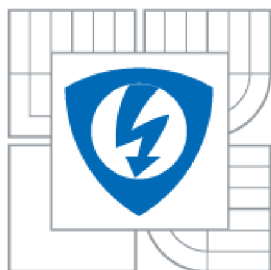




**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ**

**ÚSTAV SILNOPROUDÁ ELEKTROTECHNIKA A VÝKONOVÁ  
ELEKTROTIKA**

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

# **ELEKTRICKÝ OBLOUK VE SPÍNACÍCH PŘÍSTROJÍCH**

ELECTRIC ARC IN THE SWITCHGEAR

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

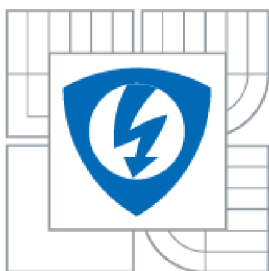
**ONDŘEJ KUTAL**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**DOC. ING. BOHUSLAV BUŠOV, CSC.**

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor  
Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika

**Student:** Ondřej Kutal

**Ročník:** 3

**ID:** 134538

**Akademický rok:** 2014/15

**NÁZEV TÉMATU:**

## Elektrický oblouk ve spínacích přístrojích

**POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

1. Seznamte se s literaturou věnovanou spínacímu oblouku v elektrických přístrojích.
2. Popište četné vlivy působící na oblouk ve spínacích přístrojích.
3. Navrhněte rozšíření diagnostiky oblouku v laboratorních podmínkách.

**DOPORUČENÁ LITERATURA:**

Dle doporučení vedoucího

**Termín zadání:** 22.9.2014

**Termín odevzdání:** 2.6.2015

**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 části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

## **Abstrakt**

Tato práce se zaměřuje na popis vzniku, vlastností a chování elektrického oblouku v elektrických přístrojích. Dále se zaměřuje na to, jakým způsobem vzniká elektrický oblouk a jaký má vliv na kontakty elektrického přístroje. Elektrický oblouk se dělí na elektrický oblouk napájený se stejnosměrným nebo střídavým elektrickým proudem. Zhášení elektrického oblouku napájeného stejnosměrným proudem je obtížnější než při napájení střídavým proudem, protože stejnosměrný proud neprochází nulovou hodnotou. Pro návrh zhasací komory je důležité znát vlastnosti elektrického oblouku napájeného stejnosměrným a střídavým proudem. Chování statické V-A charakteristiky elektrického oblouku napájeného stejnosměrným proudem bylo stanoveno experimentálně pomocí rovnice Ayrtonové. Následně byla proměřena dynamická charakteristika elektrického oblouku napájený střídavým proudem s cílem proměřit mezní hodnoty vzniku oblouku a popsat četné vlivy působící na oblouk. Závěrem byla data zhodnocena a podány návrhy pro rozšíření měřených úloh a diagnostiky oblouku v laboratorních podmínkách.

## **Abstract**

This thesis focuses on description of creation, properties and behavior of an electric arc in the switchgear. In addition, it focuses on description how an electric arc can be created and how it effects contacts in electrical switchgear. Electric arcs is divided into arc with DC or AC. Quenching of the electric arc supplied by DC is more difficult than in case of AC since the DC does not pass through zero value. For the design of quenching chamber it is important to know the characteristics of the electric arc under both conditions. The behavior of static V-A characteristic of the electric arc supplied by DC was determined with experimental measurements using the equation by Ayrton. Subsequently, measurement of the dynamic characteristics of the electric arc with AC were determined. And the limits values for the emergence of electric arc were measured of. Last, the results wereevaluated and expansion of measurement task was proposed. The numerous influences on the arc were described. In conclusion the thesis extends diagnostic of the arc under the laboratory conditions.

## **Klíčová slova**

Elektrický oblouk; statická V-A charakteristika oblouku; dynamická charakteristika oblouku; zhášení elektrického oblouku; diagnostika plazmatu.

## **Keywords**

Electric arc; static V-A characteristic; dynamic characteristics arc; extinction electric arc; diagnostic of plasma.



## **Bibliografická citace**

KUTAL, O. *Elektrický oblouk ve spínacích přístrojích*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015. 54 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Bohuslav Bušov, CSc.

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Elektrický oblouk ve spínacích 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.

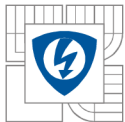
V Brně dne .....

Podpis autora .....



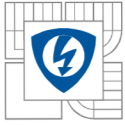
## Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	8
SEZNAM TABULEK .....	9
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	10
1 ÚVOD.....	12
2 ELEKTRICKÝ OBLOUK .....	13
3 VZNIK OBLOUKU VE SPÍNACÍCH PŘÍSTROJÍCH .....	13
4 CHARAKTERISTIKY OBLOUKU.....	14
4.1 STATICKÁ VOLTAMPÉROVÁ CHARAKTERISTIKA.....	14
4.2 DYNAMICKÁ CHARAKTERISTIKA OBLOUKU .....	16
5 ZHÁŠENÍ ELEKTRICKÉHO OBLOUKU V OBVODECH .....	18
5.1 ZHAŠENÍ OBLOUKU V OBVODECH STEJNOSMĚRNÉHO PROUDU.....	18
5.2 ZHÁŠENÍ OBLOUKU V OBVODECH STŘÍDAVÉHO PROUDU.....	22
6 MĚŘENÍ A ZKOUMÁNÍ V-A CHARAKTERISTIKY ELEKTRICKÉHO OBLOUKU NAPÁJENÉHO STEJNOSMĚRNÝM PROUDEM .....	26
6.1 MĚŘENÍ V-A CHARAKTERISTIKY ELEKTRICKÉHO OBLOUKU V ZÁVISLOSTI NA ELEKTRICKÉM PROUDU PŘI KONSTANTNÍ DÉLCE .....	27
6.2 MĚŘENÍ V-A CHARAKTERISTIKY ELEKTRICKÉHO OBLOUKU V ZÁVISLOSTI NA DÉLCE ELEKTRICKÉHO OBLOUKU PŘI KONSTANTNÍM ELEKTRICKÉM PROUDU .....	33
6.3 MEZNÍ KŘIVKY ELEKTRICKÉHO OBLOUKU.....	36
6.4 ZHODNOCENÍ MĚŘENÍ A VÝPOČTY V-A CHARAKTERISTIKY ELEKTRICKÉHO OBLOUKU NAPÁJENÉHO STEJNOSMĚRNÝM ELEKTRICKÝM PROUDEM.....	37
7 MĚŘENÍ A ZKOUMÁNÍ DYNAMICKÉ CHARAKTERISTIKY ELEKTRICKÉHO OBLOUKU NAPÁJENÉHO STŘÍDAVÝM PROUDEM.....	38
7.1 PŘEDPOKLADY O ZMĚNÁCH PŮSOBÍCÍCH NA OBLOUK A CHOVÁNÍ JEHO DYNAMICKÉ CHARAKTERISTIKY .....	39
7.2 MĚŘENÍ DYNAMICKÉ CHARAKTERISTIKY ELEKTRICKÉHO OBLOUKU NAPÁJENÉHO STŘÍDAVÝM PROUDEM.....	41
7.3 ZHODNOCENÍ MĚŘENÍ A VÝPOČTY DYNAMICKÉ CHARAKTERISTIKY ELEKTRICKÉHO OBLOUKU NAPÁJENÉHO STŘÍDAVÝM ELEKTRICKÝM PROUDEM.....	42
8 STABILITA ELEKTRICKÉHO OBLOUKU.....	43
8.1 STABILIZACE OBLOUKU STĚNOU .....	43
8.2 STABILIZACE OBLOUKU KONVEKČÍ.....	43
9 KONTAKTNÍ METODY PRO URČENÍ TEPLoty PLAZMATU .....	44
9.1 SONDOVÉ METODY.....	44
9.1.1 SONDA S VYSOKOTEPLOTNÍMI TERMOČLÁNKY .....	46
9.2 VYSOKOFREKVENČNÍ (MIKROVLNNÉ) METODY .....	48



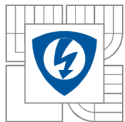
---

<b>10 BEZKONTAKTNÍ .....</b>	<b>49</b>
<b>10.1 OPTICKÉ METODY .....</b>	<b>49</b>
<b>10.2 VYSOKOFREKVENČNÍ (MIKROVLNNÉ) METODY .....</b>	<b>49</b>
<b>10.3 STANOVENÍ TEPLoty NEUTRÁLNÍHO PLYNU Z INTENZITY SPEKTRÁLNÍCH ČAR .....</b>	<b>49</b>
<b>10.4 STANOVENÍ TEPLoty NEUTRÁLNÍHO PLYNU Z ROZŠÍŘENÍ SPEKTRÁLNÍCH ČAR .....</b>	<b>50</b>
<b>11 NÁVRHY PRO ROZŠÍŘENÍ LABORATORNÍ ÚLOHY .....</b>	<b>50</b>
<b>12 NÁVRH PRO ZVÝŠENÍ BEZPEČNOSTI LABORATORNÍCH ÚLOH.....</b>	<b>51</b>
<b>13 ZÁVĚR.....</b>	<b>52</b>
<b>LITERATURA .....</b>	<b>54</b>



## SEZNAM OBRÁZKŮ

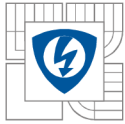
<i>Obrázek 1: Teplota jádra elektrického oblouku [1].....</i>	<i>13</i>
<i>Obrázek 2: Statická V-A charakteristika [1].....</i>	<i>14</i>
<i>Obrázek 3: Stejnoseměrný obvod s odporem v sérii [1].....</i>	<i>15</i>
<i>Obrázek 4: Statická V-A charakteristika s body stability hoření [1].....</i>	<i>16</i>
<i>Obrázek 5: Obvod s dvěma odpory v sérii s elektrickým obloukem [1].....</i>	<i>17</i>
<i>Obrázek 6: V-A charakteristika dynamického oblouku z bodu A do bodu B a naopak [1].....</i>	<i>17</i>
<i>Obrázek 7: V-A charakteristika střídavého proudu [1].....</i>	<i>18</i>
<i>Obrázek 8: Obvod s R, L, C prvky při stejnosměrném oblouku [1].....</i>	<i>18</i>
<i>Obrázek 9: V-A charakteristika ve stabilním bodě A [1].....</i>	<i>19</i>
<i>Obrázek 10: V-A charakteristika bez stabilního bodu hoření [1].....</i>	<i>20</i>
<i>Obrázek 11: Průběh napětí a proudu při rozpojení kontaktu [1].....</i>	<i>21</i>
<i>Obrázek 12: Schéma střídavého obvodu [1].....</i>	<i>23</i>
<i>Obrázek 13: Průběh změny napětí na oblouku [1].....</i>	<i>23</i>
<i>Obrázek 14: Průběh proudu nulou v bodě 1, 2 a 3 [1].....</i>	<i>24</i>
<i>Obrázek 15: Průběh elektrické pevnosti a zotavovací napětí [1].....</i>	<i>25</i>
<i>Obrázek 16: Průběh proudu a napětí oblouku v nn obvodu [1].....</i>	<i>25</i>
<i>Obrázek 17: V-A charakteristika s pásmem neklidu.....</i>	<i>26</i>
<i>Obrázek 18: Schéma zapojení obvodu pro měření V-A charakteristiky elektrického oblouku.....</i>	<i>27</i>
<i>Obrázek 19: Zařízení pro měření elektrického oblouku.....</i>	<i>28</i>
<i>Obrázek 20: Katodová a anodová skvrna.....</i>	<i>29</i>
<i>Obrázek 21: Graf V-A charakteristiky elektrického oblouku stejnosměrným proudem při konstantní délce.....</i>	<i>32</i>
<i>Obrázek 22: Graf Závislost napětí elektrického oblouku na délce oblouku při konstantním proudu.....</i>	<i>35</i>
<i>Obrázek 23: Mezní křivky elektrického oblouku [5].....</i>	<i>36</i>
<i>Obrázek 24: Dynamická charakteristika elektrického oblouku.....</i>	<i>39</i>
<i>Obrázek 25: Schéma zapojení elektrického oblouku napájeného střídavým proudem.....</i>	<i>41</i>
<i>Obrázek 26: Dynamická charakteristika elektrického oblouku.....</i>	<i>42</i>
<i>Obrázek 27: Měřicí sonda [6].....</i>	<i>44</i>
<i>Obrázek 28: Sondová charakteristika rovinné sondy [6].....</i>	<i>45</i>
<i>Obrázek 29: Sonda s vysokoteplotními termočlánky [6].....</i>	<i>47</i>



---

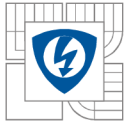
## SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 1</i> Konstanty Ayrtonové pro různé elektrody [3].....	27
<i>Tabulka 2</i> Naměřené a vypočtené hodnoty $V$ - $A$ charakteristiky při konstantní délce.....	30
<i>Tabulka 3</i> Naměřené a vypočtené hodnoty elektrického oblouku při konstantním elektrickém proudu .....	34
<i>Tabulka 4</i> Mezní křivky elektrického oblouku .....	37
<i>Tabulka 5</i> odečtené hodnoty dynamické charakteristiky.....	41
<i>Tabulka 6</i> Termoelektrická napětí některých termoelektrických dvojic platinové řady [9] .....	48



## SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

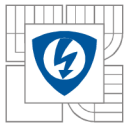
$A$ – oblast stabilního hoření	[-]
$A_s$ – plocha	[m <sup>2</sup> ]
$A_{nm}$ – Einsteinův koeficient pravděpodobnosti	[-]
$B$ – oblast labilního hoření	[-]
$C$ – kapacita	[F]
$D$ – průměr sondy	[m]
$d_0$ – skutečný průměr elektrody	[m]
$d_l$ – průměr obrazu elektrody	[m]
$E$ – intenzita elektrického pole	[Vm <sup>-1</sup> ]
$E_n$ – excitační energie hladiny	[eV]
$f_0$ – kmitočet zotaveného napětí	[Hz]
$g_m$ – statická váha horního stavu přechodu	[kg]
$h$ – Planckova konstanta	[Js]
$I_0$ – proud protékající obvodem	[A]
$I_{OB}$ – proud oblouku	[A]
$I_s$ – proud sondy	[A]
$i_{ZB}$ – proud mezikontaktního prostoru	[A]
$k$ – Boltzmannova konstanta	[JK <sup>-1</sup> ]
$K$ – zvětšení objektivu	[-]
$l$ – délka oblouku	[m]
$l_0$ – skutečná délka oblouku	[m]
$l_l$ – délka obrazu oblouku	[m]
$L$ – indukce	[H]
$m_e$ – hmotnost elektronu	[kg]
$n$ – počet atomů	[-]
$n_e$ – počet elektronů	[-]
$n_i$ – počet iontů	[-]
$P_{OB}$ – výkon na oblouku	[W]
$R$ – odpor	[Ω]
$t$ – čas	[s]



---

$T$ – perioda	[s]
$T_e$ – teplota	[K]
$U_A$ – úbytek napětí na anodě	[V]
$U_k$ – napětí na kontaktech	[V]
$U_K$ – úbytek napětí na katodě	[V]
$U_{max}$ – maximální napětí	[V]
$U_{OB}$ – napětí oblouku	[V]
$U_{OBN}$ – obnovené napětí	[V]
$U_p$ – součin intenzity	[V]
$U_{p1}$ a $U_{p2}$ – energetická pevnost mezikontaktního prostoru	[V]
$U_R$ – úbytek napětí na odporu obvodu	[V]
$U_z$ – napětí zdroje	[V]
$U_{zap}$ – zapalovací špička	[V]
$U_{zh}$ – zhášecí napětí	[V]
$U_{ZM}$ – špička zotaveného napětí	[V]
$U_{zot}$ – zotavené napětí	[V]
$\nu_{nm}$ – frekvence spektrálního přechodu	[Hz]
$W_B$ – energie v indukčnosti	[J]
$W_{OB}$ – energie na oblouku	[J]
$Z$ – stavový součet	[-]
$\chi$ – stabilita oblouku	[-]
$\alpha(T_i)$ – součinitel přestupu tepla	[Wm <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> ]
$\alpha$ – konstanty Ayrtonové	[V]
$\beta$ – konstanty Ayrtonové	[V/m]
$\gamma$ – konstanta Ayrtonové	[W]
$\delta$ – konstanty Ayrtonové	[W/m]
$\varepsilon$ – emisivita	[-]
$\sigma$ – Stephans-Boltzmannova konstanta	[Wm <sup>-2</sup> K <sup>-4</sup> ]
$\lambda$ – vlnová délka	[m]
$\lambda(T_i)$ – tepelná vodivost	[Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]
$\tau$ – časová konstanta	[s]
$\mu$ – hmotnost emitující částice	[kg]





# 1 ÚVOD

Při vypínacím pochodu elektrického přístroje je potřeba zajistit rychlé a úplné uhašení elektrického oblouku. U spínacího přístroje dochází nejdříve k oddálení kontaktů. Poté dojde k zapálení elektrického oblouku, který má velmi vysokou teplotu. Jelikož kontakty nesnesou trvalé působení takovýchto teplot, je důležité co nejdříve převést elektrický oblouk z prostor kontaktních stykových ploch do zhašecí komory. Zhašecí komory jsou navrhovány tak, aby byly schopny tento oblouk uhasit. V okamžiku kdy je elektrický oblouk uhašen, obnovuje se elektrická pevnost v mezikontaktním prostoru. Pokud je elektrická pevnost v každém okamžiku vyšší než hodnota zotaveného napětí mezi kontakty, dojde k úspěšnému uhašení.

V bakalářské práci bude popsán elektrický oblouk, jeho vznik a chování se stejnosměrným a střídavým elektrickým proudem. Další část bude věnována metodám zhašení elektrického oblouku. Následuje proměření dynamické charakteristiky elektrického oblouku a určení vlivů na souměrnosti této charakteristiky.

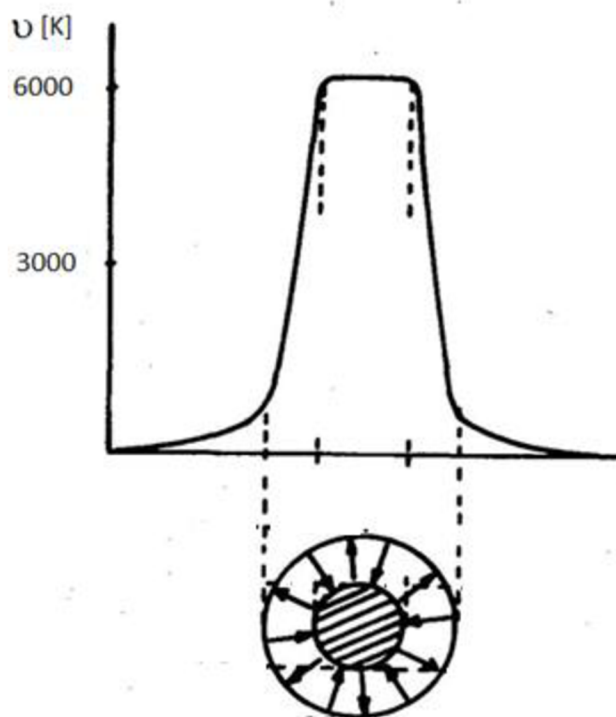
Paní Ayrtonová experimentálním měřením zkoumala vlastnosti krátkého elektrického oblouku napájeného s malým stejnosměrným proudem. Tímto měřením určila rovnici s konstantami, které závisí na druhu tvaru a materiálu elektrod, druhu a tlaku prostředí, ve kterém se elektrický oblouk nachází.

V laboratoři se budou zkoumat vlivy působící na elektrický oblouk a následně porovnávat s teoretickými předpoklady, které byly před měřením stanoveny. Poté budou stanoveny nové návrhy pro rozšíření laboratorní úlohy.

Na závěr se navrhne několik diagnostik plazmatu, které by se daly použít v laboratoři.

## 2 ELEKTRICKÝ OBLOUK

Elektrický oblouk je zářící elektrický výboj v tenkém sloupci. Elektrický oblouk je pohyblivý vlivem magnetických polí a prostředí, ve kterém hoří. Jádrem elektrického oblouku tvoří ionizovaný plyn, toto jádro přenáší elektrický proud. Proudová hustota závisí na velikosti proudu, což může být až několik tisíc ampér na centimetr čtverečný. Jádro oblouku má vysokou teplotu. Teplota jádra oblouku v normálním prostředí chlazeném vzduchem má 6000 K. Jádra velmi intenzivně chlazených oblouků mívají teplotu až 30000 K. Jádro oblouku má po celém průřezu téměř konstantní teplotu. Kolem jádra je obal žhavých plynů. Obal jádra vykazuje velký teplotní spád, což má velký význam pro chlazení oblouku. Vyměňuje se zde teplo mezi obloukem a okolním plynem. Teplo se dopravuje z oblouku do okolí vedením tepla. [2]



Obrázek 1: Teplota jádra elektrického oblouku [1]

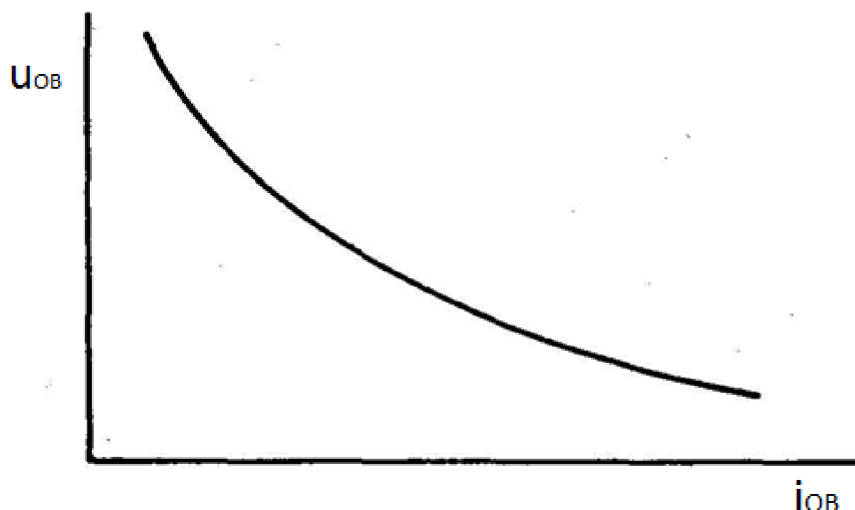
## 3 VZNIK OBLOUKU VE SPÍNACÍCH PŘÍSTROJÍCH

Oblouk vzniká při rozpojování kontaktů. Kontakty jsou v zapnutém stavu přitlačovány na sebe kontaktní silou, která částečně deformuje materiál na stykové ploše. Proud prochází mikroskopickými úžinami, ve kterých existuje tzv. úžinový odpor. V okamžiku vypínání se kontaktní tlak zmenšuje, stykové plošky (úžiny) se zmenšují, až dojde k přerušení posledního styku mezi kontakty. V posledním okamžiku styku vzroste teplota natolik, že se kov odpaří. Magnetická energie nahromaděná v indukčnostech obvodu způsobí přepětí, které prorazí malou vzdálenost mezi kontakty, kde se nacházejí páry kovu, ty vlivem přepětí ionizují, vznikne vodivé prostředí a tak vznikne oblouk mezi kontakty. Oblouk nevzniká vždy, jen pokud hodnoty proudu nebo napětí převýší kritické hodnoty, které závisí na faktorech: materiál kontaktu, parametry obvodu, vlastnosti prostředí atd. Vznik oblouku vede k přenosu materiálu kontaktu, což zkracuje životnost kontaktů a tím i přístroje. Na velikosti proudu a době hoření oblouku závisí velikost

přenosu kontaktního materiálu. Při vypínání stejnosměrného proudu se velká část elektromagnetické energie ve vypínaném obvodu mění v teplo oblouku, které se odvádí do okolí. U střídavého proudu slouží oblouk jako prostředek k dovedení zhášecího procesu do blízkosti nuly proudu.

## 4 CHARAKTERISTIKY OBLOUKU

### 4.1 Statická voltampérová charakteristika



Obrázek 2: Statická V-A charakteristika [1]

Závislost  $u_{OB} = f(i_{OB})$  pro konstantní délku oblouku, kde  $u_{OB}$  je napětí oblouku,  $i_{OB}$  proud oblouku. Z hodnot  $u$ ,  $i$  lze zjistit odpor oblouku  $R = \frac{u_{OB}}{i_{OB}}$ , který má činný odpor. Se vzrůstajícím proudem klesá činný odpor na rozdíl od odporu kovového vodiče. Proto je závislost obloukového napětí na proudu obloukem nelineární, napětí s velikostí proudu klesá. [1]

Experimentálně zkoumala voltampérové charakteristiky p. Ayrtonová, která vyjádřila statickou charakteristiku oblouku v oblasti klidného hoření rovnicí hyperboly ve tvaru

$$U_{OB} = \alpha + \beta \cdot l + \frac{\delta}{I_{OB}} \quad [V; V, Vm^{-1}, W, m, Wm^{-1}, A] \quad (4.1)$$

Konstanty  $\alpha$  [V],  $\beta$  [V/m],  $\gamma$  [W],  $\delta$  [W/m], jsou závislé na druhu a tlaku prostředí, ve kterém oblouk hoří, a dále na rozměrech, tvaru a materiálu elektrod. Rovnice platí pro krátké oblouky a malé proudy. Krátkým obloukem se rozumí, když je délka oblouku menší než průměr oblouku. [2]

Napětí na oblouku bude

$$U_{OB} = U_K + U_A + U_P \quad [V; V, V, V] \quad (4.2)$$

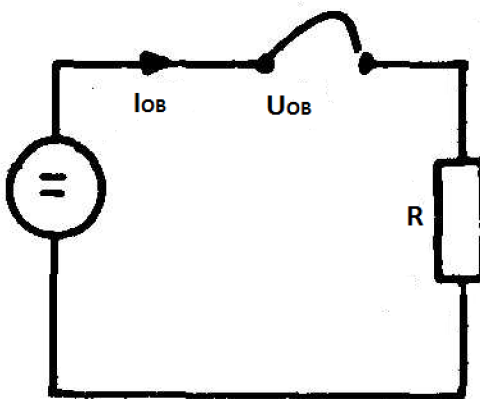
kde  $U_K$  - úbytek napětí na katodě,  $U_A$  - úbytek napětí na anodě a  $U_P$  - součin intenzity elektrického pole a délky trupu

$$U_p = E \cdot I \quad [V; Vm^{-1}, m] \quad (4.3)$$

Výkon na oblouku je dán součinem napětím na oblouku a proudem, který jím protéká, a platí:

$$P_a = U_{OB} \cdot I_{OB} \quad [W; V, A] \quad (4.4)$$

Celý tento výkon se musí odvést z oblouku chlazením. Z toho plyne, čím větší  $P_a$ , tím se při daném vypínaném proudu nastaví na oblouku vyšší obloukové napětí.[1]



Obrázek 3: Stejnoseměrný obvod s odporem v sérii [1]

Pro jistý druh chlazení oblouku dostaneme voltampérovou charakteristiku dle obr. 4. Na obr. 3 je zapojen odpor  $R$  do série s obloukem. Proud tekoucí obvodem přes odpor  $R$  generuje úbytek napětí  $I_{OB} \cdot R$ , který je v diagramu přímkou skloněnou pod úhlem  $\alpha$ ; kde  $\operatorname{tg} \alpha \approx R$ . Odečtením úbytku od napětí zdroje  $U_z$  vznikne tzv. rozdílová přímka  $U_z - I_{OB} \cdot R$ . Napětí na oblouku je dáno charakteristikou  $U_{OB} = f(I_{OB})$ , která je závislá na způsobu chlazení oblouku. Je-li  $I_{OB} = I_1$ , má zdroj přebytek napětí, proud se musí zvětšovat. Pokud  $I_{OB} = I_2$ , zdroj má nedostatek napětí a proud se musí zmenšovat. [1]

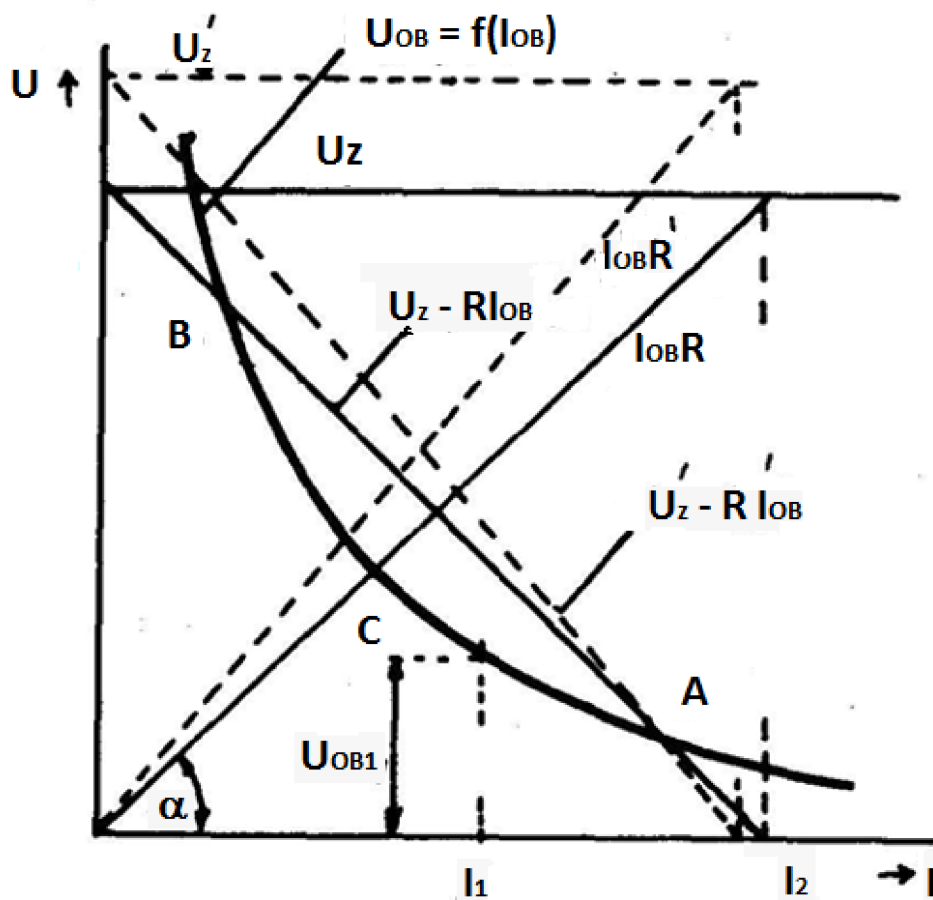
Z přebytku napětí zdroje (vlevo od bodu A) a z nedostatku napětí zdroje (vpravo od bodu A) vyplývá, že v bodě A bude oblouk hořet stabilně. Pro průsečík A platí  $U_{OB} = U_z - RI_{OB}$ . V bodě B platí opět  $U_{OB} = U_z - RI_{OB}$ , ovšem zde hoří oblouk labilně. Stabilitu hoření oblouku lze vyjádřit:

$$\chi = \frac{\frac{d(U_z - U_R)}{dI_{OB}}}{\frac{dU_{OB}}{dI_{OB}}} = \frac{d(U_z - U_R)}{dU_{OB}} \quad [-; V, A] \quad (4.5)$$

V bodě C se nachází hoření oblouku na mezi stability. Pokud  $\chi > 1$ , hoří stabilně, pokud  $\chi < 1$ , hoří nestabilně. Hodnotu  $\chi$  můžeme zvětšit, zvýšíme-li napětí zdroje a současně zvětšíme předřadný odpor, přímka  $U'_Z - I_{OB}R'$  bude mít strmější záporný sklon a  $\chi$  se zvětší [1]

Aby oblouk nehořel stabilně, můžeme zajistit podmínkami:

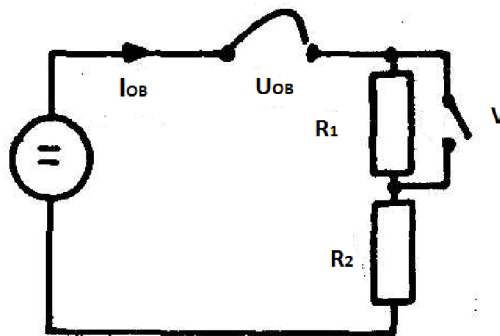
- Posunutím charakteristiky V-A oblouku k vyšším napětím (prodloužení oblouku)
- Zvětšením odporu oblouku R
- Snížením napětí zdroje



Obrázek 4: Statická V-A charakteristika s body stability hoření [1]

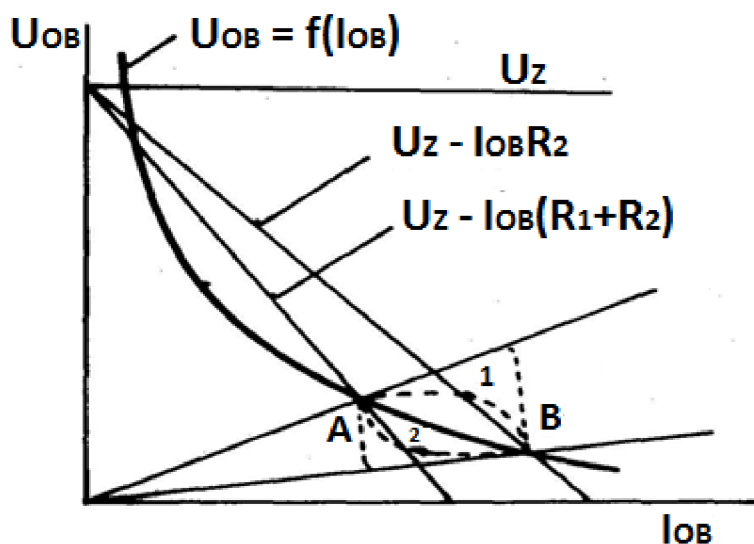
## 4.2 Dynamická charakteristika oblouku

Proud protéká přes odpory  $R_1$  a  $R_2$  zapojené do série na obr. 5, oblouk hoří v bodě A. Zkratujeme-li odpor  $R_1$ , proud oblouku se nastaví do bodu B. Přechod se neděje podle křivky  $U_{OB}$ , ale podle křivky 1 (nad charakteristikou oblouku) a 2 (pod charakteristikou oblouku). Tyto přechody (1, 2) jsou způsobeny jistou setrvačností ionizace výbojové dráhy.



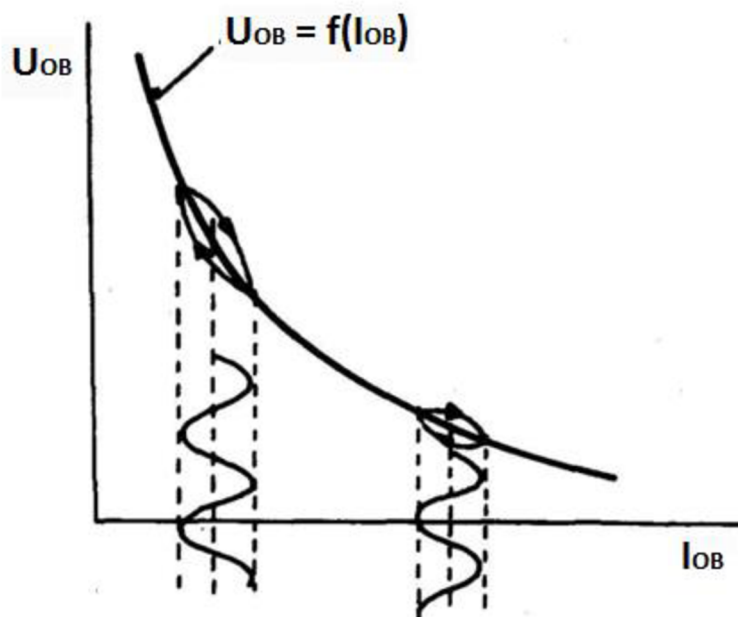
Obrázek 5: Obvod s dvěma odpory v sérii s elektrickým obloukem [1]

Ionizace se zpožďuje za okamžitou hodnotou proudu, který je ve stavu dané velikostí proudu. Náhlé změně hodnoty proudu se ionizace v oblouku přizpůsobí vždy s jistým zpožděním. Při zvýšení hodnoty proudu ionizace a odpor výbojové dráhy odpovídá předchozímu menšímu proudu, což způsobí větší úbytek napětí na oblouku, dynamická charakteristika proto leží nad statickou charakteristikou. Při zmenšení proudu je tomu naopak. [2]



Obrázek 6: V-A charakteristika dynamického oblouku z bodu A do bodu B a naopak [1]

Při zvětšování proudu bude charakteristika nad statickou charakteristikou, při zmenšování bude pod statickou charakteristikou.



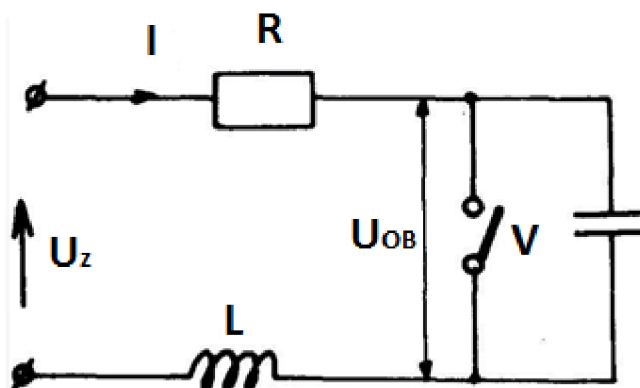
Obrázek 7: V-A charakteristika střídavého proudu [1]

Ve vrcholu proudu obr. 7 dynamické charakteristiky střídavého proudu, odpovídá stejnosměrné složce.

## 5 ZHÁŠENÍ ELEKTRICKÉHO OBLUKU V OBVODECH

### 5.1 Zhašení oblouku v obvodech stejnosměrného proudu

Pro zhašení elektrického oblouku se používají speciální zhašecí komory, které zabezpečují rychlé prodloužení, natažení oblouku, což vede ke zvýšení obloukového napětí.



Obrázek 8: Obvod s R, L, C prvky při stejnosměrném oblouku [1]

V obvodech stejnosměrného proudu, které obsahují indukčnost L, je energie soustředěná právě v indukčnosti,

$$W_m = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2 \quad [J; H, A] \quad (5.1)$$







$$U_z = IR + U_{OB} + L \frac{dI}{dt} \quad [V; A, \Omega, V, H, A, s] \quad (5.4)$$

$$\frac{dI}{dt} = 0$$

při ustáleném stavu

Pro analýzu bude přímka vycházející z bodu  $U_z = U$

$$\text{Přímka } U_z - IR = f(I) \quad [V; A, \Omega,] \quad (5.5)$$

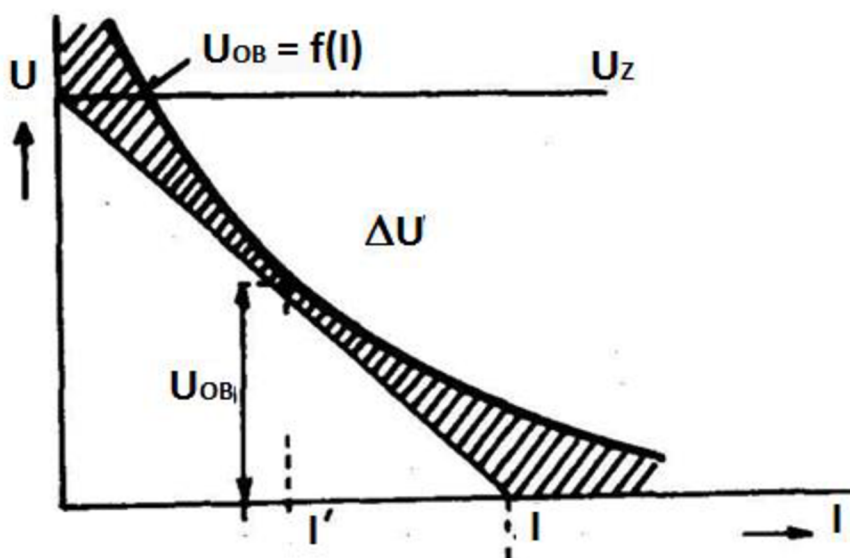
Protíná voltampérovou charakteristiku v bodech A, B. Stabilní hoření je pouze v bodě A.

$\Delta U$  je kompenzována jen na úkor elektromagnetické energie

$$\Delta U = L \cdot \frac{dI}{dt} \quad [V; H, A, s] \quad (5.6)$$

[1]

Z obr. 9 je vidět, že zleva od bodu A je  $\Delta U, \frac{dI}{dt}$  jsou kladné, a zprava naopak záporné



Obrázek 10: V-A charakteristika bez stabilního bodu hoření [1]

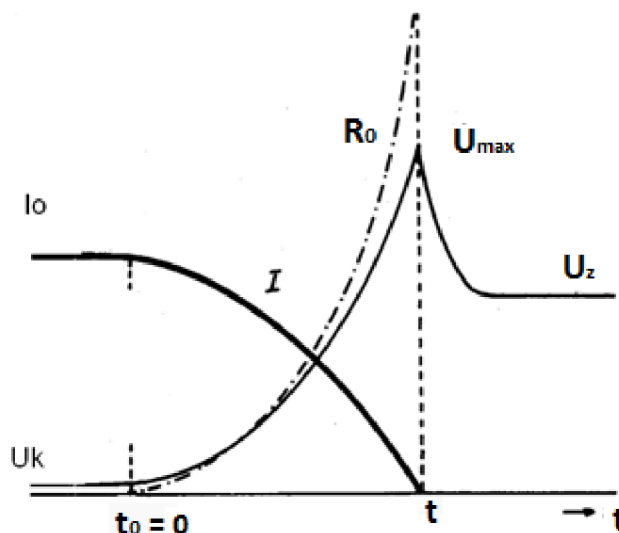
Pro zhašení oblouku po rozpojení kontaktů je potřeba, aby voltampérová charakteristika byla vyšší než vnější charakteristika obvodu daná přímkou  $U_z - IR = f(I)$ . Pokud nevznikne průsečík těchto křivek, nevznikne bod A, proud v obvodu se bude zmenšovat do nuly, dle rovnice:

$$U_z = IR + U_{OB} - \Delta U \quad [V; A, \Omega, V, V] \quad (5.7)$$

Když je  $\frac{dI}{dt}$  záporné, můžeme vyjádřit čas  $t$  zmenšování proudu do nuly z rovnice:

$$\Delta U = L \cdot \frac{dI}{dt} \Rightarrow t = L \int_I^0 \frac{dI}{\Delta U} \quad [\text{V}; \text{H}, \text{A}, \text{s}] \quad (5.8)$$

[1]



Obrázek 11: Průběh napětí a proudu při rozpojení kontaktu [1]

V čase  $t_0$  obr. 11, do rozpojení kontaktů protéká obvodem proud  $I_0$ . Napětí na kontaktech vypínače je  $U_k$ . Od času  $t_0$  se odpor oblouku  $R_0$  zvětšuje, proud klesá na nulu. Napětí mezi kontakty dosáhne hodnoty  $U_{max}$ , protože při rozpojení kontaktu začne protékat proud i přes kondenzátor, který se začne nabíjet, kde vzniká napětí podle rovnice (5.3). Vlivem svodu zbytkové vodivosti se napětí sníží na hodnotu  $U_z$ . Rovnice napětí oblouku z rovnováhy napětí [1]:

$$U_{OB} = (U_z - IR) - L \frac{dI}{dt} \quad [\text{V}; \text{V}, \text{A}, \Omega, \text{H}] \quad (5.10)$$

Kde  $\frac{dI}{dt}$  s klesajícím proudem je záporné a podmínka pro klesající proud je:

$$\frac{dI}{dt} = \frac{(U_z - RI) - U_{OB}}{L} \Rightarrow \underline{U_{OB} > U_z - IR} \quad [\text{V}; \Omega, \text{A}, \text{H}, \text{V}] \quad (5.11)$$

Jelikož se jedná o dlouhý oblouk, můžeme zvětšovat délku oblouku, aby neměl žádný průsečík s charakteristikou obvodu. Rychlost klesání proudu v obvodu může vzrůstat s klesáním indukčnosti, dynamické charakteristiky a přepětí bude též malé. Indukčnost obvodu má vliv na přepětí, tedy s rostoucí indukčností roste přepětí.

## 5.2 Zhášení oblouku v obvodech střídavého proudu

Zhášení střídavého oblouku je lehčí než zhášení stejnosměrného. U stejnosměrného oblouku se musí proud přivést do nuly nepřetržitým zvyšováním odporu dráhy. Střídavý proud prochází každou půlperiodu nulou, ale je nutné vytvořit podmínky v mezikontaktním prostoru, aby se proud v obvodu opět neobnovil.

Z hlediska zhášení mohou nastat tři případy:

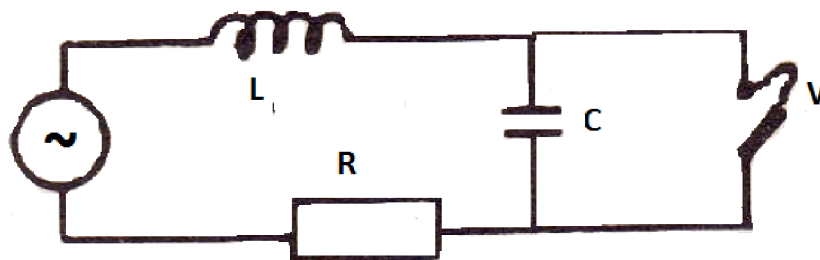
1. Oblouk volně hořící při vysokém napětí zdroje. Střídavý oblouk procházející nulou zanechává vodivou dráhu, proto je potřeba v tomto případě natahovat délku oblouku, čímž se zvyšuje obloukové napětí. Proud v obvodu se začne zmenšovat vlivem zvyšování odporu obloukové dráhy. Při tzv. kritické délce oblouku nastane porušení rovnováhy výkonu, výkon přiváděný a výkon odváděný (chlazením). Proud se zmenšuje a dojde k přerušení.
2. Střídavý proud v podmínkách velké deionizace. Působíme-li na trup střídavého oblouku tak, aby probíhalo intenzivní chlazení (deionizace). Na úkor působení plynného nebo kapalného prostředí se průměr obloukového kanálu zmenšuje, tím se zvyšuje proudová hustota. V okolí, kdy proud prochází nulou, se obloukový trup zmenšuje a oblouk se rychle rozpadá. Při dosažení proudu nuly ztrácí oblouk vodivost a zvyšuje se elektrická pevnost mezikontaktního prostoru. Případné zapálení oblouku v další periodě závisí na proražení mezikontaktní vzdálenosti.
3. Vypínání střídavého oblouku v obvodech nízkého napětí. U nízkonapěťových obvodů bývá elektrický odpor trupu oblouku řadově stejný jako odpor odpínacího obvodu, napětí oblouku řadově stejný jako napětí zdroje. Nyní nelze zanedbat napětí (odpor) oblouku.

Při intenzivních podmínkách chlazení, kdy proud protéká nulou, probíhají v obloukovém sloupci 2 procesy [1]:

- a) Nárůst elektrické pevnosti mezikontaktního prostoru
- b) Nárůst zotaveného napětí na kontaktech

Pro úspěšné uhašení oblouku, který je intenzivně chlazen, je potřeba zajistit podmínky, které při průchodu proudu nulou, zajistí, že elektrická pevnost mezikontaktního prostoru rychle vzroste a dosáhne dostatečné hodnoty než zotavené

napětí.



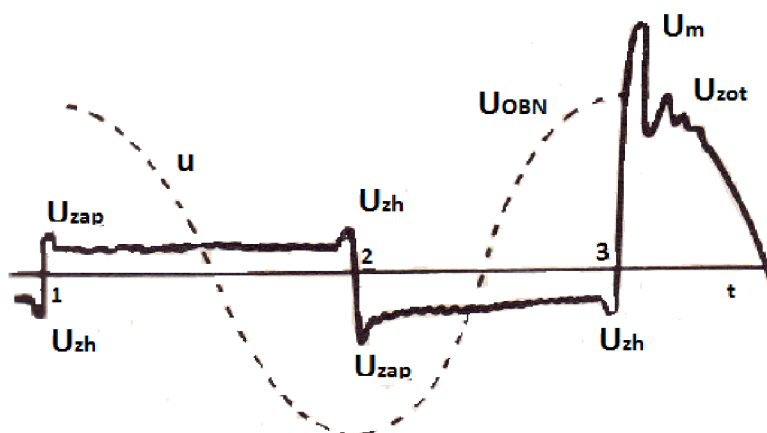
Obrázek 12: Schéma střídavého obvodu [1]

Na obrázku 13 je znázorněna změna napětí na oblouku, na obrázku 14 je změna proudu v obvodu, který je intenzivně chlazen. Po prvním a druhém průchodu proudem nulou je vidět, že obloukové napětí nabývá velkých hodnot, tzv. zapalovací špička  $U_{zap}$ , při kterých dochází k zapálení oblouku do další půl vlny proudu. Na obrázku 14 jsou vidět malé nulové prodlevy (doba na proražení mezikontaktního prostoru).

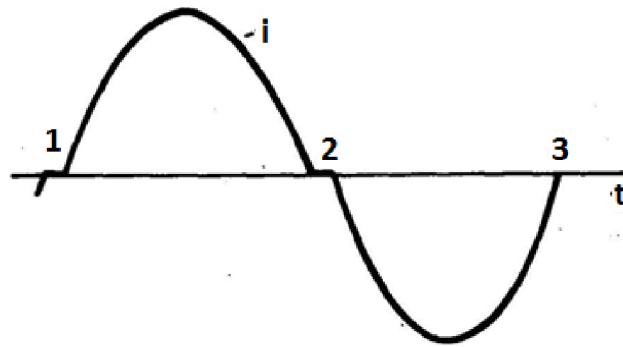
Velikost těchto úseků závisí na podmínkách obvodu:

- Velikost napětí obvodu
- Konstanty obvodu ( $R$ ,  $L$ ,  $C$ )
- Úhel posunutí proudu a napětí

Při třetím průchodu proudem nulou dojde k uhasnutí oblouku a mezi kontakty se objeví napětí zdroje. Fázové posunutí mezi napětím a proudem se blíží k  $90^\circ$ .



Obrázek 13: Průběh změny napětí na oblouku [1]



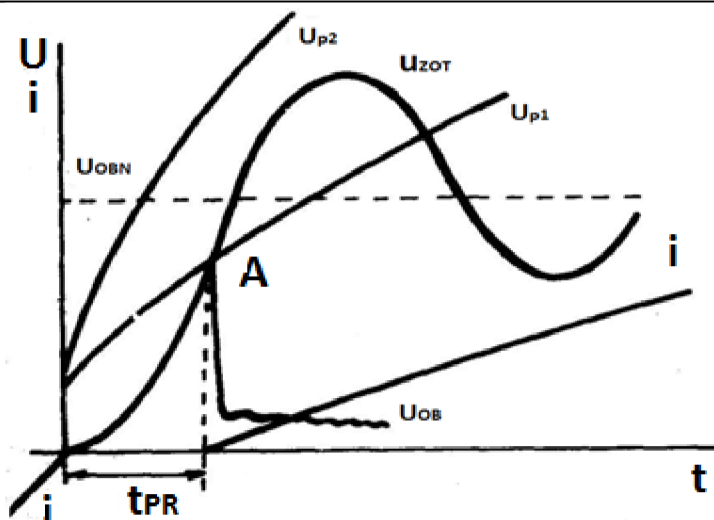
Obrázek 14: Průběh proudu nulou v bodě 1, 2 a 3 [1]

Při velké deionizaci oblouku zapalovací špičky obloukového napětí značně převyšuje hodnotu obloukového napětí. Na rozdíl od volně hořícího oblouku není napětí oblouku  $U_{OB}$  důležitou veličinou pro zhasnutí oblouku.  $U_{zap}$  v bodě 1 je několika násobně menší než v bodě 2, tudíž se oblouk v bodě 1 zapaluje snadněji než v bodě 2. Při třetím průchodu proudu nulou se oblouk nezapálí a objeví se kmity zotaveného napětí (zotavené napětí převyší napětí zdroje, při zanedbání tlumení obvodu může teoreticky dosáhnout dvojnásobného napětí zdroje). [1]

Napětí je znázorněna rovnoběžkou s osou času. Kmitočet zotaveného napětí na vypínači je dán indukčností obvodu  $L$  a kapacitou  $C$ . [1]

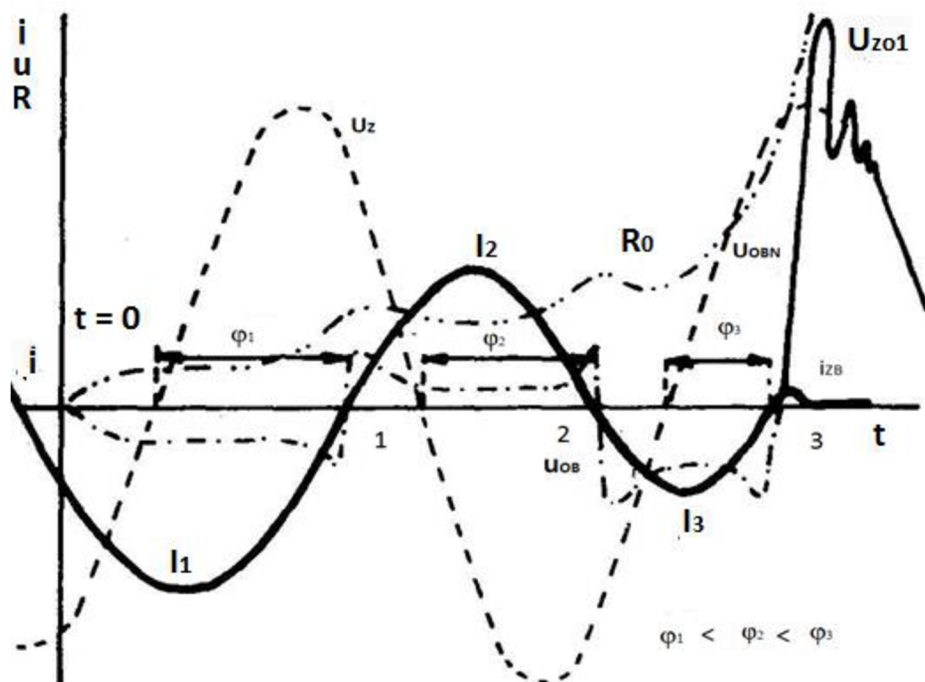
$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad [\text{Hz}; \text{H}, \text{F}] \quad (5.21)$$

Na obrázku 15 jsou dva případy vzrůstu elektrické pevnosti mezikontaktního prostoru  $U_{p1}$  a  $U_{p2}$ . V případě  $U_{p2}$  je stále na vyšší hodnotě než  $U_{ZOT}$  (podmínka zhasnutí oblouku). V případě  $U_{p1}$ ,  $U_{ZOT}$  převyší elektrickou pevnost  $U_{p1}$ , tím nastává průraz prostoru mezi kontakty, dojde k opětovnému zapálení oblouku a v obvodě protéká proud  $i$ . Podmínka průchodu proudu nulou, pevnost prostoru mezi kontakty narůstá rychleji a je vždy nad průběhem zotaveného napětí na vypínači, potom oblouk uhasne, jinak oblouk dál hoří. [1]



Obrázek 15: Průběh elektrické pevnosti a zotavovací napětí [1]

Na obrázku 16 do času  $t = 0$  protéká proud  $i$  obvodem určeným veličinami obvodu ( $R, L, U_z$ ). V okamžiku  $t = 0$  dojde k rozpojení kontaktů přístroje a začne vzrůstat odpor oblouku  $R_{OB}$  a napětí  $U_{OB}$ . Zvyšující se odpor při zhasnutí snižuje amplitudy proudu ( $I_1 > I_2 > I_3$ ) a zmenšení fázového posuvu  $i_0$  a napětí zdroje  $U_z$ . V bodech 1 a 2, kdy proud prochází nulou, nejsou splněny podmínky pro zhasnutí oblouku, oblouk se znovu zapaluje a hoří. V bodě 3 při průchodu proudu nulou jsou splněny podmínky pro zhasnutí oblouku a již nedojde k zapálení. Za tímto průchodem proudu nulou může protékat malý proud  $i_{zB}$  ze zbytkové vodivosti mezikontaktního prostoru. [1]



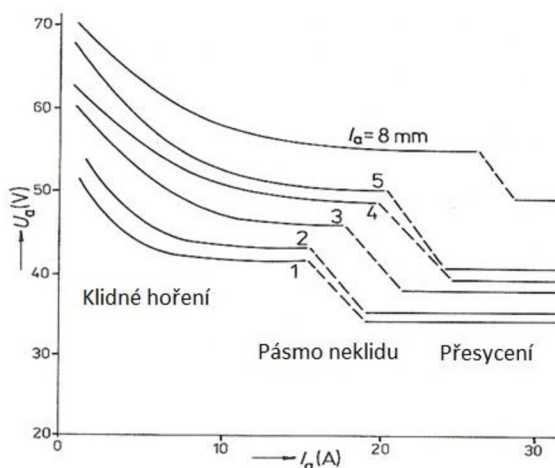
Obrázek 16: Průběh proudu a napětí oblouku v nn obvodu [1]

U rozboru podmínek pro vznik elektrické pevnosti mezi kontakty vypínače pro zhášení oblouku zjišťujeme 2 druhy oblouků:

- a) Krátký oblouk
- b) Dlouhý oblouk

## 6 MĚŘENÍ A ZKOUMÁNÍ V-A CHARAKTERISTIKY ELEKTRICKÉHO OBLOUKU NAPÁJENÉHO STEJNOSMĚRNÝM PROUDEM

Statická charakteristika oblouku se skládá ze dvou částí: z klesající ve tvaru hyperboly, probíhající v oblasti malých proudů, a z „přímkové“ v oblasti velkých proudů obr. 17. Oblouk v této části vydává syčivý zvuk. Tento jev nastává při překročení proudové hustoty na anodě ( $50 - 70 \text{ A/cm}^2$ ).



Obrázek 17: V-A charakteristika s pásmem neklidu

Experimentální zkoumání statické voltampérové charakteristiky oblouku má velký význam pro konstrukci zhášecích komor vypínačů. Jedno z prvních zkoumání provedla paní Ayrtonová, která vyjádřila V-A charakteristiku elektrického oblouku v pásmu klidného hoření rovnicí hyperboly (4.1):

$$U_{OB} = \alpha + \beta \cdot I + \frac{\delta}{I_{OB}}$$

Rozlišuje dva druhy elektrických oblouků: KRÁTKÝ oblouk a DLOUHÝ oblouk.

Krátký je takový oblouk, který má kratší délku, než je průměr oblouku. Z její rovnice

$$\text{vyjádřila zjednodušený vztah } U_{OB} = \alpha + \frac{\gamma}{I_{OB}} \quad [\text{V}; \text{V}, \text{W}, \text{A}] \quad (6.1)$$

$$\text{Dlouhý oblouk má pak tvar } U_{OB} = \beta \cdot l + \frac{\delta \cdot l}{I_{OB}} \quad [\text{V}; \text{Vm}^{-1}, \text{m}, \text{Wm}^{-1}, \text{m}, \text{A}] \quad (6.2)$$



Konstanty z rovnice (4.1) jsou závislé na materiálu tvaru a rozměrech elektrod a druhu a tlaku prostředí, ve kterém se elektrický oblouk nachází. Některé hodnoty jsou zapsané v tabulce 1.

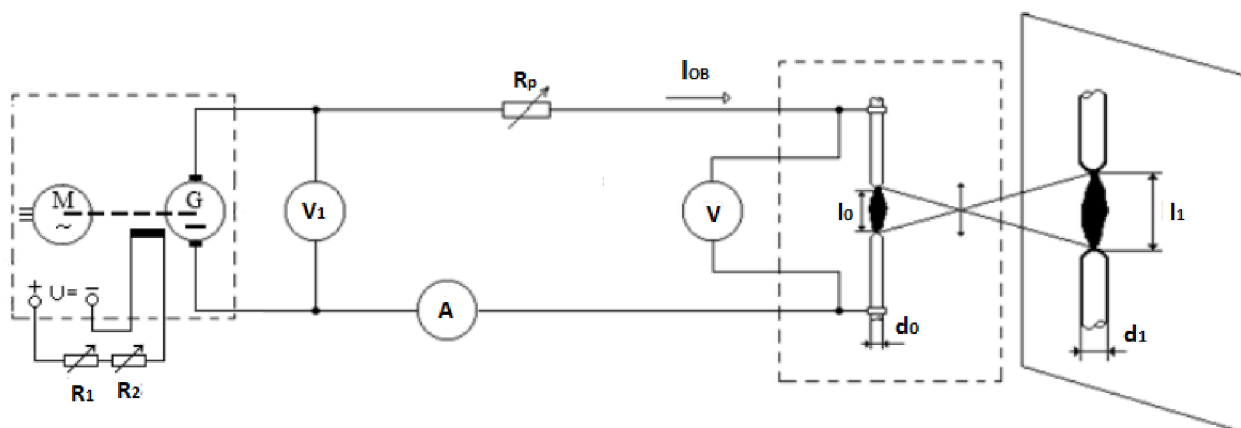
Tabulka 1 Konstanty Ayrtonové pro různé elektrody [3]

Elektrody	prostředí	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$\delta$	Poznámka
		[V]	[V/m]	[W]	[W/m]	
Homogenní uhlík $\phi=10\text{mm}$	vzduch	40	$1,2 \cdot 10^3$	20	$10 \cdot 10^3$	$l=1-7\text{mm}$ $I=5-10\text{A}$
Měděné tyče $\phi=10\text{mm}$	vzduch	17	$2 \cdot 10^3$	22	$10 \cdot 10^3$	$l=1-10\text{mm}$ $I=2-15\text{A}$
železné tyče $\phi=10\text{mm}$	vzduch	15	$1 \cdot 10^3$	22	$15 \cdot 10^3$	$l=5-30\text{mm}$ $I=2-10\text{A}$

Pro ověření platnosti rovnice Ayrtonové a porovnání V-A charakteristiky elektrického oblouku bylo provedeno experimentální měření v laboratoři SC 2.56 na VUT Fakulty elektrotechniky a komunikačních technologií v budově T12. Měření bylo prováděno se studenty v rámci předmětu BEPR.

## 6.1 Měření V-A charakteristiky elektrického oblouku v závislosti na elektrickém proudu při konstantní délce

Při vzrůstajícím elektrickém proudu se elektrody více zahřívají. Zahříváním katody se snadněji uvolňují elektrony do ionizovaného prostředí. Vzájemná poloha elektrod ovlivňuje uvolnění elektronů z katody.



Obrázek 18: Schéma zapojení obvodu pro měření V-A charakteristiky elektrického oblouku

Před samotným měřením jsme si určili zvětšení objektivu K podle vzorce (6.3). Jelikož vzdálenost  $l_0$  mezi elektrody byla velmi malá (1-10 mm), byl elektrický oblouk přes zvětšovací čočku promítnut na zeď a pomocí metru odečítána vzdálenost délky obrazu  $l_1$ .

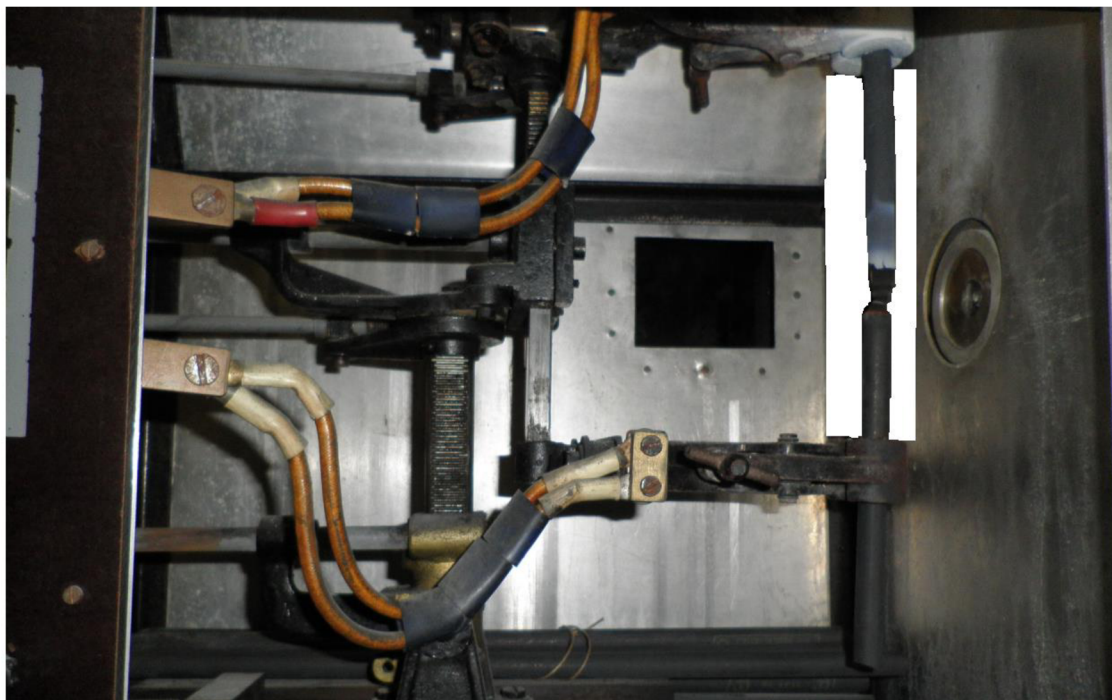


$$K = \frac{l_1}{l_0} = \frac{d_1}{d_0} \quad [-, \text{ mm, mm}] \quad (6.3)$$

Pomocí posuvného měřidla byla naměřena a vypočtena skutečná délka oblouku a délka obrazu oblouku.

$$K = \frac{l_1}{l_0} = \frac{15}{4,75} = 3,15$$

Pro co nejpřesnější měření bylo za potřeby šesti lidí. Koordinátora, který dohlížel nad měřením a řídil celou skupinu. Druhý člen nastavoval pomocí rezistoru hodnotu elektrického proudu, kterou odečetl z ampérmetru. Třetí člen pomocí ovládacího mechanismu v zařízení (obr. 19), na kterém bylo měření prováděno, nastavoval vzájemnou polohu elektrod a jejich vzdálenost od sebe. Čtvrtý člen odečítal délku obrazu oblouku ze stěny pomocí metru. Pátý člen hlásil aktuální napětí elektrického oblouku z voltmetru, šestý člen zapisoval naměřené hodnoty.



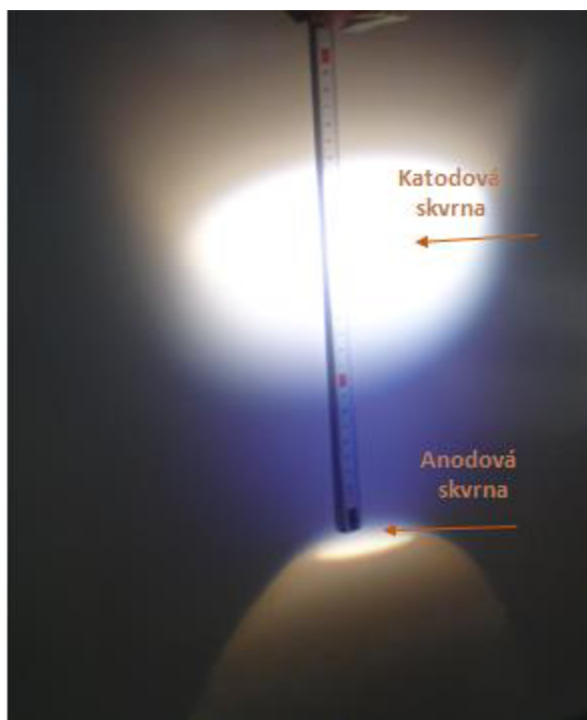
Obrázek 19: Zařízení pro měření elektrického oblouku

Bylo vybráno šest vzdáleností, u kterých se měnila hodnota elektrického proudu a to (2, 3, 4, 5, 6, 8) mm. Napájecí napětí pro měření V-A charakteristiky elektrického oblouku bylo nastaveno na 100 V. Při spojení elektrod a následně pomalém oddalování pohyblivé elektrody od pevné došlo ke vzniku elektrického oblouku. Jakmile byl elektrický oblouk mezi elektrodami, nastavila se vzdálenost mezi elektrodami 1 mm, která byla přes čočku promítnuta na zeď. Poté se začala nastavovat hodnota elektrického proudu od 2 A výše. Odečtení všech hodnot muselo být provedeno co možná současně, jelikož elektrický oblouk velmi rychle opaluje elektrody, dochází ke zkreslení hodnot. Tento postup byl opakován pro výše zvolené délky elektrického oblouku a byly zapsány do tabulek. Při měření délky elektrického oblouku se na obrazu elektrického

oblouku objevily skvrny, tzv. katodová a anodová skvrna (obr. 20). Katodová skvrna je zřetelně vidět na spodní elektrodě, jelikož obraz pomocí zvětšovacího objektivu je převrácen.

Katodová skvrna se nachází uprostřed katodové oblasti, jejíž délka je nepatrná. Proudová hustota v katodové skvrně je  $2700 \text{ A.mm}^{-2}$ . Tato proudová hustota je značně větší než v okolí povrchu katody. Od katodové oblasti je pak navazující sloupec, který tvoří nejdelší část vodivé cesty mezi elektrodami. [4]

Tato vodivá cesta se skládá z ionizovaného sloupce obsahujícího ionizované částice, které umožňují průchod proudu mezi elektrodami. V tomto ionizovaném sloupci se přeměňuje část elektrické energie na tepelnou. Na ionizovaný sloupec navazuje anodová část oblouku. Její délka je rovněž nepatrná a nezávisí na délce oblouku. Podle výzkumů byly stanoveny hustoty proudu katodové skvrny v rozmezí  $2700 \text{ A.mm}^{-2}$  až  $2900 \text{ A.mm}^{-2}$  a anodové skvrny v rozmezí  $200 \text{ A.mm}^{-2}$  až  $400 \text{ A.mm}^{-2}$ . Velmi důležitou oblastí oblouku je oblast katody, ze které jsou elektrony působením termoelektrické emise dopravovány k anodě. [4]



Obrázek 20: Katodová a anodová skvrna

Tabulka 2 Naměřené a vypočtené hodnoty V-A charakteristiky při konstantní délce

l mm	I			U	U <sub>vyp</sub>
	α	k	A	V	V
2	14	24/120	2,8	57,50	61,46
	15	24/120	3,0	56,70	60,27
	20	24/120	4,0	50,60	56,10
	25	24/120	5,0	42,70	44,00
	30	24/120	6,0	41,50	43,33
	35	24/120	7,0	38,40	42,86
	40	24/120	8,0	37,70	42,50
	45	24/120	9,0	37,70	42,22
	50	24/120	10,0	35,60	42,00
	55	24/120	11,0	36,20	41,80
3	60	24/120	12,0	35,80	41,82
	10	24/120	2,0	63,00	62,40
	15	24/120	3,0	56,00	55,73
	20	24/120	4,0	53,00	52,40
	25	24/120	5,0	51,00	50,40
	30	24/120	6,0	49,00	49,07
	35	24/120	7,0	47,00	48,11
	40	24/120	8,0	45,00	47,40
	45	24/120	9,0	44,00	42,22
	50	24/120	10,0	42,00	42,00
4	55	24/120	11,0	40,00	41,28
	16	24/120	3,2	63,55	63,55
	21	24/120	4,2	59,08	59,09
	26	24/120	5,2	56,33	56,34
	31	24/120	6,2	54,48	54,48
	36	24/120	7,2	53,13	53,13
5	41	24/120	8,2	52,11	52,12
	15	24/120	3,0	65,00	69,33
	20	24/120	4,0	55,00	56,10
	25	24/120	5,0	54,00	53,60
	30	24/120	6,0	49,00	51,93
	35	24/120	7,0	48,52	50,74
	40	24/120	8,0	47,87	49,85
	45	24/120	9,0	47,56	49,16
	50	24/120	10,0	46,00	48,60
	55	24/120	11,0	45,00	48,15
6	10	24/120	2,0	76,00	87,20
	15	24/120	3,0	69,00	73,87
	20	24/120	4,0	65,00	67,20
	25	24/120	5,0	60,20	63,20
	30	24/120	6,0	58,70	60,53
	35	24/120	7,0	56,32	58,63
	40	24/120	8,0	53,20	55,20
	45	24/120	9,0	50,23	54,47
	50	24/120	10,0	52,32	53,87
	55	24/120	11,0	51,10	52,12
8	60	24/120	12,0	49,85	51,20
	17	24/120	3,4	79,01	79,01
	22	24/120	4,4	72,32	72,33
	27	24/120	5,4	63,28	68,12
	32	24/120	6,4	62,71	65,23
	37	24/120	7,4	62,29	63,11
42	24/120	8,4	61,97	61,5	

Z naměřených hodnot napětí na elektrickém oblouku a elektrického proudu se sestavila V-A charakteristika elektrického oblouku napájená stejnosměrným elektrickým proudem. Následně se podle rovnice Ayrtonové (4.1) a pomocí konstant z tabulky 1 pro uhlíkovou elektrodu vypočítalo teoretické napětí na elektrickém oblouku a vložilo se do stejného grafu (obr. 21) k porovnání.

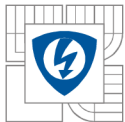
Příklad výpočtu pro délku elektrického oblouku  $l = 2$  mm a při elektrickém proudu  $I = 3$  A

$$U_{OB} = \alpha + \beta \cdot l + \frac{\delta}{I_{OB}} = 40 + 1,2 \cdot 10^3 \cdot 2 \cdot 10^{-3} + \frac{10 \cdot 10^3}{3} = 60,27V$$

Od určité hodnoty proudu úplná rovnice Ayrtonové neodpovídá a dochází k rozdílu mezi naměřeným a vypočteným napětím na elektrickém oblouku. Pro vyšší hodnoty proudu postačuje upravená rovnice Ayrtonové pro krátký oblouk:

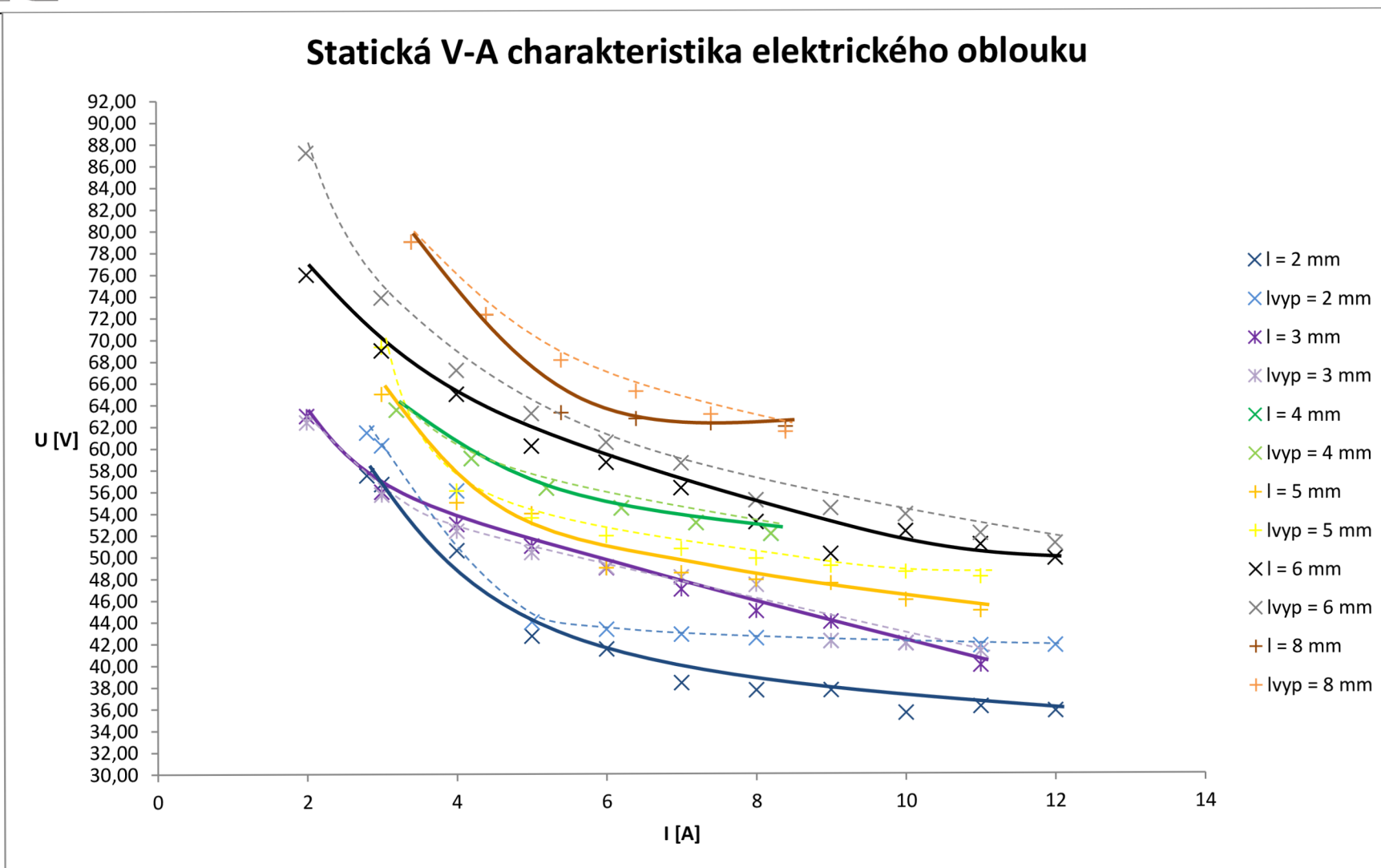
$$U_{OB} = \alpha + \frac{\gamma}{I_{OB}} = 40 + \frac{20}{6} = 43,33V$$

Z grafu lze zjistit, že při zvětšení hodnoty elektrického proudu dochází k zahřívání elektrod. Elektrony z katody vystupují snadněji a dochází k ionizaci v prostředí elektrického oblouku. V prostoru elektrického oblouku značně přibývá počet volných nosičů náboje a dochází k jejich zrychlení. Vodivost v prostředí roste a klesá odpor elektrického oblouku, čímž dochází i k jeho snížení napětí.



---

Při měření byly použity uhlíkové elektrody se stabilizačním jádrem o průměru 13 mm. Ayrtonová použila homogenní uhlíkové elektrody o průměru 10 mm viz. tabulka 1. Těmito vlivy docházelo k odchylkám naměřeného napětí od vypočítaného podle vzorce (4.1).



Obrázek 21: Graf V-A charakteristiky elektrického oblouku stejnosměrným proudem při konstantní délce

## 6.2 Měření V-A charakteristiky elektrického oblouku v závislosti na délce elektrického oblouku při konstantním elektrickém proudu

Zapojení úlohy zůstalo stejné jako při měření V-A charakteristiky při konstantní délce. V této části se udržoval konstantní elektrický proud a měnila se vzdálenost elektrického oblouku, dokud nedošlo k jeho uhašení nebo určité délky. Zvolené hodnoty elektrického proudu (3; 4,2; 5; 6) A.

Měření opět začalo při napětí 100 V a spojením elektrod. Následným pomalým oddalováním elektrod od sebe vznikl elektrický oblouk. Nejdříve se nastavil konstantní stejnosměrný elektrický proud, který se udržoval po celé době měření. Jelikož se elektrody opalovaly, bylo potřeba neustále hlídat elektrický proud pro elektrický oblouk. Poté se nastavila počáteční délka elektrického oblouku a změřilo se napětí na elektrickém oblouku. Délka se zvětšovala, dokud nedošlo k uhasnutí oblouku. Následně se nastavila další hodnota konstantního elektrického proudu a opět se prodlužovala délka elektrického oblouku. Naměřené a vypočítané hodnoty z měření se zapsaly do tabulky 3.

$$U_{OB} = \alpha + \beta \cdot l + \frac{\delta}{I_{OB}} = 40 + 1,2 \cdot 10^3 \cdot 1 \cdot 10^{-3} + \frac{10 \cdot 10^3}{3} = 51,2V$$

Z naměřených a vypočtených hodnot byl sestaven graf (obr. 22) v závislosti napětí elektrického oblouku na jeho délce. Byly opět použity uhlíkové elektrody se stabilizačním jádrem. Byly ověřeny teoretické předpoklady. Pokud má elektrický oblouk konstantní elektrický proud a začne se prodlužovat elektrický oblouk, dochází ke zvýšení chladicí plochy a teplo z oblouku odchází do okolí. Elektrody se začnou ochlazovat. Z katody se obtížně dostávají elektrony a v ionizovaném prostředí dochází k úbytku volných nosičů náboje a tím se zmenšuje i jejich rychlost. Vlivem deionizace klesá vodivost elektrického oblouku a narůstá jeho odpor. Vlivem činného odporu narůstá napětí na elektrickém oblouku.



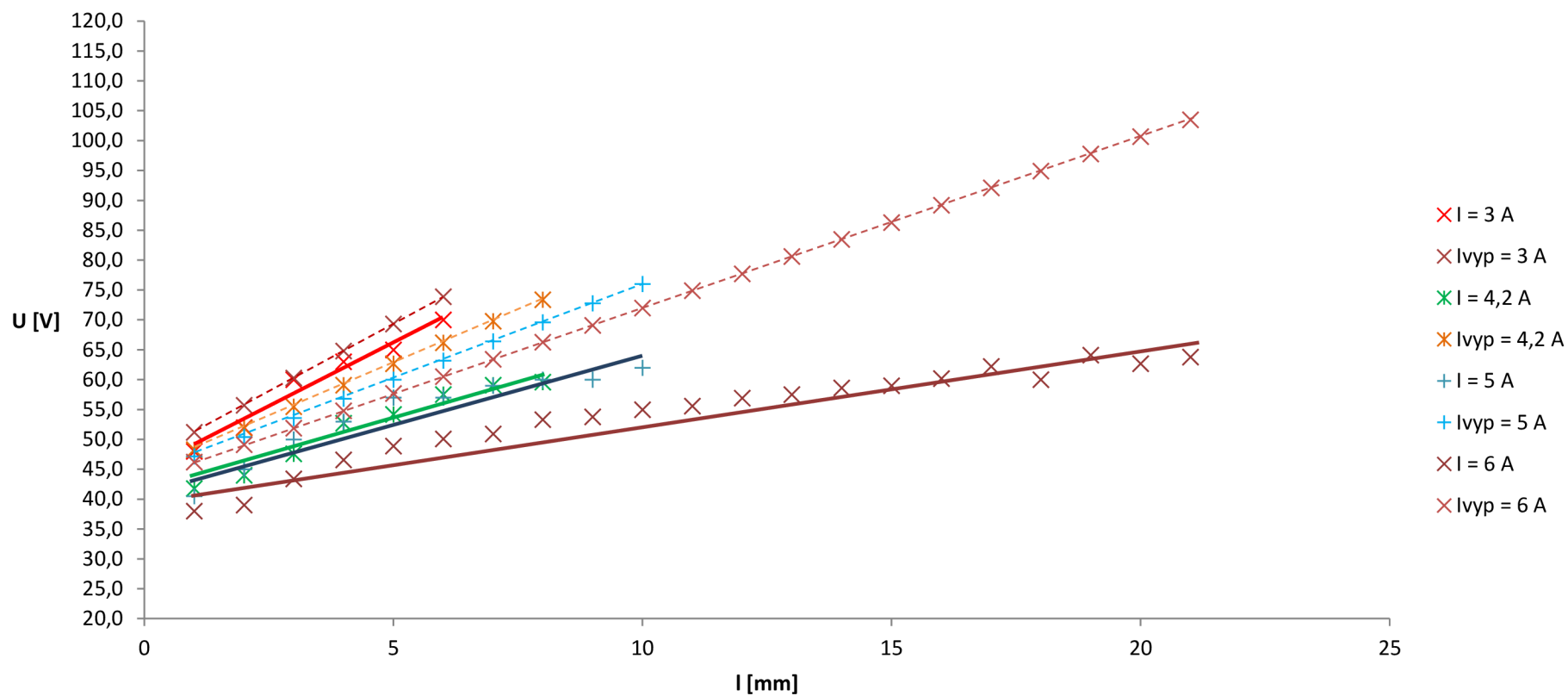
Tabulka 3 Naměřené a vypočtené hodnoty elektrického oblouku při konstantním elektrickém proudu

I	l	U	U <sub>vyp</sub>
[A]	[mm]	[V]	[V]
3	1	45	51,2
	2	52	55,7
	3	60	60,3
	4	63	64,8
	5	65	69,3
	6	70	73,9
4,2	1	41,8	48,3
	2	44,0	51,9
	3	47,6	55,5
	4	52,7	59,1
	5	54,2	62,7
	6	57,5	66,2
	7	59,1	69,8
	8	59,6	73,4
5	1	35,0	47,2
	2	45,0	50,4
	3	50,0	53,6
	4	53,0	56,8
	5	57,0	60,0
	6	57,0	63,2
	7	59,0	66,4
	8	60,0	69,6
	9	60,0	72,8
	10	62,0	76,0

I	l	U	U <sub>vyp</sub>
[A]	[mm]	[V]	[V]
6	1	34,0	46,2
	2	39,0	49,1
	3	43,4	51,9
	4	46,6	54,8
	5	48,9	57,7
	6	50,1	60,5
	7	50,9	63,4
	8	53,3	66,3
	9	53,8	69,1
	10	55,0	72,0
	11	55,6	74,9
	12	56,9	77,7
	13	57,5	80,6
	14	58,6	83,5
	15	59,0	86,3
	16	60,2	89,2
	17	62,2	92,1
	18	60,0	94,9
	19	64,1	97,8
	20	62,7	100,7
	21	63,8	103,5



## Závislost napětí elektrického oblouku na délce oblouku při konstantním proudu



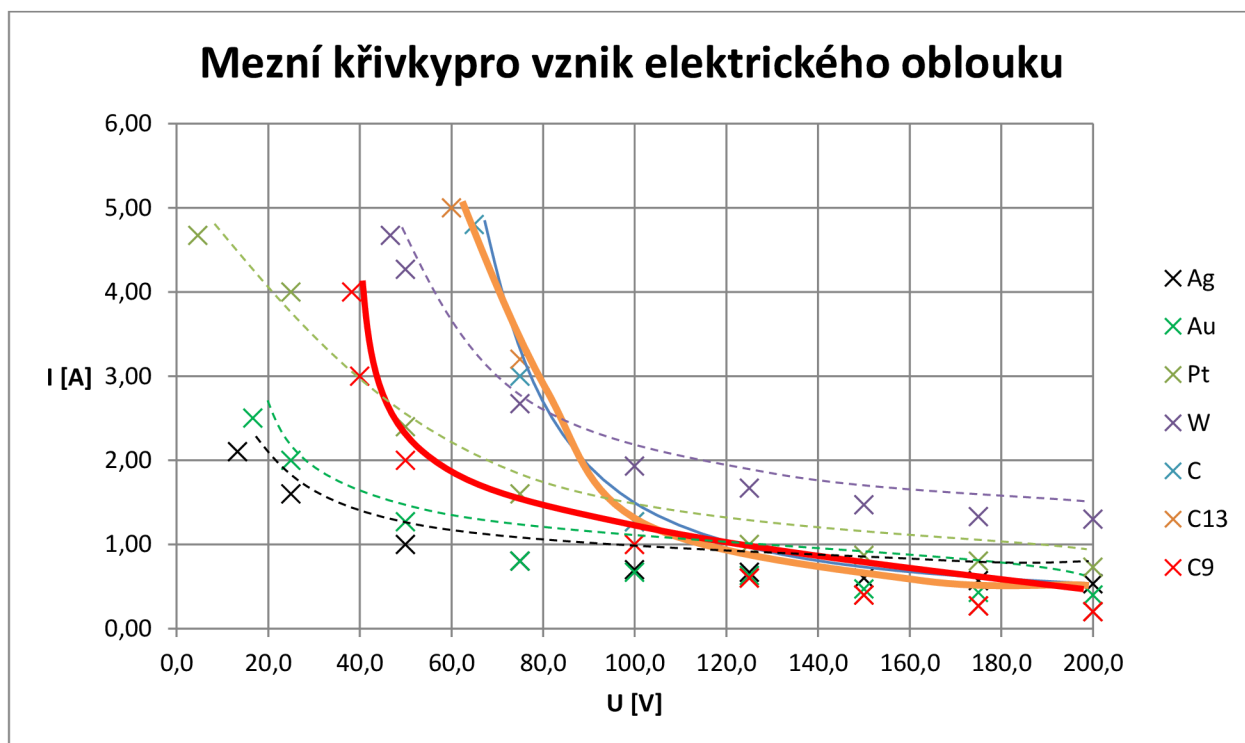
Obrázek 22: Graf Závislost napětí elektrického oblouku na délce oblouku při konstantním proudu



Z grafu (obr. 22) je vidět, že při vyšší hodnotě proudu je potřeba větší vzdálenost mezi elektrodami, aby došlo k úspěšnému uhasnutí elektrického oblouku. V energetice a výkonové elektrotechnice jsou velmi vysoké výkony, tedy i napětí a proud. Při těchto hodnotách se již elektrický oblouk nedá uhasit pouhým oddálením kontaktů. Konstrukteři proto navrhnou pro bezpečné uhašení elektrického oblouku tzv. zhášecí komory. Tyto komory pomáhají k rychlému natáhnutí a rozdělení elektrického oblouku na menší elektrické oblouky. Natáhnutí elektrického oblouku se provádí ve zhášecí komoře s izolovanými rošty. Další možnost je zmenšení průřezu oblouku. Je to prováděno intenzivním chlazením oblouku. Kolem oblouku proudí zhášecí médium a účinně jej ochlazuje, průřez oblouku se zmenšuje. Další možnost je rozdělení oblouku na větší počet menších obloučků. Rozdělení oblouku se provádí pomocí kovového roštu. Při rozdělení oblouků vznikají úbytky napětí a při nízkém napětí není oblouk schopen se udržet a je uhašen.

### 6.3 Mezní křivky elektrického oblouku

Mezní křivky elektrického oblouku určují vztah mezi elektrickým napětím a proudem na kontaktech, při nichž vzniká elektrický oblouk. Podle těchto mezních křivek je nutno zajistit takové podmínky, aby elektrické veličiny na kontaktech v okamžiku nebezpečí vzniku oblouku byly menší než hodnoty mezních křivek podle obr. 23., kde by například pro vznik elektrického oblouku u uhlíkových elektrod při napětí 100 V stačil elektrický proud 1,4 A.



Obrázek 23: Mezní křivky elektrického oblouku [5]

V laboratoři bylo provedeno kontrolní měření mezní křivky pro uhlíkové elektrody o průměru 13 mm a 9 mm. Nejdříve byly zapojeny uhlíkové elektrody se stabilizačním jádrem o

průměru 13 mm. Baly stanovena hodnota napětí 150 V a stanovila se předpokládaná hodnota elektrického proudu, kdy elektrický oblouk vzniká a nevzniká. Spojené elektrody se pomalu vzdalují minimálně do délky elektrického oblouku 1 mm a zjišťuje se, kdy elektrický oblouk vznikne. Takto bylo provedeno měření pro stanovené hodnoty napětí, při kterých vzniká elektrický oblouk. Naměřené hodnoty byly zaneseny do grafu na obr. 23. Bylo zjištěno, že u uhlíkové elektrody o průměru 9 mm vznikne elektrický oblouk při nižší hodnotě napětí 65 V. Nejnižší hodnota napětí vyšla 38,25 V při elektrickém proudu 4 A. Při menším průměru elektrody vzroste proudová hustota a tím dochází k většímu ohřátí elektrod, ionizované prostředí má více volných nosičů náboje, proto vzroste vodivost elektrického oblouku.

Tabulka 4 Mezní křivky elektrického oblouku

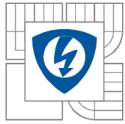
Ag		Au		Pt		W		C		C <sub>13</sub>		C <sub>9</sub>	
V	A	V	A	V	A	V	A	V	A	V	A	V	A
200,0	0,53	200,0	0,40	200,0	0,73	200,0	1,30	200,0	0,20	200,0	0,20	200,0	0,20
175,0	0,57	175,0	0,43	175,0	0,80	175,0	1,33	175,0	0,27	175,0	0,27	175,0	0,27
150,0	0,60	150,0	0,47	150,0	0,87	150,0	1,47	150,0	0,40	150,0	0,40	150,0	0,40
125,0	0,67	125,0	0,63	125,0	1,00	125,0	1,67	125,0	0,60	125,0	0,60	125,0	0,60
100,0	0,70	100,0	0,67	100,0	1,27	100,0	1,93	100,0	1,27	100,0	1,00	100,0	1,00
75,0	0,80	75,0	0,80	75,0	1,60	75,0	2,67	75,0	3,00	75,0	3,20	50,0	2,00
50,0	1,00	50,0	1,27	50,0	2,40	50,0	4,27	65,0	4,80	60,0	5,00	40,0	3,00
25,0	1,60	25,0	2,00	25,0	4,00	46,7	4,67					38,3	4,00
13,3	2,10	16,7	2,50	4,7	4,67								

## 6.4 Zhodnocení měření a výpočty V-A charakteristiky elektrického oblouku napájeného stejnosměrným elektrickým proudem

Experimentálním měřením byly ověřeny platnosti rovnic Ayrtonové. Naměřené hodnoty se neshodovaly úplně s vypočtenými, jelikož zde bylo mnoho příčin, které tyto výsledky ovlivnily. Ayrtonová pracovala při jiných podmínkách prostředí (teplota, vlhkost, tlak). Používala homogenní uhlíkové elektrody o průměru 10 mm, kdežto zde bylo měřeno s uhlíkovými elektrodami se stabilizačním jádrem o průměru 13 mm.

Měření bylo velmi náročné na koordinaci a synchronizaci se členy, kteří měření prováděli. Při každém odečtení naměřených hodnot se musela zkontrolovat konstantní délka a v případě neshody její opětovné nastavení, tím docházelo k chybám, a proto se naměřené hodnoty zcela neshodují s vypočtenými hodnotami. Tyto příčiny jsou:

- Chyba měřicích přístrojů
- Chybné odečtení z přístrojů
- Nepřesné odečtení z obrazu délky
- Vlive rychlého opalování elektrod, zkreslení hodnot (udržení konstantního proudu)
- Doba mezi naměřením a zapsáním výsledku
- Použití uhlíkových elektrod se stabilizačním jádrem



Na základě těchto údajů lze potvrdit, že tato rovnice platí pro krátké elektrické oblouky se stejnosměrným elektrickým proudem. Též bylo ověřeno, že odpor elektrického oblouku je nelineární  $R_{OB} = \frac{U_{OB}}{I_{OB}}$ , tedy se vzrůstajícím proudem klesá jeho odpor.

Při konstantní délce a zvyšujícím se proudu (od cca 5 A) docházelo k velkému rozdílu naměřených hodnot od vypočtených. Jelikož se jednalo o měření krátkých oblouků a malých proudů použila se zkrácená rovnice Ayrtonové, která naměřeným hodnotám lépe vyhovovala. Tato rovnice neuvažuje vliv délky elektrického oblouku, pouze protékající proud a katodové a anodové úbytky napětí, které velmi ovlivňují, charakteristiku krátkého oblouku.

Další graf byl graf závislosti napětí na délce elektrického oblouku při konstantním proudu. Závislost vycházela téměř přímková. Pokud se do této závislosti promítnou V-A charakteristiky, je vidět, že s rostoucí délkou oblouku (vzdáleností) roste odpor elektrického oblouku, neboť se zvětšila chladicí plocha, která napomáhá k jeho uhasnutí.

#### Seznam přístrojů:

Napájecí zdroj BS –PSN 3/5 A, 3CH

Měřicí zařízení

Sloupcový rezistor

Analogový ampérmetr, Metra, TP=0,5

Digitální voltmetr, Hexagon 340A

Uhlíkové elektrody se stabilizačním jádrem 13 mm, Elektrokarbon Topolčany

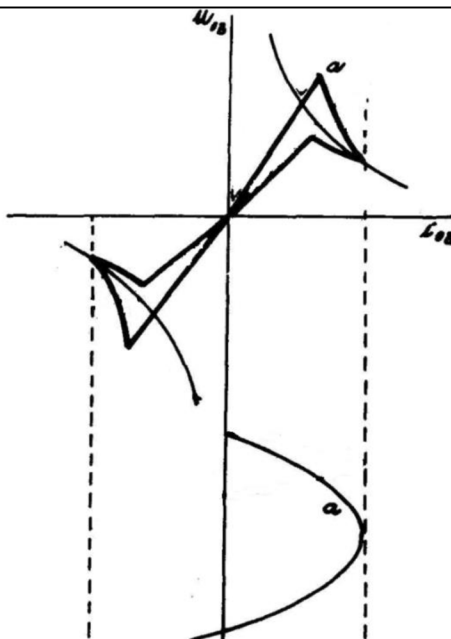
Uhlíkové elektrody se stabilizačním jádrem 9 mm, Charbons Lorraine

Metr

Posuvné měřidlo

## **7 MĚŘENÍ A ZKOUMÁNÍ DYNAMICKÉ CHARAKTERISTIKY ELEKTRICKÉHO OBLOUKU NAPÁJENÉHO STŘÍDAVÝM PROUDEM**

Elektrický oblouk napájený střídavým proudem způsobuje rychlá změna proudu odklon V-A charakteristiky od statické. Hovoří se o dynamické charakteristice elektrického oblouku. Obr. 24 znázorňuje typický tvar dynamické charakteristiky elektrického oblouku střídavým proudem s konstantní délkou elektrického oblouku. Tvar dynamické charakteristiky je závislý na materiálu elektrod, délce oblouku, zatěžovací charakteristice zdrojů a frekvenci napájecího napětí.



Obrázek 24: Dynamická charakteristika elektrického oblouku

## 7.1 Předpoklady o změnách působících na oblouk a chování jeho dynamické charakteristiky

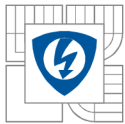
Před samotným měřením byly stanoveny předpoklady, které budou očekávány a projeví se na dynamické charakteristice napájené střídavým proudem.

### 1) Vliv teploty elektrod na hoření oblouku a chování dynamické charakteristiky

Teplota elektrod ovlivňuje velikost výstupní práce. Výstupní práce je množství dodané energie, potřebné k uvolnění elektronu z valenční vrstvy. Velikost výstupní práce závisí, stejně jako řada jiných materiálových vlastností a parametrů, na teplotě elektrod. Studené elektrody hůře uvolňují elektrony z valenční vrstvy, proto je potřeba dodat více energie k tomu, aby elektron opustil povrch materiálu elektrod. Úbytek napětí na oblouku bude větší. Naopak vyžhavené elektrody uvolňují elektrony snáze, tedy je zapotřebí menší energie k uvolnění elektronu z povrchu elektrody, úbytek napětí na oblouku bude menší.

### 2) Vliv délky oblouku na hoření oblouku a chování dynamické charakteristiky

Při oddalování pohyblivé elektrody od pevné elektrody se prodlužuje délka elektrického oblouku s konstantním proudem. Zvyšuje se velikost chladícího povrchu elektrod a dochází k jejich ochlazení. Rostou teplotní ztráty. Vlivem zvýšení teplotních ztrát a ochlazení dochází ke snížení počtu elektronů a jejich rychlosti. Dochází ke zvýšení odporu elektrického oblouku a následně ke snížení vodivosti proudovodné dráhy. Na dynamické charakteristice narůstá napětí na elektrickém oblouku a zvětšují se zapalovací špičky. V případě, kdy se elektrody přibližují, se zmenšuje velikost chladící plochy a tepelné ztráty. Vlivem zvýšené teploty se zvýší počet volných nosičů náboje a i jejich rychlost se zvýší. Napětí na elektrickém oblouku klesá, a tím dojde ke snížení odporu a zvýšení vodivosti proudovodné dráhy. Na dynamické charakteristice se zmenší dynamické špičky a narůstá elektrický proud.



### 3) Vliv velikosti proudu na hoření oblouku a chování dynamické charakteristiky

Zvýšením elektrického proudu dojde k navýšení příkonu a stačí dodat menší množství energie, která je potřebná k uvolnění elektronů z katody. Elektrody zvyšováním elektrického proudu zahřívají elektrody a roste jejich teplota. Pokud je katoda horní elektrodou, žhavé plyny z oblouku ohřívají katodu a dochází ke snadnějšímu uvolnění elektronů. V ionizovaném prostředí dochází k nárůstu iontů a elektronů a vlivem teploty i jejich rychlost. Díky velkému počtu volných nosičů náboje roste vodivost ionizovaného prostředí. Zvýšením vodivosti ionizovaného prostředí dochází ke snížení odporu elektrického oblouku. Jelikož je odpor elektrického oblouku činný, s rostoucím proudem klesá jeho hodnota a tím klesá i napětí na elektrickém oblouku.

### 4) Vliv konfigurace a materiálu elektrod na hoření oblouku a chování dynamické charakteristiky

Vzájemná poloha rozměr a materiál elektrod ovlivňují dynamickou charakteristiku elektrického oblouku v každé půlperiodě. Poloha elektrod - sousedě a vertikálně ve střídavém obvodu dochází každou půlperiodu ke změně katody za anodu. V případě, že katoda v dané půlperiodě je horní elektrodou, emitování volných nosičů náboje je jednodušší, jelikož žhavé plyny stoupají vzhůru a danou katodu oteplují. V charakteristice se to projeví tak, že zapalovací špičky jsou velmi malé, dochází ke snížení napětí a zvýšení proudu na elektrickém oblouku. V další půlperiodě je katoda dolní elektrodou, žhavé plyny stoupají vzhůru a ohřívají anodu. Poněvadž je katoda spodní a chladnější, volné nosiče opouštějí katodu hůře než v předešlé půlperiodě.

Narůstá zapalovací napěťová špička, dochází ke snížení proudu. Z toho vyplývá, že dynamická charakteristika elektrického oblouku v celé periodě je nesouměrná.

Pro vyrovnání souměrnosti elektrického oblouku můžeme uvažovat několik předpokladů:

Ponecháme-li elektrody sousedě a vertikálně, můžeme zvýšit průměr horní elektrody, kdy se horní bude hůře oteplovat než spodní. Ponechat tedy průměry stejné a ochlazovat horní elektrodu nebo naopak oteplovat spodní elektrodu, či změnit materiál horní elektrody.

Uložení elektrod sousedě a horizontálně. Jelikož jsou elektrody horizontálně, teplo elektrického oblouku je odváděno nahoru do prostoru, tudíž nedochází ke zvýšení oteplování katody a nedochází k nesymetrii dynamické charakteristiky elektrického oblouku.

### 5) Vliv chlazení na hoření oblouku a chování dynamické charakteristiky

Vlivem vynucené konvekce, dochází k chlazení elektrod. U chladnějších elektrod se volné elektrony z katodové elektrody hůře uvolňují a je potřeba dodání více energie, než u teplejších elektrod. V ionizovaném prostředí se vyskytuje menší počet volných nosičů náboje a jejich rychlost také klesá. Dochází ke snížení vodivosti ionizované dráhy. Odpor a napětí elektrického oblouku rostou.

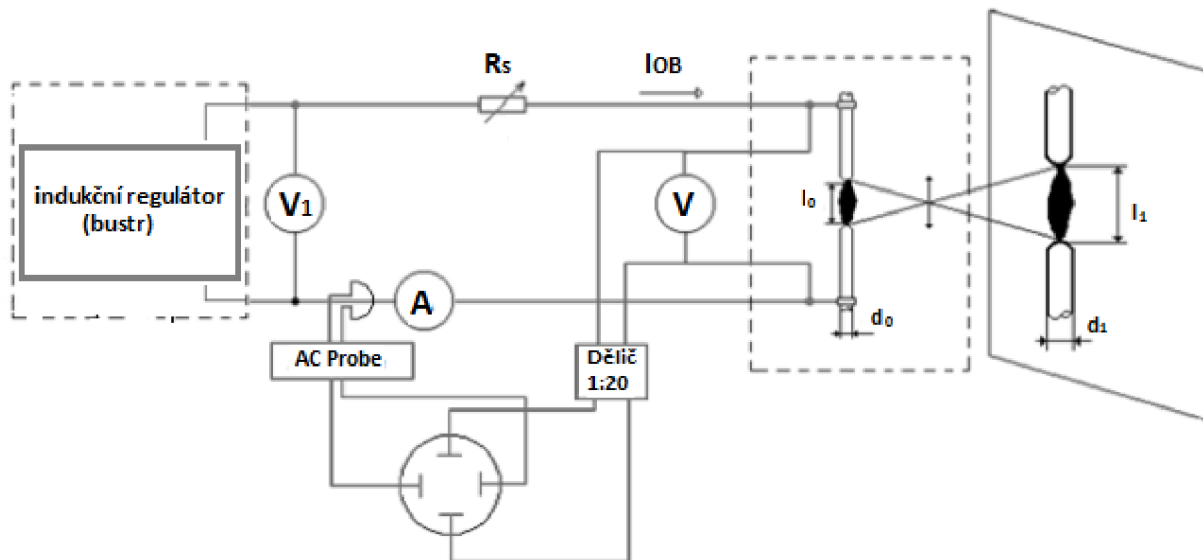
V případech vypínání zkratových proudů v reálných obvodech vn. (cca desítky kA, cca 500 V) je potřeba rychlé uhasnutí pomocí zhášecích komor, jelikož nestačí pouhé natažení elektrického oblouku.

Vypínač musí být schopen vypnout zkrat, což je 10x – 100x hodnota jmenovitého proudu. Pro tyto případy slouží zhášecí komory vybaveny zhášecími médii (voda, tlakový vzduch, olej, málo oleje, SF<sub>6</sub>, vakuum), která ovlivňují parametry a typy zhášecích komor. Zhášecími médii jsou například olej, látky s elektronegativitou například SF<sub>6</sub> a vakuum. Elektronegativní prvek je



prvek, který je schopen přitahovat vazební elektrony do své valenční vrstvy, kde postrádá elektrony. Čím méně elektronů ve valenční vrstvě chybí, tím tento prvek intenzivněji odebírá elektron z okolí (z ionizovaného prostředí elektrického oblouku).

## 7.2 Měření dynamické charakteristiky elektrického oblouku napájeného střídavým proudem



Obrázek 25: Schéma zapojení elektrického oblouku napájeného střídavým proudem

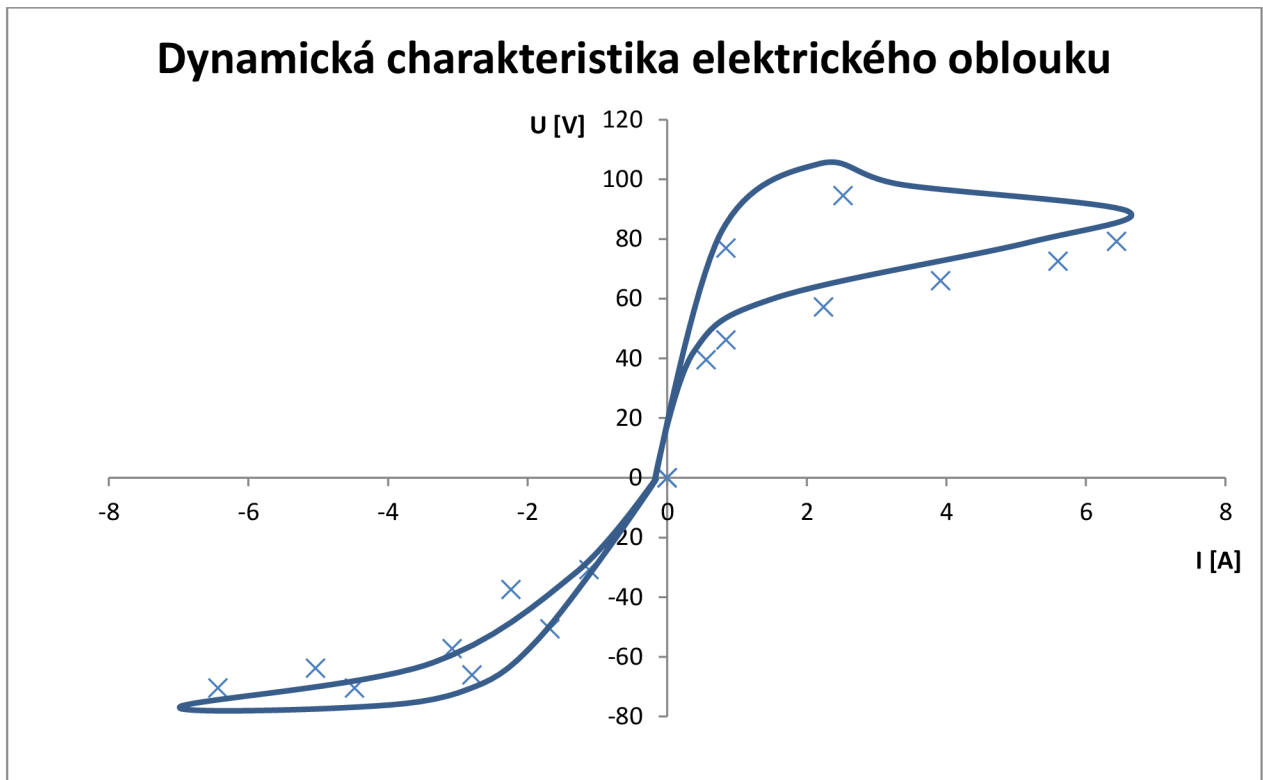
Po zapojení se přivedlo napájecí napětí o velikosti  $u_n = 100$  V a střídavým proudem o velikosti  $i = 12$  A. Oddálily se elektrody, aby vznikl elektrický oblouk, a na osciloskopu se objevila dynamická charakteristika elektrického oblouku. Pomocí osciloskopu a tiskárny se vytiskly průběhy napětí a proudu a pomocí měřítka napětí a proudu se sestavila dynamická charakteristika napájená střídavým elektrickým proudem.

Po vytisknutí průběhů se obě půlperiody rozdělily po 1 ms a odečtené hodnoty byly zapsány do tabulky 5.

Tabulka 5 odečtené hodnoty dynamické charakteristiky

Katoda horní elektrodou	U	i	Katoda dolní elektrodou	U	i
	[V]	[A]		[V]	[A]
	-30,8	-1,1		39,6	0,6
	-50,6	-1,7		77,0	0,8
	-66,0	-2,8		94,6	2,5
	-70,4	-4,5		79,2	6,4
	-70,4	-6,4		72,6	5,6
	-63,8	-5,0		66,0	3,9
	-57,2	-3,1		57,2	2,2
	-37,4	-2,2		46,2	0,8
	0,0	0,0		0,0	0,0

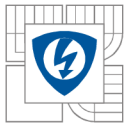
Z těchto hodnot se následně sestrojil graf dynamická charakteristika elektrického oblouku napájeného střídavým proudem obr. 26.



Obrázek 26: Dynamická charakteristika elektrického oblouku

### 7.3 Zhodnocení měření a výpočty dynamické charakteristiky elektrického oblouku napájeného střídavým elektrickým proudem

Při vzniku elektrického oblouku napájeného střídavým elektrickým proudem se na osciloskopu objevila dynamická charakteristika elektrického oblouku (obr. 26). Na obrázku je vidět celá perioda elektrického oblouku. Tato dynamická charakteristika je nesymetrická, jelikož poloha elektrod byla souosa ve vertikální poloze. V první půlperiodě (třetí kvadrant) byla katodou horní elektroda. V druhé periodě (první kvadrant) byla katoda spodní elektrodou. V době, kdy byla katoda horní elektrodou, stoupaly žhavé plyny z elektrického oblouku vzhůru a oteplovaly katodu. Oteplováním katody se snadněji uvolňovaly volné elektrony a v ionizovaném prostředí došlo ke zvýšení počtu volných nosičů náboje a jejich zrychlení. Vodivost elektrického oblouku se zvýšila. Poklesl odpor oblouku a tím i zapalovací špičky napětí. Při prodlužování délky oblouku docházelo ke zvětšení chladícího povrchu a vzrostly ztráty. Elektrody začaly chladnout, elektrony obtížněji opouštěly katodu a začalo docházet ke snížení počtu volných nosičů náboje a tím i k jejich rychlosti. Vodivost ionizovaného prostředí klesá a odpor elektrického oblouku narůstá. Dochází ke zvětšení zapalovacích špiček.

Seznam přístrojů:

Napájecí zdroj BS –PSN 3/5 A, 3CH

Měřicí zařízení

Osciloskop Tektronix TPS 2012B

Sloupcový rezistor

Odporový rezistor 10 k $\Omega$ 

Rogovského pásek

Proudová sonda Chauvin Arnoux A100

Analogový ampérmetr, Metra, TP=0,5

Digitální voltmetr Hexagon 340A

Uhlíkové elektrody se stabilizačním jádrem 13 mm, Elektrokarbon Topolčany

## 8 STABILITA ELEKTRICKÉHO OBLOUKU

Většina typů elektrického oblouku potřebuje pro svoji existenci určitý druh stabilizace. Stabilizaci si může oblouk vytvořit sám nebo může být vnější. Je-li oblouk správně stabilizován, pak při odchylce z rovnovážného stavu dochází k interakci plazmatu oblouku se stabilizujícím mechanismem, která uvede oblouk do rovnovážného stavu.

### 8.1 Stabilizace oblouku stěnou

Tato stabilizace je nejjednodušší. Oblouk hoří v úzké trubici kruhového průřezu, která zajišťuje rotaci oblouku. Při výchylce obloukového sloupce ke stěně trubice dojde ke zvýšení odvodu tepla, čímž dojde ke snížení teploty, a tím i k poklesu elektrické vodivosti v místě styku plazmatu se stěnou trubice. Tímto se oblouk dostane zpět do rovnovážného stavu. V elektrickém oblouku, který se nachází v tenké trubici, dochází k velkým tokům tepelné energie do stěny trubice. Trubice se nejčastěji skládá z několika vodou chlazených, vzájemně izolovaných kovových segmentů. [8]

### 8.2 Stabilizace oblouku konvekci

Elektrický oblouk je stabilizován relativně chladným proudícím médiem, které může být plyn nebo kapalina. Chladné médium proudí kolem sloupce plazmatu, čímž dojde k tepelné izolaci od stěny trubice. Tepelná konvekce z plazmatu do obklopujícího média má podobnou funkci jako tepelná kondukce v případě stabilizace oblouku stěnou.

Přiváděný plyn je ve vstupním otvoru urychlen a vzhledem k tangenciálnímu směru se plyn dostává do rotace. Vzniklý vír stabilizuje oblouk do osy trubice. Jelikož rotace plynů pokračuje i v oblouku a v trysce, vlivem působení odstředivé síly se soustředí lehčí částice do středu a těžší a chladnější na obvod sloupce oblouku. [8]



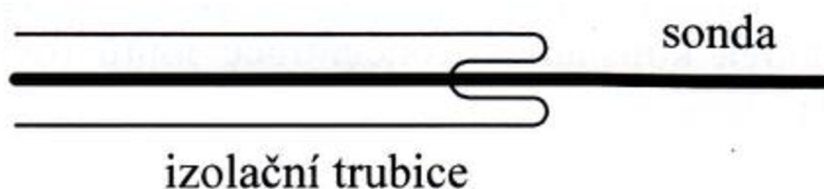
## 9 KONTAKTNÍ METODY PRO URČENÍ TEPLoty

### PLAZMATU

#### 9.1 Sondové metody

Mezi kontaktní metody patří sondové metody, které při měření využívají sondy, které se vkládají do plazmatu. Sonda měří parametry plazmatu pouze v místě jejího výskytu. Sondová metoda je omezena na oblast paprsku (jetu) plazmatu, nelze ji umístit do oblouku.

Sondová metoda umožňuje určit parametry výboje za předpokladu, že rozdělení rychlostí částic odpovídá Maxwellovu rozložení a koncentrace částic je tak velká, že střední volná dráha částic je značně větší než šířka stínící vrstvy sondy. Sondová metoda je spolehlivá, pokud sonda neovlivňuje příliš plazma. Hlavní nevýhodou této metody je značná chyba, neboť představuje zásah do plazmatu přes veškerou snahu o jeho minimalizaci. [6]



Obrázek 27: Měřicí sonda [6]

Pouze aktivně působící část sondy zůstává holá, zbytek sondy je izolován, např. skleněným povlakem obr. 27. Na sondy jsou kladeny vysoké požadavky, především na tvar, velikost, typ a vlastnosti materiálu sondy. Aby došlo k co nejmenšímu ovlivnění plazmatu, vloží se trvale do plazmatu a musí vydržet danou teplotu plazmatu. Sondy mohou být ploché, válcové nebo kulové. Pro snesení vysoké teploty sondy v plazmatu bez značnějšího opotřebení se používá jako materiál wolfram nebo molybden. Z hlediska konstrukce se rozlišuje jednoduchá, dvojná nebo trojná sonda.

Vložením sondy do plazmatu, lze měnit proud protékající sondou  $I_s$  změnou napětí sondy proti katodě  $U_{sk}$ . Vynesením závislosti proudu  $I_s$  na napětí  $U_{sk}$  vznikne sondová V-A charakteristika. Ze sondové charakteristiky lze určit teplotu elektronů  $T_e$ . Z dané teploty lze stanovit koncentraci elektronů  $n_e$ . Jelikož pro plazma platí podmínka kvazineutality, je koncentrace elektronů stejná jako koncentrace iontů  $n_e = n_i$ .

Typická charakteristika jednoduché rovinné sondy je na obr. 28, kde jsou viditelné celkem tři odlišné části. V části 1 je sonda nabitá silně záporně. Kolem sondy se shromáždí kladné ionty, které ji obalí a vytvoří okolo ní stínící vrstvu kladného náboje šířky  $d$ . V této vrstvě jsou obsaženy i neutrální částice a čím blíže k plazmatu, tím více se vrstva podobá plazmatu. Na rozhraní vrstva-plazma je též potenciál, jako má plazma v místě rozhraní. Jelikož je sonda proti plazmatu velmi záporná, odrážejí se všechny elektrony ve vrstvě a vracejí se zpět do plazmatu. Od určitého potenciálu sondy pak na ni začnou dopadat nejrychlejší elektrony. Celkový proud sondy, který je součtem iontového a elektronového proudu - pak bude klesat, až bude sondový proud nulový. Při nulovém sondovém proudu má sonda potenciál, při němž proud elektronů a

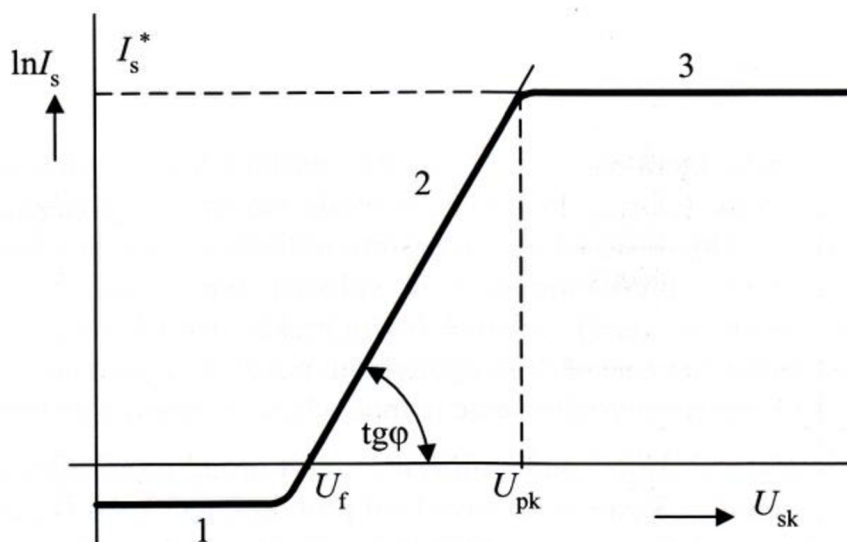
iontů dosáhne rovnováhy. Sonda je nabita na tzv. plovoucí potenciál  $U_f$ , který není potenciálem plazmatu. Další vzrůst napětí na sondě má za následek změnu směru proudu a jeho prudký nárůst. V okamžiku, kdy má sonda stejný potenciál jako plazma, přestane odpuzovat elektrony. Dojde ke zmizení stínící vrstvy kladných nábojů okolo sondy. Sonda nabývá kladného potenciálu proti plazmatu (část 3 obr. 28) a vytvoří kolem ní záporný stínící prostorový náboj. V části 3 charakteristiky rovinné sondy je pozorována oblast nasyceného proudu, která nezávisí na velikosti napětí. Přechod v části 2 mezi stavem, kdy je sonda vůči plazmatu velmi záporná, a stavem, kdy je sonda kladná, je velmi výrazný. V případě, že je rozdělovací funkce rychlosti elektronů v plazmatu Maxwelllovská, je závislost v části 2 lineární. Ze směrnice této přímkové části se určí teplota elektronů [6]

$$T_e = \frac{e}{k \cdot \text{tg}\varphi} = \frac{e \Delta U_{sk}}{k \Delta \ln I_s} \quad [\text{K}; \text{C}, \text{JK}^{-1}, -, \text{C}, \text{V}, \text{JK}^{-1}, \text{A}] \quad (8.1)$$

Potenciální rozdíl plazmatu a katody  $U_{pk}$  se rovná napětí na sondě v okamžiku změny sklonu obou přímkových částí V-A charakteristiky. Proud sondou  $I_s^*$  odpovídající tomuto napětí slouží společně s teplotou elektronů  $T_e$  ke stanovení koncentrace elektronů,

$$n_e = \frac{I_s^*}{Ae} \sqrt{\frac{2\pi m_e}{kT_e}} \quad [-; \text{A}, \text{m}^2, \text{kg}, \text{JK}^{-1}, \text{K}] \quad (8.2)$$

kde  $A_s$  je plocha rozhraní vrstva-plazma u sondy,  $e$  je náboj elektronu,  $m_e$  je hmotnost elektronu a  $k$  je Boltzmannova konstanta. Koncentrace iontů je rovna koncentraci elektronů, protože platí kvazineutralita plazmatu. [6]



Obrázek 28: Sondová charakteristika rovinné sondy [6]

Nejčastěji se používají válcové sondy, neboť jsou technicky nejjednodušší. Sondová charakteristika válcové sondy je podobná jako u rovinné sondy. V případě jednoduché válcové sondy je situace poněkud složitější. U povrchu sondy vzniká vrstva s odlišnou koncentrací nabitých částic proti plazmatu. Povrch této vrstvy závisí na velikosti potenciálu sondy, a proto

na rozdíl od rovinné sondy bude elektronový i iontový proud závislý na napětí i v části 3. Část 2 však bude stejná. Sklon charakteristiky, z níž určujeme  $T_e$ , není tvarem sondy příliš ovlivněn v blízkosti zlomu. Teplota se určuje stejným způsobem. Potenciál plazmatu  $U_{pk}$  se určí stejně jako u ploché sondy ze lomu charakteristiky. Zlom sondové charakteristiky je u válcové sondy méně výrazný než u sondy ploché. [6]

Nejstarší metodou zkoumání parametrů plazmatu je jednosondová metoda. Jednoduchá sonda (Langmuirova sonda) je ve formě drátu (vodiče) o průměru 0,1 mm – 1 mm. Doba, za kterou se vytvoří příslušné vrstvy, je u jednoduché sondy kratší než 10  $\mu$ s.

Jelikož by sonda mohla při zatížení velkých proudů snadno shořet, přechází se k pulznímu provozu, sonda je zatěžována jen krátkodobým napěťovým pulzem. Pulzní provoz je nutný i tehdy, chtějí-li se sledovat rychle probíhající děje, nebo mění-li se parametry rychle v čase. Pro sondové pulzní metody s jednoduchou sondou je nutné používání delších pulzů než 10  $\mu$ s. [6]

Dvojná sonda jsou dvě (zpravidla identické) sondy umístěné v ekvipotenciální ploše plazmatu. Výhoda použití dvojných sond je v tom, že doba potřebná k ustálení poměrů na sondě je kratší než 10<sup>-8</sup> s. Tím lze měřit i velmi rychle probíhající jevy v plazmatu. [6]

Přiloží-li se na sondy napětí, musí se potenciál sond vůči plazmatu ustálit na takové hodnotě, kdy součet elektronových a iontových proudů bude nulový, tedy jedna sonda se postupně blíží k úrovni potenciálu plazmatu a sbírá elektrony, zatímco druhá sonda sbírá převážně ionty. Přebytečné elektrony protékají mezi sondami vnějším obvodem a tvoří sondový proud. Při větším napětí mezi sondami bude jedna ze sond sbírat pouze elektrony a druhá ionty. Pak vnějším obvodem poteče proud rovný iontovému proudu na druhou sondu. Vyhodnocení sondové charakteristiky dvojná sonda je možné provést analogicky jako u sondy jednoduché. [6]

Trojná sonda se zpravidla skládá z trojice identických elektrod umístěných v plazmatu těsně vedle sebe, aby se nacházely v místě stejného potenciálu. Oproti jednoduché a dvojná sonda má řadu předností, které se používají v radiofrekvenčních výbojích a depozicích tenkých vrstev. Krajní sondy představují normální dvojnou sondu a třetí sonda funguje jako referenční. Proud touto třetí elektrodou je vždy nulový a elektroda zůstává trvale na plovoucím potenciálu a obvodem netečou žádné proudy. Přiloží-li se na obě krajní sondy vnější napětí, které budou záporné oproti referenční sondě, bude na těchto sondách potenciál nižší než plovoucí a proud těmito sondami bude odpovídat především proudu kladných iontů. Při obrácené polaritě pak proud bude odpovídat proudu elektronovému. [6]

### 9.1.1 Sonda s vysokoteplotními termočlánky

Další sondovou metodou je sonda s vysokoteplotními termočlánky obr. 29, např. systém Pt-PtRh nebo Ir-IrRh. Drátek je průměru 0,5 mm a délky asi 2 mm. Na místě svaru je kontaktní potenciál a hlavička termočlánku je kompaktní a na celém povrchu má stejnou teplotu.

Vzhledem k teplotám, při kterých je hlavička termočlánku natolik rozžhavena, že vyzařuje do okolí část energie přijaté od okolního proudícího plazmatu, je nutno teplotu naměřenou termočlánkem  $T_t$  korigovat. K určení teploty plazmatu  $T_p$  slouží energetická bilance hlavičky termočlánku. Energetická bilance termočlánku vychází ze základní bilanční rovnice

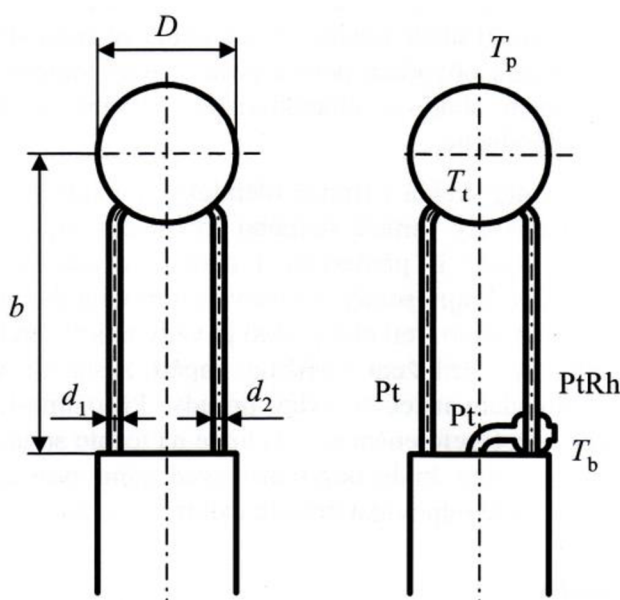
$$W_{kond} + W_{konv} + W_{rad} = 0 \quad [J, J, J] \quad (8.3)$$

a zahrnuje příspěvky v důsledku kondukce (vedení), konvekce (proudění) a radiace (sálání). Za určitých zjednodušení (linearizace) lze tuto rovnici zrozsádat do tvaru

$$\frac{\lambda(T_t)\pi(a_1^2+a_2^2)(T_b-T_t)}{4b} + \pi D^2\alpha(T_t)(T_p-T_t) + \frac{4}{3}\pi D^2\varepsilon\sigma(T_t^4-T_p^4) = 0 \quad (8.4)$$

kde  $\lambda(T_t)$  je tepelná vodivost vodičů (přívodu termočlánku),  $\alpha(T_t)$  je součinitel přestupu tepla,  $\varepsilon$  je emisivita,  $\sigma$  Stephans-Boltzmannova konstanta,  $T_b$  je teplota paty termočlánku. Kondukční člen je záporný, protože dochází k odvodu tepla vodiči (drátky), tj. platí  $T_b < T_t$ . Záporný je i člen radiace  $T_t < T_p$ , protože rozžhavená hlavička termočlánku září a vyzařuje energii do okolí. [6]

Tímto způsobem lze měřit teploty plazmatu až o několik set stupňů vyšší, než je tepelná odolnost použitého typu termočlánku. Těto metody se používá zejména pro okrajové oblasti paprsku plazmatu, které jen málo nebo již vůbec nezáří. Postupné vnořování termočlánku sondy se ukončí, pokud se údaj termočlánku blíží mezi jeho tepelné odolnosti. Odezva při měření termočlánkem je pomalá, řádově desítky vteřin. [6]



Obrázek 29: Sonda s vysokoteplotními termočlánky [6]

Tabulka 6 Termoelektrická napětí některých termoelektrických dvojic platinové řady [9]

Teplota[°C]	Termoelektrické napětí mV				
	h10/Pt	PtRh30 PtRh6	PtRh13/ Pt	PtRh20/ PtRh5	PtRh40/ PtRh20
0	0	0	0	0	0
100	0,643	0,055	0,645	0,09	0,040
200	0,436	0,161	1,465	0,27	0,090
300	2,316	0,418	2,395	0,57	0,155
400	3,251	0,790	3,399	0,95	0,240
500	4,221	1,245	4,455	1,42	0,352
600	5,224	1,796	5,563	1,97	0,492
700	6,260	2,441	6,720	2,59	0,664
800	7,329	3,163	7,924	3,29	0,866
900	8,432	3,964	9,475	4,05	1,104
1000	9,570	4,840	10,471	4,87	1,378
1100	10,741	5,792	11,817	5,75	1,680
1200	11,935	6,811	13,192	6,68	2,015
1300	13,138	7,890	14,582	7,64	2,380
1400	14,337	9,000	15,969	8,62	2,780
1500	15,531	10,130	17,356	9,91	3,190
1600	16,716	11,260	18,728	10,60	3,625
1700	-	12,391	20,090	-	4,070
1800	-	13,520	-	-	4,525

## 9.2 Vysokofrekvenční (mikrovlnné) metody

Mikrovlnné metody mohou být jak aktivní tak i pasivní. Mikrovlnné pásmo použité v těchto metodách má rozsah ve vlnových délkách řádově od jednotek metru po milimetry.

V aktivních metodách se vystaví plazma vysokofrekvenčnímu poli a pozoruje se vzájemná interakce. Plazma jakožto vodivé prostředí může vést vysokofrekvenční signál. V důsledku vlastností plazmatu však existuje tzv. plazmatická frekvence, představující dolní mez frekvencí mikrovln, které ještě mohou plazmatem projít. Je-li frekvence dopadající vlny menší než plazmatická, vlna se od plazmatu pouze odrazí. Hodnota plazmatické frekvence je úzce spjata s koncentrací částic v plazmatu, a to nepřímou úměrou. [7]

Pokud se dopadající vysokofrekvenční elektromagnetická vlna od plazmatu neodrazí a začne jím procházet, dochází k jejímu zeslabování s rostoucí dráhou uraženou v plazmatu. Parametr, který udává zmenšování elektrické, resp. magnetické složky vlny podél dráhy, označujeme  $\gamma$  a nazýváme jej konstanta šíření. Konstanta šíření je komplexní číslo, jehož reálná složka, tzv. útlum, představuje změnu amplitudy, zatímco imaginární složka (zvaná fáze) změnu fáze. [7]

Aktivní metody jsou založeny na měření změn konstanty šíření (útlumu i fáze) po průchodu vlny plazmatem. Z těchto změn je možné určovat různé parametry, například koncentraci. V případě tzv. rezonátorové (rezonanční) metody je plazma umístěno v rezonátoru. Měření změny



konstanty šíření je převedeno na měření rezonanční křivky a kvality rezonátoru. Z těchto údajů je možno určit hustotu elektronů a efektivní srážkovou frekvenci. [7]

## 10 BEZKONTAKTNÍ

### 10.1 Optické metody

Mezi hlavní optické metody patří metoda optické emisní spektroskopie, která je založená na detekci a analýze záření emitovaného excitovanými částicemi v plazmatu. Příkladem jejího užití je určování vibračních a rotačních teplot na základě změřené intenzity emitovaného záření. Základní rovnicí optické emisní spektroskopie je vztah mezi intenzitou emitovaného záření a koncentrací částic ve vybuzeném stavu. U molekul existují kromě elektronových kvantových stavů také stavy vibrační a rotační, které rovněž mohou být vybuzeny. S obsazením vybuzených hladin je (za určitých předpokladů) jako parametr rotační teplota. Rotační teplota má navíc velký význam proto, že se její hodnotou aproximuje hodnota teploty neutrálních částic, která má zásadní vliv na procesy probíhající v plazmatu. Optické metody obecně patří k hlavním diagnostickým metodám pro doutnavý výboj. Jejich předností je to, že takřka neovlivňují zkoumané plazma a že jejich použitím lze získat množství parametrů výboje. [7]

### 10.2 Vysokofrekvenční (mikrovlnné) metody

Pasivní metoda spočívá v detekci a zkoumání mikrovlnného záření vydávaného plazmatem v důsledku urychlení elektronů v poli atomů či iontů. V plazmatu navíc se detekuje tzv. šumový proud způsobený náhodným pohybem elektronů vlivem jejich urychlení. Změří-li se tento proud, je možné určit i šumovou teplotu, která se za určitých předpokladů pokládá rovna elektronové. Metoda detekce šumových teplot tedy umožňuje získání elektronové teploty. [7]

Srovná-li se četnost použití této metody a sondové diagnostiky, vzhledem k menší náročnosti se elektronová teplota častěji získává ze sondové charakteristiky. Ne vždy je ovšem možno sondu v plazmatu použít, a právě tehdy se detekce šumových teplot uplatní. [7]

### 10.3 Stanovení teploty neutrálního plynu z intenzity spektrálních čar

Výpočet teploty neutrálního plynu vychází z předpokladu, že jde o případ izotermického plazmatu, například obloukový výboj. Intenzita  $I_{nm}$  emisní spektrální čáry je dána vztahem

$$I_{nm} = A_{nm} h \nu_{nm} n \frac{g_m}{Z} e^{-\frac{E_n}{kT}} \quad (10.3.1),$$

kde  $A_{nm}$  je Einsteinův koeficient pravděpodobnosti spontánní emise,  $h$  je Planckova konstanta,  $\nu_{nm}$  je frekvence spektrálního přechodu,  $g_m$  je statická váha horního stavu přechodu,  $Z$  stavový součet,  $n$  počet atomů emitujících uvažovanou čáru,  $E_n$  je excitační (vybuzená) energie hladiny,  $k$  je Boltzmannova konstanta a  $T$  je teplota neutrálního plynu. Specifické parametry pro jednotlivé spektrální čáry sledovaného atomu ( $A_{nm}$ ,  $\nu_{nm}$ ,  $g_m$ ,  $E_n$ ) jsou pro značnou část atomů tabelované a ostatní veličiny jsou poté za daných podmínek konstanty. Je patrné, že intenzita jednotlivých spektrálních čar bude záviset na teplotě. Je-li naměřen ve spektru větší počet čar procházejících z různých excitovaných hladin (z přesnosti výpočtu o co největším rozmezí energií  $E_n$ ), dá se graficky zobrazit závislost  $\ln I_{nm} = \frac{I_{nm}}{A_{nm} g_{nm} \nu_{nm}}$  (10.3.2)

na energii  $E_{nm}$ . Její směrnice je rovna  $-\frac{1}{kT}$ , z které lze vypočítat teplotu neutrálního plazmatu. [10]

## 10.4 Stanovení teploty neutrálního plynu z rozšíření spektrálních čar

Podle Bohrovy podmínky pro emisi (absorpci) fotonu by měla být spektrální čára pozorovatelná jen při pevně dané vlnové délce a profil by měl odpovídat Diracově  $\delta$  funkci. Idealizovaná spektrální čára Diracovy  $\delta$  funkce vychází z energie obou elektronových stavů, mezi kterými dochází k přechodu, je konstantní. Jelikož neurčitost stanovení času není nekonečná, nelze přesně stanovit energii elektronových hladin. Je pozorováno záření o vlnových délkách v blízkém okolí „správné“ vlnové délky. Tento vznikající profil spektrální čáry se označuje jako přirozený a není možné jej žádným způsobem ovlivnit. [10]

Atomy emitující záření nejsou v klidu, ale pohybují se chaotickým pohybem rychlostmi odpovídajícími Maxwellovu rozdělení pro určitou teplotu. Pohyb emitujících částic vlivem Dopplerova jevu vede k malým změnám vlnové délky emitovaného záření, které se projeví rozšířením profilu spektrálních čar. Velikost šířky v poloviční výšce čáry je dána vztahem

$$\Delta\lambda_D = 7,16 \cdot \lambda \cdot \sqrt{\frac{T}{\mu}} \quad (10.3.3)$$

kde  $\lambda$  je vlnová délka příslušné spektrální čáry,  $\mu$  je hmotnost emitující částice a  $T$  je teplota emitujících částic neutrálního plynu. [10]

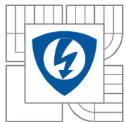
## 11 NÁVRHY PRO ROZŠÍŘENÍ LABORATORNÍ ÚLOHY

Při měření laboratorních úloh navrhuji několik rozšíření a prohloubení při zkoumání chování statické a dynamické charakteristiky elektrického oblouku. Navrhuji, aby Studenti zkoumali principy úspěšného zhašení stejnosměrného elektrického oblouku. První způsob je snížením napětí zdroje, kdy rozdílová přímka  $U_{OB} = U_z - RI_{OB}$  se posune pod V-A charakteristiku elektrického oblouku. Dojde k destabilizaci hoření a oblouk uhasíná. Druhý způsob je zvýšení odporu v obvodu. Při zvýšení sériového odporu v obvodu bude rozdílová přímka strmější, tudíž tato přímka se dostane pod V-A charakteristiku oblouku, čímž dojde k opětovné destabilizaci hoření a následně i k jeho uhasnutí. Třetí způsob zhašení elektrického oblouku je zvýšení jeho odporu. V laboratoři se provádí natahování délky oblouku a tím i velikost chladící plochy. S rostoucím výkonem ovšem nelze elektrický oblouk pouhým natažením uhasit. Proto se využívá tzv. ofukování.

Při radiálním ofukování by se na izolované páce přiblížily kovové rošty k elektrickému oblouku. Radiálním ofuknutím oblouku dojde k natažení elektrického oblouku a oblouk uhasíná.

V případě oblouku napájeného střídavým proudem sledujeme dynamickou charakteristiku oblouku na osciloskopu. Na osciloskopu lze pozorovat vyvolané změny na dané charakteristice a tak ověřovat vytvořené předpoklady o chování charakteristiky působením několika vlivů:

- změnou délky oblouku
- zvyšováním proudu
- lehkou konvekcí (mávnutím listu papíru) došlo k uhasnutí oblouku



Navrhuji umožnit nastavení polohy elektrod (vertikálně, horizontálně, souose a vychýlení elektrod vůči sobě) pomocí otočných pák, kterými by se tato poloha dala nastavit, a tím sledovat v laboratorní úloze podmínky symetrie dynamické charakteristiky elektrického oblouku.

Další návrh je materiál elektrod (uhlík, měď, wolfram,...) a jejich rozměry a tvary elektrod, jaký vliv mají na oblouk. Z hlediska odolnosti elektrod posoudit vlastnosti materiálu na jejich úbytku při opalování vlivem vysoké teploty oblouku.

Pomocí ventilátoru ochlazovat dolní nebo horní elektrodu a následně sledovat změny symetrie dynamické charakteristiky. Ventilátor ovšem nesmí být příliš silný, jelikož by docházelo k uhasnutí elektrického oblouku, pro tato měření by měl postačit malý ventilátor z počítače.

Vložení kovových roštů do elektrického oblouku přes izolovanou páku by došlo k rozdělení elektrického oblouku na několik menších a vzrostly by katodové a anodové úbytky, čímž dojde k uhasnutí oblouku.

## 12 NÁVRH PRO ZVÝŠENÍ BEZPEČNOSTI LABORATORNÍCH ÚLOH

Při hoření elektrického oblouku vlivem vysoké teploty dochází k opalování elektrod, čímž vznikají zplodiny uhlíku. Tyto zplodiny se uvolňují do ovzduší celé laboratorní místnosti, které vdechují studenti a vyučující. Jejich delší vdechování má neblahý vliv na zdraví člověka. Pro tento problém by se dal využít princip vysavače, který by plnil hned dvě funkce.

Stabilizaci elektrického oblouku: Výfuková část, ve které se žene proud vzduchu pomocí ventilátoru do přívodní hadice k trysce v tangenciálním směru. Vzniká vír vzduchu ve skleněné trubičce, kde se nachází elektrický oblouk, který je tím to vírem stabilizován.

Odsávání zplodin: Při opalování elektrod se do ovzduší uvolňují zplodiny uhlíku a dalších částic, které se nacházejí ve stabilizačním jádře, proto je potřeba umístit sací trubici, do které jsou tyto zplodiny nasávány. Ve vysavači se nachází filtr pevných částic, který zachytává částičky uhlíku, a přefiltrovaný vzduch je hnán zpět do vysavače.



## 13 ZÁVĚR

Tato bakalářská práce se věnovala elektrickému oblouku ve spínacích přístrojích. Byl popsán jeho vznik a vlastnosti při oddalování kontaktů. Elektrický oblouk má činný nelineární odpor, což znamená, že se vzrůstajícím proudem klesá jeho odpor a charakteristika elektrického oblouku je hyperbola.

Při zhašení elektrického oblouku ve stejnosměrném obvodu je snaha docílit podmínek pro úspěšné a trvalé uhašení, a to posunutím V-A charakteristiky elektrického oblouku k vyšším hodnotám napětí na oblouku (nad body stability hoření). Podmínky vedoucí pro uhasnutí stejnosměrného oblouku lze docílit také zvýšením sériového odporu v obvodu a snížením napětí zdroje, oba tyto způsoby jsou možné v laboratoři, avšak v praxi jsou nepoužitelné. Prakticky použitelný způsob zhašení stejnosměrného oblouku spočívá ve zvýšení odporu oblouku a tím i napětí na oblouku. Pro zvýšení odporu oblouku a obloukového napětí se používají speciální zhašecí komory, které oblouk prodlužují, chladí a kovové rošty zvyšují anodové a katodové úbytky.

V případě zhašení střídavého oblouku je situace jednodušší, jelikož každou půlperiodu proud prochází nulovou hodnotou. Podmínky pro uhašení oblouku a tím vypnutí střídavého obvodu závisí jednak na použitém principu vypínače, jednak na velikosti napětí obvodu a zejména na indukčnosti v obvodu.

V rámci této práce jsem se zúčastnil několika měření V-A charakteristiky stejnosměrného a střídavého oblouku v předmětu Elektrické přístroje (BEPR). Ve spolupráci se studenty jsem proměřil statickou a dynamickou V-A charakteristiku. Následně jsem porovnal teoretické předpoklady a hodnoty elektrického oblouku podle rovnice Ayrtonové s naměřenými hodnotami. Elektrický oblouk se choval dle očekávání podle teoretických předpokladů.

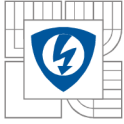
Z těchto poznatků jsem navrhl několik rozšíření pro laboratorní úlohy jako je vzájemná poloha elektrod, materiál a tvar elektrod, chlazení jedné elektrody pomocí ventilátoru.

Dále jsem proměřil mezní hodnoty pro vznik oblouku, pro uhlíkové elektrody s průměrem elektrod (9 mm a 13 mm). Zjistil jsem, že při stejné hodnotě napětí u elektrody s menším průměrem (9 mm) vzniká elektrický oblouk při nižších hodnotách proudu než u elektrod s větším průměrem.

Poslední část jsem věnoval popsáním některých diagnostických metod plazmatu oblouku použitelných k jeho analýze. Diagnostiky jsem rozdělil na kontaktní a bezkontaktní metody. Mezi kontaktní metody patří sondové metody, které při měření využívají sondy, jejichž pomocí lze určit přibližnou teplotu plazmatu. Další kontaktní metodou je metoda vysokofrekvenční. Plazma se vystaví vysokofrekvenčnímu poli a pozoruje se vzájemná interakce. Tak lze detekovat v plazmatu vedle sebe oblasti o různých koncentracích částic plazmatu.

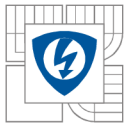
Mezi bezkontaktní metody patří optické metody. Hlavní optickou metodou je metoda optické emisní spektroskopie, která se využívá pro stanovení rotační teploty neutrálních částic. Další optickou metodou pro stanovení teploty neutrálního plynu je metoda pomocí spektrálních čar.

V závěru jsem nastínil možné návrhy, které by obohatily laboratorní úlohu při měření statické a dynamické V-A charakteristiky elektrického oblouku. Tímto způsobem mohou studenti více zkoumat vlivy působící na uhasnutí elektrického oblouku.



---

Při pozorování vlastností oblouku se z opalovaných elektrod uvolňují zplodiny, které studenti a vyučující vdechují, pro odstranění tohoto problému navrhuji odsávání, které by dané zplodiny odvětrávalo přes filtr pevných částic.



## LITERATURA

- [1] NOVOTNÝ, V. Elektrické přístroje silnoproudé. 1. vyd. Praha: ČVUT, 1975, 173 stran.
- [2] BÁRTA, K., VOSTRACKÝ, Z. Spínací přístroje velmi vysokého napětí: vysokošk. příručka pro vys. školy techn. směru. 1. vyd. Praha: SNTL, 1983, 445 s. Česká matice technická.
- [3] GROSS, B., VÁVRA, Z., HAVELKA, O., KRÁL, J., VANĚK, J., SVOBODA, D. Laboratorní a numerická cvičení z elektrických přístrojů. první. Brno: Editační středisko VUT Brno, 1983.
- [4] HRADÍLEK, Z., LÁZNIČKOVÁ, I., KRÁL, V. Elektrotepelná technika. první. Praha: ČVUT PRAHA, 2011. ISBN 9788001049389. Dostupné z: [http://k315.feld.cvut.cz/CD\\_MPO/CVUT-3-Elektrotepelná.pdf](http://k315.feld.cvut.cz/CD_MPO/CVUT-3-Elektrotepelná.pdf)
- [5] DRÁPALA, J., KURSA, M. *Elektrotechnické materiály*. Vyd. 1. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2012, 1 DVD-ROM. ISBN 978-80-248-2570-0.
- [6] ŠENK, J., LÁZNIČKOVÁ, I., GREGOR, J. *Aplikace elektrického oblouku* (rozpracovaná skripta FEKT VUT v Brně). [cit. 2015-04-9].
- [7] SCHMIEDT, L., JÍLEK, M. Plazma: Diagnostika plazmatu. *Plazma* [online]. 2014, s. 1 [cit. 2015-04-03]. Dostupné z: <http://physics.mff.cuni.cz/kevf/s4r/plazma/?p=2>
- [8] AUBRECHT, V. *Radiační transport energie v plazmatu elektrického oblouku* [online]. Brno, s. 109 [cit. 2015-05-05].
- [9] TECHNOTREND CZ s.r.o. 2015. *Technotrend* [online]. [cit. 2015-05-11]. Dostupné z: <http://www.technotrend.cz/stranky/teorie/teorie2.htm>
- [10] KRČMA, F., SLAVÍČEK, P. 2010. Optické metody diagnostiky plazmatu pro depozice tenkých vrstev za nízkého tlaku. *Plazma* [online]. [cit. 2015-05-12]. Dostupné z: <http://www.fch.vutbr.cz/~krcma/vyuka/plazma/optickadiagnostika.pdf>