelné odbočky pro lepší nastavení výstupních parametrů.
- *Motor-generátor 16 MVA* – synchronní generátor poháněný frekvenčně řízeným motorem je nejsilnějším zdrojem zkratového proudu laboratoře, jehož transcendentní složky proudu mohou dosáhnout hodnot až 13 kA.
- *Kondenzátorová baterie 3200 μ F/10 kV – 320 kJ* – je určena pro zkratové zkoušky vysokonapěťových přístrojů.

K transformaci zkratových veličin na požadované hodnoty se používá transformátor TT2 o výkonu 16 MVA, nízkém napětí nakrátko $u_{k\%} = 2,5 \%$ a možností nastavení vstupního a výstupního napětí pomocí odboček. Pro delší zkoušky se za transformátor TT2 připojuje ještě snižující transformátor TT3.

Parametry průběhu proudu jsou udané normou a nastavují pomocí proměnného odporu a cívky, sériově zapojené před primárním vinutím transformátoru TT2. U zkoušek do 40 kA slouží k nastavení parametrů vedení sady zátěží, zapojené před a za zkušební stolicí, která sama obsahuje ještě mobilní odporové děliče. Měření proudu je uskutečněno bezprostředně před zkušební stolicí pomocí bočníků.

Při zkouškách většími proudy než 40 kA je nutné co nejvíce zkrátit vzdálenost zdroje zkratového proudu od zkoušeného přístroje, aby ztráty na vedení neomezovali hodnotu maximálně dosažitelného proudu, proto je zkušební stolice na velké proudy umístěna bezprostředně za transformátorem TT2, který od rozvodny dělí jen zeď zkušební místnosti. Hodnoty těchto proudů se měří pomocí Rogowského cívky.



Obr. 11 Orientační schéma laboratoře spínacích přístrojů

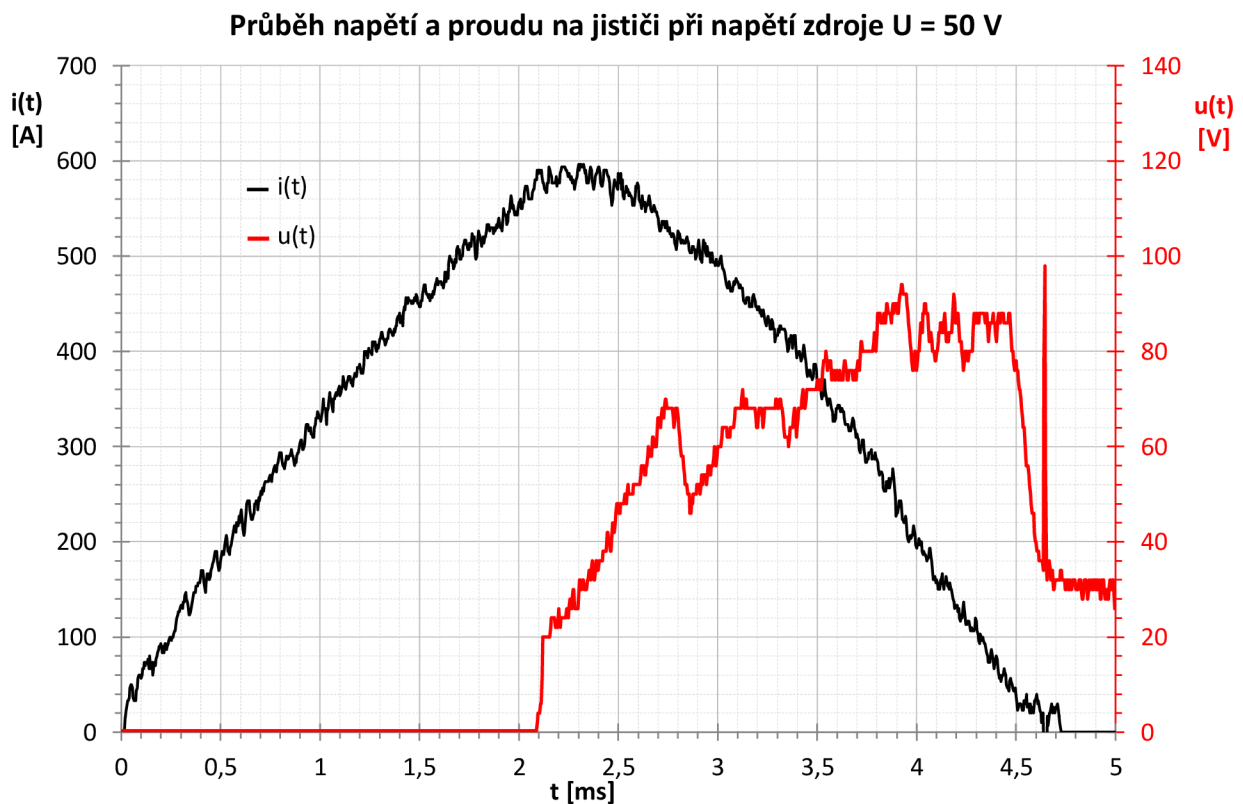
4 MĚŘENÍ SE ZÁZNAMEM

Měření jsme prováděli na jednopólovém nízkonapětovém jističi typu 10B při vypínání zkratového proudu různé velikosti. Vzniklý elektrický oblouk byl snímán vysokorychlostní kamerou zároveň se záznamem velikosti procházejícího proudu a napětí na kontaktech jističe. Zdrojem elektrické energie byla zkratová zkušební stolice a motor-generátor v Laboratoři spínacích přístrojů.

4.1 Měření na kondenzátorové zkušební stolici

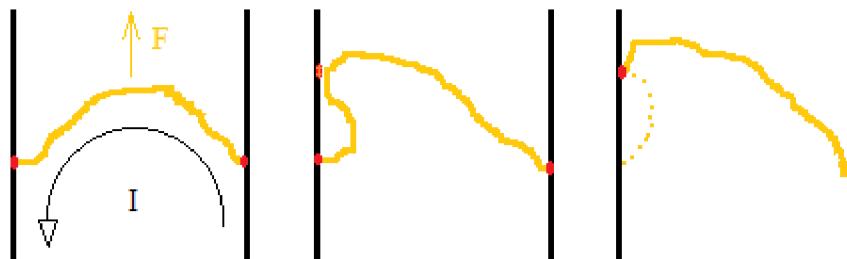
Kondenzátorová zkušební stolice nepatří mezi zdroje energie Laboratoře spínacích přístrojů, je to učební pomůcka skládající se z kondenzátorové baterie a tlumivky, které jsou vyladěné na rezonanční kmitočet shodný s kmitočtem sítě. Kondenzátorová baterie je nabíjena z distribuční sítě 230/400 V. Pro měření napětí a proudu na jističi jsme použili digitální osciloskop, který byl propojen s vysokorychlostní kamerou a stolicí pomocí vedení přenášející trigrovací impuls. Abychom byli schopni natočit vypínací děj uvnitř jističe, bylo potřeba odstranit jeho boční kryt. Vypínací děj jsme měřili pro tři různé hodnoty napětí zdroje

4.1.1 Měření s napětím zdroje $U = 50 \text{ V}$



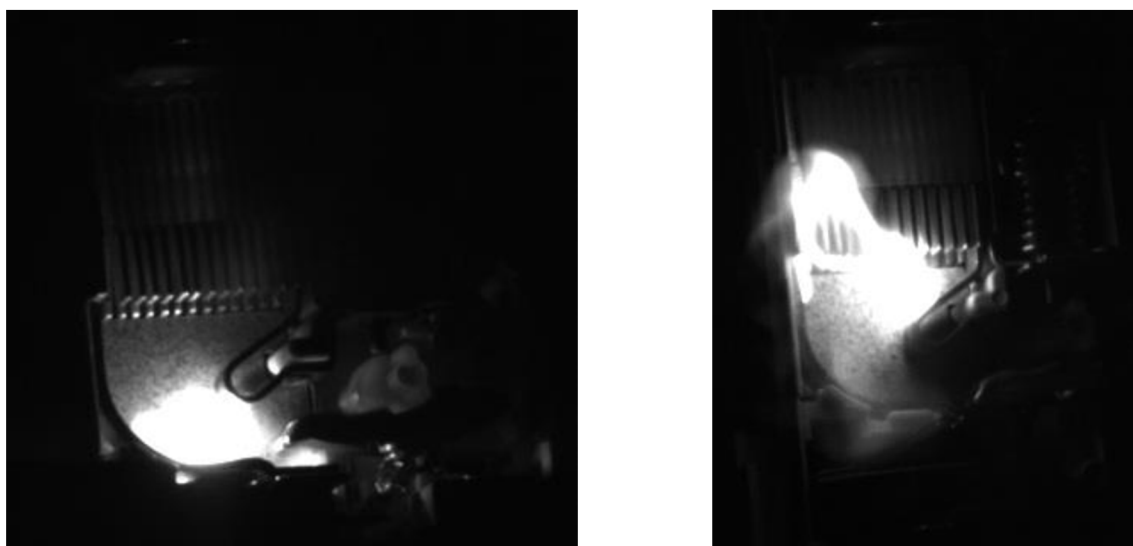
Obr. 12 Průběh napětí a proudu na kontaktech jističe při napětí zdroje $U = 50 \text{ V}$

V prvních okamžicích hoření se obloukové napětí skokově navýší o elektroodové úbytky na kontaktech. Elektrodynamická síla proudového záhybu žene oblouk k deionizační komoře, deformuje proudovodnou dráhu do tvaru oblouku, zvětšuje jeho délku a tím i jeho efektivní chladičí plochu.



Obr. 13 Pohyb elektrického oblouku mezi vodíci plechy jističe

Pokles obloukového napětí v čase 2,9ms koresponduje s přestupem paty oblouku z pohyblivého kontaktu na vodící plech komory. Oblouk se mezi vodíci plechy pohybuje podle Obr. 13, nová elektroda se vytvoří pomocí autoemise, vodící plechy proto nemusí být tolik zahřáté. Po přestupu na vodící plech se zmenšila délka oblouku a v souvislosti s tím kleslo obloukové napětí.



a)

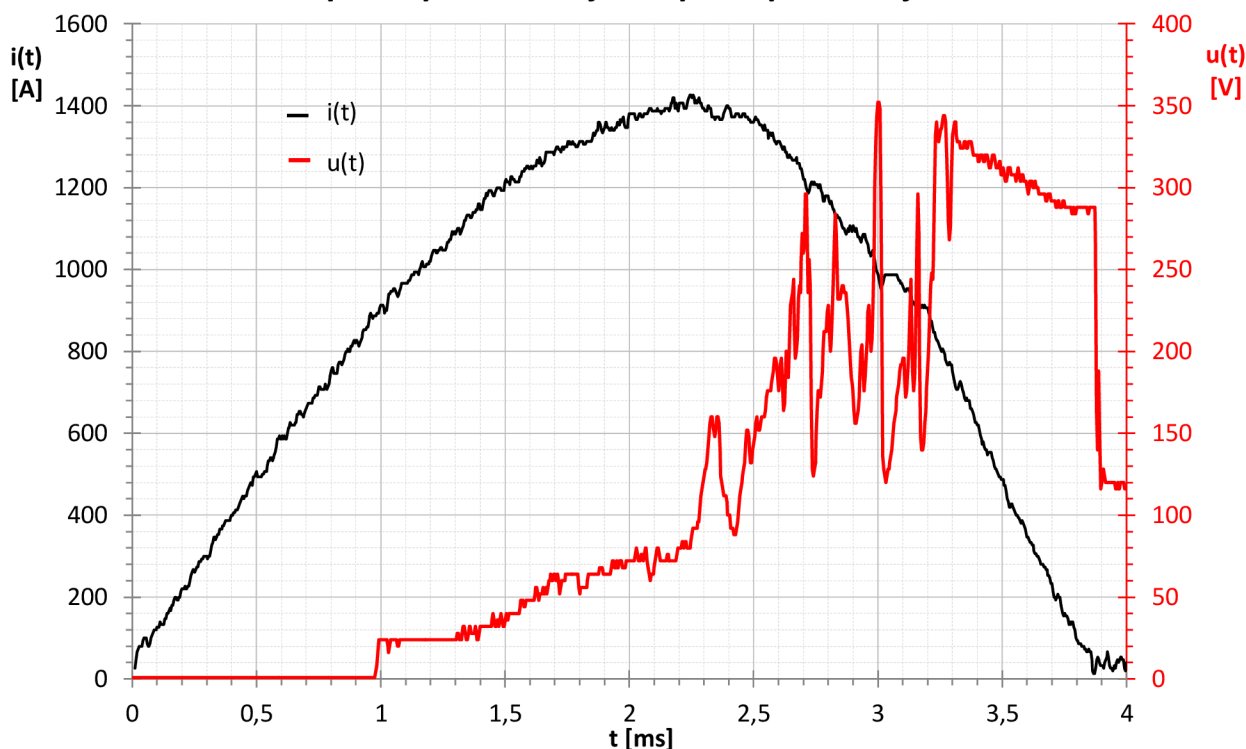
b)

Obr. 14 Snímek ze záznamu při napětí $U = 50 V$; a) 2,9 ms; b) 4 ms

Vlivem odebraného krytu přístroje se elektrický oblouk rozpínal mimo zhášecí komoru jističe, vtaňovací síla komory byla při daném proudu příliš malá a pro oblouk bylo výhodnější hořet volně v prostoru. Na zhášení tedy komora neměla velký vliv.

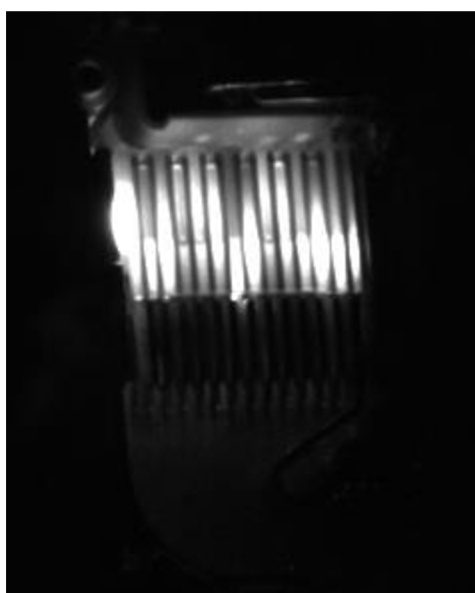
4.1.2 Měření s napětím zdroje $U = 150\text{ V}$

Průběh napětí a proudu na jističi při napětí zdroje $U = 150\text{ V}$



Obr. 15 Průběh napětí a proudu na kontaktech jističe při napětí zdroje $U = 150\text{ V}$

Analogicky jsme provedli měření s napětím zdroje $U = 150\text{ V}$. Vlivem větší strmosti procházejícího proudu došlo k rozpojení kontaktů dříve než v předchozím měření. Hoření oblouku prodloužilo příliš dlouhé setrvání kontaktů v bezprostřední blízkosti viditelné na Obr. 15.



a)



b)

Obr. 16 Snímky ze záznamu při napětí $U = 150\text{ V}$; a) 2,9 ms; b) 3,2 ms

4.1.3 Vyhodnocení

Vzhledem k malému omezení vyzářeného světla jsou záznamy po optické stránce téměř nepoužitelné. Vlivem otevřeného krytu přístroje nejsou určující ani záznamy z osciloskopu, neboť tím byly průběhy napětí a proudu silně ovlivněny.

Z naměřených hodnot můžeme přibližně stanovit koeficient α z rovnice (3), který odpovídá úbytku napětí na elektrodách. Zanedbáme-li délku oblouku v okamžiku těsně po rozpojení kontaktů, určíme hodnotu koeficientu $\alpha \cong 20 \text{ V}$. Z Obr. 15 můžeme odečíst, že deionizační komora navýšila hodnotu obloukového napětí o $\Delta U = \pm 270 \text{ V}$. Deionizační komora má celkem 13 ocelových desek, takže se při plném hoření oblouku v komoře vytvoří dohromady 13 párů anoda-katoda. Se zanedbáním vlivu materiálu, tvaru a dalších vlastností elektrod na koeficient α , můžeme úbytek napětí způsobený deionizační komorou vypočítat dle vztahu:

$$\Delta U \cong k \cdot \alpha \cong 13 \cdot 20 \cong 260 \text{ V}$$

Pro názornost můžeme posoudit omezovací schopnost jističe při měření s napětím zdroje $U = 150 \text{ V}$. Velikost elektrického proudu, který by obvodem protékal, můžeme stanovit dle vztahu:

$$I_{max} = \frac{i(t)}{\sin(\omega t)} \Big|_{t=0,9ms} = \frac{827}{\sin(314,15 \cdot 9 \cdot 10^{-4})} = 2964,3 \text{ A}$$

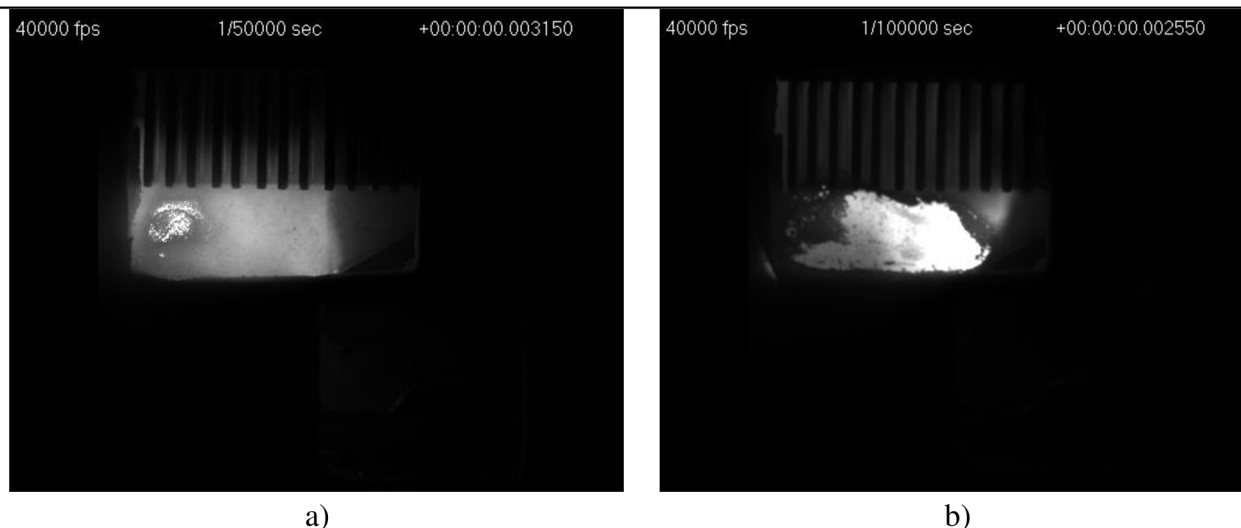
Maximální proud protékající obvodem byl přitom vlivem rychlého nárůstu obloukového napětí poloviční. Platí, že čím rychleji vzroste obloukové napětí, tím více se omezí hodnota procházejícího proudu. Proto je důležité co nejvíce zkrátit dobu mezi zareagováním zkratové spouště a samotným vešnění oblouku do deionizační komory.

4.2 Měření v Laboratoři spínacích přístrojů

Z měření na kondenzátorové zkušební stolici vyplývá, že pro využití vysokorychlostní kamery pro záznam spínacího oblouku je nejdůležitější omezit množství světla, které vyzáří a zároveň minimálně ovlivnit průběh spínacího pochodu. Následující měření probíhala již v Laboratoři spínacích přístrojů a byla zaměřena na správné nastavení expozice snímání.

4.2.1 Úprava jisticího přístroje a pořízených dat

Otvor, vyrobený v boční části krytu přístroje pro možnost optické diagnostiky spínacího oblouku, změnil aerodynamické poměry uvnitř přístroje. Oblouk hořel déle a většinou mimo deionizační komoru. Proto bylo nutné zakrytování otvoru. K tomu posloužila nejdříve vystřižená část disku staré diskety. Experimentálně byla zjištěna její propustnost, která odpovídala posunu expoziční hodnoty zhruba o 11 stupňů, což odpovídá propustnosti 0,05 %. Jak je vidět z Obr. 17, vlivem vysoké teploty oblouku velmi rychle ztrácela svou povrchovou vrstvu a její použitelnost je ohraničena velikostí proudu kolem 1000 A.



Obr. 17 Míra poškození diskety při průchodu proudy o velikosti: a) 1000 A, b) 1200 A

Abychom mohli snímat vyšší zkratové proudy, museli jsme disketu nahradit neutrálním šedým filtrem. Neutrální šedé filtry (tzv. ND filtry) jsou primárně určeny pro fotografické účely a používají se k snížení kvanta světla dopadeného na senzor fotoaparátů. Mají vynikající optické vlastnosti s důrazem na minimální barevný posun prošlého světla. K měření jsme měli k dispozici filtr vyrobený z termosetové pryskyřice s optickou hustotou 0.9, takže jsme kromě přiblížení se aerodynamickým vlastnostem nepoškozeného jističe dosáhli ještě omezení prošlého světla o 87,5 %. Jelikož se filtry většinou vyrábějí číré a následně se povrchově upravují, došlo v průběhu vypínání zkratového proudu k odpaření části těchto vrstev a následně k ovlivnění složení plynného média uvnitř přístroje. V porovnání s nezakrytovaným přístrojem je však tento vliv zanedbatelný. Pro upřesnění je nutné uvést, že otvor v horní části přístroje neodkryvá celou deionizační komoru, ale jen její spodní část z potřeby zachování soudržnosti přístroje.

Množství vyzařeného světla obloukem bylo ale stále příliš velké a pro velikosti zkratových proudů nad 600 A byly záznamy téměř nepoužitelné. Proto bylo nutné použití spektrálního filtru o vlnové délce 807 nm s šířkou propustnosti 12 nm, který se šroubuje před přední čočku objektivu. Ačkoliv elektrický oblouk vyzařuje světlo o různých vlnových délkách, filtr propustí pouze světlo daných vlnových délek. To jednak omezí množství světla, které projde na snímač, o zhruba 50 % a zároveň eliminuje vliv různé citlivosti snímače na světlo různých vlnových délek patrný z Obr. 9.

Veškerá měření jsme prováděli s nastavením kamery na frekvenci snímání **40 000 fps**. Záznamy z měření proudu a napětí byly provedeny s krokem 0,02 ms. Pro analýzu snímků tedy bylo nutné podvzorkovat signál změřeného proudu a napětí z původní frekvence 50 kHz na frekvenci 40 kHz. Toho jsme dosáhli interpolací signálu s faktorem 4, aplikováním decimální dolní propusti s mezní frekvencí 20 kHz a následnou decimací signálu s faktorem 5. ^[4] Celý postup je zřejmý ze zdrojového kódu z programu Matlab v příloze A.

Zprávu a úpravu záznamů z vysokorychlostní kamery poskytl volně přístupný software Photron Fastcam viewer, který umožňuje ukládání dat do formátů MRAW a TIFF ve 12-ti bitové hloubce a který zároveň slouží k nastavení kamery při měření.

4.2.2 Nastavení kamery pro optimální snímání určité velikosti proudu

Optimálním snímáním rozumíme takové snímání, při kterém bude rozložení jasových úrovní jednotlivých obrazů záznamu co nejrovnoměrnější. Největší důraz je třeba klást na rozložení jasů hlavně na světlých místech snímků, kde bychom mohli vlivem přesvětlení snímače ztratit přesnost při snaze lokalizovat jádro oblouku. Množství vyzařeného světla elektrickým obloukem v jističi pro určitou velikost nastaveného zkratového proudu není nikdy úplně stejné, ale pohybuje se v určitých mezích.

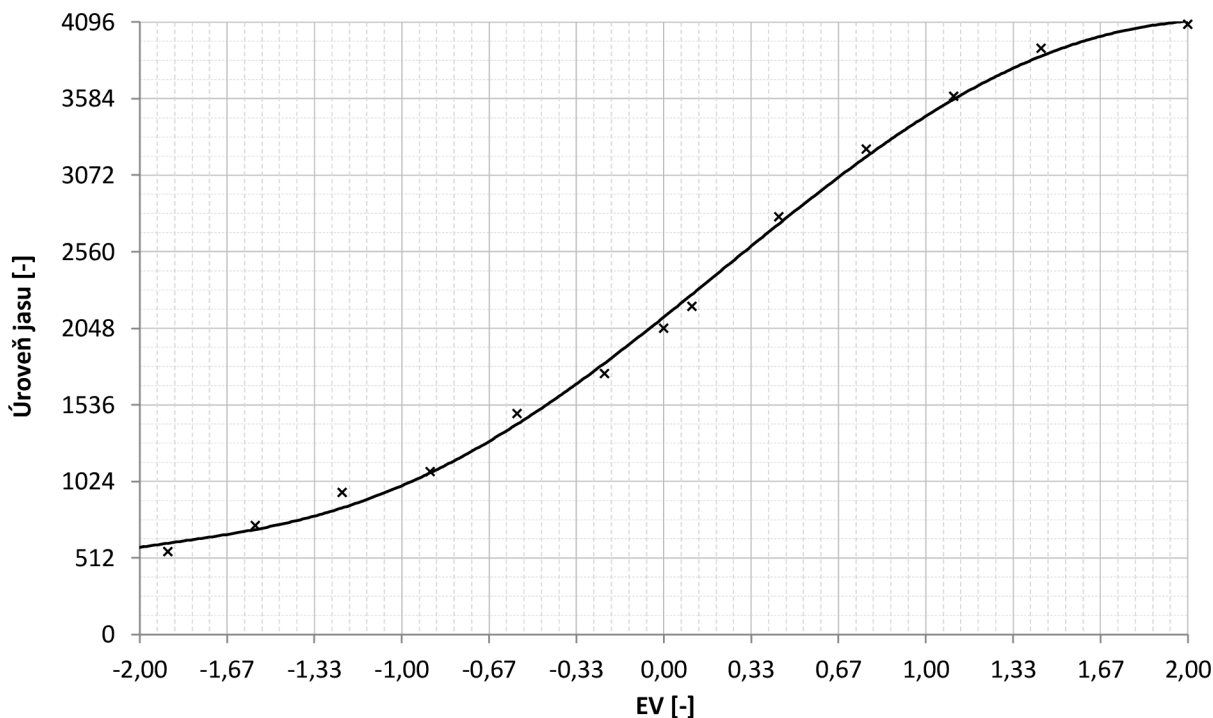
Pro vyhodnocení bylo nutné stanovit dvě pomocné veličiny, a to *střední hodnotu jasu* a *přepal*.

Střední hodnotu jasu určíme jako aritmetický průměr všech jasů jednotlivých pixelů, jejichž jas je větší než 512 a to z důvodu vyloučení tmavých míst záznamu, které by snižovali rozlišovací schopnost při porovnávání snímků.

Přepal vyjadřuje poměr počtu pixelů s jasnem vyšším než 4092 ku počtu pixelů uvažovaných při výpočtu střední hodnoty jasu.

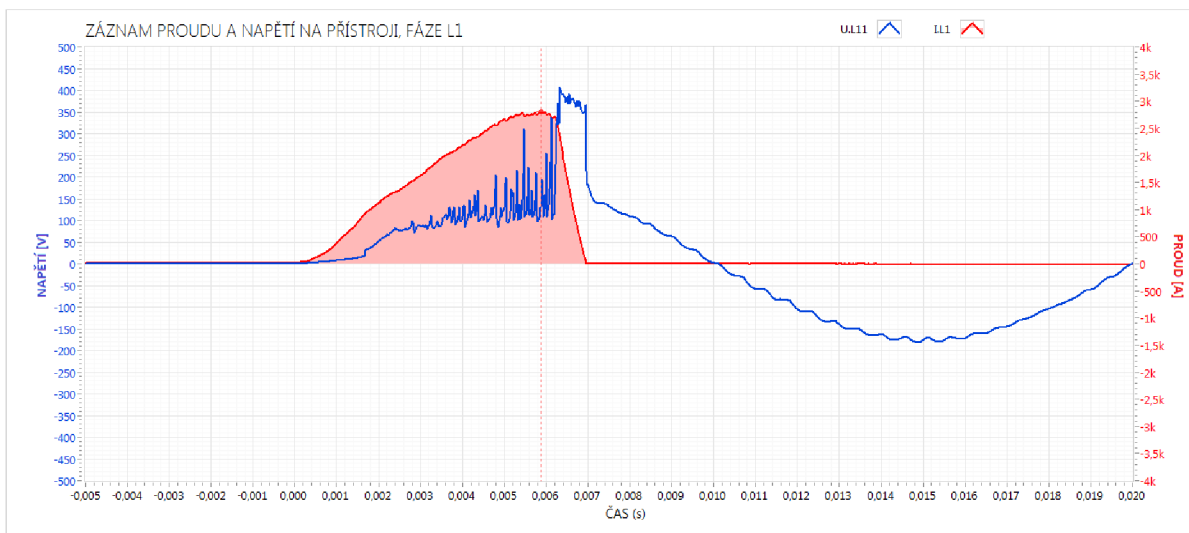
Před porovnáváním jednotlivých snímků je třeba si uvědomit, že posun jasů při změně expozice není lineární v celém rozsahu, ale že se od střední úrovně (2048) směrem ke krajním hodnotám snižuje. Pro demonstraci jsme tuto charakteristiku experimentálně změřili přímo námi používanou vysokorychlostní kamerou, přičemž jsme snímali konstantně osvětlenou bílou zeď a měnili hodnotu expozice s krokem 1/3 EV. Výsledek je možné vidět na Obr. 18. Podobný průběh je možné dostat například i z běžně používaných obrazových snímačů digitálních zrcadlovek.

Závislost změny úrovně jasu na změnu expozice při konstantním obrazu

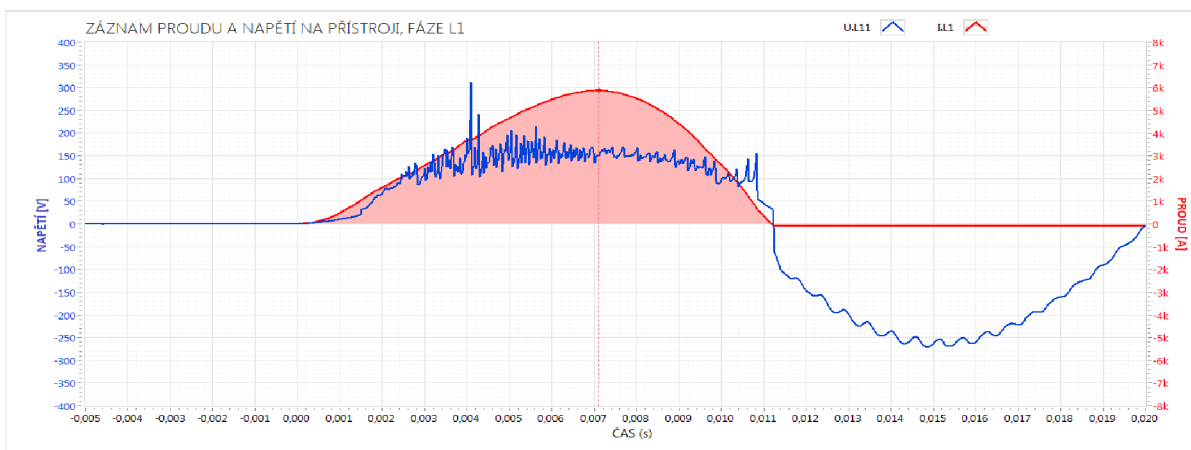


Obr. 18 Závislost změny úrovně jasu na změnu expozice při konstantním obrazu

Výsledný záznam spínacího pochodu ovlivňují tři základní faktory: hodnota clony objektivu, čas závěrky a velikost procházejícího proudu elektrickým obloukem. Vliv clony, respektive času závěrky, je zřejmý z Obr. 18. Skok o 1 EV odpovídá dvojnásobku, případně polovině času závěrky, nebo posunu clonového čísla o tři úrovně. Vliv procházejícího proudu je vidět na Obr. 21. Závislost byla změřena pro dvě různé velikosti zkratového proudu, a to 5 kA a 7,5 kA. Průběhy napětí a proudu obou měření jsou na Obr. 19 a Obr. 20. Z nich je patrné, že v obou případech hořel oblouk poměrně dlouhou dobu. U druhého případu vlivem nedokonalého utěsnění krytu ani nedosáhl deionizační komory a uhasl až po přirozené nule proudu.



Obr. 19 Průběh napětí a proudu při vypínání zkratového proudu 5 kA



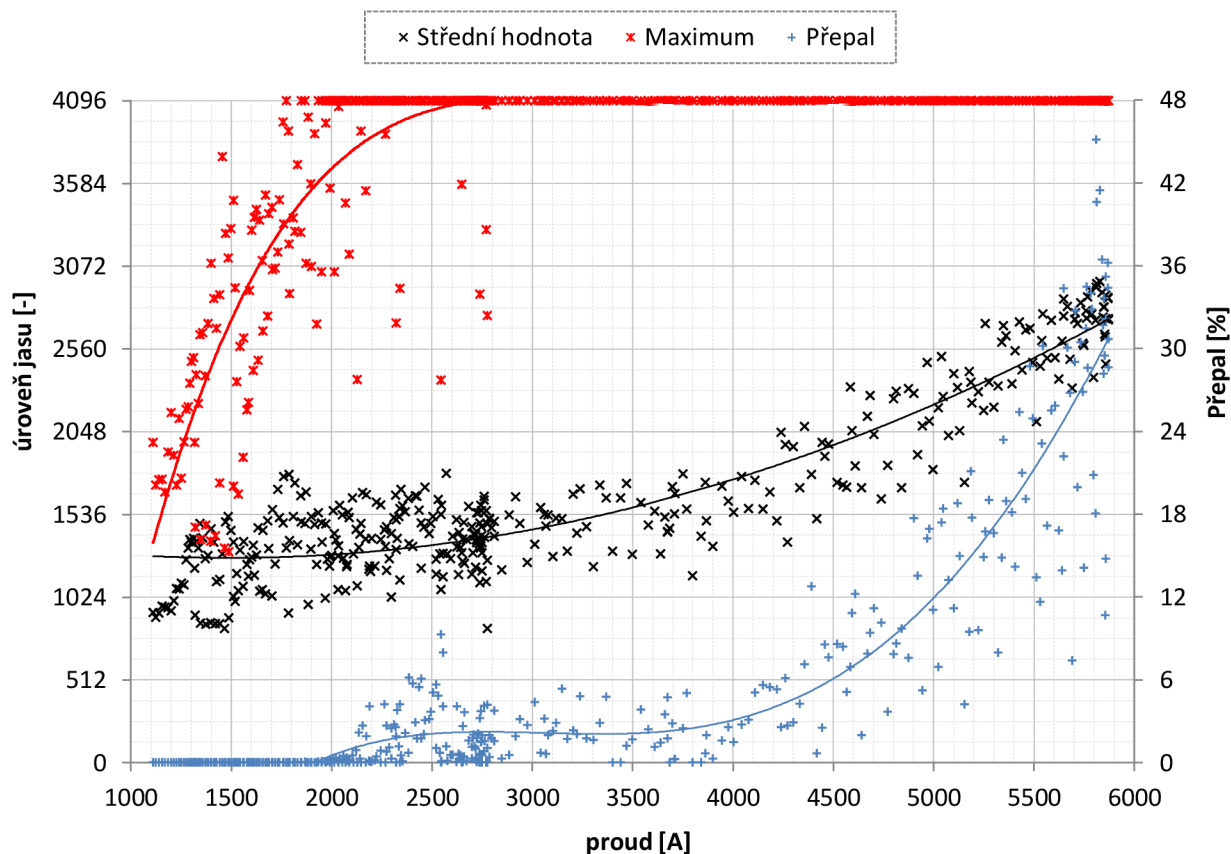
Obr. 20 Průběh napětí a proudu při vypínání zkratového proudu 7,5 kA

Z hlediska vyhodnocení jsme tak sice dostali k dispozici více bodů charakteristiky s menší strmostí proudu, ale vzhledem k tomu, že oblouk hořel převážně pod deionizační komorou, vodící plechy se v těchto místech ohřály na velmi vysokou teplotu a tím pádem paty oblouku vyzařovaly mnohem více světla než obvykle. To mohlo měřenou závislost mírně ovlivnit, stejně jako skutečnost, že se při vyšších teplotách začala pomalu odpařovat ND vrstva filtru v místě hoření oblouku.

Nastavení kamery bylo v průběhu tohoto měření neměnné:

Frekvence snímání	Clona	Čas závěrky	Spekt. filtr	ND filtr
40 000 fps	f/16	1/3410526 s	Ano	Ano

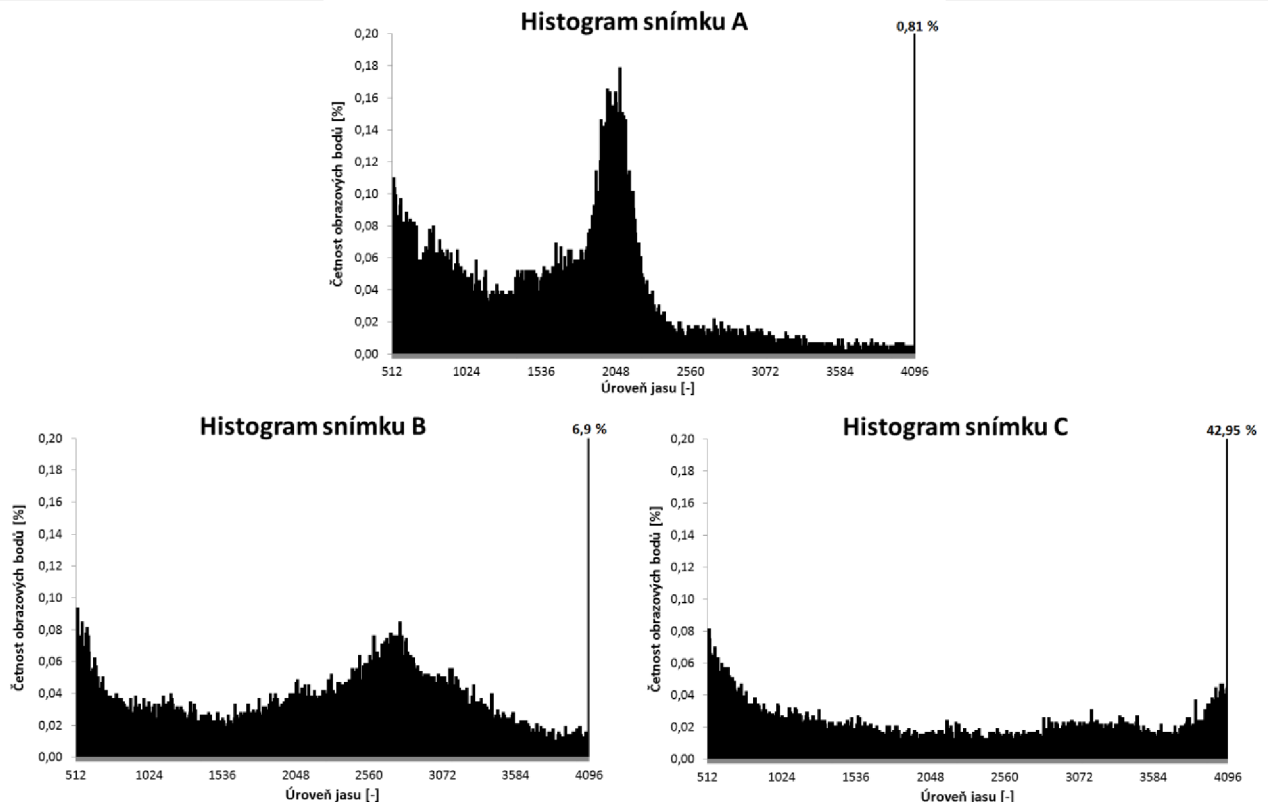
Závislost jasu záznamu na procházejícím proudu



Obr. 21 Vliv velikosti procházejícího proudu na jas záznamu při konstantním nastavení vysokorychlostní kamery

Nejsvětlejší místa bývají zpravidla na elektrodách, v jejichž blízkosti je větší teplota. Tomu odpovídá i procentuální rozložení přepalu v záznamu. Je patrné, že při hodnotě proudu nad 4 kA míra přepalu výrazně roste a bývá složitější rozlišit tělo a patu oblouku.

Při tomto měření jsme použili již nejmenší možný čas závěrky, kterého je kamera schopna dosáhnout. Pokud bychom chtěli v daném uspořádání snímat vyšší hodnoty proudu, bylo by potřeba množství vyzářeného světla v korespondenci s Obr. 18 ještě více omezit. Přitom je třeba brát v úvahu, že scéna není konstantně nasvícená, ale že je vysoce kontrastní a velká část pixelů má hodnotu jasu nad 4000. Procentuální rozložení jasů pro tři rozdílné snímky je možné vidět na Obr. 22. Výsledný expoziční posun je vhodné uvažovat od průměrné hodnoty jasu počítané z oblasti mezi maximální úrovní a hodnotou jasu, u které se vyskytuje více či méně patrný vrchol.



Obr. 22 Porovnání rozložení jasů snímků pořízených s rozdílnou hodnotou procházejícího proudu

Kde:

Snímek A – $I_o = 2762$ A; Střední hodnota jasu = 1638

Snímek B – $I_o = 4587$ A; Střední hodnota jasu = 2324

Snímek C – $I_o = 5782$ A; Střední hodnota jasu = 2933

Ideálně nastavenou expozici kamery nelze zajistit během celého průběhu vypínání zkratového proudu, neboť se během něj vlivem změny velikosti proudu mění množství světla vyzářeného obloukem.

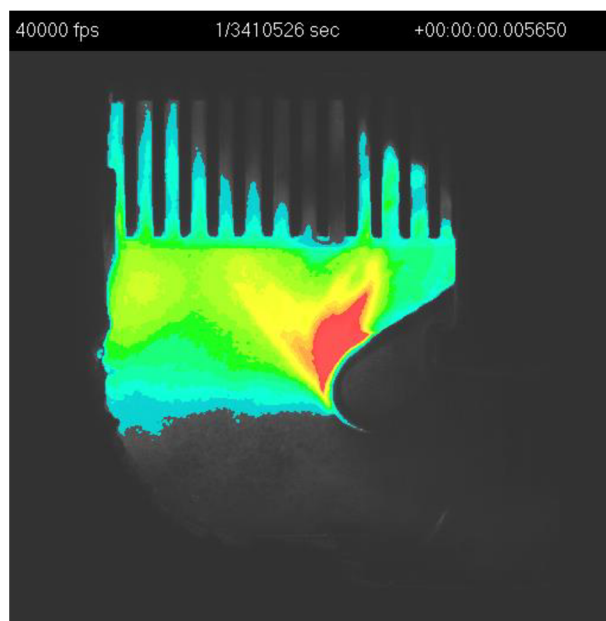
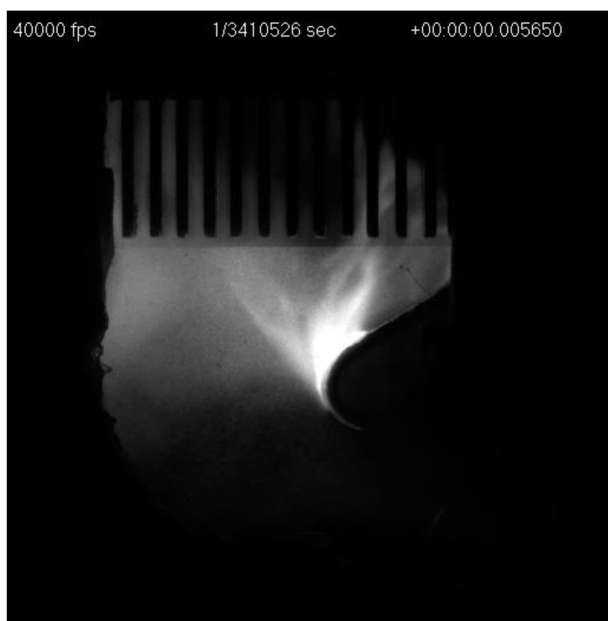
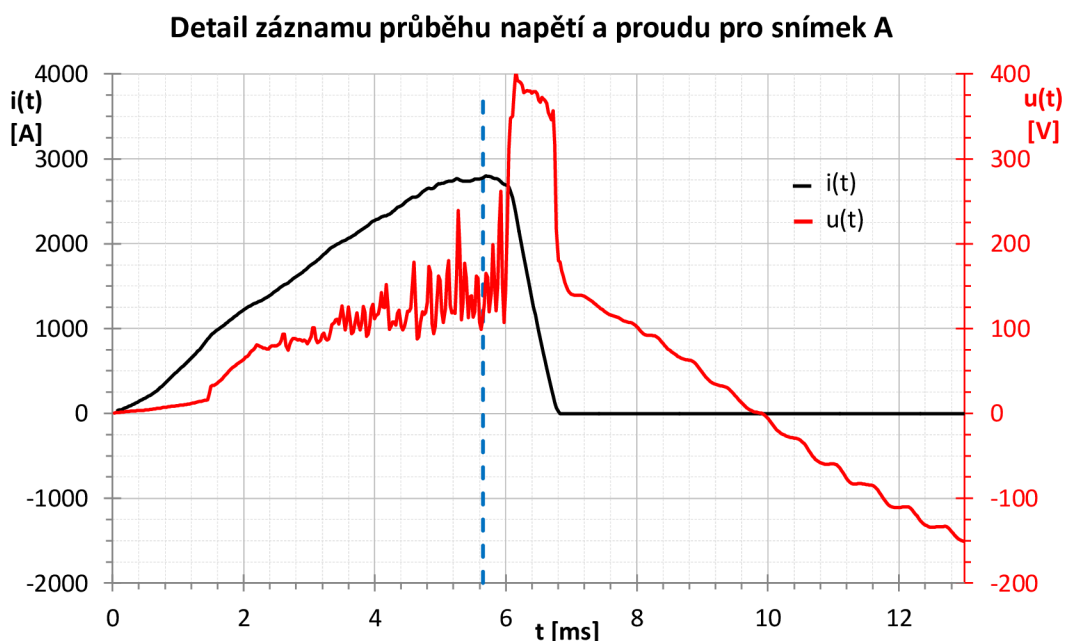
Pro určení závislosti expozice kamery na předpokládané velikosti zkratového proudu by bylo zapotřebí mnohem více změřených průběhů. Předpokladem pro tato měření by byla optická stálost krytu, na kterém se po uhasnutí oblouku usazují cizí vrstvy materiálů odpařených při hoření. Naše měření bylo provedeno s nejkratší dobou expozice, jakou jsme byly schopni v daném uspořádání dosáhnout. S tímto nastavením jsou dobře exponované záznamy s velikostí proudu do 2 kA, kdy je tělo oblouku dobře rozeznatelné.

Pro snímání menších zkratových proudů dochází ke ztrátě informací vlivem nevyužití všech úrovní jasů. Oblouk, kterým prochází větší proudy, vyzařuje již příliš velké množství světla a bez přidání prvku snižujícího hodnotu expozice bývá lokalizace těla oblouku složitější či úplně nemožná. Takovým prvkem by mohl být filtr větší denzity např. 3.0 s propustností pouhých 0,098 %. Pro menší ovlivnění záznamu by bylo příhodnější filtr nasadit na objektiv kamery a pro zakrytování jisticího přístroje použít kryt z čirého materiálu s minimálními povrchovými úpravami.

4.2.3 Použití ekviintenzit jasu záznamu oblouku

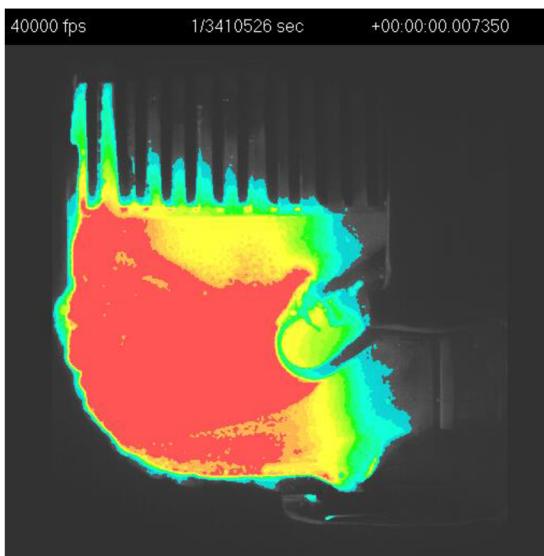
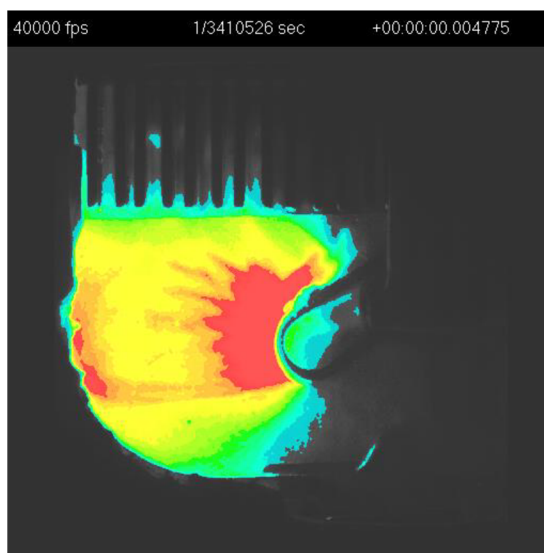
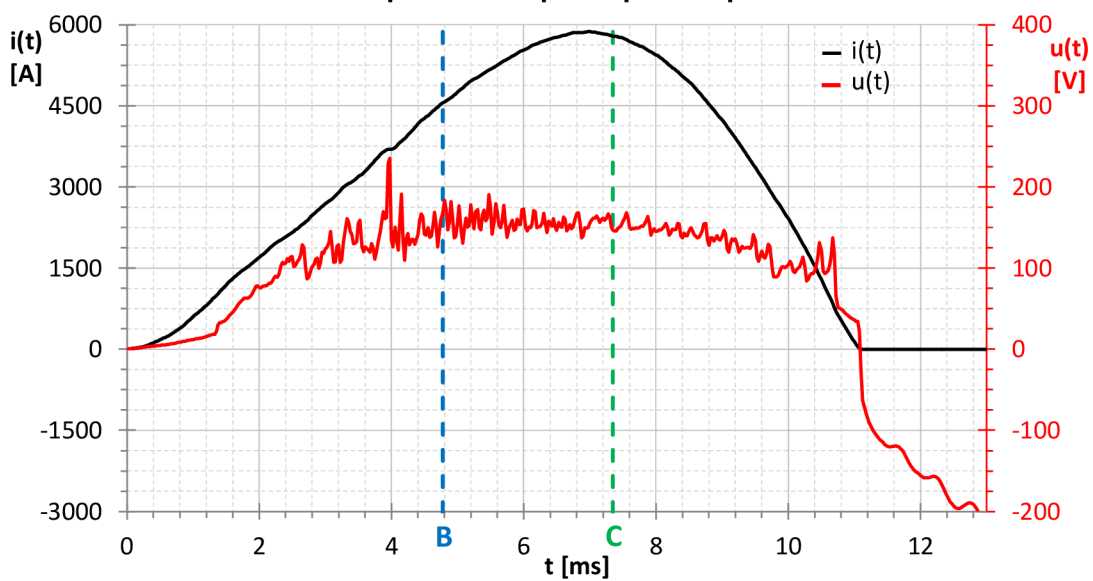
Snímky zaznamenané našim modelem vysokorychlostní kamery Photron SA-X2 jsou pouze černobílé, rozdělené do 4096 úrovní jasu. Je známo, že lidské oko vnímá více změnu barev než změnu odstínu šedé, natož když je odstínů 2^{12} . Použitím ekviintenzit sice přijdeme o informace obrazu, získáme však rychle přehled o tom, kde se pravděpodobně jádro oblouku nachází. Pro lepší názornost je výhodné jednotlivé ekviintenzity barevně odlišit.

Pro názornost zde můžeme uvést ekviintenzity snímků A, B a C zmíněných v předešlé kapitole, rozdělených do 16-ti úrovní jasu:

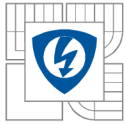


Obr. 23 Ekviintenzity el. oblouku pro snímek A

Detail záznamu průběhu napětí a proudu pro snímek B a C



Obr. 24 Ekviintenzity el. oblouku pro snímky B a C



Z výše uvedených obrázků je patrné, že při nižších hodnotách proudu lze mimo deionizační komoru celkem snadno odhadnout pozici jádra oblouku. V místě přechodu do komory skokově klesá úroveň jasu. Je to dáno jak odpařením menšího množství ND vrstvy z filtru v místě deionizační komory, tak i faktem, že se od destičky chránící boční prostor mezi kontakty a komorou odráží mnohem více světla, než od plastového krytu za deionizační komorou. Odebráním destičky bychom mohli tento pokles eliminovat a zároveň snížit množství světla dopadajícího na snímač. Otázkou je, zda by boční plastový kryt vydržel vysokou teplotu oblouku a případně výrazně neovlivnil průběh jeho hoření. Pro vyšší hodnoty proudu by bylo vhodné množství světla ještě více omezit.

S přesným určením polohy jádra oblouku zde narážíme na hlavní problém celého snímání vysokorychlostní kamerou, který je způsobený ztrátou třetího prostorového rozměru. Tím pádem se zde nedá mluvit o určení polohy jádra oblouku, ale pouze o odhadu jeho polohy, který by se mohl určit pomocí známých rozměrů vypínací komory. Dosažení deionizační komory je zatím výhodnější určit ze záznamu z osciloskopu, pro názornost doplněným záznamem z kamery viz video v příloze A.

Lepší využití ekviintenzit by mohlo být v přiřazení teploty k určité úrovni jasu. K tomu by byl zapotřebí zdroj tepla o známé teplotě sloužící ke kalibraci stupnice jasu při daném nastavení kamery. Senzorem kamery vlastně snímáme integrál dopadajícího světla, pro následné přiřazení teploty by bylo nutné použít např. Abelovu transformaci. Tato problematika přesahuje rámec této práce a může být předmětem dalšího zkoumání.

5 ZÁVĚR

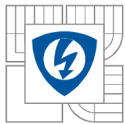
Vysokorychlostní kamera může mít široké využití při snímání spínacího procesu v elektrických přístrojích s magnetickým vypínáním, ať už se bavíme o kontaktním systému, nebo o přestupu oblouku od kontaktů do deionizační komory a díky mžikovému snímání tak pomáhá k lepšímu pochopení a analýze elektrického oblouku.

Z měření vyplývá, že pro správnou diagnostiku oblouku je důležité lokalizovat jeho jádro. Pokud ovšem budeme snímat elektrický oblouk pouze z jednoho místa, tak vlivem ztráty třetího prostorového rozměru nedosáhneme nikdy jeho přesného určení. Dostaneme pouze odhad jeho polohy s přesností odpovídající momentálnímu rozložení oblouku v prostoru, která se s přibližováním k roštu komory zvětšuje.

Vzhledem k velmi výraznému vyzařování světla je proto důležité vhodně nastavit expozici dané scény, která závisí především na velikosti procházejícího proudu. Díky malému počtu měření, které samotné bylo ovlivněno odpařením ND vrstvy filtru, jsme nebyli schopni stanovit určující závislost vyzářeného světla na velikosti procházejícího proudu. Uvedli jsme zde pouze možný postup, podle kterého lze s ohledem na procházející proud upravit hodnotu expozice. Na výsledek měření měl vliv i fakt, že jsme byli schopni dobře exponovat scénu jen do velikosti proudu 2 kA a tudíž jsme nemohli expozici měnit, veškerá měření jsme prováděli s nejkratší dobou závěrky, maximální clonou a spektrálním filtrem. Množství vyzářeného světla navíc roste s druhou mocninou proudu v oblouku.

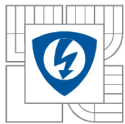
Pro další měření by bylo výhodné použít ND filtr větší denzity v provedení, které se šroubuje na objektiv kamery. K zakrytí by bylo vhodnější použít čirý materiál bez lehce odpařitelných povrchových vrstev k dosažení optické stálosti během hoření oblouku. Kryt je nutné po každém testu očistit od usazených látek, odpařených při vypínání. Pozornost by měla být věnována i kvalitnímu hermetickému uzavření otvoru v boční části přístroje. Pro jasovou stálost by bylo příhodné odstranit nebo jinak eliminovat vliv odrazu světla od postranní destičky umístěné mezi kontakty a deionizační komorou, neboť určení míry odrazu by bylo vzhledem k samotnému zahřívání destičky příliš složité.

Po odstranění všech výrazných chyb měření by následně bylo možné přesněji analyzovat chování elektrického oblouku při spínacím procesu, jako například určení jeho teplotního rozložení pomocí úrovní jasu záznamu.



LITERATURA

- [1] HAVELKA, Otto et al. *Elektrické přístroje*. 1. vyd. Praha: SNTL/ALFA, 1985, 440 s.
- [2] VÁVRA, Zdeněk. *Vysoké napětí a elektrické přístroje, Část II: Elektrické přístroje*. elektronický text. Brno: FEKT VUT, 2003, 83 s.
- [3] PHOTRON Ltd. *Fastcam SA-X2 technical datasheet*. 2013, Dostupný z: <http://www.proxis.cz/?i=1617/rada-sa>
- [4] KOZUMPLÍK, Jiří. *Multitaktní systémy*. elektronický text. Brno: FEKT VUT, 2005



PŘÍLOHY

- A CD obsahující záznamy z vysokorychlostní kamery a měřicího systému, zdrojové soubory programu Matlab, video s použitím ekviintenzit