

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

EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ VLASTNOSTÍ ZHÁŠECÍ KOMORY JISTIČE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

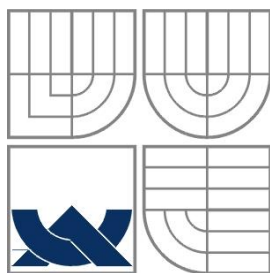
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

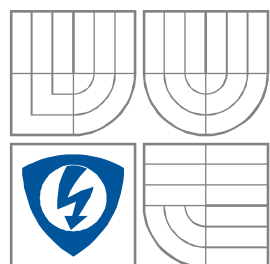
Petr Kadrnka

BRNO 2010



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

EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ VLASTNOSTÍ ZHÁŠECÍ KOMORY JISTIČE

EXPERIMENTAL VERIFICATION OF PROPERTIES OF CIRCUIT BREAKER QUENCHING CHAMBER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

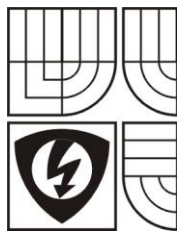
Petr Kadrnka

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jiří Valenta, Ph.D.

BRNO, 2010



**VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ**

**Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Silnoprúdová elektrotechnika a výkonová elektronika

Student: Kadrnka Petr

Ročník: 3

ID: 83669

Akademický rok: 2009/2010

NÁZEV TÉMATU:

Experimentální ověření vlastností zhášecí komory jističe

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Popište princip funkce kovové roštové zhášecí komory jističe.
2. Navrhněte schéma zapojení pro měření potřebného napětí na vznik katodových a anodových skvrn.
3. Pro plechy s různými vlastnostmi proveďte potřebná měření včetně synchronního snímání rychlostní kamerou a vyhodnoťte je.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Termín zadání: 1.10.2009

Termín odevzdání: 27.05.2010

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

doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor semestrální práce nesmí při vytváření semestrální 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 § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

Abstrakt

Jističe jsou schopny zapínat a samočinně vypínat i zkratové proudy, až do mezí svých vypínacích schopností. Při rozpojení kontaktů, ve spínacích přístrojích, dochází ke vzniku elektrického oblouku, který je potřeba rychle uhasit. Chování elektrického oblouku, ve spínacích elektrických přístrojích, je ovlivňováno několika různými vlivy. Musí se vzít v úvahu dynamika plazmy, tekoucí proud na elektrodách, tekoucí proud plazmou, magnetické pole vytvořené protékajícím proudem.

Tato práce se snaží popsat chování elektrického oblouku ve zhášecí komoře. Na provedených experimentálních pokusech se pokouší vysvětlit, zpřesnit a důkladněji pochopit pohyby a vlastnosti elektrického oblouku v kovové zhášecí kovové komoře jističe.

Abstract

The circuit breakers are able to switch on and off automatically either the short circuit currents up to the limits of their breaking capacity. While the disconnection of the contacts in the switching devices are generated by the arc then it is needed to put it out quickly. A manner of the arcing in the electrical switching devices is influenced by several different factors. It must be taken into account the dynamics of a plasma, a current flowing in the electrodes, a flowing stream in a plasma and a magnetic field generated by a flowing current.

This paper is devoted to describe the manner of the arcing in the arc chamber. The experiments carried out in an experimental way attempt to explain, specify and thoroughly comprehend the movements and the characteristics of the arc in a metal arc and in a metal enclosure circuit breaker.

Klíčová slova

Jistič; oblouk; elektrický oblouk; pata oblouku; zhášecí komora; deionový plech

Keywords

Circuit breaker; arc; electric arc; arc root; quenching chamber; deion plate

Bibliografická citace

KADRNKA, P. *Experimentální ověření vlastností zhášecí komory jističe*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 40 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jiří Valenta, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci, na téma *Experimentální ověření vlastností zhášecí komory jističe*, 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. Jiřímu Valentovi, Ph.D., za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

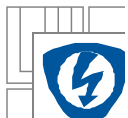
V Brně dne

Podpis autora



OBSAH

1 ÚVOD	10
2 JISTIČE	11
2.1 POPIS FUNKCE A MECHANISMU JISTIČE	11
2.2 VZNIK OBLOUKU NA KONTAKTECH JISTIČE.....	11
2.2.1 ZAPÍNÁNÍ	11
2.2.2 VYPÍNÁNÍ.....	12
3 FUNKCE KOVOVÉ ZHÁŠECÍ KOMORY.....	13
4 OBLOUK VE ZHÁŠECÍ KOMOŘE JISTIČE.....	18
4.1 ELEKTRICKÝ OBLOUK A JEHO VLASTNOSTI	18
4.2 KATODA A KATODOVÝ PROSTOR	19
4.3 ANODA A ANODOVÝ PROSTOR	19
4.4 TERMICKÁ ROVNOVÁHA	19
4.5 PLAZMA	20
4.6 REKOMBINACE	21
5 EXPERIMENTÁLNÍ ZKOUMÁNÍ OBLOUKU.....	22
5.1 NĚKTERÉ ASPEKTY CHOVÁNÍ OBLOUKU V KOMOŘE.....	22
5.1.1 EXPERIMENTÁLNÍ NASTAVENÍ.....	22
5.1.2 VÝSLEDKY	23
5.1.3 OBLOUKOVÉ PATY	25
5.2 PROCES DĚLENÍ OBLOUKU MEZI PLECHY KOMORY	26
6 JISTIČE MODEION	31
6.1 KOMPAKTNÍ ŘADY JISTIČŮ MODEION.....	31
6.2 MODEION BD250.....	32
7 SCHÉMA ZAPOJENÍ	33
8 MĚŘENÍ ELEKTRICKÉHO OBLOUKU	34
8.1 PŘÍPRAVA NA MĚŘENÍ.....	34
8.2 NAMĚŘENÉ PRŮCHODY ELEKTRICKÉHO OBLOUKU ROŠTOVÝM PLECHEM	34
9 ZÁVĚR.....	38
LITERATURA	39
PŘÍLOHA A – KALIBRACE MĚŘICÍHO ZAŘÍZENÍ	40

	ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií Vysoké učení technické v Brně	8
SEZNAM OBRÁZKŮ <i>Obr.3-1 Průrazné napětí obloukové dráhy po nule proudu při studené katodě [1]13</i> <i>Obr.3-2 Zhášecí komora s kovovým roštem[1]13</i> <i>Obr.3-3 Oblouk na ocelové desce roštu zhášecí komory [1]15</i> <i>Obr.3-4 Desky ocelového roštu zhášecí komory s výřezy [1]16</i> <i>Obr.5-1 Princip dělení oblouku na kovových plechách [7]22</i> <i>Obr.5-2 a) Zkušební přepínač pro výzkum elektrického oblouku a b) plech se všemi rozměry v mm [7]23</i> <i>Obr.5-3 Oscilogramy celkového proudu, proudu procházejícího plechem a napětí oblouku [7] .23</i> <i>Obr.5-4 Snímky z vysokorychlostní kamery [7]24</i> <i>Obr. 5-5 Snímky katody (a) a anody (b) plech po dvou experimentech [7]25</i> <i>Obr.5-6 Oscilogramy celkového proudu, proudu tekoucího skrze kovový plech a obloukové napětí [8]26</i> <i>Obr.5-7 Snímky z vysokorychlostní kamery k oscilogramu na Obr. 5-6b [8]27</i> <i>Obr.5-8 Oscilogram celkového proudu a obloukového napětí [8]28</i> <i>Obr.5-9 Snímky z vysokorychlostní kamery k oscilogramu na Obr. 5-8 [8]29</i> <i>Obr. 6-1 Jistič Modeion BD250 [4]32</i> <i>Obr.7-1 Orientační schéma zapojení pracoviště.....33</i> <i>Obr.8-1 Zaznamenané průběhy napětí a proudu při měření oblouku na plechu34</i> <i>Obr.8-2 Zaznamenané průběhy napětí a proudu při měření oblouku na plechu35</i> <i>Obr.8-3 Zaznamenané průběhy napětí a proudu při měření oblouku na plechu36</i> <i>Obr.8-4 Zaznamenané průběhy napětí a proudu při měření oblouku na plechu37</i>		



SEZNAM TABULEK

Tab. 4-1 Přehled pochodů mezi dvěma částicemi20

Tab.6-1 Parametry jističe Modeion BD25032



1 ÚVOD

Jističe jsou schopny zapínat a samočinně vypínat i zkratové proudy až do mezí svých vypínacích schopností. Jejich konstrukce však nedovoluje příliš časté spínání. Proto jsou vhodné pro obvody s malou hustotou spínání, v nichž se musí při poruchách vypínat velké zkratové proudy. Jsou to např.: vývody generátorů se samočinnou synchronizací, vývody transformátorů atd. Jističe jsou samočinné vypínače vybavené alespoň jednou nadproudovou spouští.

Každý jistič musí mít tři části: spínací ústrojí – zpravidla to jsou dvě sady kontaktů (hlavní a opalovací); ovládací ústrojí – se skládá z pohonu a volnoběžky (umožňuje samočinné vypnutí jističe při působení jističe); jistící ústrojí – obsahuje nadproudové spouště, nebo relé, které vybavují při svém působení volnoběžku. Kromě uvedených hlavních částí má jistič ještě pomocné kontakty, určené ke spínání pomocných obvodů.

Při rozpojení kontaktů ve spínacích přístrojích dochází ke vzniku elektrického oblouku, který je potřeba rychle uhasit. Elektrický oblouk je samostatný výboj, hořící v plynu za normálního, nebo zvýšeného tlaku, schopný samostatné existence libovolnou dobu, pokud jej nepřerušíme vhodným zásahem do jeho mechanismu.

Tato práce se zabývá chováním elektrického oblouku ve zhasací komoře jističe. Vlastní měření elektrického oblouku, pohyb oblouku na plechách zhasací komory jističe, pořízení snímků vysokorychlostní kamerou a další měření mělo být součástí práce. Vzhledem k tomu, že došlo k požáru laboratoří elektrických přístrojů, kde se nacházela měřicí stolice, která neshořela, ale popílek z hoření v laboratoři byl napadaný ve všech částech měřicího přístroje. Z tohoto důvodu byla změřena pouze malá část pokusů. Proto jsme se s vedoucím práce dohodli na drobné změně, která zahrnuje rešerši literatury, zabývající se danou problematikou vytváření elektrického oblouku.



2 JISTIČE

2.1 Popis funkce a mechanismu jističe

Silnoproudé obvody ovládáme a současně zajišťujeme před nežádoucími účinky nadproudu nebo podpětí samočinnými vypínači neboli jističi. Samočinný vypínač slučuje do jednoho celku funkci vypínače a funkci pojistky. Zpravidla jde o přístroj s velkým vypínacím proudem (20 až 100násobku proudu jmenovitého), u něhož se při zapínání napne vypínací pružina, která pak stále tlačí pohyblivé kontakty do vypnuté polohy. Je proto nutné kontakty v zapnuté poloze zajistit vhodným zámkem. Nastane-li v zařízení porucha, při níž má jistič obvod vypnout, uvolní se působením spouště zámek a vypínač, působením vypínací pružiny, okamžitě vypne.

Vypínače velkých výkonů a především vypínače všech vysokých napětí jsou téměř bez výjimky, jističi. Název jistič se však začal používat jako pojmenování užšího významu jen pro takto provedené vypínače nízkého napětí, ať už jde o vypínače s magnetickým zhasením oblouku, nebo s volným zhasením oblouku.

Aby vypínač mohl působit jako jistič, musí mít, kromě kontaktní soustavy s příslušným ovládáním, také zámek a spoušť.

Zámek vypínače je mechanismus, který drží kontaktní ústrojí samočinného vypínače v zapnuté poloze proti síle vypínacích pružin. Zámek se vybavuje buď, ručně tlačítkem, nebo dálkově elektromagnetickou spouští. Aby spoušť nemusela být neúměrně velká, musí být síla, potřebná k vybavení zámku, malá. Zámky jsou jednoduché a složené. Principem jednoduchého zámku je buď západka, nebo prolomené páky. Zámekům složeným, vytvořeným spojením několika zámků jednoduchých, říkáme volnoběžky.

Spoušť je zařízení skládající se z proudové dráhy (vinutí) a z mechanismu. Mechanismus spouště se uvádí v činnost elektromagnetickým, nebo tepelným působením proudu a vybavuje zámek nebo volnoběžku jističe, převyší-li proud obvodu určitý násobek jmenovitého proudu, popřípadě klesne-li napětí obvodu pod určitou hodnotu.

2.2 Vznik oblouku na kontaktech jističe

2.2.1 Zapínání

Zapínací pochod je charakterizován přibližováním kontaktů spínače, na kterých se potenciální rozdíl rovná napětí zapínaného zdroje. Při přibližování kontaktů se zvětšuje intenzita pole v prostoru mezi kontakty, v určitém okamžiku dosáhne velikosti porovnatelné s elektrickou pevností prostředí, které je mezi kontakty.

Při dosažení průrazné intenzity elektrického pole je síla, způsobující urychlování elektronů tak velká, že kinetická energie urychleného elektronu je schopna vyvolat ionizaci atomu, na který urychlený elektron narazil. Protože celý děj probíhá v oblasti elektrického plazmatu, vznikne v prostoru mezi elektrodami zárodek koróny, který umožní vznik elektronové laviny, vznikne elektrický oblouk, který však trvá velmi krátkou dobu, dokud se přibližující elektrody nedotknou. Při vodivém spojení kontaktů oblouk zanikne.

Za předpokladu, že volná dráha elektronu ve vzduchu za normálního tlaku je řádově 10^{-3} mm, elektrická pevnost vzduchu je 3 kV/mm, vzdálenost elektrod je minimálně 100 volných drah (k



vytvoření elektronové laviny), vznikne oblouk při zapínání pouze při napětí na elektrodách vyšším než 300V.

Při nižším napětí na elektrodách vznikne při zapínání elektrický oblouk, jestliže po prvním dotyku kontaktů se tyto vlivem pružných sil odrazí a nastane-li kmitavý pohyb jednoho z kontaktů. V tomto případě může vzniknout elektrický oblouk s negativním vlivem na elektrody. Mechanismus vzniku oblouku v tomto případě je stejný, jako v případě oddalování kontaktů při vypínání.

Při odražení kontaktů vypínače, zapínajícího velký proud, může mít oblouk za následek svaření kontaktů a tím selhání vypínače při dalších spínacích pochodech.

2.2.2 Vypínání

V zapnutém stavu jsou kontakty vypínače navzájem přitlačovány silou kontaktní pružiny. Tato síla deformuje současně pružně a plasticky materiál v oblasti styku kontaktů. Proud neprochází celou plochou kontaktů, ale pouze určitým počtem mikroskopicky malých kontaktních plošek, následkem nerovnosti povrchu elektrod.

Během vypínacího pochodu se zmenšuje síla kontaktní pružiny, kontakty se pohybují v mezích pružné deformace materiálu, zmenšuje se velikost a počet bodových plošek. Vyrůstá kontaktní odpor, zvětšuje se ohřívání kontaktních můstků Joulovým teplem.

Jsou-li kontakty vyrobeny z materiálu s nízkou teplotou tavení (měď, stříbro), může v okamžiku rozpojování, vzniknout můstek z roztaveného kovu a oblouk vznikne stejným postupem jako v pojistce.

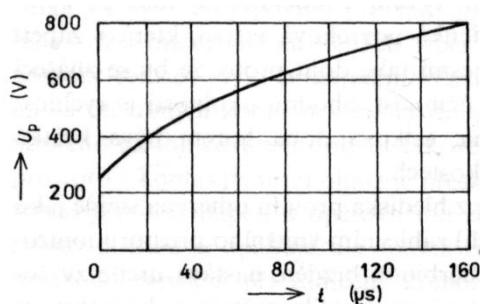
V případě, že kontakty jsou vyrobeny z materiálu s vysokou teplotou tavení (wolfram, hliník), nebo nevzniknou-li můstky z roztaveného kovu, je v místech posledního styku kov vyhřát na teplotu blízkou teplotě tavení a ve vyhřátých místech je energie, potřebná pro uvolnění elektronů, malá. Z elektrody, která je v okamžiku rozpojení kontaktů katodou, jsou elektrickým polem vytrhovány elektrony a po urychlení vytvoří elektronovou lavinu a vznikne oblouk.

V obou případech jsou elektrody na počátku vytváření náboje teplé, vznikne tedy oblouk i při nízkých napětích na elektrodách stejně, jako při vzniku oblouku v pojistce.

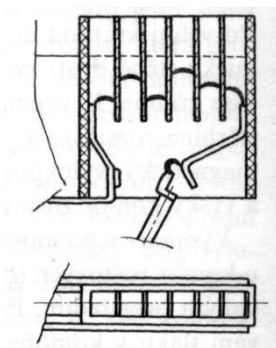
3 FUNKCE KOVOVÉ ZHÁŠECÍ KOMORY

Všechny kovové komory jsou provedeny jako komory roštové, a to tak, že do izolačního pouzdra jsou vložena kovová příčná žebra. Přesto můžeme u nich rozlišit dva typy, a to podle hustoty roštu, popř. jmenovitého napětí vypínače. Velmi hustý rošt používá magnetický vypínač na vysoké napětí, obvykle nazývaný, *Slepianův deionový vypínač*. Je to přístroj, patřící dnes už do minulosti. Komory s řidším rostem jsou naproti tomu nejběžnějším provedením zhášecí komory u magnetických vypínačů střídavého proudu na nízké napětí, ať už jde o stykače, nebo jističe.

Slepianův deionový vypínač vznikl v první polovině dvacátých let jako výsledek prvních systematictějších prací, věnovaných problematice zhášení oblouku střídavého proudu. **Slepian** zjišťoval průběh zotavení prostředí v prostoru krátkého oblouku za předpokladu, že elektroda, která se po komutaci proudu stává katodou, zůstává studenou. Za studenou považujeme v tomto případě elektrodu s teplotou, při níž je emise elektronů v nule proudu tak malá, že oblouk musí zapalovat přes mezifázi doutnavého výboje. V praxi tento pochod realizoval **Slepian** rychlým pohybem paty oblouku po elektrodě. Přitom naměřil časový průběh napětí U_p , které ještě nezpůsobí opětovné zapálení, reprodukováný na Obr. 3-1. Počáteční průrazné napětí prostředí mezi elektrodami, za těchto podmínek, je asi 250V (což řádově odpovídá velikosti katodového spádu doutnavého výboje). Další nárůst elektrické pevnosti probíhá již pomalu.



Obr.3-1 Průrazné napětí obloukové dráhy po nule proudu při studené katodě [1]



Obr.3-2 Zhášecí komora s kovovým rostem[1]

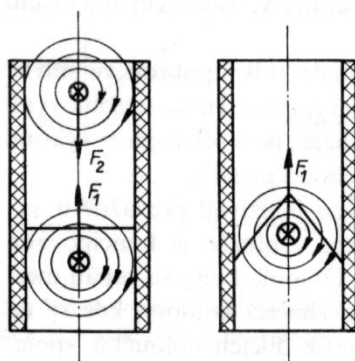
	ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií Vysoké učení technické v Brně	14
	Vypínač, konstruovaný podle tohoto poznatku, měl komoru složenou z měděných desek tlustých 1,5mm a oddělených vzduchovými mezerami, stejně širokými. Oblouk, který zapaloval na kontaktech pod komorou, byl vehnán magnetickým polem mezi tento rošt a roztržen na sérii obloučků, dlouhých 1,5mm. Tak se na délce necelého centimetru komory vytvořily tři katody. Protože při velké rychlosti oblouku by byla jeho dráha dlouhá a pro přímočarý pohyb komora nepřijatelně rozměrná, vložil do komory pomocná vinutí, která svým magnetickým polem uvedla oblouk do opakovaného pohybu po uzavřené kruhové dráze. Oblouk, když byl vehnán dovnitř roštu, nemohl jej již opustit a kroužil v něm až do nuly proudu, kdy zanikl. Toto zhášedlo zvládlo proudy větší než 20kA, což na tehdejší dobu byl mimořádný výkon. Následkem velké rychlosti nedocházelo k teplotnímu narušení roštu, i když doba hoření oblouku byla někdy delší než 10ms, nýbrž jen ke slabé dezoxidaci povrchu. Počet desek roštu byl vždy, vzhledem k napětí obvodu, volen tak, aby oblouk bezpečně uhasl. Na každé desce se ihned po nule proudu vytvoří prostředí s průrazným napětím asi 250 V rychleji, než probíhá nárůst čela zotaveného napětí. Nejmenší napětí, které by mohlo vyvolat opětovné zapálení oblouku, přesahuje na každý centimetr délky roštu hodnotu $3 \times 250 = 750$ V. Uvážíme-li, že velký odpor oblouku a zbytková vodivost výbojové dráhy v nule proudu potlačí, resp. utlumí kmity zotaveného napětí, přeruší toto zařízení oblouk v případech, kdy efektivní napětí nepřestoupí velikost $750/\sqrt{2} \approx 500$ V/cm. To je nejvyšší teoretická hodnota za předpokladu, že se zotavené napětí rozdělí na všechny desky roštu rovnoměrně. Následkem různosti vlastních kapacit jednotlivých desek navzájem, a vzhledem k uzemněné konstrukci, nedochází ve skutečnosti k jeho rovnoměrnému rozdělení. Mezery mezi krajními žebry nesou i několikanásobně větší potenciální rozdíl, než je střední hodnota, daná velikostí napětí a počtem mezer. Naopak mezi středními deskami se napěťové zatížení dosti zmenšuje. Stíněním roštu, proti zemi kovovým krytem, lze dosáhnout podstatné úpravy, sotva však úplné rovnoměrnosti. Proto i Slepian používal ve svém vypínači, místo teoretických 170V na 1 dílčí oblouk, pouze 130V, tj. asi 400 V na centimetr délky komory. Takovým způsobem sestavil vypínače až do napětí 20kV. Slepianova konstrukce, i když ve své době znamenala velký pokrok ve stavbě vypínačů vysokého napětí, byla rozměrná a nákladná. Magnetické vypínače vysokého napětí se štěrbínovými komorami, vyvinuté v pozdějších létech a dodnes vyráběné, jsou při stejném výkonu menší, lehčí a levnější. Vypínač deionový zatlačily zcela do pozadí. Kovové komory s jednoduchým kovovým rostem se používají převážně u vypínačů nízkého napětí na střídavý proud. Konstrukce vypínače je koncipována podobně jako v případě izolačních roštových komor. Oblouk, který se zapálí mezi oddalujícími se kontakty, se vyfoukne po různých do zhášecí komory, kde se na příčně umístěných kovových deskách rozdělí na několik dílčích obloučků, spojených do série (Obr. 3-2). Počet desek neurčuje u přístrojů nízkého napětí jen velikost napětí přerušovaného obvodu, ale i mnoho jiných činitelů. Aby oblouk uhasl uvnitř komory a neunikal při poměrně malé výšce komory ven, nemůže být rychlost vyfukování příliš velká. Proto nelze předpokládat studenou katodu, opětovné zapálení přes doutnavý výboj, a tedy počáteční průrazné napětí vyšší, než odpovídá katodě s tepelnou emisí elektronů. Počet desek pro dané napětí je pak téměř o řád větší, v porovnání se Slepianovým vypínačem. Velký počet desek vede, avšak při malých rozměrech vypínače, k úzkým štěrbínám. Hustý rošt pak představuje velké zmenšení průřezu, kterým unikají obloukové plyny z prostoru kontaktů. Aby vznik tlakových rozdílů, jako následek náhlého vzrůstu aerodynamického odporu v cestě unikajících obloukových plynů, nezabránil vniknutí oblouku mezi desky roštu, je zapotřebí magnetického	



pole určité intenzity. To předpokládá vhodně dimenzovanou vyfukovací soustavu s pólovými nástavci. Zde se však setkáváme s obtížemi.

Rozsah proudů, které vypínač přerušuje, je velký, zvláště u jističů, kdy vypínací proud je (20 až 100násobkem) proudu jmenovitého. Zhášedlo musí přitom spolehlivě zvládnout i zlomky jmenovitého proudu. Dimenzujeme-li vyfukovací magnetickou soustavu tak, aby byla dostatečně účinná v oblasti malých proudů (kritických proudů), jsou jádro a pólové nástavce při nadproudech přesyceny a přestávají plnit svůj účel. Aby vyhovovaly úměrně v celém rozsahu vypínaných proudů, bylo by je nutné, stejně jako cívku, neúnosně předimenzovat.

Magnetická soustava je soustava s vlastní zhášecí energií. Pokud ji při rostoucím proudu neovlivní negativním způsobem vlastnosti použitého materiálu, (jako zmíněné přesycení železového obvodu), pak jeho účinek roste s proudem. Dlouholeté zkušenosti s takovými soustavami ukázaly, že při velkých proudech není zapotřebí v obvodech střídavého proudu složité zařízení, protože magnetické pole proudového záhybu v úseku kontaktů je samo dostatečné pro rychlé vtlačení oblouku do komory. Proto se novodobé konstrukce snaží vyloučit vyfukovací cívku úplně a vystačit s co nejjednodušší konstrukcí. Proudová dráha se upravuje tak, aby tvořila účinnou smyčku, jejíž pole se někdy zesiluje bočními ocelovými příložkami. Původně měděný deionový rošt (měděný proto, aby se místo paty oblouku jeho vynikající tepelnou vodivostí dobře chladilo) se nahrazuje deskami ocelovými, které účinně pomáhají vtáhnout oblouk do roštu.

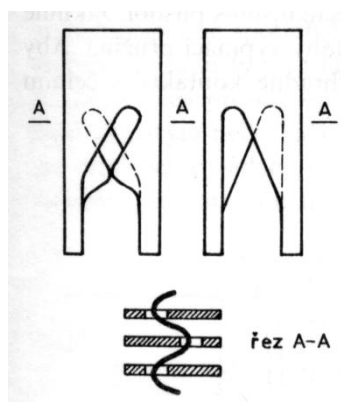


Obr.3-3 Oblouk na ocelové desce roštu zhášecí komory [1]

Nyní vyložíme působení ocelových desek. Přiblíží-li se oblouk k feromagnetické desce, orientované příčně, vzhledem k jeho ose, uzavírá se - jak ukazuje Obr. 3-3 magnetický tok, vyvolaný obloukem, zčásti touto deskou. Pohyblivý útvar se snaží zaujmout takové postavení, aby energie, potřebná k vybuzení magnetického pole, byla co nejmenší. To nastane tehdy, uzavírá-li se tok prostředím s malým odporem, tedy železem. Proto mezi deskou a obloukem vzniká síla F_1 , která vtahuje oblouk na desku. (V případě příček z mědi) se tato síla neobjeví, neboť měď má permeabilitu stejnou, jako vzduch. K tomu, aby oblouk vnikl do roštu, je zapotřebí silné magnetické pole, vybuzené cívkou. Podobně, dosáhne-li oblouk, účinkem pole proudové smyčky, horního okraje ocelové desky, vzniká síla F_2 opačného směru, která brání tomu, aby oblouk rošt opustil. Vliv vtahovací síly F_1 lze zesílit klínovými výřezy, jak je naznačeno na Obr. 3-3.

Vnikne-li oblouk do roštu, rozčlení se na několik krátkých obloučků, které se mezi deskami dále pohybují. Pokud v některém úseku oblouk vnikne mezi žebra roštu dříve, obloučky nehoří v jedné ose. I malý rozdíl v poloze sousedních obloučků vede ke vzniku přídavných elektrodynamických sil, zadržujících dále pohyb zpožděných obloučků a urychlujících naopak obloučky, vysunuté dopředu (Obr. 3-2).

Vlastní zhášecí činnost komory, s krátkým a nepřiliš hustým roštem, není principiálně jednoznačná. Protože nelze uvažovat o studené katodě, spotřebuje se na anodový a katodový spád a trup každého obloučku asi 20 až 30 V. V obvodech nízkého napětí i tento malý úbytek představuje při několika obloučcích v sérii velké zvětšení odporu výbojové dráhy, následnou deformaci vlny proudu a zmenšení fázového posunu mezi proudem a napětím. Překmit zotaveného napětí, nad hodnotu amplitudy základního napětí, se značně tlumí. Členění oblouku, na několik dílčích úseků, vlastní zhášecí pochod jiným způsobem většinou neovlivňuje. Rozhodující jsou pochody v nule proudu. Protože mezi jednotlivými žebry roštu je poměrně velká vzdálenost (5 mm i více milimetrů), mezi bočními stěnami komory ještě větší, (podle velikosti jmenovitého proudu i několik centimetrů), nejsou podmínky, pro intenzifikaci radiální výměny částic podél trupu oblouku, nijak vynikající. I přes tuto nedokonalou dispozici je tato jednoduchá soustava v obvodech nízkého napětí tak výkonná, že zvládne i mezní možné proudy, tj. proudy až 100 kA. Proto je konečná deionizace výsledek spolupůsobení radiální výměny částic, mechanické výměny prostředí, vyvolané mírným vztlakovým prouděním obloukem ohřátého vzduchu, spolu s účinným zmenšením (podle počtu žebí, vzhledem k napětí obvodu) vlivu elektrického pole v prostoru přeskokové dráhy, po nule proudu.



Obr.3-4 Desky ocelového roštu zhášecí komory s výřezy [1]

Kovovou zhášecí komoru lze použít i pro spínače stejnosměrného proudu, pokud počet dílčích obloučků je takový, že celý obvod přejde do labilního stavu, kdy výboj, a tím i proud zaniká. Oblouk se však brání rozčlenění, neboť pro svou existenci v novém stavu potřebuje větší energii (napětí) než před rozčleněním. Bylo pozorováno, že před vniknutím do roštu se na oblouku soustředí vyšší napětí než je zapotřebí pro krytí katodových a anodových nových dílčích obloučků. Oblouk, hnaný magnetickým polem, se zastaví na spodních hranách žebí, v místech styku s chladným kovem žebí, se zužuje. V okolí míst zúžení se začíná prodlužovat, vnikat do prostoru mezi žebry a vytvářet zde smyčku. Velký nárůst obloukového napětí, před rozdělením, je tedy důsledek zvětšení celkové délky oblouku. Pak teprve může docházet ke vzniku nových

	ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií Vysoké učení technické v Brně	17
anod a katod, protože to znamená stav s menší potřebou energie (tj. s nižším napětím), než předcházející stav, s řadou smyček mezi deskami. K prodloužení délky oblouku a usnadnění následného rozčlenění napomáhá prostorové prostřídání nesouměrných výřezů v deskách roštu, naznačené v alternativním provedení na Obr. 3-4. Zastavení oblouku na vstupních hranách roštu pozorujeme i u střídavého proudu, pokud první dotyk nastává při větších, okamžitých hodnotách, během půlvlny. Opětovné zapálení oblouku po nule proudu, může nastat v členěném stavu i bez prodlužování oblouku do meziprostorů roštu, pokud hrany plechů, ohřáté předchozím obloukem, jsou schopny produkovat elektrony tepelnou emisí. Vypínače stejnosměrného proudu, u kterých k žádné komutaci proudu nedochází, nebo vypínače střídavého proudu, u nichž na nulu proudu nečekáme (tj. omezující jističe) musí, pro vnucení oblouku do roštu, počítat s potřebou silnějšího magnetického vyfukovacího pole, než vypínače spoléhající na nulu proudu.		



4 OBLOUK VE ZHÁŠECÍ KOMOŘE JISTIČE

4.1 Elektrický oblouk a jeho vlastnosti

Elektrický oblouk je samostatný výboj, hořící v plynu za normálního, nebo zvýšeného tlaku, schopný samostatné existence libovolnou dobu, pokud jej nepřerušíme vhodným zásahem do jeho mechanismu.

Hlavní znaky oblouku jsou:

- Vysoká teplota katodové skvrny (nebo katody vůbec) dostačující k tepelné emisi elektronů.
- Hustota proudu katodové skvrny se řádově rovná desítkám MA/m^2 .
- Malé elektrodové úbytky.
- Malé napětí mezi elektrodami (vzhledem k napětí zdroje).
- Velký proud procházející obloukem (větší než 1 A).
- Intenzivní proud procházející obloukem (větší než 1 A).
- Intenzivní vyzařování světla z výbojového plazmatu a z elektrod.

Podle druhu napětí v obvodu, ve kterém oblouk hoří, dělíme oblouky na oblouk napájený stejnosměrným proudem a na oblouk napájený střídavým proudem. Stejnosměrný oblouk považujeme za statický, závislost napětí mezi elektrodami na obloukovém proudu nazýváme v tomto případě statickou charakteristikou. Střídavý oblouk je proměnný s časem, jeho charakteristika se nazývá dynamická. Přesto, že střídavý oblouk je proměnný, může existovat v ustáleném - kvazi stacionárním stavu, kde časové změny jeho parametrů sledují časový průběh napájecího proudu. Podle tvaru výbojové dráhy dělíme oblouky na volně hořící s nepravidelným tvarem a oblouky stabilizované s pravidelným osově souměrným tvarem. Stabilizované oblouky se mohou lišit od volně hořících nejen tvarem, ale i složením výbojové dráhy. U volně hořících oblouků, je ve většině případů, výbojová dráha tvořena plynem, ve kterém oblouk hoří zároveň s parami z elektrod. Výbojová dráha stabilizovaného oblouku je téměř vždy tvořena plynem nebo parami stabilizačního média.

Doba vytváření oblouku je velmi krátká, řádově 10^{-6}s . Po vytvoření je plazma oblouku v termické rovnováze, to znamená, že elektrony, ionty, neutrální atomy a molekuly mají stejné teploty. Oblouk je schopen samostatně existovat, probíhají-li v něm ionizační pochody, které po dobu existence oblouku jsou v rovnováze s rekombinačními pochody.

Při zániku oblouku převládají rekombinační pochody nad ionizačními. Této převahy lze dosáhnout různými postupy.



4.2 Katoda a katodový prostor

Katoda a anoda nejsou pouze elektrickým spojením, ale zprostředkují přechod mezi vysokými teplotami plazmatu a nízkými teplotami vnějšího obvodu. Vlivem velkého rozdílu teplot plazmatu a katody, vznikne bezprostředně u katody pásma, se značně klesající teplotou, a tím i vodivostí. Přes tento pokles vznikne katodová skvrna s velkou proudovou hustotou.

Elektrony mohou být uvolněny z katody v podstatě třemi způsoby:

- 1) Katoda je vyhřátá cizím zdrojem (nízkotlaký oblouk), nebo elektronovým proudem na teplotu dostačující k tepelné emisi elektronů.
- 2) Před katodou vznikne, působením přilétajících proudů iontů, intenzita elektrického pole, která je dostačující k emisi elektronů elektrickým polem.
- 3) Před katodou jsou vytvářeny dvojice elektronů a iontů, jejichž počet se rovná počtu elektronů, putujících do sloupce, umožňující zajistit spojitost elektronového proudu.

Velikost skvrny závisí nejenom na proudu, ale také na délce oblouku. Příčina vzniku zapalovací špičky u střídavého oblouku leží v blízkém okolí elektrody, která je při opětovném zápalu katodou. Oblouky bez skvrny vyžadují materiály s vysokou teplotou tání.

4.3 Anoda a anodový prostor

Přechod z elektronového proudu, ve vnějším okruhu, na elektronový a iontový proud v plazmatu, je u anody mnohem více patrný, než u katody. Poněvadž anoda neemituje žádné ionty, je hlavním úkolem anodového úbytku vytvářet z přicházejícího proudu neutrálních částíček ionty, které pak putují průřezem oblouku ke katodě. Pro vytváření iontů je nutné, aby nárazová ionizace v prostoru anodového úbytku byla větší než v plazmatu. K tomu je zapotřebí větší energie elektronů, které jsou získávány z elektrického pole.

Energie může být na elektrony přenesena dvěma způsoby:

- 1) Vzdělání potenciálu tvořen na délce volné dráhy elektrony - ionizace elektrickým polem.
- 2) Potenciál vzroste na délce několika volných drah a elektrony v tomto oboru vykonají několik srážek – tepelná ionizace.

Pro výskyt jednoho, nebo druhého způsobu ionizace, je rozhodující rozdělení prostorového náboje a z něho plynoucí délka volných drah elektronů a iontů. Ionizace elektrickým polem nastane tedy ve výbojích s nízkými teplotami, a tepelná ionizace nastane ve výbojích s vysokými teplotami.

4.4 Termická rovnováha

V elektrickém oblouku přijímá plazma energii z přiváděného proudu a ztrácí ji vyzařováním tepelné a světelné energie, vedením tepla a dalšími pochody. Aby se mohlo rozhodovat, do jaké míry je plazma oblouku v termické rovnováze a mohlo se vůbec mluvit o jeho teplotě, musí se vzít také v úvahu pochody probíhající mezi nosiči náboje a v neutrálních částicích. Tyto pochody se souborně nazývají elementární pochody. Projevují se v podstatě jako přeměna jedné energie v energii druhou. Částice plazmatu mohou být podrobeny různým elementárním pochodům. Nejjednodušší elementární pochody jsou urychlování elektronů a iontů v elektrickém poli a emise, případně absorpce světla neutrálními, nebo ionizovanými atomy. Urychlování iontů a elektronů v elektrickém poli se projevuje vzrůstem jejich kinetické energie. Při emisi nebo



absorpci světla se mění potenciální energie atomu, popřípadě iontu. Složitějších elementárních pochodů se zúčastní dvě nebo tři částice. Přehled pochodů mezi dvěma částicemi je v Tab. 4-1.

	Elektrony	Ionty	Neutrální částice
Elektrony	Srážka	Zachycení rekombinace	Pružná srážka neutrální ionizace srážka 2. řádu
Ionty	Zachycení rekombinace	Srážka	Pružná srážka Změna náboje
Neutrální částice	Pružná srážka nabuzení ionizace srážka 2. řádu	Pružná srážka změna náboje	Pružná srážka

Tab. 4-1 Přehled pochodů mezi dvěma částicemi

Pružné srážky jsou schematicky vysvětleny takto: pomalý elektron při srážce s atomem změní svůj směr, avšak neztrácí svou kinetickou energii.

U srážek prvního řádu se mění kinetická energie částic před srážkou v potenciální energii po srážce. Srážky prvního řádu jsou charakterizovány tak, že rychlý elektron při srážce může atom nabudit, popřípadě ionizovat a ztrácí přitom značnou část své energie.

Srážky druhého řádu jsou charakterizovány změnou potenciální energie před srážkou, v převážně kinetickou energii po srážce. Vyjádřit to můžeme tak, že setká-li se pomalý elektron s nabuzeným atomem, může převzít jeho budící energii, která se změní v kinetickou energii elektronů.

Změna náboje je charakterizována přechodem elektronů z atomu na iont při srážce iontu s neutrálním atomem. Výsledek změny náboje je neutrální atom a elektron, stejně jako před rázem.

4.5 Plazma

Plazma plynového výboje je charakteristickým stavem ionizovaného plynu. Tento plyn, složený převážně z elektricky nabitých částíček, má velmi odlišné vlastnosti proti normálnímu plynu. Hlavním znakem plazmatu je totiž vysoký stupeň ionizace plynu. Můžeme proto plazma označit jako zvláštní stav hmoty, lišící se od plynného skupenství tím, že v něm nastává rozpad neutrálních částíček v kladné ionty a elektrony. Ionizace atomů v plazmatu má za následek poměrně intenzivní vyzařování světla z plazmatu. Dalším znakem plazmatu je rovnost koncentrace kladných a záporných částíček, neboli výsledný prostorový náboj plazmatu je prakticky nulový.



4.6 Rekombinace

Rekombinace je pochod zvrtný, vzhledem k ionizaci. Kladný iont a záporný elektron se spojí na neutrální atom a přitom se uvolní energie, spotřebovaná ionizací. V jakou energii se změni uvolněná energie, to závisí na okolnostech rekombinace. Rekombinace může nastat na stěně na elektrodě, nebo v prostoru, vyplněném plynem. Při rekombinaci na stěně je ionizovaná energie, uvolněná rekombinací, převzata stěnou jako teplo. Nejčastěji probíhá rekombinace tak, že na spojení iontu s elektronem jsou zúčastněny tři částice (potrojná srážka). Jeho charakteristikou je převzetí rekombinační energie třetí částicí. Není-li v blízkém okolí, spojujícího se iontu a elektronu, žádná třetí částice (atom nebo elektron), která by mohla převzít uvolněnou energii, musí být energie vyslána jako záření. Jsou-li elektrony zachyceny v nejnižší energetické hladině atomu, dostaneme tzv. hraniční kontinuum. Vyvážené hraniční kontinuum je zvláště intenzivní ve vysokotlakých výbojích, s velkou proudovou hustotou. Tlak a velká proudová hustota snižují rychlost elektronů, a tak zvětšují možnost rekombinace. Je-li elektron zachycen ve vyšší hladině, je emitováno záření menšího kmitočtu a příslušná spektrální čára je rozšířena, směrem k modrému konci spektra. V plazmatu oblouku se elektrony pohybují všemi směry, stejnými rychlostmi a unášivý pohyb elektronů je až druhořadý. Energie, předaná elektrony plazmatu, se z plazmatu ztrácí vyzařováním (budící energie), odváděním tepla ven z plazmatu (kinetická energie) a difúzí nosičů náboje z plazmatu, a rekombinací na okraji plazmatu (ionizační energie). Jedním z vnitřních parametrů plazmatu je počet ionizačních aktů, daným počtem ionizací, způsobených jedním elektronem za s. Proto je určen stupeň ionizace, tj. koncentrace elektronů a iontů, elektronovou teplotou.

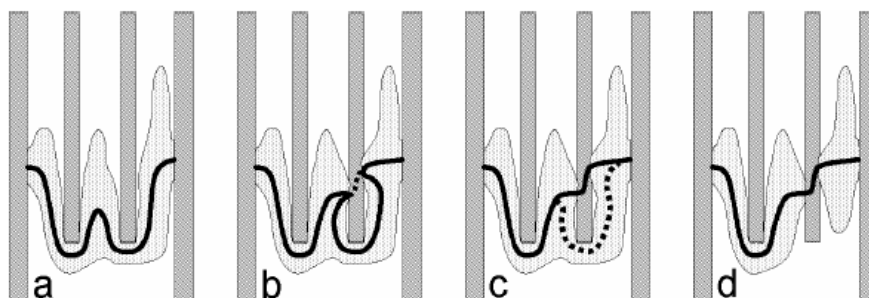
Teplota elektronů a teplota plynu nemusí být vždy stejná. Při zapalování oblouku je teplota plynu vždy menší, než teplota elektronů. Druhý případ je plazma nízkotlakého výboje, při nízkých tlacích teče energie z elektronového plynu na neutrální, popřípadě iontový plyn, elektronová teplota musí být tedy znatelně vyšší, než teplota plynu.

5 EXPERIMENTÁLNÍ ZKOUMÁNÍ OBLOUKU

Tato kapitola je zaměřena na již provedené experimentální pokusy od p. prof. Manfreda Lindmayera a jeho kolektivu, podle [7] a [8]. Všechny experimenty jsou zaměřeny na zkoumání vlastností elektrického oblouku. Jsou zde prezentovány experimenty zaměřující se na pohyb oblouku na plechu zhášecí komory. Dělení oblouku, průchod proudu skrze plechy komory. Vytváření anodových a katodových skvrn. Jsou zde prezentovány různé výsledky z měření, oscilogramy a snímky z vysokorychlostních kamer, které nám pomáhají detailněji pozorovat pohyb elektrického oblouku na plechách kovové zhášecí komory.

5.1 Některé aspekty chování oblouku v komoře

Tento experimentální pokus se zabývá procesem dělení oblouku na roštových plechách zhášecí komory. Podstata spočívá ve vytváření nových pat oblouku na plechách komory. Postup dělení oblouku je zobrazen na Obr. 5-1.



Obr.5-1 Princip dělení oblouku na kovových plechách [7]

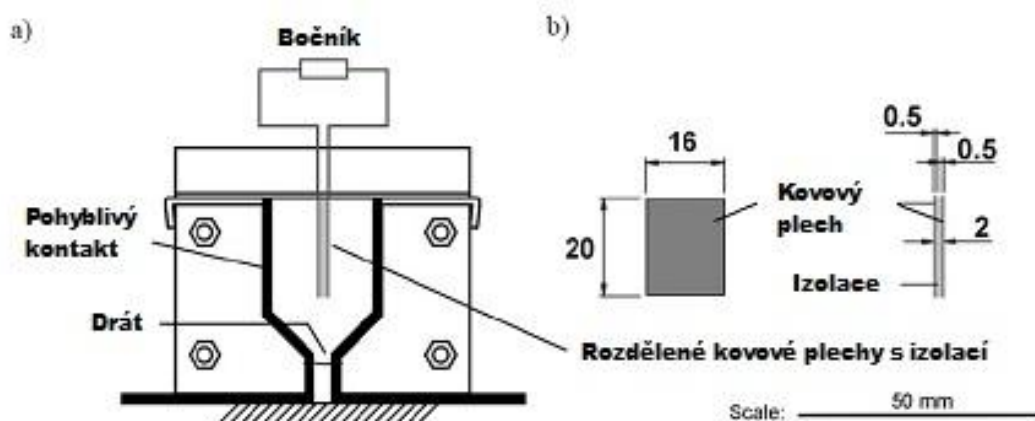
V průběhu dělení oblouku na kovovém plechu musí vzniknout další katoda a anoda na obou stranách plechu. Katodový a anodový potenciál se musí pohybovat mezi 15-20 V. Aby se mohly vytvořit nové paty oblouku, musí v ještě nerozdělené plasmě poklesnout napětí mezi oběma stranami plechu. Hodnota napětí musí dosáhnout alespoň výše zmíněné hodnoty potenciálu. Toho docílíme obtékáním plazmatu kolem plechu a zastavením se na čelní hraně komory Obr. 5-1(a, b). Po určitou dobu dochází k toku proudu přes nově vzniklou katodu a anodu. Ty prochází kovem ve staré cestě přední části desky Obr. 5-1(b, c). Toto chování bylo ověřeno různými měřeními.

5.1.1 Experimentální nastavení

Výzkum procesu dělení oblouku byl uskutečněn s modelovou zhášecí komorou, ve které byl vložen jeden plech viz Obr. 5-2 podle [7]. Komora se skládá ze dvou pohyblivých kontaktů. Mezi tyto kontakty byl vložen plech o síle 2 mm, upevněný k zadní stěně komory. Vzhledem k tomu, že za účelem měření, musí proud procházet plechem, byl plech rozdělen na dvě poloviny. Tyto dvě poloviny spojuje k sobě kombinace izolační vrstvy a nízkého odporového materiálu. Aby mohl vzniknout zkrat a nebyl ohrožen proces dělení, a vytváření pat oblouku, byl navržen plech s nízkým odporem. Pohyblivé kontakty s plechem obklopují stěny komory, složené z izolačních materiálů a z žáruvzdorných materiálů. Abychom mohli pozorovat probíhající děj, byla přední stěna vyrobena ze skla a vsazena mezi bočnice pomocí akrylátové desky. Horní stěna se skládá ze

skelných vláken, vyztužených plastem. Obsahuje také ventilační otvory, jejichž celkový účinný průřez zabírá 20 % plochy horní stěny.

Mezi kontakty, ve spodní části komory, se nachází měděný drát. Přetavením tohoto drátu dosáhneme potřebného zapálení oblouku.

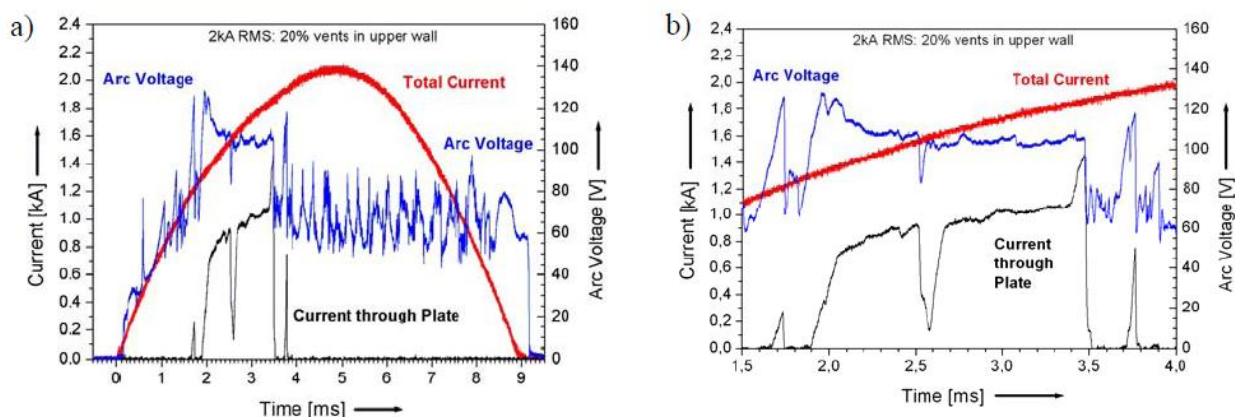


Obr.5-2 a) Zkušební přepínač pro výzkum elektrického oblouku a b) plech se všemi rozměry v mm [7]

5.1.2 Výsledky

Zobrazené křivky celkového proudu, procházejícího deskou a napětím oblouku, na Obr.5-3, jsou výsledkem pokusu podle [7]. Vytvoření elektrického oblouku popisuje níže uvedený obrázek.

Soubor snímků z rychlostní kamery - Obr. 5-4 je shodný s časovou osou grafu na Obr. 5-3. Pohyb oblouku při vytváření paty a během jeho dělení (v časovém rozmezí $t = 1.6$ a $3,86$ ms) zachycují snímky a graf.

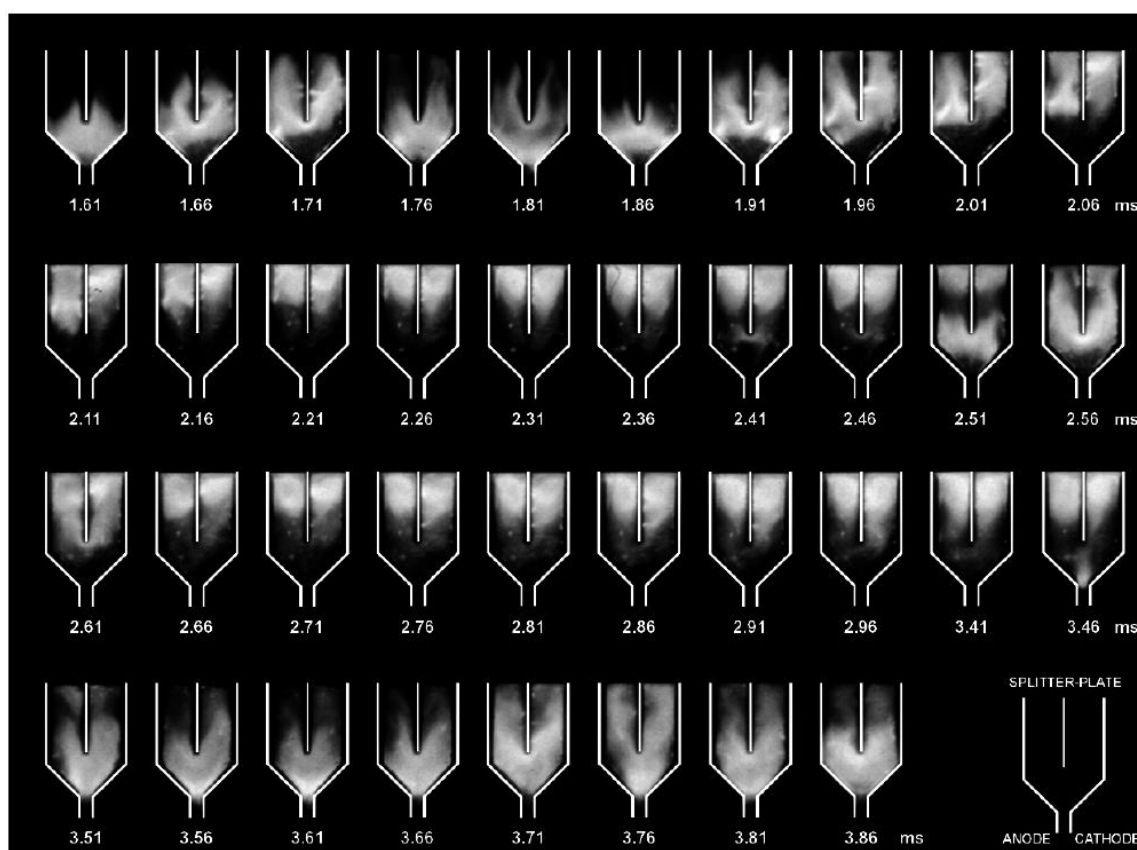


Obr.5-3 Oscillogramy celkového proudu, proudu procházejícího plechem a napětí oblouku [7]

V čase $t = 0.5$ ms dojde k zapálení oblouku, které se vyznačuje 80 V špičkou napětí při hodnotě proudu, přibližně 500 A. Dále se elektrický oblouk pohybuje a prodlužuje podél spodní oblasti kontaktů, kde napětí vzroste z 35V až na hodnotu 75 V. Následující dva napětíové poklesy, které způsobí opětovné zapálení oblouku. Do té doby plazma, což je jasně zářící



obloukový sloupec, který je vytvořen ionizací atomů v plazmatu, proudí směrem k horní stěně. Až do doby $t = 1.61$ ms, kdy plazma začíná obklopotvat prostor kolem kovového plechu a pohybuje se dál k okraji plechu. V čase $t = 1.66$ ms už oblouk úplně obtéká kovový plech, tím vznikne zvýšení napětí a poklesu mezi stranami plechu, a to způsobí vznik paty oblouku. V čase $t = 1.71$ ms zvýšení obloukového napětí vytváří viditelné paty oblouku ve středu plechu. V této době jsou už viditelné tři paty oblouku – jedna na anodě a dvě souběžně na katodě. Tok proudu, napříč plechem, dosahuje hodnoty okolo 290 A. Hlavní část proudu ještě skutečně protéká obloukovým sloupcem pod plechem. Krátkou dobu rozdělování elektrického oblouku doprovází rychlé zvyšování obloukového napětí, dokud není přerušena zpětnou komutací v čase $t = 1.7$ ms. V této době proud komutuje do ještě horké a vodivé oblasti pod plechem.



Obr.5-4 Snímky z vysokorychlostní kamery [7]

Další pokus rozdělení elektrického oblouku je úspěšnější. V čase $t = 1.90$ ms začíná oblouk tvořit smyčku kolem plechu, která je následována vytvářením pat oblouku. Anodová pata se objeví na stejném místě, jako v předchozím pokusu. Předtím, než se začne zvětšovat obloukový proud, důsledkem průchodu plechem, napětí je na úrovni okolo 110 V. V čase $t = 1.96$ ms, napětí oblouku dosahuje svého globálního maximum, a to je 127 V, zatímco proud, o velikosti téměř 350 A, protéká skrze plech. V tomto okamžiku mohou být pozorovány dvě paralelní paty oblouku na anodovém kontaktu. Hlavní část proudu samozřejmě ještě teče pod plechem. Rostoucí anodový proud je spojený s rostoucím počtem pat oblouku v anodě plechu. V čase $t = 2.01$ ms existují dva viditelně oddělené obloukové sloupce. V čase $t = 2.05$ ms není žádná viditelná cesta proudu pod plechem. Přestože oscilogram ukazuje celkový proud skrze plech, ve skutečnosti protéká plechem jen určitá část. Vzhledem k tomu, že elektrický oblouk dosáhl horní stěny komory, plazma se

může vyfouknout ven z komory. I když převládající část celkového proudu protéká mimo komoru, může nějaká menší část proudu ještě téci pod plechem.

Mezi časy $t = 2.1$ ms a $t = 2.40$ ms, stálá část celkového množství proudu teče napříč plechem. Napětí na oblouku se zvyšuje jen nepatrně. V této době se stále více plazmy začíná vracet zpět k dolní části kovového plechu. To vede k vytváření paralelních cest proudu pod plechem v čase $t = 2.41$ ms, což je doprovázeno snížením protékajícího proudu plechem. Další následek je velká teplota a větší vodivost v této části oblasti. V čase $t = 2.51$ ms začíná zpětná komutace oblouku. Menší část proudu ještě protéká ve vrchní části plechu, zatímco větší část proudu se začíná rychle pohybovat k horní části plechu. Následkem tohoto pohybu, proud protékající skrze plech, se znova zvýší až k poloviční hodnotě celkového proudu. Další pokus o zvýšení části proudu skrze plech, končí zpětnou komutací v čase $t = 3.46$ ms.

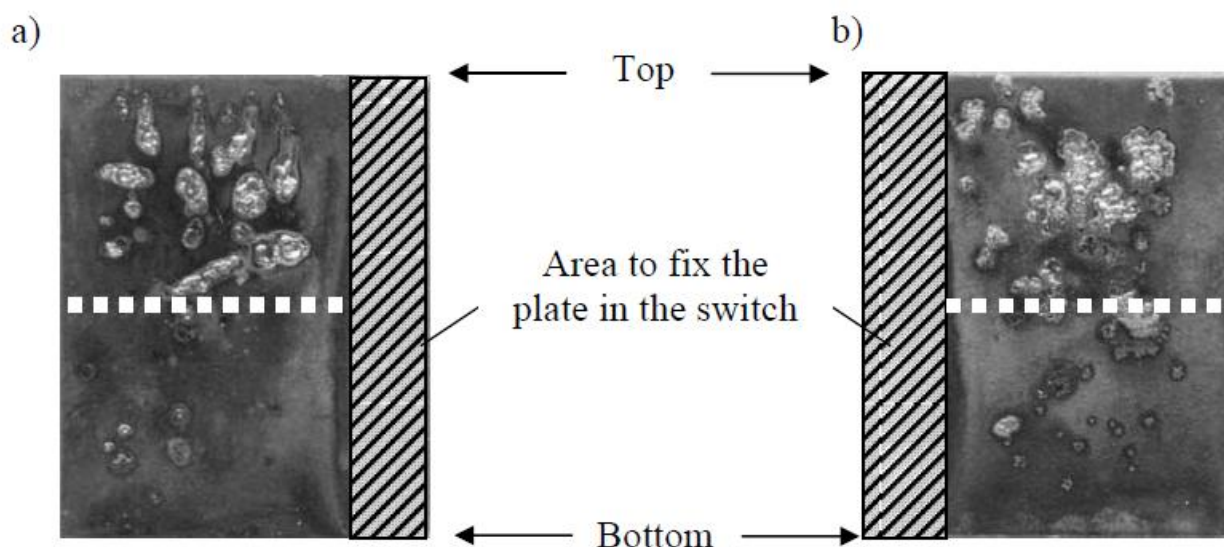
Mezi časem $t = 3.70$ ms a $t = 3.80$ ms je poslední viditelný tok proudu skrze plech. Tím pokus o rozdělení oblouku končí. Napětí začíná rychle kolísat mezi 50 a 80 V, dokud oblouk neuhasne v nule proudu.

5.1.3 Obloukové paty

Pro porovnání vytváření pat oblouku a hustoty proudu v patě oblouku nám slouží Obr. 5-5, který ukazuje stopy pat oblouku na anodě a katodě.

Katodické paty oblouku jsou hlubší, je jich více a mají velmi podobný tvar. Anodové stopy jsou plošší, a jejich průměry mají tendenci být trochu větší, než katodové. Na anodovém plechu se nachází ještě další menší skvrny, které pravděpodobně mohou být stopy vícenásobných pat oblouku.

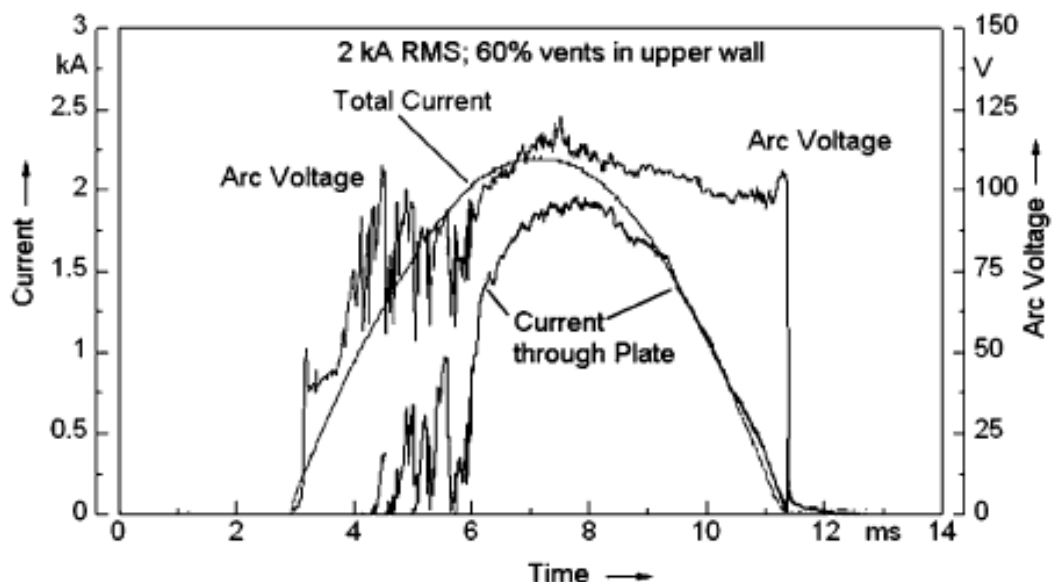
Přerušovaná čára označuje střed mezi spodní a vrchní částí plechu. Koncentrace roztavených oblastí převážně leží v horní polovině plechu. To nám ukazuje, že oblouk a jeho paty se začínají vytvářet až ve středu plechu. Aby se mohly vytvořit paty oblouku, musí proudový oblouk dosáhnout určité délky a určitého napěťového potenciálu. Dále můžeme sledovat pohyb oblouku, který je pouze v minimálních vzdálenostech. Všechny vytvořené paty jsou ve vzájemné blízkosti.



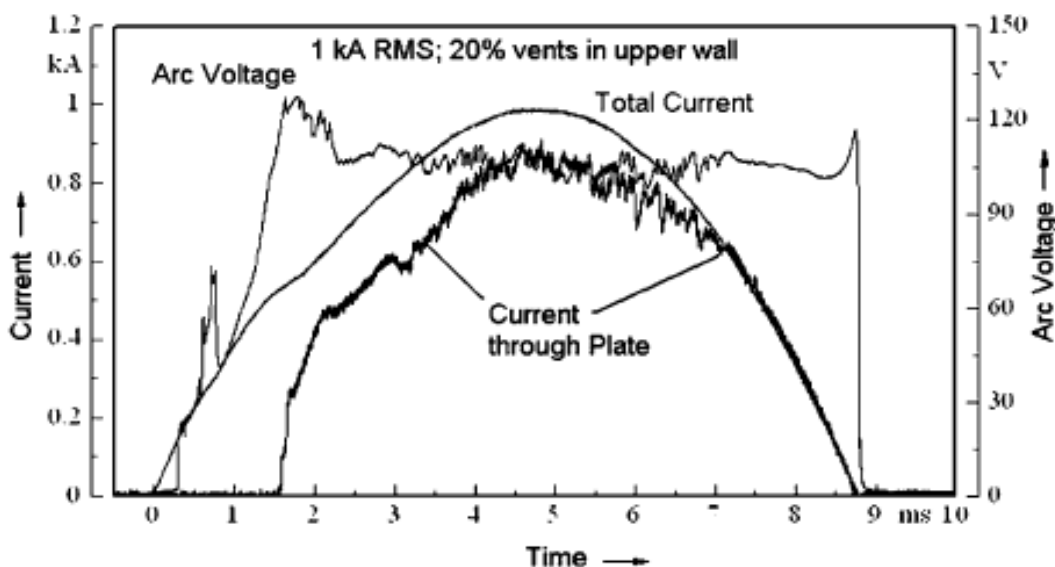
Obr. 5-5 Snímky katody (a) a anody (b) plech po dvou experimentech [7]

5.2 Proces dělení oblouku mezi plechy komory

Toto experimentální měření nám poskytuje srovnání výsledků chování elektrického oblouku na jednom plechu, s výsledky se dvěma plechy, které jsou vloženy ve zhašecí komoře. Výsledky tohoto experimentu jsou podle [8].



a)



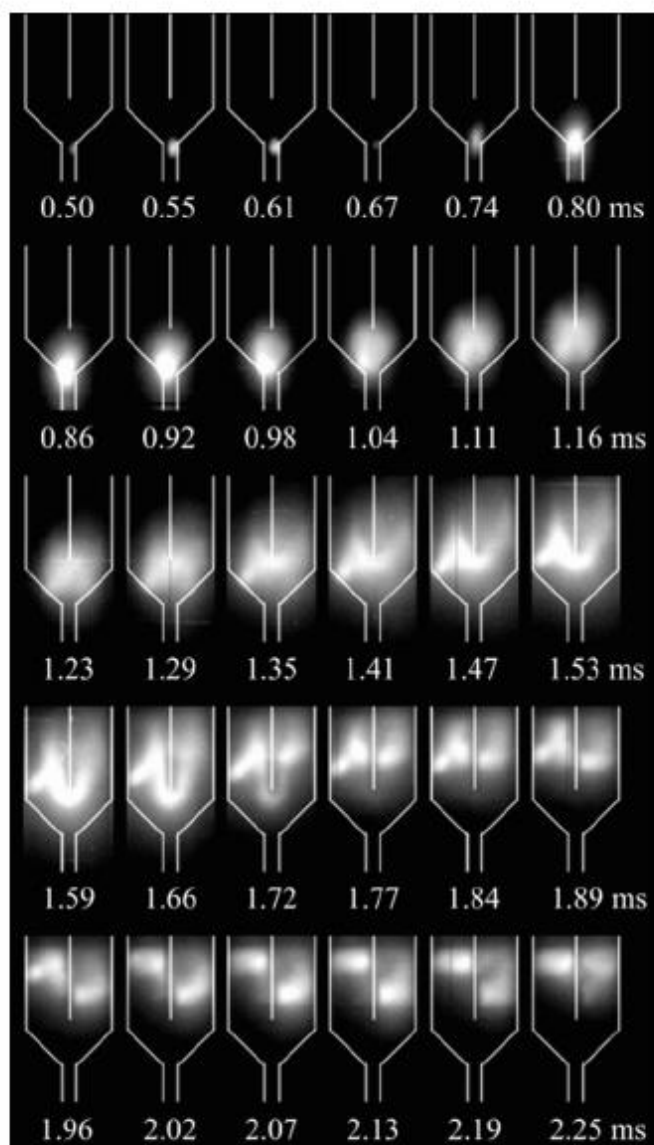
b)

Obr.5-6 Oscilogramy celkového proudu, proudu tekoucího skrze kovový plech a obloukové napětí [8]

Na Obr. 5-6 jsou typické oscilogramy celkového proudu napětí a proudu oblouku. Jsou zde srovnány dva experimenty. Oscilogram na Obr. 5-6 a) popisuje pohyb oblouku na plechu ve zhašecí komoře. Zapálení oblouku, které je způsobeno přetavením drátu mezi kontakty je na oscilogramu charakterizováno 50-ti voltovou špičkou napětí, zhruba ve 3 ms. Po této napěťové špičce se napětí ustálí mezi 40 a 45 V. Z následného nárůstu napětí je vidět, že se elektrický

oblouk prodlužuje do horní oblasti komory a obklopuje téměř celý plech. Od 4ms začíná proud téct také plechem, ke kterému se oblouk začíná přibližovat. Trvalý nárůst podílu proudu, tekoucím skrze plech, začíná v čase $t = 4$ ms až do doby $t = 4.5$ ms, kdy proud, procházející plechem, dosáhne jedné třetiny celkového proudu. Mezitím se napětí zvýší až na 105 V. Ve 4.5 ms dochází k rychlému přesunu oblouku zpět ke spodnímu okraji plechu, což je doprovázeno poklesem obloukového proudu a poklesem napětí na polovinu špičky napětí. Okamžitě následuje znovu rychlý pohyb oblouku nahoru, směrem do horní poloviny plechu, a podíl proudu, protékajícího skrze plech, se zvětšuje až na 40 % celkového proudu, které je samozřejmě doprovázeno zvýšením napětí, až na 100 V. V čase $t = 5.6$ ms, po několika dalších opakovaných pohybech oblouku po plechu, proud procházející skrze kovový plech, dosahuje přibližně poloviny celkové hodnoty proudu. Konečné spojení rozděleného oblouku začíná, při stále se zvyšujícím proudu procházejícím plechem, v čase 6ms.

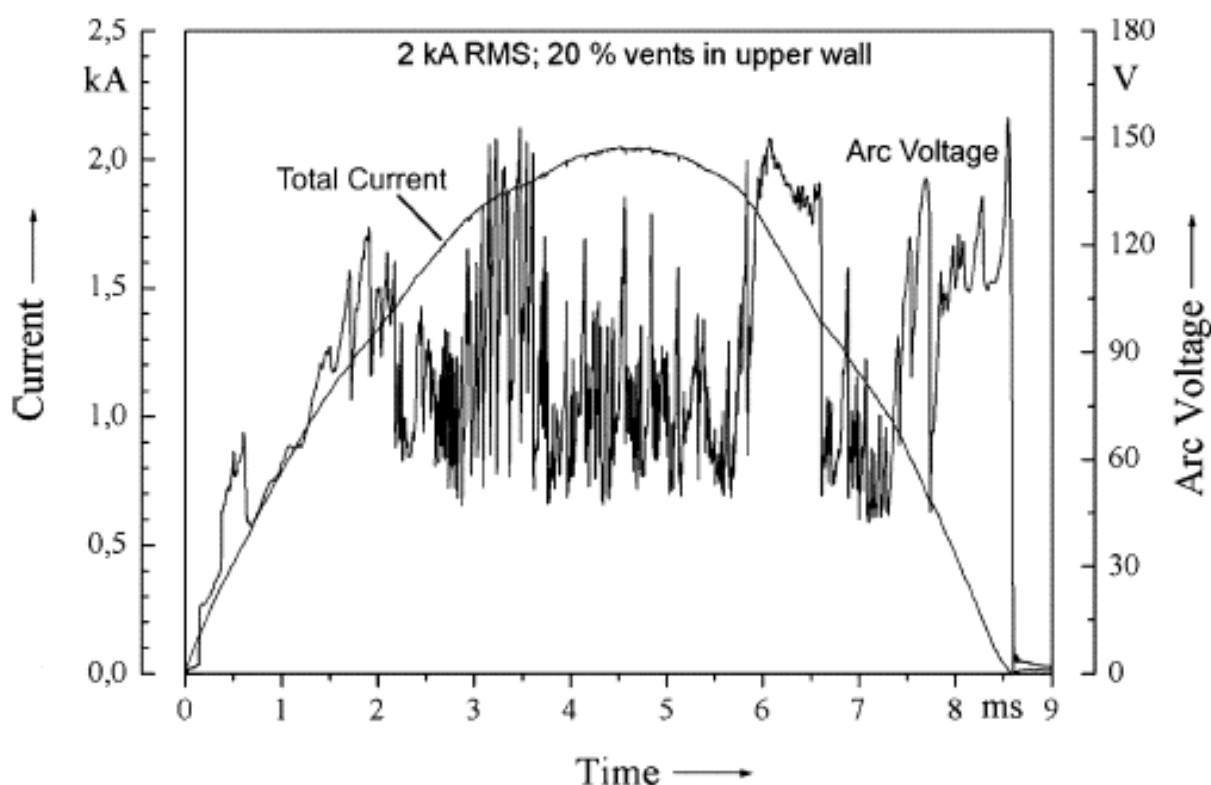
Proces dělení oblouku je ukončen, jakmile rostoucí proud, procházející skrze plech, dosáhne celkové hodnoty proudu. Tento stav setrvává až do nuly proudu. Tento experiment dokazuje, že je možný částečný tok proudu skrze plech, což je vlastně paralelní existence oblouku.



Obr.5-7 Snímky z vysokorychlostní kamery k oscilogramu na Obr. 5-6b [8]

Obr. 5-7 zachycuje snímky z vysokorychlostní kamery, na které navazuje oscilogram z Obr. 5-6b. Poněvadž máme k dispozici i snímky z kamery, můžeme pohyb oblouku popsat přesněji. Na zmíněných snímcích je kovový plech znázorněn tenkou čarou uprostřed zhášecí komory.

Přetavení drátu mezi kontakty je spojené s první špičkou napětí, která končí krátce před časem $t = 1$ ms. Následně vzniká elektrický oblouk, který se začíná pohybovat směrem ke kovovému plechu. V čase $t = 1.35$ ms se oblouk začíná ohýbat kolem plechu, zatímco celkový proud teče ještě obloukem. Po čase $t = 1.5$ ms dochází ke zvětšování proudu, procházejícího skrze plech, a následně dochází k rychlému vzestupu počátečního proudu. Rychlý vzestup proudu nám vytváří nové paty oblouku po obou stranách plechu. V tomto bodě napětí dosahuje svého maxima. Paty oblouku nebyly, podle očekávání, vytvořeny ve spodní části plechu, ale ve středu plechu. Mohlo to být způsobeno nějakým pohybem oblouku, který způsobil nedostatečně dlouhý pokles napětí, který je nutný pro vytvoření paty oblouku. Pokles napětí musí trvat určitou dobu, aby se vytvořily paty oblouku. Obě cesty proudu - skrze plech a kolem jeho spodní hrany, jsou jasně viditelné. Po čase $t = 1.77$ ms jsou obě cesty oblouku již špatně viditelné, ale oscilogram je zobrazuje až do 7ms. Menší část celkového proudu stále protéká plazmou, která je vidět kolem plechu.

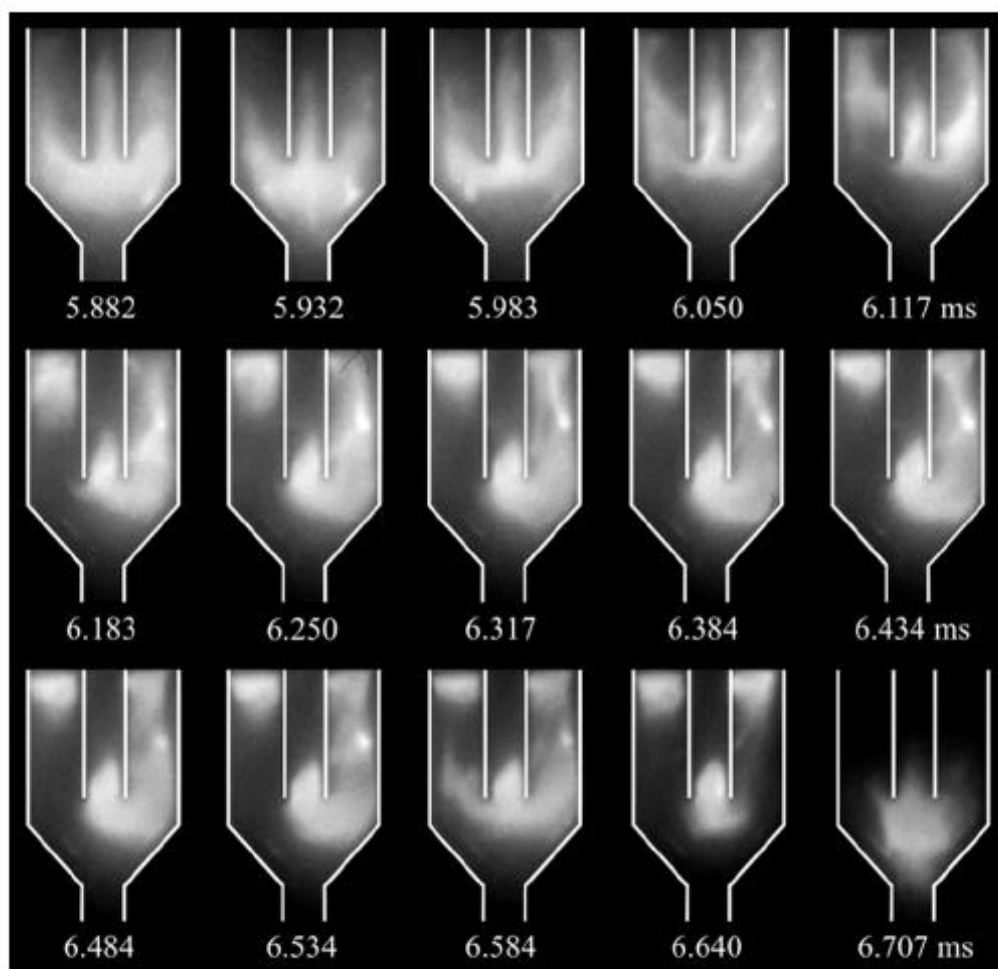


Obr.5-8 Oscilogram celkového proudu a obloukového napětí [8]

Na oscilogramu z Obr. 5-8 můžeme sledovat měření se dvěma plechy a snímky z vysokorychlostní kamery - Obr. 5-9. Experimentální nastavení je stejné jako předchozí, jen jsou použity dva plechy místo jednoho.

Zapálení elektrického oblouku dochází v čase $t = 0.6$ ms. Následuje jeho prodloužení do horní oblasti plechu a několik jeho opakovaných pohybů po plechách komory, kde se snaží nalézt elektricky nejvýhodnější cestu. Tento opakovaný pohyb elektrického oblouku je znázorněn na

oscilogramu opakovanými vzestupy a poklesy napětí, které se opakují s vysokou frekvencí až do času $t = 5.9$ ms. Během této doby elektrický oblouk obklopuje oba kovové plechy do tvaru W, který je způsoben vtahováním oblouku mezi plechy. Mezi časem $t = 6.0$ ms až $t = 6.7$ ms napětí klesá z hodnoty 150 V až na hodnotu 135 V. Toto je způsobeno dalšími pohyby oblouku po plechách a jeho intenzivnějšího vtahování do prostoru mezi plechy. Tento pohyb pokračuje až do nuly proudu, který nastává v čase $t = 8.5$ ms.



Obr.5-9 Snímky z vysokorychlostní kamery k oscilogramu na Obr. 5-8 [8]

Obr. 5-9 nám zachycuje část snímků z vysokorychlostní kamery, patřících oscilogramu Obr. 5. Roštové plechy jsou znovu znázorněny jako dvě tenké čáry uprostřed komory. Jsou znázorněny snímky od času $t = 5.882$ ms až do $t = 6.707$ ms. Tyto snímky nám ujasňují průběh dělení elektrického oblouku, pohybujícího se po plechách komory. V čase $t = 5.882$ ms se elektrický oblouk začíná prodlužovat a pohybovat nahoru, kde obtéká kovové plechy. Tento pohyb je doprovázen rychlým nárůstem napětí. V čase $t = 5.983$ ms už velice zřetelně vidíme elektrický oblouk, jak obtéká všechny plechy a je vtahován i do prostoru mezi plechy a zaujímá tvar W. Na dalších dvou snímcích můžeme pozorovat začátek formování dvou částí oblouku ve spodní části komory. Mezitím napětí dosahuje svého maxima. Elektrický oblouk se začíná částečně tvořit v levé horní polovině komory a pohybuje se směrem nahoru, mezitím druhá část obloukového sloupce se formuje ve spodní části komory, kolem pravého plechu. Na snímcích mezi časy $t =$

	ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií Vysoké učení technické v Brně	30
6.117 ms a $t = 6.484$ ms jsou jen bezvýznamné změny ve tvaru elektrického oblouku. U oblouku, na pravém plechu, se zdá být převládající proud, i když skrze levý plech protéká větší část celkového proudu. Mezitím se napětí snižuje až k hodnotě 135 V. V čase $t = 6.584$ ms je znatelný tok proudu, mimo levý plech a následně je vytvořena série tří oblouků. Nicméně rozdělení oblouku na pravé desce není zcela dokončeno, ale menší část proudu stále protéká i pod plechem. V čase $t = 6.707$ ms dočasně vytvořený elektrický oblouk zaniká, doprovázejícím malým pokusem o opětovný zápal oblouku na částech kontaktů. Zde uvedené příklady jasně ukazují, že proces, dělení oblouku mezi kovovými plechy komory, není v žádném případě stabilní. Existence paralelních cest proudu, mimo plechy a skrze plechy, je zcela normální. Čím více je sériově vložených plechů v komoře, tím se jejich role stávají důležitější. Procesy dělení oblouku a vytváření paralelních cest jsou nežádoucí, ale nevyhnutelné.		



6 JISTIČE MODEION

6.1 Kompaktní řady jističů Modeion

Kompaktní jističe řady Modeion nacházejí uplatnění jak v bytové výstavbě, infrastruktuře, nebo energetice, tak v náročných, nepřetržitých provozech v průmyslu. Toto široké uplatnění umožňuje nejenom velké množství různého stavebnicového příslušenství, ale především výměnné nadproudové elektronické spouště. V jedné typové velikosti tak jistič dosáhne, včetně využití rozsahu regulace 60 %, změny proudu v rozmezí až 87 %.

Spouště s charakteristikou **L** (L001) jsou určeny pro jištění obvodů vedení, neboť zkratová spoušť jističe s uvedenou charakteristikou je nastavena na čtyřnásobek jmenovitého proudu. Jistič, vybavený spouští s charakteristikou **D** (DTV3), je vhodný především pro průmyslové aplikace, neboť umožňuje nejen regulaci jmenovitého proudu, ale i regulaci zkratové spouště. Právě díky tomu je možné tímto typem charakteristiky jistit vedení, ale také zařízení s velkým záběrným proudem, jako jsou skupiny svítidel, nebo motorové vývody.

Pro přímé jištění motorů je určena varianta s charakteristikou **M** (MTV8). Elektronické spouště s charakteristikou MTV8 však lze bez problému použít i pro jištění transformátorů a vedení. Jističe Modeion mají širokou škálu stavebnicového příslušenství. Je to především komplexně vyřešené připojování silových vodičů. Připojovací sady umožňují připojit měděné a hliníkové pásy a kabely všech běžně používaných průřezů a profilů.

Pro ovládání jističů je možné použít ruční otočný pohon, který zabezpečuje i ovládání přes čelní panel nebo dveře rozvaděče.

Dálkově lze jističe Modeion zapínat i vypínat pomocí motorových pohonů. Standardem je ovládací napětí 230 V a 110 V pro střídavé obvody. Ve stejnosměrných obvodech je k dispozici ovládací napětí 220 V a 110 V. Pohony jističů BD250 a BH630 disponují napětím 24 a 48 V střídavého i stejnosměrného napětí. Další možností, jak lze jističe Modeion dálkově vypínat, je použití napětřových, nebo podpětřových spouští.

6.2 Modeion BD250

Jistič Modeion BD250 je určen pro jištění a méně časté spínání elektrických zařízení do 250 A. Hlavní výhodou jsou promyšlená stavebnicová příslušenství. Nadproudová elektronická spoušť tvoří samostatný záměnný blok. Je zde možnost jak ručního, tak i motorového pohonu a různých mechanických blokování. Je vhodný pro jištění vedení, transformátorů, motorů a generátorů.

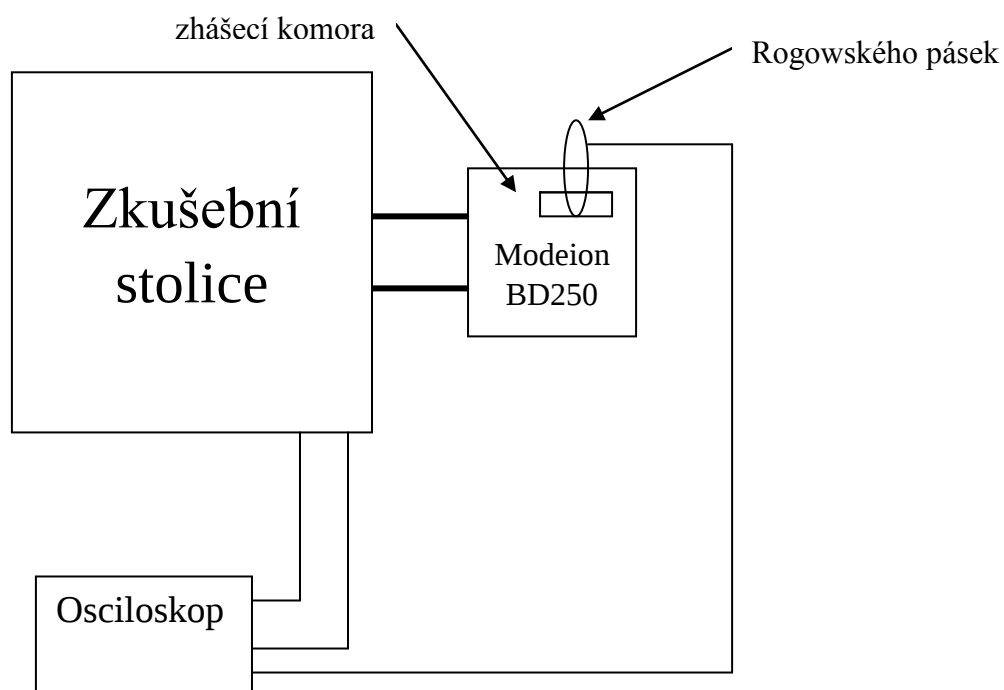


Obr. 6-1 Jistič Modeion BD250 [4]

Parametry	Hodnoty
Jmenovitý proud	100 A, 160 A, 250 A
Jmenovité pracovní napětí	690 V a.c.
Jmenovitý kmitočet	50/60 Hz
Kategorie užití	A
Jmenovitá mezní zkratová vypínací schopnost	65 kA / 415 V a.c. (36 kA / 415 V a.c.)
Jmenovitý krátkodobý výdržný proud při 690V a.c.	2,5 kA / 1 s
Jmenovitá zkratová zapínací schopnost	140 kA / 415 V a.c. (75 kA / 415 V a.c.)
Počet pólů	3/4

Tab.6-1 Parametry jističe Modeion BD250

7 SCHÉMA ZAPOJENÍ



Obr.7-1 Orientační schéma zapojení pracoviště

Pro měření byl použit osciloskop značky Tektronics, který umožňuje připojení tiskárny a následný tisk grafů na tiskárně. Ke zkušební stoličce byl připojen jistič Modeion BD250 s vyjmutou roštovou zhášecí komorou. Do zhášecí komory byly vloženy pouze dva stejné plechy kovového roštu o poloviční tloušťce. Plechy jsou k sobě galvanicky spojené pomocí vodiče a navzájem odizolované. Odizolování bylo provedeno pomocí papíru, který byl vystřížen do tvaru plechů. Jistič byl nastaven do rozepnuté polohy a na kontakty byl připájen slabý drát, který při puštění většího proudu se přetavil, a vzniknul elektrický oblouk.

8 MĚŘENÍ ELEKTRICKÉHO OBLOUKU

8.1 Příprava na měření

Nejprve byla připravena k měření zkušební stolice a poté byl připojen osciloskop, jistič. Dále byla nachystána roštová komora a vybrány kovové plechy, se kterými bude prováděno měření. Protože plechy jsou od sebe odděleny izolačním papírem a spojeny drátem, musel být spočítán odpor drátu. Odpor byl změřen tak, že plechy byly připojeny na zdroj napětí a úbytek napětí byl měřen na různých místech plechů. Všechny naměřené hodnoty byly zprůměrovány a vyděleny odebíraným proudem. Výsledný odpor je $R=0,03324\Omega$.

Na zkušební stolici byly použity děliče napětí a proudu:

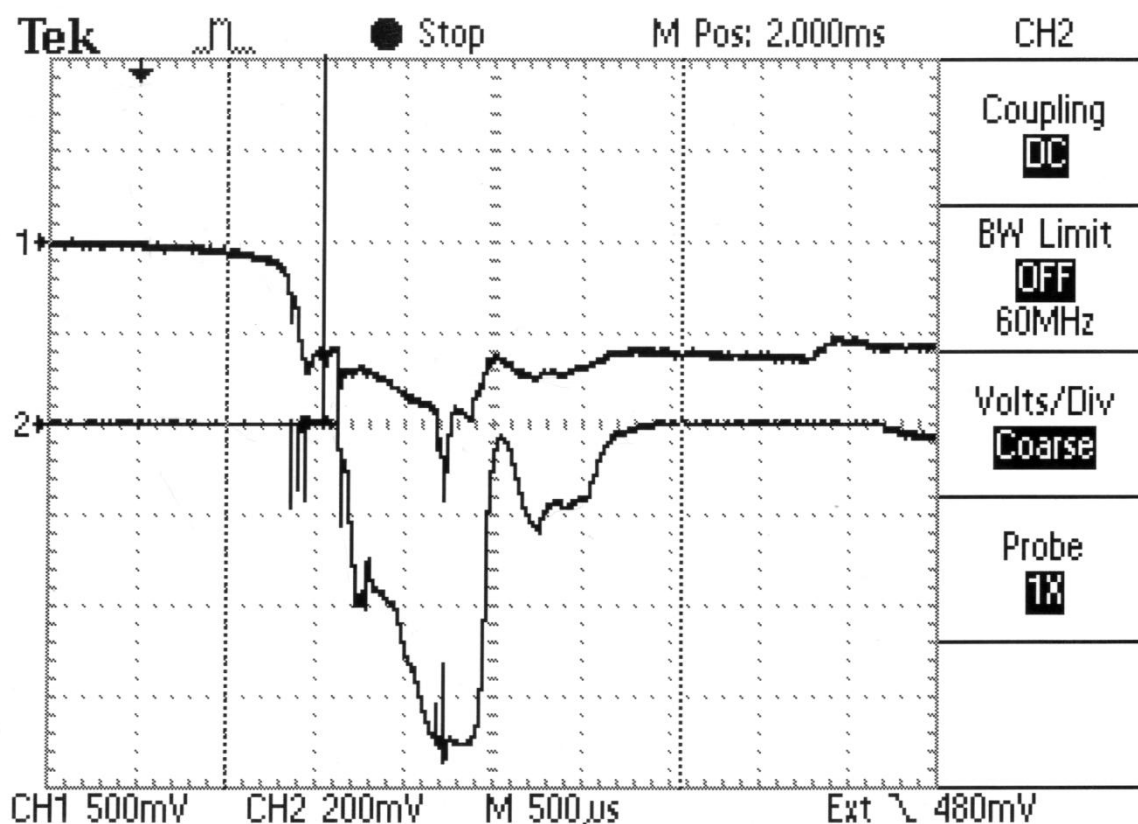
napěťový dělič: 1000V/5V

proudový dělič: 2000A/60mV

u Rogowského pásku byl také použit převodník proudu: 1A/1mV

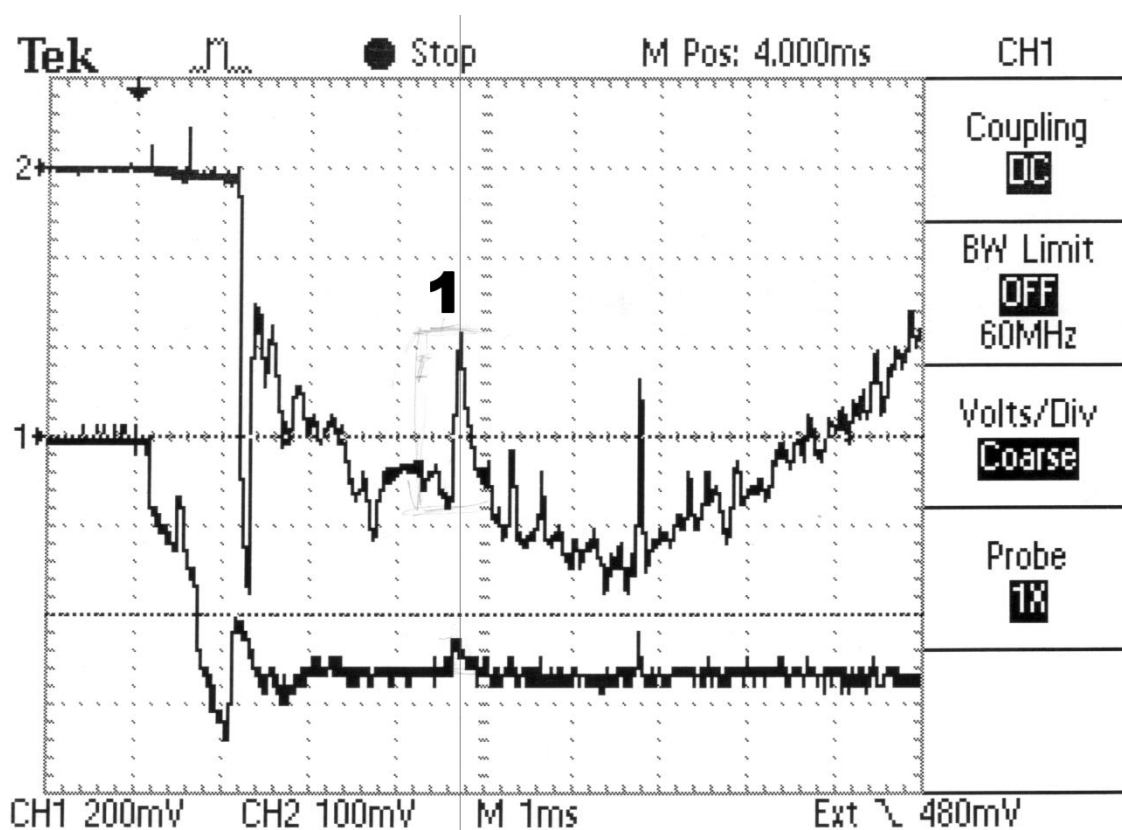
8.2 Naměřené průchody elektrického oblouku roštovým plechem

Bylo provedeno několik pokusů a naměřené charakteristiky zaznamenány a okomentovány. Před každým pokusem jsme kondenzátorovou baterii nabili na 200 V. Pak byl puštěn proud do obvodu s jističem a simulován zkrat a vznik elektrického oblouku.



Obr.8-1 Zaznamenané průběhy napětí a proudu při měření oblouku na plechu
kanál 1: napětí; kanál 2: proud plechem

Na Obr. 8-1 jsou zaznamenány průběhy proudu a napětí z osciloskopu. Na kanálu 1 bylo připojeno napětí a na kanálu 2 byl připojen proud plechem. Z grafu je vidět, že došlo ke zkratu, přetavení drátu mezi kontakty a vzniku elektrického oblouku. Elektrický oblouk přešel na plech v komoře a snažil se najít energeticky nejvýhodnější cestu plechem, kterou by mohl projít. Dále z grafu můžeme usoudit, že se elektrický oblouk snažil opustit plech, ale nepodařilo se mu to. To mohlo být z důvodu, že došlo k většímu prodloužení elektrického oblouku, a tím i zvětšení jeho odporu, a na to už oblouk neměl dostatečnou energii, a proto se vrací zpět na plech a následně, z nedostatku energie, zaniká. Z grafu, a podle doby trvání, se domníváme, že se také jednalo o kratší elektrický oblouk s menší energií.

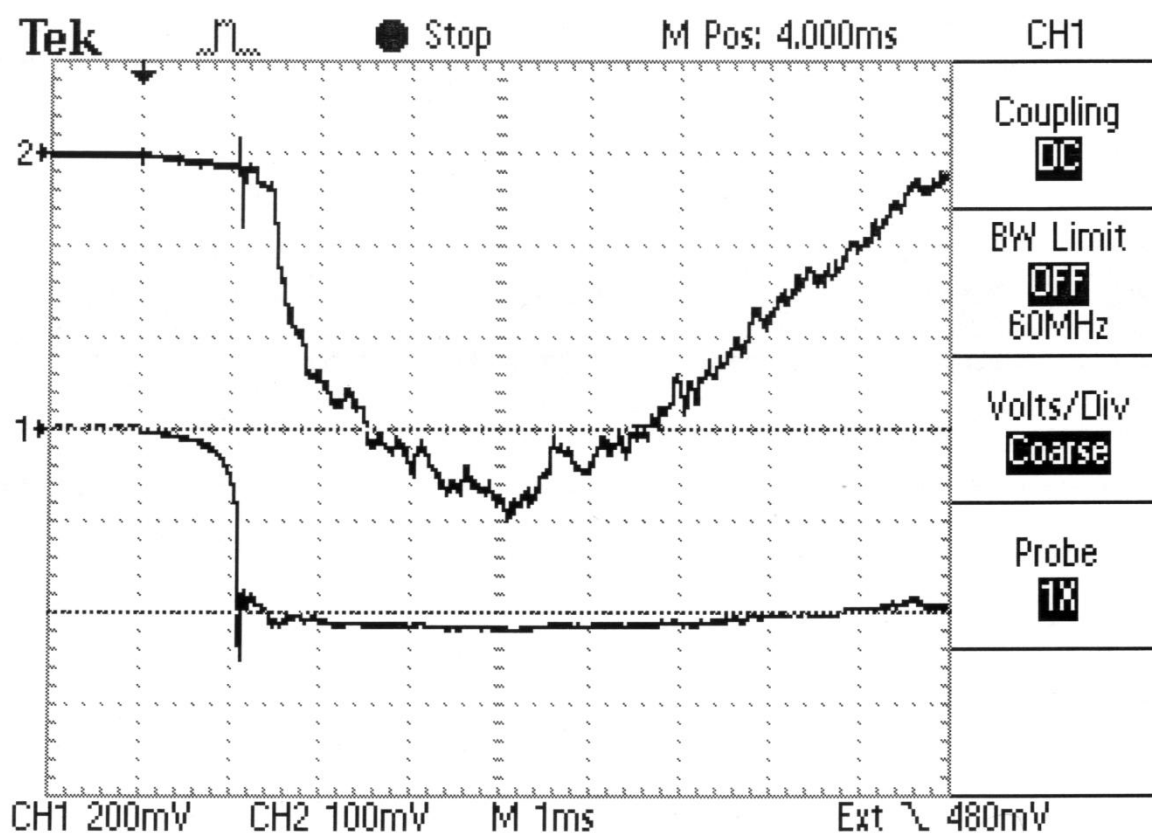


Obr.8-2 Zaznamenané průběhy napětí a proudu při měření oblouku na plechu

kanál 1: napětí; kanál 2: proud plechem

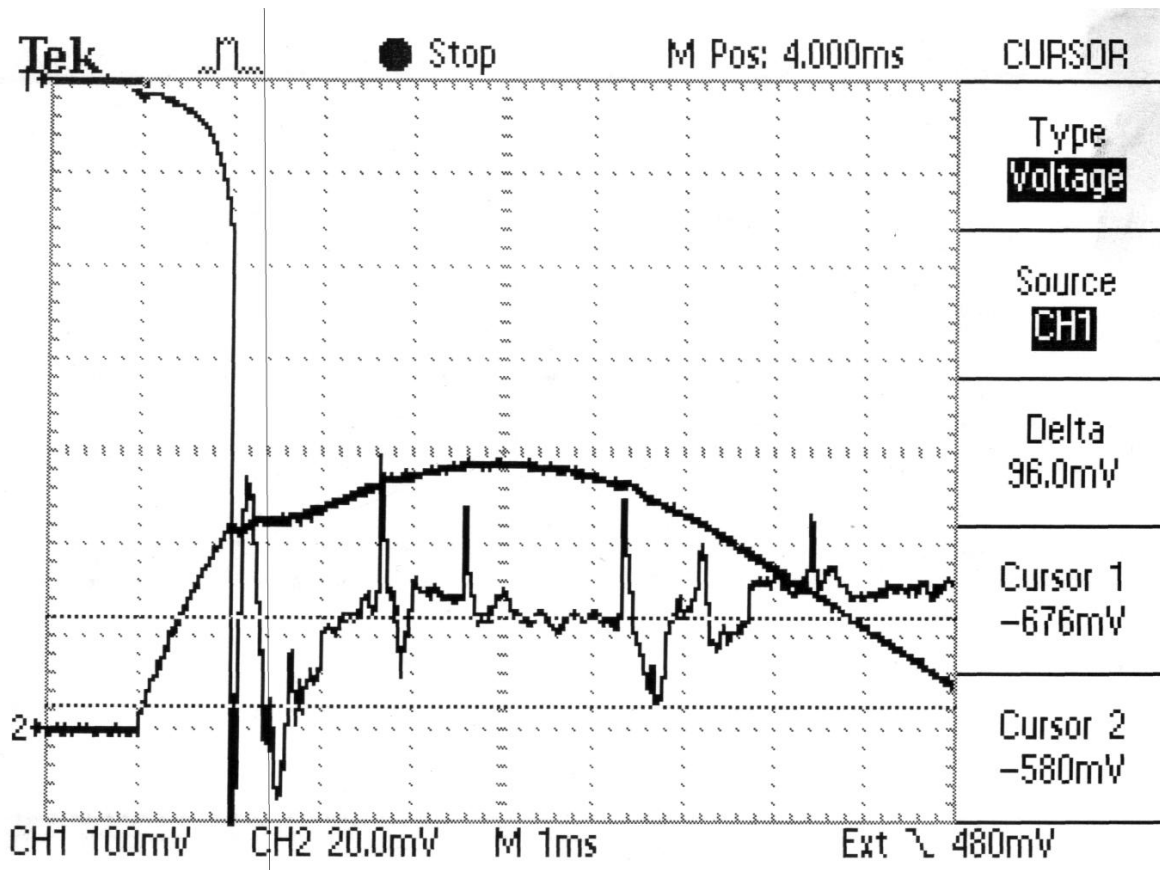
V tomto grafu na Obr. 8-2 maximální výchylky udávají, kdy přešel oblouk na plech. Minimální výchylky udávají, kdy elektrický oblouk plech opustil. V první milisekundě nastává zkrat a vytváří se oblouk. V bodě 1 můžeme pozorovat větší úbytek (skok) proudu. Z velikosti proudu byl spočítán úbytek napětí. Tento úbytek je spočítán odečtením proudu z grafu a vynásoben již zmíněným odporem drátu, který spojuje tyto dva plechy. Úbytek napětí je $U = 6,648 \text{ V}$. Poté je odečten rozdíl na napěťové křivce ve stejném čase, a získán výsledek $-U = 6,6 \text{ V}$. Z těchto hodnot lze usoudit, že napětí, potřebné na vznik a udržení katodové skvrny, je nezávislé na proudu tekoucím plechem. Z toho lze vyvodit, že v tomto místě se elektrický oblouk spojil „za plechem“ a neprošel celým drátem, kterým jsou obě části plechu spojené. Udržet

takový stav je pro oblouk energeticky náročnější, a tak pravděpodobně došlo k tomu, že oblouk obnovil nějakou cestu přes vložený plech a spojku.



Obr.8-3 Zaznamenané průběhy napětí a proudu při měření oblouku na plechu
kanál 1: napětí; kanál 2: proud plechem

Křivka 1 znázorňuje napětí, a křivka 2 proud procházející roštovým plechem. V první milisekundě nastává zkrat, přetavení drátu a vznik elektrického oblouku a následného pohybu elektrického oblouku na roštový plech. Elektrický oblouk se pokouší najít energeticky co nejvýhodnější cestu plechem. To se nejvíce projevilo na proudové křivce grafu, který nám ukazuje, že elektrický oblouk byl krátký a velmi brzo uhasnul.



Obr.8-4 Zaznamenané průběhy napětí a proudu při měření oblouku na plechu
kanál 1: napětí; kanál 2: proud obvodem

V tomto posledním měření byla do jističe vložena roštová komora se všemi plechy. Osciloskop má pouze dva vstupy, takže bylo změřeno pouze napětí plechem a proud obvodem - znázorněné na Obr. 8-4. V první milisekundě došlo ke vzniku zkratu, přetavení drátu a vzniku elektrického oblouku. Z grafu je vidět, jak elektrický oblouk přechází na jeden z plechů v roštové komoře a následně plech opouští, chvíli cestuje ve vzduchové mezeře mezi plechy a přechází na další z plechů komory.

Takto oblouk pokračuje až do jeho uhasnutí. Nejvíce je to znatelné na křivce napětí: největší výchylky udávají přeskočení elektrického oblouku na plech v komoře a nejmenší výchylky udávají opuštění elektrického oblouku z plechu.



9 ZÁVĚR

Tato bakalářská práce se snaží vysvětlit a pochopit chování elektrického oblouku ve zhášecí kovové komoře jističe. Vznik oblouku, pohyb oblouku na plechách komory, procesy dělení oblouku, vytváření anodových a katodových skvrn.

Úkolem bylo pokusit se experimentálně ověřit vlastnosti kovové zhášecí komory jističe. Pro experimenty byl použit jistič Modeion BD250. Byl zkoumán vznik elektrického oblouku, pohyb elektrického oblouku po plechách ve zhášecí komoře jističe, vliv na kontakty a následný zánik oblouku. Bylo provedeno několik experimentů na zhášecí komoře jističe Modeion BD250. V experimentech bylo zjištěno, že vznikající elektrický oblouk, mezi kontakty jističe, má pokaždé trochu odlišný průběh, který závisí na napájecím napětí proudu při vzniku oblouku, teplotě okolí a dalších faktorech, které nemůžeme ovlivnit.

Měření by bylo přesnější, kdybychom se dostali k další části měření, které zahrnovalo měření s vysokorychlostní kamerou. Podle zachycených snímků bychom mohli pozorovat chování elektrického oblouku ve zhášecí komoře, a tím přesněji určili cestu oblouku po kovových plechách ve zhášecí komoře.

Z porovnání měření v laboratorích elektrických přístrojů s experimenty v kapitole 5, můžeme říci, že proces dělení oblouku mezi kovovými plechy, není v žádném případě stabilní a přímočarý. Existence paralelních současných cest oblouku je zcela běžný jev. Ve zhášecí komoře si elektrický oblouk snaží najít energeticky co nejvýhodnější cestu. Při prodlužování elektrického oblouku dochází k velkému nárůstu obloukového napětí, čímž se mohou vytvářet anodové a katodové skvrny oblouku, které mohou na plechách zhášecí kovové komory zanechat stopy ve formě obloukových patek. Než dojde k vytvoření těchto skvrn, musí nejprve dojít k poklesu napětí v plazmě mezi oběma stranami plechu. Musí být určitý napěťový potenciál mezi anodou a katodou.



LITERATURA

- [1] HAVELKA, O. A KOL. *Elektrické přístroje*. Praha: SNTL, 1985. 436 s.
- [2] ZEMAN, S. *Jističe a stykače*. Praha: SNTL: 1963. 194 s.
- [3] HYNEK, J. Řada kompaktních jističů Modeion. *Elektro* (2006) č.:4, FCC Public s. r. o., Praha 2006. str. 14 – 16
- [4] OEZ s. r. o., Kompaktní jističe 2005 [firemní katalog], Letohrad 2005
- [5] GROSS, B.; HAVELKA, O. *Elektrické přístroje II*. Brno, VUT 1978. 274 stran
- [6] DOLEŽAL, M.; GROSS, B.; ZAJÍC, V. *Oblouk ve vypínací technice*. Praha : SNTL, 1959. 326 s.
- [7] LINDMAYER, M.; MARZAHN, E.; MUTZKE, A.; RÜTHER, T.; SPRINGSTUBBE, M., *The Process of Arc Splitting Between Metal Plates in Low Voltage Arc Chutes*. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 2006, Vol. 29, No. 2, str. 310-317
- [8] LINDMAYER, M.; MUTZKE, A.; RÜTHER, T.; SPRINGSTUBBE, M. *Some aspects of arc behavior in low voltage arc chutes*. XVIth Symposium on Physics of Switching Arc Brno: 2005, str. 278



PŘÍLOHA A – KALIBRACE MĚŘICÍHO ZAŘÍZENÍ

