

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

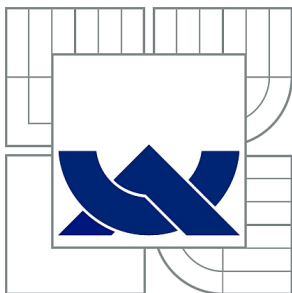
ZHÁŠENÍ SPÍNACÍHO OBLOUKU V EL. PŘÍSTROJÍCH

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

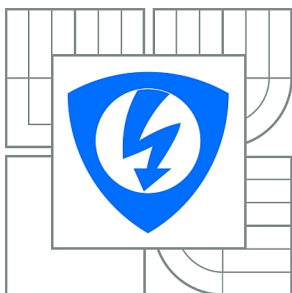
LADISLAV KARÁSEK

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A
ELEKTRONIKY

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

ZHÁŠENÍ SPÍNACÍHO OBLOUKU V EL. PŘÍSTROJÍCH

THE ARC EXTINCTION IN ELECTRICAL APPARATUSES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

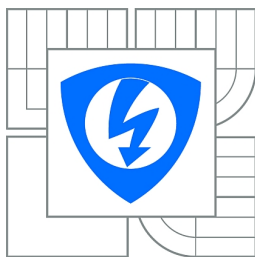
LADISLAV KARÁSEK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. BOHUSLAV BUŠOV, CSc.

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: Ladislav Karásek

ID: 146034

Ročník: 3

Akademický rok: 2013/2014

NÁZEV TÉMATU:

Zhášení spínacího oblouku v el. přístrojích

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Analyzujte okolnosti vzniku a zhášení elektrického oblouku ve spínacích přístrojích.
2. Představte úspěšné konstrukční varianty zhášecích principů v současných přístrojích nn.
3. Navrhněte rozšíření dvou laboratorních úloh s el. obloukem o moderní diagnostické metody.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] Havelka O. a kol.: Elektrické přístroje, SNTL/ALFA, 1985.

[2] Bárta-Vostracký a kol.: Spínací přístroje velmi vysokého napětí. SNTL/ALFA, 1983.

Termín zadání: 27.9.2013

Termín odevzdání: 2.6.2014

Vedoucí práce: doc. Ing. Bohuslav Bušov, CSc.

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

Bakalářská práce je zaměřena na teoretický rozbor problematiky spínacího oblouku v elektrických přístrojích, představení úspěšných zhašecích principů v současných přístrojích a její praktická část je zaměřena na inovaci laboratorních úloh „Statická V-A charakteristika stejnosměrného oblouku a dynamická V-A charakteristika střídavého oblouku“, která je součástí předmětu Elektrické přístroje. Součástí bakalářské práce je praktické měření stejnosměrného a střídavého oblouku, sestavení statické a dynamické charakteristiky a jeho následné zhodnocení. Poslední část práce je zaměřena na inovaci této laboratorní úlohy.

Abstract

My bachelor's thesis is focused on theoretical analysis of the issues of switching arc in electrical devices, introducing successful quenching principles in present devices and the practical part of thesis is focused on innovation of lab exercises „Static V-A characteristics of DC (direct-current) arc and dynamical V-A characteristic of AC (alternating current) arc“, which is part of the course Electrical Devices. Part of the bachelor's thesis is practical measuring of DC and AC arc, construction of static and dynamic characteristics and its subsequent reviews. The last part of my bachelor's thesis is focused on innovation of this lab exercise

Klíčová slova

Elektrický oblouk; statická V-A charakteristika oblouku; dynamická V-A charakteristika oblouku; zhášení oblouku;

Keywords

Electric arc; static V-A characteristic; V-A dynamic characteristics arc; extinction electric arc;

Bibliografická citace

KARÁSEK, L. *Zhášení spínacího oblouku v el. přístrojích*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 64 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Bohuslav Bušov, CSc..

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Spínací oblouk v elektrických přístrojích 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

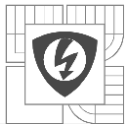
Podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Bohuslavu Bušovi, CSc. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

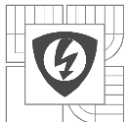
V Brně dne

Podpis autora

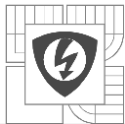


OBSAH

1 ÚVOD	10
2 CHARAKTERISTIKA ELEKTRICKÉHO OBLOUKU	11
2.1 ÚVOD DO PROBLEMATIKY ELEKTRICKÉHO OBLOUKU	11
2.2 PLAZMA	13
2.3 VZNIK OBLOUKU VE SPÍNACÍCH PŘÍSTROJÍCH	13
2.3.1 VZNIK OBLOUKU MEZI KONTAKTY VYPÍNAČE PŘI ZAPÍNÁNÍ.....	14
2.3.2 VZNIK OBLOUKU MEZI KONTAKTY VYPÍNAČE PŘI VYPÍNÁNÍ	14
3 CHARAKTERISTIKY ELEKTRICKÉHO OBLOUKU	16
3.1 STATICÁ V-A CHARAKTERISTIKA ELEKTRICKÉHO OBLOUKU	16
3.2 DYNAMICKÁ V-A CHARAKTERISTIKA ELEKTRICKÉHO OBLOUKU	18
4 ZHÁŠENÍ ELEKTRICKÉHO OBLOUKU V OBVODECH	21
4.1 ZÁNİK ELEKTRICKÉHO OBLOUKU	21
4.2 PRINCIP ZHÁŠENÍ STEJNOSMĚRNÉHO PROUDU	22
4.2.1 PRINCIPY ZHÁŠENÍ STEJNOSMĚRNÉHO OBLOUKU	22
4.3 PRINCIP ZHÁŠENÍ STŘÍDAVÉHO PROUDU	25
4.3.1 FYZIKÁLNÍ PRINCIP ZHÁŠENÍ STŘÍDAVÉHO OBLOUKU	25
5 ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI JEDNOTLIVÝCH TYPŮ ZHÁŠEDEL PRO NÍZKÉ NAPĚTÍ	27
5.1 MAGNETICKÉ VYPÍNAČE	27
5.2 TLAKOVZDUŠNÉ VYPÍNAČE	28
5.3 VAKUOVÉ VYPÍNAČE	28
5.4 ZHÁŠEDLA SE ZRNITÝM HASIVEM	29
6 LABORATORNÍ ÚLOHA MĚŘENÍ V-A STATICKÉ CHARAKTERISTIKY ELEKTRICKÉHO OBLOUKU	30
6.1 MĚŘENÍ STATICKÉ V-A CHARAKTERISTIKY ELEKTRICKÉHO OBLOUKU	31
6.1.1 MĚŘENÍ V-A STATICKÉ CHARAKTERISTIKY ELEKTRICKÉHO OBLOUKU PŘI $I_{OB}=KONST.$	31
6.1.2 MĚŘENÍ V-A STATICKÉ CHARAKTERISTIKY ELEKTRICKÉHO OBLOUKU PŘI $L_0=KONST.$	37
6.1.3 KATODOVÁ A ANODOVÁ SKVRNA	40
7 MĚŘENÍ A ZKOUMÁNÍ DYNAMICKÉ V-A CHARAKTERISTIKY ELEKTRICKÉHO OBLOUKU	41
7.1 HYPOTÉZY O ZMĚNÁCH A CHOVÁNÍ DYNAMICKÉ V-A CHARAKTERISTIKY VLIVEM ZMĚN PARAMETRŮ ZAPOJENÍ A PŮSOBENÍM OKOLNÍCH VLIVŮ	42
7.2 MĚŘENÍ DYNAMICKÉ V-A CHARAKTERISTIKY ELEKTRICKÉHO OBLOUKU	44
8 INOVACE PRACOVIŠTĚ A NÁVRH ROZŠÍŘENÍ LABORATORNÍCH ÚLOH O MODERNÍ DIAGNOSTICKÉ METODY	46

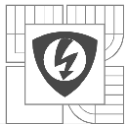


8.1 POPIS SYSTÉMU OVLÁDÁNÍ POLOHY ELEKTROD	46
8.2 NÁVRH MĚŘENÍ ÚBYTKU NAPĚTÍ NA STEJNOSMĚRNÉM ELEKTRICKÉM OBLOUKU	47
8.3 MĚŘENÍ DYNAMICKÉ V-A CHARAKTERISTIKY A VLIV POLOHY ELEKTROD	49
8.4 NÁVRH A REALIZACE CHLADICÍHO SYSTÉMU	53
8.5 MĚŘENÍ TEPLoty VE STYKU ELEKTROD POMOCÍ INFRAČERVENÉ KAMERY	54
8.5.1 PRÁCE S PROGRAMEM SAT REPORT	55
8.5.2 VÝSLEDKY A ZHODNOCENÍ MĚŘENÍ	57
8.6 ZMĚNY VLASTNOSTÍ ELEKTRICKÉHO OBLOUKU VLIVEM ZVYŠOVÁNÍ KATODOVÝCH A ANODOVÝCH ÚBYTKŮ	61
9 ZÁVĚR.....	62
LITERATURA	63
PŘÍLOHY	64

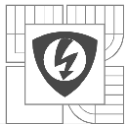


SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 1 Teplota elektrického oblouku v radiálním směru</i>	<i>11</i>
<i>Obrázek 2 Průběh napětí podél krátkého oblouku</i>	<i>12</i>
<i>Obrázek 3 Průběh napětí podél dlouhého oblouku</i>	<i>12</i>
<i>Obrázek 4 Dvě základní polohy vypínače</i>	<i>13</i>
<i>Obrázek 5 Průchod proudu úžinami v kontaktním styku</i>	<i>14</i>
<i>Obrázek 6 Statické V-A charakteristiky elektrického oblouku</i>	<i>16</i>
<i>Obrázek 7 Obvod s obloukem a předřadníkem</i>	<i>18</i>
<i>Obrázek 8 Charakteristika obvodu s obloukem a předřadníkem</i>	<i>18</i>
<i>Obrázek 9 Průběhy napětí a proudu elektrického oblouku napájeného střídavým proudem</i>	<i>19</i>
<i>Obrázek 10 Dynamická V-A charakteristika elektrického oblouku</i>	<i>19</i>
<i>Obrázek 11 Vliv délky oblouku na tvar dynamické V-A charakteristiky</i>	<i>20</i>
<i>Obrázek 12 Vliv délky a odporu oblouku na tvar statické V-A charakteristiky</i>	<i>23</i>
<i>Obrázek 13 Vliv velikosti předřadníku na tvar statické V-A charakteristiky</i>	<i>23</i>
<i>Obrázek 14 Vliv napětí zdroje na tvar statické V-A charakteristiky</i>	<i>24</i>
<i>Obrázek 15 Podmínky úspěšného uhasnutí oblouku</i>	<i>25</i>
<i>Obrázek 16 Oscilogram napětí a proudu při vypínání</i>	<i>26</i>
<i>Obrázek 17 Vypínač s magnetickým vyfukováním oblouku</i>	<i>27</i>
<i>Obrázek 18 Vypínač se štěrbinovou komorou</i>	<i>28</i>
<i>Obrázek 19 Schéma zapojení obvodu pro měření statické V-A charakteristiky elektrického oblouku</i>	<i>31</i>
<i>Obrázek 20 Zařízení na měření elektrického oblouku</i>	<i>32</i>
<i>Obrázek 21 Změřená a vypočtená statická V-A charakteristika elektrického oblouku při konstantní délce oblouku $l_0=2\text{mm}$</i>	<i>36</i>
<i>Obrázek 22 Změřená a vypočtená statická V-A charakteristika elektrického oblouku při konstantní délce oblouku $l_0=3\text{mm}$</i>	<i>36</i>
<i>Obrázek 23 Změřená a vypočtená statická V-A charakteristika elektrického oblouku při konstantním proudu oblouku $I_{ob}=3\text{A}$</i>	<i>39</i>
<i>Obrázek 24 Změřená a vypočtená statická V-A charakteristika elektrického oblouku při konstantním proudu oblouku $I_{ob}=7\text{A}$</i>	<i>39</i>
<i>Obrázek 25 Katodová a anodová skvrna při měření statické V-A charakteristiky</i>	<i>40</i>
<i>Obrázek 26 Dynamická V-A charakteristika střídavého oblouku</i>	<i>41</i>
<i>Obrázek 27 Schéma zapojení obvodu pro měření dynamické V-A charakteristiky elektrického oblouku</i>	<i>44</i>
<i>Obrázek 28 Popis ovládacích koleček</i>	<i>46</i>

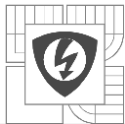


<i>Obrázek 29 Schéma zapojení obvodu pro měření průběhu napětí na elektrickém oblouku</i>	<i>47</i>
<i>Obrázek 30 Průběh napětí podél měřeného oblouku</i>	<i>48</i>
<i>Obrázek 31 Průběhy napětí a proudu na elektrickém oblouku při vertikálním uložení elektrod ..</i>	<i>49</i>
<i>Obrázek 32 Dynamická V-A charakteristika elektrického oblouku při vertikálním uložení elektrod</i>	<i>50</i>
<i>Obrázek 33 Průběhy napětí a proudu na elektrickém oblouku při horizontálním uložení elektrod</i>	<i>51</i>
<i>Obrázek 34 Dynamická V-A charakteristika elektrického oblouku při horizontálním uložení elektrod.....</i>	<i>51</i>
<i>Obrázek 35 Průběh napětí a proudu na elektrickém oblouku s chlazením horní elektrody</i>	<i>52</i>
<i>Obrázek 36 Dynamická V-A charakteristika elektrického oblouku s chlazením horní elektrody ..</i>	<i>52</i>
<i>Obrázek 37 Ventilátor Brushless AFB0712MB.....</i>	<i>53</i>
<i>Obrázek 38 Schéma zapojení chladicího systému.....</i>	<i>53</i>
<i>Obrázek 39 3-D model nástavce na ventilátor.....</i>	<i>54</i>
<i>Obrázek 40 Ukázka vložení pracovního pole IrImage</i>	<i>55</i>
<i>Obrázek 41 Ukázka pracovního prostředí programu SAT Report - vložený snímek.....</i>	<i>56</i>
<i>Obrázek 42 Popis programu SAT Report - Export zpracovaného snímku.....</i>	<i>56</i>
<i>Obrázek 43 Snímek infrakamerou - teplota elektrod při napětí $U=4\text{ V}$ a $I=15\text{ A}$</i>	<i>57</i>
<i>Obrázek 44 Snímek infrakamerou - teplota elektrod při napětí $U=4,5\text{ V}$ a $I=15\text{ A}$</i>	<i>57</i>
<i>Obrázek 45 Snímek infrakamerou - teplota elektrod při napětí $U=5\text{ V}$ a $I=15\text{ A}$</i>	<i>58</i>
<i>Obrázek 46 Průběh teploty elektrody v závislosti na poloze.....</i>	<i>60</i>
<i>Obrázek 47 Vliv katodového a anodového úbytku napětí na statickou V-A charakteristiku</i>	<i>61</i>



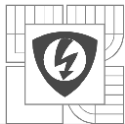
SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 1</i> Konstanty Ayrtonové pro různé druhy elektrod [11]	32
<i>Tabulka 2</i> Měření statické V-A charakteristiky při l_o =kont. pro délky 2, 3, 4, 5 mm	34
<i>Tabulka 3</i> Měření statické V-A charakteristiky při l_o =kont. pro délky 6, 7, 8 mm	34
<i>Tabulka 4</i> Měření úbytku napětí při délce horní elektrody 14 a 4 cm pro vzdálenost elektrod $l_o=6$ mm	35
<i>Tabulka 5</i> Měření V-A charakteristiky pro konstantní proud $I_{ob}=(3; 4,2)$ A	37
<i>Tabulka 6</i> Měření V-A charakteristiky pro konstantní proud $I_{ob}=(5; 7)$ A	37
<i>Tabulka 7</i> Měření V-A charakteristiky pro konstantní proud $I_{ob}=8$ A	37
<i>Tabulka 8</i> Měření teploty ve styku a elektrod.....	58



SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

$A1$	oblast stabilního hoření	[-]
$A2$	oblast stabilního hoření	[-]
$A3$	mez stabilního hoření	[-]
E	intenzita elektrického pole	[V m^{-1}]
f_0	kmitočet zotaveného napětí	[Hz]
I_0	proud protékající obvodem	[A]
I_{OB}	proud oblouku	[A]
l_{ob}	délka oblouku	[m]
L	indukce	[H]
P_{OB}	výkon na oblouku	[W]
R	odpor	[Ω]
R_{ob}	odpor oblouku	[Ω]
R_s	stykový odpor	[Ω]
t	čas	[s]
T	perioda	[s]
U_A	úbytek napětí na anodě	[V]
U_K	úbytek napětí na katodě	[V]
U_{max}	maximální napětí	[V]
U_{OB}	napětí oblouku	[V]
U_{OBN}	obnovené napětí	[V]
U_p	součín intenzity	[V]
U_R	úbytek napětí na odporu oblouku	[V]
U_G	napětí zdroje	[V]
U_{zap}	zapalovací špička	[V]
ΔU	rozdíl napětí oblouku a obvodu	[V]
α	konstanty Ayrtonové	[V]
β	konstanty Ayrtonové	[V/cm]
γ	konstanty Ayrtonové	[W]
δ	konstanty Ayrtonové	[W/cm]
ϑ	teplota	[°F]
T	časová konstanta	[s]



1 ÚVOD

Při vypínacím pochodu elektrického přístroje dochází ke vzniku elektrického oblouku. Je tedy nutné charakterizovat oblouku a zajistit rychlé a úplné uhašení elektrického oblouku. Při vypínání obvodu spínacím el. přístrojem dojde nejprve k oddálení kontaktů a zapálení elektrického oblouku mezi oddalujícími se kontakty. Oblouk je tvořen plazmatem o velmi vysoké teplotě. Intenzivním působením tepla může dojít k měknutí kontaktů, nebo celkovému zničení kontaktů vlivem svaření a tím i celého elektrického přístroje a vyřazení celého systému z provozu. Proto je kladen důraz na rychlost odvedení elektrického oblouku ze stykových ploch do zhášecí komory. Zhášecí komory jsou navrhovány tak, aby odolaly působení oblouku, zajistily účinnou deionizaci oblouku a jeho přerušení.

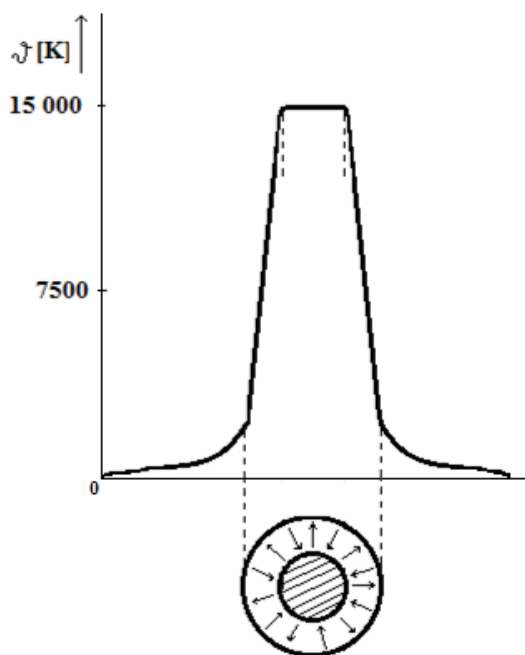
V bakalářské práci bude popsán elektrický oblouk, jeho fyzikální podstata, vznik, V-A charakteristika, odlišnosti mezi stejnosměrným a střídavým elektrickým obloukem, zhášení elektrického oblouku a představení typů úspěšných zhášedel používaných v praxi. Další část bude věnována měření na stejnosměrném a střídavém elektrickém oblouku a konstrukci V-A charakteristik. Poslední část bakalářské práce bude zaměřena na návrh rozšíření dvou laboratorních úloh s elektrickým obloukem o moderní diagnostické metody.

2 CHARAKTERISTIKA ELEKTRICKÉHO OBLOUKU

2.1 Úvod do problematiky elektrického oblouku

Elektrický oblouk je na pohled oslnivě zářící elektrický výboj hořící v plynu (plazma), který je schopen samostatné existence libovonně dlouhou dobu, dokud nezanikne napájecí elektrický proud. Mezi hlavní znaky elektrického oblouku patří velký proud protékající hořícím obloukem. Jádrem oblouku tvoří ionizovaný plyn (plazma), které přenáší proud. Následkem průchodu velkého proudu je v oblouku velmi vysoká teplota a proto oblouk intenzivně vyzařuje světlo. [5][10]

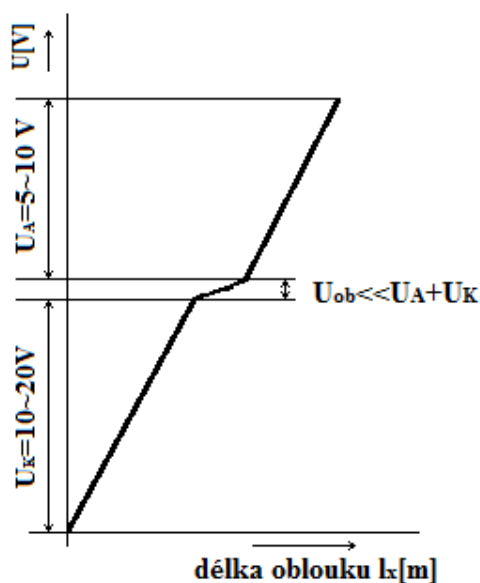
Teplota jádra se pohybuje od 6 000 °K do 15 000 °K. Paradoxní je, že teplot 6000 °K dosahují oblouky chlazené přirozeně vzduchem, a teplot 15 000 °K dosahují oblouky velmi intenzivně chlazené. Tento paradox je způsoben tím, že při intenzivním chlazení dochází ke zmenšení průměru hořícího oblouku a tím dojde ke zvýšení hustoty proudu, což vyvolá zvýšení teploty v jádru oblouku. Na obrázku č. 1 je vidět rozložení teplot v elektrickém oblouku v radiálním směru. Je patrné, že celé jádro oblouku má téměř konstantní teplotu. Obal jádra je tvořen žhavými plyny, na obalu je velký teplotní spád a toho se využívá při chlazení oblouku. V obalu oblouku dochází k výměně tepla mezi obloukem a okolním plynem. [5][3]



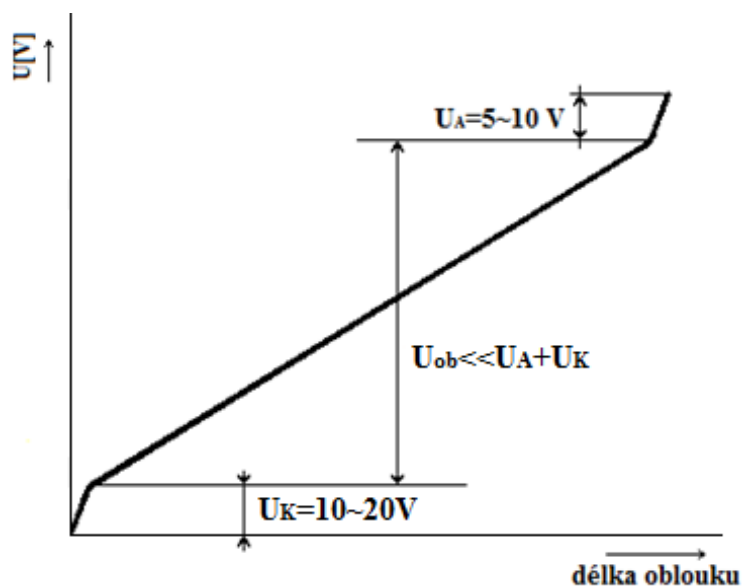
Obrázek 1 Teplota elektrického oblouku v radiálním směru

Mezi další znaky patří poměrně malý úbytek napětí na elektrodách oblouku, malý katodový úbytek a velká hustota proudu na katodové skvrně a tím i její velká teplota. Spád napětí podél oblouku je závislý na délce oblouku. Při porovnání obrázků č. 2 a č. 3 je vidět, že pro krátký oblouk je katodový a anodový úbytek hlavní částí napětí na oblouku, a jsou mnohonásobně větší než napětí na sloupci oblouku. Naopak, při hoření dlouhého oblouku tvoří úbytek napětí na

katodě a anodě podstatně malou část v porovnání s napětím plazmatu, což také prokazují laboratorní úlohy. [3]



Obrázek 2 Průběh napětí podél krátkého oblouku



Obrázek 3 Průběh napětí podél dlouhého oblouku

Oblouk můžeme klasifikovat podle charakteru napájecího proudu na stejnosměrný a střídavý oblouk. Stejnosměrný oblouk je takový oblouk, který je napájen stejnosměrným proudem a má stálou polaritu elektrod. Stejnosměrný oblouk považujeme za statický, závislost napětí mezi elektrodami a obloukovým proudem nazýváme statickou V-A charakteristikou. [5][10]

Střídavý oblouk je takový oblouk, který je napájen střídavým proudem, polarita jeho napájecího proudu se periodicky mění a tím i polarita napětí na elektrodách, proto veličiny charakterizující střídavý oblouk jsou periodickými funkcemi času. Při optickém porovnání se stejnosměrným obloukem se střídavý oblouk jeví jako souměrný. Tato optická souměrnost je způsobena tím, že polarita elektrod se mění s frekvencí střídavého proudu a se stejnou frekvencí se mění tvar oblouku. [5][10]

Dalším kritériem, podle kterého můžeme oba typy oblouků klasifikovat, je materiál ze kterého jsou vyrobeny elektrody, a to na oblouky s uhlíkovými, železnými nebo měděnými elektrodami. Oblouky můžeme nadále odlišovat podle prostředí na oblouky v parách elektrodových kovů a oblouky v plynech, tj. podle složení výbojové dráhy. U oblouků v parách tvoří výbojovou dráhu atomy a molekuly z jedné elektrody, zatím co u oblouků v plynech tvoří výbojovou dráhu především materiál prostředí. [5][10]

Podle tvaru výbojové dráhy klasifikujeme oblouky na stabilizované a volně hořící. Stabilizovaného oblouku dosáhneme použitím vhodné stabilizační metody, jako stabilizační media se nejčastěji používají kapaliny nebo plyny. Souměrný tvar podle svislé osy je výhodný pro početní a experimentální zkoumání vlastností oblouku. [3][5][10]

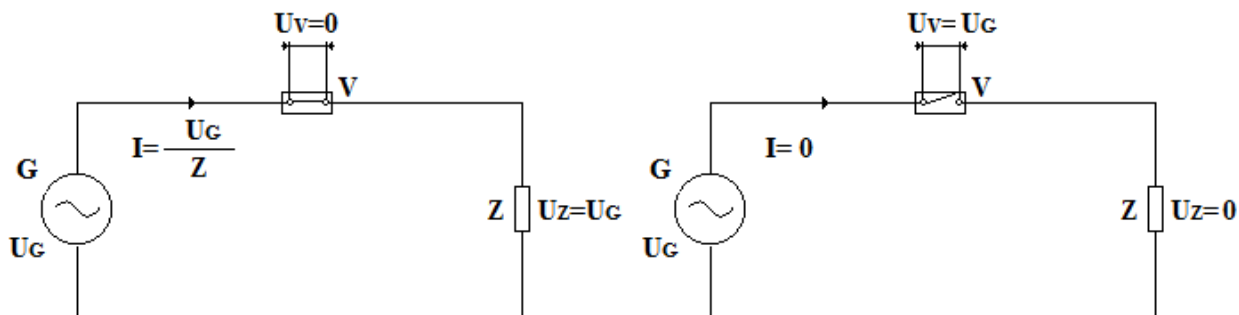
2.2 Plazma

Hmotu lze rozdělit do čtyř skupenství podle obsahu tepelné energie: pevné, kapalné, plynné a plazmatické. V pevném skupenství mají látky atomy uspořádány pravidelně v mřížce, každý atom má pevně vymezené místo a velmi malou možnost pohybu. Zahříváním látky na teplotu tání, která je pro každý materiál jiná, se poruší struktura a látka přejde v kapalinu. Vzájemné působení atomů v kapalné látce se omezuje na nejbližší atomy, stejně jako v tuhé látce. Při přechodu látky z kapalného do plynného skupenství nastávají větší změny, pohyb částic je chaotický a jednotlivé částice na sebe působí jen velmi krátkou dobu při srážkách. Zahřívání plynné látky má za následek zvyšování kinetické energie molekul, při určité teplotě je kinetická energie tak velká, že dochází k disociaci molekul na atomy. Takto vzniklé atomy, mají dostatečně velkou kinetickou energii, aby při srážkách dvou atomů došlo k nabuzení atomu. Nabuzený atom ve velmi krátké době vyzařuje energii jako světlo. Některé atomy mají dostatečně velkou kinetickou energii, která dostačuje k vytržení elektronu z obalu atomu, tj. k ionizaci. [5]

Ionizací v plynu vzniknou elektricky nabitě částice – záporně nabitě elektrony a kladně ionty. Plazma je plyn zahřátý na vysokou teplotu, s velkým stupněm ionizace. Nabuzené atomy v plazmatu mají za následek intenzivní vyzařování světla. Plazma obsahuje nosiče nábojů a je velmi dobrým vodičem. Velká vodivost a intenzivní vyzařování plazmatu jsou jeho hlavními znaky. [5]

2.3 Vznik oblouku ve spínacích přístrojích

Každá elektrická soustava se skládá ze tří základních prvků: zdroje elektrické energie, spotřebiče a vypínače. Vypínač má za úkol dle potřeby přivést elektrickou energii ke spotřebiči a uvést spotřebič do chodu, nebo odpojit dodávku elektrické energie do spotřebiče a tím přerušit činnost spotřebiče. Z toho plyne, že každý vypínač má dvě základní pracovní polohy, zapnuto a vypnuto. V sepnutém stavu protéká vypínačem proud určený podílem napájecího napětí a celkové impedance obvodu. Při poloze vypnuto je proud nulový a na vypínači je napětí zdroje. Tyto polohy jsou schématicky znázorněny na obrázku č. 4. Vypínače jsou podle tohoto stavěny na hodnoty proudu, které musí vypínač během provozu trvale snést, aniž by oteplení částí vypínače překročilo dovolené hodnoty oteplení. [3]



Obrázek 4 Dvě základní polohy vypínače

2.3.1 Vznik oblouku mezi kontakty vypínače při zapínání

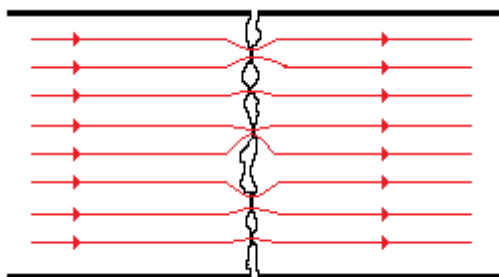
Mechanismus vzniku oblouku při vypínání a zapínání vypínače jsou odlišné. Liší se účinky i způsob zhášení elektrického oblouku v obou stavech.

Při zapínání jsou kontakty rozpojeny, pohyblivý kontakt se přibližuje k pevnému kontaktu určitou rychlostí, tím se zkracuje vzdálenost mezi oběma kontakty. V určité vzdálenosti, když intenzita elektrického pole překročí elektrickou pevnost prostředí mezi kontakty, dojde k elektrickému průrazu prostředí mezi kontakty a zapálí se zapínací oblouk. Při dalším pohybu kontaktů se velikost oblouku zkracuje, až se kontakty dotknou, oblouk zanikne. [10]

Oblouk způsobuje opálení kontaktů, opálení minimalizujeme použitím vhodného materiálu při návrhu kontaktů. Proto dbáme na to, aby byl čas hoření oblouku co nejkratší, to znamená, aby zapínací rychlost byla co nejvyšší a přitlačná síla kontaktu dostatečně velká. Když není přitlačná síla dostatečně velká, může dojít k odražení kontaktu, vlivem pružných sil při prvním dotyku. Při několikanásobném odražení (zakmitání), může dojít k trvalému svaření kontaktů a tím zničení vypínače. Pro zhášení zapínacího oblouku se obvykle v přístrojích neprovádí žádné zvláštní úpravy. [10]

2.3.2 Vznik oblouku mezi kontakty vypínače při vypínání

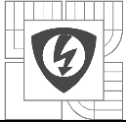
Při vypínání jsou kontakty v sepnutém stavu přitlačeny na sebe kontaktní silou, která částečně deformuje materiál ve stykové ploše. Proud nikdy neprochází celou plochou kontaktu, protože není možné vyrobít naprosto hladký kontakt, jak je naznačeno na obrázku č. 5. Proud prochází mikroskopickými můstky, které vzniknou přitlačením jednoho kontaktu na druhý. Stykový odpor R_s je mnohem větší než odpor proudovodné dráhy, proto je stykový odpor zdrojem tepla v sepnutém stavu.



Obrázek 5 Průchod proudu úžinami v kontaktním styku

V okamžiku vypínání dochází k zmenšování přitlačné síly a oddalování kontaktů, tím se zmenšují stykové plochy, až se přeruší styk úplně. Při snižování velikosti kontaktních ploch rostou proudové hustoty v těchto ploškách a dochází k vzrůstu teploty. V posledních okamžicích kovového spojení vzroste teplota spoje tak vysoko, že dochází k odpaření kovu. Energie nahromaděná v indukčnostech vypínaného obvodu způsobí mezi kontakty přepětí, které působí malou vzdálenost mezi oddalujícími se kontakty, kde se nachází páry kontaktního materiálu. Působením přepětí páry kovů ionizují, tak vzniká vodivé prostředí a začne hořet oblouk mezi kontakty. [3] [4]

Oblouk vzniká jen tehdy, když napětí a proud překročí kritické hodnoty, které jsou ovlivněny vlastnostmi materiálu kontaktu, vlastnosti prostředí ve kterém oblouk hoří a parametry



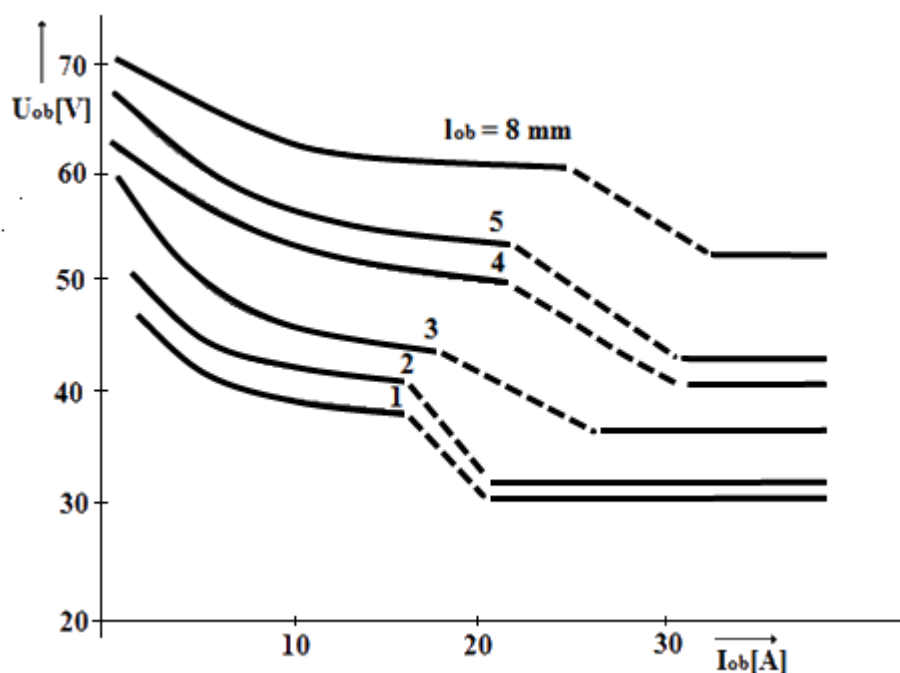
obvodu. Při vzniku oblouku dochází k nadměrnému oteplování a tím i poškozování kontaktů, což zkracuje životnost kontaktů a tím i celého spínacího přístroje, nebo jeho úplnému zničení a vyřazení z funkce. Velikost proudu a doba hoření oblouku ovlivňuje vzniklé škody. Proto je žádoucí, aby byl oblouk uhašen v co nejkratší době. Zhášecí principy budou důkladně probrány v kapitole č. 4. Spínací oblouk je důležitým prvkem vypínacího přístroje. Umožňuje přeměnu elektromagnetické energie obvodu na tepelnou energii, kterou lze odvést chlazením oblouku, jinak by se elektromagnetická energie přeměnila jiným méně výhodným způsobem, například elektrickým výbojem přes izolaci v některém místě vypínaného obvodu. [4]

3 CHARAKTERISTIKY ELEKTRICKÉHO OBLUKU

Charakteristikou oblouku je křivka zobrazující závislost obloukového napětí tj. napětí na elektrodách na proudu protékajícím obloukem. Charakteristiky dělíme na statickou a dynamickou. Statickou charakteristiku vynášíme pro stejnosměrný oblouk, tj. oblouk napájený stejnosměrným napětím. Dynamickou charakteristiku naopak vynášíme pro střídavý oblouk, tj. oblouk napájený střídavým napětím.

3.1 Statická V-A charakteristika elektrického oblouku

Stejnoseměrný oblouk je udržovaný stejnosměrným proudem, je charakterizován stálou polaritou elektrod a napětím konstantním v čase. Závislost napětí U_{ob} na elektrodách a proudu procházejícím obloukem I_{ob} nazýváme statickou charakteristikou stejnosměrného oblouku $U_{ob}=f(I_{ob})$. Tato charakteristika se skládá ze dvou částí, jak je vidět na obrázku č. 6. Jedná se o hyperbolickou část, která probíhá v oblasti malých proudů a část mírně stoupající, která se nachází v oblasti velkých proudů a je to přímka. [3]

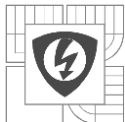


Obrázek 6 Statické V-A charakteristiky elektrického oblouku

kde U_{ob} je napětí na elektrodách oblouku a I_{ob} je proud procházející obloukem, z hodnot napětí a proudu oblouku lze spočítat dle Ohmova zákona odpor oblouku:

$$R_{ob} = \frac{U_{ob}}{I_{ob}} \quad [\Omega; V, A] \quad (3.1.1)$$

Tento odpor má činný charakter. Na rozdíl od odporu kovového vodiče má odpor oblouku vlastnost, že se vzrůstajícím proudem odpor oblouku klesá, proto je závislost napětí oblouku na proudu nelineární, napětí klesá se vzrůstajícím proudem. V oblasti nízkých proudů, klidového hoření, je napětí oblouku vyjádřeno pomocí rovnice Ayrtonové: [10]



$$U_{ob} = \alpha + \beta \cdot l_{ob} + \frac{\gamma + \delta \cdot l_{ob}}{I_{ob}} \quad [V; V, V \cdot m^{-1}, m, W, W \cdot m^{-1}, m, A] \quad (3. 1. 2)$$

kde l_{ob} - délka oblouku

$\alpha, \beta, \gamma, \delta$ – konstanty Ayrtonové, jsou závislé na druhu plynu, ve kterém oblouk hoří, jeho tlaku, poměrech oblouku a na rozměrech, tvaru a materiálu elektrod.

Součet $\alpha + \frac{\gamma}{I_{ob}}$ je součet katodového a anodového úbytku napětí na elektrodách, součet $\beta + \frac{\delta}{I_{ob}}$ je spád napětí na oblouku, závislý na délce oblouku. Podle délky oblouku můžeme v rovnici Ayrtonové zanedbat buď úbytky napětí na elektrodách, když se jedná o dlouhý oblouk nebo spád napětí na oblouku, když se jedná o krátký oblouk. Krátkým obloukem se rozumí oblouk, jehož délka je menší než průměr oblouku. [3]

Pro dlouhý oblouk můžeme psát:

$$U_{ob} = \beta \cdot l_{ob} + \frac{\delta \cdot l_{ob}}{I_{ob}} \quad [V; V \cdot m^{-1}, m, W \cdot m^{-1}, m, A] \quad (3. 1. 3)$$

Zde zanedbáváme $\alpha + \frac{\gamma}{I_{ob}}$, protože katodový a anodový úbytek je několikanásobně menší než spád na oblouku, což je vidět na obrázku č. 2 a č. 3.

Pro krátký oblouk můžeme psát:

$$U_{ob} = \alpha + \frac{\gamma}{I_{ob}} \quad [V; V, W, I] \quad (3. 1. 4)$$

Kde naopak zanedbáme napěťový spád na oblouku $\beta \cdot l_{ob} + \frac{\delta \cdot l_{ob}}{I_{ob}}$, který je daleko menší než úbytek napětí na elektrodách, což je vidět na obrázku č. 2 a č. 3. [3]

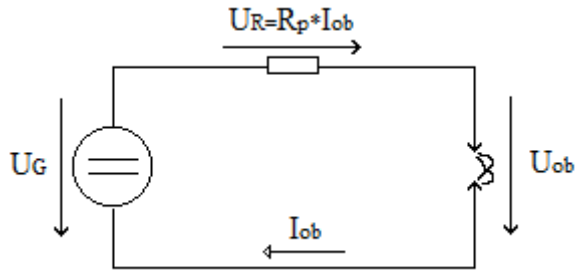
Výkon oblouku je dán součinem napětí na oblouku U_{ob} a proudu procházejícího obloukem I_{ob} . Celý tento výkon je z oblouku odveden chlazením. Pro ustálený oblouk platí: [3]

$$P_{ob} = U_{ob} \cdot I_{ob} \quad [W; V, A] \quad (3. 1. 5)$$

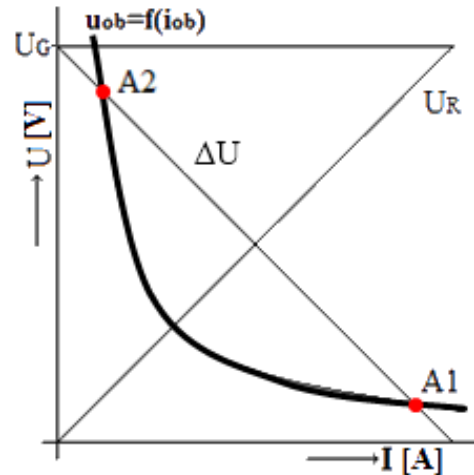
Charakteristika oblouku je tímto výkonem jednoznačně definovaná, neboť čím větší je výkon odváděný do okolí, tím se při určitém proudu na oblouku nastaví vyšší napětí. Když známe charakteristiku oblouku, můžeme dopočítat jeho body stability. Jeho stabilita je určena odporem rezistoru zapojeným s elektrickým obloukem do série, viz obrázek č. 7. Oblouk v obvodu může existovat pouze tehdy, když je součet napětí U_{ob} na něm a napětí na rezistoru $U_R = R \cdot I_{ob}$ rovna napětí zdroje U_G . [1]

$$U_G = U_{ob} + U_R \quad [V; V, V] \quad (3. 1. 6)$$

Tuto rovnici řešíme graficky, řešení je naznačeno na obrázku č. 8.



Obrázek 7 Obvod s obloukem a předřadníkem



Obrázek 8 Charakteristika obvodu s obloukem a předřadníkem

V rovinné kartézské soustavě vyneseme V-A charakteristiku oblouku $U_{ob}=f(I_{ob})$ a rozdílovou přímkou $\Delta U=U_G-U_R$. Podmínka $U_G=U_{ob}+U_R$ je splněna ve dvou bodech charakteristiky A1 a A2, ve kterých může elektrický oblouk existovat.

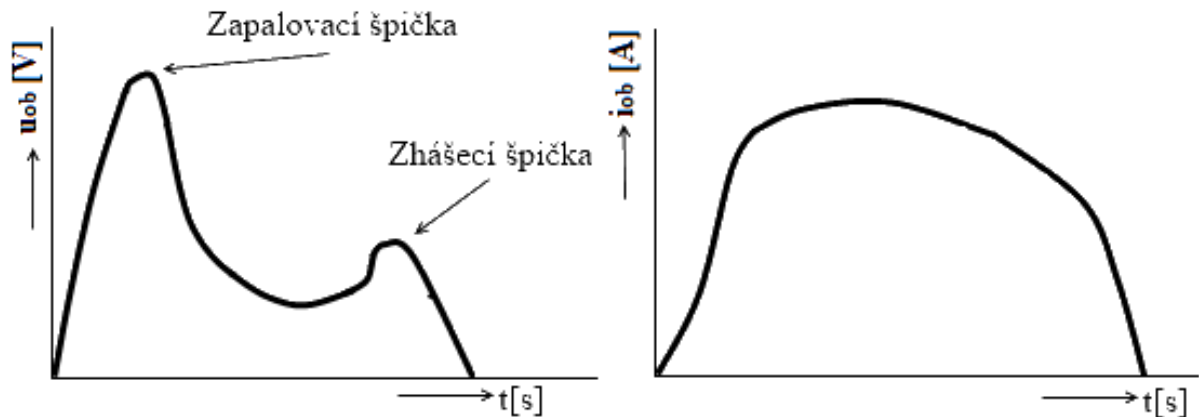
Stabilita v bodu A1: Při náhodném zvětšování proudu je porušena podmínka rovnosti a nastane $U_{ob} + U_R > U_G$, zdroj nedodává oblouku potřebný příkon, vzroste odpor oblouku a oblouk se vrátí do bodu A1. Při náhodném zmenšení proudu je $U_{ob} + U_R < U_G$, na oblouku je vyšší napětí, dojde ke zvýšení teploty oblouku. Vlivem zvýšení teploty oblouku dojde ke snížení odporu a vrátí se opět do bodu A1.

V bodě 2 jsou poměry opačné. Při zvětšení proudu je na oblouku přebytek napětí a dojde ke zvýšení teploty oblouku a jeho odpor přejde do bodu A1. Při náhodném zmenšení proudu je na oblouku nedostatek napětí, odpor oblouku se zvětší až je proud v obvodu nulový a oblouk zaniká.[1]

3.2 Dynamická V-A charakteristika elektrického oblouku

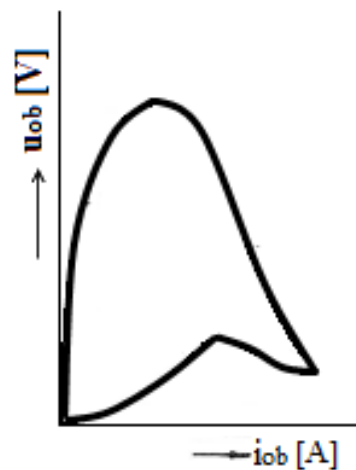
Problematika stability střídavého oblouku je složitější než problematika stejnosměrného oblouku, protože napětí a proud jsou periodickými funkcemi času. Průběhy napětí a proudu hořícího oblouku v obvodu střídavého proudu jsou nakresleny na obrázku č. 9. Tato V-A charakteristika vyjadřuje závislost napětí na oblouku na proudu protékajícím obloukem. Její tvar je ovlivněn několika činiteli: materiálem elektrod, předřadným odporem, délkou oblouku a frekvencí napájecího napětí.[1][5]

Na začátku každé půlperrody napětí na elektrodách u_{ob} stoupá souhlasně s napájecím napětím až na hodnotu zapalovacího napětí, to je napětí potřebné pro zapálení oblouku, které nazýváme zapalovací špička. Po zapálení oblouku poklesne na hodnotu hořícího napětí a po určitou část periody se mění velmi málo, rozdíl mezi tímto napětím a síťovým napětím je úbytek napětí na předřadném odporu, který je vyvolaný proudem oblouku i_{ob} . Po dobu, kdy je napětí téměř konstantní se proud oblouku mění podle mírně deformované sinusovky. Na konci půlperrody se napětí zvýší, maximální hodnotu zvýšeného napětí nazýváme zhášecí špička. [1][5]



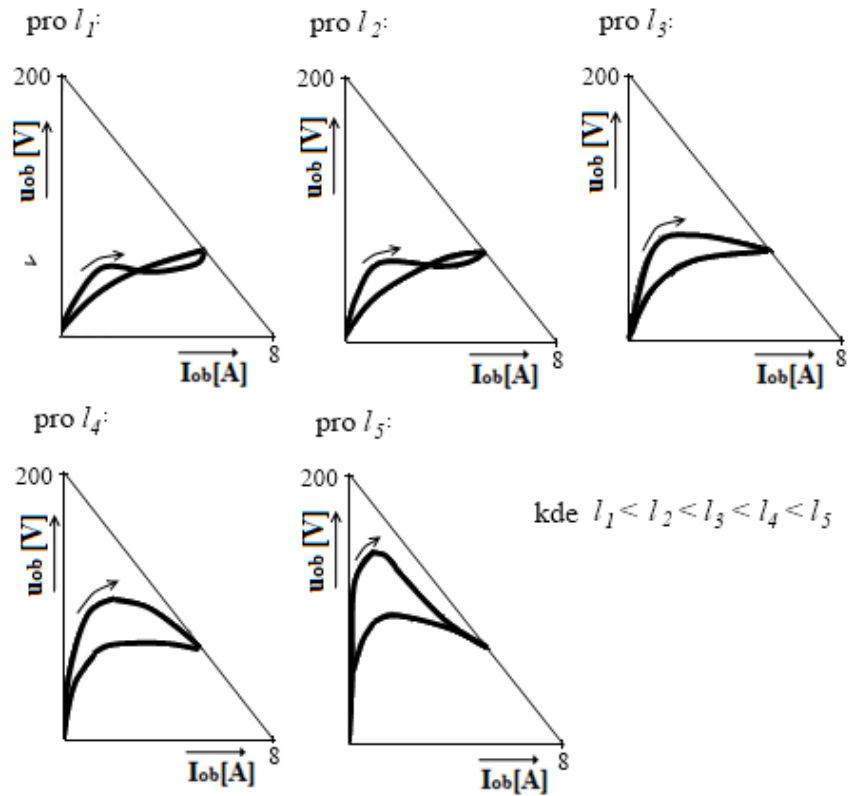
Obrázek 9 Průběhy napětí a proudu elektrického oblouku napájeného střídavým proudem

Eliminací času z časových průběhů napětí a proudu nebo přímým snímáním oblouku pomocí osciloskopu, dostaneme dynamickou charakteristiku, viz obrázek č. 10. Z dynamické charakteristiky je patrné, že napětí při vytváření oblouku jsou vyšší než napětí v oblasti uhasínání oblouku. Při zapalování oblouku musí být napětí na elektrodách vyšší, aby dodávaný příkon dostatočně pokrýval ztráty výboje z okolí předcházející nuly proudu a dodával energii umožňující převahu ionizačních pochodů. [1][5]



Obrázek 10 Dynamická V-A charakteristika elektrického oblouku

Na obrázku č. 11 je vidět vliv délky oblouku na dynamickou charakteristiku. Je vidět, že s rostoucí vzdáleností elektrod se charakteristika posouvá k vyšším hodnotám napětí, tento jev je způsoben zvyšujícím se odporem elektrického oblouku. Zvětšuje se i velikost zapalovací špičky, zatím co amplituda proudu klesá. [1]



Obrázek 11 Vliv délky oblouku na tvar dynamické V-A charakteristiky

Volbou velikosti předřadníku můžeme tvar dynamické charakteristiky také ovlivnit. Vlivem rostoucího předřadníku se V-A charakteristika posunuje k vyšším napětím a stlačuje do oblasti malých proudů. [4]

S rostoucí frekvencí se dynamická V-A charakteristiky výrazně zužuje, blíží se přímce procházející počátkem a současně se zmenšuje zapalovací špička. [4]



4 ZHÁŠENÍ ELEKTRICKÉHO OBLOKU V OBVODECH

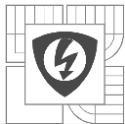
Při vypínání silnoprůdového elektrického obvodu spínačem, dochází ke vzniku elektrického oblouku mezi kontakty vypínače. Elektrický oblouk je z hlediska vypínací techniky považován za nežádoucí prvek. Jeho působením dochází ke škodám na vypínači, nebo celému jeho zničení, jak je popsáno v kapitole 2.3. Elektrický oblouk nemá jen negativní vlastnosti na vypínací proces, je užitečný tím, že zprostředkuje přerušení proudu v obvodu a to energetickým přechodem z vodivého do nevodivého stavu. V oblouku se přeměňuje velká část elektromagnetické energie akumulované v obvodu na energii tepelnou, která je lépe zvládnutelná odvedením tepla chlazením, než přepětí, které by vzniklo při vypínání bez oblouku. Tento jev je nejvíce patrný při vypínání obvodu napájeného stejnosměrným napětím. [1]

4.1 Zánik elektrického oblouku

Pro vznik a existenci elektrického oblouku jsou nezbytné ionizační pochody v prostoru mezi elektrodami, tyto pochody probíhají současně s pochody opačného charakteru, které vedou k zániku nabitých částic, nazýváme je pochody deionizační. Hlavní z nich je rozptýlení částic z horkých částí v okolí osy plazmatu do okrajových částí, které jsou chladnější a tím k rekombinaci. Pro uhasnutí elektrického oblouku musí převažovat deionizační pochody nad ionizačními. Rekombinace je opačný pochod vzhledem k ionizaci. Při rekombinaci dochází ke spojení kladného iontu se záporným elektronem, vznikne neutrální atom a uvolní se energie spotřebovaná na ionizaci. K rekombinaci může dojít na elektrodě, v prostoru vyplněném plazmatem a na okraji plazmatu, místo rekombinace ovlivní, v jakou energii se uvolněná energie změní. Jedním z hlavních úkolů zhasedla je odvod energie uvolněné při rekombinačních procesech a urychlení difúzních pochodů v plazmatu. [1]

Jedním z deionizačních principů je radiální difúze částic. Tato deionizace probíhá v plazmatu spontánně, zhasedlo má za úkol tento proces podpořit odváděním tepla z povrchu plazmatu, jeho chlazením zhasecím médiem. Při vypínání malých proudů, řádově desítek ampér stačí spontánní radiální difúze uhasit oblouk. [1]

Při vypínání proudů řádově vyšších než desítky ampér, musí mít ochlazování velkou účinnost, protože při ochlazování oblouku dochází ke zvyšování teploty jádra plazmatu oblouku. K tomuto paradoxu dochází vlivem zmenšení průřezu oblouku, a tím i zvětšení odporu oblouku. Proud udržující oblouk prochází plazmatem s menším průměrem a tím větším odporem, teplo uvolněné v plazmatu se zvětší. Při větší teplotě oblouku se zvýší i výměna energie mezi elektrickým obloukem a okolím. Pokud je chladící médium schopné odvést zvětšený přísun tepla, zmenšuje se průměr oblouku, až celý oblouk zaniká. Účinnost chlazení plazmatu se zvětší při vzájemném pohybu chladícího média a plazmatu zhaseného oblouku. Podle způsobu, jakým je vzájemný pohyb vyvolán dělíme zhasedla na zhasedla s vlastní energií a zhasedla s cizí energií. [1]



4.2 Princip zhášení stejnosměrného proudu

V obvodu se stejnosměrným zdrojem dodává zdroj stále stejné množství energie do výbojového sloupce mezi kontakty přístroje. Ionizační pochody jsou v rovnováze s rekombinačními pochody, proto může stejnosměrný oblouk uhasnout pouze, když se naruší jeho rovnovážný stav, převládnu deionizační pochody nad ionizačními. [8]

4.2.1 Principy zhášení stejnosměrného oblouku

Při vypínání stejnosměrných oblouků jde převážně o dlouhé oblouky, můžeme zanedbat elektroodvévodné úbytky napětí a za rozhodující považovat vlastnosti plazmatu vypínaného oblouku. Aby došlo k přerušení oblouku, je potřeba podstatně zmenšit jeho vodivost. Toho lze dosáhnout dvěma způsoby, zmenšením průměru plazmatu oblouku nebo zvětšením jeho délky. Průměr plazmatu oblouku se zmenší chlazením, což se zpravidla realizuje vyfouknutím oblouku do úzké štěrbině pomocí magnetického pole. Při vyfouknutí oblouku dochází k jeho natáhnutí, tzn. zvětšení jeho délky a také odporu. [1]

Do obvodu oblouku zařadíme předřadník R_p a pro napětí na oblouku a proud procházejícím obloukem platí: [5]

$$U_{ob} = U_G - I_{ob} \cdot R_p \quad [V; V, A, \Omega] \quad (4.2.1)$$

Pro příkon dodávaný do oblouku platí:

$$P_{ob} = I_{ob} \cdot U_{ob} \quad [W; A, V] \quad (4.2.2)$$

$$P_{ob} = I_a \cdot (U_G - I_{ob} \cdot R_p) \quad [W; A, V, A, \Omega] \quad (4.2.3)$$

Změnu příkonu v závislosti na změně proudu dostaneme derivací předchozí rovnice podle proudu:

$$\frac{dP_{ob}}{dI_{ob}} = U_G - 2 \cdot I_{ob} \cdot R_p \quad [-; V, A, \Omega] \quad (4.2.4)$$

Při konstantním chlazení následkem zvýšení proudu dojde ke zvýšení teploty oblouku a následkem toho snížení odporu oblouku a tím se sníží příkon potřebný pro udržení oblouku. Naopak při konstantním proudu a rostoucím chlazením roste příkon potřebný pro udržení oblouku. Protože chlazením oblouku se zmenšuje jeho poloměr a tím roste jeho odpor. [5]

Maximální příkon dodávaný od oblouku můžeme vypočítat podle následujícího postupu. Vztah pro maximální příkon dostaneme položením první derivace funkce 4.2.4 rovno nule:

$$0 = U_G - 2 \cdot I_{ob} \cdot R_p \quad [-; V, A, \Omega] \quad (4.2.5)$$

vyjádříme $\frac{U_G}{2}$:

$$\frac{U_G}{2} = I_{ob} \cdot R_p \quad [V; A, \Omega] \quad (4.2.6)$$

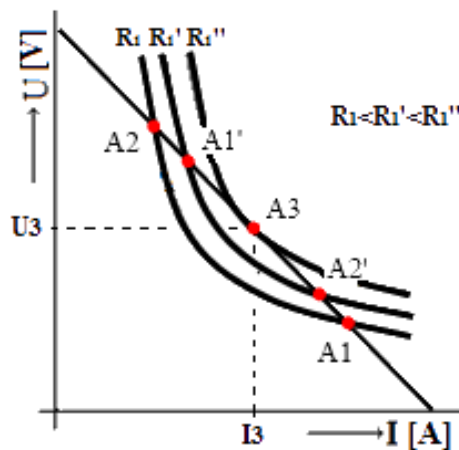
z toho plyne, že v oblasti maximálního příkonu je maximální napětí na oblouku rovno

$$U_{ob(max)} = \frac{U_G}{2} \quad [V; A] \quad (4.2.7)$$

Tuto rovnici dosadíme do rovnice pro příkon oblouku:

$$P_{a(max)} = I_{ob} \cdot U_{ob(max)} = I_{ob} \cdot \frac{U_G}{2} = \frac{U_G}{2R_p} \cdot \frac{U_G}{2} = \frac{U_G^2}{4R_p} \quad (4.2.8)$$

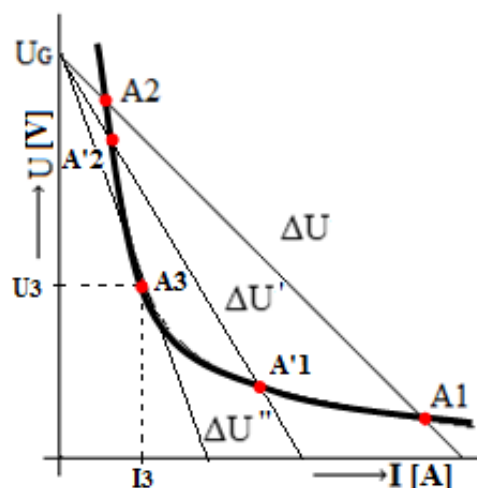
Tento příkon oblouku se přemění na teplo, toto teplo musí elektrický oblouk předat svému okolí, aby došlo k úspěšnému dokončení zhášecího procesu. Při velkém předání tepla do okolí, dosáhne oblouk toho, že rekombinační pochody budou převládat nad ionizačními. Tím se v plazmatu začne zmenšovat počet nabitých částic, následkem toho dojde k nárůstu odporu plazmatu, odpor bude růst až do hodnoty, při které oblouk zanikne. Z toho plyne, že nutnou podmínkou pro zánik oblouku ve stejnosměrném obvodu, je zvětšování odporu oblouku, až do hodnoty, kdy oblouk zaniká. Tato podmínka je vidět z chování statické V-A charakteristiky oblouku na obrázku č. 12. Odpor oblouku lze zvyšovat chlazením oblouku nebo zvětšováním délky elektrického oblouku, těchto způsobů zvyšování odporu se využívá i v moderních zhášecích přístrojích. [1]



Obrázek 12 Vliv délky a odporu oblouku na tvar statické V-A charakteristiky

Při zvětšování odporu oblouku ($R_1 < R_1' < R_1''$), se jeho charakteristika posune k vyšším hodnotám napětí, jak je vidět na obrázku č. 12. V bodu A1 je oblouk stabilní, zvětšováním odporu oblouku, se body A1 a A2 přibližují, při zvětšení odporu oblouku na hodnotu R_1'' dojde ke splnutí bodů A1 a A2. Tento bod A3 určuje minimální hodnotu napětí a proudu, při kterých může oblouk existovat. Následným zvětšením odporu oblouku nad velikost R_1'' dojde k posunutí charakteristiky do oblasti nestability a oblouk zanikne. Do oblasti nestability můžeme charakteristiku posunout ještě dvěma způsoby. [1]

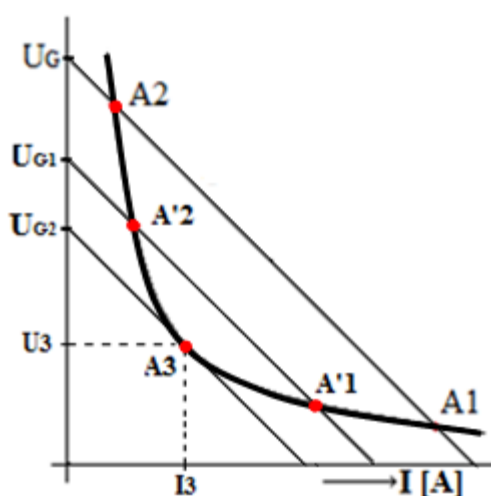
První z nich je možnost zvětšování předřadného odporu v obvodu s obloukem, vliv velikosti předřadného odporu je vidět na obrázku č. 13.



Obrázek 13 Vliv velikosti předřadníku na tvar statické V-A charakteristiky

Při zvětšování odporu předřadného odporu R_p se změní sklon rozdílové přímky ΔU . Znázorněné rozdílové přímce ΔU odpovídá předřadný odpor R_s , přímce $\Delta U'$ odpovídá předřadný odpor R_p' a přímce $\Delta U''$ odpovídá předřadný odpor R_p'' , přičemž $R_p < R_p' < R_p''$. Body A1 a A2 se posunují po V-A charakteristice oblouku až do bodu, kde splynou v jeden bod A3, který určuje minimální napětí U_3 a proud I_3 při kterém může oblouk existovat, po překročení tohoto bodu dojde k uhasnutí elektrického oblouku. Tento způsob zhášení elektrického oblouku je v praxi nepoužitelný. [1]

Druhým způsobem je snižování napětí zdroje U_G ($U_G > U_{G1} > U_{G2}$), tím se mění poloha rozdílové přímky. Se snižujícím se napájecím napětím se body A1 a A2 stále přibližují, až do okamžiku, kdy splynou v bod A3, který určuje minimální hodnotu napětí U_3 a proudu I_3 pro existenci oblouku a při dalším snížení napětí dojde k uhasnutí oblouku, ale i tento způsob je v praxi nepoužitelný. [1]



Obrázek 14 Vliv napětí zdroje na tvar statické V-A charakteristiky

Dalším v praxi používaným způsobem, je rozdělení vypínacího oblouku na několik malých oblouků spojených za sebou sériově. Realizace je provedena vložením kovových přepážek (žeber) kolmých k směru osy oblouku, umístěných ve směru jeho pohybu. Při vzniku takto rozdělených sériových oblouků se sečtou katodové a anodové úbytky všech oblouků, úbytek napětí v plazmatu oblouku se zanedbává, jelikož se jedná o oblouk krátký, kde je velikost katodových a anodových úbytků mnohem větší než spád napětí na oblouku. Je-li součet katodových a anodových úbytků větší, než vypínané napětí, dojde k uhasnutí oblouku. [1]

4.3 Princip zhášení střídavého proudu

V obvodu napájeném střídavým zdrojem napětí proud periodicky prochází nulou, v tomto okamžiku ustávají ionizační pochody. Když vnějším působením zajistíme, aby v tomto okamžiku převládly rekombinační pochody, dojde k uhasnutí oblouku. Když ionizační pochody převládnu nad rekombinačními, dojde k opětovnému zapálení oblouku.[5]

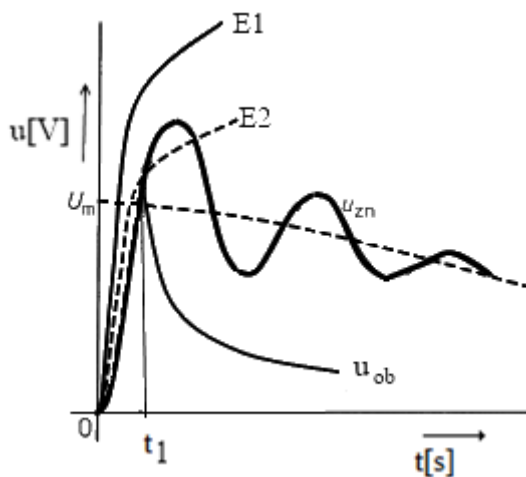
4.3.1 Fyzikální princip zhášení střídavého oblouku

Metody probrané v kapitole 4. 2 Princip zhášení stejnosměrného proudu, lze použít i pro zhášení střídavého oblouku. Tyto metody se v praxi používají u některých upravených magnetických vypínačů nízkého napětí. Při vysokých napětích by zhášený oblouk nabýval takových rozměrů, že by musel mít vypínač mnohonásobně větší rozměry a jeho konstrukce by byla neekonomická, proto je jejich realizace omezena z konstrukčních hledisek. [1]

Dle teoretických předpokladů by bylo možné, vypnou obvod se střídavým elektrickým proudem, bez zapálení oblouku. Kdybychom od sebe kontakty vypínače oddělili dostatečně rychle, aby mezera mezi nimi snesla rychle rostoucí zotavené napětí, přesně v okamžiku, kdy proud prochází nulou, celý vypínací proces by se omezil pouze na mechanické pochody, nedošlo by k zapálení oblouku. Ale přesné synchronizace a dostatečně velké rychlosti oddělení kontaktů není možno v praktickém provedení dosáhnout. [3]

U vypínačů používaných v praxi, není splněna ani jedna z těchto dvou uvedených podmínek. Náhodně může dojít k přerušení obvodu v okamžiku, kdy proud prochází nulou, ale rychlost vzdalování kontaktů nezaručuje, že vlivem velkého zotaveného napětí nenastane opětovný průraz prostředí mezi elektrodami a tím zapálení oblouku. Oblouk vznikne vždy, pokud tomu nezabráníme vhodnou realizací zhášecí komory.[1][3]

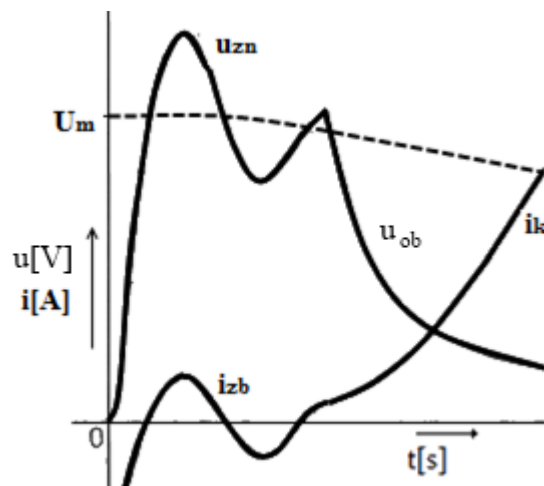
Po průchodu proudu nulou, je plazma ve zhášecí komoře ovlivňováno dvěma protichůdnými vlivy. První z těchto vlivů, je vliv zhášecího média, které zvětšuje elektrickou pevnost plazmatu a tím podporuje rekombinační pochody a napomáhá zhášení oblouku. Druhý vliv je elektrické namáhání zotaveným napětím. Podmínka pro úspěšné vypnutí je zobrazena na obrázku č. 15. Z obrázku je vidět, že pro úspěšné vypnutí je potřeba, aby byl nárůst elektrické pevnosti rychlejší, než rychlost růstu zotaveného napětí. [1]



Obrázek 15 Podmínky úspěšného uhasnutí oblouku

Časový průběh zotavující se elektrické pevnosti znázorňuje křivka E1, která musí mít pro úspěšné vypnutí vždy větší velikost než křivka u_{zn} , která znázorňuje časový průběh zotaveného napětí. Neúspěšné vypnutí znázorňuje případ s přerušovanou křivkou E2, kdy v čase t_1 dojde k urychlení iontů a elektronů v plazmatu, následkem působení elektrostatické síly pole vytvořeného zotaveným napětím, převládnu ionizační pochody nad rekombinačními a oblouk se znovu zapálí. Zotavené napětí zanikne a na elektrodách se objeví napětí oblouku u_{ob} . Znovu zapálený oblouk hoří až do dalšího průchodu proudu nulou, kde se tyto pochody opakují. K definitivnímu uhasnutí oblouku dojde, když deionizační pochody převládnu nad ionizačními a vzrůst elektrické pevnosti bude dostatečně rychlý. [1]

Výše uvedené poměry nejsou v reálném vypínači tak jednoduché. Hlavním problémem ve výbojovém prostoru je otázka elektrické pevnosti. V okamžiku po průchodu proudu nulou je prostor mezi elektrodami vyplněn plazmatem s převládajícími ionizačními pochody, je tedy vodivý, proto nevyhovuje obvyklá definice elektrické pevnosti. Výbojovým prostředím prochází malý proud, který nazýváme zbytkový, jeho velikost závisí na vodivosti prostředí a velikosti zotaveného napětí. Tento případ je vyznačen na obrázku č. 16, v tomto případě o zapálení oblouku nerozhoduje podmínka o velikosti zotaveného napětí a zotavující se elektrické pevnosti prostoru.[1]



Obrázek 16 Oscillogram napětí a proudu při vypínání

V tomto případě nedošlo k průrazu a opětovnému zapálení oblouku vlivem rychlého růstu zotaveného napětí, k opětovnému zapálení oblouku došlo až po několika kmitech zotaveného napětí. Na obrázku je vidět, že po dvou kmitech zotaveného napětí dochází k růstu zbytkového proudu, který následně přechází do zkratového proudu, zotavené napětí se zmenšuje a postupně přechází do obloukového napětí u_{ob} . Celková energie odvedené z plazmatu do okolí musí být větší, než energie dodaná obvodem do plazmatu, při splnění této podmínky dojde k úspěšnému uhasnutí oblouku.[1]

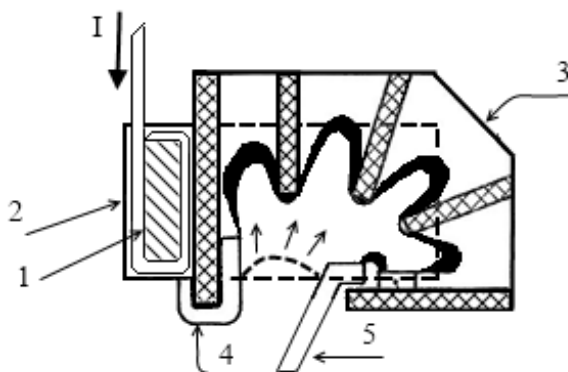
5 ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI JEDNOTLIVÝCH TYPŮ ZHÁŠEDEL PRO NÍZKÉ NAPĚTÍ

Podle způsobu, jakým je získávána energie pro uhašení oblouku, dělíme vypínače pro nízké napětí na vypínače s vlastní zhášecí energií a vypínače s cizí zhášecí energií. Vypínače patřící do skupiny vypínačů s cizí zhášecí energií, mají energii potřebnou pro uhasnutí oblouku předem připravenou. Energie bývá připravena v zásobníku se stlačeným vzduchem, kterým se při vypínání ochlazuje vzniklý oblouk a napomáhá jeho zhášení, nebo napnutá či stlačená pružina, která po uvolnění pohybuje pístem, ženoucí zhášecí médium do trysky. Pro každé vypnutí je zásoba energie stejná, a její množství je určeno podle požadavků na spolehlivé vypnutí jmenovitého vypínacího proudu. Účinnost zhášedel s cizí zhášecí energií se snižuje s rostoucím vypínacím jmenovitým proudem, při určitém jmenovitém proudě už nestačí akumulovaná energie k vypnutí proudu, tímto proudem je určena mez vypínačů s cizí zhášecí energií. [1][4]

Vypínače s vlastní zhášecí energií využívají k deionizaci plazmatu energii dodanou přerušovaným obvodem, kde se jedná buď o tepelnou energii plazmatu, nebo energii magnetického pole, které je buzeno vypínaným proudem. [1]

5.1 Magnetické vypínače

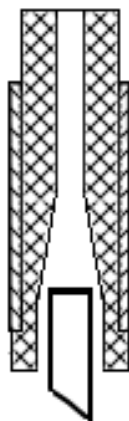
Jde o vypínače s magnetickým vyfukováním oblouku do zhášecích komor. Jsou využívány pro vypínání stejnosměrných i střídavých obvodů. Tyto zhášedla jsou typickým příkladem zhášedel s vlastní zhášecí energií. Pro zhášení oblouku se používají komory s izolačním roštem a komory s kovovým roštem, nebo šterbinovou komoru. V komoře na kovovém roštu dojde k rozdělení oblouku na několik menších oblouků zapojených za sebou, viz obrázek č. 17. [1]



Obrázek 17 Vypínač s magnetickým vyfukováním oblouku

Zhášecí komora je tvořena roštem s přepážkami, které jsou vyrobeny z izolačního materiálu. Cívka s jádrem 1 a pólovými nadstavci 2, které jsou vyrobeny z feromagnetického materiálu, budí ve zhášecí komoře magnetické pole. Zhášecí komora 3 je vyrobena z elektricky nevodivého materiálu, na její vnější straně jsou umístěny pólové nadstavce. Přebíjí komoru je uzavírán magnetický tok, který je buzený vypínaným proudem procházejícím cívkou 1. Při vypínání dochází k oddálení pohyblivého kontaktu 5 od pevného kontaktu 4, mezi nimi vznikne elektrický oblouk, který je uváděn do pohybu proti žebřím komory 3 díky působení elektrodynamických sil. Oblouk se pohybuje směrem do volných prostorů mezi jednotlivými žebry, tím se zvětší jeho délka, ochlazovací povrch a tím odpor celého oblouku až do hodnoty, kdy oblouk zaniká. [1]

Vypínač se štěrbinovou komorou je zobrazen na obrázku č. 18. V horní části komory jsou stěny silnější, tím dochází k zúžení prostoru mezi nimi. Oblouk je uváděn do pohybu magnetickým polem, které je vytvářeno pomocí pólových nadstavců, které jsou umístěny vně komory. Po zapálení se oblouk pohybuje od spodního okraje štěrbiny po vrchní a při pohybu se deformuje a zvětšuje se povrch jeho jádra a dostává se do těsného styku s izolačními stěnami, které intenzivněji odjímají jeho teplo a oblouk se chladí. Tento typ chlazení je mnohem účinnější než chlazení na žebrech v roštové komoře. Z toho plyne, že vypínačem s roštovou komorou lze vypínat poměrně menší výkony, než vypínačem se štěrbinovou komorou. [5]



Obrázek 18 Vypínač se štěrbinovou komorou

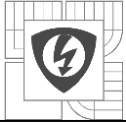
Jediná vhodná soustava pro zhasení stejnosměrného oblouku je soustava s magnetickým vyfukováním a je také nejrozšířenější soustavou u vypínačů střídavého proudu na nízké napětí. [1]

5.2 Tlakovzdušné vypínače

Tlakovzdušné vypínače jsou typickou ukázkou vypínačů s cizí zhasací energií, ke zhasení se používá stlačený vzduch a řadíme je do skupiny vypínačů s krátkým obloukem. Součástí těchto vypínačů je stlačený vzduch a jeho rozvod. Chlazení elektrického oblouku v těchto vypínačích může probíhat dvojím způsobem, příčně (radiální chlazení) a podélně (axiální chlazení). Po zapálení elektrického oblouku dochází vlivem proudění vzduchu k jeho chlazení a také k zvětšování jeho délky, tím zvýšení odporu elektrického oblouku, intenzivnímu nárůstu napětí až do uhasnutí oblouku. Radiální chlazení je velmi účinné, ale ve směru toku vzduchu je štěrbinová rozšířená, aby mohlo dojít k natáhnutí oblouku. V praxi se více používá axiálního chlazení. Vzduch je stlačen v prostoru pod tryskou, jakmile se pohyblivý kontakt vysune z trysky, uvolní se cesta chladicímu vzduchu do prostoru pod kontakt. Výhodou těchto vypínačů je vyloučení požárů a jsou výhodné pro opětovné zapínání, nevýhodou je velký hluk. [1]

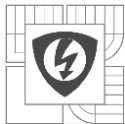
5.3 Vakuové vypínače

Ve vakuových vypínačích se využívá velké rychlosti difúze částic ve vakuu ke zhasení oblouku. Následkem rychlé difúze, se plazma ve vakuu roztáhne a vyplní téměř celý prostor vakuové nádoby, v níž jsou umístěny elektrody vypínače. Koncentrace nabitých částic je tak malá, že oblouk uhasne v první periodě proudu. Tyto vypínače se nehodí pro vypínání stejnosměrného proudu. [5]



5.4 Zhášedla se zrnitým hasivem

Po přetavení tavného vodiče v pojistce může dojít k zapálení oblouku, ke zhášení tohoto oblouku se používá zrnité hasivo (jemný křemičitý písek). Po přerušení vodivé cesty, dojde k zapálení oblouku v pojistce, prostor, který vznikne přehořením vodiče je okamžitě zasypán jemným křemičitým pískem a dojde k zániku elektrického oblouku.[5]



6 LABORATORNÍ ÚLOHA MĚŘENÍ V-A STATICKÉ CHARAKTERISTIKY ELEKTRICKÉHO OBLOUKU

Statická V-A charakteristika se skládá ze dvou částí: první část má hyperbolický tvar, hořící v oblasti malých proudů. Druhá část má tvar přímky a je v oblasti velkých proudů, jak je vidět na obrázku č. 6. Při měření této laboratorní úlohy se budeme pohybovat v oblasti malých proudů maximálně do 10 A, vyšší hodnoty proudu si v laboratoři vzhledem k technickým požadavkům nemůžeme dovolit. Studenti mají na internetu dostupný manuál k této laboratorní úloze. Podle tohoto manuálu jsem provedl i svá měření, abych mohl analyzovat vznik možných chyb a nedostatků.

Pro ověření platnosti rovnice Ayrtonové a porovnání statické V-A charakteristiky elektrického oblouku, byla provedena série experimentálních měření v laboratoři SC 2.52 na fakultě Elektrotechniky a komunikačních technologií v budově Technická 12. Série měření byla prováděna se studenty předmětu BEPR.

Seznam použitých přístrojů:

- Sloupcový posuvný rezistor
- Napájecí zdroj BS-PSN 3/5A
- Analogový ampérmetr Metra 40/304; TP=0,5 s. č 1360328
- Digitální voltmetr Hexagon 340 A s. č 111180537
- Laboratorní zařízení s elektrodami
- Posuvné měřítko
- Metr

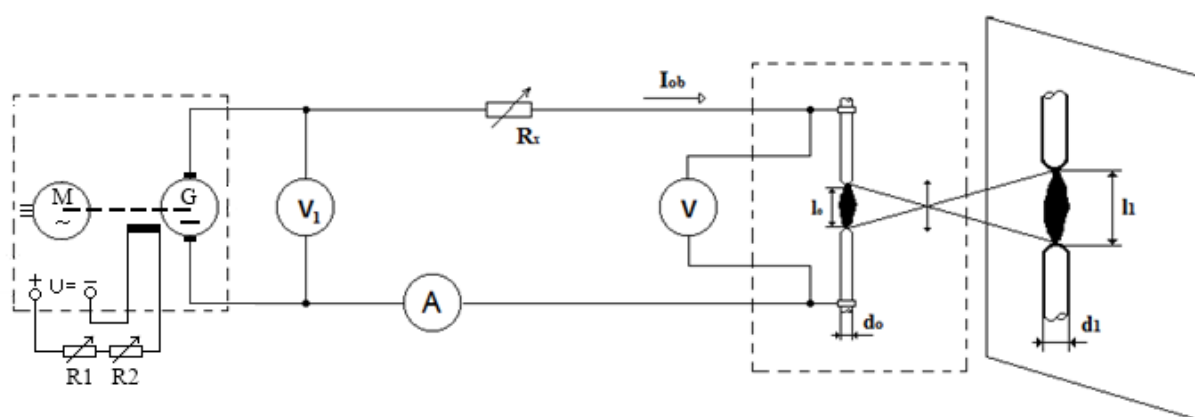
6.1 Měření statické V-A charakteristiky elektrického oblouku

Měření V-A charakteristiky elektrického oblouku bylo v této úloze rozděleno na dvě části. Na měření napětí na elektrickém oblouku v závislosti na elektrickém proudu při konstantní délce oblouku $U_{OB} = f(I_{OB}); l_{ob} = konst.$ a měření napětí elektrického oblouku v závislosti na vzdálenosti mezi elektrodami při konstantním proudu $U_{OB} = f(l_{ob}); I_{OB} = konst.$.

6.1.1 Měření V-A statické charakteristiky elektrického oblouku při $I_{OB}=konst.$

Před měřením byla důkladně probrána teorie měřeného oblouku a studenti byli seznámeni s vlastnostmi elektrického oblouku a V-A charakteristiky při změnách elektrického proudu.

Laboratorní úloha byla zapojena dle obrázku:



Obrázek 19 Schéma zapojení obvodu pro měření statické V-A charakteristiky elektrického oblouku

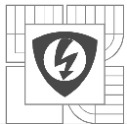
Pro co nejpřesnější měření je k úloze potřeba šesti studentů, kteří si rozdělili role u úlohy. První role je „koordinátor“, který dohlížel na měření a řídil celý tým. Druhý člen pomocí sloupcového posuvného rezistoru R_x nastavoval potřebnou hodnotu proudu, kterou odečítal na analogovém ampérmetru. Třetí člen hlásil aktuální hodnoty napětí na elektrickém oblouku, které odečítal z digitálního voltmetru. Čtvrtý člen nastavoval polohu elektrod, jejich vzdálenost, pomocí ovládacího mechanismu, elektrody jsou vidět na obrázku č. 20. Jelikož by bylo velmi obtížné a nebezpečné odečítat hodnoty vzdálenosti elektrod při zapáleném oblouku, byl elektrický oblouk promítnut na zeď pomocí zvětšovací čočky, tuto velikost oblouku pomocí metru odečítal pátý člen skupiny. Hodnota délky elektrického oblouku byla poté přepočtena přes koeficient K na hodnotu odpovídající vzdálenosti elektrod. Šestý člen pečlivě zapisoval všechny nahlášené hodnoty, které byly dále zpracovány.



Obrázek 20 Zařízení na měření elektrického oblouku

Tabulka 1 Konstanty Ayrtonové pro různé druhy elektrod [11]

Elektrody	Prostředí	α	β	γ	δ	Poznámka:
		[V]	[V/m]	[W]	[W/m]	
Homogenní uhlík $\varnothing=10\text{mm}$	vzduch	40	1200	20	10000	$l=1-7\text{mm}$ $I=5-10\text{A}$
Měděné tyče $\varnothing=10\text{mm}$	vzduch	17	2000	22	10000	$l=1-10\text{mm}$ $I=2-15\text{A}$
Železné tyče $\varnothing=10\text{mm}$	vzduch	15	1000	22	15000	$l=5-30\text{mm}$ $I=2-10\text{A}$



Před započítáním měření jsme museli určit převodní konstantu čočky K , byla spočítána dle vzorce:

$$K = \frac{l_1}{l_0} = \frac{d_1}{d_0} \quad [-; \text{mm}; \text{mm}] \quad (6.1.1)$$

kde l_1 je vzdálenost mezi elektrodami změřená na obraze,

l_0 je skutečná vzdálenost mezi elektrodami,

d_1 je průměr elektrody na obraze,

d_0 je skutečný průměr elektrody.

V tomto měření jsme použili vzorec $K = \frac{l_1}{l_0}$, protože na obraze nebylo možné změřit průměr elektrod d_1 . Změřili jsme vzdálenost mezi elektrodami l_1 pomocí metru a skutečnou vzdálenost elektrod l_0 pomocí posuvného měřítka, při odpojeném zdroji napětí. Takto změřené hodnoty jsme dosadili do vzorce a získali koeficient K :

$$K = \frac{l_1}{l_0} = \frac{16}{5,74} = 2,78$$

Bylo stanoveno šest vzdáleností elektrod, pro které jsme měřili hodnoty proudu a to 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 mm. Před samotným měřením bylo potřeba nastavit polohu elektrod tak aby byly navzájem souosé a jejich polohu vůči čočce pro co nejpřesnější měření. Pro měření statické V-A charakteristiky bylo napájecí napětí při rozepnutých elektrodách nastaveno na hodnotu 100 V. Spojením elektrod a následným pomalým oddalováním pohyblivé elektrody byl vytvořen oblouk. Při zapáleném oblouku bychom nedokázali přesně odměřit vzdálenost elektrod, tak byly elektrody nastaveny pomocí obrazu, vytvořeného pomocí čočky, která je součástí měřicí stanice. Tato vzdálenost l_1 byla vypočtena ze vzorce:

$$l_1 = K \cdot l_0 = 2,78 \cdot 2 = 5,56 \text{ mm}$$

Skutečná vzdálenost elektrod pro první měření byla nastavena na 2 mm. Po nastavení vzdálenosti byl nastavován proud od hodnoty 2,8 A do 12 A s krokem 1 A pomocí sloupcového odporu, který je ve schématu zapojením značen jako R_x a bylo odečteno napětí příslušné jednotlivým proudům. Toto měření muselo být provedeno velmi rychle, protože při hoření oblouku dochází k opalování elektrod a tím ke zvětšování délky mezi elektrodami a tím možné chybě měření. Stejným postupem bylo postupováno i při měření dalších vzdáleností elektrod. Takto naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce č. 2:

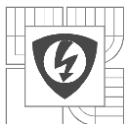
Z naměřených hodnot napětí U_{ob} a elektrického proudu I_{ob} byla sestavena statická V-A charakteristika elektrického oblouku, která je vidět na obrázku č. 21. Následně byla vypočtena teoretická hodnota napětí U_{Vyp} dle rovnice Ayrtonové (3.1.1) za pomoci konstant uvedených v tabulce č. 1.

Příklad výpočtu pro tabulky č. 2, délku elektrického oblouku $l=2\text{mm}$ a proudu $I_0=2,8\text{ A}$:

$$I_{ob} = k \cdot \alpha = \frac{24}{120} \cdot 14 = 2,8 \text{ A}$$

$$U_{Vyp} = \alpha + \beta \cdot l + \frac{\gamma + \delta \cdot l}{I_0} = 40 + 1200 \cdot 0,002 + \frac{20 + 10000 \cdot 0,002}{2,8} = 56,69 \text{ V}$$

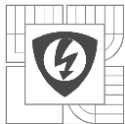
$$R_{ob} = \frac{U}{I} = \frac{57,5}{2,8} = 20,54 \Omega$$

Tabulka 2 Měření statické V-A charakteristiky při $l_0 = \text{kont. pro délky } 2, 3, 4, 5 \text{ mm}$

α	I_{ob}		U_{ob} [V]	U_{vyp} [V]	R [Ω]
	k	[A]			
Vzdálenost elektrod $l_0=2\text{mm}$					
14	24/120	2,8	57,5	56,69	20,54
15	24/120	3	56,7	55,73	18,90
20	24/120	4	50,6	52,40	12,65
25	24/120	5	42,7	50,40	8,54
30	24/120	6	41,5	49,07	6,92
35	24/120	7	38,4	48,11	5,49
40	24/120	8	37,7	47,40	4,71
45	24/120	9	36,9	46,84	4,10
50	24/120	10	35,6	46,40	3,56
55	24/120	11	36,2	46,04	3,29
60	24/120	12	35,8	45,73	2,98
Vzdálenost elektrod $l_0=3\text{mm}$					
10	24/120	2	63	68,60	31,50
15	24/120	3	56	60,27	18,67
20	24/120	4	53	56,10	13,25
25	24/120	5	51	53,60	10,20
30	24/120	6	49	51,93	8,17
35	24/120	7	47	50,74	6,71
40	24/120	8	45	49,85	5,63
45	24/120	9	44	49,16	4,89
50	24/120	10	42	48,60	4,20
55	24/120	11	40	48,15	3,64
Vzdálenost elektrod $l_0=4\text{mm}$					
16	24/120	3,2	62	63,55	19,93
21	24/120	4,2	58	59,09	14,08
26	24/120	5,2	55	56,34	10,85
31	24/120	6,2	53	54,48	8,81
36	24/120	7,2	51	53,13	7,29
41	24/120	8,2	50	52,12	6,24
Vzdálenost elektrod $l_0=5\text{mm}$					
15	24/120	3	65	69,33	21,67
20	24/120	4	55	63,50	13,75
25	24/120	5	54	60,00	10,80
30	24/120	6	48	57,67	8,00
35	24/120	7	47	56,00	6,71
40	24/120	8	47	54,75	5,88
45	24/120	9	46	53,78	5,11
50	24/120	10	46	53,00	4,60
55	24/120	11	45	52,36	4,09

Tabulka 3 Měření statické V-A charakteristiky při $l_0 = \text{kont. pro délky } 6, 7, 8 \text{ mm}$

α	I_{ob}		U_{ob} [V]	U_{vyp} [V]	R [Ω]
	k	[A]			
Vzdálenost elektrod $l_0=6\text{mm}$					
10	24/120	2	69,5	87,20	34,75
15	24/120	3	62,5	73,87	20,83
20	24/120	4	62,5	67,20	15,63
25	24/120	5	57,3	63,20	11,46
30	24/120	6	54,1	60,53	9,02
35	24/120	7	50,5	58,63	7,21
40	24/120	8	48,5	57,20	6,06
45	24/120	9	45,6	56,09	4,86
50	24/120	10	43,5	55,20	4,35
55	24/120	11	43,7	54,47	3,97
60	24/120	12	42,8	53,87	3,57
Vzdálenost elektrod $l_0=7\text{mm}$					
23	24/120	4,6	62,5	67,97	13,59
25	24/121	5	61	66,40	12,20
31	24/122	6,2	58,4	62,92	9,42
37	24/123	7,4	56,4	60,56	7,62
42	24/124	8,4	55,6	59,11	6,62
46	24/125	9,2	55,7	58,18	6,05
52	24/126	10,4	54,8	57,05	5,27
56	24/127	11,2	54,4	56,44	4,86
61	24/128	12,2	54,1	55,78	4,43
Vzdálenost elektrod $l_0=8\text{mm}$					
17	24/120	3,4	79,15	79,01	23,28
22	24/120	4,4	72,45	72,33	16,47
27	24/120	5,4	63,28	68,12	11,72
32	24/120	6,4	62,71	65,23	9,80
37	24/120	7,4	62,29	63,11	8,42
42	24/120	8,4	61,97	61,50	7,38



6.1.1.1 Zhodnocení měření V-A charakteristiky při $I_0 = \text{konst.}$

Na obrázku č. 21 a č. 22 jsou vidět vynesené naměřené hodnoty napětí U_{ob} a hodnoty napětí vypočteného U_{vyp} dle rovnice Ayrtonové (3.1.1), v závislosti na proudu I_{ob} , naměřené při konstantní vzdálenosti elektrod $l_0 = (2; 3) \text{ mm}$. Zbylé V-A charakteristiky pro vzdálenosti elektrod $l_0 = (4; 5; 6; 7; 8) \text{ mm}$ jsou uvedeny v příloze A.

Z grafů je patrné, že při zvětšujícím se proudu dochází k zahřívání elektrod a jejich opalování. Vlivem zahřívání elektrod dochází ke snadnějšímu výstupu elektronů z katody a převaze ionizačních pochodů, vodivost oblouku se zvětšuje a tím klesá odpor oblouku a tím i napětí na oblouku, nelinearita V-A charakteristiky je způsobena klesajícím odporem elektrického oblouku s rostoucí teplotou.

Podle očekávání je napětí na oblouku nejmenší pro nejkratší vzdálenost elektrod $l_0 = 2 \text{ mm}$, kde převážnou část úbytku napětí tvoří úbytek na elektrodách. Při zvětšující se vzdálenosti elektrod narůstá i délka oblouku, zvětšuje se jeho chladicí povrch a roste elektrický odpor oblouku, což je vidět v tabulce č. 2 a 3. Což má za následek posouvání statické V-A charakteristiky do oblastí vyšších napětí. Tento způsob zhášení elektrického oblouku se v praxi často vyskytuje a je popsán v kapitole č. 4. 2. 1.

Naměřené hodnoty napětí se liší od hodnot vypočtených. V našem případě jsme měřili homogenní uhlíkové elektrody o průměru $\varnothing = 13 \text{ mm}$, ale hodnoty napětí počítané pomocí rovnice Ayrtonové jsou vypočteny s konstantami, které jsou uvedeny v tabulce č. 1, kde jsou konstanty uvedeny pro homogenní uhlíkové elektrody o průměru $\varnothing = 10 \text{ mm}$. Další nepřesnost vzniká vlivem ohořívání elektrod, při ohořívání se mění vzdálenosti elektrod l_x , která se musí neustále během měření nastavovat znovu na konstantní udržovanou hodnotu. S rostoucí vzdáleností elektrod l_0 se zmenšuje rozdíl vypočteného napětí U_{vyp} pomocí úplné rovnice Ayrtonové a změřeného napětí na oblouku U_{ob} .

Při zpětném hodnocení měření jsem si uvědomil, že by do měření mohla být vnášena chyba. V našem případě se měřené napětí skládá z napětí na oblouku a úbytku na elektrodách. Horní elektroda byla upnuta tak, že vzdálenost od místa upnutí elektrody k místu hoření oblouku byla l_{he} byla 14 cm, domníval jsem se, že na tak velké délce elektrody mohl vznikat velký úbytek napětí. Proto jsem provedl sérii měření, kde byly pro vzdálenost elektrod $l_0 = 6 \text{ mm}$ změřeny hodnoty napětí U_1 na elektrodách pro dvě hodnoty proudu (12 A a 14,5 A). Následně byla zkrácena vzdálenost místa upnutí od konce elektrody l_{he} ze 14 cm na 4 cm a toto měření bylo opakováno pro stejné hodnoty proudu a vzdálenost elektrod l_0 . Byla odečtena hodnota napětí U_2 , výsledné hodnoty jsou uvedeny v tabulce č. 4.

Tabulka 4 Měření úbytku napětí při délce horní elektrody 14 a 4 cm pro vzdálenost elektrod $l_0 = 6 \text{ mm}$

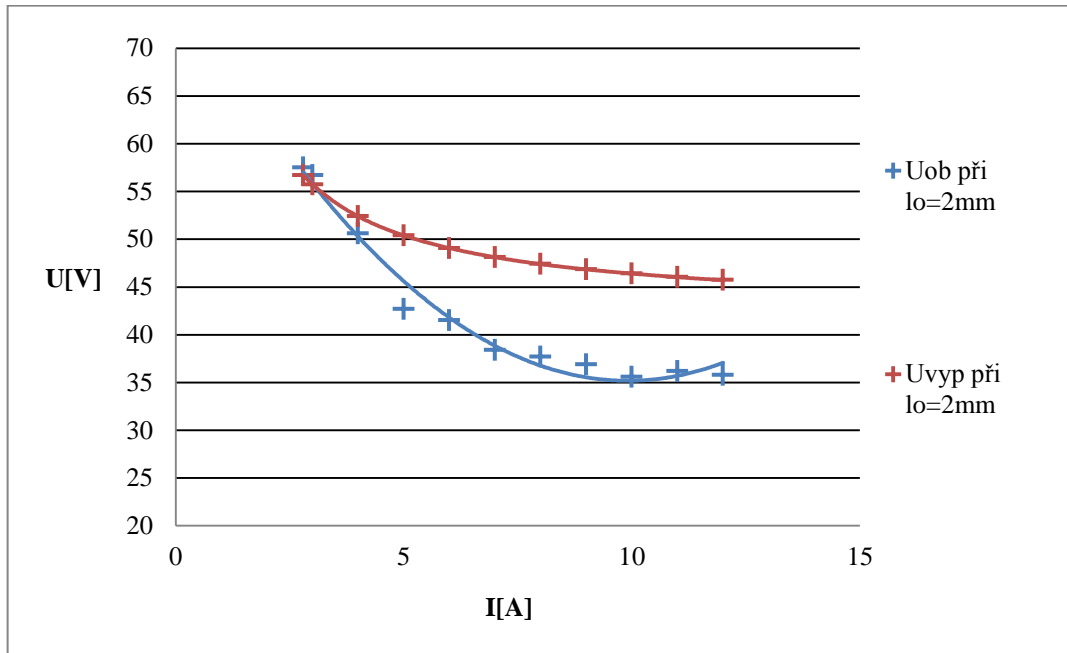
I	U_1 pro $l_{he} = 14 \text{ cm}$	U_2 pro $l_{he} = 4 \text{ cm}$	ΔU
[A]	[V]	[V]	[V]
12	65,5	62,3	3,2
14,5	51,2	48,7	2,5

Příklad výpočtu pro 3. řádek tabulky č. 4:

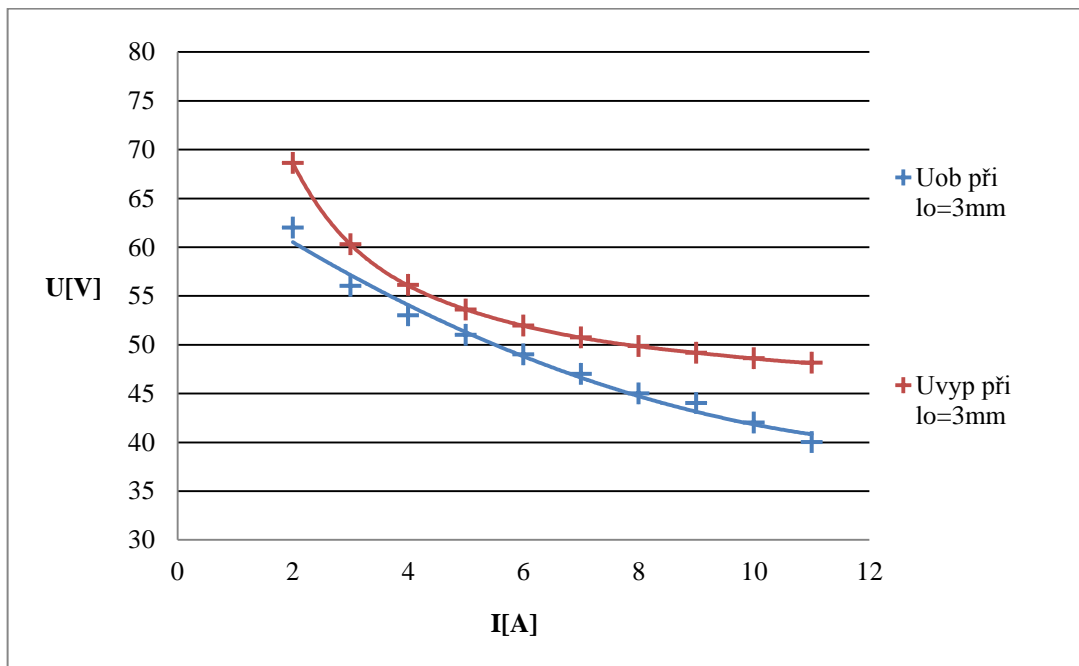
$$\Delta U = U_1 - U_2 = 65,5 - 62,3 = 3,2 \text{ V}$$

Při měření napětí pro původní délku elektrody 14 cm byla hodnota napětí $U_1=65,5 \text{ V}$, při proudu $I=12 \text{ A}$ a hodnotu vzdálenosti elektrod $l_0=6\text{mm}$. Po zkrácení délky elektrody byla naměřená hodnota napětí $U_2=62,3 \text{ V}$, což tvořilo rozdíl $\Delta U=3,2\text{V}$. Tímto měřením byla potvrzena tato hypotéza.

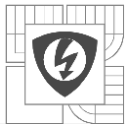
6.1.1.2 Grafy statických V-A charakteristik



Obrázek 21 Změřená a vypočtená statická V-A charakteristika elektrického oblouku při konstantní délce oblouku $l_0=2\text{mm}$



Obrázek 22 Změřená a vypočtená statická V-A charakteristika elektrického oblouku při konstantní délce oblouku $l_0=3\text{mm}$



6.1.2 Měření V-A statické charakteristiky elektrického oblouku při $l_0 = \text{konst.}$

Druhá část úlohy je měření V-A charakteristiky elektrického oblouku pro konstantní vzdálenost l_0 . V-A charakteristiky byly změřeny pro hodnoty proudu $I=(3; 4,2; 5; 6; 7; 8)A$ při počáteční vzdálenosti $l_0=1\text{mm}$ do vzdálenosti, kdy oblouk uhasnul.

Pracoviště bylo zapojeno dle schématu, které je vidět na obrázku č. 19 a napájecí napětí bylo 100 V při spojených elektrodách. Pomalým oddálením elektrod od sebe, byl elektrický oblouk zapálen, byla nastavena vzdálenost elektrod $l_0=1\text{mm}$. Pomocí sloupcového posuvného rezistoru R_x byl nastaven příslušný stejnosměrný proud, který byl udržován v průběhu celého měření, jeho hodnota se měnila v důsledku ohořívání elektrod. Při vzdálenosti $l_0=1\text{mm}$ byla odečtena první hodnota napětí na elektrodách, následně se po kroku 1mm zvětšovala vzdálenost elektrod l_0 a odečtena hodnota napětí pro příslušnou vzdálenost. Po čas celého měření byl kladen důraz na dodržení stálé hodnoty proudu elektrickým obloukem, před odečtením napětí. Po uhasnutí oblouku pro proud $I=3A$, byla nastavena další hodnota proudu $I=4,2 A$ a měření opakováno stejným způsobem. Toto měření bylo dále opakováno pro hodnoty proudu $I=(5; 7; 8)A$. Naměřené hodnoty jsou vyneseny v tabulce č. 5; 6; 7:

Tabulka 5 Měření V-A charakteristiky pro konstantní proud $I_{ob}=(3; 4,2)A$

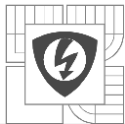
l_{ob}	U_{ob}	U_{vyp}	R_{ob}
[mm]	[V]	[V]	[Ω]
Pro proud $I=3A$			
1	45	51,20	15,00
2	52	55,73	17,33
3	60	60,27	20,00
4	63	64,80	21,00
5	65	69,33	21,67
6	70	73,87	23,33
Pro proud $I=4,2A$			
1	41,8	48,34	9,95
2	44	51,92	10,48
3	47,6	55,50	11,33
4	52,7	59,09	12,55
5	54,2	62,67	12,90
6	57,5	66,25	13,69
7	59,1	69,83	14,07
8	59,6	73,41	14,19

Tabulka 6 Měření V-A charakteristiky pro konstantní proud $I_{ob}=(5; 7)A$

l_{ob}	U_{ob}	U_{vyp}	R_{ob}
[mm]	[V]	[V]	[Ω]
Pro proud $I=5A$			
1	35	47,20	7,00
2	45	50,40	9,00
3	50	53,60	10,00
4	53	56,80	10,60
5	57	60,00	11,40
6	57	63,20	11,40
7	59	66,40	11,80
8	60	69,60	12,00
9	60	72,80	12,00
10	62	76,00	12,40
Pro proud $I=7A$			
1,25	32,2	46,15	4,60
1,79	36,4	47,57	5,20
2,51	40,3	49,45	5,76
3,05	50,2	50,87	7,17
5,20	57,2	56,52	8,17
6,09	60,5	58,87	8,64
7,17	63,1	61,70	9,01
8,60	63,4	65,47	9,06
10,75	69,4	71,12	9,91
14,87	83	81,96	11,86

Tabulka 7 Měření V-A charakteristiky pro konstantní proud $I_{ob}=8A$

l_{ob}	U_{ob}	U_{vyp}	R_{ob}
[mm]	[V]	[V]	[Ω]
Pro proud $I=8A$			
1,25	35,2	45,57	4,40
1,79	39,5	46,89	4,94
2,51	43,8	48,65	5,48
3,23	46,6	50,40	5,83
5,02	50	54,79	6,25
6,09	53,6	57,43	6,70
7,17	56,5	60,06	7,06
8,96	59,8	64,45	7,48
10,75	64,4	68,84	8,05
16,13	91	82,02	11,38



V tomto měření byly použity uhlíkové homogenní elektrody se stabilizačním jádrem o průřezu $\varnothing=13\text{mm}$. Vypočtené napětí U_{vyp} bylo vypočteno pomocí rovnice Ayrtonové za pomoci konstant uvedených v tabulce č. 1.

Příklad výpočtu pro tabulku č. 5; 6; 7, pro proud $I=3\text{A}$ a $l_0=1\text{mm}$:

$$U_{\text{vyp}} = \alpha + \beta \cdot l + \frac{\gamma + \delta \cdot l}{I_0} = 40 + 1200 \cdot 0,001 + \frac{20 + 10000 \cdot 0,001}{3} = 51,20 \text{ V}$$

$$R = \frac{U}{I} = \frac{45}{3} = 15 \Omega$$

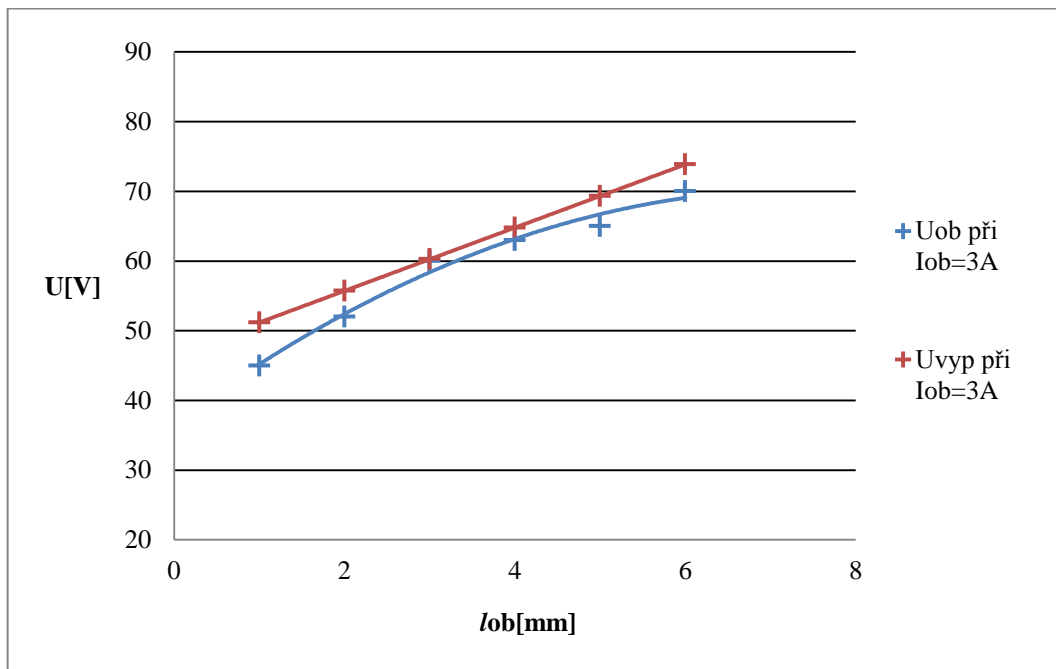
6.1.2.1 Zhodnocení měření V-A charakteristiky při $I=\text{konst.}$

Z takto naměřených a vypočtených hodnot byly sestaveny grafy závislosti napětí na oblouku U_{ob} a vzdálenosti elektrod l_0 , které je vidět na obrázku č. 23 a č. 24. Zbýlé grafy pro hodnoty proudu $I_{\text{ob}}=(4,2; 5; 8)\text{A}$ jsou vyneseny v příloze B. Z grafu je patrné, že s rostoucí vzdáleností elektrod l_0 roste napětí na oblouku. Při zvětšování vzdálenosti mezi elektrodami, dochází k zvětšování plochy oblouku a tím snadnějším chlazení, teplo je z oblouku odváděno snadněji, v důsledku toho dochází k ochlazování elektrod. Začne klesat počet volných nosičů náboje a zpomalují se. Vlivem snížení počtu volných nosičů náboje a jejich zpomalení narůstá odpor elektrického oblouku a tím nárůst obloukového napětí, až dojde k jeho uhasnutí. Tohoto jevu se využívá při zhášení elektrických oblouků mezi kontakty vypínačů.

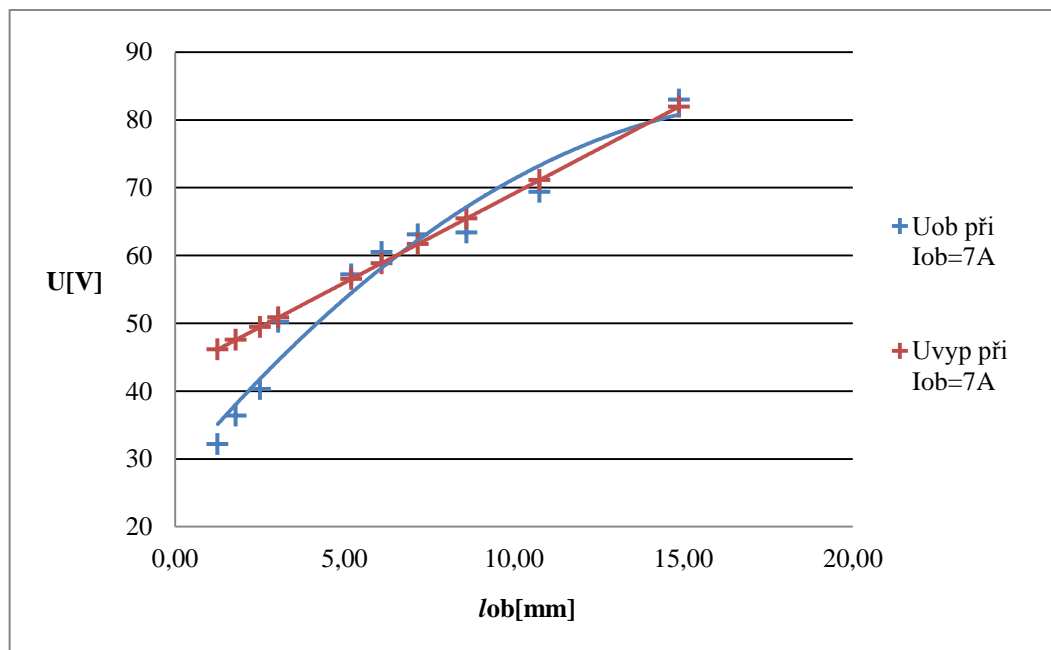
Při zvětšování odporu oblouku se jeho charakteristika posunuje k vyšším hodnotám napětí. Při zvětšení odporu oblouku na dostatečnou hodnotu dojde k uhasnutí oblouku. Zvětšovat odpor oblouků můžeme několika způsoby, první je zvětšování katodových a anodových úbytků přidáním feromagnetického materiálu do elektrického oblouku, v praxi často využívané zhášení oblouků.

Druhým způsobem je zvětšení délky elektrického oblouku. Z obrázků je patrné, že při vyšší hodnotě proudu je potřeba dosáhnout větší vzdálenosti mezi elektrodami pro úspěšné uhasnutí oblouku. V moderní energetice však výkony soustav dosahují velmi vysokých hodnot, že vzdálenost, na kterou by se musely kontakty vzdálit, by byla tak velká, že rozměry vypínače by byly neekonomické a proto konstruktéři navrhují vhodné zhášecí systémy, komory, které napomáhají ke zhášení oblouku, například vhodným chlazením, rozdělením elektrického oblouku na více malých oblouků a další způsoby, které byly probrány v kapitole č. 5.

Změřené napětí U_{ob} a napětí vypočtené pomocí úplné rovnice Ayrtonové U_{vyp} se lišilo, v důsledku toho, že při výpočtu byly použity konstanty Ayrtonové pro homogenní uhlíkové elektrody o průměru $\varnothing = 13\text{mm}$, ale v našem případě bylo měření provedeno na homogenních uhlíkových elektrodách o průměru $\varnothing = 10\text{mm}$. Rozdíly mohly vzniknout v důsledku nepřesného odečtení vzdálenosti elektrod na promítnutém obraze, která se musela neustále nastavovat kvůli ohořívání elektrod, nebo nepřesnému nastavení proudu na oblouku.



Obrázek 23 Změřená a vypočtená statická V-A charakteristika elektrického oblouku při konstantním proudu oblouku $I_{ob}=3A$



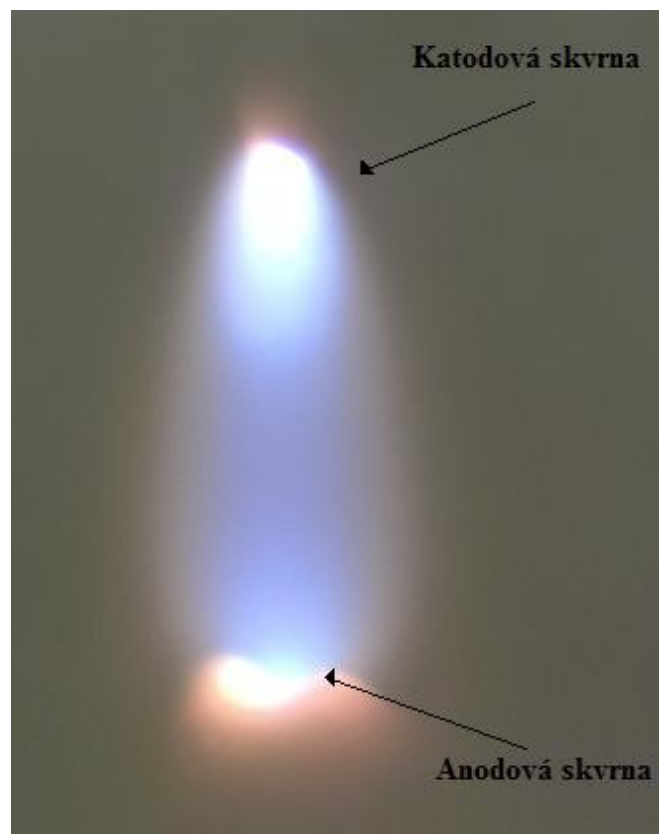
Obrázek 24 Změřená a vypočtená statická V-A charakteristika elektrického oblouku při konstantním proudu oblouku $I_{ob}=7A$

6.1.3 Katodová a anodová skvrna

Dále bylo možno při měření pozorovat velmi výraznou katodovou a anodovou skvrnu, které jsou vidět na obrázku č. 25. V našem zapojení byla katoda spodní elektrodou, ale na obrázku je vidět výrazně větší katodová skvrna na horní elektrodě, tento jev je způsoben tím, že byl oblouk promítán na měřicí tabuli pomocí čočky, která obrací obraz.

Plazma samostatných výbojů přechází do katody nápadnou katodovou skvrnou, proudová hustota v katodové skvrně dosahuje $2700 \text{ A}\cdot\text{mm}^{-2}$ až $2900 \text{ A}\cdot\text{mm}^{-2}$. Proudová hustota katodové skvrny je výrazně větší než proudová hustota v okolí povrchu katody, protože bezprostředně před katodou je oblast plazmatu se silně klesající vodivostí. Katodová skvrna se obvykle nevyskytuje u oblouků s velkými výkony a velkými teplotami katody. Na obrázku je vidět i nepatrná skvrna u anody, tato skvrna se nazývá anodová skvrna, je mnohem menší, než katodová skvrna a vodivost v anodové skvrně dosahuje $200 \text{ A}\cdot\text{mm}^{-2}$ až $400 \text{ A}\cdot\text{mm}^{-2}$. [1]

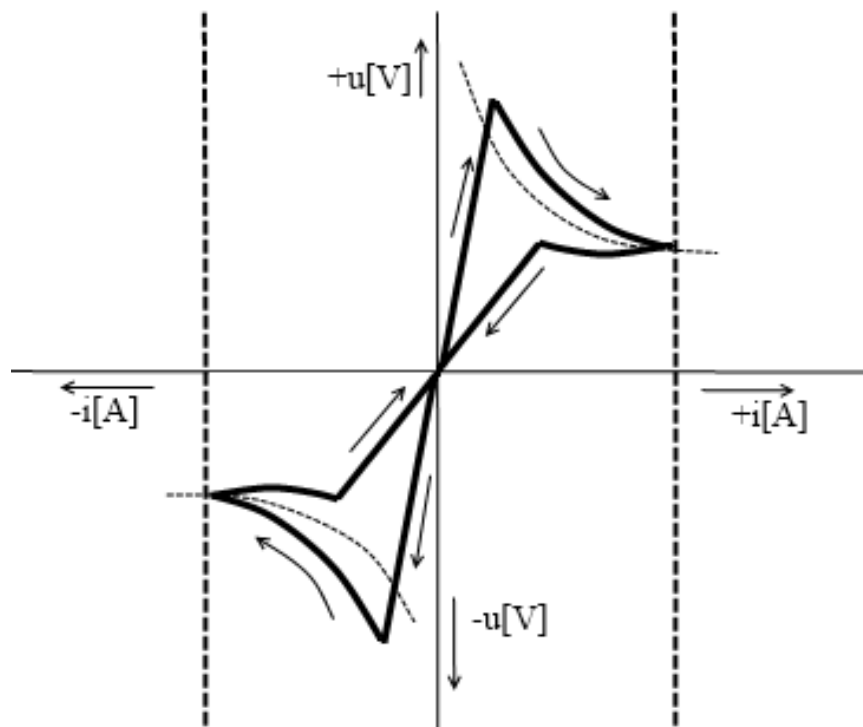
Katodová a anodová skvrna byly nejvýraznější při měření elektrického oblouku napájeného stejnosměrným napětím $U_{ob}=120 \text{ V}$, nastavené vzdálenosti elektrod $l_0=10 \text{ mm}$ a proudu protékajícím obloukem $I_{ob}=10 \text{ A}$. Zadání laboratorní úlohy by mohlo být doplněno o bod, ve kterém by se studenti věnovali pozorování katodové a anodové skvrny, promítnutých na tabuli, při hodnotách $U_{ob}=120 \text{ V}$, $l_0=10 \text{ mm}$, $I_{ob}=10 \text{ A}$.



Obrázek 25 Katodová a anodová skvrna při měření statické V-A charakteristiky

7 MĚŘENÍ A ZKOUMÁNÍ DYNAMICKÉ V-A CHARAKTERISTIKY ELEKTRICKÉHO OBLOUKU

V případě měření dynamické charakteristiky způsobuje rychlá změna proudu výrazný odklon voltampérové charakteristiky od statické voltampérové charakteristiky, což je vidět na obrázku č. 26. Na obrázku je znázorněn typický tvar dynamické V-A charakteristiky oblouku. Z obrázku je vidět, že při zapalování oblouku, jsou okamžité hodnoty napětí větší než napětí při zhášení oblouku. Tento jev je v oblasti okolo nuly proudu. Po průchodu nulou je v elektrickém oblouku nedostatek volných nosičů náboje, toto napětí je potřeba k průrazu výbojové dráhy, v maximální hodnotě proudu (amplitudě) odpovídá napětí statické V-A charakteristice. Při klesání hodnoty proudu je přebytek volných nosičů náboje, do průchodu proudu nulou. Tvar dynamické charakteristiky je ovlivněn zejména materiálem elektrod, teplotou elektrod, frekvencí napájecího napětí a prostředím, ve kterém oblouk hoří. Důkladně byla teorie dynamické charakteristiky probrána v kapitole 3. 2. [10]



Obrázek 26 Dynamická V-A charakteristika střídavého oblouku



7.1 Hypotézy o změnách a chování dynamické V-A charakteristiky vlivem změn parametrů zapojení a působením okolních vlivů

Před započítáním měření byly probrány hypotézy, jak se bude chovat dynamická V-A charakteristika elektrického oblouku, při změnách parametrů zapojení úlohy a jak její tvar ovlivní působení vnějších vlivů. Bylo stanoveno pět vlivů, které byly následně ověřeny. Tyto vlivy jsou:

1) Vliv teploty na hoření oblouku a chování dynamické V-A charakteristiky

Na začátku měření jsou elektrody spojeny, mají nízkou teplotu a nehoří elektrický oblouk. Po oddálení elektrod dojde k zapálení oblouku a jeho hoření. Elektrický oblouk má velmi vysokou teplotu, působením elektrického oblouku se ohřívají elektrody a jejich teplota roste.

Rovnice tepelné bilance: [12]

$$RI^2 dt = \alpha_0 A \Delta \vartheta dt + cVd(\Delta \vartheta) \quad (7.1.1)$$

$RI^2 dt$ jsou ztráty v časovém úseku,

kde $R[\Omega]$ je odpor oblouku,

$I[A]$ je proud tekoucí obloukem.

Část $\alpha_0 A \Delta \vartheta dt$ představuje část tepla odvedeného do okolí za čas.

kde $\alpha_0 [W/m^2K]$ je součinitel přestupu tepla,

$A[m^2]$ je povrch oblouku,

$\Delta \vartheta [K]$ je oteplení oblouku proti okolí.

Třetí člen rovnice $cVd(\Delta \vartheta)$ je teplo, které v oblouku zůstává a zvyšuje jeho teplotu a přírůstek $d\vartheta [K]$. Tato část představuje tepelný výkon, způsobuje oteplování tělesa.

kde $c [J/m^3 \cdot K]$ je měrná objemová tepelná kapacita. [12]

Velikost výstupní práce je ovlivněna teplotou oblouku, materiálem elektrod a teplotou elektrod. Výstupní práce je množství dodané energie, potřebné k uvolnění elektronu z valenční vrstvy. Studené elektrody uvolňují hůře elektrony a je k tomu potřeba většího napětí. Při zahřívání elektrod jsou elektrony uvolňovány snáze, z toho plyne, že je potřeba menší energie k uvolnění elektronu z povrchu elektrody, úbytek napětí na oblouku bude menší. To znamená, že po zahřátí elektrod klesne napětí na oblouku. [12]

2) Vliv velikosti elektrického proudu na hoření oblouku a chování dynamické V-A charakteristiky

Při zvyšování elektrického proudu procházejícího obloukem dochází k zahřívání proudovodné dráhy a elektrod, roste teplota elektrod. Dochází ke snazšímu uvolňování elektronů z katody, tím se zvyšuje počet vodivých částic v proudovodné dráze. Díky velkému počtu volných nosičů náboje roste vodivost proudovodné dráhy. Vlivem zvýšené vodivosti klesá odpor elektrického oblouku a klesá napětí na elektrickém oblouku.



3) Vliv délky oblouku na hoření oblouku a chování dynamické V-A charakteristiky

Vlivem oddalování pohyblivé elektrody od pevné dochází k prodloužení délky elektrického oblouku, s prodlužujícím se obloukem roste i jeho povrch, přes který se vyměňuje teplo s okolním prostředím. Dle rovnice tepelné bilance 7.1.1 rostou tepelné ztráty, teplota elektrického oblouku a elektrod klesá, elektrony z katody vystupují hůře, klesá jejich počet a rychlost pohybu. Klesá vodivost proudovodné dráhy, zvětšuje se její odpor, na dynamické charakteristice narůstá napětí, zvyšují se zapalovací špičky až do vzdálenosti, kdy oblouk zaniká a nedojde k jeho opětovnému zapálení. V opačném případě, kdy se elektrody přibližují, dochází ke zmenšení povrchu oblouku, klesají ztráty a narůstá teplota elektrického oblouku a elektrod. Elektrony jsou uvolňovány snadněji, zvyšuje se počet volných nosičů náboje a roste vodivost celé proudovodné dráhy. Snižuje se odpor elektrického oblouku a na dynamické charakteristice se snižují napěťové špičky.

4) Vliv polohy a materiálu elektrod na hoření elektrického oblouku a tvar dynamické V-A charakteristiky

Tvar dynamické V-A charakteristiky ovlivňuje především poloha elektrod, souosost elektrod, úhel mezi elektrodami, tvar elektrod, materiál elektrod. Ve střídavém oblouku dochází každou půlperiodu ke změně polarity katody a anody. V případě, že jsou elektrody umístěny vertikálně, má horní elektroda vyšší teplotu než spodní, protože je ohřívána žhavými plyny stoupajícími z elektrického oblouku. V případě půlperiody, kdy je katoda horní elektrodou, jsou elektrony z katody emitovány snáze, roste počet volných nosičů náboje, klesne odpor proudovodné dráhy a v charakteristice poklesnou napěťové špičky a zvýší se proud na elektrickém oblouku. V další půlperiodě je katoda spodní elektrodou, teplo stoupající nahoru v tomto případě ohřívá anodu a katoda je chladnější. Volné nosiče náboje opouštějí katodu hůře než v předešlé půlperiodě, narůstá zapalovací napěťová špička. Tento jev má za následek nesouměrnost dynamická V-A charakteristiky.

Pro dosažení souměrnosti dynamické charakteristiky můžeme aplikovat několik způsobů:

- Pokud ponecháme elektrody horizontálně, můžeme zvětšit průměr horní elektrody na tolik, aby se horní elektroda oteplevala hůř než spodní a jejich teplota zůstala stejná. Pokud průměry elektrod zůstanou stejné, můžeme chladit horní elektrodu (viz obrázek č. 36), nebo nahřívát spodní elektrodu, popřípadě změnit materiál horní elektrody.
- Další možností je uložení elektrod horizontálně. Když budou elektrody vodorovně, teplo z oblouku bude odcházet nahoru a nebude docházet k oteplování jedné z elektrod a dynamická charakteristika bude souměrná (viz obrázek č. 34).

5) Vliv chlazení na hoření elektrického oblouku a tvar dynamické V-A charakteristiky

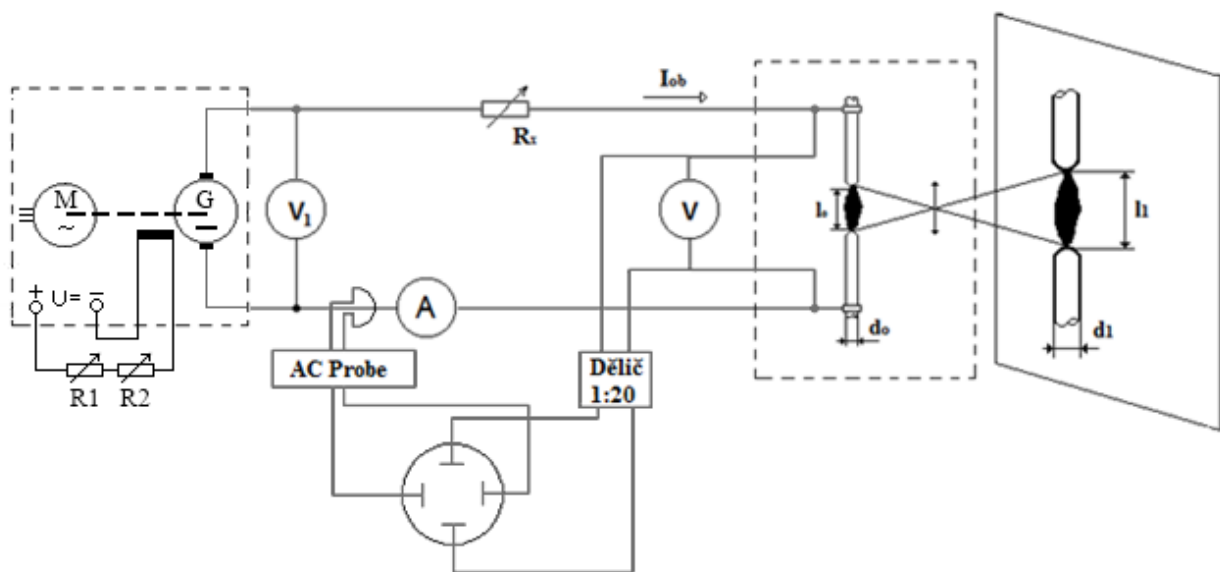
Působením vynuceného proudění vzduchu, dochází k ochlazení elektrod. U chlazených elektrod se z katody hůře uvolňují nosiče náboje a je potřeba dodávat více energie, než u teplejších elektrod. V proudovodné dráze se vyskytuje menší počet volných nosičů náboje a jejich rychlost klesá, a tím klesá její vodivost, roste odpor oblouku a tím i napětí na oblouku. Při

chlazení elektrického oblouku dochází ke zmenšení jeho průměru, toho zmenšení má za následek zvýšení odporu oblouku a tím zvýšení napětí na oblouku.

U vypínačů velkých výkonů musí vypínač vypnout výkon 1250krát větší, v našem případě stačí pro uhasnutí oblouku například pouhé mávnutí listu papíru, avšak v pro vypínání vysokých výkonů je zapotřebí navrhnutí speciálních zhášecích komor a zhášecích médií (voda, vzduch, olej, SF₆, vakuum) pro účinné uhasnutí elektrického oblouku.

7.2 Měření dynamické V-A charakteristiky elektrického oblouku

Před započítím měření byla zkontrolována souosost elektrod a jejich správná poloha vůči čočce. Obvod byl zapojen dle obrázku č. 27. Elektrody byly svisle proti zemi.



Obrázek 27 Schéma zapojení obvodu pro měření dynamické V-A charakteristiky elektrického oblouku

Seznam použitých přístrojů:

- Sloupcový posuvný rezistor
- Rezistor 10 kΩ
- Napájecí zdroj BS-PSN 3/5A
- Analogový ampérmetr Metra 40/304; TP=0,5 s. č. 1360328
- Digitální voltmetr Hexagon 340 A s. č. 111180537
- Laboratorní zařízení s elektrodami
- Posuvné měřítko
- Osciloskop TPS 2012B s. č. 000000317333-0000

Po zapojení obvodu dle schématu, byl připojen na sinusové napájecí napětí o hodnotě $U=100$ V a proud $I_{ob} = 10$ A. Při oddálení elektrod došlo k zapálení elektrického oblouku, vzdálenost elektrod byla nastavena na $l_0=10$ mm. Na osciloskopu byly zobrazeny průběhy napětí a proudu v závislosti na čase. Osciloskop byl přepnut do režimu XY, kde byla vidět dynamická V-A charakteristika elektrického oblouku. Následně bylo provedeno ověření hypotéz probraných



v kapitole 7.1 a tyto hypotézy byly srovnány s chováním dynamické V-A charakteristiky, která byla zobrazena na displeji osciloskopu.

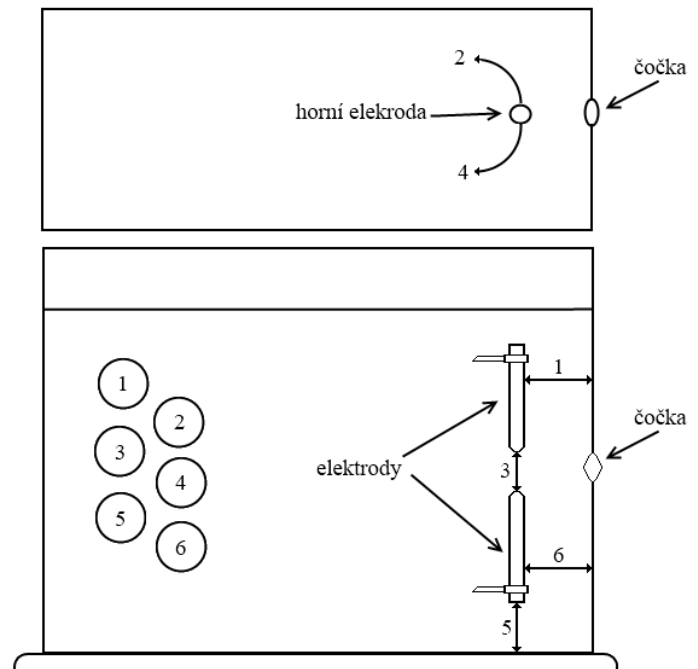
8 INOVACE PRACOVNÍŠTĚ A NÁVRH ROZŠÍŘENÍ LABORATORNÍCH ÚLOH O MODERNÍ DIAGNOSTICKÉ METODY

V rámci laboratorních cvičení z předmětu Elektrické přístroje jsem se zúčastnil několika měření laboratorních úloh „Měření statické V-A charakteristiky“ a „Měření dynamické V-A charakteristiky“, abych mohl inovovat tyto laboratorní úlohy a navrhnout rozšíření těchto laboratorních úloh o moderní diagnostické metody.

8.1 Popis systému ovládání polohy elektrod

Velkým nedostatkem měřicí stanice jsem považoval absenci popisu ovládacího systému polohy elektrod. Měřicí stanice obsahuje šest koleček pro ovládání polohy elektrod, které nejsou nijak popsány. Před začátkem měření studenti zkoušeli metodou „pokus, omyl“ funkci těchto šesti koleček. Čímž docházelo ke změnám polohy elektrod, jejich vzájemnému natočení, posunu a pootočení vůči čočce, většinou nebyly elektrody vráceny do původní polohy. Jak bylo uvedeno v kapitole č. 7. 1, tak poloha elektrod, vzájemné natočení a nesouosost elektrod má vliv na tvar V-A charakteristiky. Z toho plyne, že špatnou konfigurací elektrod by mohla být vnášena chyba do měření. Aby byla eliminována možnost výskytu této chyby, byly označeny kolečka čísly 1 až 6 a k těmto číslům byla vytvořena legenda s nákresem měřicí stanice, která by byla přiložena k pracovišti. Vytvořená legenda je vidět na obrázků č. 28.

1. Vzdálenosti horní elektrody vůči čočce.
2. Pohyb horní elektrody po kružnici.
3. Vzdálenost mezi elektrodami.
4. Pohyb dolní elektrody po kružnici.
5. Výška obou elektrod vůči podložce.
6. Vzdálenost dolní elektrody vůči čočce.



Obrázek 28 Popis ovládacích koleček

8.2 Návrh měření úbytku napětí na stejnosměrném elektrickém oblouku

Z obrázku č. 2 a č. 3 je zřejmé, že napět'ový úbytek na oblouku je složen ze součtu úbytků napětí na anodě a katodě a napětí na oblouku.

$$U_{ob}=U_A+U_K+U_P \quad [V; V, V] \quad (8.2.1)$$

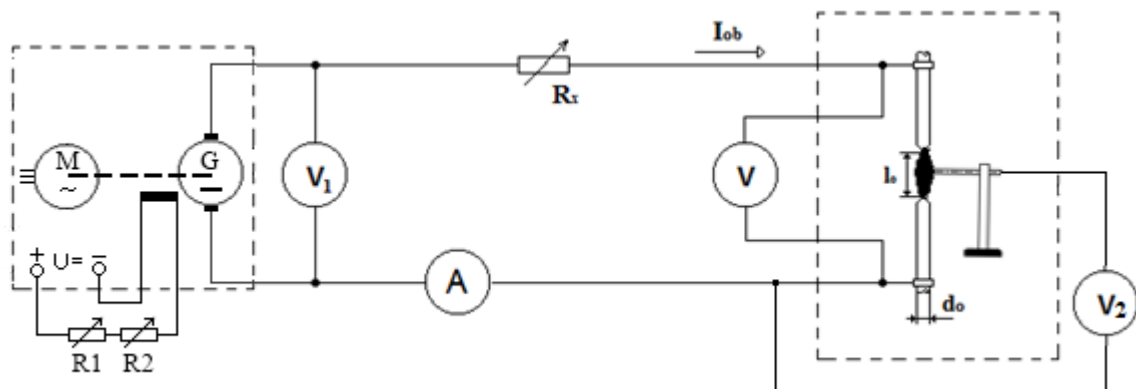
kde U_A úbytek napětí na anodě,

U_B úbytek napětí na katodě,

U_P úbytek napětí v plazmatu oblouku.

Průběh napětí na oblouku je závislý na délce elektrického oblouku. Velikost napětí v závislosti na jeho poloze by bylo možné měřit, zavedením vhodné sondy a měřit úbytek napětí v tomto místě. Pro měření je zapotřebí klidného hoření oblouku.

Schéma zapojení obvodu pro toto měření je zobrazeno na obrázku č. 29.



Obrázek 29 Schéma zapojení obvodu pro měření průběhu napětí na elektrickém oblouku

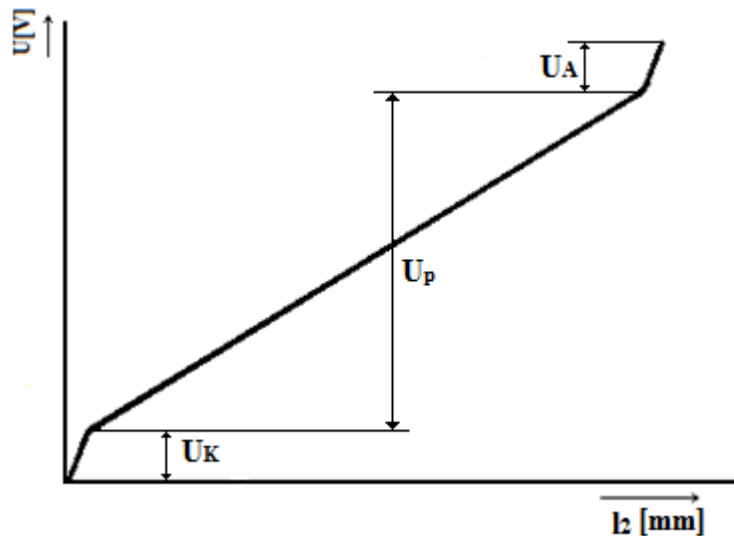
Zapojení je podobné jako zapojení pro měření statické V-A charakteristiky, jen je do obvodu přidána třetí uhlíková elektroda, která musí být podstatně užší než hlavní elektrody. Na pomocnou elektrodu je připojen voltmetr, který měří úbytek napětí v oblouku ve vzdálenosti l_2 .

Postup měření:

1. Obvod zapojíme dle schématu zapojení z obrázku č. 34, nastavíme elektrody tak, aby byly sousedé, a spojíme je. Daný obvod připojíme ke zdroji stejnosměrného napětí a oddálíme elektrody tak, aby došlo k zažhnutí oblouku a ten ustáleně hořel.
2. Určíme požadovanou vzdálenost elektrod l_0 , a následně pomocí vzorce 6. 1. 1 spočítáme vzdálenost elektrod l_1 , kterou musíme nastavit na měřicí tabuli: $l_1=k \cdot l_0$.
3. Spojíme elektrody, připojíme obvod ke zdroji napětí a nastavíme délku oblouku l_0 a odečteme hodnotu napětí U_{ob} na voltmetru „V“. Poněvadž se elektrody neustále opalují, musíme neustále kontrolovat délku oblouku, nastavenou délku udržujeme konstantní velikostí U_{ob} .
4. Pomocí ovládacího systému elektrod, posunujeme elektrody do doby, než dojde k zavedení pomocné elektrody do oblouku. Polohu elektrod nastavíme tak, aby byla pomocná elektroda vzdálená od horní elektrody $l_2=1\text{mm}$ a odečteme hodnotu napětí z voltmetru V_2 .

5. Pomocná elektroda je nepohyblivá, vzdálenost horní elektrody k pomocné elektrodě budeme nastavovat pomocí pohybu oblouku. Vzdálenost l_2 měníme s krokem 1 mm a odečítáme příslušné hodnoty napětí, které zaznamenáme do tabulky.

Měření provedeme pro dvě vzdálenosti elektrod l_x , nejlépe pro krátký a dlouhý oblouk. Takto změřené hodnoty vyneseme do grafické závislosti $U_{ob}=f(l_2)$, příklad této závislosti je vidět na obrázku č. 30.



Obrázek 30 Průběh napětí podél měřeného oblouku

Z vynesení grafu lze odečíst velikosti úbytku napětí na katodě a anodě a porovnat je s teoreticky vypočtenými hodnotami. Z kompletní rovnice Ayrtonové (3.1.1) plyne pro součet elektrodoých úbytků:

$$\alpha + \frac{\gamma}{i_{ob}} = U_A + U_K \quad [V, W, A; V, V] \quad (8.2.1)$$

kde α, γ jsou konstanty Ayrtonové,

i_{ob} je proud obloukem,

U_A úbytek napětí na anodě,

U_K úbytek napětí na katodě. [1]

Pro napětí plazmatu:

$$\left(\beta + \frac{\delta}{i_{ob}}\right) \cdot l = U_P \quad [Vcm^{-1}, Wcm^{-1}, A, m; V] \quad (8.2.1)$$

kde β, δ jsou konstanty Ayrtonové,

i_{ob} je proud obloukem,

U_P je úbytek napětí v plazmatu.[1]

Lze sledovat měnící se velikost úbytku napětí v plazmatu, která se mění s délkou elektrického oblouku. Jak bylo řečeno, napětí na oblouku je dáno součtem, katodového a anodového úbytku a napětí na oblouku. V případě měření krátkého oblouku budou ve

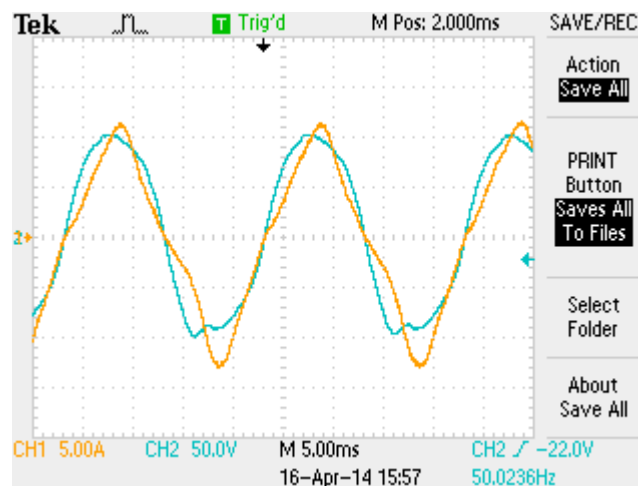
vyneseném grafu převládá úbytky napětí na elektrodách, velikost napětí na oblouku bude zanedbatelné, naopak v případě měření dlouhého oblouku budou úbytky na elektrodách v porovnání s napětím na oblouku zanedbatelné, jak je vidět na obrázku č. 2 a 3.

8.3 Měření dynamické V-A charakteristiky a vliv polohy elektrod

Při měření dynamické V-A charakteristiky studenti nevynášeli tvar dynamické V-A charakteristiky do protokolu. Nahrazením staršího osciloskopu moderním osciloskopem, který umožňuje uložit hodnoty a „screen“ displeje osciloskopu na SD kartu nebo „flash disk“, by bylo možné změřenou charakteristiku vynést do grafu a porovnat její tvar a vlastnosti při různých polohách elektrod. Schéma zapojení bylo použito totožné jako u laboratorní úlohy „Měření dynamické V-A charakteristiky“ elektrického oblouku a je zobrazeno na obrázku č. 27.

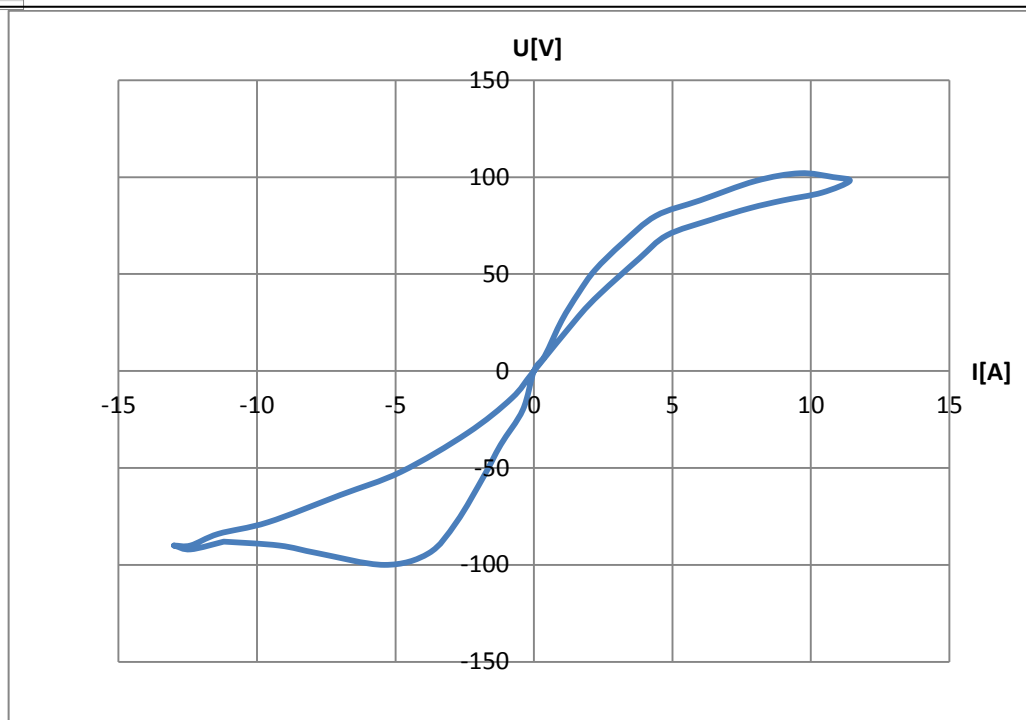
Původní osciloskop byl nahrazen moderním osciloskopem Tektronix TPS 2012B SAP:000000317333-0000, který umožňuje uložit měřené hodnoty na SD kartu a tyto hodnoty dále zpracovávat. Po zapojení se obvod připojil na napájecí napětí o hodnotě $u=100$ V. Při oddálení elektrod došlo k zažehnutí elektrického oblouku, vzdálenost elektrod byla nastavena na $x=12$ mm. Na osciloskopu byly zobrazeny průběhy napětí a proudu v závislosti na čase. Osciloskop byl přepnut do režimu XY, kde byla vidět dynamická V-A charakteristika elektrického oblouku. Pomocí funkce „SAVE ALL TO FILE“ byly hodnoty napětí, proudu a jejich průběhy uloženy na SD kartu vloženou v osciloskopu a přeneseny do počítače k dalšímu zpracování.

Na obrázku č. 31 je vidět „screen“ displeje osciloskopu, kde jsou průběhy napětí a proudu na elektrickém oblouku. Jak je vidět na obrázku, napětí je ve fázi s proudem, z toho plyne, že elektrický oblouk je ryze odporová zátěž.



Obrázek 31 Průběhy napětí a proudu na elektrickém oblouku při vertikálním uložení elektrod

Na začátku každé půlperiody stoupá napětí na oblouku souhlasně s napětím síťovým až do napětí, které odpovídá zapálení oblouku, tuto hodnotu nazýváme zapalovací špička. Proud oblouku se v průběhu půlperiody mění přibližně podle sinusovky. Hodnoty přenesené do počítače byly zpracovány pomocí programu EXCEL, dynamická V-A charakteristika oblouku byla vynesena do grafu, který je vidět na obrázku č. 32.

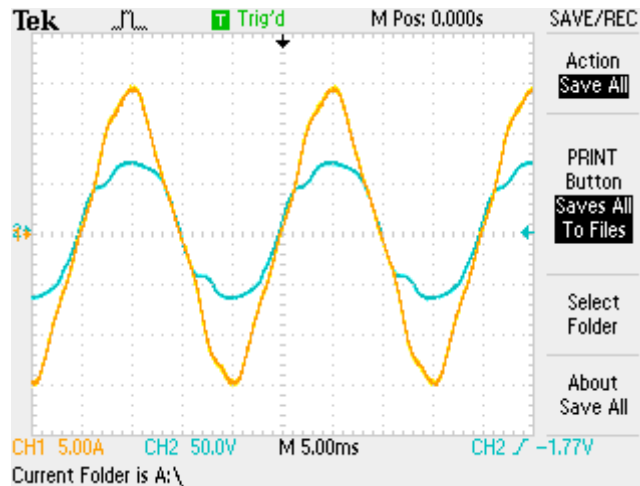


Obrázek 32 Dynamická V-A charakteristika elektrického oblouku při vertikálním uložení elektrod

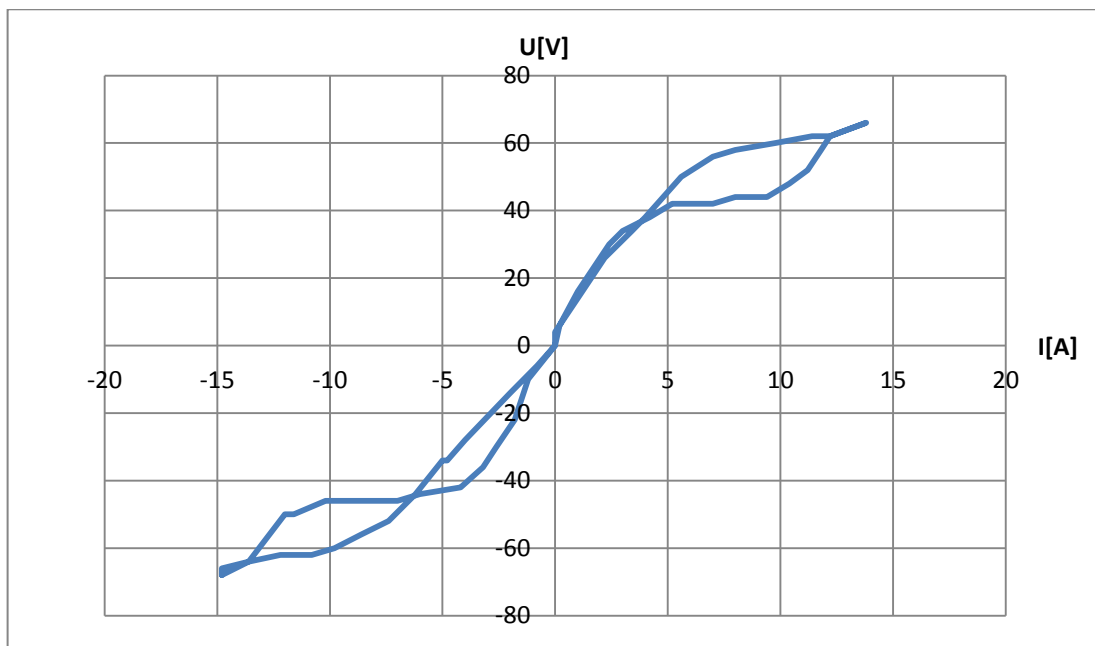
Dynamická V-A charakteristika je vynesena ve dvou kvadrantech a to v prvním a třetím kvadrantu. Napětí odpovídající proudům při zapalování oblouku jsou větší než napětí odpovídající stejně velkým proudům při zhašení oblouku. Z obrázku je patrné, že vynesená dynamická V-A charakteristika je nesouměrná. V třetím kvadrantu je vidět část, kdy byla katodou spodní elektroda, která je chladnější. V prvním kvadrantu je část dynamické V-A charakteristiky, kde byla katodou horní elektroda. Nesouměrnost dynamické V-A charakteristiky je způsobena rozdílnou teplotou elektrod, horní elektroda je teplejší, protože při svislé poloze elektrod, dochází ke stoupání tepla ze spodní elektrody a žhavých plynů z elektrického oblouku a zahřívání horní elektrody. Z teplejší elektrody jsou snadněji uvolňovány větší počet elektronů, jsou rychlejší a tím je zvýšena vodivost proudovodné dráhy. Kvůli tomuto jevu se liší i hodnoty zapalovacích špiček i průběhy napětí v obou půlperiodách.

Při dalším měření byl obvod zapojen totožně jako předchozí měření, elektrody byly uloženy vodorovně se zemí, čímž bylo docíleno stejné teploty obou elektrod v průběhu měření. Obvod byl připojen na napájecí napětí o stejné hodnotě jako v předchozím měření. Při oddálení elektrod došlo k zapálení elektrického oblouku, vzdálenost elektrod byla nastavena na $l_x=12\text{mm}$. Postup měření a zpracování hodnot byl totožný jako v předchozím měření. Na obrázku č. 33 jsou vidět průběhy napětí a proudu elektrického oblouku při horizontálních elektrodách. Na průběhu napětí a proudu je vidět, že napětí má stejný průběh v první a i druhé půlperiodě a je ve fázi s proudem.

převážně horní teplejší elektrodu, a jeho vzdálenost od elektrody byla 10 cm. Postup měření byl proveden totožně jako v předchozích měření dynamické charakteristiky, bylo nastaveno stejné napájecí napětí a vzdálenost elektrod byla nastavena na $l_x=12\text{mm}$. Po zapálení oblouku byly svorky chladicího obvodu připojeny na stejnosměrné napětí 12 V. Obdobně jako u předchozích měření byly hodnoty uloženy na „flash disk“ a zpracovány v programu „Excel“. Průběhy napětí a proudu jsou vidět na Obrázku č. 35.



Obrázek 35 Průběh napětí a proudu na elektrickém oblouku s chlazením horní elektrody



Obrázek 36 Dynamická V-A charakteristika elektrického oblouku s chlazením horní elektrody

Z obrázku č. 36 je patrné, že vlivem chlazení horní elektrody došlo ke snížení hodnoty napětí zápalné špičky a částečné symetrizaci dynamické V-A charakteristiky. Ventilátor chladící horní elektrodu způsobil to, že žhavé stoupající plyny byly proudem vzduchu vyfouknuty a nedocházelo k tak velkému oteplování horní elektrody.

8.4 Návrh a realizace chladicího systému

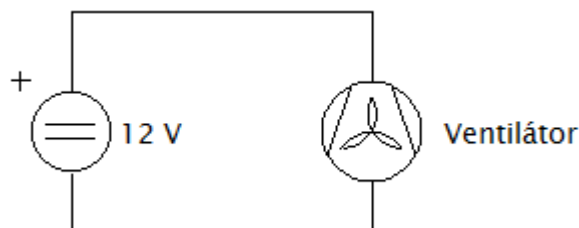
Jako velkým nedostatkem jsem viděl absenci chladicího systému oblouku, chlazení bylo zastoupeno ve formě náhodného proudění vzduchu, které bylo vyvoláno pohybem listu papíru. Tento způsob chlazení mi přišel velmi nepřesný a nevhodný pro vyvození závěrů a srovnání hypotéz s měřenou skutečností.

Chlazení nesmí být příliš silné, aby nedocházelo k zhasnutí elektrického oblouku hned po jeho zapálení. K chlazení elektrického oblouku byl zvolen obyčejný počítačový ventilátor Brushless AFB0712 MB. Je to ventilátor se stejnosměrným motorkem napájeným napětím 12 V, má 2800 otáček za minutu a maximální průtok vzduchu 0,662 m³/min. Použitý ventilátor je vidět na obrázku č. 37.



Obrázek 37 Ventilátor Brushless AFB0712MB

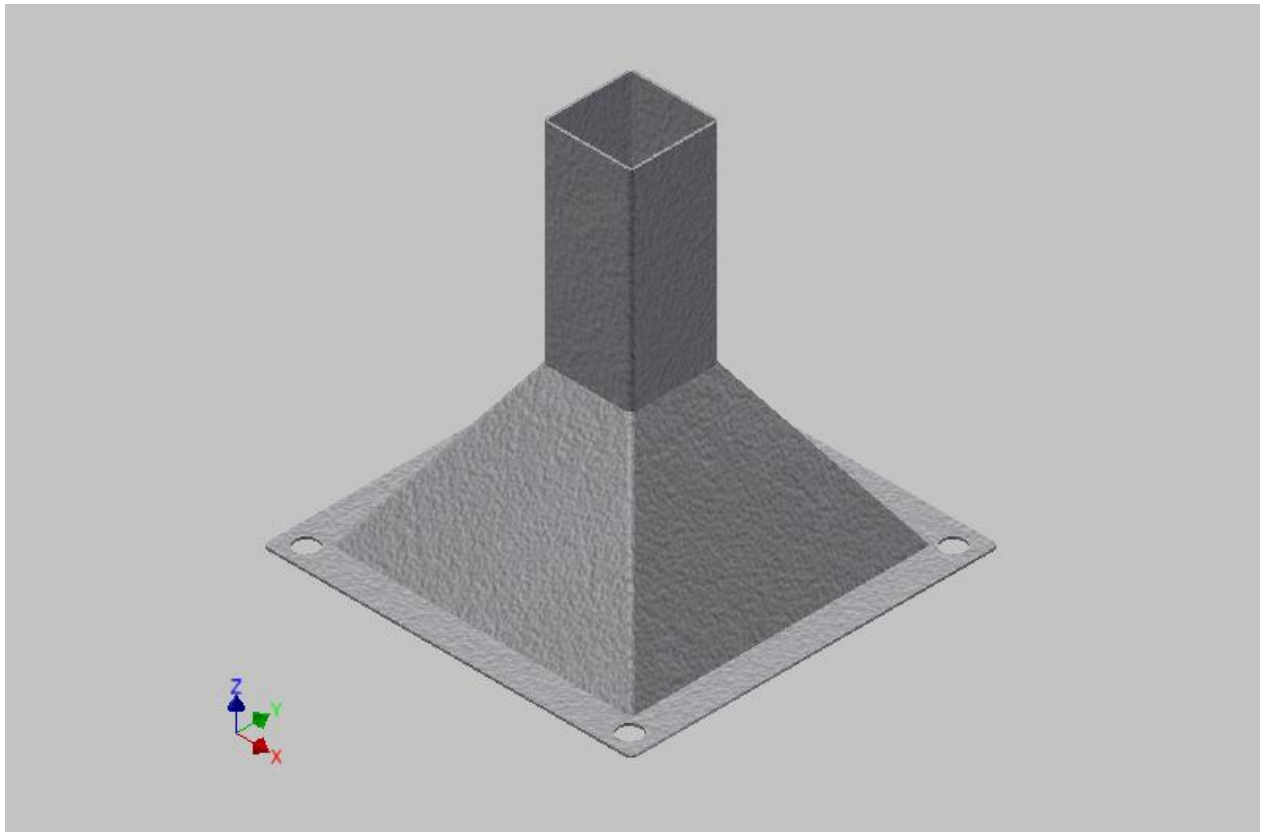
Ventilátor byl připojen na stejnosměrné napájecí napětí 12 V, byl použit laboratorní zdroj napětí BS-PSN 3/5A. Schéma zapojení chladicího systému je vidět na obrázku č. 38.



Obrázek 38 Schéma zapojení chladicího systému

Při chlazení elektrického oblouku se výrazně mění jeho dynamická V-A charakteristika. Můžeme chladit celý oblouk nebo pouze jednu z elektrod. Pomocí chlazení může být minimalizován rozdíl teplot obou elektrod v případě jejich vertikálního uložení a tím dojde ke změně tvaru a vlastností dynamické V-A charakteristiky, které je možné srovnat s dynamickou V-A charakteristikou elektrického oblouku bez chlazení. Výsledky tohoto měření jsou zaznamenány v kapitole 8.3, pro zlepšení vlastností chladicího systému a zpřesnění výsledků měření by bylo vhodné vyrobit nástavec na ventilátor, který by soustředil proud vzduchu do jednoho místa.

Tento nástavec jsem vymodeloval v programu Autodesk Inventor Professional 2014. Model je navržen z hliníkového plechu tloušťky 0,5 mm a je vidět na obrázku č. 39. Výkres tohoto nástavce je uveden v příloze C.



Obrázek 39 3-D model nástavce na ventilátor

8.5 Měření teploty ve styku elektrod pomocí infračervené kamery

Při sepnutých elektrodách má na velikost napětí vliv velikost odporu ve styku. Odpor ve styku:

$$R_d = \frac{k}{F_s^n} \quad [\Omega; \Omega, N, -] \quad (7.1.4)$$

kde k [Ω] je konstanta zachycující druh materiálu kontaktů,

F_s [N] je přitlačná síla,

n je druh kontaktního styku.

Při zvyšování přitlačné síly elektrod na sebe, klesá odpor ve styku mezi elektrodami, sníží se úbytek napětí na odporu ve styku. Přechodový odpor ve styku je hlavním ukazatelem jakosti elektrického spojení, závisí na něm velikost tepelných ztrát ve styku. [12]

V rámci měření dynamické V-A charakteristiky se ověřovala hypotéza o závislosti velikosti napětí na přitlačné síle. Studenti sledovali pouze velikost napětí, která se měnila s velikostí přitlačné síly elektrod. Přínosnou inovací je využití infračervené kamery SAT-HY6800, pro sledování oteplení elektrod, která je v laboratoři elektrických přístrojů dostupná. Touto kamerou lze sledovat velikost tepelných ztrát ve styku, zaznamenávat snímky na kartu a dále je zpracovávat, pro zpracování byl použit program SatReport Standart. S touto kamerou byla provedena série měření, při kterých bylo sledováno oteplení elektrod v závislosti na přitlačné síle

elektrod. Přítlačná síla byla definována pomocí snadněji měřitelného napětí, které se se zvětšující se přítlačnou silou zvětšuje, protože na odporu ve styku vznikají větší ztráty.

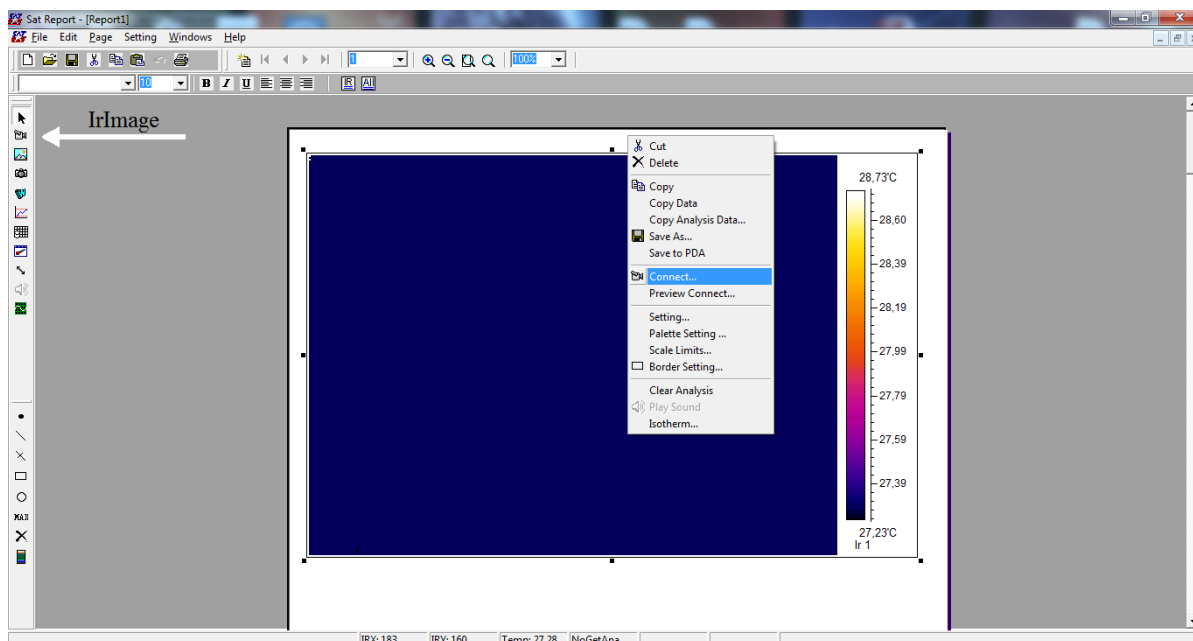
Při měření bylo použito schéma zapojení, které je vidět na obrázku č. 27. Po připojení obvodu k síti, byla nastavena poloha elektrod tak, aby byly elektrody sousedě, při tomto měření je důležité, aby na tento fakt byl kladen důraz, protože při nesouososti elektrod může dojít při zvětšení přítlačné síly ke zlomení jedné z elektrod. Po nastavení správného uložení elektrod byly elektrody spojeny, a pomocí ovládacích koleček přítlačeny co největší silou k sobě. Snímky byly pořizovány ze vzdálenosti 1m pomocí infракamery. Infракameru bylo nutné po zapnutí nechat 30 sekund automaticky nastavit. Po zapnutí kamery do režimu focení, byla kamera nastavena pro měření našeho pracoviště.

Byla odečtena hodnota napětí $U=4$ V, která definovala přítlačnou sílu, a proudu $I=15$ A. Pomocí kamery byl po 10 sekundách zaznamenán snímek elektrod. Následně byla přítlačná síla snížena natolik, aby napětí na elektrodách vzrostlo na hodnotu $U=4,5$ V a proud $I=15$ A a infračervenou kamerou byl pořízen snímek po 10 sekundách, takto bylo měření opakováno i pro hodnotu napětí $U=5$ V. Snímky byly ukládány na SD kartu a byly přeneseny do počítače k následovnému zpracování. Pro zpracování obrázků byl použit program SAT Report, jeho ovládání je popsáno v následující kapitole.

8.5.1 Práce s programem SAT Report

SAT report je program přiložený k infračervené kameře SAT-HY6800, který slouží k zobrazení a zpracování snímků pořízených infракamerou.

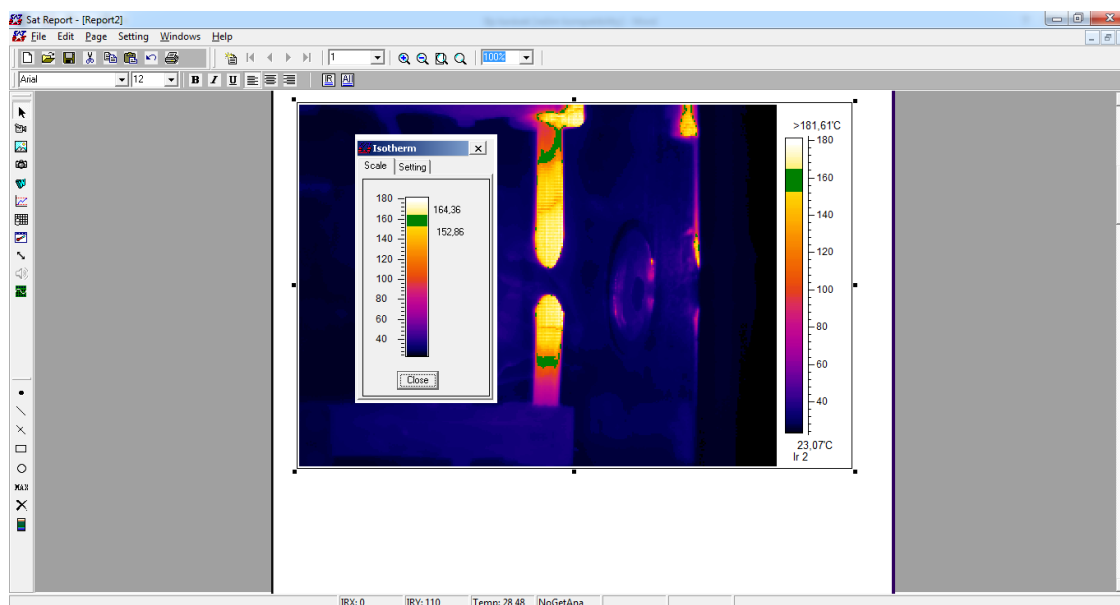
Po spuštění programu se uživateli zobrazí úvodní pracovní plocha. V horizontální nástrojové liště uživatel zvolí funkci „IrImage“ pomocí které nakreslí obdélníkové pole, do kterého budou vkládány vytvořené snímky infračervenou kamerou. Celý tento proces je zobrazen na obrázku č. 40.



Obrázek 40 Ukázka vložení pracovního pole IrImage

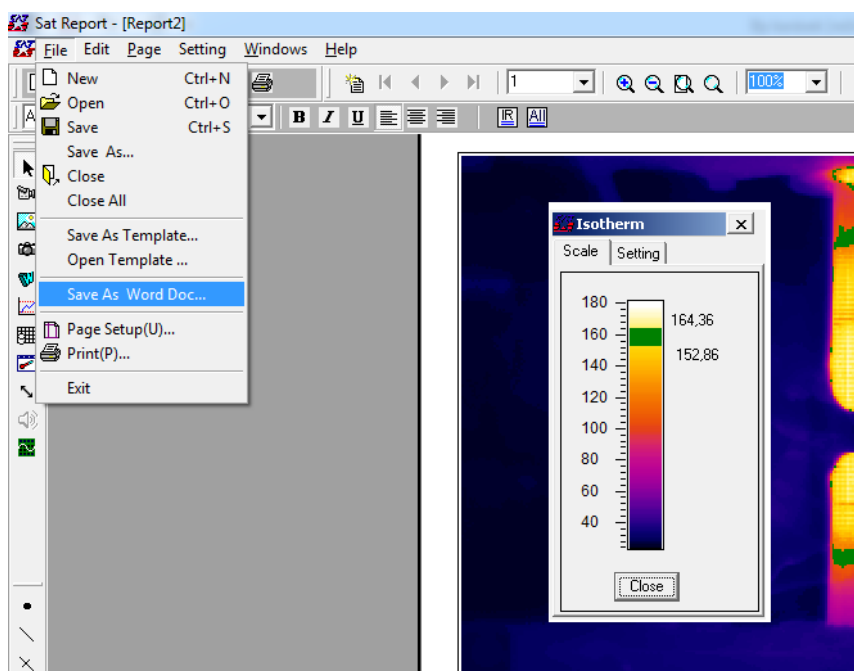
Kliknutím pravým tlačítkem na pole IrImage se objeví panel nastavení tohoto pole. Vybereme funkci „Connect“. Zobrazí se průzkumník, kde vybereme cílový soubor z karty

kamery, který chceme importovat. V pravé části pracovního pole je vidět barevné rozložení teplot. V horizontální pracovní liště můžeme vybrat funkci „Isotherm“, která umožňuje zvýraznit určitou teplotu, kterou požadujeme. Tato funkce otevře panel s teplotním rozložením a posuvnou lištu, kde si můžeme navolit teplotu, kterou chceme zvýraznit, zvolená teplota bude ve snímku zvýrazněna zelenou barvou, tato funkce je vidět na obrázku č. 41. Program umožňuje další velké množství úprav snímků, doplňujících informací a tabulek, ale tyto funkce nejsou pro naše měření podstatné.



Obrázek 41 Ukázka pracovního prostředí programu SAT Report - vložený snímek

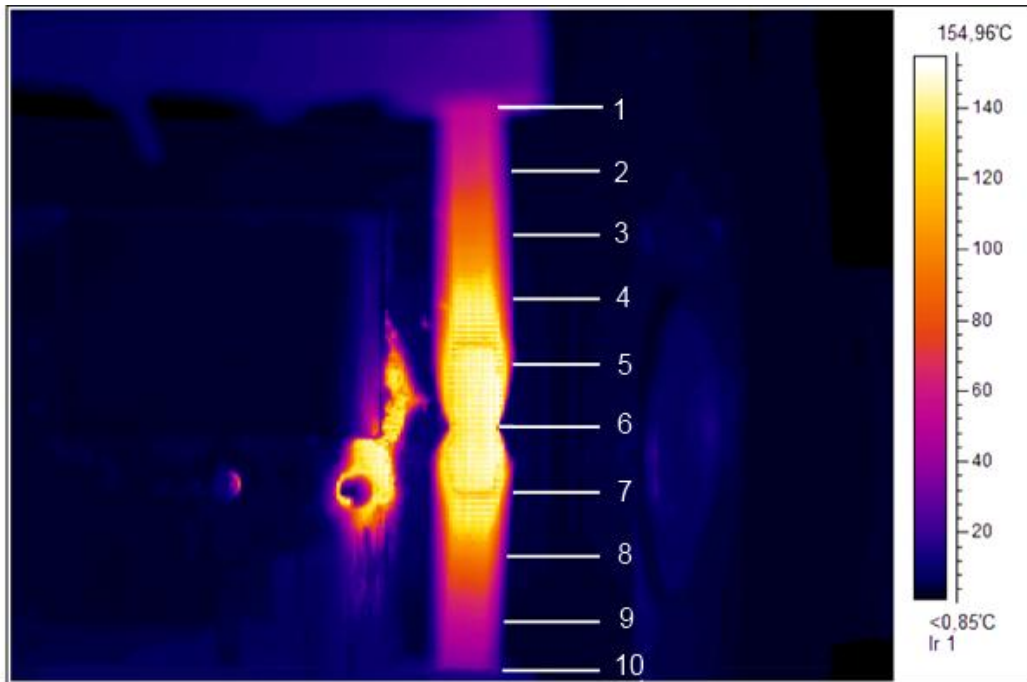
Zpracovaný snímek můžeme exportovat do obrázku ve formátu .jpg. V horní liště zvolíme sloupec File, kde vybereme funkci „Save As Word Doc..“ a soubor uložíme pod příslušným jménem do pracovního adresáře. Snímek je uložen v soboru .doc. Tento postup je zobrazen na obrázku č. 42.



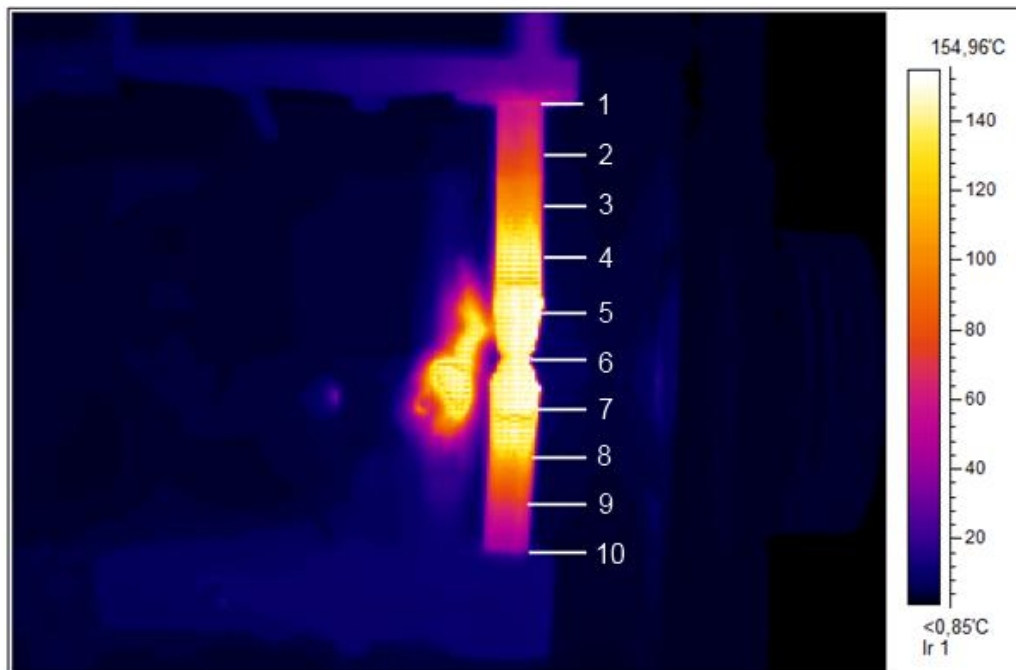
Obrázek 42 Popis programu SAT Report - Export zpracovaného snímku

8.5.2 Výsledky a zhodnocení měření

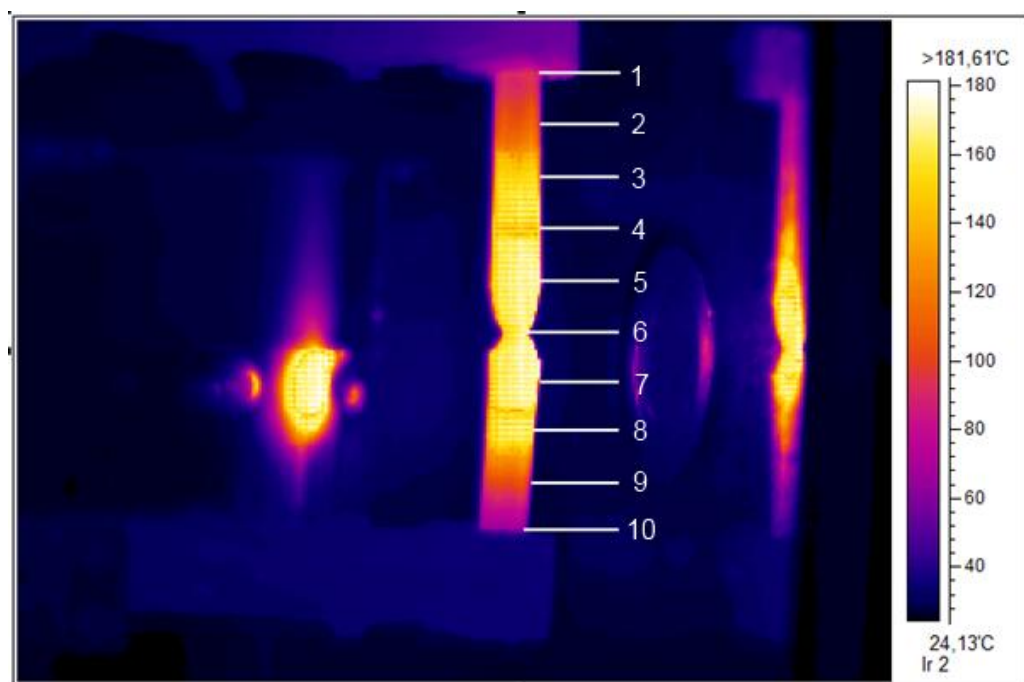
Měření bylo provedeno pro 3 hodnoty přitlačné síly, velikost přitlačné síly byla definována podle velikosti úbytku napětí na elektrodách, protože se zvětšující se přitlačnou silou klesá odpor ve styku a s klesajícím odporem klesá i úbytek napětí na odporu ve styku R_s . Zpracované snímky jsou vidět na obrázku č. 43 až č. 45.



Obrázek 43 Snímek infrakamerou - teplota elektrod při napětí $U=4\text{ V}$ a $I=15\text{ A}$



Obrázek 44 Snímek infrakamerou - teplota elektrod při napětí $U=4,5\text{ V}$ a $I=15\text{ A}$



Obrázek 45 Snímek infrakamerou - teplota elektrod při napětí $U=5\text{ V}$ a $I=15\text{ A}$

Po zpracování snímků v programu SatReport byly elektrody rozděleny 10 přímkami. Následně byla pro každou přímku odečtena teplota místa umístění této přímkou pomocí programu SatReport a jeho funkcí „Isotherm“. Hodnoty teplot byly zaznamenány do tabulky č. 8.

Tabulka 8 Měření teploty ve styku a elektrod

Bod	Pro $U=4\text{V}$	Pro $U=4.5\text{V}$	Pro $U=5\text{V}$
[-]	T_1 [°C]	T_2 [°C]	T_3 [°C]
1	35	55	80
2	55	80	100
3	80	100	130
4	110	120	140
5	120	135	155
6	130	145	170
7	115	130	150
8	90	100	140
9	55	70	100
10	35	50	80

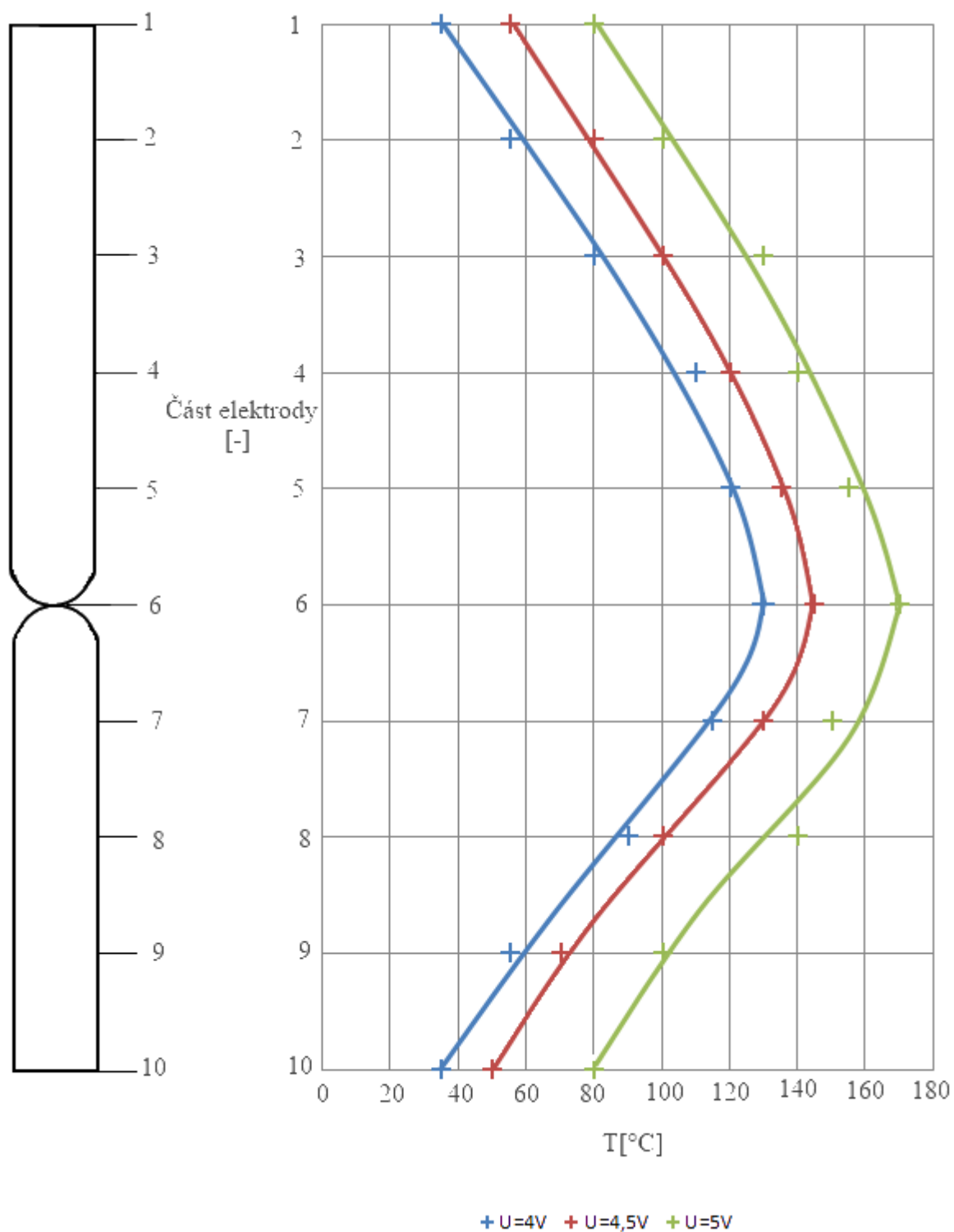


Při tomto měření byly použity homogenní uhlíkové elektrody s průměrem 13mm používané pro měření V-A charakteristik oblouku. Hodnoty z infrakamery mají pouze informační hodnotu.

Hodnoty teploty pro 3 přitlačné síly jsou vyneseny do grafu, který je vidět na obrázku č. 46. Podle očekávání je největší teplota ve styku (bod 6), postupně teplota klesá až k držákům elektrod. Pro největší přitlačnou sílu, tj. nejmenší úbytek napětí ve styku 4V (obrázek č. 43; tab. 8) je tato teplota ve styku rovna 130°C (bod 6). Tato teplota je poměrně velká, je to způsobeno tím, že byly použity elektrody, které již byly opotřebovány při měření V-A charakteristik elektrického oblouku. Při měření V-A charakteristik oblouku byly vypáleny středy elektrod, to znamená, že odpor ve styku elektrod byl v tomto měření poměrně velký i při maximální přitlačné síle. Z obrázku je dále patrné, že teplota elektrod dále směrem k držadlům elektrod klesala. Z průběhu teploty je vidět, že celá horní elektroda byla víc vyhřívána než spodní. Rozdílný průběh teplot elektrod je způsoben tím, že teplo odváděné z povrchu elektrod stoupalo prouděním nahoru a oteplovalo horní elektrodu a její držadlo (35°C), zatím co držadlo spodní má nepatrně vyšší teplotu než okolí (25°C).

Při následném zmenšování přitlačné síly docházelo k zmenšování počtu a velikosti styčných ploch, proudová hustota v těchto plochách se zvětšovala a docházelo k růstu teploty styčné plochy a elektrod, což je vidět na obrázku č. 44, č. 45 a tab. 8. Na obrázku č. 45 byly styčné plochy natolik malé, že vlivem procházejícího proudu je teplota ve styku 170°C (bod 6). Při zvyšující se teplotě ve styku byly elektrody vyhřívány dále k držadlům, kde horní držadlo dosáhlo teploty 80°C. Z průběhů teplot je patrné, že při zmenšující se přitlačné síle roste odpor ve styku a rostou hodnoty dosažených teplot. Při následném snižování přitlačné síly by došlo ke zmenšení styčné plochy natolik, že teplota stoupla na hodnotu, kdy by došlo k zapálení elektrického oblouku, od kterého by byly elektrody dále velmi intenzivně ohřívány.

Kvalitě kontaktů, velikosti stykového odporu a ztrátám ve styku, je v elektrických přístrojích věnována velká pozornost, proto bych doporučoval, zařadil sledování teploty ve styku pomocí infrakamery v závislosti na přitlačné síle do laboratorní úlohy „Měření dynamické V-A charakteristiky elektrického oblouku“.

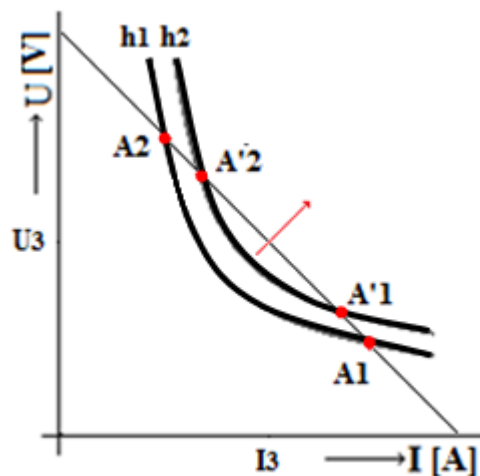


Obrázek 46 Průběh teploty elektrody v závislosti na poloze

8.6 Změny vlastností elektrického oblouku vlivem zvyšování katodových a anodových úbytků

V kapitole č. 4 byly probrány principy zhášení stejnosměrného elektrického oblouku. Jedním z principů zhášení oblouku je zvyšování katodových a anodových úbytků na elektrickém oblouku. Rozdělením elektrického oblouku na dva krátké oblouky dojde k nárůstu katodových a anodových úbytků napětí. Vlivem zvýšení úbytků napětí na oblouku se statická V-A charakteristika posune do oblasti vyšších napětí jak je vidět na obrázku č. 47.

V průběhu měření statické V-A charakteristiky elektrického oblouku při $I_{ob} = \text{konst.}$ bylo možné demonstrovat vliv zvýšení katodových a anodových úbytků napětí na chování statické V-A charakteristiky zavedením vhodného feromagnetického materiálu do cesty oblouku. Nejprve by studenti změřili statickou V-A charakteristiku při konstantní délce oblouku (křivka h1). Poté by se zasunul feromagnetický materiál do sloupce oblouku a celé měření by se opakovalo (křivka h2). Vlivem zvýšení katodových a anodových úbytků na oblouku by došlo k posunutí bodů stabilního hoření z bodů A1 a A2 do bodů A'1 a A'2. Dá se předpokládat, že při dalším dělení elektrického oblouku by došlo k posunutí statické V-A charakteristiky k hodnotám vyššího obloukového napětí až by nebyla splněna podmínka pro stabilní hoření elektrického oblouku $U_G = U_R + U_{ob}$ a došlo k uhasnutí oblouku.



Obrázek 47 Vliv katodového a anodového úbytku napětí na statickou V-A charakteristiku

Při měření dynamické V-A charakteristiky by při zasunutí feromagnetického materiálu do jádra oblouku mohli studenti pozorovat zvýšení katodových a anodových úbytků přímo na osciloskopu. Dynamická V-A charakteristika by se v tomto případě pohybovala k vyšším hodnotám napětí a docházelo by k jejímu zužování vlivem poklesu proudu.



9 ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo nastudovat problematiku vzniku a zhašení elektrického oblouku v elektrických přístrojích. Představit úspěšné varianty zhašecích principů v přístrojích nízkého napětí a inovovat laboratorní úlohy „Měření statické V-A charakteristiky elektrického oblouku“ a „Měření dynamické V-A charakteristiky elektrického oblouku“.

Byly popsány základní klasifikace elektrického oblouku, jeho vlastnosti, vznik v elektrických přístrojích a působení elektrického oblouku na kontakty elektrického přístroje. Stejnoseměrný elektrický oblouk byl charakterizován statickou V-A charakteristikou se sériovým odporem, byly popsány místa V-A charakteristiky, kde může oblouk hořet stabilně, nestabilně a kde oblouk zaniká. Střídavý elektrický oblouk byl popsán dynamickou V-A charakteristikou a závislost tvarů této charakteristiky na parametrech elektrického oblouku.

Při zhašení elektrického oblouku ve stejnosměrném obvodu je snaha docílit podmínek pro úspěšné a trvalé uhašení elektrického oblouku posunutím statické V-A charakteristiky nad body stability hoření. Jedním ze způsobů je zvětšování délky elektrického oblouku, chlazením elektrického oblouku, nebo zvětšováním katodových a anodových úbytků elektrického oblouku.

Hlavní částí bakalářské práce byla inovace laboratorních úloh. Z tohoto důvodu jsem se zúčastnil několika měření těchto laboratorních úloh se studenty předmětu Elektrické přístroje a také tyto laboratorní úlohy proměřil. Změřená statická V-A charakteristika byla srovnána s V-A charakteristikou sestavenou z hodnot vypočtených podle rovnice Ayrtonové. Elektrický oblouk se choval v souladu s teoretickými předpoklady. Byl navržen způsob demonstrování vlivu katodových a anodových úbytků napětí na statickou V-A charakteristiku.

Byl popsán na první pohled nepřehledný systém ovládacích koleček laboratorního přípravku s elektrodami. Bylo navrženo rozšíření úlohy „Měření statické V-A charakteristiky elektrického oblouku“ o měření úbytku napětí na elektrickém oblouku pro krátký a dlouhý oblouk, jelikož rozložení napětí podél oblouku se pro rozdílné délky oblouku mění. Byl navržen způsob chlazení, ke které byl použit ventilátor Brushless AFB0712MB a v programu Autodesk Inventor Professional 2014 byl vytvořen návrh nástavce na ventilátor.

Měřením a zaznamenáním hodnot dynamické V-A charakteristiky pomocí osciloskopu, můžeme porovnat vliv polohy elektrod elektrického oblouku (horizontálně uložené elektrody, vertikálně uložené elektrody), chlazení elektrického oblouku, nebo chlazení jedné z elektrod na tvar dynamické V-A charakteristiky.

Návrh možnosti použití infračervené kamery v oblasti pozorování vlivu přítlačné síly na odpor ve styku a oteplení kontaktního styku byl přínosný, protože velikost odporu ve styku je jedním z hledisek hodnocení jakosti elektrických přístrojů.



LITERATURA

- [1] HAVELKA Otto., *Elektrické přístroje*. první. Praha 1: SNTL, 1985. 436 s.
- [2] Bárta-Vostracký a kol.: *Spínací přístroje velmi vysokého napětí*. SNTL/ALGA, 1983.
- [3] ZAJÍC, Vladislav. *Vypínače na vysoké napětí*. Praha, 1954.
- [4] CIGÁNEK Lad. *Elektrické přístroje spínací, ochranné a řídicí*. první. Praha: Česká grafická Unie a. s., 1944, 181s.
- [5] GROSS Boleslav a CHALUPA Zdeněk. *Elektrické přístroje II*. druhé. Brno: Rektorát vysokého učení technického v Brně, 1980.
- [6] KOSTKA, T., TOPOLÁNEK, O. *Elektrotechnika 2: Elektrické přístroje* [online]. 2003 [cit. 2013-04-29].
Dostupné z: http://www.outech-havirov.cz/skola/files/knihovna_eltech/eti/el_pristroje.pdf
- [7] NOVOTNÝ, V. *Elektrické přístroje silnoproudé*. 1. vyd. Praha: ČVUT, 1975, 173 s.
- [8] BUŠOV, Bohuslav. *Elektrické přístroje 34_2 Oblouk a jeho zhášení*[online]. Dostupný z <https://www.vutbr.cz/elearning/>
- [9] NOVOTNÝ, V. *Elektrické přístroje silnoproudé*. 1. vyd. Praha: ČVUT, 1975, 173 stran.
- [10] DOLEŽAL, Miloš, Boleslav GROSS a Vladislav ZAJÍC. *Oblouk ve vypínací technice: Určeno inženýrům a technikům ve výrobě, vývoji a výzkumu spínacích přístrojů*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1959, 326 s.
- [11] *L3-SS_Char_Oblouku*. VUT Brno, 2014. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/elearning/mod/resource/view.php?id=260359>
- [12] BUŠOV, Bohuslav. *Elektrické přístroje 14_35_4_Kontakty-zaklady*[online]. Dostupný z <https://www.vutbr.cz/elearning/>
- [13] *L5-Dyn_Ch_Oblouku*. VUT Brno, 2014. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/elearning/mod/resource/view.php?id=264075>



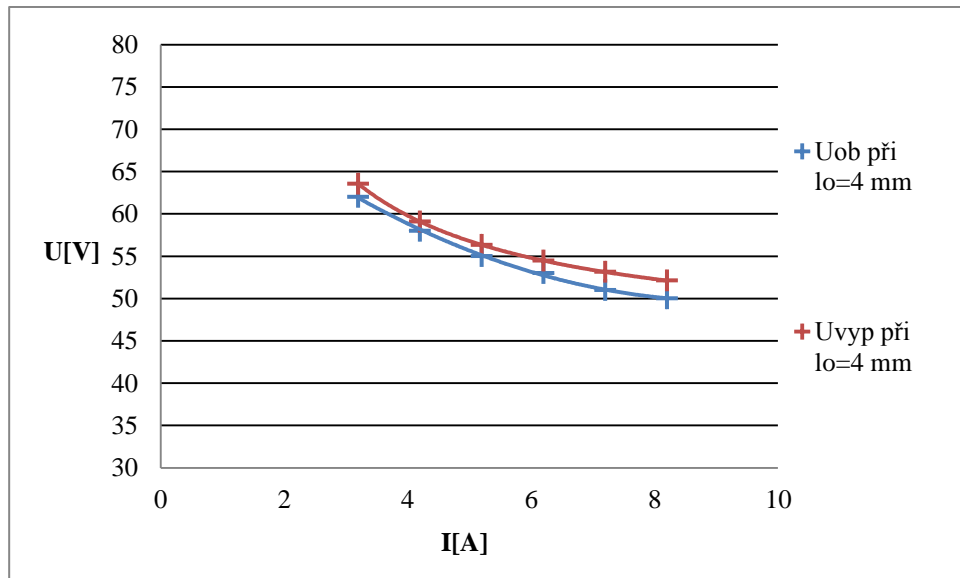
PŘÍLOHY

Příloha A: Grafy z měření statických V-A charakteristik při $l_0 = \text{konst.}$

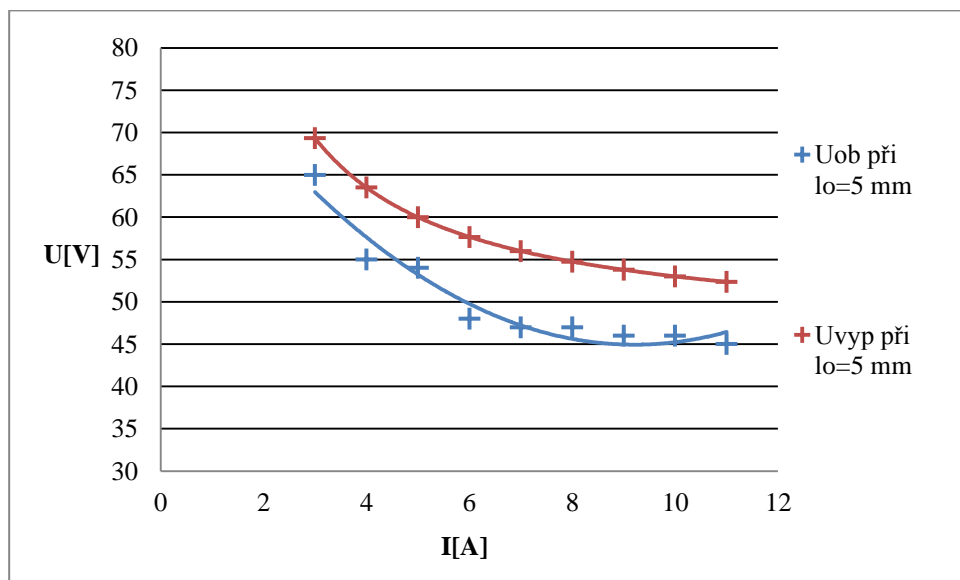
Příloha B: Grafy z měření statických V-A charakteristik při $I_{OB} = \text{konst.}$

Příloha C: Výkres nástavce na ventilátor.

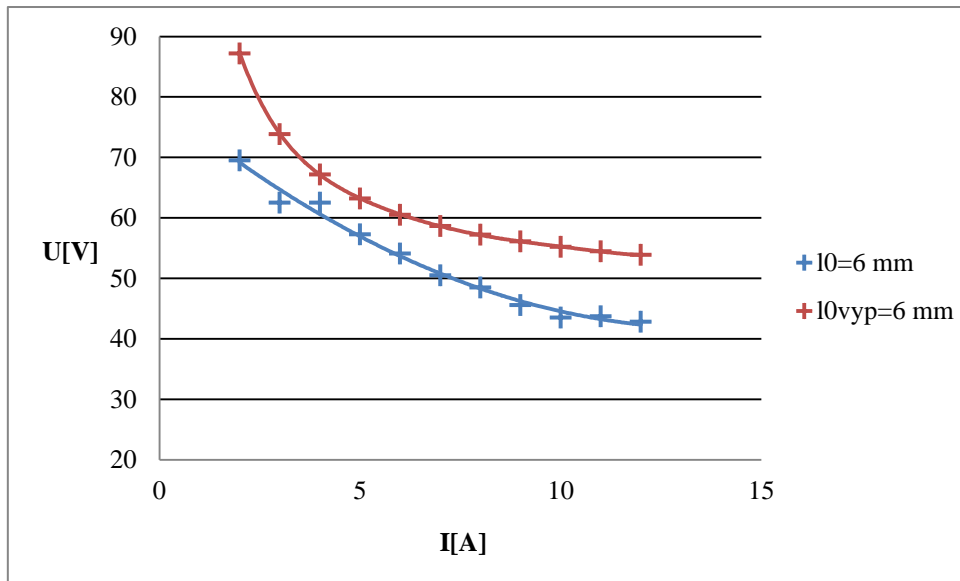
Příloha A: Grafy z měření statických V-A charakteristik při $l_0 = \text{konst.}$



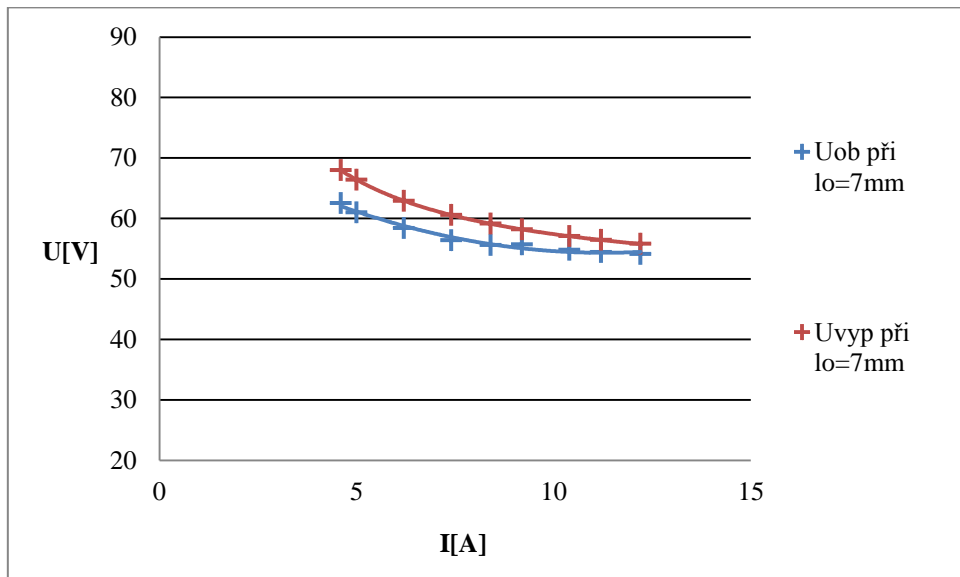
A 1 Změřená a vypočtená statická V-A charakteristika elektrického oblouku při konstantní délce oblouku $l_0 = 4 \text{ mm}$



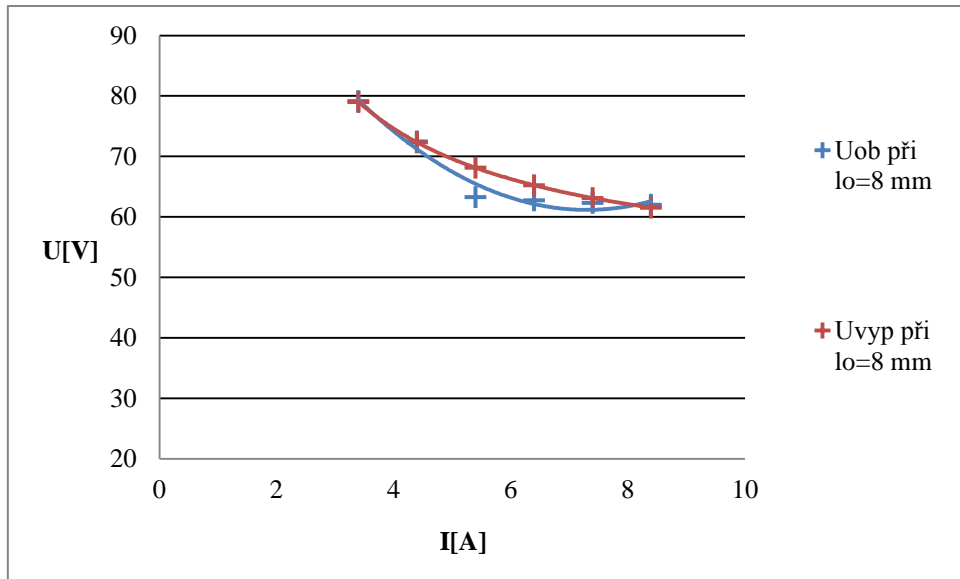
A 2 Změřená a vypočtená statická V-A charakteristika elektrického oblouku při konstantní délce oblouku $l_0 = 5 \text{ mm}$



A 3 Změřená a vypočtená statická V - A charakteristika elektrického oblouku při konstantní délce oblouku $l_0 = 6 \text{ mm}$

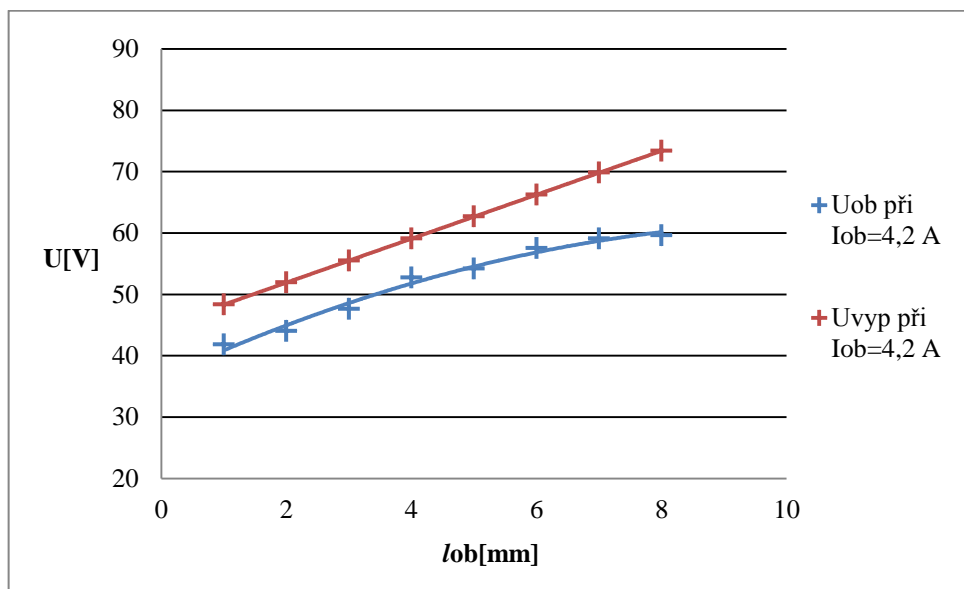


A 4 Změřená a vypočtená statická V - A charakteristika elektrického oblouku při konstantní délce oblouku $l_0 = 7 \text{ mm}$

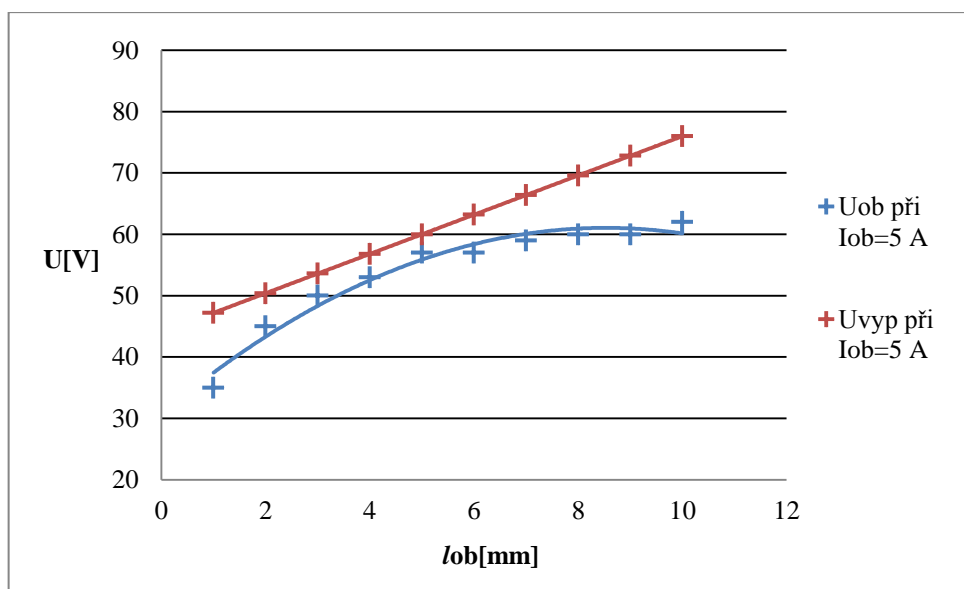


A 5 Změřená a vypočtená statická V - A charakteristika elektrického oblouku při konstantní délce oblouku $l_0 = 8 \text{ mm}$

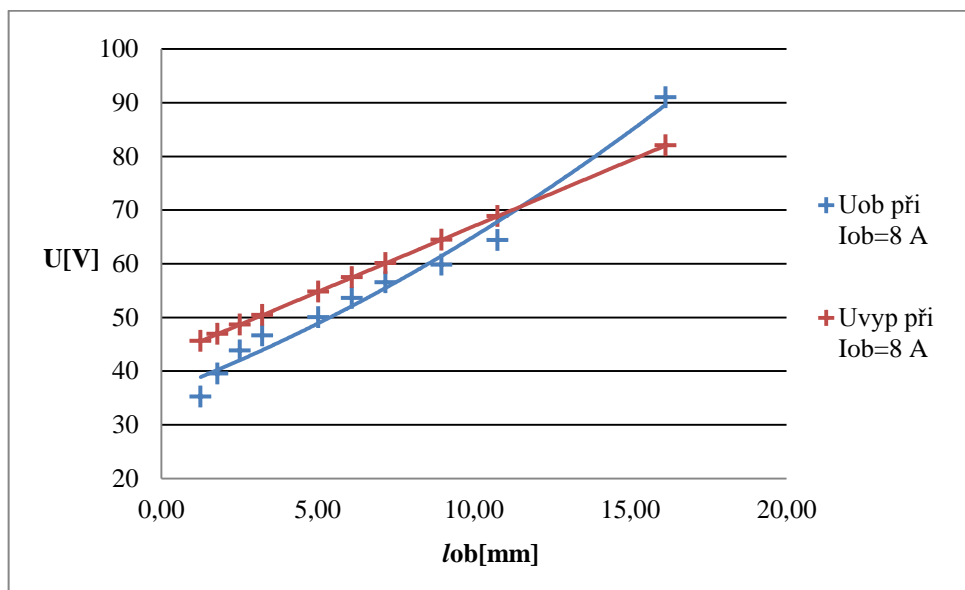
Příloha B: Grafy z měření statických V-A charakteristik při $I_{OB}=\text{konst.}$



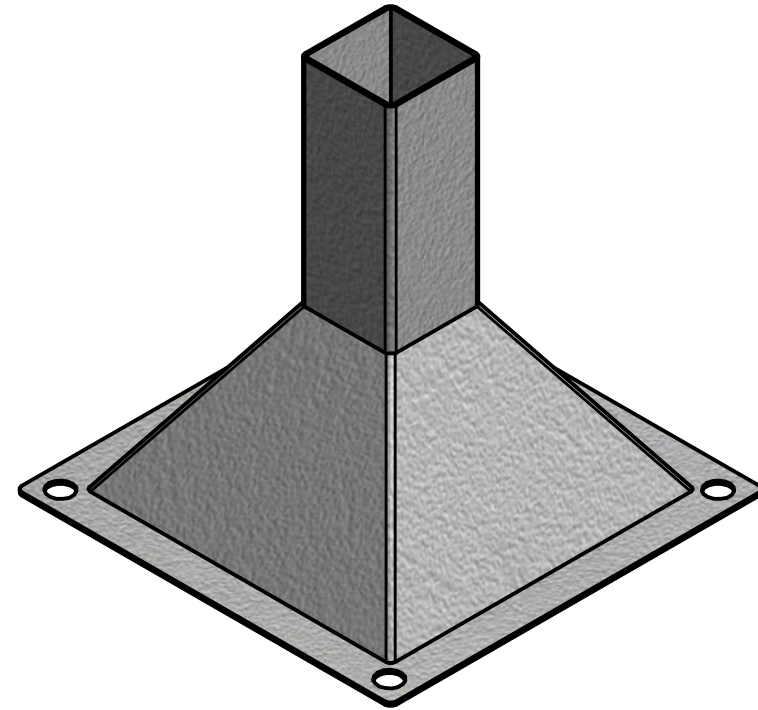
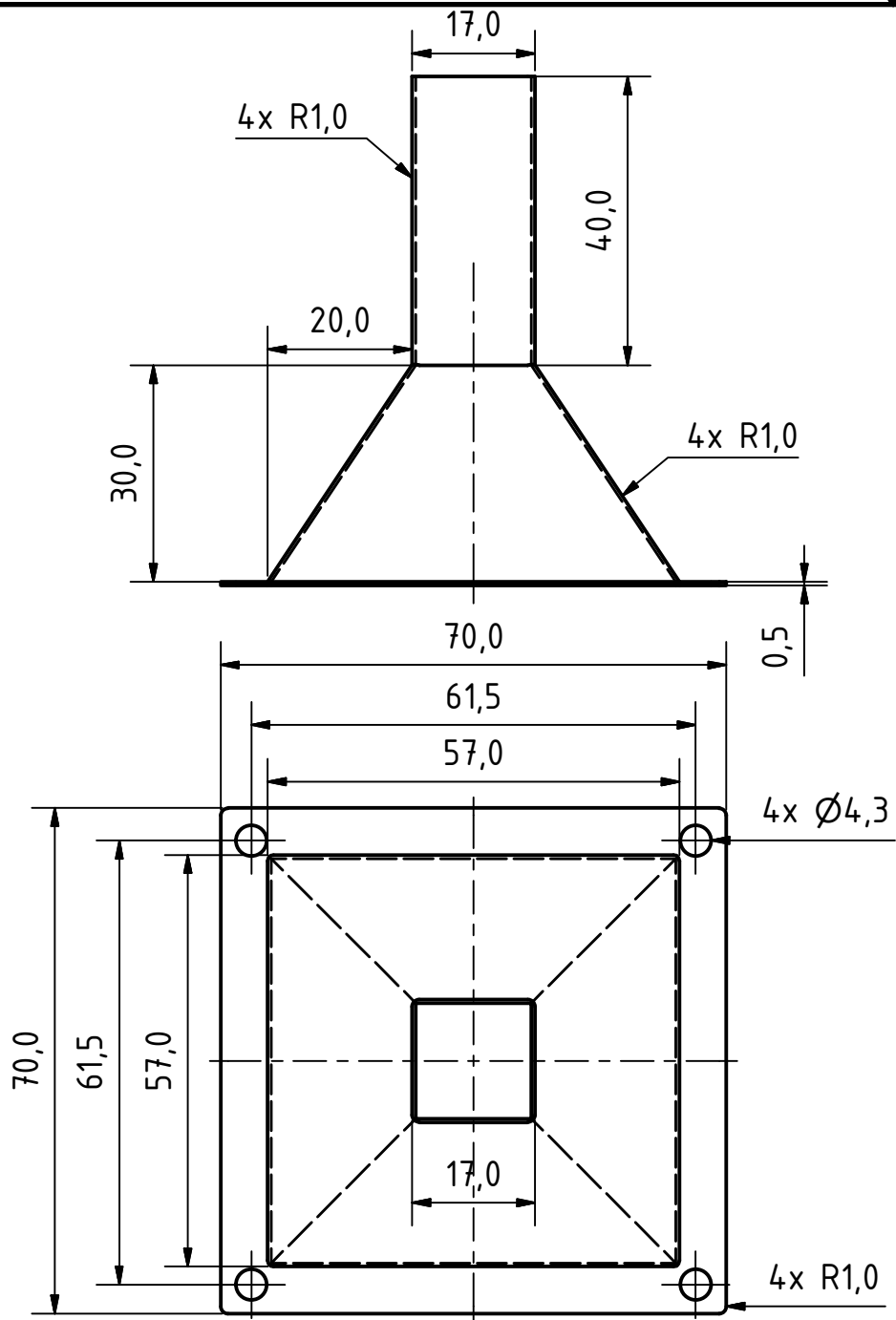
B 1 Změřená a vypočtená statická V-A charakteristika elektrického oblouku při konstantním proudu $I_{ob}=4,2 \text{ A}$



B 2 Změřená a vypočtená statická V-A charakteristika elektrického oblouku při konstantním proudu $I_{ob}=5 \text{ A}$



B 3 Změřená a vypočtená statická V - A charakteristika elektrického oblouku při konstantním proudu $I_{ob} = 8 \text{ A}$



Nástavec na ventilátor		
FEKT VUT v Brně	Meritko 1:1	
Datum	18.5.2014	ID 146 034 Příloha C
Jméno	Ladislav Karásek	
Tloušťka plechu	0,5 mm	