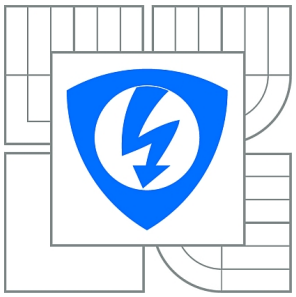
VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

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

OPTICKÁ DIAGNOSTIKA OBLOUKU

ARC OPTICAL DIAGNOSTICS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

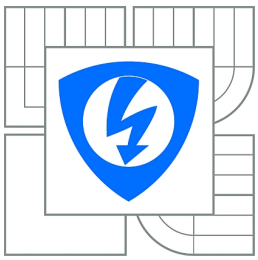
AUTOR PRÁCE — JIŘÍ ČERMÁK

AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — Ing. PETR DOHNAL, Ph.D.

SUPERVISOR

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:	Jiří Čermák	***ID:***	146802
Ročník:	3	***Akademický rok:***	2013/2014

NÁZEV TÉMATU:

Optická diagnostika oblouku

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Seznamte se a popište optickou diagnostickou metodu pro sledování oblouku uvnitř jističe NN
2. Navrhněte a vyzkoušejte metodu ekvidenzit
3. Sestavte demonstrační úlohu pro výklad této metody

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] Havelka, Otto a kol. : Elektrické přístroje učebnice pro elektrotechnické fakulty vysokých škol technických, SNTL 1985
[2] Měřička J., Zoubek Z. : Elektrické stroje, skriptum ČVUT 1990
[3] Patočka, Miroslav: Magnetické jevy a obvody ve výkonové elektronice, měřicí technice a silnoproudé elektrotechnice, VUTIUM 2011

Termín zadání:	27.9.2013	***Termín odevzdání:***	2.6.2014

Vedoucí práce: Ing. Petr Dohnal, 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

Cílem bakalářské práce je rozdělení jednotlivých druhů elektrických výbojů, vysvětlení ionizace v plazmatu elektrického oblouku a objasnění energetické bilance uvnitř plazmatu. Elektrický oblouk představuje nežádoucí, těžko předvídatelný jev vyskytující se ve spínacích přístrojích při spínání a rozpínání obvodu. Dále jsou uvedeny starší metody vyhodnocování snímků pořízených vysokorychlostní kamerou. Na základě těchto snímků jsou vytvářeny ekvidenzity a ekvidenzitogramy sloužící k monitorování pohybu oblouku ve zhášecí komoře.

Druhá část zahrnuje popis pokusu provedeného v laboratoři a popis vysokorychlostní kamery použité při pokusu. Dále je uvedena moderní metoda zpracování digitálního snímku pomocí výpočetního programu Matlab. Z pořízených snímků byl Matlabem vytvořen ekvidenzitogram znázorňující různé hladiny intenzity vyzařování.

Abstract

The aim of this bachelor thesis is to sort out the individual types of electric discharges, explain the ionization inside the plazma of the electric arc and the elucidation of the energetic balance inside the plazma. The electric arc is an undesirable and hardly predictable phenomenon occurring in switching devices during switching on and switching off the electric circuit. Some older methods of image processing obtained by a high-speed camera are also mentioned. Based on the images obtained from the camera, it is possible to make an equidensity or an equidensitogram that is used to monitor the arc in a quenching chamber. The second part includes the description of an experiment performed in a laboratory and the description of the high-speed camera used during this experiment. A modern method of the image processing using software Matlab is also described. An equidensitogram showing different levels of radioation was made in Matlab from the obtained images.

Klíčová slova

Napětí; elektrický proud, vypínač; elektrický výboj; elektrický oblouk; ekvidenzita; ekvidenzitometrie; diagnostika; kamera; snímek; pokus; Matlab; matice.

Keywords

Voltage; electric current; circuit breaker; electric discharge; electric arc; equidensity; equidensitometry; diagnostic; camera; image; experiment, Matlab; matrix.

Bibliografická citace

ČERMÁK, J. *Optická diagnostika oblouku* . Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 50 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Petr Dohnal, Ph.D..

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Optická diagnostika 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 panu Ing. Petru Dohnalovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce. Rovněž děkuji panu prof. RNDr. Vladimíru Aubrechtovi, CSc. a paní doc. RNDr. Miladě Bartlové Ph.D. za zapůjčenou odbornou literaturu a za přínosné rady. Dále děkuji panu Ondřeji Kabelkovi za neskonalou trpělivost při udělování rad do programovací části.

V Brně dne:…… Podpis autora:…….

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ **8**

SEZNAM TABULEK **9**

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK **10**

ÚVOD **11**

1 ELEKTRICKÉ VÝBOJE **11**

1.1 DĚLENÍ ELEKTRICKÝCH VÝBOJŮ **11**

1.2 PLAZMA **12**

1.2.1 VLASTNOSTI PLAZMATU 13

1.3 OBLASTI ELEKTROD **13**

1.3.1 KATODOVÁ OBLAST 14

1.3.2 ANODOVÁ OBLAST 14

1.4 ENERGETICKÁ BILANCE PLAZMATU **15**

2 ELEKTRICKÝ OBLOUK **17**

2.1 VLASTNOSTI OBLOUKU **17**

2.1.1 VZHLED OBLOUKU 17

2.1.2 CHARAKTERISTIKY OBLOUKU 18

2.2 TEORETICKÝ ROZBOR OBLOUKU **20**

2.3 SPÍNACÍ OBLOUK **22**

3 OPTICKÁ DIAGNOSTIKA OBLOUKU **23**

3.1 EKVIDENZITOMETRIE **23**

3.2 EKVIDENZITA **24**

3.3 FOTOGRAFICKÉ MATERIÁLY A JEJICH VLASTNOSTI **26**

3.4 VYBRANÉ METODY ANALÝZY **27**

3.4.1 FOTOGRAFICKO-CHEMICKÁ METODA 27

3.4.2 FOTOGRAFICKO-FOTOMETRICKÁ METODA 29

3.4.3 FOTOGRAFICKO-MECHANICKÁ METODA 29

4 PRAKTICKÁ ČÁST **30**

4.1 MODERNÍ METODA VYTVÁŘENÍ EKVIDENZIT **30**

4.2 KAMERA A JEJÍ POUŽITÍ **31**

4.3 PROGRAMOVACÍ ČÁST **33**

4.3.1 MATLAB 33

4.3.2 FUNKCE POUŽITÉ V MATLABU 33

4.4 DEMONSTRAČNÍ ÚLOHA **37**

5 ZÁVĚR **39**

LITERATURA **40**

CITACE **41**

PŘÍLOHA A **42**

PŘÍLOHA B **43**

PŘÍLOHA C **45**

PŘÍLOHA D **46**

PŘÍLOHA E **47**

PŘÍLOHA F **48**

PŘÍLOHA G **49**

PŘÍLOHA H **50**

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Graf skupenství látky 12
Obrázek 2: Tvar stejnosměrného oblouku 18
Obrázek 3: Statická charakteristika oblouku 19
Obrázek 4: Dynamická charakteristika oblouku 20
Obrázek 5: Příklad ekvidenzitogramu oblouku 24
Obrázek 6: Geometrická změna oblouku v čase 25
Obrázek 7: Vytvořená ekvidenzita s hustotou D = 80 30
Obrázek 8: Bitmapa z pořízeného videa 31
Obrázek 9: Příklad vyhotoveného ekvidenzitogramu 31
Obrázek 10: Kamera použitá při pokusu 32
Obrázek 11: Jistič snímaný kamerou 32
Obrázek 12: Reprezentativní bitmapa použitá při zpracování 33
Obrázek 13: Zobrazení ekvidenzit po zadání funkce MojeMilaFunkce 34
Obrázek 14: Výsledný ekvidenzitogram ohraničující plazma 36
Obrázek 15: Průběh napětí a proudu během pokusu 37

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Tabulka s parametry požadovaného laboratorního pokusu 38

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Značka	Název	Jednotka
W	výstupní práce	eV
h	Planckova konstanta	eV*s
c	rychlost světla	m/s
λ	vlnová délka	m
f	frekvence záření	Hz
E	intenzita elektrického pole	V/m
σ	merná elektrická vodivost	S/m
T	termodynamická teplota	K
-div (λ) * grad (T)	energie odvedená	-
Z (T)	ztráta energie zářením	-
r	poloměr oblouku	m
r_a	oblast mimo plazma oblouku	m
R	poloměr oblouku na povrchu plazmatu	m
J	hustota elektrického proudu	A/m^2
J_e	hustota elektronového proudu	A/m^2
J_i	hustota iontového proudu	A/m^2
D_e; D_i	koeficienty difuze elektronů a iontů	-
e	elementární náboj	C
n_e	počet elektronů	-
n_i	počet iontů	-
U_{ob}	obloukové napětí	V
l	délka oblouku	m
I	proud tekoucí oboukem	A
α	konstanta reprezentující materiál elektrod	V
β	konstanta reprezentující prostředí mezi elektrodami	V/m
γ	konstanta reprezentující tvar elektrod	VA
δ	konstanta reprezentující tlak v oblouku	VA/m
T_m	maximální teplota	K
D	optická hustota	-
τ	transmitance	-
G	strmost filmu	-

ÚVOD

V této bakalářské práci jsou popsány vybrané metody diagnostiky elektrického oblouku. Dále je uvedena modernější metoda digitálního zpracování diagnostikovaného oblouku. Elektrický oblouk je nežádoucí v technice spínacích přístrojů, dosahuje velmi vysokých teplot. Je tedy potřeba dokázat předpovídat tvar a pohyb oblouku uvnitř spínacích zařízení. Při optické diagnostice je pohybující se oblouk snímán vysokorychlostní kamerou. Video získané z této kamery může být zpracováno například metodou fotograficko-chemickou nebo fotograficko-fotometrickou.

Při práci s videem jde o získání ekvidenzity, která spojuje na snímku body se stejnou intenzitou vyzařování. Dochází tím ke zjednodušení informace obdržené ze snímku vytvořením spojitých čar. Pomocí ekvidenzity se dá například určit hranice elektrického oblouku a okolního prostředí, nejčastěji vzduchu, vakua nebo fluoridu sírového SF_6 používaného ve výkonových vypínačích.

V další části práce je popsáno opakovatelné laboratorní měření, při kterém byla zhášecí komora nízkonapěťového jističe snímána vysokorychlostní kamerou. Tento pokus je dostatečně specifikovaný, aby byl opakovatelný a měl by sloužit k demonstrativnímu předvedení fungující laboratorní úlohy během výuky. Pořízené video je tvořeno bitmapami, což je formát obrázku tvořený rastrem. Všechny body rastru mají svou danou číselnou hodnotu a tvoří matici čísel, jejíž počet sloupců a řádků odpovídá rozlišení videa. Číselná hodnota každého bodu v rastru reprezentuje intenzitu vyzařování sledovaného oblouku.

Bitmapa získaná z videa je pomocí programu MATLAB, který pracuje s maticemi, naprogramovanou funkcí přeměněna na novou matici, která obsahuje pouze požadované hladiny intenzity osvětlení. Vzniká tak matice, která obsahuje plošné obrazce z čísel. Na rozhraní těchto čísel se dá vytvořit ekvidenzita zobrazující tvar elektrického oblouku a zvýrazňující místa s měnící se intenzitou vyzařování viditelného světla z oblouku. Díky tomuto ekvidenzitogramu lze předvídat pohyb oblouku ve zhášecí komoře jističe.

1 ELEKTRICKÉ VÝBOJE

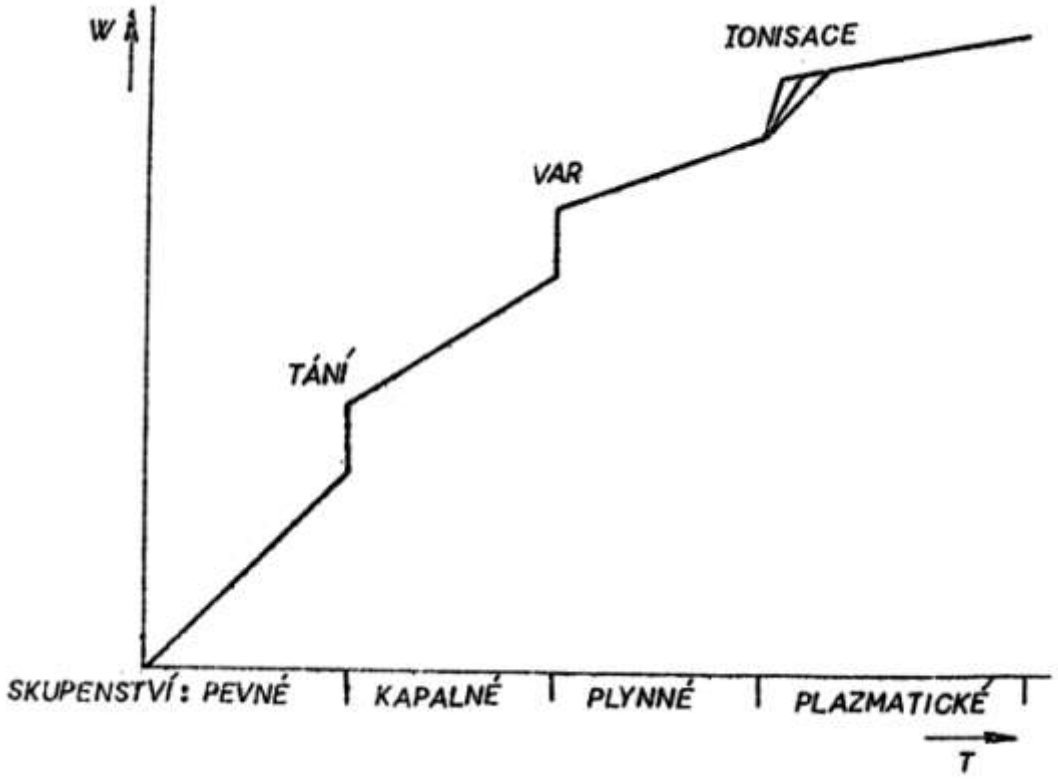
1.1 Dělení elektrických výbojů

Elektrické výboje se rozdělují do několika skupin podle různých kritérií. Mezi základní dělení patří rozdělení na přechodné a ustálené výboje. Ustálené pak dělíme na samostatné a nesamostatné podle toho, jestli potřebují ke své existenci zdroj nosičů náboje. Nesamostatné výboje potřebují ke své existenci zdroj nosičů náboje anebo zdroj energie, která dokáže ionizovat atomy tvořící výboj. Samostatné elektrické výboje nepotřebují takovýto zdroj. Do této skupiny samostatných výbojů patří temný výboj, korónový výboj, doutnavý výboj, jiskrový výboj a obloukový výboj.

Mezi základní parametry výbojů patří napětí na elektrodách, tvar a poloha elektrod, proud tekoucí výbojem, chemické složení plazmatu, způsob chlazení plazmatu, tlak ve výbojové dráze. Závislost napětí mezi elektrodami na proudu protékajícím plazmatem se nazývá voltampérová charakteristika výboje.

1.2 Plazma

Klasická fyzika zná tři možná skupenství látky. Je to skupenství pevné, kapalné a plynné. Při práci s elektrickými výboji zavádíme pojem plazma. Je to vysoce ionizovaný plyn schopný vést elektrický proud (viz obr. 1). V plazmatu se vyskytují volné elektrony uvolněné z obalu atomů a kladně nebo záporně nabité ionty. K ionizaci plynu dochází vlivem srážek pohybujících se částic s určitou kinetickou energií.



Obrázek 1: Graf skupenství látky

Existují pružné srážky částic, které se vyznačují změnou kinetické energie částic. Částice po srážce však mají stejnou vnitřní strukturu jako před srážkou, mění se tedy pouze jejich směr a rychlost. K pružné srážce může dojít pouze mezi částicemi, mezi kterými nepůsobí přitažlivé síly, což znamená, že nesmí mít rozdílné náboje. Jedna z částic může mít nulový náboj.

Naproti tomu nepružné srážky vznikají, pokud má pohybující se částice dostatečně velkou kinetickou energii na to, aby po srážce došlo ke změně vnitřní struktury částic. To jsou srážky nepružné. Nepružné srážky způsobují, že se kinetická energie částic přemění na jinou formu energie. Nejčastěji to je změna potenciální energie vazebních elektronů atomového obalu, což se projevuje buď nabuzením, nebo ionizací atomu. K ionizaci dochází, pokud je kinetická energie pohybující se částice dostatečně velká. K nabuzení vodíkového atomu dostačuje energie 1 eV - 13 eV. K ionizaci jedné částice dochází, pokud je energie druhé částice větší než 13,53 eV. Takové srážky nazýváme srážky prvního řádu. Srážky druhého řádu vznikají srážkou částic vzniklých při srážkách prvního řádu s elektrony, atomy a fotony. Srážky druhého řádu jsou charakteristické tím, že se potenciální energie částic před srážkou mění na energii kinetickou. Tyto srážky mají za následek navýšení teploty plazmatu.

V plazmatu existuje ještě další typ srážek, kterým je rekombinace. Je to opačný děj, než je ionizace. Kladný iont se spojí s elektronem a dojde k vytvoření neutrální částice. Při tomto spojení dochází k uvolnění energie odpovídající energii potřebné k ionizaci. Druh uvolněné energie závisí na místě, ve kterém k rekombinaci došlo. Může to být buď na stěně ohraničující plazma výboje, na elektrodě, anebo v prostoru uvnitř plazmatu. Při rekombinaci na stěně anebo na elektrodách se uvolněná energie přeměňuje na energii tepelnou. Uvnitř plazmatu se na rekombinaci může podílet ještě třetí částice, je to tzv. potrojná srážka. Rekombinační energii si převezme tato třetí částice. Pokud je třetí částicí elektron, získá kinetickou energii, pokud je to atom, zvýší se jeho potenciální energie a atom je v nabuzeném stavu.

Jestliže není v bezprostřední blízkosti rekombinace elektronu s iontem žádná třetí částice, přeměňuje se uvolněná energie v záření.

1.2.1 Vlastnosti plazmatu

Plazma je plyn s velmi vysokou teplotou, ve kterém dochází díky elementárním procesům k budícím a ionizačním jevům. Nabuzené atomy způsobují intenzivní vyzařování viditelného světelného záření z oblasti plazmatu. Vysoká teplota plazmatu nemusí být stejná v celém objemu plazmatu. K udržení existence plazmatu stačí, když například elektrony - pouze jedna složka plazmatu mají dostatečně velkou teplotu, a tedy kinetickou energii, aby ionizovaly okolní částice. Tuto energii elektrony získají díky přítomnosti elektrického pole.

Existuje rozdíl mezi plynem zahřátým v peci na vysokou teplotu a mezi plazmatem elektrického výboje. Hlavní rozdíl je ve způsobu příjmu a výdeje energie. Plyn zahřátý na vysokou teplotu v peci obsahuje částice, které mají všechny stejnou teplotu, to znamená, že elektrony, ionty a neutrální částice přijaly stejné množství energie. Naproti tomu energie v plazmatu výboje je tvořena elektrony reagujícími na přiložené elektrické pole. Ty se urychlují proti směru působení elektrického pole a následnými srážkami s neutrálními částice předávají svoji vlastní energii těmto neutrálním částicím.

Energie nahromaděná v plazmatu díky interakci elektronů s neutrálními částicemi se uvolňuje do okolí vyzařováním, vedením tepla a rekombinací nosičů náboje na okraji plazmatu díky neustále probíhající difuzi. Při přerušení dodávky elektrického proudu do oblasti výboje tento výboj zanikne.

1.3 Oblasti elektrod

Elektrody plní funkci zprostředkování elektricky vodivého spojení mezi vnějším obvodem a plazmatem. Zprostředkovávají navíc přechod mezi pevným a plazmatickým skupenstvím, což je charakteristické velkým rozdílem teplot. Do elektrody přichází elektronový proud obvodem přes vodivou cestu vodiče. Proud elektronů se na katodě spotřebovává na neutralizaci kladných iontů přicházejících z plazmatu, anebo přechází plazmatem přes anodu dál do vodivého obvodu. U samostatných výbojů dochází k vytvoření vrstvy se silně klesající teplotou plazmatu a tím i silně klesající elektrickou vodivostí. V oblasti plazmatu s klesající teplotou je část výboje, kde se kinetická energie elektronů velmi rychle zmenšuje na poměrně malé hodnoty uvnitř pevného vodiče. Plazma elektrického oblouku je izotermické, takže všechny jeho složky mají stejnou teplotu. V oblasti elektrod tak vznikají velké teplotní gradienty.

Samostatné výboje se vyznačují tím, že nepotřebují vnější zdroj ionizace. Musíme tedy dodáním energie umožnit vznik elementárních procesů vedoucích ke vzniku elektronu a iontu

z atomu plynu anebo k uvolnění elektronu z elektrody. Elektrony se dají z elektrod uvolňovat díky termické emisi. Uvažovaný elektron uvolňující se z elektrody do vakua musí mít kinetickou energii dostatečně velkou k překonání potenciálního rozdílu mezi kovem a vakuem. Energie k tomu potřebná se nazývá výstupní práce a její jednotkou je eV (elektronvolt). Dalším způsobem uvolňování elektronů z elektrod je dodání energie zářením. Kvantová teorie říká, že energie zářením musí být předávána pouze v určitém množství představujícím násobky kvant energie. Velikost kvanta je dána vztahem

$$W = h * f = \frac{h * c}{\lambda}, \qquad \text{Rov. 1}$$

kde h je Planckova konstanta, f frekvence záření, c rychlost světla, a λ je vlnová délka dosazovaná v metrech. Pro uvolnění elektronu z kovu musí být kvantová energie záření větší než výstupní práce pro uvolnění elektronu.

1.3.1 Katodová oblast

Z katody mohou být elektrony uvolňovány třemi způsoby:

1. Katoda se zahřívá cizím zdrojem nebo proudem elektronů na teplotu dostačující k tepelné emisi elektronů.

2. Před katodou vzniká díky působení kladných iontů elektrické pole dostatečné k emisi elektronů právě tímto elektrickým polem.

3. Před katodou vznikají dvojice iontů a elektronů. Počet těchto dvojic je stejný jako počet elektronů potřebných k zajištění spojitosti elektronového proudu ve sloupci. Přenos proudu mezi plazmatem a katodou je uskutečňován pouze ionty. Ty jsou po styku s katodou neutralizovány elektronem a vracejí se zpět do prostoru oblouku.

Do katody přechází plazma samostatných výbojů nápadnou katodovou skvrnou. Proudová hustota v tomto místě dosahuje velkých hodnot i přesto, že je v blízkosti katody oblast se silně klesající vodivostí. Přenos proudu mezi sloupcem plazmatu a katodou je realizován pouze ionty zachycujícími elektrony. Ionty jsou tím pádem neutralizovány a vracejí se zpět do prostoru plazmatu a vniká kruhový oběh iontů. Vracející se neutrální atomy se s poměrně velkou energií vracejí do prostoru katody. Během tohoto pohybu dodávají tepelnou energii plynu před katodou. Ohřátí plynu je dostačující k dodávání iontů a k uzavření kruhového oběhu iontů.

„Dodáváním tepla se zvyšuje teplota plynu v oblasti katodového úbytku. Poněvadž plazma je chlazeno vzduchem, musí se jeho průřez stáhnout, aby nastalo požadované zvýšení teploty. Zúžení průřezu oblouku a malá velikost katodové skvrny jsou podmíněny nízkou teplotou katody. Při zvýšení teploty katody vyhřátím cizím zdrojem se zvětší velikost katodové skvrny. Ze stejných důvodů je teplota anodové oblasti oblouku menší než teplota katodové oblasti.

Popisovaný pochod vzniku katodové skvrny nevylučuje, že katodová skvrna dosáhne na materiálech s vysokým bodem tání zvolna teplotu potřebnou k tepelné emisi elektronů a tak odlehčí proud iontů.“ [1]

1.3.2 Anodová oblast

Rozdíl přechodu proudu z vnitřku vnějšího obvodu do hmoty plazmatu je patrnější víc u anody než u katody. Elektronový proud v elektrickém poli výboje je stejný jako ve vnějším

obvodu a to i přestože se v anodovém úbytku mění gradient. Stejný je proud pomalých záporných iontů tekoucí z katodového úbytku. Kvůli přesunu iontů ke katodě je u anody těchto nedostatek a vzniká tak anodový úbytek, který tvoří přechod z plazmatu na anodu. Velikost anodového úbytku závisí na vlastnostech plazmatu a anody. Anoda neemituje žádné ionty, a proto je hlavním úkolem úbytku na anodě vytvářet z neutrálních atomů ionty, které pak putují obloukem směrem ke katodě a uzavírají tak kruhový oběh iontů. Ionty vytvořené na anodě musí mít takové rozdělení rychlostí, aby teplota plazmatu odpovídala teplotě iontů.

Aby se vytvořily ionty, musí být nárazová ionizace v prostoru anodového úbytku vydatnější než v plazmatu. Elektrony tedy musí mít větší energii, tu získají díky elektrickému poli. Energie se elektronům předává ionizací elektrickým polem nebo tepelnou ionizací.

Při prvním způsobu ionizace elektron prolétne skrz anodový úbytek, jenž se vyskytuje na délce volné dráhy elektronu, bez jediné srážky na přímkové dráze. Anodový úbytek musí být větší než ionizační napětí. Ve druhém případě tepelné ionizace jsou anodové úbytky menší než při ionizaci elektrickým polem. Anodový úbytek se vytváří na délce několika volných drah elektronu a elektrony v tomto prostoru vykonají několik srážek. Při těchto srážkách se mění energie srážejících se částic v neuspořádaný pohyb a teplota elektronů výrazně roste nad teplotu plynu. Průměrná tepelná energie elektronů je menší než ionizační energie.

O uplatnění prvního nebo druhého způsobu ionizace rozhoduje rozdělení prostorových nábojů a z něho plynoucí délka volných drah elektronů a iontů. Tepelná ionizace probíhá ve výbojích s vysokými teplotami a ionizace elektrickým polem nastává ve výbojích s nízkými teplotami. U vysoko teplotních výbojů je volná dráha iontů větší než volná dráha elektronů. Rozdíl mezi drahami obou typů částice roste s teplotou a následkem toho se zvětšuje počet ionizačních srážek elektronů, čímž se zvyšuje pravděpodobnost ionizace. V termické rovnováze plazmatu je teplota plynu stejná jako teplota elektronů, tím se snižuje počet elektronů schopných ionizovat a následkem toho i anodový úbytek. Při vysokých teplotách se vlastnosti plazmatu v okolí úbytku anody téměř shodují s plazmatem ve sloupci výboje, velikost anodového úbytku je skoro nulová.

1.4 Energetická bilance plazmatu

„Plazma elektrických výbojů přenáší poměrně velké množství energie. Poměry při tomto přenášení popisuje energetická bilance plazmatu. Při teoretickém projednávání energetické bilance plazmatu budeme uvažovat pouze element objemu plazmatu a zanedbáme konvekci tepla. Elektrická energie $\sigma * E^2$ přivedená do uvažovaného elementu je rovna energii odvedené $-div(\lambda) * grad(T)$ a ztrátě energie zářením Z (T). Ve stacionárním stavu platí

$$\sigma * E^2 = Z(T) - div(\lambda) * grad(T). \qquad \text{Rov. 2}$$

Tato rovnice se nazývá Elenbaas-Hellerovou rovnicí a je v obecném tvaru neřešitelná. Je-li plazma osově souměrné, platí

$$\sigma * E^2 = Z(T) - \frac{1}{r}\left(\frac{d}{dr}\right) - div(\lambda) * grad(T)\left(\lambda\frac{dT}{dr}\right). \qquad \text{Rov. 3}$$

Okrajové podmínky jsou: pro $r = 0$ je $\frac{dT}{dr} = 0$ a pro $r = R$ je $T = T_R$. Poněvadž platí $div\vec{J} = 0$, musí být E ve směru osy souměrnosti konstantní. Ve válcově souměrném plazmatu musí být pro udržení stacionárních poměrů plyn ohraničen válcem s teplotou T_1. Plyne to z rovnice

$$2 * \pi * E\text{^}2 \int \sigma * r dr = -2 * \pi * r * \lambda * \frac{dT}{dr}, \qquad \text{Rov. 4}$$

kterou dostaneme integrací předposlední rovnice a násobením obou stran rovnice $2 * \pi$. Na levé straně poslední rovnice je elektrický příkon přiváděný do kruhového válce o poloměru r a jednotkové výšce. Na pravé straně je množství tepla prostupující za jednotku času pláštěm válce. Zvolíme-li poloměr $r = R$ tak velký, že v oblastech, kde je $r > R$ neteče žádný proud, znázorňuje levá strana celkový příkon přivedený do vrstvy s výškou rovnou jednotce délky, který pro větší poloměry zůstává stále stejný.

Další integrací od R do $r_a > R$ dostaneme

$$P = \frac{2 * \pi * \lambda * (T_R - T_a)}{ln\frac{r_a}{R}}. \qquad \text{Rov. 5}$$

Plyne odtud, že při stálém R a rostoucím r_a roste trvale rozdíl teplot a tím i T_R. V prostoru rozšiřujícím se do nekonečna by teplota stoupala na libovolnou velikost a výsledek by nebyl ustálený stav. Důsledkem toho je, že prostor vyplněný plazmatem musí být ohraničen a že okrajová teplota je poměrně nízká. V nestacionárním stavu platí rovnice

$$\sigma * E^2 = Z(T) - div(\lambda) * grad(T) + c * \frac{\partial T}{\partial t}, \qquad \text{Rov. 6}$$

kde člen $c * \frac{\partial T}{\partial t}$ představuje energii potřebnou k ohřátí jednotkového objemu plynu s měrným teplem c o teplotu dT za vteřinu. Tato rovnice umožňuje výpočet parametrů plazmatu na základě energetické bilance. Při výpočtu používáme další rovnice:

$$div(\vec{J_e} + \vec{J_i}) = div\vec{J} = 0. \qquad \text{Rov. 7}$$

Hustota iontového a elektronového proudu je dána rovnicemi

$$\vec{J_e} = e * b_e * n_e * \vec{E} - e * D_e * grad(n_e) \qquad \text{Rov. 8}$$

a

$$\vec{J_i} = e * b_i * n_i * \vec{E} - e * D_j * grad(n_i), \qquad \text{Rov. 9}$$

kde D_e a D_i jsou koeficienty difuze elektronů a iontů. Difuze nosičů náboje uvnitř plazmatu nemá význam, při uvažování vnitřních vrstev plazmatu zanedbáváme druhé členy na pravé straně obou posledních rovnic.

Systém posledních pěti rovnic spolu se Sahovou rovnicí a rovnicí

$$E = -grad(V) \qquad \text{Rov. 10}$$

popisující závislost intenzity elektrického pole v plazmatu na potenciálu v plazmatu, tvoří systém šesti rovnic pro šest neznámých E, U, J_e, J_i, T, p řešitelných pouze ve zvláštních případech.“ [1]

2 ELEKTRICKÝ OBLOUK

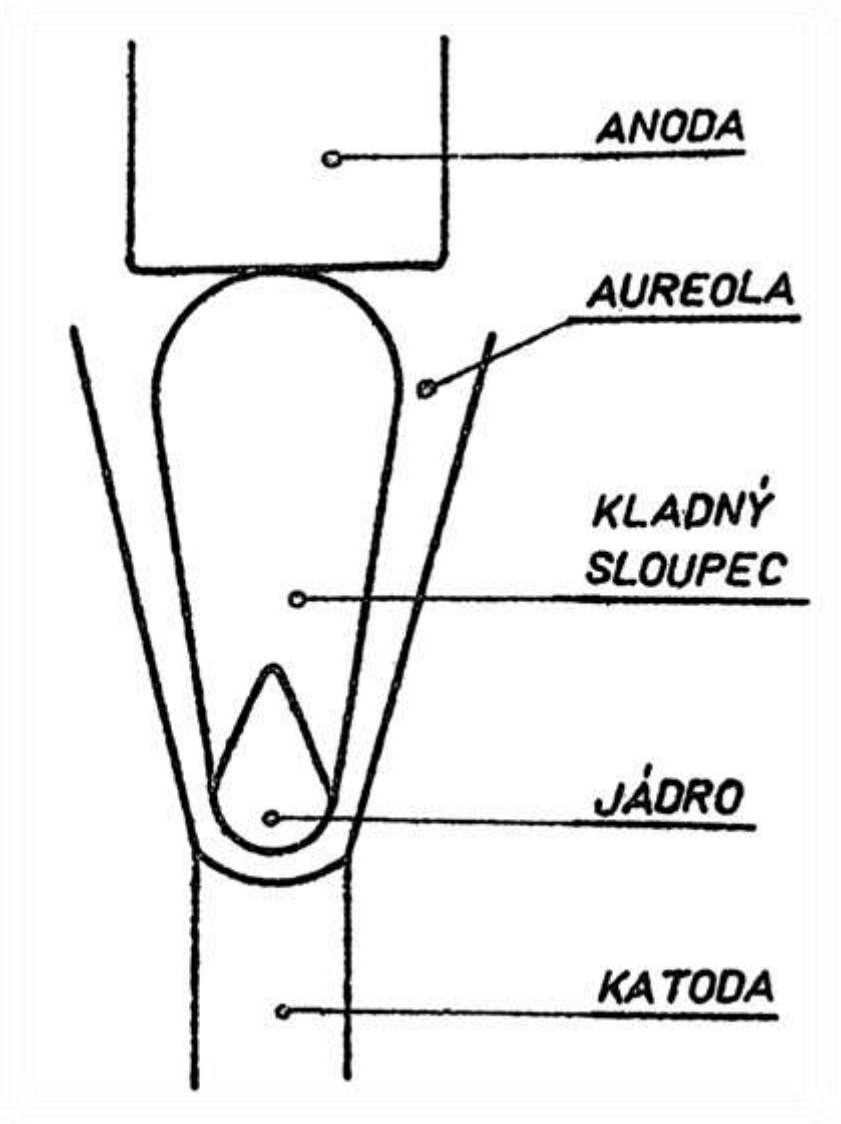
2.1 Vlastnosti oblouku

Elektrický oblouk je samostatný elektrický výboj, který probíhá mezi dvěma elektrodami, mezi nimiž je vzduchová mezera. Je charakteristický oproti jiným druhům výbojů vysokým proudem protékajícím plazmatem, vysokou teplotou plazmatu a velkou intenzitou vyzařování. Dalším znakem je malý úbytek napětí na oblouku a přítomnost tzv. katodové skvrny, v jejímž okolí je velká proudová hustota, řádově $J = 10^3\ A * cm^2$. Oblouk vzniká za normálního nebo zvýšeného tlaku. Může být stejnosměrný anebo střídavý podle proudu tekoucího obvodem s elektrodami.

Oblouk může existovat mezi elektrodami kovovými anebo mezi elektrodami uhlíkovými. Při hoření mezi kovovými elektrodami vzniká oblouk v kovových parách, kdežto při hoření mezi uhlíkovými elektrodami vzniká oblouk v okolních plynech.

2.1.1 Vzhled oblouku

Rozlišujeme oblouky stejnosměrné a střídavé. Stejnosměrný oblouk má v bezprostředním okolí katody jádro oblouku nebo též katodový paprsek plazmatu. Kolem jádra je kladný sloupec sahající až k anodě. Od katody směrem k anodě pak celý kladný sloupec pokrývá aureola (viz obr. 2). Barvy oblouku závisí na plynu, ve kterém oblouk hoří. Střídavý oblouk se jeví na první pohled jako souměrný, protože se mění polarita na elektrodách podle frekvence střídavého proudu.



Obrázek 2: Tvar stejnosměrného oblouku

Existuje také značný rozdíl mezi volně hořícím obloukem tvořeným plynem, ve kterém oblouk hoří s příměsemi par elektrod, a mezi stabilizovaným obloukem tvořeným plyny nebo parami stabilizačního média. Aureola stabilizovaného oblouku je téměř potlačena a ve středu stabilizované dráhy je nepozorovatelná. Střídavý stabilizovaný oblouk má stejný vzhled jako stejnosměrný, mění se pouze jeho průměr v závislosti na frekvenci proudu.

2.1.2 Charakteristiky oblouku

Statická charakteristika oblouku

Statická charakteristika znázorňuje závislost napětí na elektrodách na proudu protékajícím obvodem. Při malých proudech je charakteristika hyperbolicky klesající. Tímto stavem oblouku s malými protékající proudy se zabývala Ayrtonová a na základě měření se ukázalo, že napětí na oblouku je dáno empirickým vztahem

$$U_{ob} = \alpha + \beta * l + \frac{\gamma + \delta * l}{I}. \qquad \text{Rov. 11}$$

V tomto vztahu je I proud tekoucí obvodem, l délka oblouku a $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ jsou konstanty závislé na okolním plynu, tlaku, rozměrech i tvaru elektrod. Pro oblouky dlouhé přibližně 0,5 m, které jsou stabilizované vzduchem, uvádí Grotrian konkrétní hodnoty. Například pro napětí oblouku hořícího mezi železnými elektrodami platí

$$U_{ob} = 62 + \left(11{,}4 + \frac{32{,}6}{I}\right) * l, \qquad \text{Rov. 12}$$

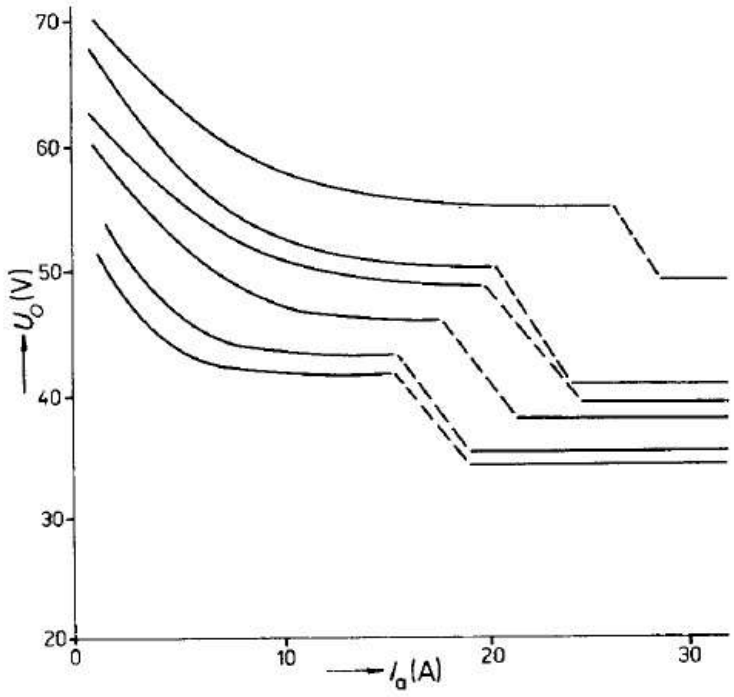
pro oblouk hořící mezi měděnými elektrodami

$$U_{ob} = 60 + \left(12{,}8 + \frac{35{,}5}{I}\right) * l, \qquad \text{Rov. 13}$$

a pro oblouk, který hoří mezi uhlíkovými elektrodami, platí vztah obloukového napětí

$$U_{ob} = 80 + \left(12 + \frac{33{,}3}{I}\right) * l \qquad \text{Rov. 14}$$

Se zvyšujícím se proudem se objevuje pásmo neklidného hoření. V tomto pásmu je obtížné jednoznačně určit napětí na oblouku. Při zvyšujícím se proudu se charakteristika stává přímková s velmi malou strmostí stoupání (viz obr. 3).



Obrázek 3: Statická charakteristika oblouku

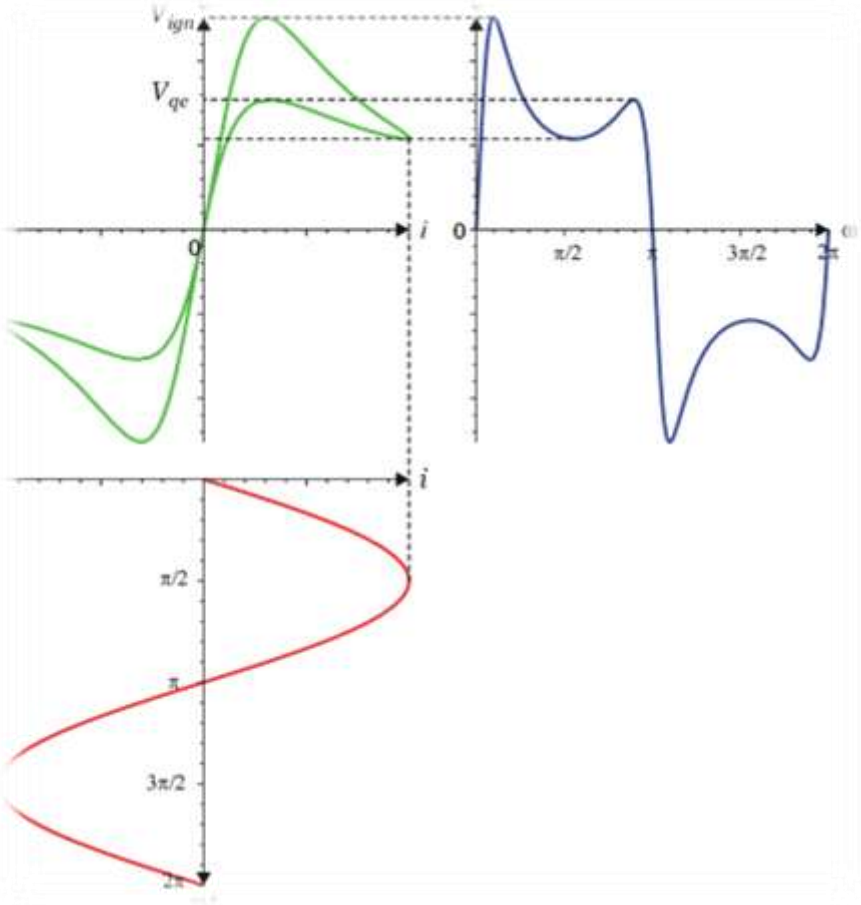
Dynamická charakteristika oblouku

Dynamická charakteristika je složitější na sledování, protože se periodicky mění. „Na začátku každé půlperiody stoupá napětí na oblouku u_{ob} souhlasně se síťovým napětím až do

napětí opětovného zápalu. Po zapálení oblouku klesne napětí na hodnotu hořícího napětí a po určitou část půlperiody zůstává konstantní. Rozdíl mezi tímto napětím a napětím síťovým je roven úbytku napětí na předřadném odporu vyvolaném proudem oblouku.“ [1] Tvar procházejícího proudu je při konstantním napětí přibližně sinusového průběhu. Při růstu napětí na oblouku je procházející proud přibližně roven nule.

Z dynamické charakteristiky je vidět, že napětí při zápalu oblouku jsou větší, než napětí stejně velkého proudu při zhášení oblouku. Rozdílné napětí ve střídavém oblouku musí být z důvodů krytí ztrát výboje, pokud by zůstal stejný proud, ale i kvůli zvýšení ionizace ve výbojové dráze z důvodů nedostatku volných nosičů náboje. Při klesajícím proudu je naopak ve výbojové dráze větší počet nosičů náboje, než kolik jich je potřeba pro přenesení okamžitého proudu, proto je velikost napětí na oblouku menší.

Tvar dynamické charakteristiky je dán několika činiteli a nazývá se hysterezní smyčka. Ta je ovlivňována materiálem elektrod, délkou oblouku, předřadným odporem a frekvencí napájecího napětí (viz obr. 4).



Obrázek 4: Dynamická charakteristika oblouku

2.2 Teoretický rozbor oblouku

Důležitou součástí jakékoli práce s elektrickým obloukem je jeho matematické vyjádření a vyjádření závislosti jednotlivých parametrů na proudu nebo na napětí vnuceného oblouku. Nejčastějším předpokladem je, že známe proud tekoucí obvodem s obloukem a zbylé parametry můžeme zjistit právě jako funkce proudu. Kriteriem použitelnosti matematických teorií je výpočet charakteristiky oblouku a výpočet teploty uvnitř plazmatu.

Proud protékající plazmatem oblouku o poloměru *r* je

$$I = r^2 + E * f_1(T), \qquad \text{Rov. 15}$$

kde $f_1(T)$ je funkce podobná elektrické vodivosti plazmatu.

V plazmatu oblouku musí platit termická rovnováha, což znamená, že proud musí vyhřát všechny složky plazmatu na teplotu dostačující k termické ionizaci a na krytí ztrát tepla vedením a taky vyzařováním. Jak ionizace tak krytí tepla jsou funkcí teploty a množství odvedené energie je úměrné poloměru oblouku. Platí

$$E * I = r * f_2(T). \qquad \text{Rov. 16}$$

Pokud známe proud protékající obloukem, obsahují obě tyto rovnice tři neznámé, kterými jsou poloměr r, teplota T a elektrické pole plazmatu E.

Při stanoveném poloměru oblouku může existovat nekonečný počet různých oblouků, které se vzájemně liší intenzitou elektrického pole a teplotou. Funkce f_1 a f_2 považujeme pro konkrétní případy oblouku za známé. Z rovnic vyplývá, že při konstantním proudu klesá teplota s rostoucím poloměrem oblouku. Oblouky s malými poloměry se vyznačují vysokými teplotami, je v nich tedy vysoký stupeň ionizace a tím pádem vysoká elektrická vodivost. K přenosu proudu přes malý průřez oblouku je však zapotřebí velký gradient. Oblouky s velkým poloměrem plazmatu mají nižší teploty a tím pádem dochází k menšímu stupni ionizace a v prostředí oblouku je malá elektrická vodivost. K transportu proudu obloukem s velkým průřezem je zapotřebí velká intenzita elektrického pole. Mezi těmito dvěma stavy musí existovat oblouk s minimální velikostí intenzity elektrického pole. Steenbeck vyslovil předpoklad, že tak jako v mechanice nastává rovnováha při s minimální energií soustavy, tak v obloukovém plazmatu nastává rovnováha při minimální intenzitě elektrického pole. Stabilní oblouk je ten, pro který platí

$$\frac{dE}{dT} = 0 \qquad \text{Rov. 17}$$

nebo

$$\frac{dE}{dr} = 0, \qquad \text{Rov. 18}$$

to znamená, že ze všech možných oblouků, které mohou vzniknout, vzniká pouze ten, jehož intenzita elektrického pole je pro daný poloměr nebo teplotu minimální. Princip, který formuloval Steenbeck vede k teoretickým závěrům souhlasícím se závěry stanovenými experimentálně.

V zařízeních zvaných plazmomety můžeme díky stabilizaci plynem nebo kapalinou získat osově souměrné oblouky válcového tvaru. Oblouk hoří v ose např. skleněného válce a jeho rozměry jsou dány vírem přiváděného média, který je foukán dovnitř v určitém směru. Toto rotující médium pak vytvoří uvnitř kanálek pro průchod plazmatu. Při plynové stabilizaci je možné vytvořit oblouky s teplotou do 10 000 K. Kapalinová stabilizace je stejná jako ta plynová. Do stabilizačního tělesa se ve směru tečny přivádí kapalina, která pak rotuje po stěnách a vytváří

tak uprostřed volný kanálek pro oblouk. Průměr kanálu určuje průměr obou otvorů čel stabilizace, která zároveň slouží k přívodu a odvodu stabilizační kapaliny. Oblouk může být dostatečně chlazený, protože přes čela se může přivádět a odvádět libovolné množství stabilizační a zároveň chladicí kapaliny. Teploty, jichž se dosahuje v kapalinou stabilizovaných obloucích, jsou tak omezeny pouze tepelnou odolností čel stabilizace.

Teplota v plazmatu závisí na dodávaném proudu. Energie dodávaná do oblouku v podobě elektrického příkonu se přeměňuje na teplo v poměrně malém prostoru, který je dán velikostí kanálku vytvořeného ve stabilizaci. Velikost tohoto prostoru známe, je poměrně malý a tak teploty stabilizovaného oblouku jsou velmi vysoké. Mezi určující parametry oblouku patří elektrický příkon rovný součinu proudu a napětí na oblouku a poloměr kanálku, ve kterém oblouk hoří. Při výpočtu teploty vycházíme z proudové hustoty plazmatu oblouku. Pro tuto hustotu platí

$$\vec{J} = \sigma * \vec{E}, \qquad \text{Rov. 19}$$

kde je σ elektrická vodivost a $\vec{E}$ je intenzita elektrického pole v oblouku. Celkový protékající proud obloukem získáme integrací proudové hustoty přes poloměr r.

Výpočet teploty volně hořícího oblouku je možné provést z výše zmiňovaného Steenbeckova principu minimálního napětí. Výpočet je náročný, protože poloměr oblouku není daný okolním prostředím tak jako u oblouků stabilizovaných, ale je funkcí proudu. Velikost oblouku závisí na proudu podle empirického vztahu, který odvodili Kirchstein a Koppelmann. Pro poloměr volně hořícího oblouku mezi dvěma uhlíkovými elektrodami platí

$$r = 4{,}6 * 10^{-2} * I^{0{,}6}. \qquad \text{Rov. 20}$$

Intenzita elektrického pole v oblouku je závislá podle vztahu plynoucího z rovnice Ayrtonové

$$E = 12 + \frac{100}{I}. \qquad \text{Rov. 21}$$

Tyto rovnice můžeme dosadit do rovnice pro výpočet teploty

$$T_m = 1{,}041 * 10^3 * \left(\frac{I}{R^2 * E}\right)^{\frac{2}{3}}, \qquad \text{Rov. 22}$$

dostaneme výsledný vztah

$$T_m = 1{,}041 * 10^3 * \frac{I^{0{,}533}}{\left(\frac{12 * I}{100}\right)^{0{,}666}}. \qquad \text{Rov. 23}$$

2.3 Spínací oblouk

Elektrický oblouk je jev doprovázející vypínání silnoproudého elektrického obvodu. Vzniká mezi kontakty při jejich oddalování. Oblouk realizuje přerušení obvodu. Jedním z důležitých

požadavků na vypínače je mechanická spolehlivost součástí vypínače, schopnost zániku spínacího oblouku a obnova dielektrické pevnosti prostředí mezi kontakty.

Z hlediska životnosti každého vypínače je oblouk považovaný za vysoce nežádoucí jev. Plazma takového oblouku je vysoce energetická hmota, která má teplotu velmi vysokou teplotu a způsobuje velké opotřebování kontaktů během vypínání. Míra poškození kontaktů je závislá jednak na velikosti proudu protékajícího obvodem, ale i na době trvání oblouku ve vypínači mezi elektrodami.

Na druhou stranu oblouk představuje přeměnu většiny části elektromagnetické energie obsažené v elektrickém obvodu na energii tepelnou. Tepelná energie uvolňující se z elektrického oblouku je zvládnutelnější než přepětí vznikající při vypínání bez oblouku. To je nejpatrnější při vypínání stejnosměrného oblouku.

Stále rostoucí požadavky na vypínací schopnost vypínačů (z důvodů zmenšování rozměrů a jiné) komplikují konstrukci spínacích přístrojů. Při vývoji nového přístroje je nutné sledovat nejdůležitější část přístroje, kterou je zhášecí komora, a podmínky, za kterých vzniká, existuje, a zháší se elektrický oblouk. Na kvalitě znalostí příslušných veličin ve sledovaném prostředí závisí základní předpoklady pro teoretický rozbor vypnutí obvodu. Podklady jsou v praxi získávány diagnostikou prostředí a vlastností elektrického spínacího oblouku. Diagnostika se tak stává nedílnou součástí metod aplikované fyziky, umožňuje proniknout do podstaty vypínacích procesů a uplatňuje se ve výzkumu a vývoji spínacích přístrojů.

„Pro tyto postupy jsou nejvýhodnější metody optické diagnostiky plazmatu a používají se ve všech výzkumně-vývojových pracovištích elektrotechnických firem vyrábějících vypínače na vysoké a velmi vysoké napětí. Nejčastěji je to filmování plazmatu vypínacího oblouku rychlostními kamerami, měření teplot plazmatu spektrálními metodami, dále se používají i interferometrické šlírové a holografické metody.

Hlavní důraz je kladen na vyhodnocovací fáze a postupy experimentu, interpretaci získaných výsledků a jejich aplikovatelnosti na konkrétní konfigurace zhášecích systémů.“ [2]

3 OPTICKÁ DIAGNOSTIKA OBLOUKU

3.1 Ekvidenzitometrie

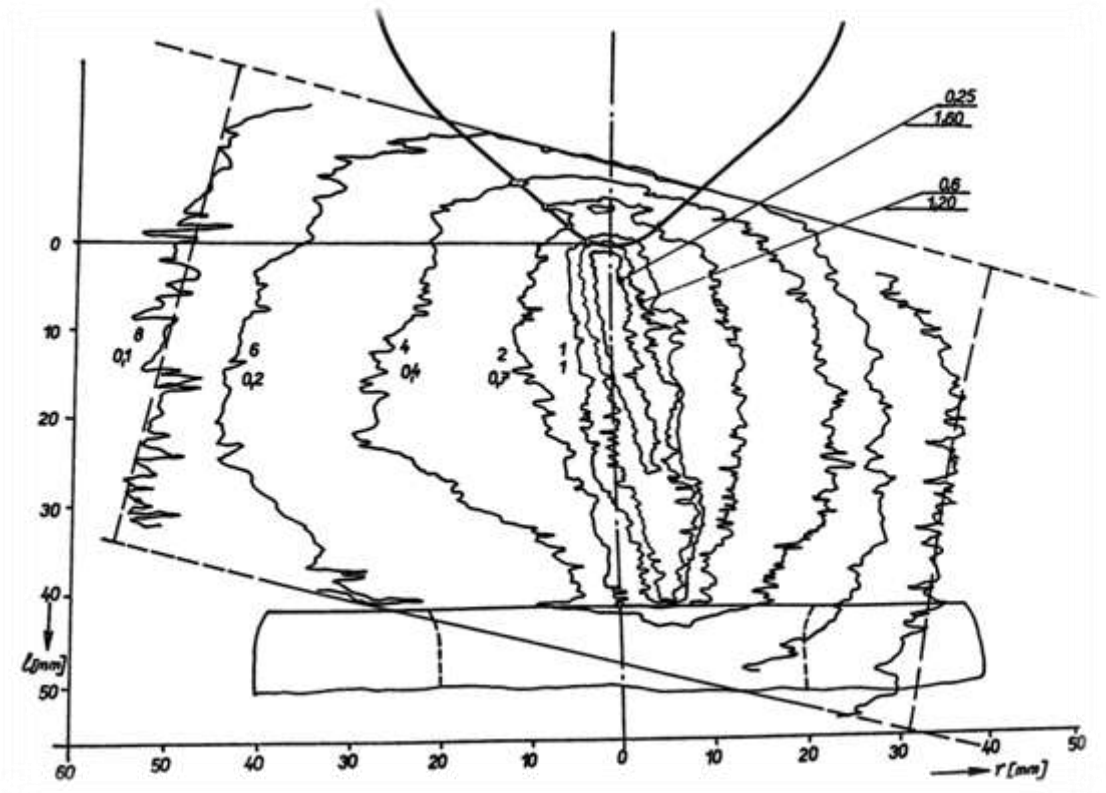
Ekvidenzitometrická metoda navazuje na spektrální diagnostické metody, umožňuje sledovat tvar a změny teplot v průběhu vypínacího procesu. Výsledky této diagnostiky plazmatu ve vypínači jsou podkladem pro konstruování zhášecích komor vypínačů ať už vysokého nebo velmi vysokého napětí. Přesné měření poměrů v oblouku při zkratových proudech řádově $10^3\ A$ je prakticky nemožné. Proto se tvar plazmatu oblouku snímá časovou lupou. Snímky nafilmované vysokou frekvencí mohou reprodukovat obraz skutečných poměrů během zhášení oblouku. Vyhodnocení pořízených snímků umožňují tak zvané ekvidenzitometry. Ekvidenzitometrické metody aplikované na vypínací oblouk nacházejí uplatnění v oborech, kde se používá fotografický záznam sledovaných dějů.

Vysokorychlostní snímkování je jedna z nejstarších a nejproduktivnějších metod v oblasti dějů, které probíhají pro lidské oko nepostřehnutelně. Při zkoumání spínacího oblouku vysokorychlostní kamera poskytuje negativní film s řadou obrázků s geometrickým tvarem oblouku.

Kvalita snímku po stránce rozlišení anebo po stránce časové závisí na konstrukci použitého snímacího zařízení. Kvalita snímku na negativu může být ovlivňována mnoha faktory, jako jsou zajištění optimálních nahrávacích podmínek a kvalita samotného negativního filmu. Velký důraz musí být kladen na dodržování přísných pravidel při vyvolávání, protože kvalita obdržené informace závisí na vhodné volbě metody.

3.2 Ekvidenzita

Termínem ekvidenzitometrie je rozuměna technika zjednodušující vzorek hustoty spojitého obrazu na snímku vytvořením ekvidenzity. Ekvidenzita je čára spojující body se stejnou intenzitou a zjednodušuje tak požadovanou přesnost informací obdržených ze snímku (viz obr. 5). V případě spínacího oblouku tato informace představuje hlavně změny tvaru oblouku v čase a rychlost pohybu ve sledovaném zařízení a podobně. Tvar ekvidenzit (vrstevnicová mapa) zprostředkovává informaci o geometrických vlastnostech filmovaného plazmatu a přibližnou podobu teploty a rozdělování tepla z oblouku do okolí.



Obrázek 5: Příklad ekvidenzitogramu oblouku

Negativ z vysokorychlostní kamery obsahuje řadu snímků se zachyceným obloukem v přesně definovaném čase expozice. Záznam oblouku se skládá z celé řady snímků s vhodnou frekvencí. Ekvidenzitometrie umožňuje předvídat tvar oblouku a jeho chování v průběhu vypínacího procesu. Ekvidenzity také slouží jako vstupní data pro časové a radiální (paprsčité) šíření teploty v oblouku.

Výsledky této metody mohou být využívány právě při návrhu zhášecích komor vypínačů v obvodech s vysokým a velmi vysokým napětím a přispívají k celkovým znalostem jevů vyskytujícím se ve spínacím oblouku.

Na fotografické emulzi je obraz oblouku reprezentovaný zčernáním (stupně šedi) jednotlivých bodů. Poloha každého bodu je zadána souřadnicemi x a y. Během mikro-fotometrického vyhodnocování negativů je prostupnost τ každého bodu na fotografické emulzi jednoznačně určena. Hodnoty τ určují hustotu D všech bodů vzorcem

$$D = -\log \tau. \qquad \text{Rov. 24}$$

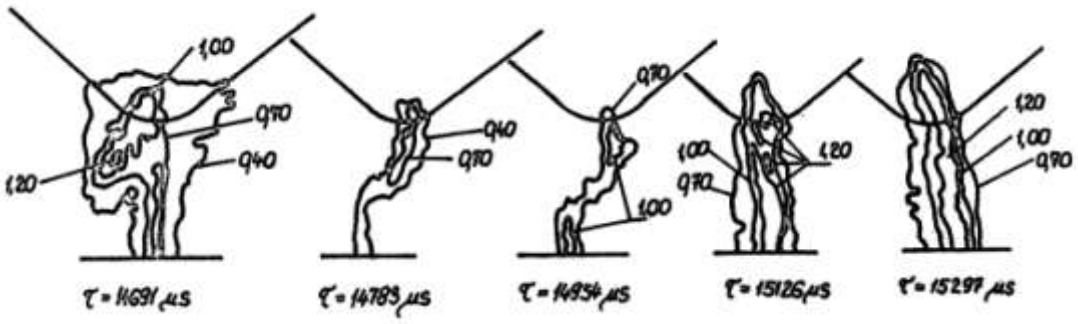
Hustota D je jako propustnost τ funkcí souřadnic x a y

$$D = f(x, y). \qquad \text{Rov. 25}$$

Plné zastoupení křivek se stejnou hustotou zčernání negativu vyžaduje třírozměrný (3D) model. Třírozměrný obraz však může být přetransformovaný do dvourozměrného obrazu (2D) propojením všech bodů se stejnou hustotou

$$D = konst. \qquad \text{Rov. 26}$$

Zobrazení vytvořených obrazců do xy roviny představuje geometrické umístění odpovídajících si hustot v rovině. Čára spojující stejné hustoty se nazývá ekvidenzita. Ekvidenzity jsou analogické k vrstevnicím na zeměpisných mapách. Sada ekvidenzit na snímku vyfoceného objektu se nazývá ekvidenzitogram. Právě tyto ekvidenzitogramy nám zprostředkovávají informace o geometrickém charakteru snímaného plazmatu a taky o principu šíření tepla do okolí (viz obr. 6).



Obrázek 6: Geometrická změna oblouku v čase

Množství získaných informací z fotografické emulze je úměrné množství ekvidenzit. V praxi je možné získat omezený počet ekvidenzit, které popisují rozložení hustoty v požadovaném rozsahu přesnosti. Vzdálenost mezi jednotlivými ekvidenzitami znázorňuje průměrný gradient prostupnosti. Dalším hlediskem výběru počtu ekvidenzit je požadavek na charakter informací získaných negativního filmu. Kvalita negativu je základní podmínka pro ekvidenzitometrickou analýzu snímaného předmětu. Ekvidenzitogramy mohou být získány použitím vhodné fotografické metody nebo metodou fotoelektrické fotometrie.

3.3 Fotografické materiály a jejich vlastnosti

Fotografická vrstva jako nositel informace

Optické informace může zaznamenávat citlivá fotografická vrstva nanesená na vhodný podklad tak, že při osvitu převádí dopadající intenzitu osvětlení ve stabilní odpovídající rozložení optických hustot. Dá se tedy říci, že fotografický záznam je promítnutý obraz sledovaného objektu na citlivou vrstvu. Tento proces je zvládnutelný obvyklými analytickými metodami.

Přenášená informace se ze zdroje šíří jako plošný signál daný rozdělením jasu na sledovaném objektu. Za nositele informace považujeme elektromagnetické záření v příslušné spektrální oblasti. Součástí přenosového kanálu je zobrazovací systém, který je tvořen optickým přístrojem s umístěnou citlivou fotografickou vrstvou. Fotografická emulze zpracovaná do podoby negativu reprezentuje kódovanou přenesenou informaci. Přenesená informace se projevuje transformací černých částí objektu v bílé a naopak bílých částí v černé. Dále je na negativu přítomen tak zvaný šum. Tento kanál je díky citlivé vrstvě časově stacionární, protože ukládá do paměti jen rozložení jasu sledovaného objektu v určitém časovém okamžiku. Fotografickou emulzi tak můžeme pokládat za dvourozměrnou paměť. Zkoumání časových změn jasu sledovaného objektu je možné pořízením většího počtu snímků v příslušném časovém rozmezí. Tuto možnost nabízí časová lupa. Při optické diagnostice má přenosový systém s dvourozměrnou pamětí, jež je představována citlivou fotografickou vrstvou, mnoho možností aplikace a předností. Informace na negativu můžeme rozdělit na plošné anebo detailní - bodové.

Filmový materiál

Nejčastějším fotografickým materiálem je film. Tvoří ho tenká nosná podložka s vyhovujícími mechanickými vlastnostmi, na niž je nanesena fotografická emulze. Podložkou je zcela průhledná nebo slabě šedá folie z nehořlavého materiálu s tloušťkou asi 0,1 mm. Filmy jsou opatřovány ochrannou vrstvou proti mechanickému poškození a taky antistatickou vrstvou proti poškození statickou elektřinou. Ve filmu se taky vyskytuje antihalační vrstva bránící vzniku odrazu po průchodu světla podložkou. Citlivá vrstva na povrchu folie je tvořena jemnou suspenzí mikroskopických krystalů halových solí stříbra v želatině obsahující další složky, které jsou však jednotlivými výrobci tajeny.

Narušením struktury této citlivé vrstvy dopadajícím světelným zářením se v halogenidech stříbra vytváří latentní obraz. Tento obraz nazýváme fotografická odezva. Fotografická odezva se zesiluje chemickým působením při vyvíjení jednotlivými složkami vývojky. Vývojka působí mnohem rychleji na osvitnutých krystalech, než na neosvitnutých. Následkem toho se latentní obraz zviditelní. Při vyvolávání dochází k redukci halových solí stříbra aktivovaných osvitem na kovové stříbro. Po vyvolání obrazu ztrácí citlivá vrstva citlivost na světlo, protože se v ustalovači rozpustí nevyvolané halogenidy. Zbytky ustalovače se odstraňují vypráním ve vodě, výsledkem pak je negativní obraz sledovaného objektu.

Na trhu je velký výběr nejrůznějších filmů, při sledování tvaru oblouku však můžeme použít jakýkoli materiál za předpokladu, že jeho citlivost umožňuje fotografování při konkrétních světelných podmínkách. Oblouk je velmi intenzivní zdroj záření, a proto vystačujeme s materiály s malou citlivostí, které jsou dostatečně jemnozrnné.

Pokud chceme u snímku získat jiné parametry oblouku nebo stanovit teploty na základě vyzářené energie, musíme vybírat film pečlivěji. Kritéria výběru nelze zobecňovat, jedná se vždy

o jistý kompromis mezi citlivostí, zrnitostí a také senzitometrickou charakteristikou použitého materiálu.

Zpracování informace na fotografické vrstvě

Předpokladem pro úspěšnou práci je zvládnutí vyvíjecího procesu zaručující reprodukovatelnost (opakovatelnost) výsledků. Toho lze dosáhnout přesným dodržováním pracovních postupů předepsaných pro jednotlivé materiály. Nejdůležitějším činitelem je pak teplota vývojky, která má být v rozmezí 18 - 20 °C, a přesná doba vyvíjení.

Na vývojku nejsou kladeny žádné speciální požadavky týkající se například složení, vhodné nejsou pouze vývojky vyrovnávací a měkce pracující. V praxi se pro sérii spolu souvisejících měření osvědčilo míchat koncentrovaný roztok ředěný daným množstvím vody. Při vyvolávání je nutné dbát na dostatečný styk citlivé vrstvy s látkou vývojky. Pro dosažení rovnoměrnosti je třeba pohybovat citlivým materiálem ve vývojce. Kvůli reprodukovatelnosti výsledků je nutné přerušení vyvíjení po uplynutí stanovené doby. Toho dosahujeme vhodnou přerušovací lázní a intenzivním opláchnutím proudící vodou. Ustalovací lázeň má být dostatečně čerstvá a taky kyselá. Závěrečné praní musí být dlouhé aspoň 15 minut v tekoucí vodě.

3.4 Vybrané metody analýzy

3.4.1 Fotograficko-chemická metoda

„Většina metod, používajících fotograficko-chemické postupy, je založena na Sabatierově efektu, objeveném v roce 1864. Tento efekt je založen na skutečnosti, že exponovaná fotografická emulse osvitnutá po druhé po určité době vyvolání světlem působícím na použitou emulzi, zčerná i na místech neosvětlených při prvním osvitu, přitom vznikne na rozhraní obou osvětlených míst kontura s poměrně malým zčernáním.“ [2]

Tento mechanismus není do dneška uspokojivě vysvětlen. Při experimentech bylo zjištěno, že světlé čáry na rozhraní vznikají chemickým reagováním halogenidu stříbra s alkalickými halogenidy. Pro získání ekvidenzit Fotograficko-chemickou metodou je třeba použít negativní materiál s velkou strmostí, ideálně by mělo platit $G = 7$. Této podmínce vyhovují fotografické papíry s gradací extra nebo ultra hard. Tento filmový materiál je ideální kvůli častému kopírování. Existují dva základní postupy při získávání ekvidenzit.

První postup

V prvním postupu zvětšíme jemnozrnně snímek vyvolaný na používaný fotografický materiál. Délku osvitu určíme pokusně při zvětšování tak, aby pozadí snímku až k první zvolené ekvidenzitě bylo po vyvolání stejnoměrně černé. Expoziční doba je závislá na vývojce a samozřejmě na použitém materiálu.

„Exponovaný materiál vyvoláváme v tvrdě pracující vývojce, do které byl přidán hexametafosforečnan sodný a asi 2 g bromidu draselného pro odstranění případného závoje negativu. Po třech minutách vyvolávání osvitneme negativ po druhé po dobu stanovenou pokusně. Po skončení druhého osvitu vyvoláváme materiál ještě 1,5 minuty. Vyvolávání zastavíme v přerušovací lázni a materiál ustálíme v kyselém ustalovači. Po usušení jsou v prohledu na snímku patrné ekvidenzity.

Pro získání dalších ekvidenzit měníme dobu prvního osvitu. Jednotlivé ekvidenzity vykopírujeme na pozitivní materiál a složíme z nich celkový obraz. Správnou polohu ekvidenzit

na jednotlivých snímcích a výsledném snímku zaručíme vhodnými značkami kopírovanými na dílčí kopie.“ [2]

Druhý postup

Při druhém postupu se používá film. Je to metoda stupňovitých kopií. Není vhodné zvětšovat snímek, protože se tím snižuje výsledná kvalita obrazu. Z negativu vyhotovíme několik pozitivních kopií za použití materiálu s velkou strmostí. Jednotlivé osvity opět volíme pokusně s kvocientem 1,5 až 2. Pokud požadujeme rovnoměrné rozdělení ekvidenzit, musíme opět provést několik pokusných osvitů. Takto osvitnuté filmy můžeme vyvolat ve stejné vývojce jako v předešlém postupu. Po usušení filmů pozitivy okopírujeme stejně jako v prvním postupu. Při kopírování na jeden obrázek dostaneme výsledný soubor ekvidenzit. Tento postup zaručuje kvalitnější výsledky než první postup, ale je časově náročnější.

Oběma postupy dostáváme široké ekvidenzity. Kvůli získání úzkých ekvidenzit musíme použít vícekrát za sebou Sabatierův efekt. Takto získané ekvidenzity se nazývají vícenásobné ekvidenzity. Ekvidenzity druhého stupně dostáváme zpracováním ekvidenzit prvního stupně prvním postupem. Dostáváme tak ekvidenzity druhého stupně na místech se stejnou propustností první ekvidenzity. Ekvidenzity vyšších stupňů dostáváme vícenásobným opakováním tohoto procesu. Prakticky se však ukazuje, že není vhodné vytvářet ekvidenzity vyššího než třetího stupně. Dochází totiž ke zdvojení silných čar.

Další způsoby

Třetím používaným způsobem získávání ekvidenzit je „ton-line process“, kterým se dají ekvidenzity získat velice jednoduše. Postup je založen na skutečnosti, že ztotožněním negativu s pozitivem stejného snímku dochází k stejnosměrnému zčernání po celé ploše. Pokud negativ oddělíme od pozitivu tenkou průhlednou vrstvičkou, mohou projít paprsky dopadající pouze pod určitým úhlem až na negativ ležící pod ztotožněnými snímky a naexponuje se na něm přímo hledaná ekvidenzita.

Teoreticky je to jednoduchá metoda, ale praktické zrealizování vyžaduje velké nároky. Hlavní problém představuje vykopírování pozitivů tak, aby přesně doplňovaly negativ. Další problém představuje nalezení vhodné doby kopírování, aby hustota negativu i pozitivu byla stejná a aby byla i stejná strmost zčernání na obou materiálech. Problém představuje i osvit, protože je potřeba pohybovat zdrojem světla. Šířku takto získané ekvidenzity můžeme ovlivňovat tloušťkou průhledné mezivrstvy.

Čtvrtým způsobem je tak zvaný Agfacontour, název podle filmu vyráběného firmou Agfa-Gewaert. Agfacontour je černobílý film, který po osvitu a vyvolání zobrazuje přímo ekvidenzity bez dalšího zpracování. Film má dvě emulzní vrstvy, obsahuje bromid stříbrný, chlorid stříbrný a zrna siřičitanu stříbrného. Jedna vrstva filmu se vyvolává ve vývojce fyzikálně a druhá chemicky.

V první vrstvě vzniká pozitivní obraz a ve druhé vzniká negativní. Sležením obou obrazů vzniká tmavá plocha, na které jsou vidět světlé čáry, což jsou ekvidenzity. Vrstva vytvářející pozitivní obraz je senzibilována na modré světlo, negativní pak na zelené. Díky tomu lze vytvořit pomocí barevných filtrů různě široké ekvidenzity. Nejtenčí ekvidenzita je pro praxi široká a proto jsou použitelné ekvidenzity druhého až třetího stupně vytvářené opakováním postupu. Rozlišovací schopnost materiálu činí 50 čar na milimetr a dovoluje použití téměř libovolného počtu ekvidenzit v obraze. Postup je časově náročný a dochází k velké spotřebě materiálu. Na druhou stranu výsledek vyhovuje i náročnějším požadavkům.

3.4.2 Fotograficko-fotometrická metoda

Pro stanovení průběhu ekvidenzit jsou právě tyto metody nejvýhodnější. Základem všech fotograficko-fotometrických metod je proměřování negativů zkoumaného objektu vhodným fotometrem. Postup při práci s fotometrem závisí na kvalitě proměřovaného snímku i na kvalitě použitého fotometru.

Při práci s bodovým fotometrem bez registračního zařízení je tato metoda velmi zdlouhavá. V negativu je třeba proměřovat bod po bodu, tyto body musíme vybrat podle předem stanovených kritérií. Snímek rozdělíme souřadnou sítí a proměřujeme body ležící na průsečíku příslušných souřadnic. Změřené numerické hodnoty hustot jednotlivých bodů umožňují nakreslit ekvidenzity spojením bodů se stejným zčernáním. Množství ekvidenzit odpovídá povaze proměřovaného negativu a jeho senzitometrické charakteristice. Tato metoda je dále vhodná pouze pro vyhodnocování snímků s velkými rozměry a se zřetelnými podrobnostmi.

Při použití registračního fotometru můžeme spoustu nevýhod tohoto postupu odstranit. Při měření tímto fotometrem stanovujeme průběh hustoty ve zvoleném řezu negativem. Všechny podrobnosti v tomto řezu zůstávají zachovány s obrazem větším, než je rozlišovací schopnost samotného negativního materiálu. Vzdálenost řezů volíme podle toho, jaký máme proměřovaný negativ. Kvůli zvýšení přesnosti můžeme snímek rozdělovat na řezy, které jsou navzájem kolmé. Tento způsob vykresluje ekvidenzity pro libovolnou hustotu a v téměř libovolném zvětšení oproti negativu, na druhou stranu však dochází ke ztrátě informací mezi jednotlivými řezy. Postup je navíc také zdlouhavý.

Přístroje s automatickou transformací negativu na ekvidenzitogram zakreslovaný jako dvourozměrný obraz odstraňují výše zmíněné nedostatky. Jeden z postupů práce s takovýmto přístrojem umožňuje zobrazení ekvidenzit přímo na stínítku obrazovky. Tato metoda je založena na klasickém televizním přenosu od snímací kamery k monitoru. Body se stejnou hustotou jsou vybírány elektrickým filtrem. Tento postup umožňuje v kombinaci s obrazovkou rychlý přehled o tvaru ekvidenzit, na druhou stranu však neumožňuje přesnější měření kvůli nepřesnosti zobrazení obrazovkou.

3.4.3 Fotograficko-mechanická metoda

Přístroj, zvaný ekvidenzitograf, umožňuje kreslení ekvidenzit fotografického snímku na desce s rozměry 9 x 12 cm na druhou fotografickou desku se stejnými rozměry. Tento přístroj umožňuje zobrazení bodů se stejným zčernáním ve stejné geometrické konfiguraci na druhou desku. Spojením těchto bodů vzniká ekvidenzita.

Kvůli zaručení stálosti vzájemné polohy obou desek jsou tyto desky upevněny na masivním kovovém rámu, který se pohybuje ve vodící liště. K pohybu fotografické desky dochází mezi kondenzátorem a objektivem mikroskopu s mnohonásobným zvětšením, druhá deska se pohybuje synchronně pod mikroprojektorem. První deska je prosvětlovětlovaná zdrojem a element obrazu je okulárem mikroskopu přenesen na fotodiodu. Světlo, které dopadá na diodu, se mění tak, jak se mění zčernání snímaného elementu obrazu. Pokud je proud procházející diodou odpovídající svou velikostí nastavenému zčernání kreslené ekvidenzity, tak se přes relé připojí žárovka mikroprojektoru ke zdroji a světlo vycházející z tohoto mikroprojektoru exponuje na druhé desce plošku o velikosti $0{,}1\ mm^2$. Pohyb obou desek je řešen proměřováním první desky po řádcích se vzdáleností $0{,}1\ mm$.

Z důvodů správné funkce zmiňovaného přístroje je nezbytně nutné, aby byla celá mechanická konstrukce zcela přesná. Stejnoměrné zčernání bodů na druhé desce je zajištěno pouze při konstantní rychlosti pohybu obou desek. Musí být také splněna konstantní vzdálenost mezi emulzí desky a objektivem mikroprojektoru. Při nedodržení této podmínky vznikají výkyvy jasu elementu na obraze, což má za následek rozmazání ekvidenzit. Veškeré posuvy musí být navíc zcela bez chvění.

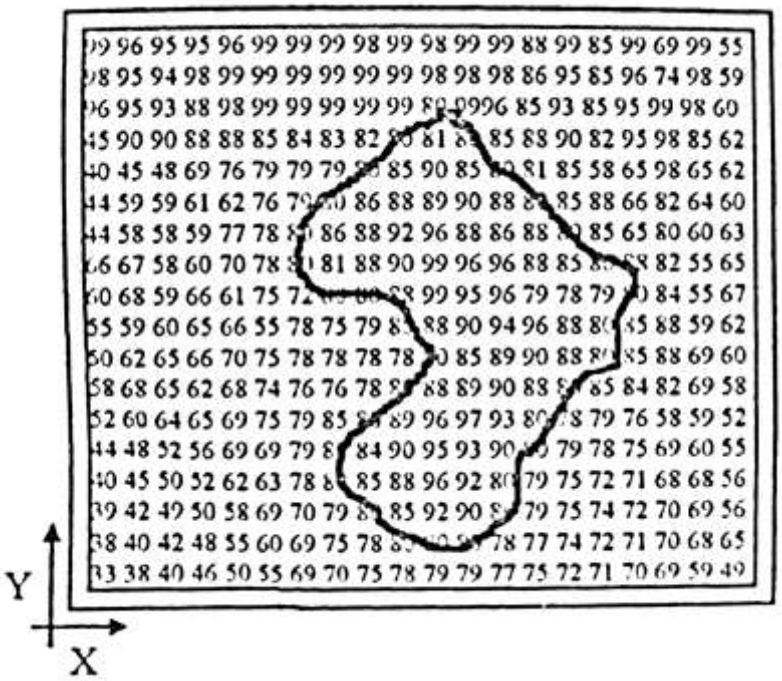
Toto zařízení je možné provozovat pouze v temné komoře. Zařízení navíc vykresluje ekvidenzity pouze v jedné propustnosti, na jednom záznamu tak nemůžeme rozlišit více ekvidenzit. Pro každou hodnotu propustnosti je tedy potřeba pořizovat nový záznam na druhé desce.

4 PRAKTICKÁ ČÁST

4.1 Moderní metoda vytváření ekvidenzit

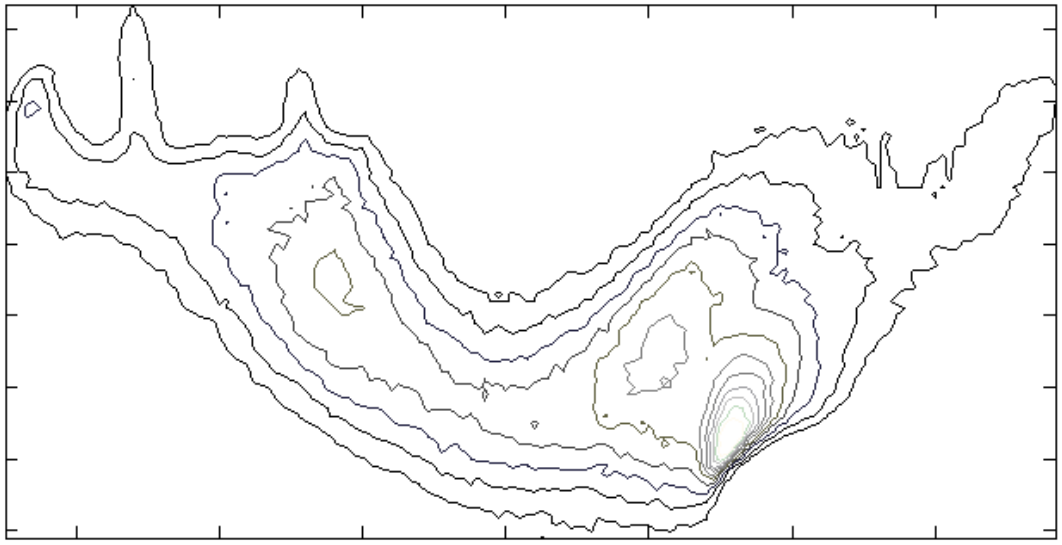
Výše uvedené metody jsou ze současného pohledu zastaralé, neboť s pokročilou technikou mohou být obrazy získané z kamery zpracovány digitálně. Jde o rozdělení videa získaného například ve formátu .avi na jednotlivé snímky, například ve formátu .bmp bitmapového obrázku. Bitmapový obrázek nebo taky rastrová grafika je obrázek popsaný pomocí jednotlivých bodů (pixelů). Každý bod má určenou svou polohu a barvu. Tento typ grafiky má nevýhody například při zvětšování obrázku, při kterém dochází ke zhoršení kvality snímku a při větším zvětšení může být patrný rastr. Uložené snímky jsou navíc náročné z pohledu paměťových médií. (viz obr. 7).

S digitálním snímkem ve formě rastrové grafiky se dá pracovat pomocí speciálních programů, jedním z nich je například MATLAB (viz příloha A). Díky tomuto programu používanému v odborné vědecké praxi můžeme sérií příkazů vykreslit hledané ekvidenzity. Příklad vykreslení ekvidenzit na principu vrstevnic je na obrázku 8 a 9.



Obrázek 7: Vytvořená ekvidenzita s hustotou D = 80

Obrázek 8: Bitmapa z pořízeného videa



Obrázek 9: Příklad vyhotoveného ekvidenzitogramu

4.2 Kamera a její použití

Ve specializované laboratoři byl proveden pokus, při kterém byla vysokorychlostní kamerou Photron Fastcam SA-X2 (viz obr. 10) snímána zhášecí komora nízkonapěťového jističe s odejmutým bočním krytem (viz obr. 11) v okamžiku vybavení. Použití této kamery vyhovuje požadavkům vědeckých pracovníků, kteří se zabývají velmi rychlými ději pro lidské oko nepostřehnutelnými. Nabízí dobrou kombinaci rychlosti snímkování, rozlišení snímku, citlivosti na světlo i dynamického rozsahu.

Kamera je ovládána přes klávesnici, avšak může být ovládána i na dálku pomocí softwaru Photron's FASTCAM Viewer (PFV) z běžné sestavy PC přes vysokorychlostní Gigabit Ethernet network. Pokud není k dispozici připojení k PC, mohou být pořízené snímky staženy na kartu přes jeden ze dvou přítomných SD slotů. Bližší informace o kameře jsou k nalezení v datasheetu (viz příloha A).

Obrázek 10: Kamera použitá při pokusu

Obrázek 11: Jistič snímaný kamerou

4.3 Programovací část

4.3.1 Matlab

Program Matlab pracuje s dvourozměrnými nebo třírozměrnými maticemi, dokáže vykreslovat 2D nebo 3D grafiku, slouží také k vytváření počítačových simulací složitějších fyzikálních procesů. Bitmapa načtená do pracovního prostředí Matlabu je reprezentována souborem číselných hodnot v osách x a y. Matlab chápe načtenou bitmapu jako třírozměrnou matici.

Video pořízené kamerou Photron Fastcam má softwarově nastaveno rozlišení 328 x 384 pixelů. Bitmapu vytvořenou z tohoto videa Matlab chápe jako třírozměrnou matici 328x384x3, kde třetí rozměr udává barevnou paletu obrázku. Trojka značí v případě matlabu RGB, tedy červenou, zelenou a modrou. Pokud snímek neobsahuje třetí rozměr, jde o dvourozměrnou matici s prvky v řádcích a sloupcích. Jedná se o černobílý (tzv. grayscale - šedobílý) snímek. Takovýto snímek je reprezentován rozdílnou intenzitou vyzařování, tedy rozdílnou číselnou hodnotou jednotlivých bodů. Při práci s Matlabem je pomocí definované funkce změněna matice z barevné na černobílou.

Díky použité cloně (svářečské sklíčko) je většina snímku tvořena černou barvou. Černou barvu v maticovém zápisu bitmapy reprezentují nuly. Jakmile se rozpojí kontakty jističe, vznikne oblouk emitující světlo, které se po záznamu na digitální snímek projeví zvětšením číselné hodnoty jednoho pixelu v rovině xy. Čím jasnější je vyzařování, tím větší je číselná hodnota prvku matice.

4.3.2 Funkce použité v Matlabu

Ke zpracování bitmapy naprogramovanými funkcemi je třeba mít bitmapu (viz obr. 12) a zdrojové soubory s funkcemi ve stejné složce. Složka pak musí být nastavena v cestě Matlabu. Příkaz

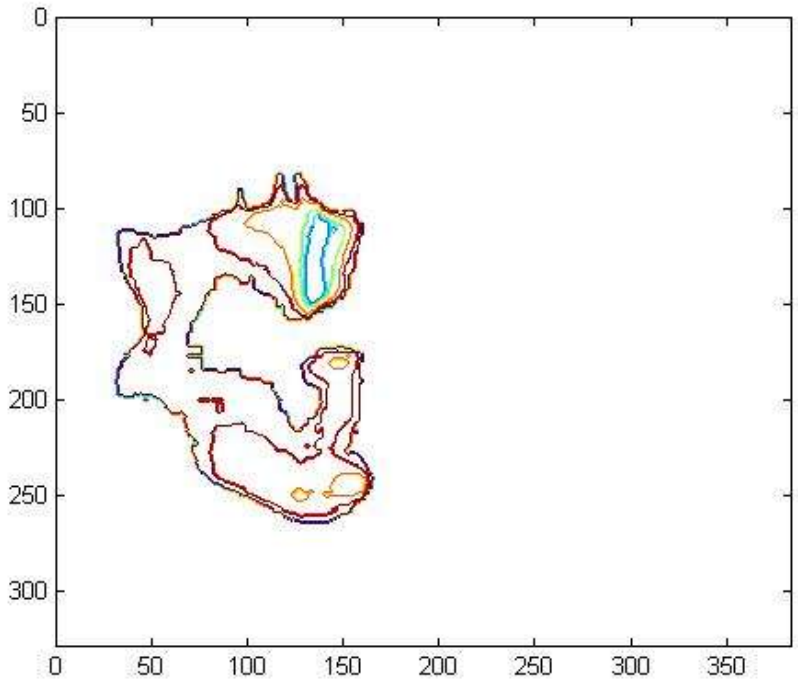
```
A = imread('zkva', 'bmp');
```

vytvoří proměnnou A, do které nahraje v pracovním prostředí matlabu požadovanou bitmapu ve tvaru matice čísel. S tou Matlab dokáže dále pracovat.

Obrázek 12: Reprezentativní bitmapa použitá při zpracování

```
C = MojeMilaFunkce(B, 120,80,30,10,2);
```

Zavoláním funkce MojeMilaFunkce například s těmito vstupními parametry dojde k vytvoření další proměnné, která obsahuje nové matice obsazené jedničkami, to jsou body s větším číslem než zadaný vstupní parametr, a nulami, což jsou body s menší číselnou hodnotou než zadaný vstupní parametr. Vstupní parametr 0 zobrazuje všechny body, které mají větší světlost než černou. Tímto parametrem se dá zobrazit všechno, co je obsaženo na snímku včetně jisker a podobně (viz obr. 13).



Obrázek 13: Zobrazení ekvidenzit po zadání funkce MojeMilaFunkce

Při diagnostikování plazmatu je výhodnější nahradit stávající matici nul a dalších čísel novou maticí, která vznikla vyvoláním napsané funkce. Za tímto účelem je vytvořeno několik funkcí napsaných v M souboru v Matlabu. Po aplikování funkcí z bitmapy nahrané do prostředí matlabu vznikne nová matice obsahující jeden velký plošný útvar tvořený čísly zastupujícími plazma.

```
function [ Vystup ] = final( matice, U1, U2, U3, U4, U5 )
```

Toto je úvodní hlavička funkce. Do ní se v hranatých závorkách zapisuje název nové proměnné, která vznikne po zavolání funkce. Za rovnítkem je název samotné funkce. Do kulatých závorek se na pozici matice zapisuje název proměnné obsahující do Matlabu načtenou bitmapu, za jednotlivé úrovně se dosazují vybraná čísla seřazená sestupně. V této závorce jsou obsaženy vstupní parametry funkce, které se zadávají v pracovním okně Matlabu.

Funkce Final (Příloha B)

Tato funkce zajistí vyvolání všech ostatních funkcí, které byly naprogramovány. Zadávají se do ní vstupní parametry, které vedou k výsledné matici. Příklad zadání funkce

```
B = final(A, 10,5);
```

Tato funkce zjistí počet vstupních parametrů přes nargin, a pak provede opatření, aby předala vstupní parametry funkci MojeMilaFunkce správně. Tato funkce také maže ostatní menší plošné fleky v matici.

Funkce MojeMilaFunkce (Příloha C)

Funkce dokáže po zadání vstupního parametru reprezentovaného číselnou hodnotou nahradit všechny prvky větší než zadaná hodnota číslem jedna. Všechny prvky menší než zadaná vstupní hodnota se nahradí nulou. Vzniká tak nová matice čísel znázorňující pouze určitou hladinu intenzity vyzařování větší než zadané číslo.

Funkce však dokáže rozlišovat až pět zadaných vstupních parametrů. Všech pět parametrů musí být do příkazu v Matlabu zadáno sestupně. Při zadání druhého vstupního parametru se čísla větší než tento parametr přepíší na dvojky. Čísla větší než zadaný první parametr zůstanou jedničkami. Takto lze pokračovat až pro pět vstupních parametrů. Díky tomu lze získat matici s až šesti různými prvky reprezentující nulou černou barvu. Jednička až pětka určuje výskyt plazmatu v závislosti na velikosti vstupních parametrů. Jednička znázorňuje místa plazmatu s největší intenzitou vyzařování fotonů. Díky tomu lze určit místa s vyšší teplotou, která jsou u kontaktů.

Funkce OneFlekToRuleThemAll (Příloha D)

Volá se jako druhá v pořadí. Vytvoří se v ní proměnná „Obsahy“ a „PoradiFleku“ s nulovými hodnotami. Cyklus `for` projíždí matici, jakmile narazí na první bod nějakého fleku, inkrementuje proměnnou PoradiFleku o jedna. Pak uloží souřadnice bodu v podobě vektorů x a y, kde indexem těchto vektorů je proměnná PoradiFleku. Poté funkce OneFlekToRuleThemAll zavolá funkci **MapovaniFleku (Příloha E)**, které předá souřadnice x a y bodu a také hodnotu proměnné „Obsahy“ s indexem „PoradiFleku“. Zároveň také zikrementuje proměnnou „PoradiFleku“ a vynuluje následující prvek vektoru „Obsahy“.

MapovaniFleku nejprve inkrementuje hodnotu proměnné „Obsahy“ o jedna. Poté uloží na souřadnice zjištěného bodu -1, potom zkontroluje všechny body kolem bodu (nad, pod, vpravo, vlevo, nikoli však úhlopříčně!). Pokud na nějakém místě najde číslo větší než 0, zavolá sama sebe na číslo s novými souřadnicemi. Tomu se říká rekurzivní funkce. Tato funkce se volá opakovaně až do chvíle, kdy už v okolí fleku nejsou žádná čísla větší než nula, což znamená, že byly prozkoumány všechny body fleku. V proměnné „Obsahy“ na pozici „PoradiFleku“ pak je geometrický obsah prozkoumaného fleku.

Funkce OneFlekToRuleThemAll pokračuje dále ve svém cyklu `for` s novou maticí, která byla vytvořená funkcí MapovaniFleku. V této nové matici je právě prozkoumaný flek celý nahrazen -1. Vzhledem k tomu, že OneFlekToRuleThemAll je naprogramovaná na detekci kladných čísel v matici, tak pokračuje dál, dokud nenarazí na další flek. To se děje tak dlouho, dokud není celá matice prozkoumána.

Funkce LordOfTheFlek (Příloha F)

Funkce cyklem `for` projede vektor obsahů a najde nejvyšší číslo, pak uloží jeho index. Tím vlastně zjistíme, který z nalezených fleků v matici je ten největší. Na výstup funkce zapíše x a y souřadnice prvního bodu největšího fleku.

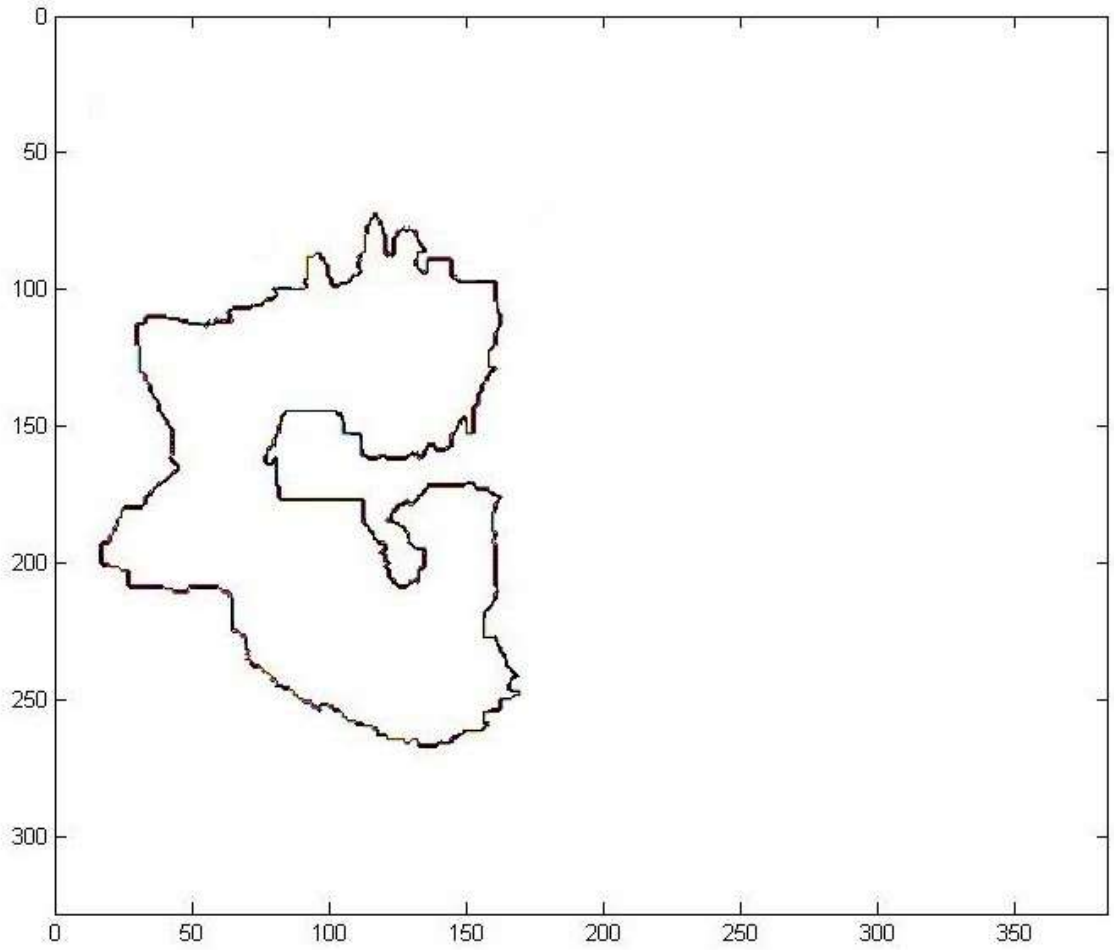
Funkce ConsumeTheMeek (Příloha G)

Do této funkce se vkládají jako vstupní parametry matice původní, která vznikla po aplikaci funkce MojeMilaFunkce, matice s nulami a mínus jedničkami, kterou vytvořila funkce OneFlekToRuleThemAll a souřadnice x a y, které určují první bod největšího fleku. Funkce ConsumeTheMeek vytvoří matici nul s rozměry stejnými, jako původní matice, a zavolá funkci RekonstrukceFleku, které předá všechny své vstupy.

Funkce RekonstrukceFleku (Příloha H)

Funkce, stejně jako MapovaniFleku ohraničuje celou matici dokola nulami, kvůli problémům s pamětí - mohla by se odkazovat na neexistující prvek matice. Má x a y souřadnice prvního bodu největšího fleku. Otestuje, jestli je menší než nula. Pokud ano, tak to přepíše mínus jedničku na původní číslo z matice vzniklé po aplikování MojeMilaFunkce a otestuje všechny čtyři kolem. Pokud na nějakém místě najde číslo menší než nula, tak zavolá sama sebe se souřadnicemi čísla, které našla. Na konci funkce je největší flek s hodnotami z MojeMilaFunkce a malé fleky tvořené -1.

Zde se proces vynořuje zpět do funkce Final, ve které dojde ke smazání všech menších fleků jednoduchým cyklem `for`, který hodnoty menší než nula (malé fleky jsou tvořeny -1) nahradí nulou. Získali jsme tedy obraz vyfiltrovaný od jisker a šumu a můžeme vykreslit jednu ekvidenzitu (viz obr. 14).



Obrázek 14: Výsledný ekvidenzitogram ohraničující plazma

Tento postup je extrémně náročný na operační paměť počítače. Rekurzivní funkce jsou pomalé a při obrovských rozměrech matic - řádově stovky sloupců a stovky řádků dochází k zaplnění operační paměti a následně k chybě celého Matlabu. Pro další zkoumání dané problematiky je potřeba naprogramovat nové funkce, které budou méně náročné na paměť počítače. Jednou z možných cest by bylo postupovat přes menší submatice, které budou sloužit k detekci sousedících bodů.

4.4 Demonstrační úloha

V rámci vytvoření demonstrační úlohy je níže vytvořeno zadání, které bude sloužit ostatním studentům společně s popisem úlohy k provedení popsaného měření pod dohledem vyučujícího.

Zadání demonstrační úlohy

1. Zhotovte kamerový záznam oblouku pohybujícího se uvnitř elektrického přístroje.
2. Zpracujte záznam a pomocí programu vytvořte ekvidenzity.
3. Ze získaných ekvidenzit stanovte hranici oblouku.
4. Závěrem proveďte zhodnocení získaných výsledků.

Součástí laboratorního měření je tedy kamera Photron Fastcam SA-X2 a libovolný jednofázový nízkonapěťový jistič, z něhož byl sejmut boční kryt tak, aby byla vidět zhášecí komora se žebrováním. Jistič však musí být plně funkční, to znamená, že musí jít pomocí spínače sepnout a rozepnout kontakty proudovodné dráhy. Při prováděném měření dne 21. 2. 2014 ve zkušebně v objektu Technická 14 byla kamera umístěna na stativu ve vzdálenosti 1,1 metru od jističe. Na kameře byl nastaven objektiv 180 mm a kvůli ostrosti byly vloženy předřadné kroužky 1 a 3. Na kameře byla kvůli přesvětlení získaného záznamu nastavena clona 2,8 a před objektivem bylo navíc umístěno svářečské sklíčko číslo 11. Oblouk je totiž silným zdrojem fotonů. Nastavení samotného záznamu proběhlo v rozlišení videa 384 x 424 při počtu 50 000 snímků za sekundu. Závěrka byla nastavena na 10 mikrosekund. Informace o nastaveném proudu a napětí na kontaktech jističe jsou na obrázku 15.

Obrázek 15: Průběh napětí a proudu během pokusu

Z pořízeného videa byl vytvořen snímek ve formátu .bmp (viz obr. 10), ze kterého byl pomocí výpočetního programu MATLAB vytvořen ekvidenzitogram (viz obr 11). Tohoto

jednoduchého ekvidenzitogramu se dá dosáhnout pomocí příkazu vytvoření vrstevnic na zpracovávaném snímku.

Tabulka 1: Tabulka s parametry požadovaného laboratorního pokusu

Vzdálenost jističe od objektivu kamery	110 cm
Clona kamery	2,8
Clona	Svářečské sklo číslo 11
Počet snímku za sekundu	50 000
Závěrka	10 µs
Rozlišení videa	384x424
Objektiv	180 mm
Nastavovací kroužky	1; 3

5 ZÁVĚR

V první části byl popsaný elektrický oblouk jako ustálený elektrický výboj, který nepotřebuje ke své existenci zdroj ionizovaných částic. Skládá se z plazmatu, které kvůli ionizačním a rekombinačním procesům dosahuje vysokých teplot. Plazma se skládá z kladně a záporně nabitých částic, díky čemuž reaguje na elektromagnetické pole. Kvůli vysoké teplotě má nežádoucí účinky na elektrody a tedy i na kontakty ve spínacích přístrojích. V minulosti se k pozorování plazmatu používaly fotografické filmy, které se zpracovávaly fotograficko-chemicky, fotograficko-fotometricky anebo fotograficko-mechanicky. Z těchto uvedených metod se nejpraktičtěji jevila fotograficko-fotometrická metoda, ať už s použitým registračním zařízením, anebo bez něj. Praktické využití mělo i řešení firmy AgfaGewaert zvané Agfacontour. Výsledky totiž vyhovovaly i náročnějším požadavkům. Zmiňované metody jsou z dnešního pohledu zastaralé, protože moderní technika dovoluje digitální zpracování snímků. Tyto snímky jsou zpracovány pomocí výkonného stolního počítače výpočetním programem.

V praktické části byla popsána metoda vytváření čar spojujících body se stejnou intenzitou vyzařování, neboli ekvidenzit, pomocí práce s maticemi v programovém systému Matlab. Ten chápe bitmapu jako matici bodů zaplněnou čísly. Dále byl vytvořen ekvidenzitogram na vybraném snímku ve formátu bitmapy nahrané do Matlabu.

Program v Matlabu vytváří vrstevnice osvícení čipu kamery - ekvidenzity. Program eliminuje malé body a vybírá pouze ekvidenzitu s největší uzavřenou plochou. Ekvidenzitu s vyšším potenciálem pak vybírá pak pouze na základě nižší ekvidenzity. Všechny ekvidenzity se skládají zpět do jedné matice, která tvoří výsledek výpočtu v maticovém tvaru.

Jako závěrečná část práce byla navržena demonstrační úloha sloužící k praktické demonstraci metody ekvidenzit pro účely výuky. Ve formátu zadání úlohy a poznámek pro vyučujícího byl popsán provedený postup měření, z něhož byl následným zpracováním vyhotoven výše popsaný ekvidenzitogram.

Cílů daných zadáním bylo dosaženo. Další práce by měla pokračovat tracingem - vektorizací získaných ekvidenzit pomocí splajnů ať už plošné (2D) nebo prostorové (3D) projekci.

LITERATURA

GROSS, Boleslav a Otto HAVELKA. *Elektrické přístroje II*. 2 .vyd. Brno: Rektorát Vysokého učení technického v Brně, 1980.

GROSS, Boleslav. *Knižnice odborných a vědeckých spisů vysokého učení technického v Brně: Ekvidenzitometrická diagnostika plazmatu spínacího oblouku I.* 1. vyd. Brno: Rektorát Vysokého učení technického v Brně, 1989. ISBN 80-214-0091-9.

AUBRECHT, Vladimír, B. GROSS a E.T. PROTASEVICH. *Spectral and Equidensitometry Diagnostics of Electric Arc Plasma*. Tomsk, 1999. ISBN 189826444.

Photron [online]. USA, 2013 [cit. 2013-12-14]. Dostupné z: http://www.photron.com/index.php

TÁRSADALMI SZOLGÁLTATÓ NONPROFIT KFT. *Digitális Tankönyvtár* [online]. Budapest, 2012, 29.2.2012 [cit. 2013-12-17]. Dostupné z: http://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop425/0048_VIVEM174EN/ch02s02.html

CITACE

1. **GROSS, Boleslav a HAVELKA, Otto.** *ELEKTRICKÉ PŘÍSTROJE II.* Brno : Vysoké učení technické v Brně, 1980.

2. **GROSS, Boleslav.** *KNIŽNICE: Edvidenzitometrická diagnostika plazmatu spínacího oblouku I.* Brno : Vysoké učení technické v Brně, 1989. 80-214-0091-9.

PŘÍLOHA A

http://www.photron.com/datasheet/FASTCAM_SA-X2.pdf

http://www.mathworks.com/products/matlab/

PŘÍLOHA B

```
function [ Vystup ] = final( matice, U1, U2, U3, U4, U5 )
%UNTITLED3 Summary of this function goes here
%   Detailed explanation goes here

%A = matice;
A = rgb2gray(matice);



ni = nargin;  %Zjisteni poctu vstupnich argumentu
if ni < 2,
    Vystup = 'Prilis malo vstupnich argumentu';



    %Zajisteni spravneho fungovani funkce podle poctu vstupnich argumentu

elseif ni == 6,
    uroven1 = U1;
    uroven2 = U2;
    uroven3 = U3;
    uroven4 = U4;
    uroven5 = U5;

    B = MojeMilaFunkce( A, uroven1, uroven2, uroven3, uroven4, uroven5);

elseif ni == 5,
    uroven1 = U1;
    uroven2 = U2;
    uroven3 = U3;
    uroven4 = U4;

    B = MojeMilaFunkce( A, uroven1, uroven2, uroven3, uroven4);

elseif ni == 4,
    uroven1 = U1;
    uroven2 = U2;
    uroven3 = U3;

    B = MojeMilaFunkce( A, uroven1, uroven2, uroven3);

elseif ni == 3,
    uroven1 = U1;
    uroven2 = U2;

    B = MojeMilaFunkce( A, uroven1, uroven2);

elseif ni == 2,
    uroven1 = U1;

    B = MojeMilaFunkce( A, uroven1);

end



[ C, obsahy, X, Y] = OneFlekToRuleThemAll( B );

[poradi, x, SouradniceX, SouradniceY] = LordOfTheFlek( obsahy, X, Y );

D = ConsumeTheMeek( C, B, SouradniceX, SouradniceY );

V = size(D);
for j = 1 : V(2)
    for i = 1 : V(1)
        if D(i, j) < 0;
            D(i, j) = 0;
```

```
        end
    end
end

Vystup = D;

end
```

PŘÍLOHA C

```
function [ vysledek ] = MojeMilaFunkce( matice, uroven1, uroven2, uroven3, uroven4, uroven5)
%Parametry urovni je nutno zadavat sestupne podle velikosti. Tzn.
%uroven1>uroven2>uroven3>uroven4>uroven5.

%   Detailed explanation goes here
ni = nargin;  %Zjisteni poctu vstupnich argumentu

if ni < 2,
    vysledek = 'Prilis malo vstupnich argumentu';

    %Zajisteni spravneho fungovani funkce podle poctu vstupnich argumentu

elseif ni == 5,
    uroven5 = uroven4;
elseif ni ==4,
    uroven5 = uroven3;
    uroven4 = uroven3;
elseif ni ==3,
    uroven5 = uroven2;
    uroven4 = uroven2;
    uroven3 = uroven2;
elseif ni ==2,
    uroven5 = uroven1;
    uroven4 = uroven1;
    uroven3 = uroven1;
    uroven2 = uroven1;
end




M = matice;

Velikost = size(M);                     %Zjisteni velikosti vstupni matice projete rgb2gray

for j = 1 : Velikost(2)             %Zanorene cykly for, projizdejici postupne celou matici
    for i = 1 : Velikost(1)

        if M(i,j)>uroven1;          %Jestlize je cislo na dane pozici vyssi nez uroven jedna,
ulozi se jednicka
            M(i,j) = 1;
        elseif M(i,j)>uroven2;      %To samy s dvojku atd.
            M(i,j) = 2;
        elseif M(i,j)>uroven3;
            M(i,j) = 3;
        elseif M(i,j)>uroven4;
            M(i,j) = 4;
        elseif M(i,j)>uroven5;
            M(i,j) = 5;
        else
            M(i,j) = 0;
        end
    end

end
vysledek = M;                                           %privedeni nove matice na vystup
end
```

PŘÍLOHA D

```
function [ vysledek, obsahy, X, Y] = OneFlekToRuleThemAll( Vstup )
%UNTITLED2 Summary of this function goes here
%   Detailed explanation goes here

Velikost = size(Vstup);
obsahy(1) = 0;
PoradiFleku = 0;



for j = 1 : Velikost(2)
    for i = 1 : Velikost(1)
        if Vstup(i,j)>0;
            PoradiFleku = PoradiFleku +1;
            obsahy(PoradiFleku + 1) = 0;
            X(PoradiFleku) = i;
            Y(PoradiFleku) = j;
            [ Vstup, obsahy(PoradiFleku)] = MapovaniFleku( Vstup, i, j, obsahy(PoradiFleku));
        end
    end
end

X;
Y;
vysledek = Vstup;
obsahy;
end
```

PŘÍLOHA E

```
function [ vysledek, obsahy] = MapovaniFleku( KAREL, k, l, obsahy)
%UNTITLED2 Summary of this function goes here
%   Detailed explanation goes here

obsahy = obsahy + 1;

Velikost = size(KAREL);
M = zeros(Velikost(1)+2,Velikost(2)+2);

for j = 2 : (Velikost(2)+1)
    for i = 2 : (Velikost(1)+1)
        M(i,j) = KAREL(i-1,j-1);
    end
end

if M(k+1,l+1)>0;
    KAREL(k,l)=-1;
    M(k+1,l+1)=-1;
    if M(k+2,l+1)>0;
        [KAREL, obsahy] = MapovaniFleku(KAREL, k+1, l, obsahy);
        for j = 2 : (Velikost(2)+1)
            for i = 2 : (Velikost(1)+1)
                M(i,j) = KAREL(i-1,j-1);
            end
        end
    end

    if M(k,l+1)>0;
        [KAREL, obsahy] = MapovaniFleku(KAREL, k-1, l, obsahy);
        for j = 2 : (Velikost(2)+1)
            for i = 2 : (Velikost(1)+1)
                M(i,j) = KAREL(i-1,j-1);
            end
        end
    end
    if M(k+1,l+2)>0;
        [KAREL, obsahy] = MapovaniFleku(KAREL, k, l+1, obsahy);
        for j = 2 : (Velikost(2)+1)
            for i = 2 : (Velikost(1)+1)
                M(i,j) = KAREL(i-1,j-1);
            end
        end
    end
    if M(k+1,l)>0;
        [KAREL, obsahy] = MapovaniFleku(KAREL, k, l-1, obsahy);
        for j = 2 : (Velikost(2)+1)
            for i = 2 : (Velikost(1)+1)
                M(i,j) = KAREL(i-1,j-1);
            end
        end
    end

end

vysledek = KAREL;
end
```

PŘÍLOHA F

```
function [poradi, x, SouradniceX, SouradniceY ] = LordOfTheFlek( obsahy, X, Y )
%UNTITLED Summary of this function goes here
%   Detailed explanation goes here

x = 0;
delka = size(obsahy);

for i = 1 : delka(2)
    if x < obsahy(i)
        x = obsahy(i);
        poradi = i;
    end
end



x;
poradi;
SouradniceX = X(poradi);
SouradniceY = Y(poradi);

end
```

PŘÍLOHA G

```
function [ Matice ] = ConsumeTheMeek( Vstup, PuvodniMatice, X, Y )
%UNTITLED2 Summary of this function goes here
%   Detailed explanation goes here

Velikost = size(Vstup);
M = zeros(Velikost(1),Velikost(2));
MinusJednicky = Vstup;



% for j = 1 : Velikost(2)
%     for i = 1 : Velikost(1)
%         if Vstup(i,j)<0;
%             if i == X;
%                 if j == Y;
%                     [ M ] = RekonstrukceFleku(MinusJednicky, PuvodniMatice, i, j );
%                 end
%             end
%         end
%     end
% end

[ M ] = RekonstrukceFleku(MinusJednicky, PuvodniMatice, X, Y );

Matice = M;

end
```

PŘÍLOHA H

```
function [ Vysledek ] = RekonstrukceFleku( MinusJednicky, PuvodniMatice, k, l )
%UNTITLED2 Summary of this function goes here
%   Detailed explanation goes here

Velikost = size(MinusJednicky);
M = zeros(Velikost(1)+2,Velikost(2)+2);

for j = 2 : (Velikost(2)+1)
    for i = 2 : (Velikost(1)+1)
        M(i,j) = MinusJednicky(i-1,j-1);
    end
end

if M(k+1,l+1)<0;
    MinusJednicky(k,l)=PuvodniMatice(k,l);
    M(k+1,l+1)=PuvodniMatice(k,l);
    if M(k+2,l+1)<0;
        [MinusJednicky] = RekonstrukceFleku(MinusJednicky, PuvodniMatice, k+1, l);
        for j = 2 : (Velikost(2)+1)
            for i = 2 : (Velikost(1)+1)
                M(i,j) = MinusJednicky(i-1,j-1);
            end
        end
    end

    if M(k,l+1)<0;
        [MinusJednicky] = RekonstrukceFleku(MinusJednicky, PuvodniMatice, k-1, l);
        for j = 2 : (Velikost(2)+1)
            for i = 2 : (Velikost(1)+1)
                M(i,j) = MinusJednicky(i-1,j-1);
            end
        end
    end
    if M(k+1,l+2)<0;
        [MinusJednicky] = RekonstrukceFleku(MinusJednicky, PuvodniMatice, k, l+1);
        for j = 2 : (Velikost(2)+1)
            for i = 2 : (Velikost(1)+1)
                M(i,j) = MinusJednicky(i-1,j-1);
            end
        end
    end
    if M(k+1,l)<0;
        [MinusJednicky] = RekonstrukceFleku(MinusJednicky, PuvodniMatice, k, l-1);
        for j = 2 : (Velikost(2)+1)
            for i = 2 : (Velikost(1)+1)
                M(i,j) = MinusJednicky(i-1,j-1);
            end
        end
    end

end

Vysledek = MinusJednicky;
end
```