

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Brno, 2021

Martin Fencel



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY

A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

ZHÁŠENÍ STEJNOSMĚRNÉHO OBLOUKU V PŘÍSTROJÍCH NÍZKÉHO NAPĚTÍ V OBLASTI KRITICKÝCH PROUDŮ

DC ARC EXTINGUISHING IN LOW VOLTAGE SWITCHING DEVICES FOR CRITICAL CURRENTS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Martin Fencí

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jakub Píška

BRNO 2021

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Student: Martin Fencel

Ročník: 3

ID: 203500

Akademický rok:
2020/21

NÁZEV TÉMATU:

Zhášení stejnosměrného oblouku v přístrojích nízkého napětí v oblasti kritických proudů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Popište princip zhášení stejnosměrného proudu u zadaného přístroje a vznik kritické oblasti.
2. Navrhněte vhodné metody pro výzkum zhášení oblouku v oblasti kritických stejnosměrných proudů.
3. Proveďte potřebné experimenty a stanovte závislost doby hoření oblouku na velikosti proudu a napětí.
4. Získané výsledky přehledně vyhodnoťte.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Havelka, O. a kol.: Elektrické přístroje, SNTL, 1985
- [2] ČSN EN 60947-2 ed. 4
- [3] ČSN EN 60898-1
- [4] Boulos, M. I., Fauchais, P., Pfender, E.: Thermal Plasmas, Volume 1, Springer Science & Business Media, 1994

Termín zadání: 8.2.2021

Termín odevzdání:
27.5.2021

Vedoucí práce: Ing. Jakub Píška

doc. Ing. Petr Toman,
Ph.D.

Předseda rady studijního program

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 se zabývá problematikou zhášení oblouku v oblasti kritických proudů při stejnosměrném napájení. První část teorie popisuje obecně oblouk a poté navazuje popis stejnosměrného oblouku a způsoby jeho zhášení. Druhá teoretická část se věnuje spektrální analýze, obzvláště emisní metodě. Taktéž jsou představeny metody pro výzkum kritických proudů při zhášení. Praktická část se skládá ze dvou měření. První měření spočívalo v měření spekter v závislosti na čase společně s průběhy napětí a proudu. V druhém měření šlo o závislost doby hoření oblouku na velikosti napětí a proudu. Závěr poté shrnuje výsledky jednotlivých měření, která jsou poté dána do souvislosti.

Klíčová slova

Oblouk; stejnosměrné napětí; oblast kritických proudů; zhášení; spektrální analýza; emisní metoda

Abstract

This bachelor's thesis deals with DC arc extinguishing for critical currents. The first, theoretical part describes and defines an arc, a DC arc and methods of its extinguishing. The second, theoretical part concerns spectral analysis – specifically, the emission method. Methods of research of extinguishing critical currents are also presented. The practical part consists of two measurements. The first measurement consists of spectrum measuring in time, in conjunction with voltage and current measurements. In the second measurement, the goal was to measure the dependence of arc burning time on voltage and current. The thesis concludes with summary of the results of each individual measurement and their presentation in the wider context.

Keywords

Arc; DC voltage; critical currents; extinguishing; spectral analysis, emission method

Bibliografická citace

FENCL, Martin. *Zhášení stejnosměrného oblouku v přístrojích nízkého napětí v oblasti kritických proudů* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-05-07]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/134975>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky. Vedoucí práce Jakub Píška.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta:	Martin Fencel
VUT ID studenta:	203500
Typ práce:	Bakalářská práce
Akademický rok:	2020/21
Téma závěrečné práce:	Zhášení stejnosměrného oblouku v přístrojích nízkého napětí v oblasti kritických proudů

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné 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 závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné 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 části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 27. května 2021

podpis autora

Poděkování

Děkuji svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Jakubovi Píškovi za vedení a rady při zpracování bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat Mgr. Petrovi Klocovi, Ph.D. za pomoc při zpracování problematiky spektrální analýzy a také děkuji Ing. Jiřímu Valentovi, Ph.D., Ing. Lukášovi Dostálovi, Ph.D. a Ing. Davidovi Šimkovi za pomoc při měření na zkratovně ve Vědeckotechnickém parku profesora Lista.

V Brně dne: 27. května 2021

podpis autora

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ	9
SEZNAM TABULEK	11
ÚVOD	12
1. ELEKTRICKÝ OBLOUK	13
1.1 CHARAKTERISTIKA OBLOUKU	13
2. STEJNOSMĚRNÝ ELEKTRICKÝ OBLOUK	16
2.1 STABILITA OBLOUKU	17
2.2 ZHÁŠENÍ OBLOUKU	19
2.2.1 <i>Způsoby zhášení oblouku</i>	20
2.2.2 <i>Magnetická zhášedla</i>	23
2.2.3 <i>Roštová zhášedla</i>	24
2.2.4 <i>Štěrbinová zhášedla</i>	25
3. NORMA ČSN EN 60947-2 ED. 4	26
4. VHODNÉ METODY PRO VÝZKUM KRITICKÝCH PROUDŮ	28
4.1 SPEKTRÁLNÍ ANALÝZA	28
4.2 POUŽITÍ VYSOKORYCHLOSTNÍ KAMERY	28
5. SPEKTRÁLNÍ ANALÝZA	29
5.1 EMISNÍ METODA	30
5.2 SPEKTROSKOPICKÝ SYSTÉM	31
5.3 TYPY SPEKTROMETRŮ	32
5.4 DIAGNOSTICKÁ METODA – IDENTIFIKACE ČÁSTIC	32
6. MĚŘENÍ SPEKTER OBLOUKU	33
6.1 POUŽITÉ PŘÍSTROJE	35
6.2 POČÁTEČNÍ NASTAVENÍ	36
6.3 MĚŘENÍ SPEKTER	36
6.3.1 <i>První měření</i>	36
6.3.2 <i>Druhé měření</i>	43
6.3.3 <i>Třetí měření</i>	48
6.3.4 <i>Čtvrté měření</i>	52
6.3.5 <i>Páté měření</i>	55
6.4 ANALÝZA MĚŘENÍ	61
7. MĚŘENÍ ZÁVISLOSTI DOBY HOŘENÍ OBLOUKU NA NAPĚTÍ A PROUDU	63
7.1 MĚŘENÍ PŘI NAPĚTÍ 150 V	64
7.2 MĚŘENÍ PŘI NAPĚTÍ 200 V	65
7.3 MĚŘENÍ PŘI NAPĚTÍ 250 V	66
7.4 MĚŘENÍ PŘI NAPĚTÍ 300 V	69
7.5 MĚŘENÍ PŘI NAPĚTÍ 350 V	70
7.6 MĚŘENÍ PŘI NAPĚTÍ 400 V	72
7.7 ANALÝZA MĚŘENÍ	74

8. ZÁVĚR.....	77
LITERATURA.....	79
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	81

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Rozložení teploty elektrického oblouku [3].....	13
1.2	Krátký oblouk [3]	14
1.3	Dlouhý oblouk [3].....	15
2.1	Statická V-A charakteristika oblouku [2]	16
2.2	Statická V-A s rozdílovou přímkou [2].....	17
2.3	Obvod oblouku s předřadným odporem [2].....	18
2.4	Rozdělení na kladnou a zápornou oblast [4].....	19
2.5	Posun V-A charakteristiky zvětšováním odporu oblouku [2].....	20
2.6	Zvětšování sériového odporu [2]	21
2.7	Snižování napětí zdroje [2].....	22
2.8	Průběh napětí (dole) a proudu (nahore) oblouku [2]	23
2.9	Oblouk unášený médiem (vpravo) a elektrodynamickými silami (vlevo) [2].....	24
2.10	Řez roštovým zhašedlem [2]	24
2.11	Řez štěrbinovým zhašedlem [2].....	25
3.1	Teoretický průběh závislosti vypínacího času na velikosti proudu s naznačenou kritickou oblastí [2].....	27
5.1	Graf závislosti intenzity toku energie na frekvenci, resp. vlnové délce [16]	30
6.1	Schéma napájecího obvodu	33
6.2	Schéma měřicího obvodu	34
6.3	Zapojení pracoviště.....	34
6.4	Detail na vyříznuté otvory	35
6.5	Graf závislosti intenzity vyzářených prvků na vlnové délce a času kamera 68 – první měření	37
6.6	Graf závislosti intenzity vyzářených prvků na vlnové délce a času kamera 69 – první měření	38
6.7	Spektrum v čase 27 ms kamera 68 – první měření.....	39
6.8	Přiblížení spektra v čase 27 ms na sodík kamera 68 – první měření.....	40
6.9	Spektrum stříbra v čase na vlnové délce 521,42400 nm kamera 68 – první měření.....	40
6.10	Spektrum vodíku v čase na vlnové délce 656,97247 nm kamera 68 – první měření.....	41
6.11	Spektrum stříbra v čase na vlnové délce 523,12700 nm kamera 69 – první měření.....	41
6.12	Spektrum vodíku v čase na vlnové délce 658,84100 nm kamera 69 – první měření.....	42
6.13	Vývoj napětí oblouku v čase – první měření	42
6.14	Graf závislosti intenzity vyzářených prvků na vlnové délce a času kamera 68 – druhé měření.....	44
6.15	Graf závislosti intenzity vyzářených prvků na vlnové délce a času kamera 69 – druhé měření.....	44
6.16	Spektrum stříbra v čase na vlnové délce 521,44720 nm kamera 68 – druhé měření	45
6.17	Spektrum vodíku v čase na vlnové délce 656,97247 nm kamera 68 – druhé měření	45
6.18	Spektrum stříbra v čase na vlnové délce 523,12700 nm kamera 69 – druhé měření	46
6.19	Vývoj napětí oblouku v čase – druhé měření.....	46
6.20	Graf závislosti intenzity vyzářených prvků na vlnové délce a času kamera 68 – třetí měření	48
6.21	Graf závislosti intenzity vyzářených prvků na vlnové délce a času kamera 69 – třetí měření	49
6.22	Spektrum stříbra v čase na vlnové délce 521,44720 nm kamera 68 – třetí měření	49
6.23	Spektrum vodíku v čase na vlnové délce 656,79773 nm kamera 68 – třetí měření.....	50
6.24	Spektrum stříbra v čase na vlnové délce 523,12700 nm kamera 69 – třetí měření	50
6.25	Vývoj napětí oblouku v čase – třetí měření	51
6.26	Graf závislosti intenzity vyzářených prvků na vlnové délce a času kamera 68 – čtvrté měření.....	52
6.27	Graf závislosti intenzity vyzářených prvků na vlnové délce a času kamera 69 – čtvrté měření.....	53
6.28	Spektrum stříbra v čase na vlnové délce 521,63050 nm kamera 68 – čtvrté měření.....	53
6.29	Spektrum vodíku v čase na vlnové délce 656,79773 nm kamera 68 – čtvrté měření.....	54

6.30	Spektrum stříbra v čase na vlnové délce 523,12700 nm kamera 69 – čtvrté měření.....	54
6.31	Vývoj napětí oblouku v čase – čtvrté měření.....	55
6.32	Porovnání polohy oblouku – vrchní kontakt.....	56
6.33	Porovnání polohy oblouku – spodní kontakt.....	56
6.34	Graf závislosti intenzity vyzářených prvků na vlnové délce a času kamera 68 – páté měření.....	57
6.35	Graf závislosti intenzity vyzářených prvků na vlnové délce a času kamera 69 – páté měření.....	57
6.36	Spektrum stříbra v čase na vlnové délce 521,44720 nm kamera 68 – páté měření.....	58
6.37	Spektrum vodíku v čase na vlnové délce 656,97247 nm kamera 68 – páté měření.....	58
6.38	Spektrum stříbra v čase na vlnové délce 548,95337 nm kamera 69 – páté měření.....	59
6.39	Vývoj napětí oblouku v čase – páté měření.....	59
6.40	Snímky z vysokorychlostní kamery – intenzita světla.....	60
6.41	Snímky z vysokorychlostní kamery – intenzita světla.....	61
6.42	Detail průběhu napětí oblouku v čase – první měření.....	62
7.1	Graf závislosti vypínacího času na velikosti proudu při napětí 150 V – přímý směr.....	64
7.2	Graf závislosti vypínacího času na velikosti proudu při napětí 150 V – obrácený směr.....	64
7.3	Graf závislosti vypínacího času na velikosti proudu při napětí 200 V – přímý směr.....	65
7.4	Graf závislosti vypínacího času na velikosti proudu při napětí 200 V – obrácený směr.....	65
7.5	Graf závislosti vypínacího času na velikosti proudu při napětí 250 V – přímý směr.....	66
7.6	Graf závislosti vypínacího času na velikosti proudu při napětí 250 V – obrácený směr.....	66
7.7	Graf průběhu napětí a proudu pro proud 8 A – přímý směr.....	67
7.8	Graf detailu průběhu napětí a proudu pro proud 8 A – přímý směr.....	68
7.9	Graf průběhu napětí a proudu pro proud 32 A – přímý směr.....	68
7.10	Graf průběhu napětí a proudu pro proud 63 A – přímý směr.....	69
7.11	Graf závislosti vypínacího času na velikosti proudu při napětí 300 V – přímý směr.....	69
7.12	Graf závislosti vypínacího času na velikosti proudu při napětí 300 V – obrácený směr.....	70
7.13	Graf závislosti vypínacího času na velikosti proudu při napětí 350 V – přímý směr.....	70
7.14	Graf závislosti vypínacího času na velikosti proudu při napětí 350 V – obrácený směr.....	71
7.15	Graf závislosti vypínacího času na velikosti proudu při napětí 400 V – přímý směr.....	72
7.16	Graf závislosti vypínacího času na velikosti proudu při napětí 400 V – obrácený směr.....	72
7.17	Graf průběhu napětí a proudu pro proud 32 A – přímý směr.....	73
7.18	Graf závislosti vypínacího času na velikosti proudu pro oba směry průchodu proudu pro napětí 350 V.....	74
7.19	Graf závislosti vypínacího času na velikosti proudu pro všechna napětí – přímý směr.....	75
7.20	Graf závislosti vypínacího času na velikosti proudu pro všechna napětí – obrácený směr.....	75

SEZNAM TABULEK

2.1	Tabelované hodnoty konstant pro různé konfigurace [4]	17
-----	---	----

ÚVOD

Vznik elektrického oblouku při vypínacích pochodech u vyšších napětových hladin (nn a vyšší) je jejich nedílnou součástí. Jejich působením se mohou natavovat kontakty, což může zapříčinit až selhání vypínače. Proto je snaha, aby čas hoření oblouku byl co nejkratší. Aby bylo možné toho dosáhnout, je třeba znát V-A charakteristiku oblouku, pochody napětí a proudu při vypínání a mohlo se tak správně na oblouk působit. Ve většině případů se na oblouk působí tak, aby se dostal do zhasací komory, která je odolná vůči působení oblouku. V komoře probíhá deionizace a následný zánik oblouku.

Pro stejnosměrné napětí existuje oblast kritických proudů, která komplikuje zhasení oblouku. Tato oblast se projevuje převážně u malých proudů, tedy v rozmezí jednotek až desítek ampérů v závislosti na velikosti přístroje. Při vypínání menších proudů ve většině případů stačí pro uhašení oblouku rekombinační pochody. Jenomže v kritické oblasti nejsou rekombinační pochody dostatečné. Tím pádem se oblouk musí dostat do nebo aspoň na kraj zhasací komory. Nicméně oblouk nemá v této oblasti dostatečně velkou elektrodynamickou sílu, aby byl rychle vtažen do blízkosti zhasací komory. Proto se kritická oblast projevuje prodlužováním času hoření oblouku. To má za následek zvýšení namáhání kontaktů, což je nežádoucí jev. V nejhorších případech, kdy by oblouk dosahoval ještě menší elektrodynamické síly, by mohlo nastat, že se oblouk nedostane do zhasací komory a došlo by k jeho trvalému hoření, i když by přístroj dokázal vypnout mnohem větší proudy.

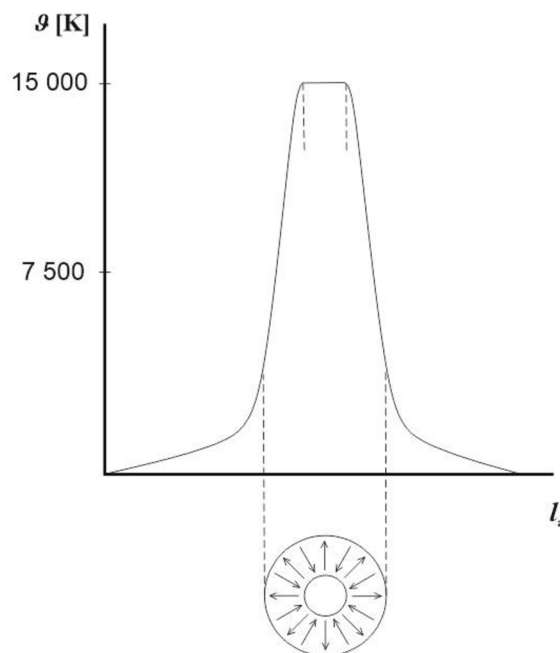
Bakalářská práce se skládá z osmi kapitol. První kapitola se věnuje obecně elektrickému oblouku. Druhá kapitola se zaměřuje přímo na stejnosměrný elektrický oblouk a způsoby jeho zhasení. Norma popisující měření kritické oblasti přístroje se nachází ve třetí kapitole. Ve čtvrté kapitole jsou představeny vhodné metody pro výzkum kritických proudů. Pátá kapitola popisuje spektrální analýzu. V šesté a sedmé kapitole jsou popsána proběhnuvší měření. Měření spekter oblouku je v šesté kapitole, zatímco stanovení závislosti doby hoření oblouku se nachází v sedmé kapitole. Osmá kapitola shrnuje celou práci.

1. ELEKTRICKÝ OBLOUK

Obecně je elektrický oblouk hořící výboj v plynu, který může hořet libovolně dlouho, dokud jsou v něm ionizační pochody v rovnováze s rekombinačními pochody. Stejnoseměrný elektrický oblouk znamená, že je napájen stejnosměrným zdrojem. Jádrem oblouku je tvořeno ionizovaným plynem neboli plazmatem, obal je tvořen většinou disociovaným plynem. [1][2][3]

1.1 Charakteristika oblouku

Mezi jednu z hlavních charakteristik oblouku patří velký proud, obvykle větší než 1 A, procházející obloukem. Díky průchodu proudem má oblouk vysokou teplotu, a proto vyzařuje intenzivní světlo. Oblouk se skládá z obalu, který dosahuje teploty 7 000 K a z jádra, které dosahuje teploty až 15 000 K (viz obrázek 1.1). Teplota jednotlivých složek závisí na prostředí a intenzitě chlazení. Nastává zde paradox, protože intenzivně chlazené oblouky dosahují teplot 15 000 K a oblouky chlazené „pouze“ vzduchem se pohybují kolem teploty 6 000 K. To je způsobeno zmenšením průměru jádra oblouku a zvýšením proudové hustoty. Následkem toho se zvýší odpor oblouku, což vyústí ve zvýšení teploty. Chlazení oblouku tedy spočívá ve zmenšování průměru jádra oblouku. Obal, kde jsou velké teplotní spády, slouží jako výměník, který předává teplo mezi obloukem a okolním prostředím. [3][4][5][7]



Obrázek 1.1 Rozložení teploty elektrického oblouku [3]

Další z hlavních charakteristik, která souvisí s teplotou oblouku, je intenzivní vyzářování světla. Čím vyšší teplota, tím intenzivnější světlo. Teplota má přímý vliv na intenzitu světla, ale na teplotu má velký vliv procházející proud, což je také jedna z hlavních charakteristik oblouku.

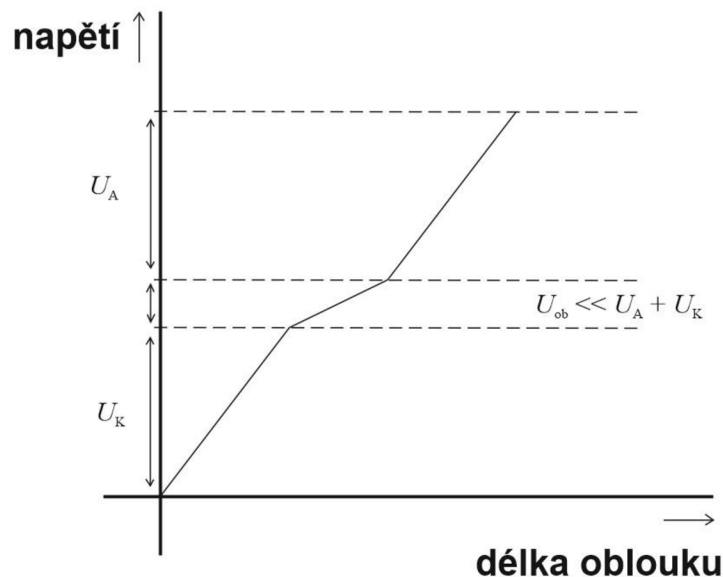
Katodová skvrna je prostor před katodou, kde je velká proudová hustota a vysoká teplota. Do katodového prostoru se vracejí rekombinované ionty jako neutrální atomy s velkou energií. Nemohou ionizovat přímým rázem, a tak dodávají tepelnou energii plynu před katodou. Následkem toho je zvýšení teploty, a protože je prostor chlazený vzduchem, musí se pro udržení teploty zmenšit jeho velikost, tedy zvětšit hustota.

Úbytky napětí na elektrodách pro krátký a dlouhý oblouk jsou různé, jak je možné vidět na obrázku 1.2 a 1.3. Krátký oblouk charakterizuje první a třetí člen rovnice Ayrtonové

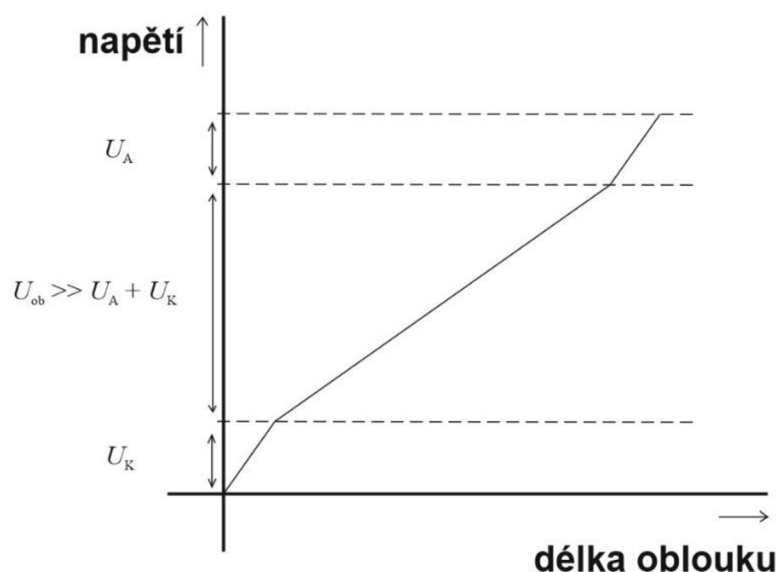
$$U_{ob} = U_A + U_K = \alpha + \frac{\gamma}{I_a}. \quad (1.1)$$

Z rovnice je vidět, že napětí na oblouku dostaneme součtem katodového a anodového úbytku. U dlouhého oblouku je katodový a anodový úbytek malý a dá se zanedbat. Úbytek na trupu oblouku tvoří druhý a čtvrtý člen rovnice Ayrtonové

$$U_{ob} = \beta \cdot l_a + \frac{\delta \cdot l_a}{I_a}. \quad (1.2)$$



Obrázek 1.2 Krátký oblouk [3]



Obrázek 1.3 Dlouhý oblouk [3]

Důležitý pro oblouky je i materiál kontaktů, ze kterého byly vyrobeny. Převážně se používají kovy jako stříbro, zlato a měď. Pro zlepšení vlastností kontaktních materiálů se používají kompozity na bázi již zmíněných kovů. [6]

Oblouky je možné také rozlišit podle složení jejich výbojové dráhy, a to na oblouky v párách elektrodových kovů a oblouky v plynech. Nicméně jde spíše o rozdělení fází existence oblouku. Tzv. kovová fáze vzniká po dosažení teploty tavení kontaktního materiálu a následného oddalování kontaktů. Oddálením kontaktů vznikne kovový můstek, který se kvůli dalšímu oddalování kontaktů stává nestabilním a nakonec praskne. Tím nastává přechod do tzv. plynné fáze, kdy se zapálí oblouk díky termické ionizaci.

Neřeší se jen složení výbojové dráhy, ale i její tvar. Z tohoto hlediska se oblouky dělí na stabilizované a volně hořící. Volně hořící oblouk se vyznačuje nesouměrným tvarem, který je zapříčiněn tepelným prouděním ve výbojové dráze a magnetickým polem proudu, který jím prochází. Stabilizovaného oblouku je možno dosáhnout použitím určité stabilizační metody např. nádoba s kapalinou, vodní nebo plynný vír. [1][2][5]

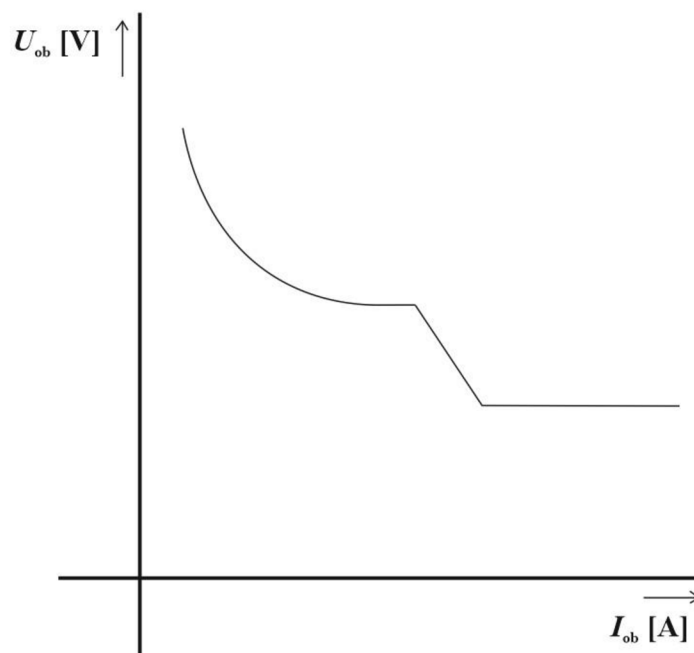
2. STEJNOSMĚRNÝ ELEKTRICKÝ OBLOUK

Velice důležitým, dosud nezmiňným, rozdělením oblouků je typ napájení. Podle typu napájení se oblouky dělí na střídavé a stejnosměrné. Tato bakalářská práce se věnuje obloukům stejnosměrným.

V-A charakteristika u stejnosměrného oblouku se nazývá statickou V-A charakteristikou. Je to tedy závislost napětí na elektrodách U_{ob} na procházejícím proudu I_{ob} . Tato závislost se vyjádří jako funkce

$$U_{ob} = f(I_{ob}). \quad (2.1)$$

Charakteristiku lze pozorovat na obrázku 2.1. Dělí se na dvě části: klesající v oblasti malých proudů, která má tvar hyperboly, a mírně stoupající až konstantní v oblasti velkých proudů. Mezi těmito dvěma částmi je při určité velikosti pásmo neklidného hoření oblouku, které se vyznačuje tzv. syčením oblouku. Tvar této oblasti se blíží lineárně klesajícímu průběhu.



Obrázek 2.1 Statická V-A charakteristika oblouku [2]

V-A charakteristikou v oblasti malých proudů se zabývala britská vědkyně Hertha Ayrtonová. Experimentálně stanovila rovnici hyperboly popisující průběh V-A charakteristiky v oblasti klidného hoření oblouku

$$U_{ob} = \alpha + \beta \cdot l_a + \frac{\gamma + \delta \cdot l_a}{I_a}. \quad (2.2)$$

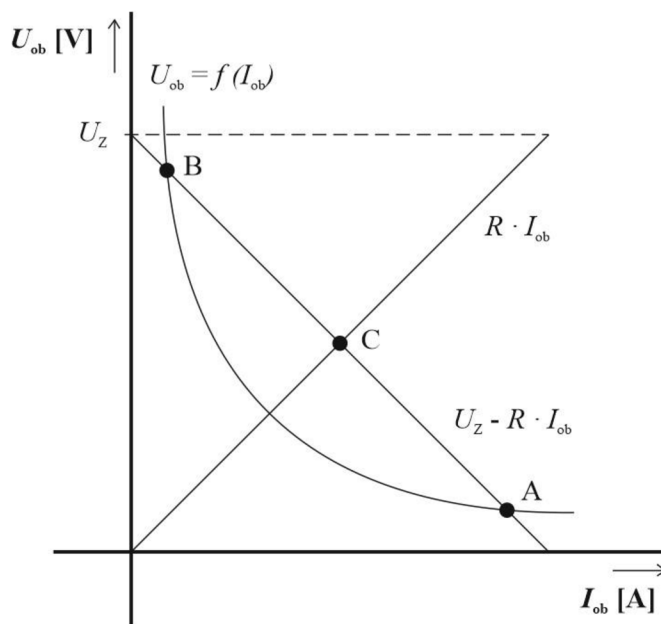
Konstanty α , β , γ , δ jsou různé pro určité prostředí, kde oblouk hoří, a rozměr, tvar a materiál elektrod. [5]

Tabulka 2.1 Tabelované hodnoty konstant pro různé konfigurace [5]

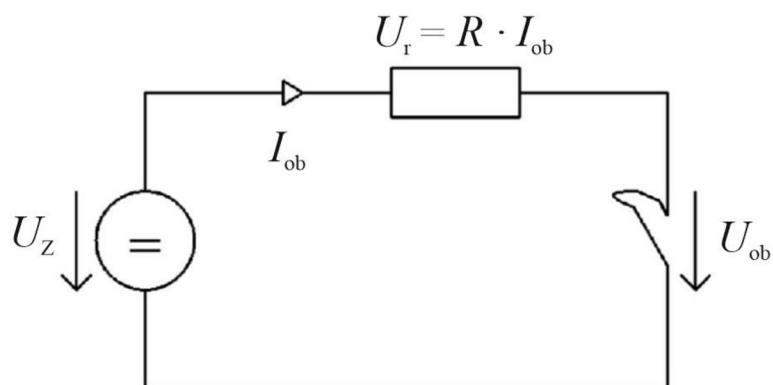
Elektrody	Prostředí	α [V]	β [V/m]	γ [W]	δ [W/m]	Poznámka
Homogenní uhlík \varnothing 10 mm	vzduch	40	1200	20	10000	$l = 1-7$ mm $I = 5-20$ A
Měděné tyče \varnothing 10 mm	vzduch	17	2000	22	10000	$l = 1-10$ mm $I = 5-15$ A
Železné tyče \varnothing 10 mm	vzduch	15	1000	22	15000	$l = 5-30$ mm $I = 2-10$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

2.1 Stabilita oblouku

Pro stabilitu oblouku je důležitý předřadný odpor. Pokud by v obvodu nebyl, oblouk by byl labilní a při vzrůstu proudu oblouku by kleslo jeho napětí. To by mělo za následek růst proudu až do nekonečna, protože napětí zdroje je větší než napětí oblouku.



Obrázek 2.2 Statická V-A s rozdílovou přímkou [2]



Obrázek 2.3 Obvod oblouku s předřadným odporem [2]

Díky předřadnému odporu vznikne úbytek napětí o velikosti

$$U_r = R \cdot I_{ob}. \quad (2.3)$$

Tento úbytek se odečte od napětí zdroje a jak lze pozorovat na obrázku 2.2, odečtením se dostane přímka daná rovnicí

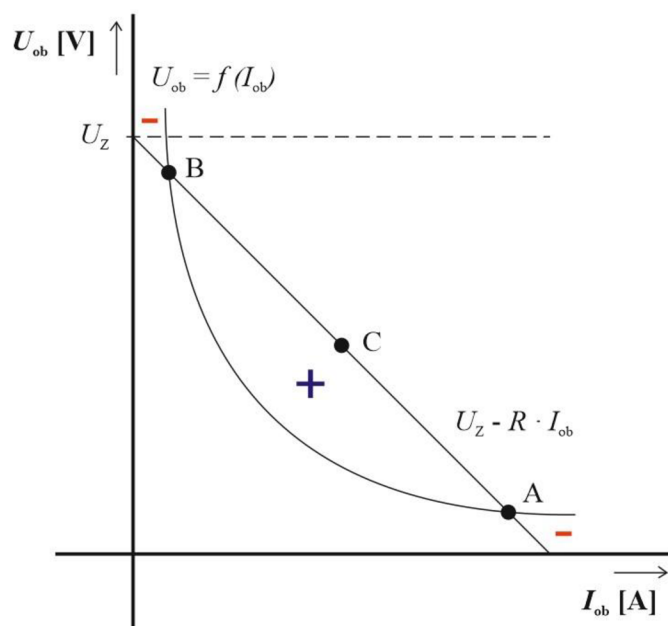
$$U_{ob} = U_Z - R \cdot I_{ob}, \quad (2.4)$$

která se nazývá rozdílová přímka. Ta protíná charakteristiku ve dvou bodech a určuje body, ve kterých oblouk může existovat. Avšak aby oblouk byl stabilní, musí splňovat dvě podmínky stabilního hoření:

$$1) \text{ II. K. z. - } U_{ob} = U_Z - R \cdot I_{ob}$$

$$2) \frac{dU_{ob}}{dI} + \frac{dU_{I_{ob}R}}{dI} > 0 \text{ tzv. Kaufmannova podmínka stabilního hoření oblouku}$$

První podmínku splňují oba body A i B. Nicméně druhou podmínku již splňuje jen jeden bod, a to bod A. Z geometrického hlediska se může Kaufmannova podmínka vyjádřit: „oblouk je stabilní v bodu, ve kterém je absolutní hodnota směrnice tečny charakteristiky menší než odpor R .“ [2] Pokud se rozdělí I. kvadrant charakteristikou oblouku $U_{ob} = f(I_{ob})$, je možné body nad charakteristikou označit jako kladnou oblast a body pod charakteristikou jako zápornou oblast. Potom se dá podmínka stability vyjádřit: „Oblouk je stabilní v bodu, ve kterém při probíhání rozdílové přímky ve směru rostoucích proudů přecházíme z kladného oboru do záporného.“ [2]



Obrázek 2.4 Rozdělení na kladnou a zápornou oblast [4]

Rozdílová přímka se může stát tečnou charakteristiky oblouku, pokud by se charakteristika oblouku posunula k vyšším napěťovým hodnotám. Toho se dá dosáhnout zvyšováním předřadného odporu. Poté body A a B splývají do jednoho bodu C, který udává minimální napětí a proud, při kterém může oblouk existovat. Tím se oblouk dostane stavu labilního hoření a další zvyšování odporu by mělo za následek posunutí charakteristiky nad rozdílovou přímku do oblasti nestability, což vyústí ve zhasnutí oblouku. Tohoto posunutí V-A charakteristiky se využívá ve zhášení ss oblouků.[1][2][5][8]

2.2 Zhášení oblouku

Vypínací oblouk vzniká při oddalování kontaktů. V obvodech nn je to zásluhou termické ionizace, kdy mezi kontakty vznikají kovové můstky, které, jak se oddalováním kontaktů prodlužují, zmenšují svůj průměr a zvětšuje se proudová hustota společně s teplotou. Poté dojde buď k přetržení nebo vypaření můstku, páry kovů zapříčiní ionizaci okolního plynu a zažehne se oblouk. U vn a vvn převládá hypotéza o nahromaděné magnetické energii v indukčnostech, která při oddalování kontaktů ionizuje okolní plyn a prorazí malou vzdálenost mezi kontakty.

Aby bylo možné oblouk zhasit, je potřeba, aby komponenty pro zhášení byly tepelně a mechanicky odolné. Teplota oblouku dosahuje vysokých teplot (viz kapitola 1.1) a namáhá kontakty. Proto se na oblouk při vypínání pohlíží jako na nežádoucí jev. Kontakty jsou natavovány při každém zapálení oblouku a pokud je zhášení oblouku nedostatečně rychlé, mohlo by dojít k většímu natavení kontaktů a při dalším vypínání

k selhání. Z tohoto důvodu je snaha o co nejkratší čas existence oblouku. Ovšem oblouk zároveň prospívá obvodu. V sepnutém obvodu je nahromaděná elektromagnetická energie, která se právě v oblouku přemění na tepelnou energii a ta se následně vyzáří. Díky tomu se dá jednodušeji odvádět energie z oblouku. Bez oblouku by mezi kontakty vznikalo přepětí, které by mohlo poškodit izolaci vypínače a ostatních komponentů.

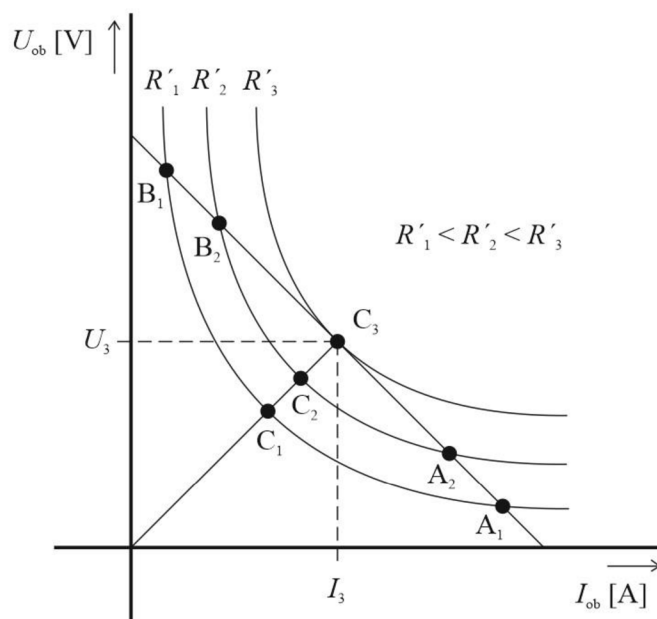
Zjednodušeně se dá říct, že podstatou zhášení oblouku je vytvořit nějakým způsobem nerovnováhu mezi ionizačními a deionizačními pochody s tím cílem, aby převládaly pochody deionizační. „Protože při vypínání stejnosměrných obvodů jde převážně o dlouhé oblouky, můžeme zanedbat elektrodové úbytky napětí a považovat za rozhodující vlastnosti plazmatu vypínacího oblouku.“ [5] Jde tedy o zmenšení vodivosti sloupce oblouku.

$$\frac{I_{ob}}{U_{ob}} = \frac{I_{ob}}{El_a} = \frac{en_e b_e E}{El_a} \cdot \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi}{4} en_e b_e \cdot \frac{d^2}{l_a} \quad (2.5)$$

Z rovnice se dá vyčíst, že zmenšení vodivosti můžeme zajistit zmenšením d nebo n_e a zvětšením l_a . [1][2][5]

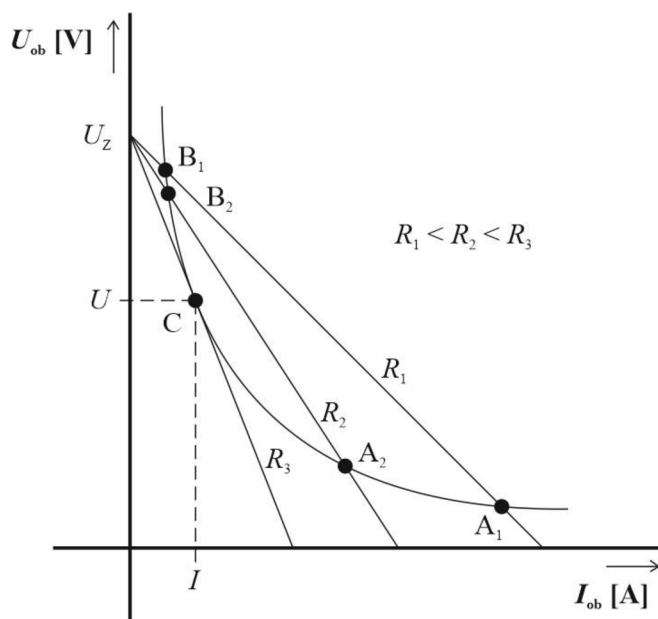
2.2.1 Způsoby zhášení oblouku

Nutnou podmínkou, a jedním ze způsobů pro zhášení ss oblouků je posun V-A charakteristiky do oblastí nestability, tedy zvyšování odporu oblouku (obrázek 2.5). To má za následek zvyšování obloukového napětí až do bodu C₃, kde splyne bod A₃ a B₃. Bod C₃ také vyjadřuje nejmenší možný proud a napětí, při kterém ještě může oblouk existovat.



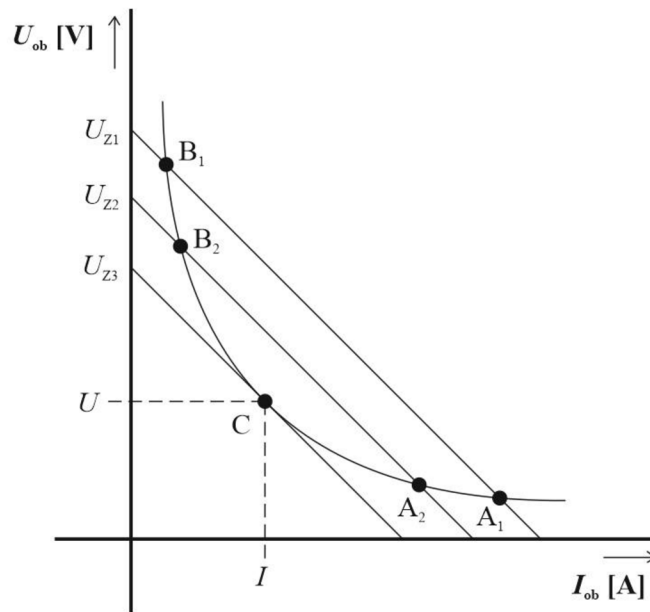
Obrázek 2.5 Posun V-A charakteristiky zvětšováním odporu oblouku [2]

Existují ještě další dva způsoby posunu V-A charakteristiky do oblasti nestability. Prvním je zvětšování sériového odporu v obvodu (obrázek 2.6). Jak už bylo řečeno, předřadný odpor se ve V-A charakteristice vykresluje rozdílovou přímkou, která může ukázat stabilní a labilní bod hoření při kompatibilních parametrech. Zvětšováním tohoto odporu se mění sklon rozdílové přímky a body A a B se přibližují k sobě až do bodu C, který udává minimální napětí a proud, při kterém může oblouk existovat.



Obrázek 2.6 Zvětšování sériového odporu [2]

Druhým způsobem je snižování napětí zdroje (obrázek 2.7). Princip je obdobný. Body A a B se přibližují, až splynou v jeden bod C.



Obrázek 2.7 Snižování napětí zdroje [2]

V praxi je ale využitelný pouze první zmíněný způsob posunu V-A charakteristiky, a to zvyšování odporu oblouku. Hodnota odporu oblouku souvisí přímo s vodivostí sloupce oblouku a jejími parametry: d , n_e a l . Změnu těchto parametrů je možné vyvolat různými způsoby. Průměr a počet volných elektronů souvisí s chlazením oblouku, přičemž průměr se dá změnit i vehnáním oblouku do úzké štěrbiny. Délku oblouku je možno prodloužit oddálením kontaktů nebo vehnáním oblouku do zhasací komory.

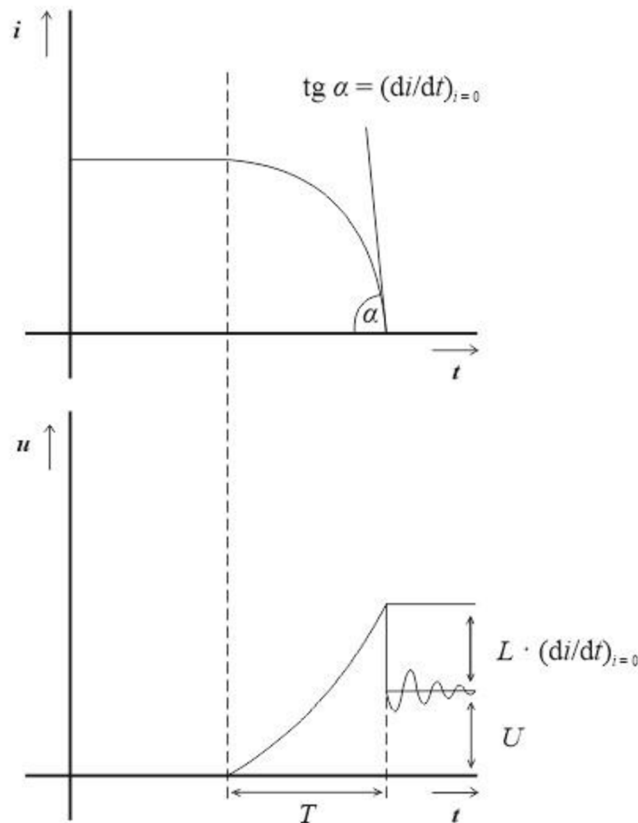
Díky zvyšování odporu roste napětí oblouku a klesá proud v obvodu. To znamená, že vypínací proud se snižuje, což je výhodné, ale změna proudu zapříčiní úbytek napětí na tlumivce

$$U_L = -L(di/dt). \quad (2.6)$$

Toto napětí má stejný smysl jako napětí zdroje a sečtou se.

$$R_S I_{ob} + U_A = U_Z + L \frac{di}{dt}. \quad (2.7)$$

Tím pádem je v okamžiku zhasnutí oblouku celkové napětí oblouku větší než napětí zdroje a na kontaktech vzniká přepětí $L \cdot (di/dt)_{i=0}$.



Obrázek 2.8 Průběh napětí (dole) a proudu (nahore) oblouku [2]

Na průběhu napětí lze pozorovat, jak se zvýší napětí z počáteční hodnoty napětí zdroje. Při zhasnutí oblouku pak přechází tlumeným přechodným dějem zase zpátky na počáteční napětí. Z průběhu se dá vyčíst, že čím je větší strmost zmenšování proudu, tím rychleji oblouk zhasne. Problémem je ale, že strmost di/dt zároveň způsobuje přepětí, které namáhá izolaci. Při menší strmosti zmenšování proudu oblouk nebude způsobovat přepětí, ale bude hořet delší dobu a tepelně namáhat kontakty. Z toho vyplývá, že pro zhašecí pochody existují diametrálně odlišné nároky. Tento problém se vyřešil speciální konstrukcí zhašedel: „*nejprve deionizace a strmost zmenšování proudu je co největší (totiž v oblasti maxima vypínaného proudu) a potom, v oblasti přibližování proudu k nule, je deionizace a strmost co nejmenší.*“ [2] [1][2][5]

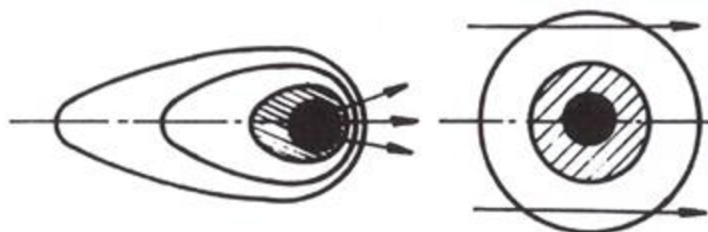
2.2.2 Magnetická zhašedla

Zhašedel je několik typů, všechna ale nejsou vhodná pro zhašení stejnosměrných oblouků, a proto jsou představeny jen ty vhodné.

Vhodnými zhašedly pro stejnosměrné oblouky jsou zhašedla magnetická, která se řadí ke zhašedlům s vlastní zhašecí energií. Magnetická zhašedla pracují na principu interakce magnetického pole oblouku a magnetického pole proudovodné dráhy, které tvoří cívka, zařazená do série s vypínacími kontakty. „*Smysl vinutí cívky musí být*

orientován tak, aby elektrodynamické síly působící na oblouk hořící mezi vzdalujícími se kontakty vtáhly oblouk do zhášecí komory.“ [9]

Způsob pohybu oblouku v magnetických zhášedlech má velkou výhodu oproti olejovým nebo plynovým zhášedlům. Tato výhoda je zapříčiněna vzájemným působením magnetických polí, kdy se jádro oblouku posunuje, díky působícím elektrodynamickým silám, na kraj obalu oblouku, kde se dostává do styku s okolím a zvyšuje se účinnost jeho chlazení.

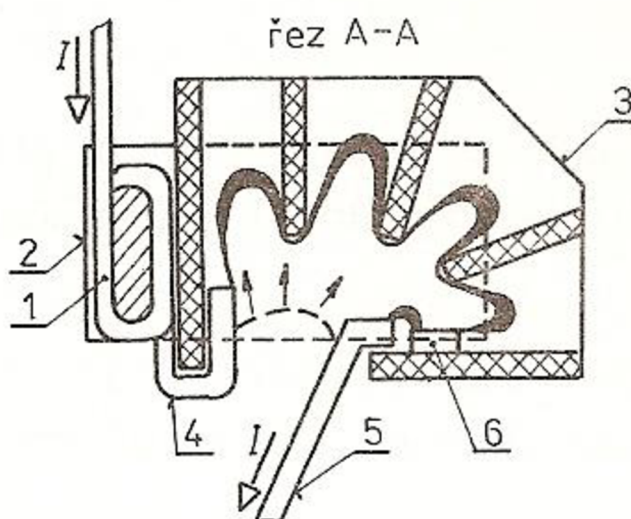


Obrázek 2.9 Oblouk unášený médiem (vpravo) a elektrodynamickými silami (vlevo) [2]

Obrázek vpravo na obrázku 2.9 ukazuje pohyb oblouku, který je unášen proudícím médiem. Oproti levému obrázku lze vidět, že jádro se nikam v rámci oblouku neposouvá. Vrstvy jsou rozmístěny rovnoměrně. [9]

2.2.3 Roštová zhášedla

Jedním ze dvou typů magnetických zhášedel jsou roštová zhášedla (obrázek 2.10). Existují kovová a izolační. Pro vypínání stejnosměrných oblouků se používají pouze izolační roštová zhášedla.

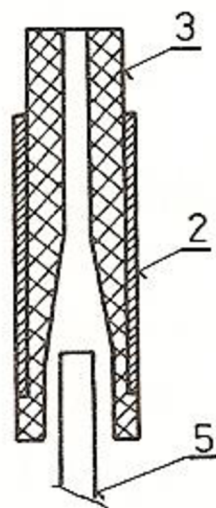


Obrázek 2.10 Řez roštovým zhášedlem [2]

Oblouk je magnetickým polem vtažen do zhášecí komory, kde jsou v kolmém směru na oblouk umístěna žebra. Oblouk se mezi jednotlivými žebry natáhne, čím zvětší svou délku, a v místech styku na vrcholcích žebry dochází k deionizaci, čím se zvětšuje odpor oblouku. Působením oblouku se vzduch ve zhášedle ionizuje a ohřívá. Ten poté uniká prostorem mezi žebry nad komoru. Expanze plynu směrem nahoru je žádoucí oproti směrem dolů. Při určité velikosti proudu dochází k expanzi směrem dolů a může dojít k znovu zapálení oblouku. Dalším nežádoucím dějem je vyfouknutí oblouku nad horní hrany žebry. To by vyústilo v trvalé hoření oblouku nad zhášecí komorou. [9]

2.2.4 Štěrbínová zhášedla

Štěrbínová zhášedla pracují na stejném principu jako roštová, jenom se liší svou konstrukcí zhášecí komory.



Obrázek 2.11 Řez štěrbinovým zhášedlem [2]

Oblouk je vtažen a dále posouván pomocí pólových nástavců umístěných na krajích komory. Na bočním řezu (obrázek 2.11) je vidět, že štěrbina se postupně zužuje, dochází tak k těsnému kontaktu oblouku a stěn zhášecí komory, kde se oblouk deformuje. Zvětšuje se odvod tepla, odpor a napětí. Tento způsob chlazení je účinnější než u roštových zhášedlech a díky tomu mohou jistící přístroje se štěrbinovým zhášedlem vypínat větší výkony. Pro trvale spolehlivé fungování je potřeba, aby stěny komory byly vyrobeny z odolných a žáruvzdorných keramických materiálů. Magnetické vyfukování zapříčiňuje, že se oblouk pohybuje rychle. Dochází k natavení jenom tenké vrstvy, která během chvíle ztuhne, a nedochází k rozšíření štěrbinu a tím pádem snižování účinnosti. Díky tomu je celková doba hoření oblouku krátká. [9]

3. NORMA ČSN EN 60947-2 ED. 4

„Zkouškami kritických proudů se zabývá norma ČSN EN 60947-2 ed. 4 z roku 2018. Přesněji se zabývá tím, jak nalézt kritickou oblast přístroje.

Zkouška kritickým stejnosměrným zatěžovacím proudem:

- platí pro jističe se jmenovitými hodnotami stejnosměrného proudu
- zkouška se musí provádět při maximálním pracovním ss Napětím ($U_e \max$) (přiřazené výrobcem)
- u jističů s nastavitelnými spouštěmi, musí být nastaveny na maximum
- hodnoty zkušebních proudů: 4 A, 8 A, 16 A, 32 A, 63 A DC s tolerancí $\pm 10\%$ (nepřesahující jmenovitý proud)
- jistič musí být zapnut a vypnut 10x při každém zkušebním proudu
- při stanovení směru průtoku proudu výrobcem se zkouška provádí ve stanoveném směru a značením síť/zátěž, jinak 5 operací v přímém směru a 5 v obráceném směru
- během každého cyklu CO musí jistič zůstat zapnutý po dobu dostatečnou pro zajištění, že je zaveden plný proud, ne však delší než 2 s
- počet spinacích cyklů za hodinu musí odpovídat tabulce 8

Tabulka 8

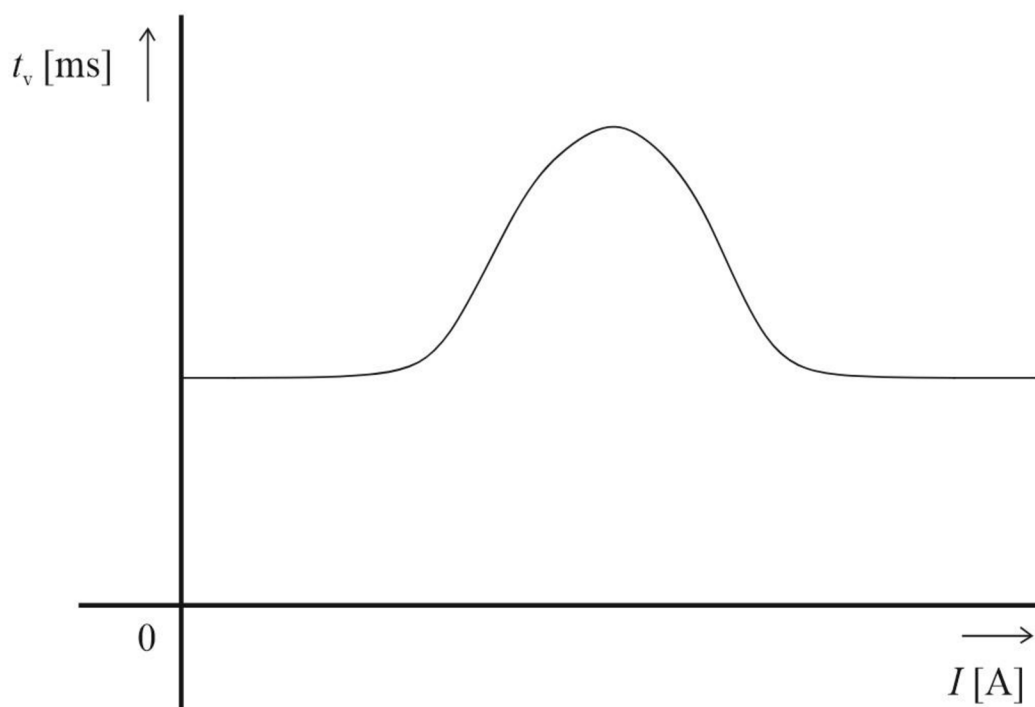
$I_n \leq 100$	120
$100 < I_n \leq 315$	120
$315 < I_n \leq 630$	60
$630 < I_n \leq 2500$	20
$2500 < I_n$	10

- doba hoření oblouku musí být zaznamenána a nesmí být delší než 1 s
- kritická hodnota je stanovena se zřetelem na maximální průměrnou dobu hoření oblouku pro každý směr proudu, přichází-li v úvahu. Nejvyšší a nejnižší hodnoty zkušebního proudu musí představovat kratší průměrné doby hoření oblouku než kritická hodnota. Je-li to nutné pro nalezení kritické hodnoty, rozsah zkušebních proudů se rozšíří nahoru ($\times 2$) nebo dolů ($/2$), nejvýše do hodnoty jmenovité hodnoty. Pokud se nenajde kritická hodnota, žádná další zkouška podle tohoto článku
- po zkoušce musí být vzorek podroben ověření provozuschopnosti 100 operací za stejných podmínek, při proudu a směru odpovídajícím kritické hodnotě. Poté zkusit i elektrickou pevnost

Kritický zatěžovací proud:

- critical load current I_{crit}
- hodnota vypínacího proudu v rozsahu provozních podmínek, při které se značně prodlužuje doba hoření oblouku

- *prodlužování doby hoření je dané malou energií magnetického pole. Aby se oblouk mohl pohybovat, musí získat větší energii a tím pádem se prodlouží doba hoření“ [10]*



Obrázek 3.1 Teoretický průběh závislosti vypínacího času na velikosti proudu s naznačenou kritickou oblastí [2]

4. VHODNÉ METODY PRO VÝZKUM KRITICKÝCH PROUDŮ

4.1 Spektrální analýza

Existují dvě spektrální metody – emisní a absorpční. Jak už názvy napovídají, emisní metoda spočívá v měření záření, které je emitované (vyzářené) vzorkem, a u absorpční metody se měří absorpce (pohlcování) určitého druhu záření vzorkem. Tato práce se věnuje emisní metodě. [11]

Složení záření je ovlivněno okolním prostředím. Působením vzniklého oblouku při vypínacím pochodu se poškozují kontakty a okolní kryty použitého jističe. Stejně jako pro absorpční metodu jsou i pro emisní metodu rozhodující spektrální kamery. Kamery používají optická vlákna, na která dopadá záření o různé vlnové délce. Tyto signály jsou následně přivedeny na spektrometr, z něhož je po zpracování výstup tzv. emisní spektrum. Tedy závislost intenzity na vlnové délce. Podrobnější informace o emisní metodě se nacházejí v kapitole 5.1. [12][13]

4.2 Použití vysokorychlostní kamery

Běžně používané kamery mají snímkovací frekvenci (FPS) v rozmezí 30–120 FPS. Nicméně za účelem lepšího pochopení a zkoumání rychlých dějů se musí použít přístroj s vyšší snímkovací frekvencí – vysokorychlostní kamera. Ta dokáže díky své snímkovací frekvenci, která se může pohybovat až v hodnotách milionů FPS, zachytit velice rychlé děje a ty poté detailně sledovat. Protože se doba hoření oblouku v příznivých případech pohybuje v jednotkách milisekund a pro záznam chování oblouku by klasická kamera nestačila, je zapotřebí použít právě vysokorychlostní kameru.

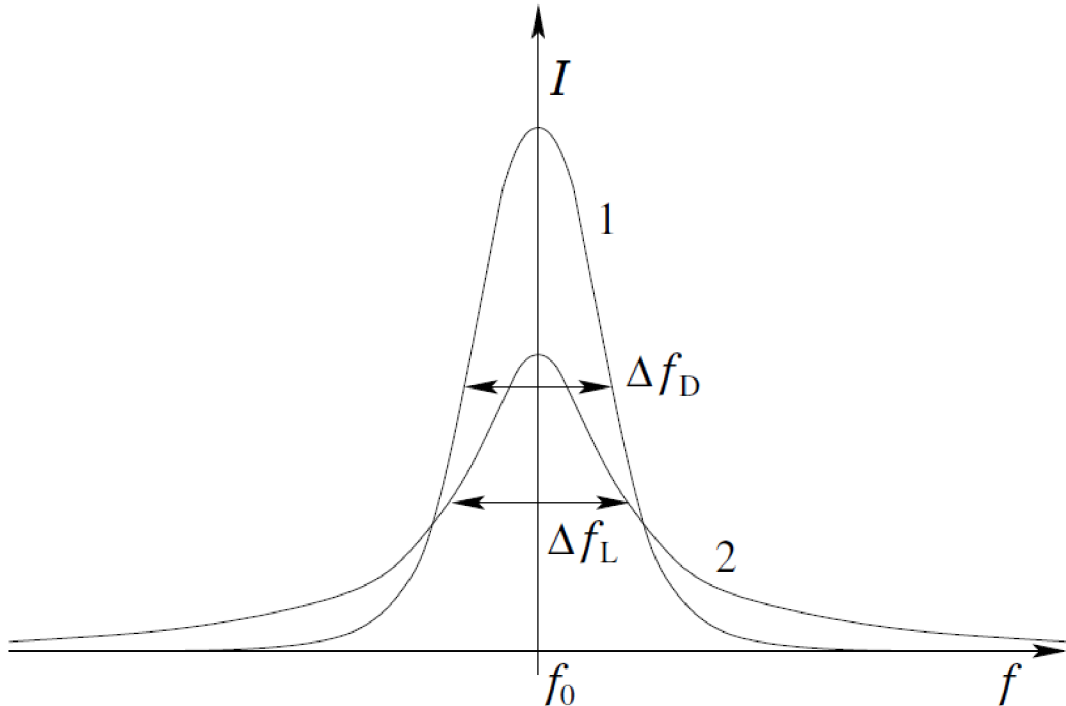
5. SPEKTRÁLNÍ ANALÝZA

Obecně se dá spektrální analýza popsat jako jedna z nejstarších diagnostických metod, která se používá v astrofyzice a fyzice plazmatu. Samotná metoda je neinvazivní, neovlivňuje plazma, a získání výsledků v oblasti viditelného spektra není náročné na provedení.

Elektromagnetické vlny dosahují délek od kilometrů (rádiové vlny) až po pikometry (gama záření), zatímco spektrum viditelného světla se pohybuje v úzkém rozmezí 380 až 780 nm. Pro experimentální měření se spektrum rozšíří o ultrafialové a infračervené záření, čímž vzniká rozmezí 200 nm až 1 μm . V tomto rozmezí je možné použít velké množství detektorů a zdrojů světla. Mimo rozmezí vznikají problémy např. pod 200 nm vzduch začne absorbovat světlo a nad 1 μm vzniká rušení termálním pozadím, které se dá kompenzovat jedině dražšími detektory.

Pro měření se používají dvě metody: aktivní metoda absorpční a pasivní metoda emisní. První rozdíl těchto dvou metod spočívá v tom, že u emisní metody je zaznamenáno záření přímo z plazmatu, zatímco u absorpční je zaznamenáno zeslabování záření pole. Druhý rozdíl spočívá excitaci částic. U emisní metody se elektronovým nárazem v plazmatu excitují částice z úrovně q na úroveň p a rozpadem na úroveň k s pravděpodobností přenosu A_{pk} , což vyústí v emisi ϵ_{pk} . Emisní signál souvisí s hustotou částic v excitovaném stavu $n(k)$. U absorpční metody probíhá excitace ze stavu q do stavu p v poli záření, a to má za následek již zmíněné zeslabení pole. Absorpční signál přímo souvisí s hustotou částice v nižším stavu $n(q)$, což je většinou základní stav, takže k základnímu stavu částice je možné se dostat přes absorpční metodu. Výhodou emisní metody oproti absorpční metodě je, že se nemusí používat externí světlo. Především je to ale vhodná metoda pro získání různých parametrů plazmatu. [15]

5.1 Emisní metoda



Obrázek 5.1 Graf závislost intenzity toku energie na frekvenci, resp. vlnové délce [16]

Průběh, který je vidět na obrázku 5.1 se označuje jako profil čáry. Střední vlnová délka λ_0 (f_0) je centrem úzké oblasti vlnových délek, ve kterém dochází k vyzařování excitovaných atomů. Její hodnota je dána rovnicí

$$\lambda_0 = \frac{h \cdot c}{E_p - E_k}. \quad (5.1)$$

Vyzařování tedy neprobíhá na jedné frekvenci, což je dané rušivými vlivy okolí a principem neurčitosti. Podstatný vliv na šířku spektrální čáry má i Dopplerův jev. Neustálým tepelným pohybem a srážkami excitovaných atomů dochází k tomu, že se vzhledem k pozorovateli posune frekvence vyzařovaného světla, která se dá popsat rovnicí

$$f = \frac{f_0}{1 - \frac{v}{c}} \approx f_0 \cdot \left(1 + \frac{v}{c}\right). \quad (5.2)$$

Tento vztah platí, pokud je splněná podmínka $|v| \ll c$. „Náhodný charakter tepelného pohybu atomů nebo iontů způsobí spojitě rozmazání čáry v závislosti na rozdělovací funkci pro rychlost pohybu.“ [16] Rozdělovací funkce pro rychlost vzhledem k pozorovateli je daná Maxwellovým rozdělením

$$A \cdot e^{-\frac{m \cdot v^2}{2 \cdot k \cdot T}} \quad (5.3)$$

Po dosazení za rychlost z rovnice 5.2 se dostane Gaussův profil čáry, který je naznačen v grafu jako 1, a je popsán rovnicí

$$A \cdot \frac{c}{f_0} \cdot \sqrt{\frac{m}{2 \cdot k_B \cdot T}} \cdot e^{-\frac{m \cdot c^2}{2 \cdot k_B \cdot T} \left(\frac{f-f_0}{f_0}\right)^2} \quad (5.4)$$

Rozšíření čáry pro Gaussův profil je charakterizováno parametrem Δf_D , který se nachází v polovině maximální intenzity toku energie.

Pokud se vezme v potaz i vzájemné působení atomů a iontů, profil čáry už není Gaussův ale Lorentzův. „*Jak narůstá tlak plynu, zvyšuje se počet srážek excitovaného atomu s molekulami plynu, co se projeví taktéž rozšířením spektrálních čar*“ [16] a posunutím maxima. Lorentzův profil lze vyjádřit rovnicí

$$\frac{2}{\pi} \cdot \frac{1}{\Delta f_L} \cdot \frac{1}{1 + \left[\frac{2 \cdot (f-f_0)}{\Delta f_L}\right]^2} \quad (5.5)$$

Intenzita spektrální čáry je daná emisním koeficientem spektrální čáry podle rovnice

$$\varepsilon_{pk} = n(p) \cdot A_{pk} \cdot \frac{h \cdot c}{4\pi \cdot \lambda_0} = \int \varepsilon_\lambda d\lambda \quad (5.6)$$

Tato rovnice se může nahradit vhodnou alternativní rovnicí

$$I_{pk} = n(p) \cdot A_{pk} \quad (5.7)$$

Z rovnice je vidět jasná závislost intenzity na počtu excitovaných atomů $n(p)$, který závisí na parametrech plazmatu. Počet excitovaných atomů $n(p)$ popisuje Boltzmannovo rozdělení, které udává pravděpodobnost, že se systém nachází v určitém stavu. Toto rozdělení platí pro teplotní rovnováhu. Protože se plazma s nízkou teplotou nenachází ve stavu teplotní rovnováhy, neřídí se nutně Boltzmannovým rozdělením. Tím pádem množství excitovaných atomů závisí nejenom na teplotě elektronů ale i na parametrech plazmatu jako třeba na hustotě elektronů a těžkých prvků nebo poli záření. [15][16]

5.2 Spektroskopický systém

Základními součástkami většiny spektrometrů jsou vstupní štěrbinu, rozptylovací mřížka a zrcadla. Na vstupní štěrbinu je zdroj světla přiveden buď zobrazovací optikou nebo pomocí optických vláken přímo na štěrbinu. Druhý zmíněný způsob je výhodnější, protože dosáhnout přímého přístupu k záři plazmatu je obvykle náročné.

Na výstupu spektrometru je situován detektor, přesněji je to buď fotonásobič nebo CCD. U každého z těchto dvou zařízení ovlivňuje spektrální rozlišení něco jiného. Pro fotonásobič je důležitá velikost výstupní štěrbinu a pro CCD je to zase velikost

pixelů. Při použití CCD se skenuje celý systém, zatímco fotonásobič je schopný zaznamenat specifickou vlnovou délku.

Mřížka je charakterizována počtem drážek na milimetr, což je důležitý parametr pro spektrální rozlišení. Speciální typy mřížky, jako třeba mřížka Echelle, jsou vhodné pro difrakce vyšších řádů, a to má za následek vysoké spektrální rozlišení. Citlivost mřížky popisuje „blaze angle“, přesněji definuje rozsah vlnových délek s nejvyšší efektivitou odrazu.

Spektrální rozlišení ovlivňuje ohnisková vzdálenost spektrometru a společně s parametry mřížky definují osvětlenost, tedy propustnost světla. Na množství propuštěného světla má velký vliv také velikost vstupní štěrby. Čím větší je, tím větší je intenzita světla, ale na druhou stranu dochází ke zmenšení spektrálního rozlišení. [15]

5.3 Typy spektrometrů

Pro pozorování spektrálních čar mimo prostory laboratoře je vhodný terénní spektrometr. Tyto spektrometry nemají nejlepší spektrální rozlišení ($\Delta\lambda \approx 1$ až 2 nm), ale jejich časové rozlišení je dobré. Výsledkem měření jsou informace o stabilitě plazmatu nebo změny v hustotě částic.

Další používaný spektrometr s ohniskovou vzdáleností $0,5$ až 1 m a parametry mřížky 1200 drážek na milimetr, dosahuje lepšího spektrálního rozlišením ($\Delta\lambda \approx 40$ pm). Společně s využitím 2-dim CCD kamerou je možné dosáhnout dobrých výsledků, co se týče spektrálního a časového rozlišení.

Spektrometr, který dosahuje skvělého spektrálního rozlišení je spektrometr Echelle ($\Delta\lambda \approx 1$ až 2 pm). Toho dosahuje díky mřížce Echelle, o které se psalo v předešlé podkapitole 5.2. Používá se pro měření profilu a posun spektrálních čar.

Při výběru vhodného typu spektrometru je důležité brát v potaz intenzitu zdroje světla. Zatímco terénní spektrometr nepotřebuje tolik světla, při měření se spektrometrem Echelle je ho potřeba více. Tento problém se ale dá kompenzovat vhodným typem detektoru a expozičním časem. [15]

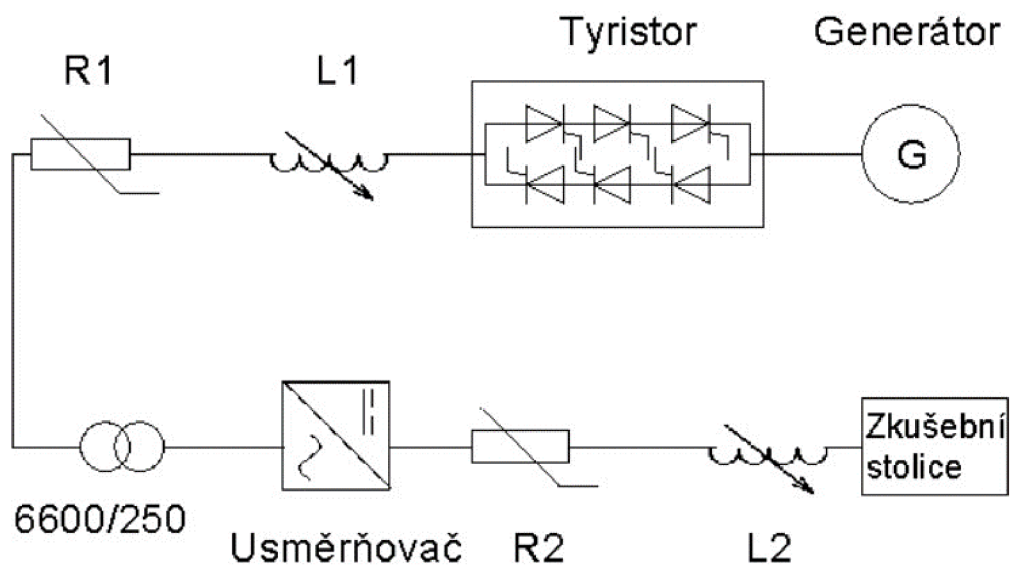
5.4 Diagnostická metoda – identifikace částic

Identifikace částic jako jsou atomy, ionty a molekuly je jeden z nejzákladnějších úkolů emisní spektroskopie. Je možné použít spektrometr s jednoduchými optickými vlákny v kombinaci s tabulkami vlnových délek atomů, iontů a molekul. Kvůli přítomnosti vyšších difrakčních řádů se ale může identifikace zkomplikovat. Tato komplikace se dá ale snadno odstranit použitím vhodných filtrů.

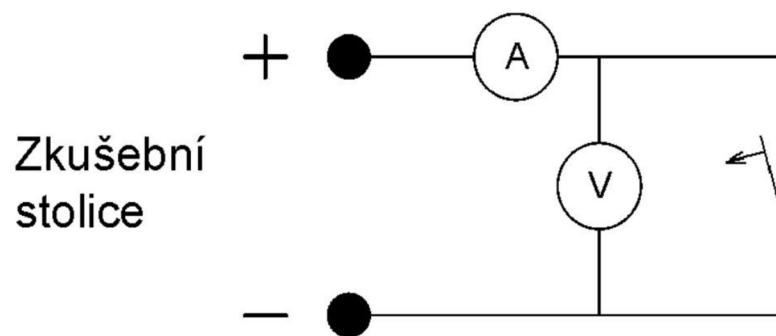
Jak již bylo zmíněno, některé jevy v plazmatu mají vliv na posun střední vlnové délky. Nicméně tento posun bývá malý a pro jeho měření je potřeba systém s vysokým spektrálním rozlišením. [15]

6. MĚŘENÍ SPEKTER OBLOUKU

K měření spekter a doby hoření oblouku byl k dispozici kompaktní jistič. Na bocích jističe v místech zhasécích komor byly vyvrtány díry. Díky nim bylo možné sledovat vysokorychlostními kamerami chování oblouku během hoření. Dále byly k dispozici spektrální kamery, jejichž vlákna pro měření byla umístěna na vysokorychlostní kamerách. Jistič byl připojen na stejnosměrné napětí, přičemž byla měřena také závislost napětí a proudu na čase. Cílem měření je prozkoumat intenzity a vliv některých prvků (stříbra, vodíku a případně plastů) v čase, převážně při zhasínacích pochodech. Plasty samotné nebudou vidět, ale možná budou vidět prvky, ze kterých se plasty skládají. To je vodík, kyslík a uhlík nebo molekuly C_2 a OH .



Obrázek 6.1 Schéma napájecího obvodu



Obrázek 6.2 Schéma měřicího obvodu



Obrázek 6.3 Zapojení pracoviště



Obrázek 6.4 Detail na vyříznuté otvory

6.1 Použité přístroje

FAST CAM SA-X2, typ 100K-M2, v.č. 10132701006

ISPEED 726 R

Měření proudu – Proudový převodník U.10.3

Měření napětí – Převodník napětí U.1K.1

Zesílení – 99,25

Napájení GS1 – Svorka 1 +, svorka 2 –

Spektrální kamera NEWTON CCD-20869, DU94OP-BV

Spektrální kamera NEWTON CCD-20868, DU94OP-BU

Kompaktní jistič 630 A

6.2 Počáteční nastavení

Napětí: 256 V (stejnoseměrné)

Proud: 32,7 A

Tau: 1,23 ms

Vysokorychlostní kamery:

SA-X2

High-contact

5 000 fps

Shutter 1 μ s

Objektiv Nikon 105 μ s, konvektor 200 μ s

Plná clona

Filtr 16x

ISPEED 726 R

Low-contact

5 000 fps

Objektiv Nikon 105 μ s (bez konvektoru)

Filtr čirý

Spektrální kamery:

Kamera 68

Vlákno 10

ISPEED 726 R

Kamera 69

Vlákno 5

SA-X2

6.3 Měření spekter

6.3.1 První měření

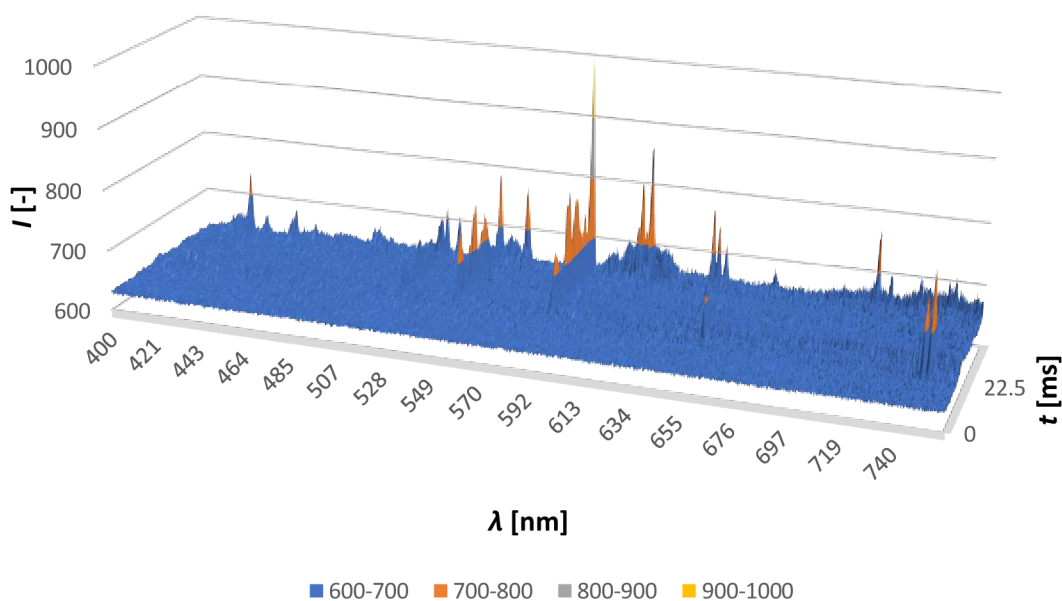
Nastavení kamer:	ISPEED	uzávěrka 50 μ s	TRIGGER 0 s
	SA-X2	uzávěrka 50 μ s	TRIGGER 0 s
	Kamera 68 a 69	uzávěrka 740 μ s	TRIGGER 0 s

Pro zpracování výsledků ze spektrální kamer bylo důležité nejprve vypočítat čas mezi jednotlivými měřeními neboli nasvícením deseti pixelů. Celkový čas se skládal ze dvou hodnot. Exposure time (doba nasvícení pixelů) a Vertical shift speed (doba, kterou trvá posunutí o jeden řádek). Pro všechna měření byla doba posunutí o jeden

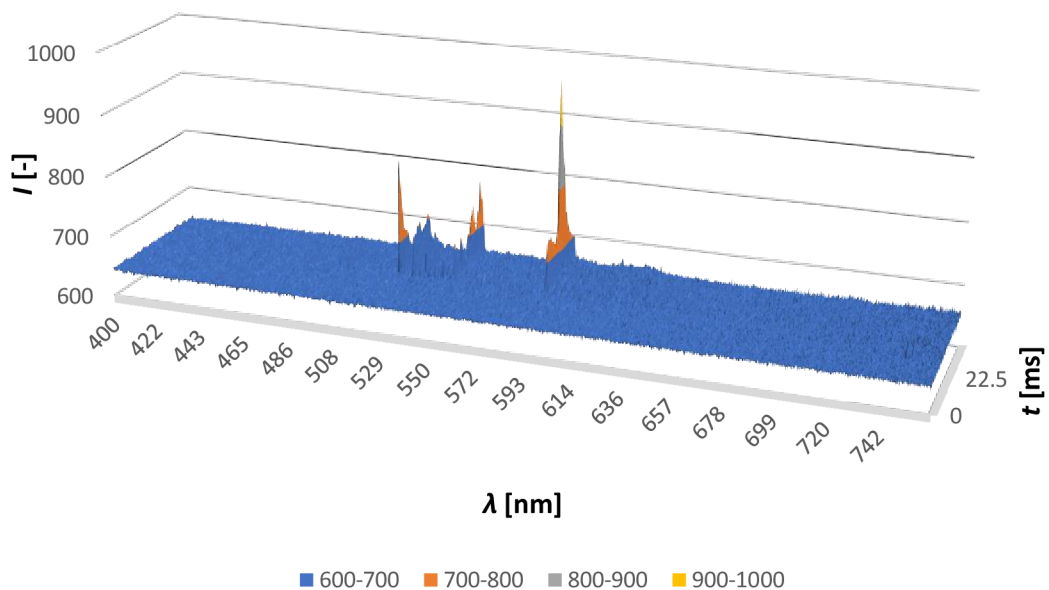
řádek $14,51 \mu\text{s}$, ale ve skutečnosti se rovná $16 \mu\text{s}$. Protože se osvětlovalo deset řádků najednou, vynásobí se hodnota posunutí o jeden řádek desetkrát. Následným součtem vychází hodnota $900 \mu\text{s}$. To znamená, že nasvícení deseti řádků a jejich posunutí do neosvětlené oblasti trvalo $0,9 \text{ ms}$. Pro padesát měření to znamená celkový čas záznamu 45 ms .

Na úspěšnosti výsledků má vliv nastavení spektrálních kamer. Obzvláště důležité je načasování počátku měření a nastavení doby osvětlení. Doba hoření oblouků se pohybovala od 180 ms do 260 ms . Tudíž se při prvním měření nepodařilo zachytit celý děj na spektrální kameru. Převážně je možno toto pozorovat na 3D průběhu ze spektrální kamery 68, jejíž vlákno 10 bylo namířeno na spodní kontakt, kdy se vyšší intenzity emitovaných prvků objevují až v blízkosti konce záznamu. Podobný průběh je možné sledovat i ze spektrální kamery 69. Její vlákno 5 bylo namířeno na vrchní kontakt. Skrz nastavení mřížky může dojít k posunu střední vlnové délky jednotlivých prvků až o 1 nm . Změřené hodnoty vlnových délek tudíž nemusí přesně odpovídat teoretickým hodnotám.

Změřené hodnoty byly vyneseny do 3D grafů, kde na x-ové ose je vlnová délka viditelného spektra, na y-ové ose jsou hodnoty intenzit jednotlivých emitovaných prvků a na z-ové ose je čas.

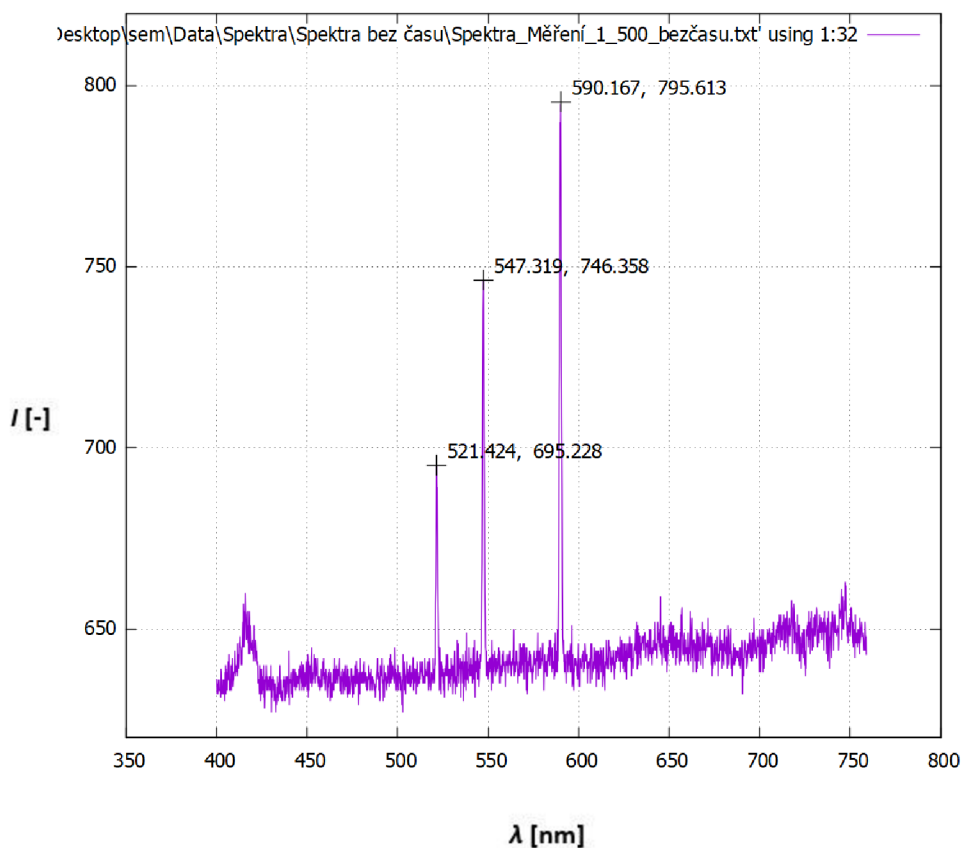


Obrázek 6.5 Graf závislosti intenzity vyzářených prvků na vlnové délce a času kamera 68 – první měření



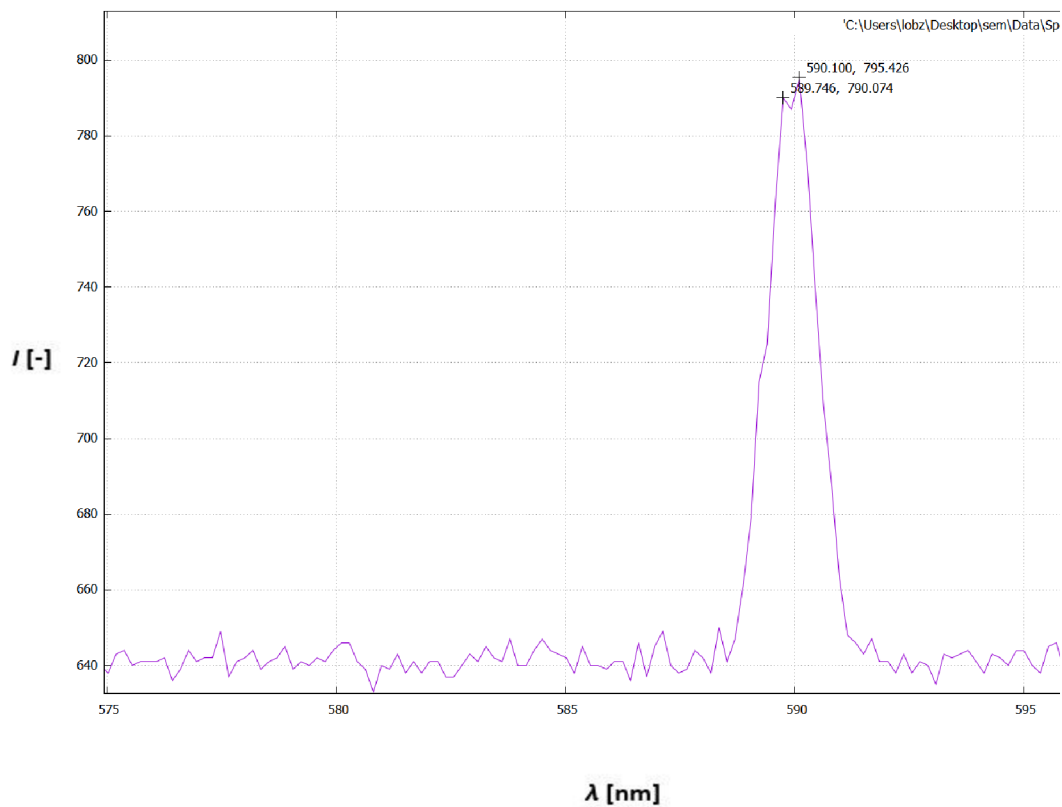
Obrázek 6.6 Graf závislosti intenzity vyzářených prvků na vlnové délce a času kamera 69 – první měření

Obecně čáry, které se objeví na začátku hoření oblouku a pak se již neobjevují, jsou různé nečistoty, které se mohly usadit na kontaktech a působením oblouku se vypařit. Čáry, které se objevují na začátku hoření oblouku v rozmezí časů 14,4 ms a 20,7 ms s velkou intenzitou okolo vlnové délky 747,2 nm jsou s velkou pravděpodobností plasty. Zjistit přesně o jaký plast se jedná je pro použité rozlišení skoro nemožné. Měření bylo provedeno v rozmezí vlnových délek 400 až 780 nm. Pro určování plastů by bylo potřeba několikrát menší rozmezí, kde by se daly pozorovat poměry mezi uhlíkem, vodíkem a kyslíkem.

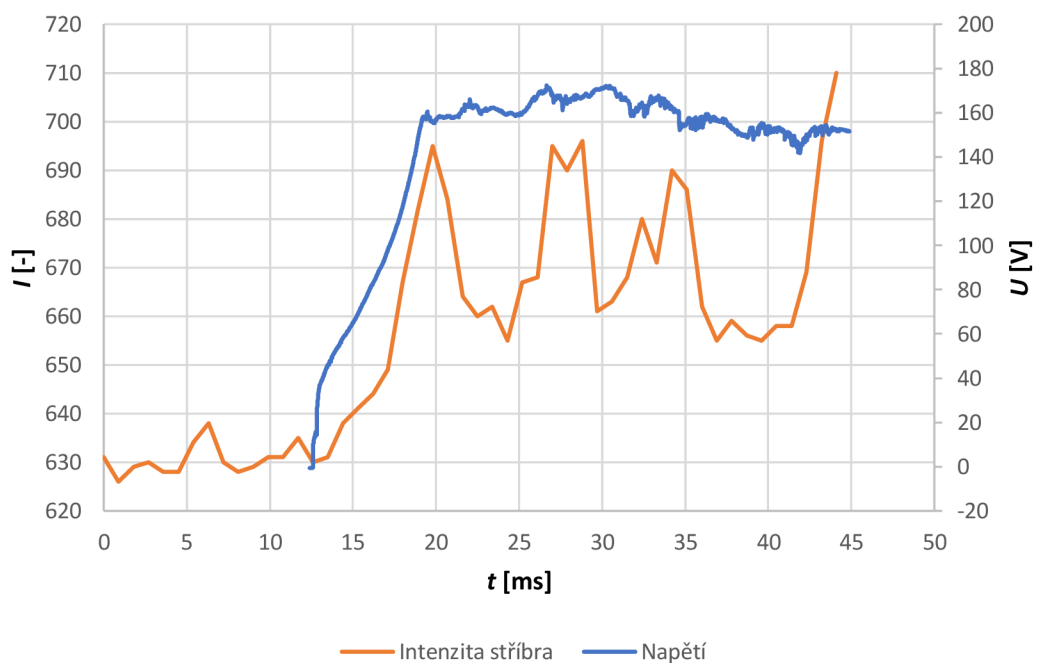


Obrázek 6.7 Spektrum v čase 27 ms kamera 68 – první měření

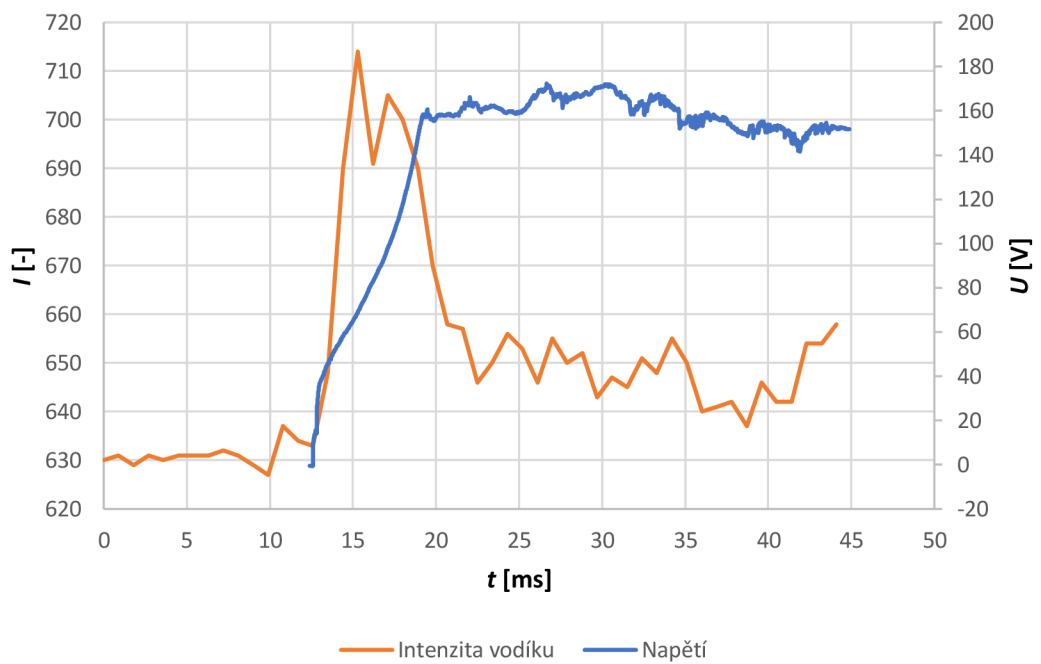
Na spektru (obrázek 6.7) jdou vidět tři výrazné čáry. Tyto tři čáry se objevují v každém jednotlivém měření na horním i vrchním kontaktu. Nejméně výrazná čára na vlnové délce 521,424 nm je stříbro, stejně tak i na vlnové délce 547,319 nm. Nejintenzivnějším prvkem tohoto spektra na vlnové délce 590,167 je sodík. Ten je typický dvojitou čárou, která jde vidět po přiblížení na obrázku 6.8.



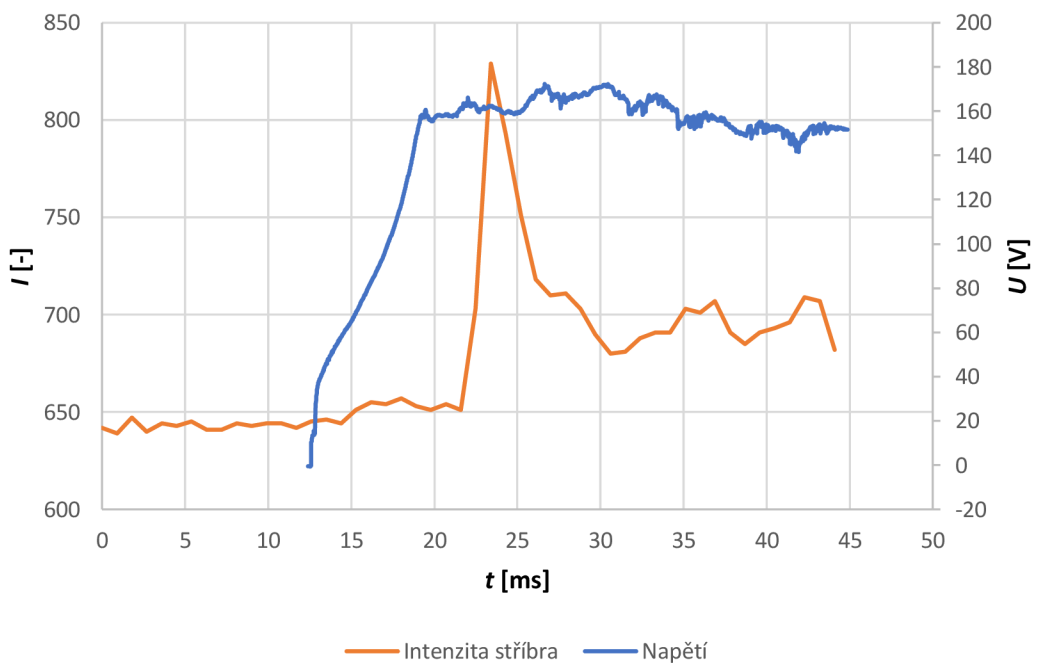
Obrázek 6.8 Přiblížení spektra v čase 27 ms na sodík kamera 68 – první měření



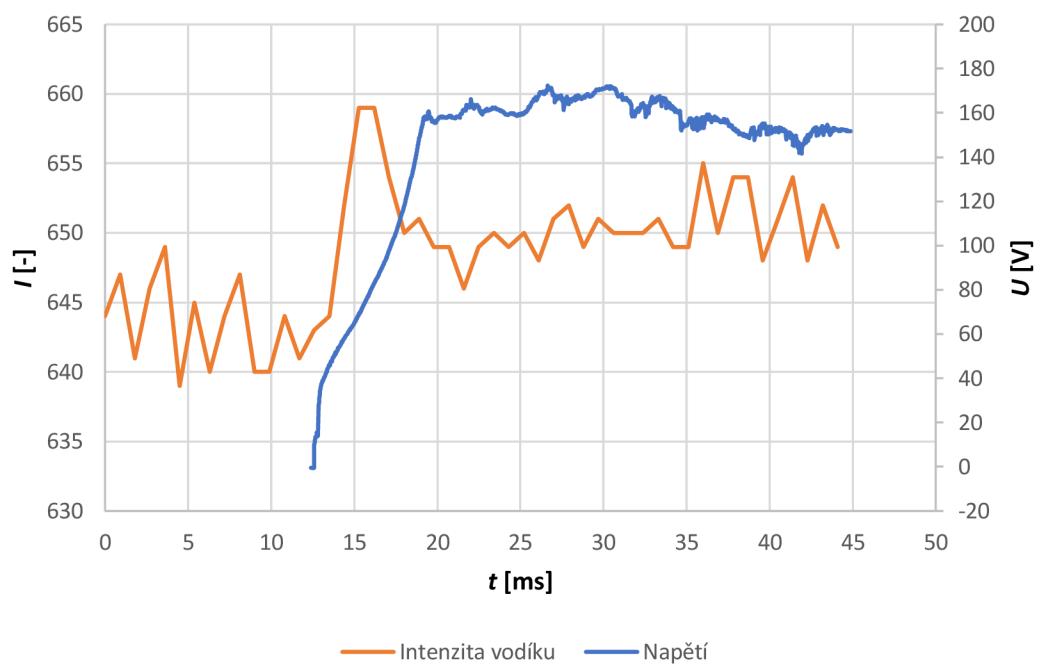
Obrázek 6.9 Spektrum stříbra v čase na vlnové délce 521,42400 nm kamera 68 – první měření



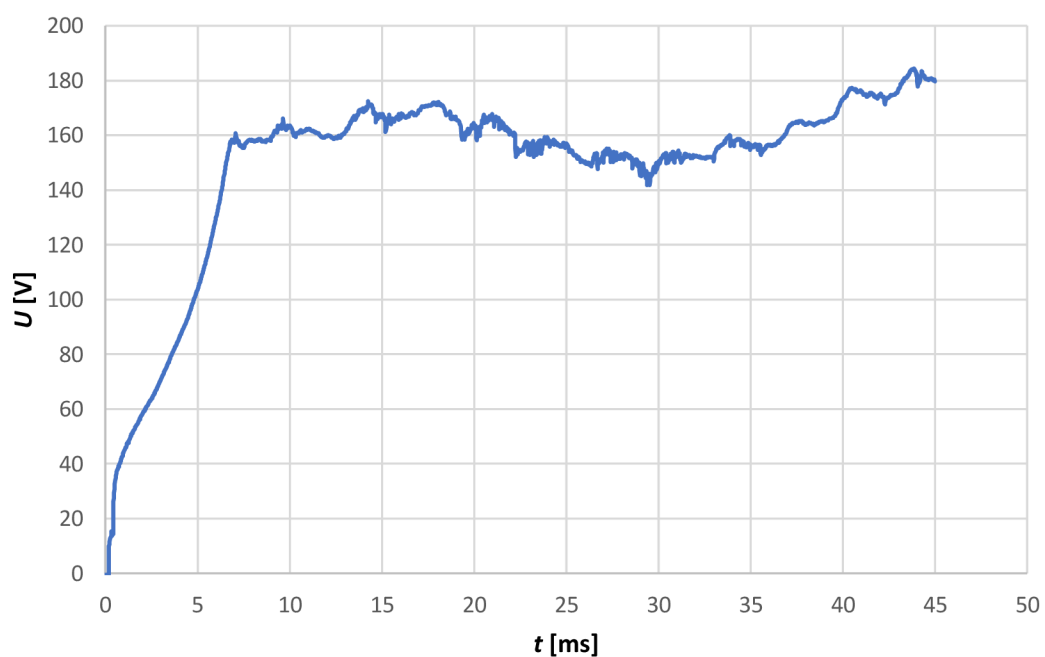
Obrázek 6.10 Spektrum vodíku v čase na vlnové délce 656,97247 nm kamera 68 – první měření



Obrázek 6.11 Spektrum stříbra v čase na vlnové délce 523,12700 nm kamera 69 – první měření



Obrázek 6.12 Spektrum vodíku v čase na vlnové délce 658,84100 nm kamera 69 – první měření



Obrázek 6.13 Vývoj napětí oblouku v čase – první měření

Kvůli přehlednosti a větší vypovídající hodnotě je do grafů intenzity emitovaných prvků přidán průběh napětí. Z dostupných průběhů intenzity je použitý vždy celý záznam. Průběh napětí je posunutý tak, aby odpovídal okamžiku zapálení oblouku. Z toho důvodu nezačíná průběh napětí v 0 ms. Okamžik zapálení oblouku pro první měření je 12,6 ms.

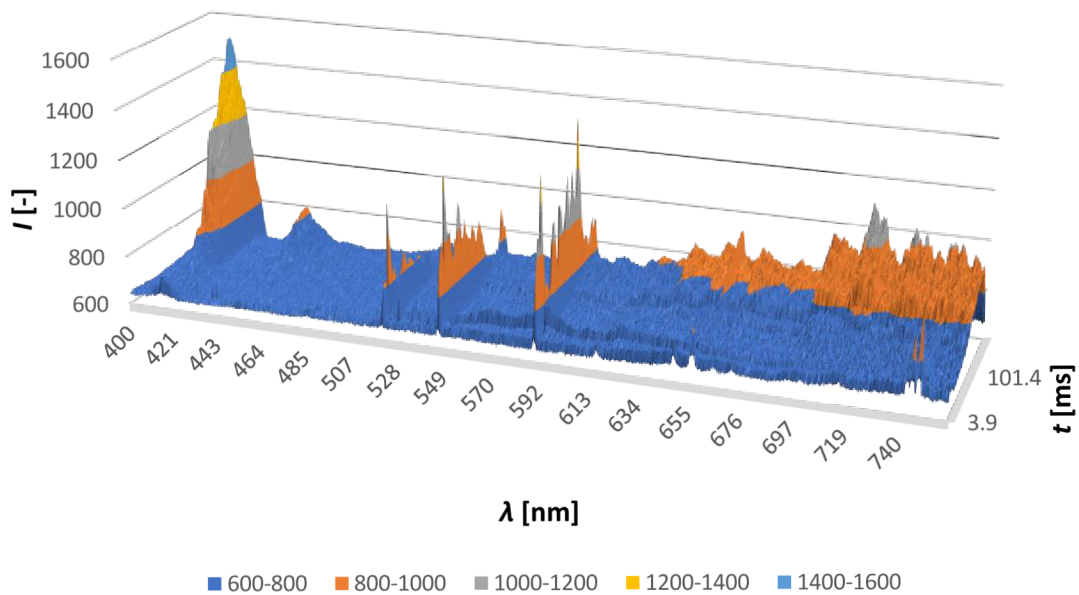
Za čas 6,63 ms se se napětí zvýšilo z 0 V na 156 V. Tento čas stačil na to, aby se usazená vlhkost (vodík) na spodním kontaktu vypařila. Vlhkost se na kontaktech mohla usadit vlivem vlhkosti okolního vzduchu v laboratoři. Další průběh vodíku koresponduje s průběhem napětí oblouku. Kompozitní kontakty na bázi stříbra se působením oblouku natavovaly a vznikaly páry stříbra s relativně vysokou intenzitou. Množství emitovaného stříbra záleží na napětí oblouku. To lze pozorovat na obrázku 6.9, jak se intenzita mění podle měnícího se napětí, když se oblouk snaží dále hořet. Ke konci se dá pozorovat prudký nárůst, který se dá také pozorovat na vzrůstajícím tendru obloukového napětí až k hodnotám přes 180 V.

6.3.2 Druhé měření

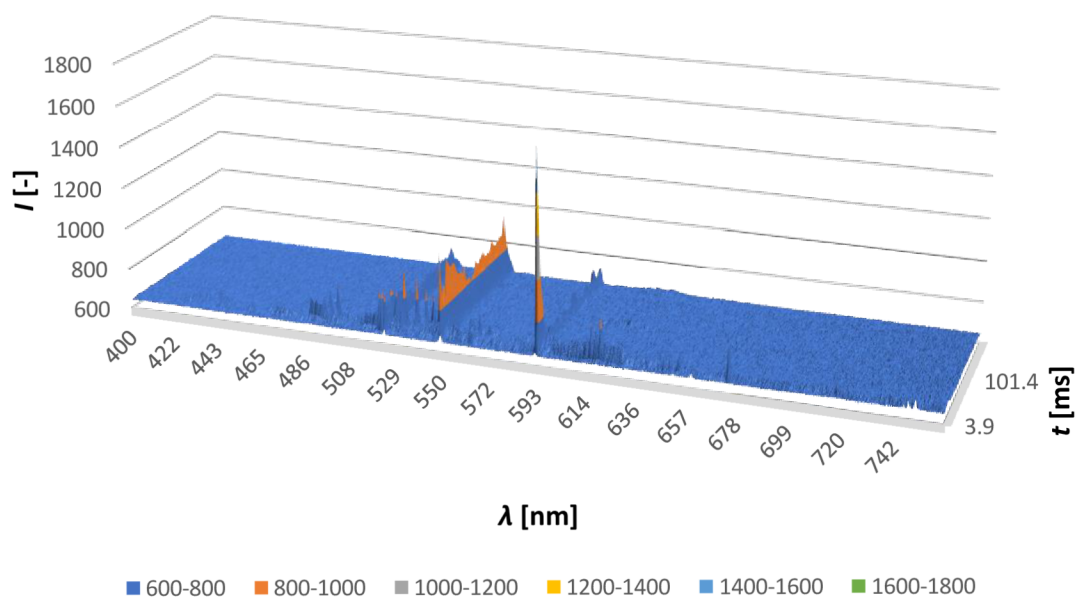
Nastavení kamer:	ISPEED	uzávěrka 100 μ s	TRIGGER 0 s
	SA-X2	uzávěrka 150 μ s	TRIGGER 0 s
	Kamera 68 a 69	uzávěrka 3 740 μ s	TRIGGER 250 ms

Při druhém měření byla uzávěrka spektrálních kamer nastavená na čas 3 740 μ s. Výsledný čas pro jedno spektrum vychází 3,9 ms a pro 50 měření je celkový čas záznamu 195 ms. Nicméně se pro nezkrácené výsledky musí vyhodit první a poslední spektrum. Z toho vyplývá celkový čas záznamu 187,2 ms. Nastavení uzávěrky spektrálních kamer se pro další měření neměnila. Měnilo se nastavení TRIGGERu a uzávěrka vysokorychlostní kamer.

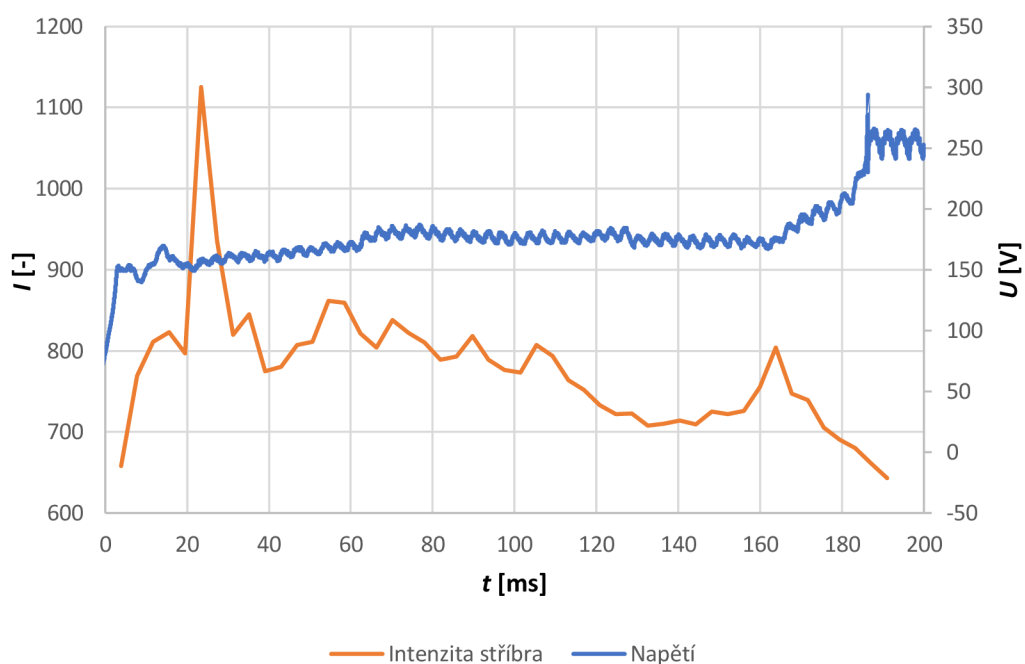
Oblouk hořel 189,96 ms a k dispozici byl záběr 187,2 ms. Proto druhé měření dopadlo o poznání lépe. Podařila se zachytit podstatná část průběhu spektrálními kamerami, ale především se zachytil konec, tedy zhasínání oblouku. Začátek se nepodařilo zachytit přesně, což jde vidět na obrázku 6.17, kde už na začátku průběhu dosahuje hodnota intenzity vodíku relativně vysoké úrovně.



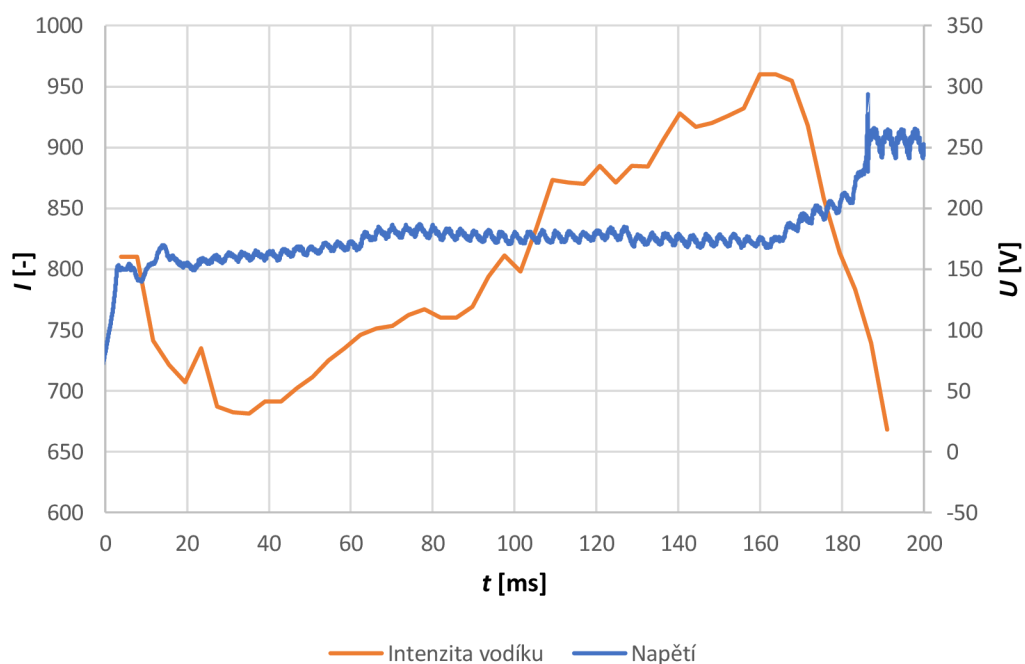
Obrázek 6.14 Graf závislosti intenzity vyzářených prvků na vlnové délce a času kamera 68 – druhé měření



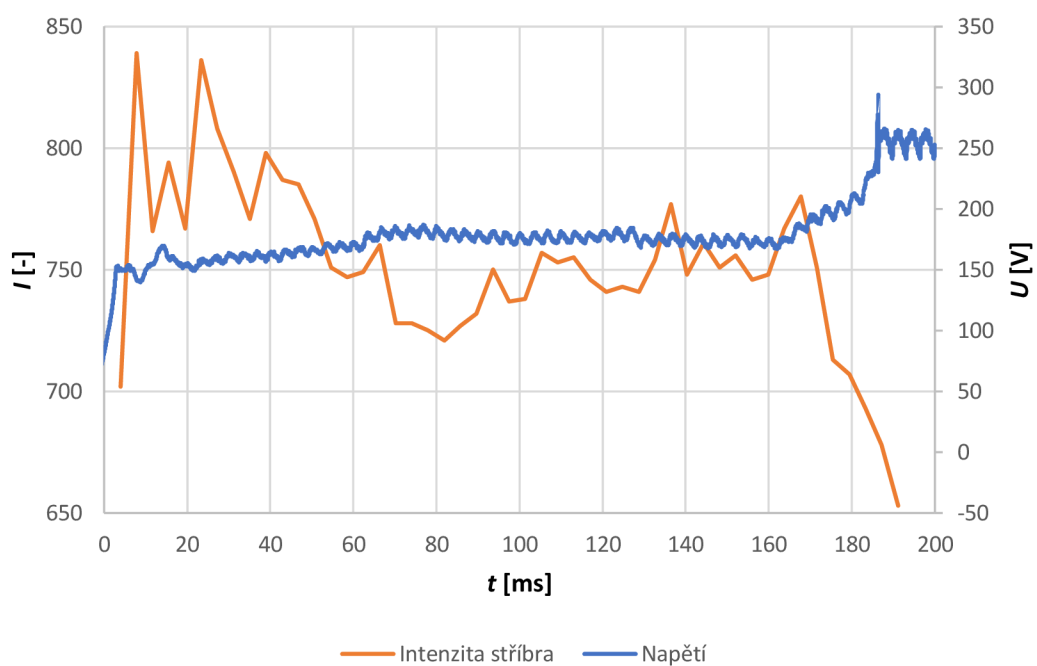
Obrázek 6.15 Graf závislosti intenzity vyzářených prvků na vlnové délce a času kamera 69 – druhé měření



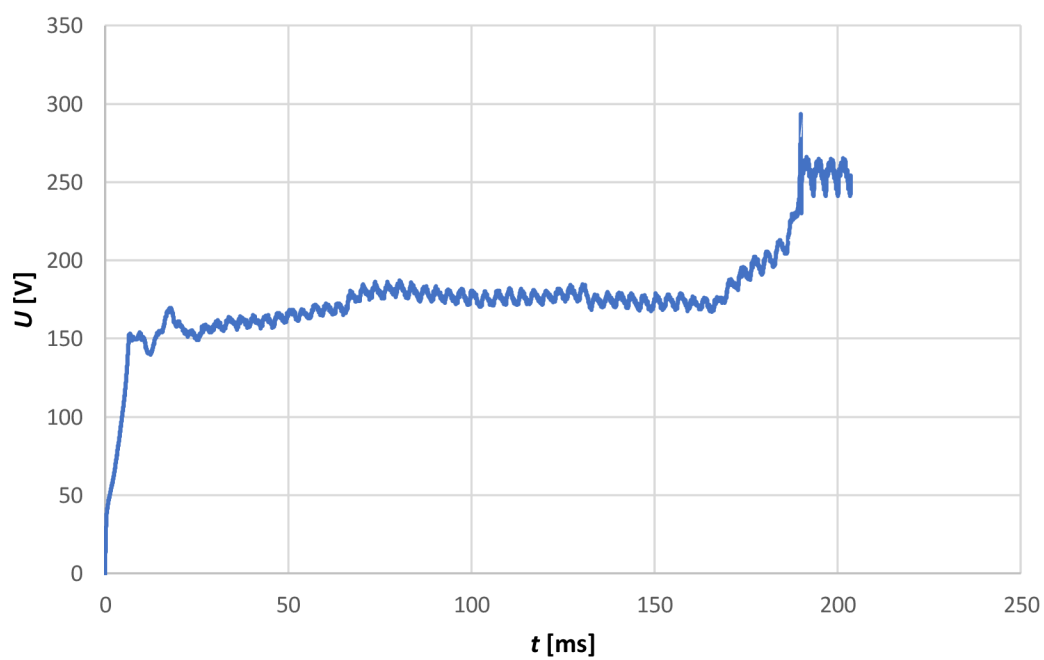
Obrázek 6.16 Spektrum stříbra v čase na vlnové délce 521,44720 nm kamera 68 – druhé měření



Obrázek 6.17 Spektrum vodíku v čase na vlnové délce 656,97247 nm kamera 68 – druhé měření



Obrázek 6.18 Spektrum stříbra v čase na vlnové délce 523,12700 nm kamera 69 – druhé měření



Obrázek 6.19 Vývoj napětí oblouku v čase – druhé měření

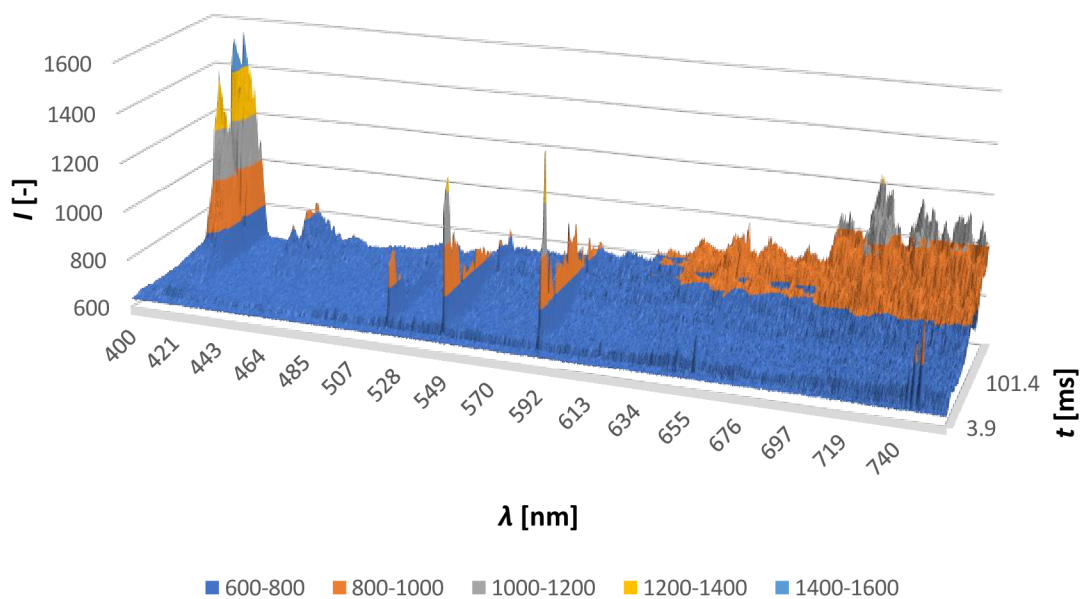
Na kontaktech během nastavování dalšího měření kondenzovala vlhkost, ta se v počátku hoření oblouku skoro hned vypařila. V čase kolem 40 ms se intenzita vodíku postupně začala zvyšovat (obrázek 6.17). Na tomto zvyšujícím se trendu mělo částečně podíl zvyšující se obloukové napětí. Hlavně ale mělo vliv na to, že se taví okolí oblouku, který natavuje plasty, ze kterých se uvolňuje vodík. Při dosažení maximální intenzity vodíku pro toto měření se obloukové napětí pohybovalo okolo hodnoty 170 V. Poté se obloukové napětí dále zvyšovalo. Působením okolí se oblouk chladí a zmenšuje svůj poloměr. Začínají převládat rekombinační pochody nad ionizačními. Čímž dochází ke zvětšování odporu oblouku a následnému uhasnutí. Oblouk měl při uhasnutí hodnotu napětí 293,6 V.

Stříbro mělo oproti vodíku, od počáteční vysoké intenzity, klesající tendenci s výkyvy. Na začátku se odpařilo tak velké množství, protože při oddalování kontaktů byla mezi kontakty velká proudová hustota a natavila povrch kontaktů. Na svůj vrchol se stříbro dostalo během 20 ms. Napětí se během stejného času dostalo na hodnotu 170 V a pak se ustálilo s menšími výkyvy. Výkyvy v průběhu spektrální čáry stříbra jsou způsobené pohybem oblouku po kontaktu, kdy se pohybuje po natavených, částečně natavených a nenatavených částech.

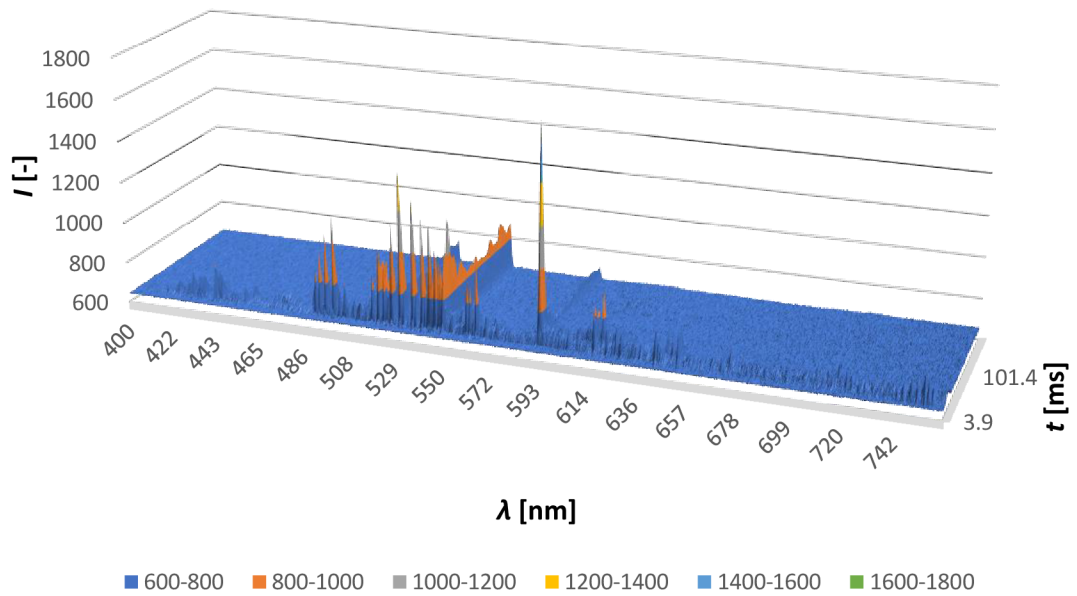
Od druhého měření se už na vrchním kontaktu neobjevoval vodík ve velké intenzitě. Proto nebyl zahrnut pro porovnání se spodním kontaktem. Jeho intenzita dosahovala hodnot pozadí, takže na vrchním kontaktu se během hoření oblouku netavily okolní plasty.

6.3.3 Třetí měření

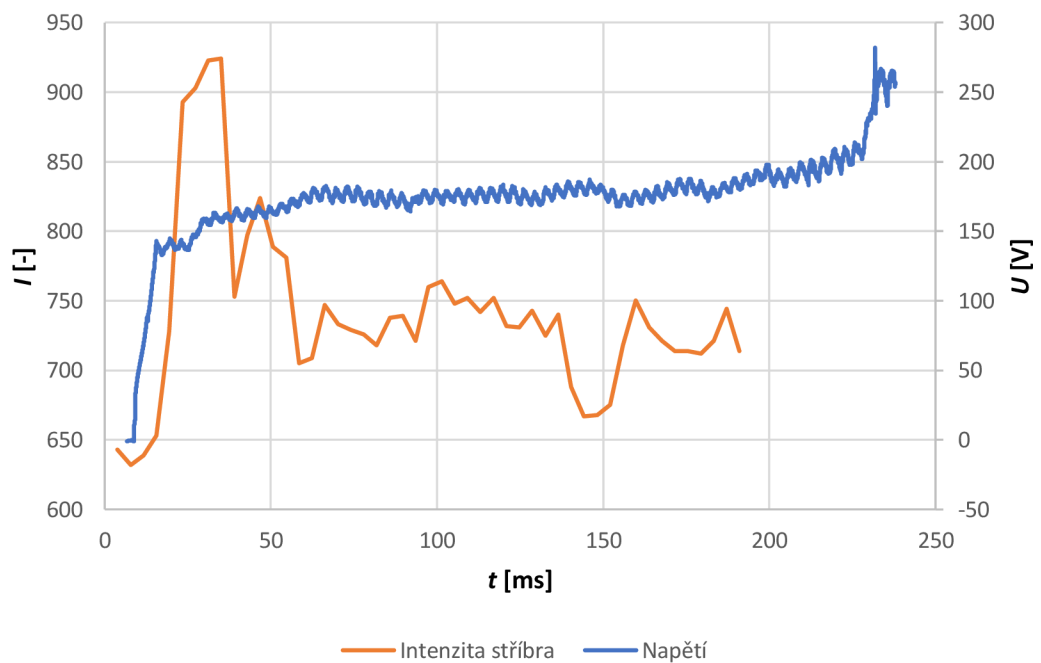
Nastavení kamer:	ISPEED	uzávěrka 100 μ s	TRIGGER 0 s
	SA-X2	uzávěrka 150 μ s	TRIGGER 0 s
	Kamera 68 a 69	uzávěrka 3 740 μ s	TRIGGER 240 ms



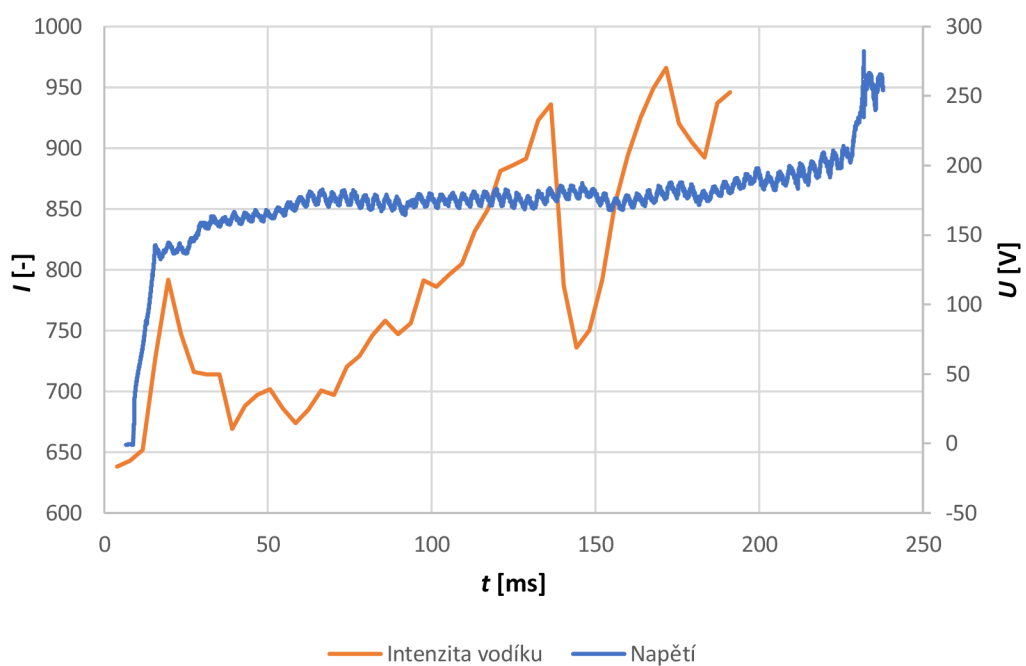
Obrázek 6.20 Graf závislosti intenzity vyzářených prvků na vlnové délce a času kamera 68 – třetí měření



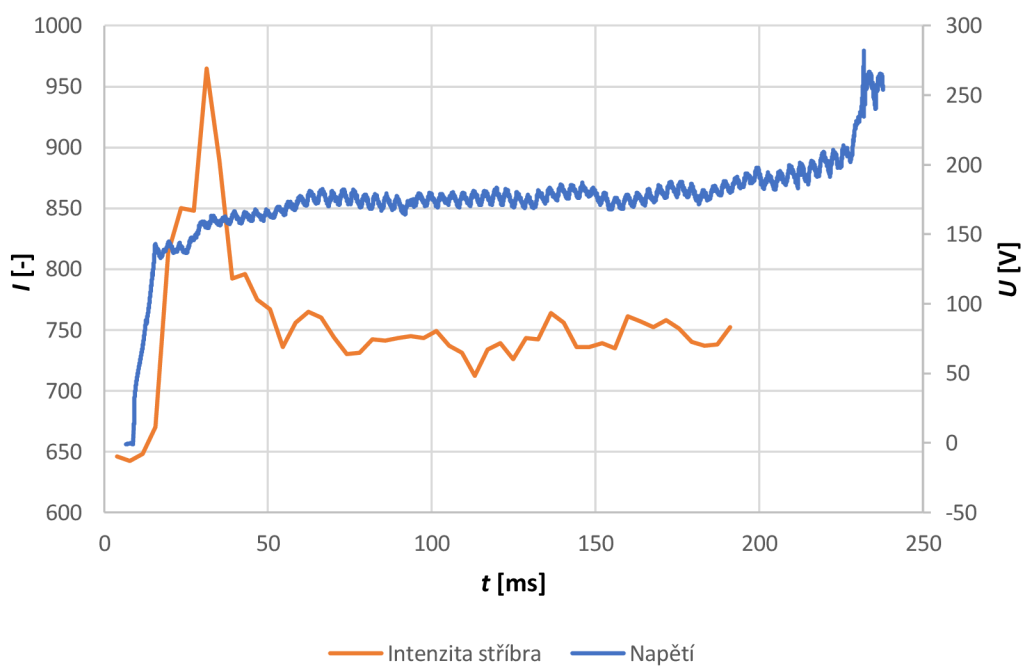
Obrázek 6.21 Graf závislosti intenzity vyzářených prvků na vlnové délce a času kamera 69 – třetí měření



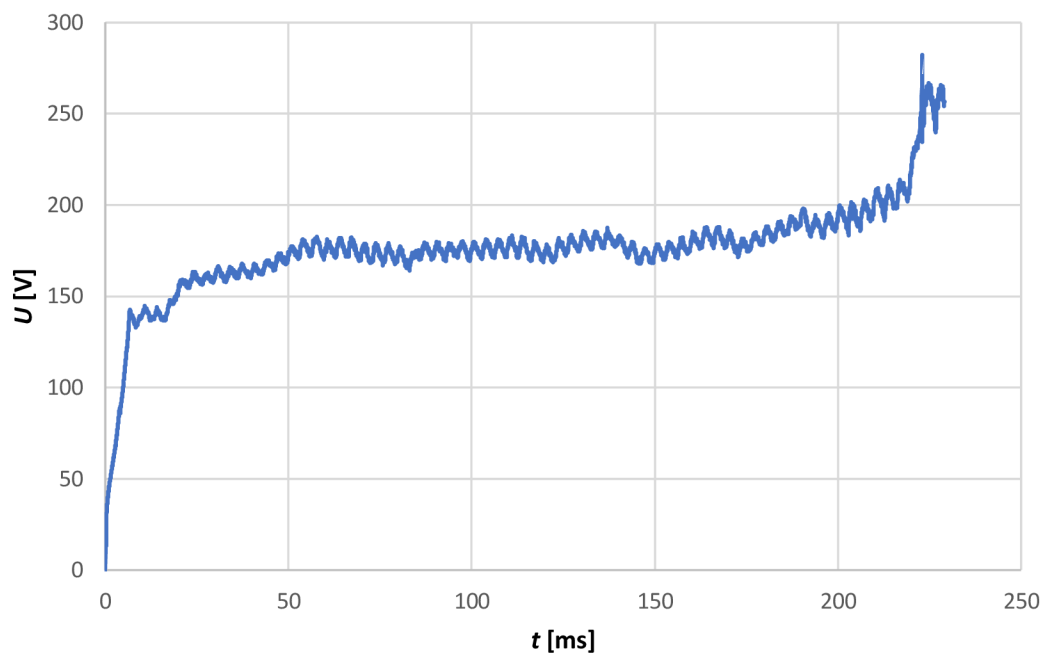
Obrázek 6.22 Spektrum stříbra v čase na vlnové délce 521,44720 nm kamera 68 – třetí měření



Obrázek 6.23 Spektrum vodíku v čase na vlnové délce 656,79773 nm kamera 68 – třetí měření



Obrázek 6.24 Spektrum stříbra v čase na vlnové délce 523,12700 nm kamera 69 – třetí měření

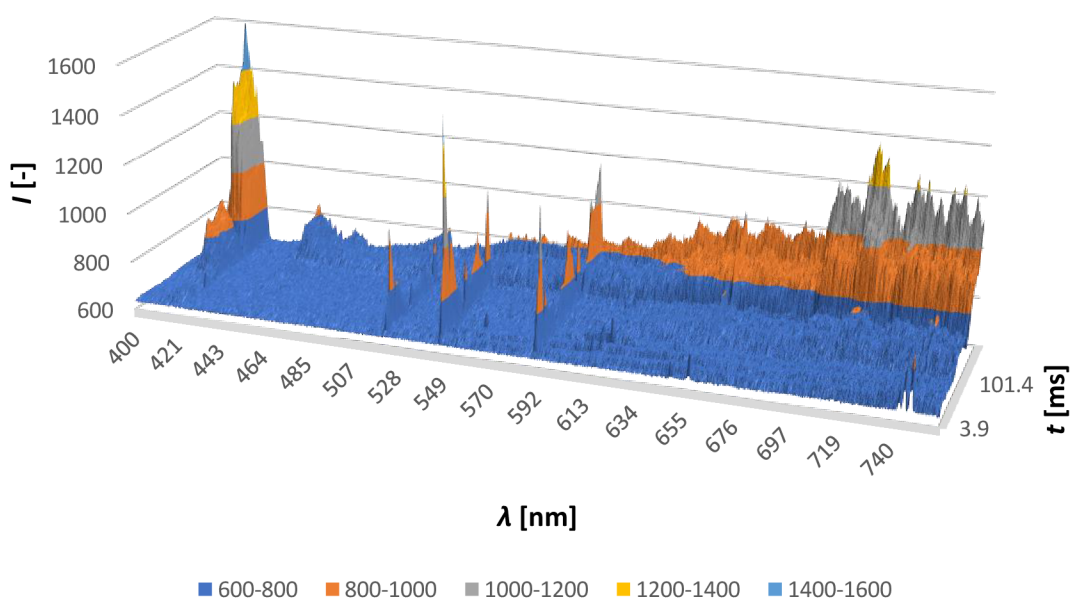


Obrázek 6.25 Vývoj napětí oblouku v čase – třetí měření

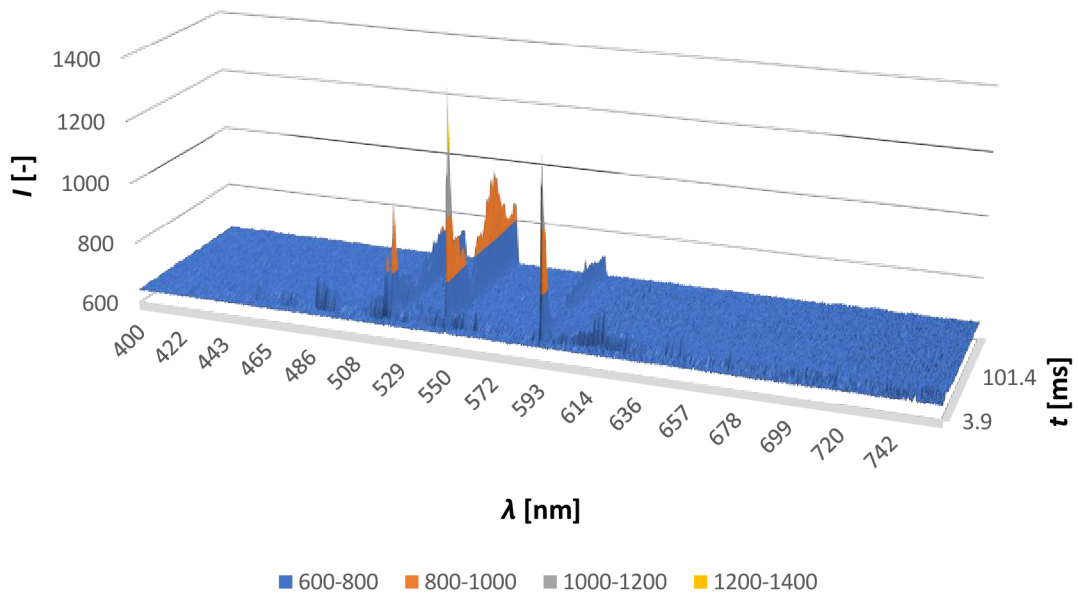
6.3.4 Čtvrté měření

Nastavení kamer:	ISPEED	uzávěrka 100 μ s	TRIGGER 0 s
	SA-X2	uzávěrka 150 μ s	TRIGGER 0 s
		Osazení čirým filtrem	
	Kamera 68 a 69	uzávěrka 3 740 μ s	TRIGGER 250 ms

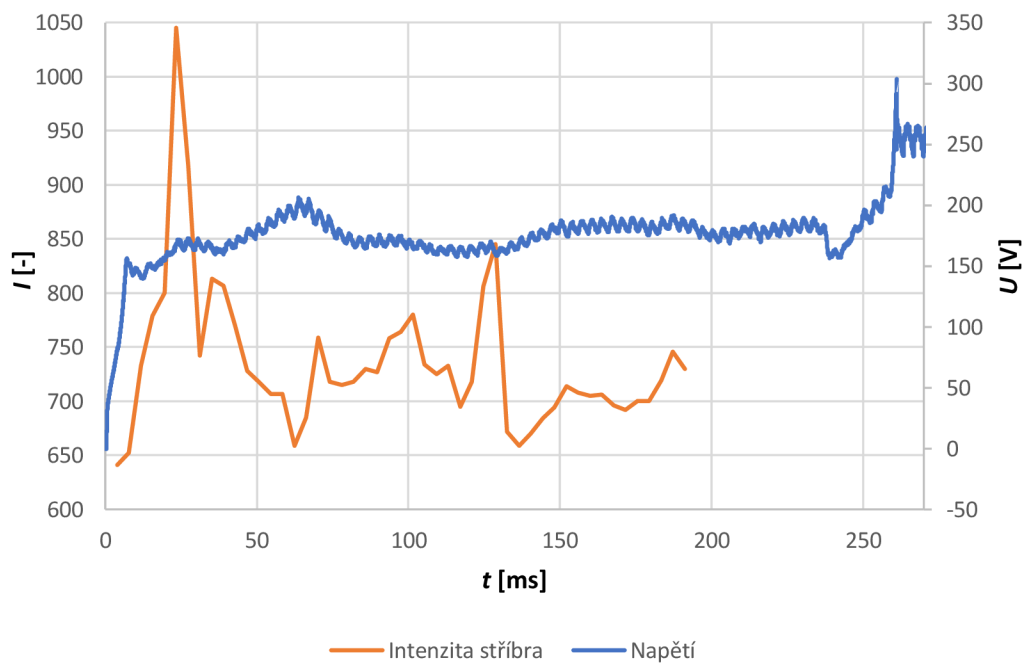
Vysokorychlostní kamera SA-X2 byla osazena čirým filtrem namísto filtru 16x, protože záznamy nebyly dobře viditelné.



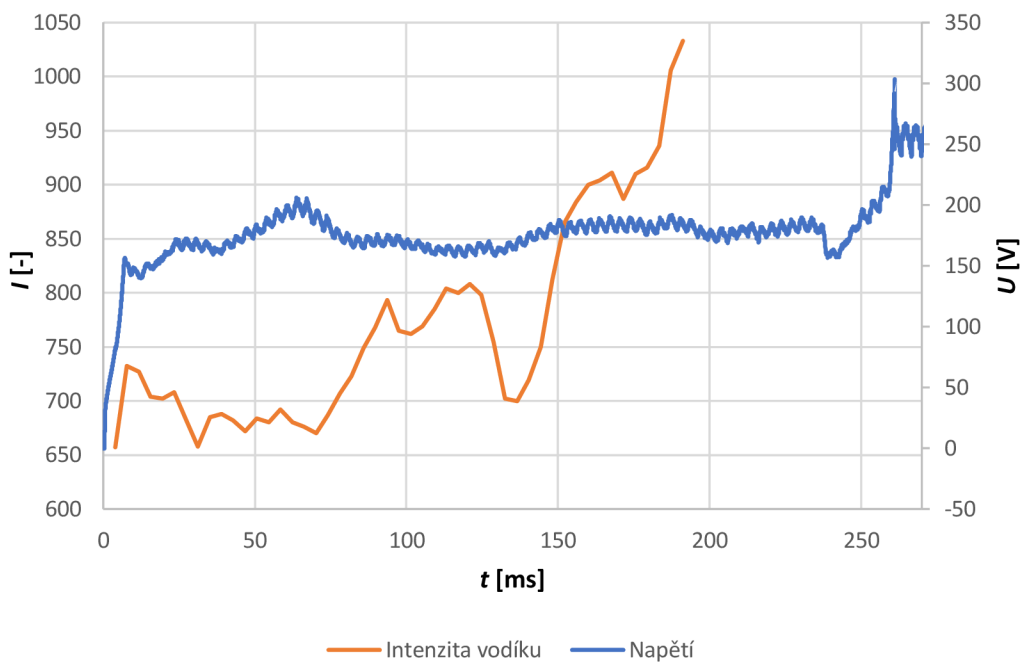
Obrázek 6.26 Graf závislosti intenzity vyzářených prvků na vlnové délce a času kamera 68 – čtvrté měření



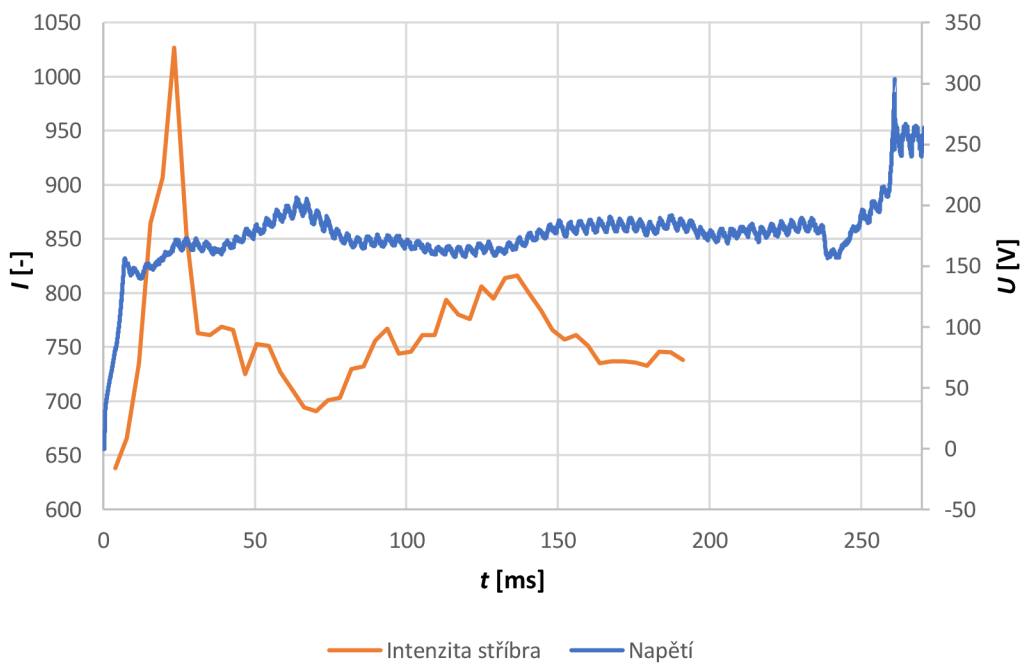
Obrázek 6.27 Graf závislosti intenzity vyzářených prvků na vlnové délce a času kamera 69 – čtvrté měření



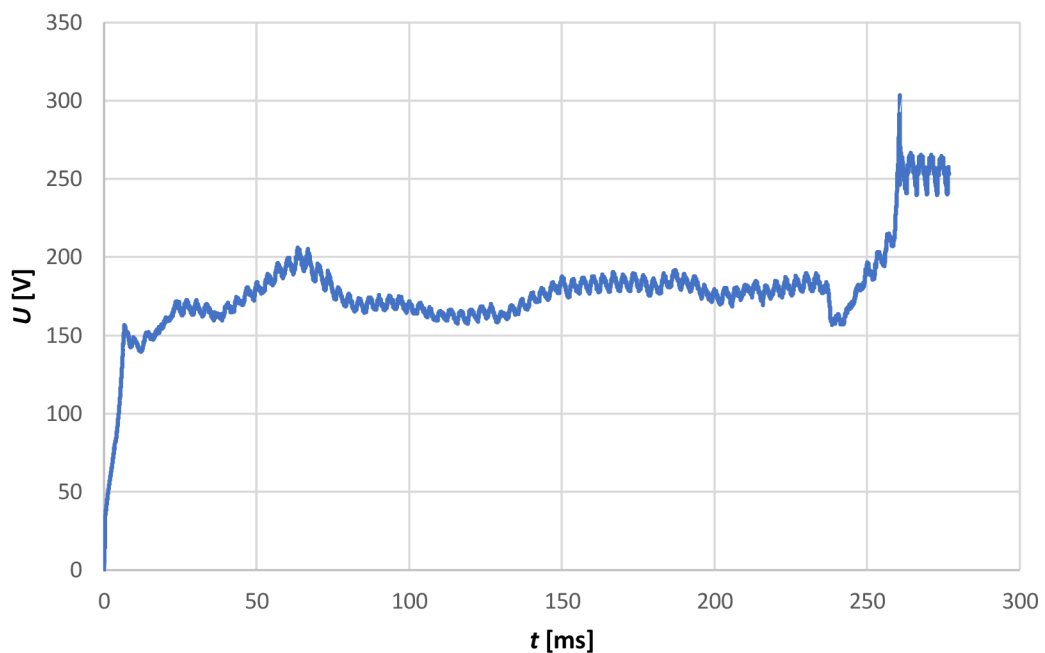
Obrázek 6.28 Spektrum stříbra v čase na vlnové délce 521,63050 nm kamera 68 – čtvrté měření



Obrázek 6.29 Spektrum vodíku v čase na vlnové délce 656,79773 nm kamera 68 – čtvrté měření



Obrázek 6.30 Spektrum stříbra v čase na vlnové délce 523,12700 nm kamera 69 – čtvrté měření



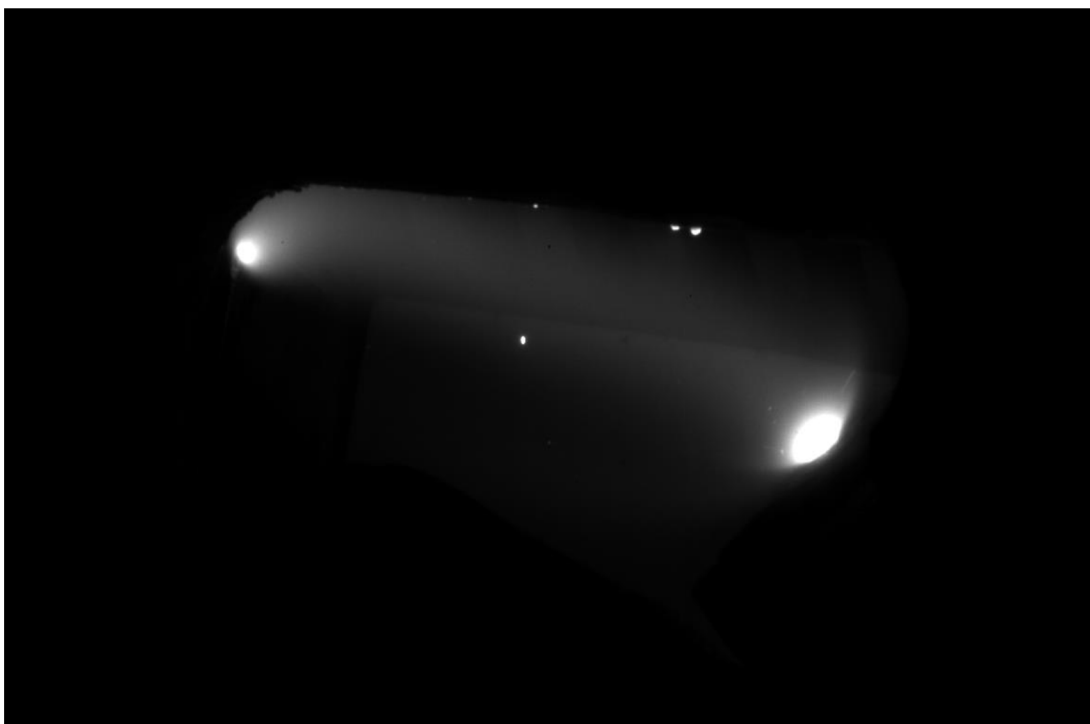
Obrázek 6.31 Vývoj napětí oblouku v čase – čtvrté měření

6.3.5 Páté měření

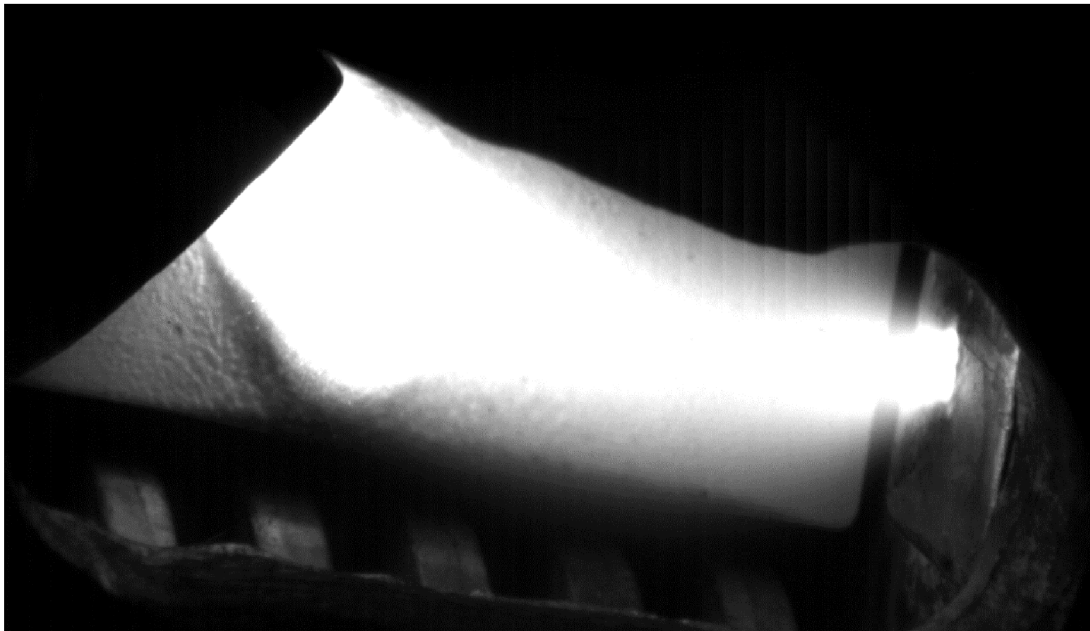
Nastavení kamer:	ISPEED	uzávěrka 100 μ s	TRIGGER 0 s
	SA-X2	uzávěrka 150 μ s	TRIGGER 0 s
	Kamera 68 a 69	uzávěrka 3 740 μ s	TRIGGER 300 ms

Páté měření je celkově druhé měření, při kterém se podařilo zachytit uhasnutí oblouku spektrálními kamerami. Oproti druhému měření je ale zachyceno úplné uhasnutí oblouku. To lze pozorovat na obrázku 6.34 a obrázku 6.35, kdy naměřené emitované prvky nedosahují na konec časové osy.

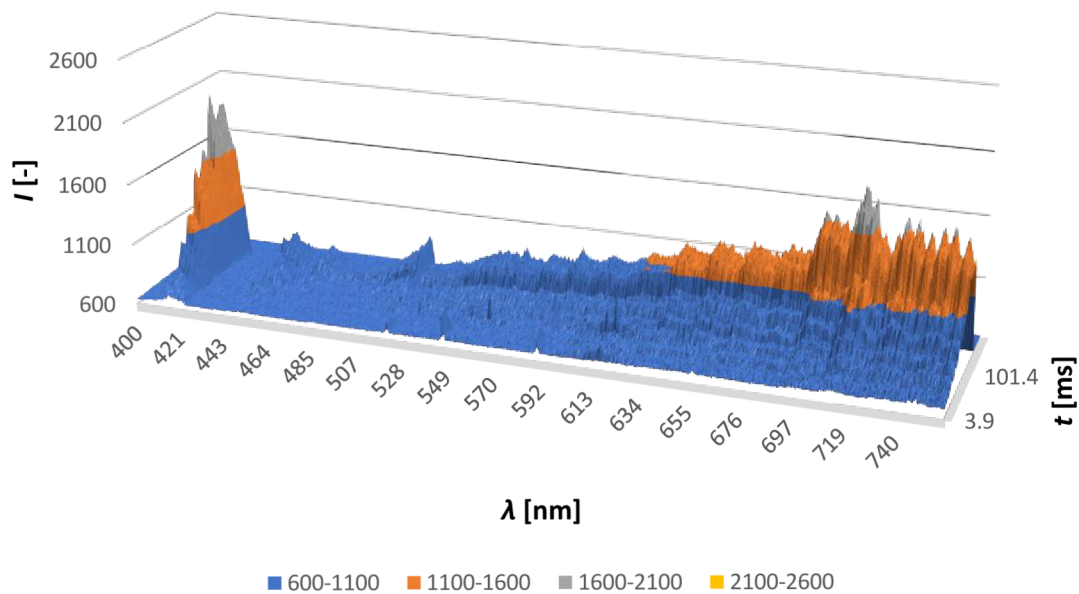
Průběhy spekter z jednotlivých kontaktů se rapidně liší. Více emitujících se prvků na spodním kontaktu může být zapříčiněno nedokonalým zabroušením hran otvorů, které byly vyříznuté pro pohledy na oblouk. Dalším důvodem může být, že na spodním kontaktu hoří oblouk blíže vnitřní konstrukci než zhášecí komoře. Jak jde vidět na obrázku 6.32 a 6.33.



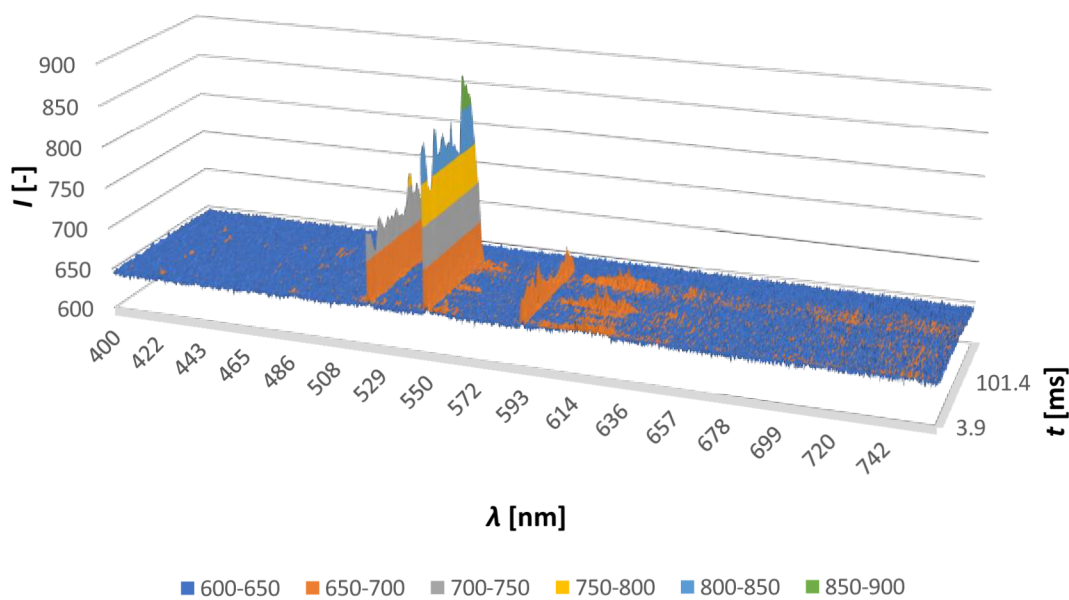
Obrázek 6.32 Porovnání polohy oblouku – vrchní kontakt



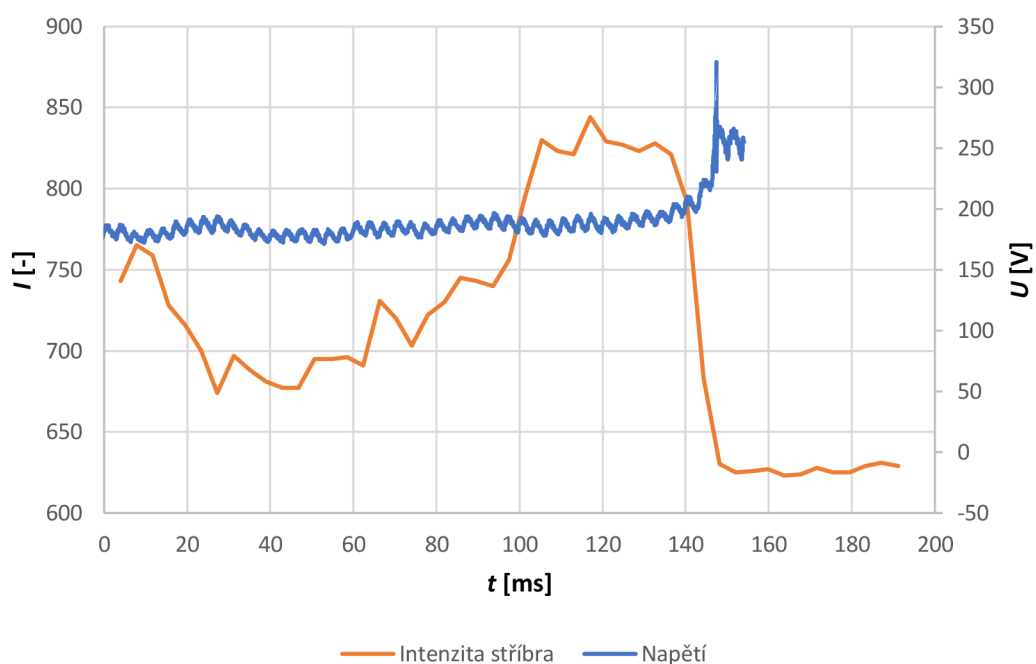
Obrázek 6.33 Porovnání polohy oblouku – spodní kontakt



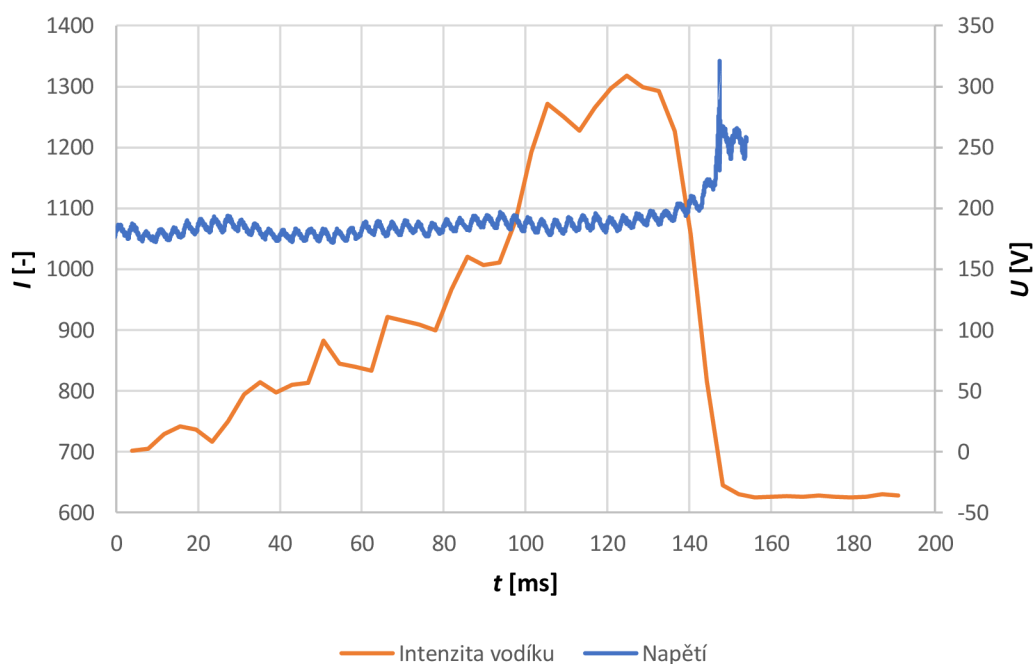
Obrázek 6.34 Graf závislosti intenzity vyzářených prvků na vlnové délce a času kamera 68 – páté měření



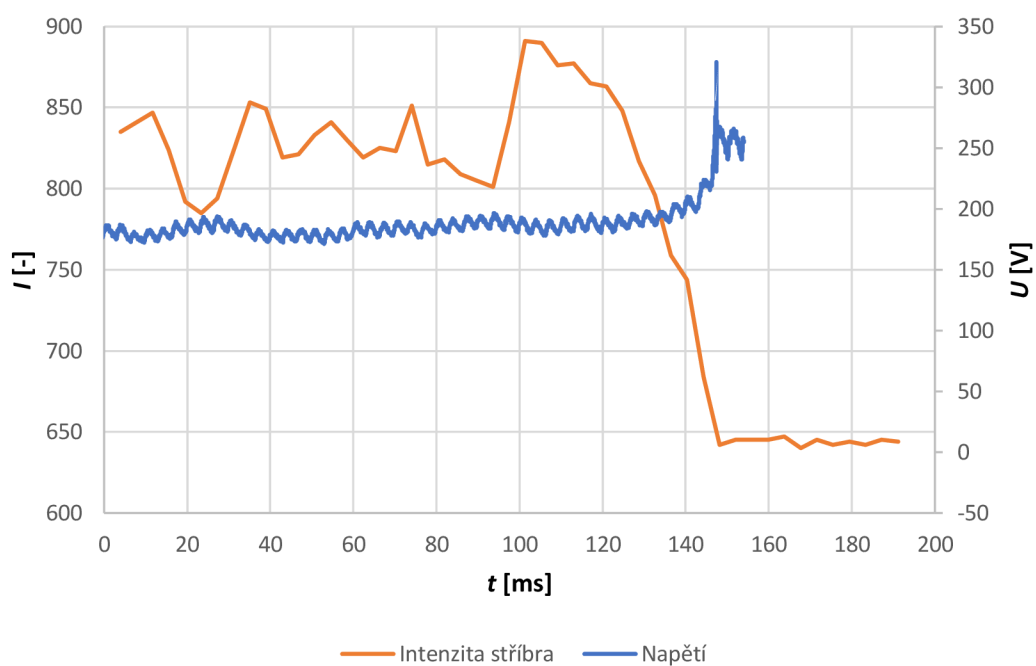
Obrázek 6.35 Graf závislosti intenzity vyzářených prvků na vlnové délce a času kamera 69 – páté měření



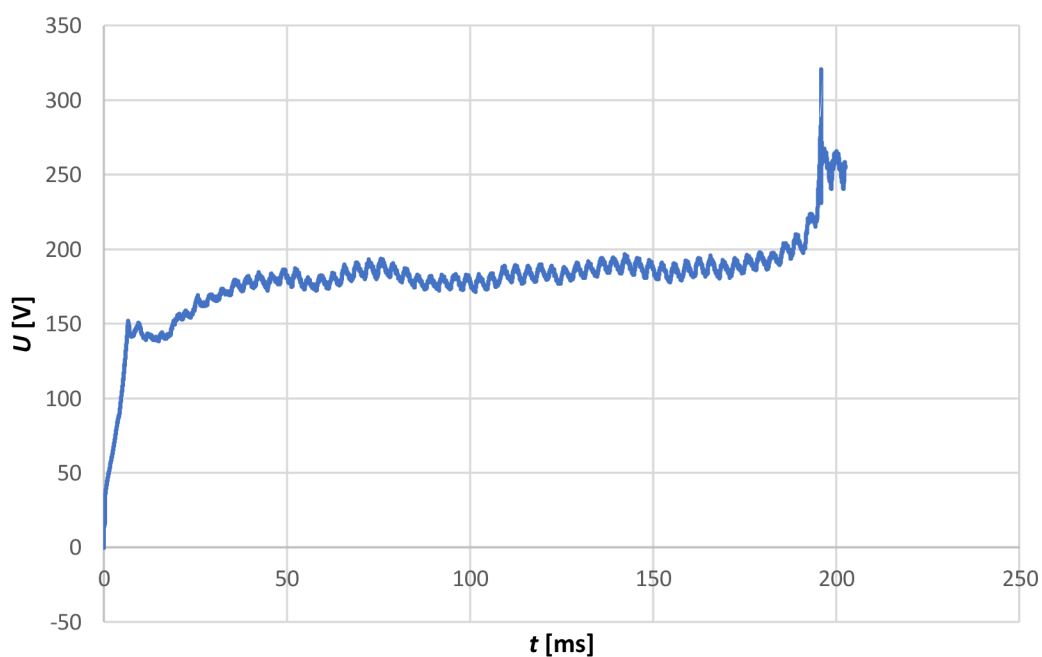
Obrázek 6.36 Spektrum stříbra v čase na vlnové délce 521,44720 nm kamera 68 – páté měření



Obrázek 6.37 Spektrum vodíku v čase na vlnové délce 656,97247 nm kamera 68 – páté měření



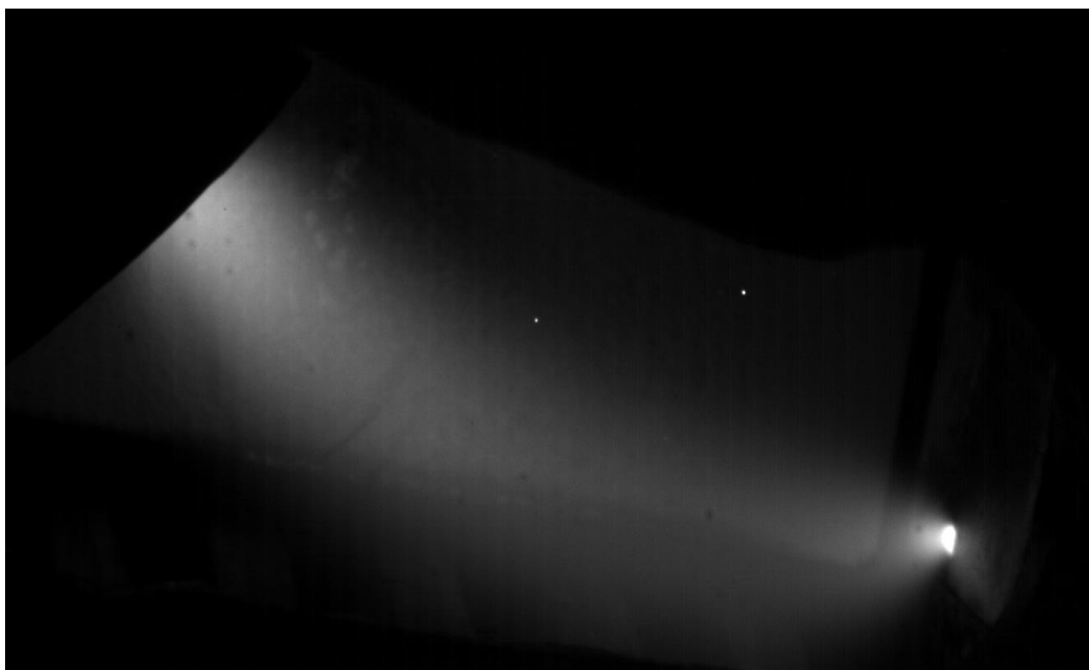
Obrázek 6.38 Spektrum stříbra v čase na vlnové délce 548,95337 nm kamera 69 – páté měření



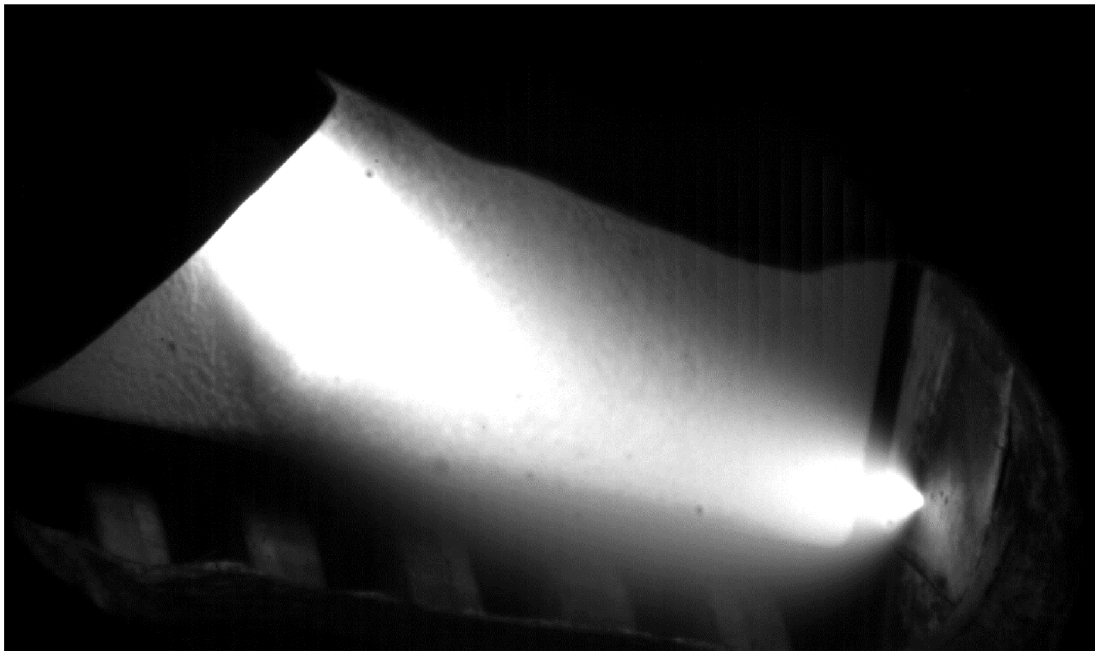
Obrázek 6.39 Vývoj napětí oblouku v čase – páté měření

Na průběhu vodíku (obrázek 6.37) se dá pozorovat, jak se podařil zachytit celý průběh hoření spektrální kamerou. Začátek se nepovedlo zachytit, a tak není možné pozorovat prudký nárůst intenzity vodíku jako na obrázku 6.10 prvního měření. Zbytek průběhu je podobný průběhu vodíku z druhého měření na stejné vlnové délce.

Průběh stříbra se ale od druhého měření liší. Místo klesajícího tendru se jeho intenzita v čase zvětšuje. V čase 93,2 ms se napětí oblouku dostalo na hodnotu 197,3 V. To vyústilo ve zvětšení energie oblouku a natavení většího množství povrchu kontaktů. Zvětšení energie se dá pozorovat na zvýšené intenzitě světla na snímcích z vysokorychlostní kamery (obrázek 6.40 a 6.41). Intenzita stříbra v oblouku tedy závisí na obloukovém napětí, ale velikost obloukového napětí nezávisí na intenzitě stříbra v oblouku.



Obrázek 6.40 Snímky z vysokorychlostní kamery – intenzita světla

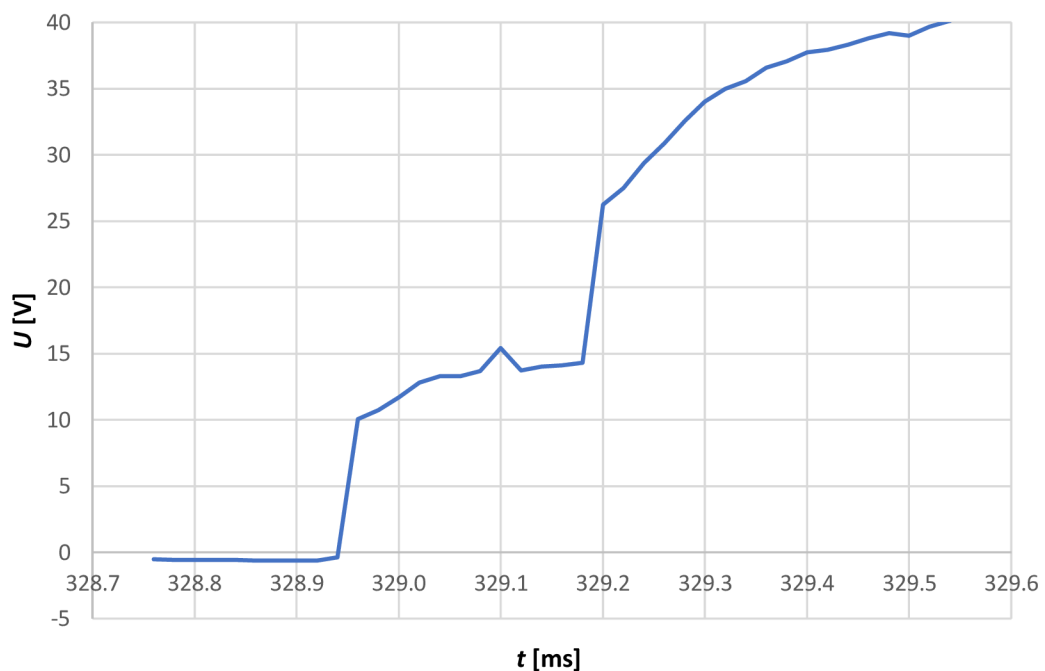


Obrázek 6.41 Snímky z vysokorychlostní kamery – intenzita světla

6.4 Analýza měření

Celkem proběhlo pět měření. Při prvním měření byly špatně nastavené spektrální kamery a podařilo se zachytit jenom začátek hoření oblouku. Na prvním měření byl ukázán blízký pohled na vývoj intenzit vodíku a stříbra v oblouku na počátku jeho hoření. Nejlépe dopadlo druhé a páté měření, kdy se dalo pozorovat uhasínání oblouku a intenzity vodíku a stříbra. Třetí a čtvrté měření dopadla podobně jako předešlá dvě měření co se týče průběhu napětí a intenzit vodíku a stříbra. Proto tyto měření nejsou okomentovány jako ostatní. Nepodařilo se totiž zachytit uhasínání oblouku.

K měření byl k dispozici jistič s rotačním kontaktním systémem s dvojitým přerušením. Vliv této vlastnosti jističe lze pozorovat na obrázku 6.42. Na něm jde vidět detail průběh napětí, jak se kontakty oddalují. Neoddálí se ve stejném čase, jeden je zpožděný. Toto zpoždění je ale velice malé. Pohybuje se kolem $250 \mu\text{s}$ a platí pro všechna měření.



Obrázek 6.42 Detail průběhu napětí oblouku v čase – první měření

Intenzity vyzářených sledovaných prvků (stříbra a vodíku) mají různé průběhy pro tato měření, ale dá se u nich pozorovat jistá podobnost. U intenzity vodíku je možné pozorovat téměř okamžité zvýšení, aspoň u prvních třech měření. U čtvrtého a pátého měření toto zvýšení není. To může být zapříčiněné tím, že kontakty po třetím a čtvrtém měření nebyly dostatečně vychladlé, aby na nich kondensovala vlhkost. Kondenzovaná vlhkost na kontaktech je nejspíš důvodem, proč byla intenzita vodíku při zapálení oblouku tak vysoká. Další příčinou ale mohou být i malé kousky plastů, které mohly odpadnout z obroušených hran vytvořeného otvoru pro zkoumání. Spektra se při zhasínacím pochodu podařilo zachytit jen u druhého a pátého měření. Zde jde vidět postupné zvyšování intenzity, což může být způsobené působením oblouku, který svou teplotou natavoval okolní plasty.

Pro intenzitu stříbra v oblouku také platí zvýšená intenzita na začátku hoření oblouku. Při počátku průchodu proudu se mohou kontakty natavit, protože stříbro má nízký bod tavení. Po následném oddálení kontaktů vzniká kovový můstek. Jakmile se kontakty ještě více oddálí, dojde k přetržení můstku a dochází ke vzniku kovové páry. Díky tomu dojde zaprvé k nárazové ionizaci a zapálení oblouku, zadruhé k naměření vyšší intenzity kontaktního materiálu. Další průběh intenzity stříbra se odvíjí od pohybu oblouku po kontaktu a napětí, kdy svým působením a výkonem natavuje kontakty.

7. MĚŘENÍ ZÁVISLOSTI DOBY HOŘENÍ OBLOUKU NA NAPĚTÍ A PROUDU

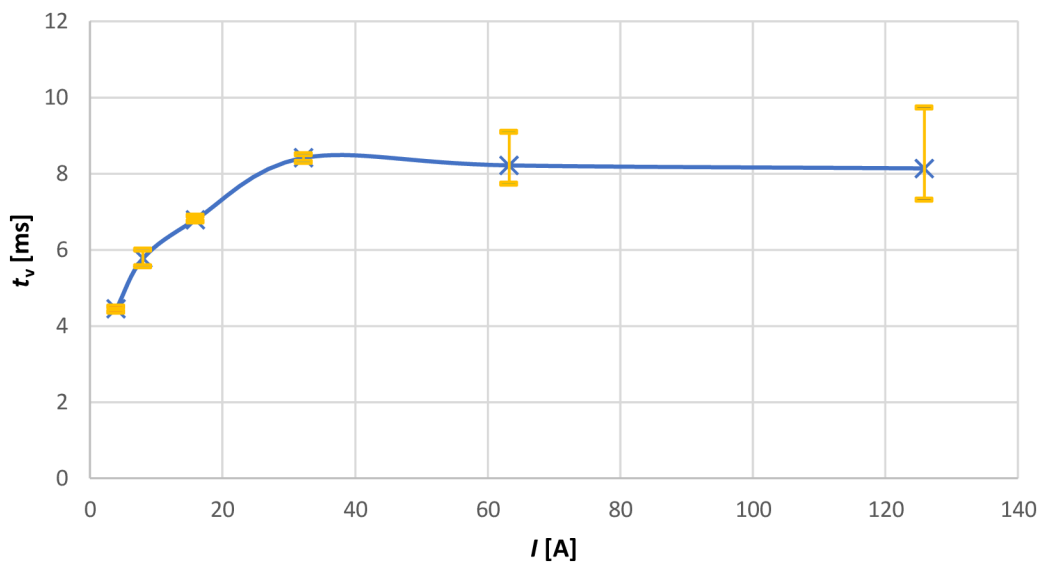
Měření probíhalo dle normy ČSN EN 60947-2 ed. 4 z roku 2018 přesněji podle zkoušky kritickým stejnosměrným zatěžovacím proudem. Obvod byl zapojen pro jeden pól jističe.

Směr průtoku proudu přístrojem nebyl daný, tudíž se zkouška prováděla 5x v přímém směru a 5x ve směru obráceném. Rozsah zkušebních proudů byl pro některá měření rozšířen směrem nahoru, kdy byl proud nastaven na hodnotu 125 A. Hodnoty napětí byly zvolené v rozsahu 150 až 400 V s krokem 50 V. Pro každou hodnotu napětí bylo provedeno 5 až 6 měření, tedy pro jednotlivé hodnoty zkušebních proudů, a byly zaznamenány časy hoření oblouku. Podle tabulky 8 v normě ČSN EN 60947-2 ed. 4 je počet spínacích cyklů za hodinu pro hodnoty proudu menší jak 100 A roven 120. Pro případ procházejícího proudu o velikosti 125 A platí stejná hodnota spínacích cyklů za hodinu, tedy 120. Této podmínky bylo dosaženo. Hodnota τ byla zvolena dle tabulky 11 podle normy ČSN EN 60947-2 ed. 4, kde hodnota pro provozuschopnost odpovídá 2 ms.

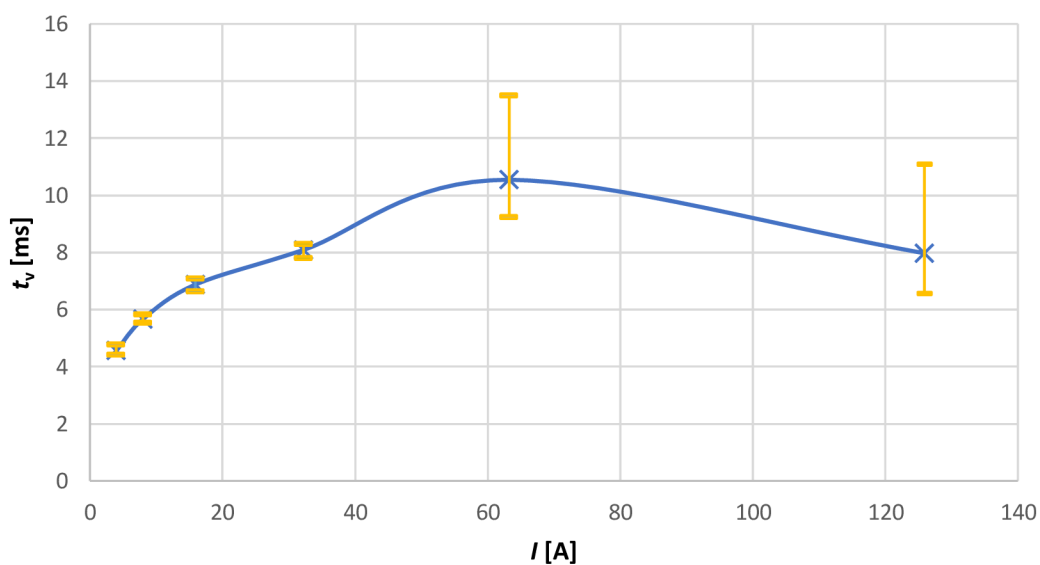
Pro vynesení naměřených časů do grafů se vypočítal průměr z jednotlivých pěti či šesti měření na stejných parametrech při obou polaritách. Do grafů byly také přidány rozsahy hodnot naměřených časů, tedy maximální a minimální čas hoření oblouku. Byly naměřeny případy, kdy oblouk sám nezhasnul za maximální dobu testu 2,5 s, a tak byl vypnut nadsystémem. Čas hoření oblouku se do výpočtu poté stanovil na 2500 ms za cenu jisté nepřesnosti. Tento problém ale nastal jen při hodnotě napětí 400 V a hodnotách proudu 32 A a 63 A.

Schéma zapojení bylo stejné jako u prvního měření. Viz obrázek 6.1 a 6.2.

7.1 Měření při napětí 150 V



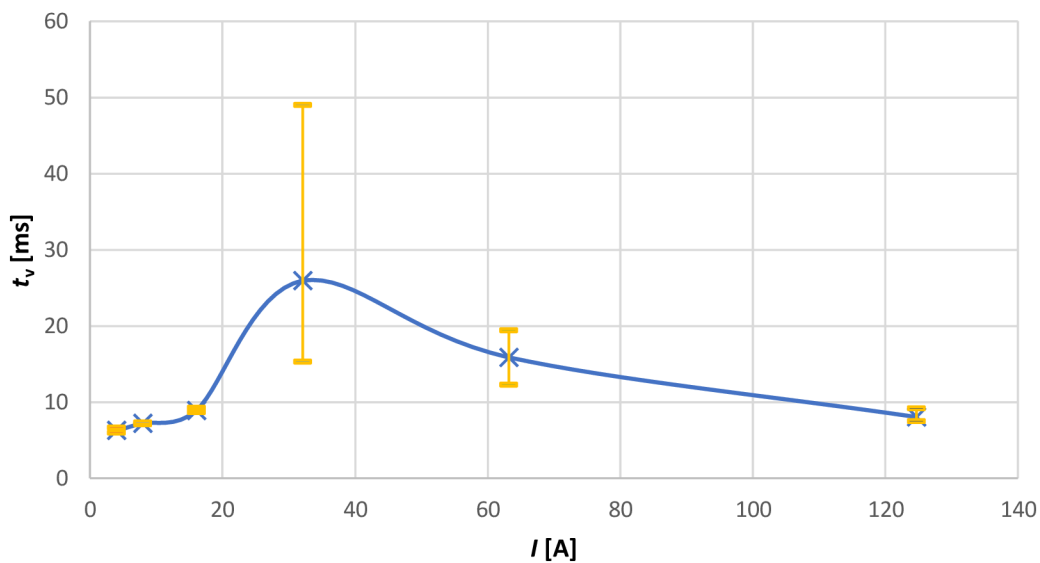
Obrázek 7.1 Graf závislosti vypínacího času na velikosti proudu při napětí 150 V – přímý směr



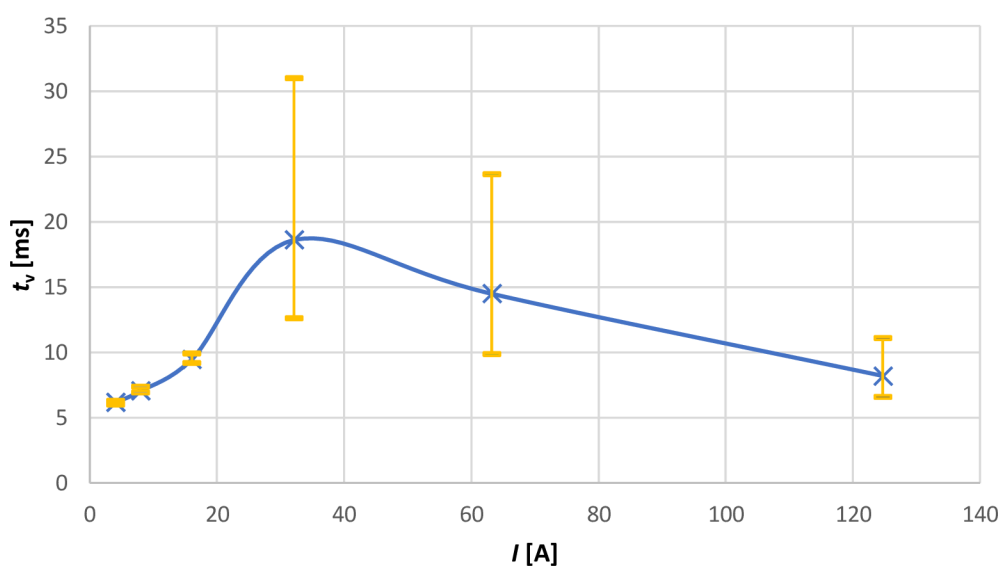
Obrázek 7.2 Graf závislosti vypínacího času na velikosti proudu při napětí 150 V – obrácený směr

Z grafů jde vidět, že doba hoření oblouku byla velice krátká v rozmezí 4 až 11 ms. Rozptyl mezi jednotlivými časy je taktéž malý. Při hodnotě napětí 150 V je možné, že oblouk nebyl vtažen do zhášecí komory a zhasl samovolně po oddálení kontaktů.

7.2 Měření při napětí 200 V



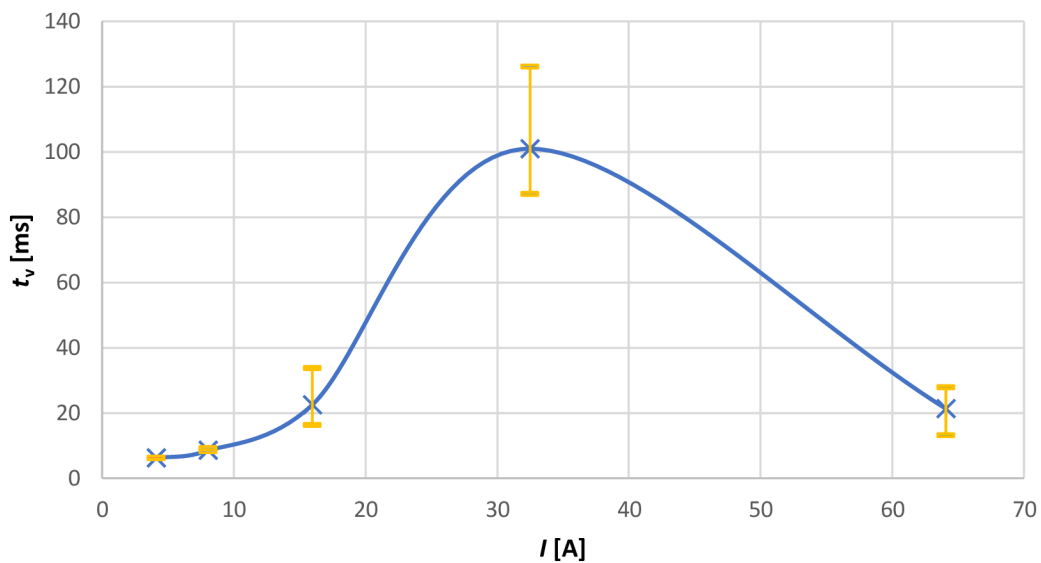
Obrázek 7.3 Graf závislosti vypínacího času na velikosti proudu při napětí 200 V – přímý směr



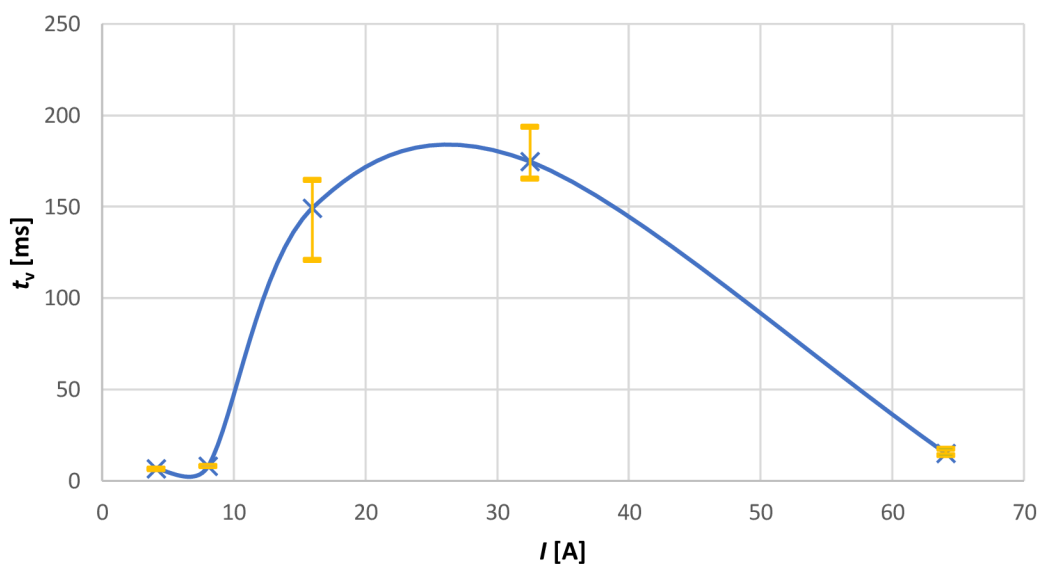
Obrázek 7.4 Graf závislosti vypínacího času na velikosti proudu při napětí 200 V – obrácený směr

Se zvýšeným napětím se prodloužily i průměrné doby hoření oblouku. Sice stále v rámci jednotek milisekund, ale lze pozorovat nárůst průměrné doby hoření oblouku pro hodnotu proudu 32 A. Tento nárůst a vyšší rozptyl hodnot ukazuje, že hodnota proudu 32 A je v kritické oblasti použitého přístroje.

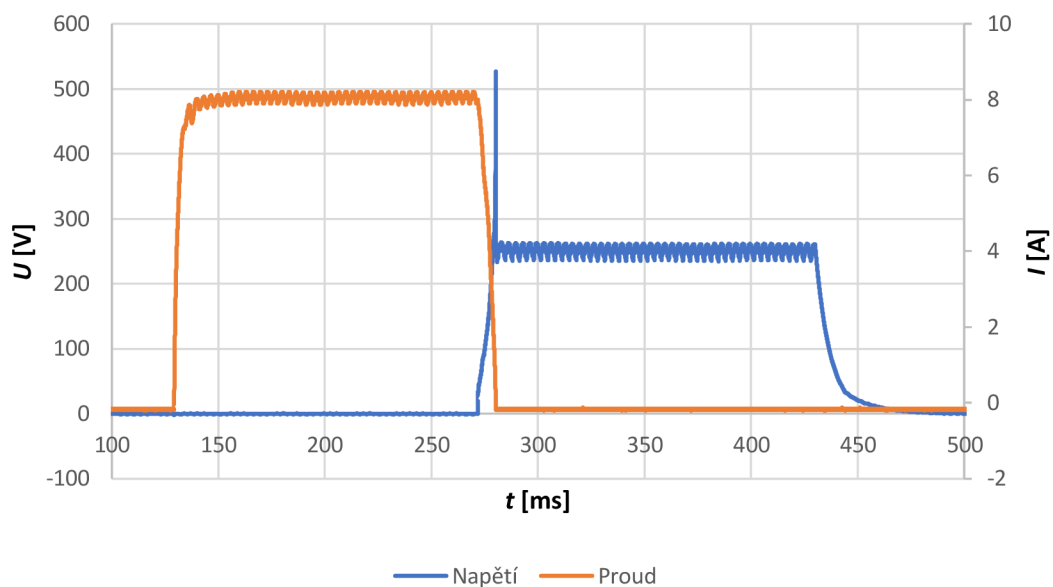
7.3 Měření při napětí 250 V



Obrázek 7.5 Graf závislosti vypínacího času na velikosti proudu při napětí 250 V – přímý směr

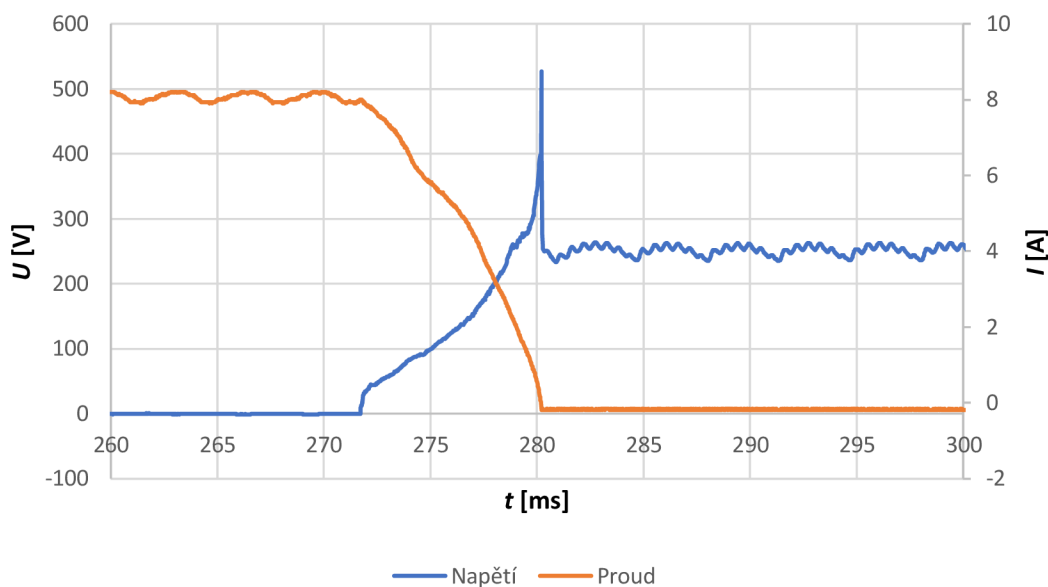


Obrázek 7.6 Graf závislosti vypínacího času na velikosti proudu při napětí 250 V – obrácený směr

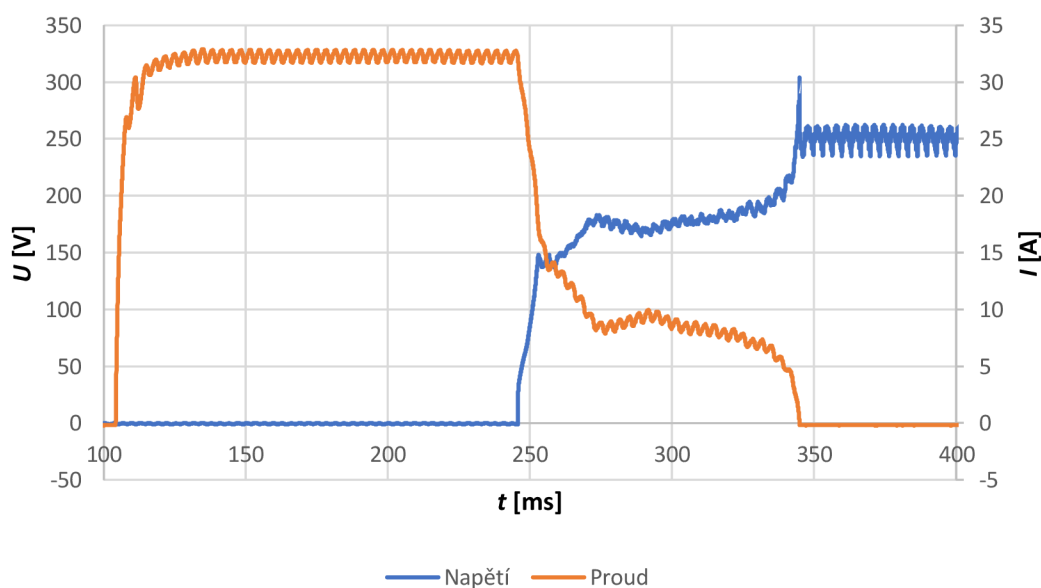


Obrázek 7.7 Graf průběhu napětí a proudu pro proud 8 A – přímý směr

Při bližším pohledu na průběh napětí a proudu pro jednotlivé proudy lze pozorovat, jak probíhalo měření. Kontakty se díky pneumatickému pohonu sepnuly a procházel proud. Poté pneumatický pohon rozeplnul kontakty, což mělo za následek zapálení oblouku. Na obrázku 7.10 lze vidět detail průběhu napětí a proudu při zapálení oblouku od času 271,5 ms do 280 ms. Čas 271,5 ms značí počátek průchodu proudu, tedy zapálení oblouku a čas 280 ms je spojen s koncem průchodu proudu, tedy uhašení oblouku. Nakonec se na kontaktech zotavilo stejnosměrné napětí a po nastaveném čase systém vypnul napájení.



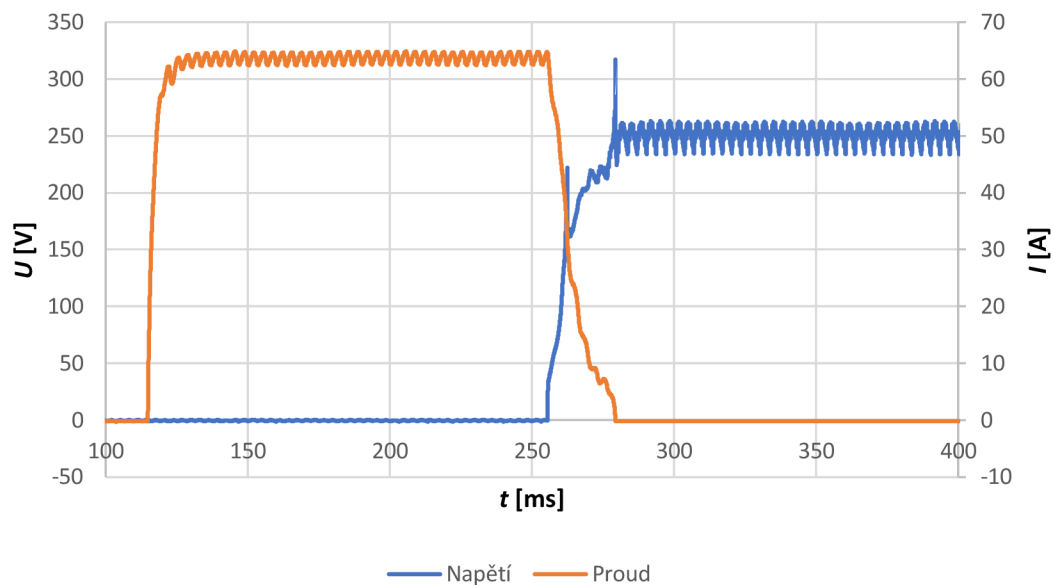
Obrázek 7.8 Graf detailu průběhu napětí a proudu pro proud 8 A – přímý směr



Obrázek 7.9 Graf průběhu napětí a proudu pro proud 32 A – přímý směr

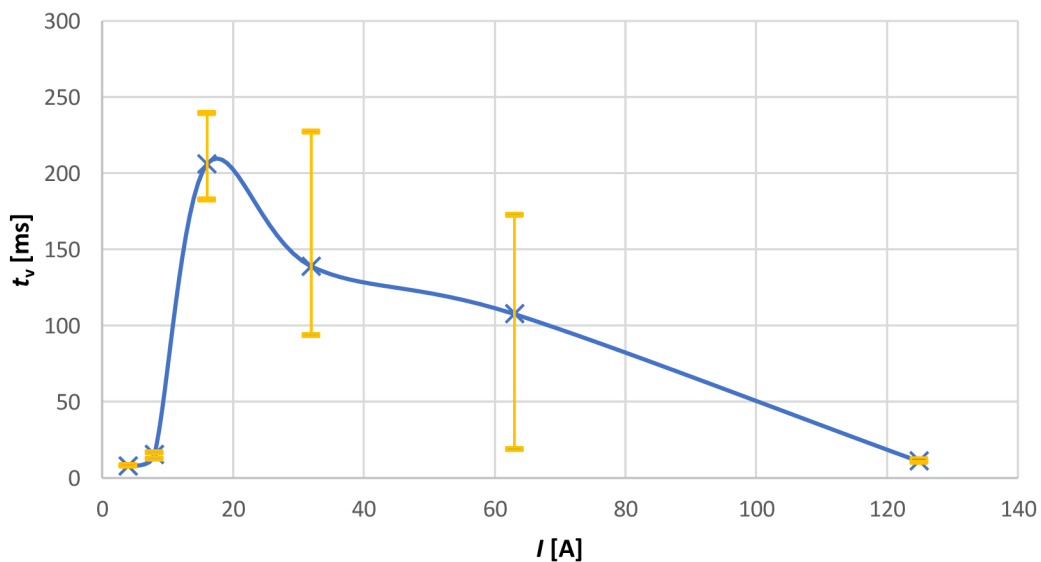
Na obrázku 7.5 bylo vidět, že průměrné hodnoty hoření oblouku mají vrchol právě v hodnotě proudu 32 A. To dokazuje i přiložený obrázek 7.9, který když se porovná s obrázkem 7.7, je vidět prodloužený čas hoření. Delší čas hoření lze pozorovat taktéž v případě, když se obrázek 7.9 porovná s obrázkem 7.10, kdy i pro vyšší hodnotu

proudu platí kratší doba hoření. To značí, že hodnota proudu 63 A se nachází na kraji nebo mimo kritickou oblast.

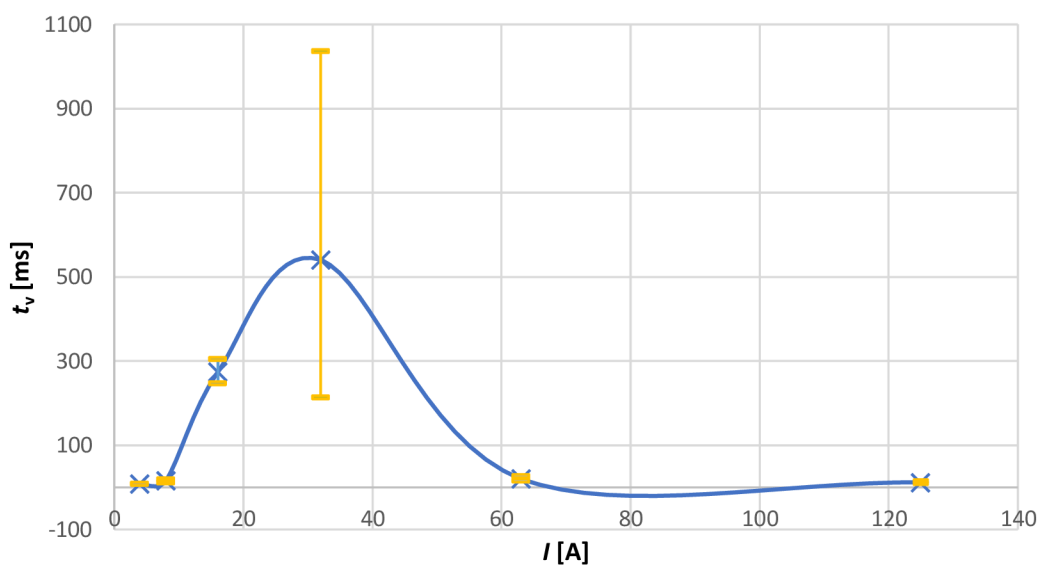


Obrázek 7.10 Graf průběhu napětí a proudu pro proud 63 A – přímý směr

7.4 Měření při napětí 300 V



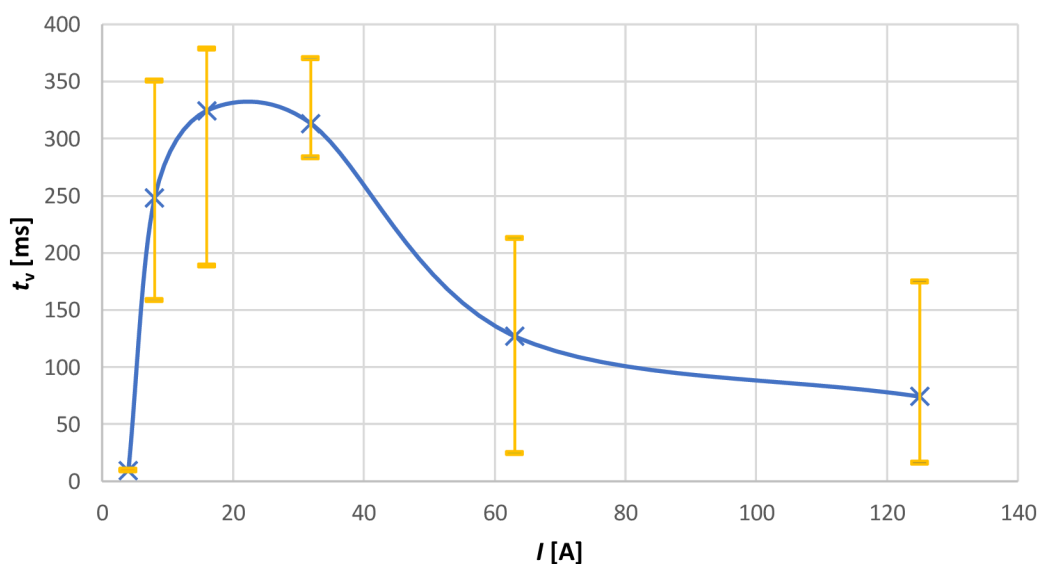
Obrázek 7.11 Graf závislosti vypínacího času na velikosti proudu při napětí 300 V – přímý směr



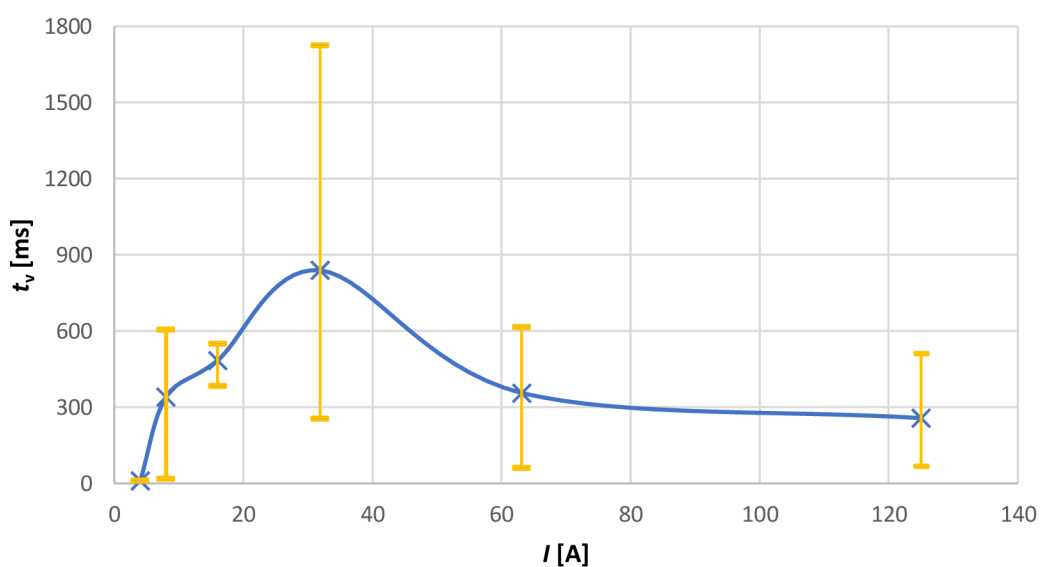
Obrázek 7.12 Graf závislosti vypínacího času na velikosti proudu při napětí 300 V – obrácený směr

Během měření při napětí 300 V došlo k rozšíření kritické oblasti k hodnotě proudu 16 A, kdy se dá pozorovat na obrázku 7.11 a 7.12 zvýšené časy hoření oblouku. V přímém směru má průběh dokonce vrchol u hodnoty proudu 16 A.

7.5 Měření při napětí 350 V



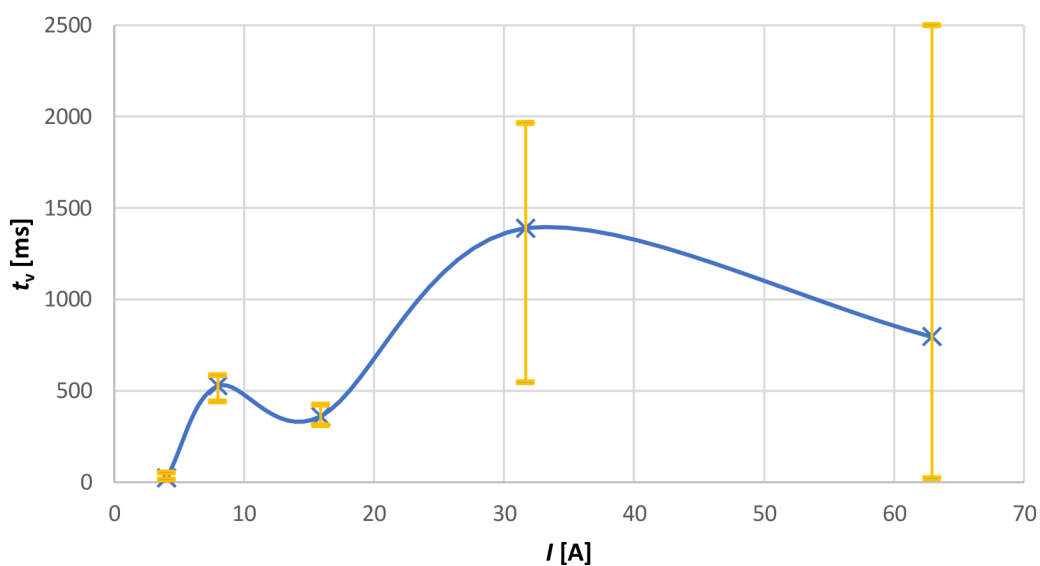
Obrázek 7.13 Graf závislosti vypínacího času na velikosti proudu při napětí 350 V – přímý směr



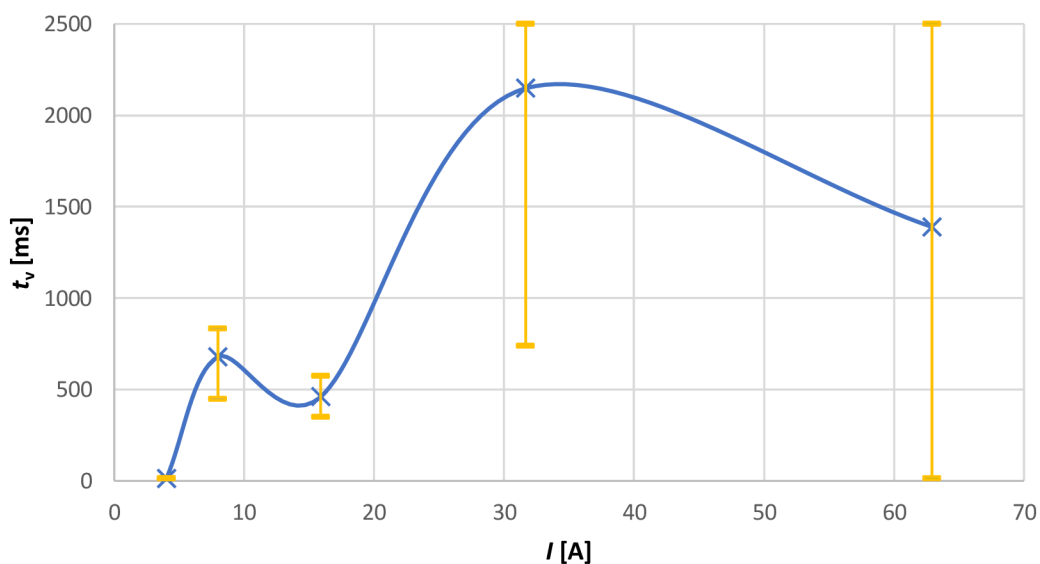
Obrázek 7.14 Graf závislosti vypínacího času na velikosti proudu při napětí 350 V – obrácený směr

Kritická oblast se dále rozšířila směrem k nižším hodnotám proudů i pro hodnotu napětí 350 V. Ovšem průměrná doba hoření oblouku je vysoká i pro vyšší hodnoty proudu s relativně velkými rozptyly. Každopádně průběh má klesající tendenci a průměrná doba hoření je nižší než pro kritickou hodnotu.

7.6 Měření při napětí 400 V



Obrázek 7.15 Graf závislosti vypínacího času na velikosti proudu při napětí 400 V – přímý směr



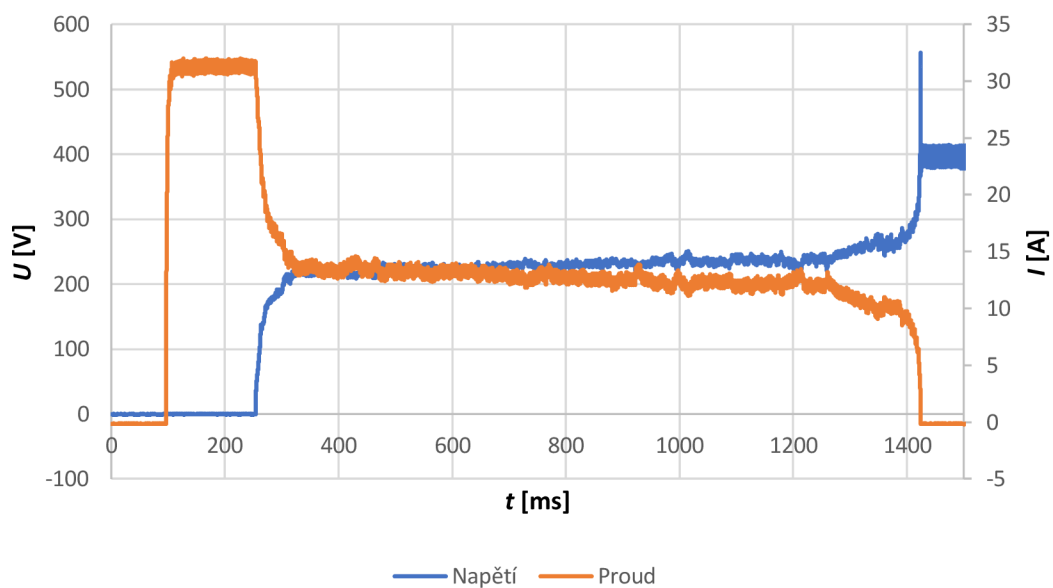
Obrázek 7.16 Graf závislosti vypínacího času na velikosti proudu při napětí 400 V – obrácený směr

Výsledný tvar průběhu vypínacího času nesplnil předpoklad pro měření na hodnotě napětí 400 V. Vrchol v hodnotě proudu 32 A splnil předpoklad, ale snížení průměrné doby hoření mezi hodnotou proudu 8 A a 32 A nebylo očekávané. Nicméně tento jev

mohl být zapříčiněn tím, že pracovní napětí přesáhlo hodnotu jmenovitého stejnosměrného pracovního napětí, které je pro tento přístroj cca 170 V na pól.

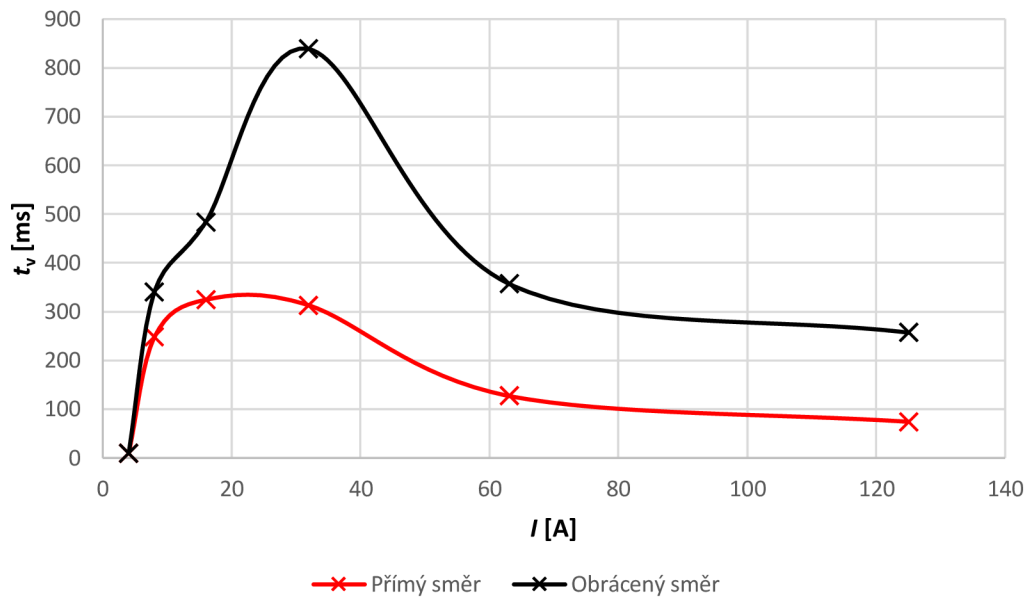
V tomto případě bylo provedeno pět měření, protože výkon oblouku byl vysoký a docházelo k zbytečnému namáhání přístroje. V některých případech totiž oblouk hořel déle než 2,5 s a s největší pravděpodobností hořel stabilně.

Přiložený průběh na obrázku 7.17 ukazuje zvýšenou dobu hoření oblouku, která byla delší než 1 s, přesněji 1170 ms. Hodnota proudu se nachází v kritické oblasti, což je první příčina. Druhou příčinou je zvýšený výkon oblouku díky vyššímu napětí. Kombinací těchto vlivů došlo i delším hořením vyšším jak 2,5 s.



Obrázek 7.17 Graf průběhu napětí a proudu pro proud 32 A – přímý směr

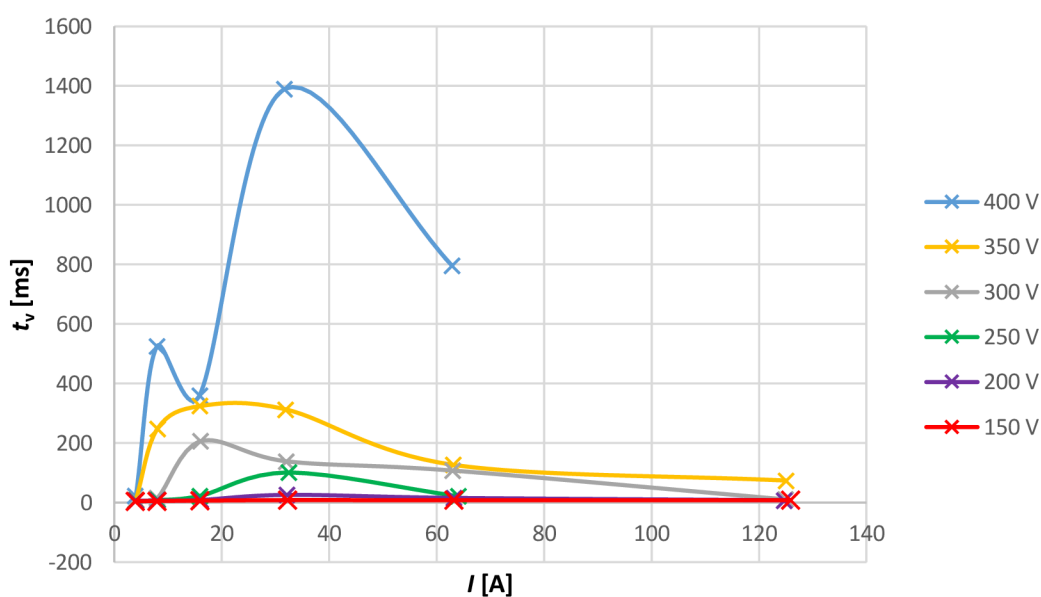
7.7 Analýza měření



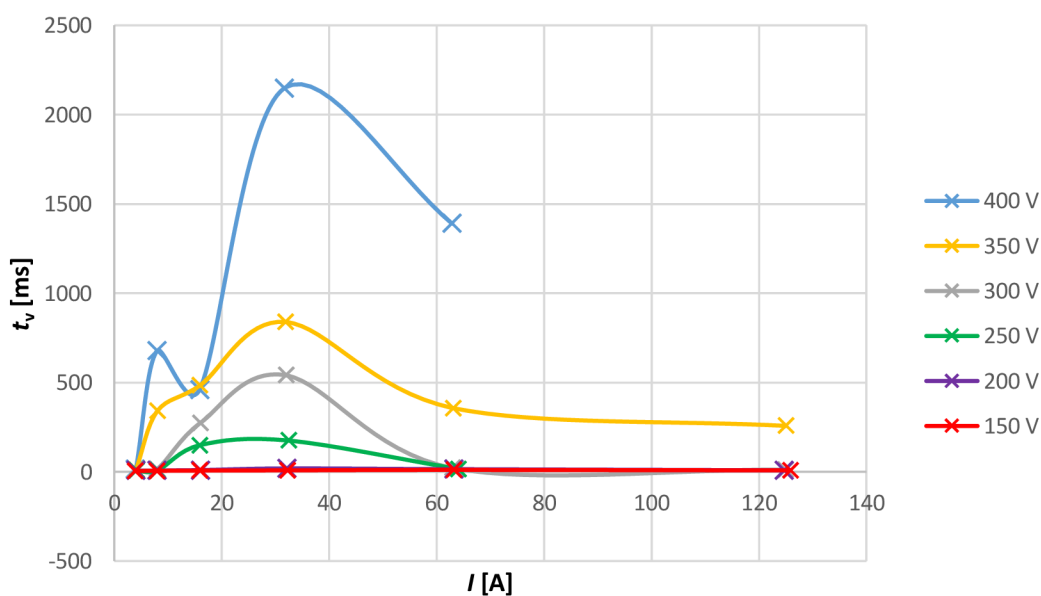
Obrázek 7.18 Graf závislosti vypínacího času na velikosti proudu pro oba směry průchodu proudu pro napětí 350 V

Tvar průběhů se při prohozené polaritě pro jednotlivá napětí ve tvaru moc neliší. Rozdíl je ale v průměrné době hoření, kdy se doba hoření při obrácené směru toku proudu prodlužuje oproti přímému směru, jak lze vidět na obrázku 7.18. Tento rozdíl je zapříčiněn jinou interakcí pro jednotlivé polarity. Jističe s dvoukontaktním rotačním systémem nemají stejné proudovodné dráhy a dochází k prodloužení doby hoření.

Průběhy jednotlivých napětí na obrázcích 7.19 a 7.20 ukazují, jak se posouvá kritická oblast přístroje. Na nejnižší hodnotě napětí 150 V a 200 V není zřetelná, ale se zvyšujícím napětím je vidět lépe. Čím vyšší je napětí, tím víc se kritická oblast posouvá k nižším hodnotám proudu a také se díky tomu prodlužuje průměrná doba hoření oblouku, což platí pro obě zapojení. Napětí má tedy vliv jak na šířku kritické oblasti, tak i na dobu hoření oblouku. Na rozdíl od proudu, který má vliv jen na dobu hoření oblouku, a navíc pouze na určité rozmezí hodnot proudu.



Obrázek 7.19 Graf závislosti vypínacího času na velikosti proudu pro všechna napětí – přímý směr



Obrázek 7.20 Graf závislosti vypínacího času na velikosti proudu pro všechna napětí – obrácený směr

Z průběhů na obrázcích 7.19 a 7.20 dále vyplývá, že kritická oblast se nachází v okolí hodnoty proudu 32 A. Jak už bylo řečeno, kritická oblast se posouvá k nižším hodnotám proudu. Nicméně pro hodnotu proudu 4 A je průměrná doba hoření oblouku víceméně stejná. Rozdíl hodnot mezi jednotlivými napětími je v rámci jednotek ms.

Ohraničení na pravé straně kritické oblasti se nachází v okolí hodnoty proudu 63 A. Při vyšších napětích 350 V a 400 V jsou doby hoření oblouku vyšší, ale to je dané výkonem oblouku. Navíc při této hodnotě proudu pokračuje klesající tendence doby hoření oblouku pro všechny hodnoty napětí.

8. ZÁVĚR

Existuje několik principů zhašení stejnosměrného proudu. Tyto principy byly popsány již v semestrální práci a byly z ní převzaty. Z rešerše vyplývá, že se v praxi využívá jen jedna, a to zvyšování odporu oblouku, tedy posun V-A charakteristiky do oblasti nestability. Informace o kritické oblasti a jejího zjišťování jsou popsány v kapitole 3. Tato kapitola je přímo ocitovaná dle platné normy ČSN EN 60947-2 ed. 4 z roku 2018.

V kapitole 4 byly navrženy metody pro výzkum zhašení oblouků v oblasti kritických stejnosměrných proudů. Jedná se o použití vysokorychlostní kamer pro bližší pohledy na chování oblouku během hoření a využití spektrálních kamer pro zjištění prvků, které se během hoření vyskytnou působením oblouku, a jejich intenzitu.

Měření spekter proběhlo za konstantních hodnot napětí a proudu. Vzhledem k cíli měření lze z průběhů vyvodit, že intenzita stříbra v oblouku nemá na napětí oblouku vliv. Ze spojených průběhů napětí a intenzity stříbra se dá totiž pozorovat, jak velikost napětí nestoupá ani neklesá vzhledem k intenzitě stříbra. Na začátku, kdy se oblouk zapaluje, sice roste napětí a intenzita stříbra, ale to je dané opačnou závislostí, kdy napětí oblouku a samotný oblouk má vliv na intenzitu stříbra v něm samotném, a především kvůli pohybu oblouku po povrchu kontaktů.

Druhým sledovaným prvkem byl vodík. Vodík se u každého měření projevil při uhašení oblouku, kdy se působením oblouku natavovaly okolní plastové kryty. Intenzita vodíku v oblouku se zvyšovala i na začátku zapálení oblouku, ale toto platilo jen pro první tři měření. Důvodem byla nejspíš kondenzovaná vlhkost na kontaktech nebo usazení plastových částiček, které se hned po zapálení oblouku vypařily. Měření pomocí spektrálních kamer bylo použito kvůli bližšímu pohledu na vývoj vybraných prvků v čase, především na vliv těchto prvků na vypínací pochody.

Předmětem zkoumání druhého měření bylo stanovení závislosti doby hoření oblouku na velikosti napětí a proudu. Průběhy závislosti vypínacího času na velikosti proudu pro jednotlivá napětí jsou podobné teoretickému průběhu (viz obrázek 3.1) s viditelným zvýšením doby hoření oblouku v určitém rozmezí proudů. Dále lze pozorovat závislost, při které se doba hoření oblouku zvyšuje společně s napětím (viz obrázek 7.19 a 7.20). Pro proud tato přímo úměrná závislost neplatí. Zde hraje roli kritická oblast proudů, kdy se doba hoření oblouku zvyšuje jen pro určité rozmezí proudů a pak se zase snižuje. Z měření vyplývá, že pro použitý kompaktní jistič je kritická oblast v okolí hodnoty proudu 32 A. Tato oblast se ale rozšiřuje v závislosti na velikosti napětí, kdy se se zvětšujícím napětím rozšiřuje k nižším hodnotám proudů a prodlužuje se doba hoření oblouku.

Jediné měření závislosti doby hoření oblouku, které se přiblížilo nastaveným hodnotám pro měření spekter oblouku, se nachází v podkapitole 7.3. Toto měření probíhalo při hodnotě napětí 250 V. Hodnota napětí u měření spekter oblouku byla nastavena na 256 V a hodnota proudu na 32,7 A. Skutečné hodnoty napětí a proudu pro

měření 7.3 jsou 250 V a 32,5 A. Jak již bylo napsáno o odstavci výše, kritická oblast použitého přístroje se pohybovala v okolí hodnoty proudu 32 A.

Lze tedy říct, že změřené průběhy spekter oblouku platí pro kritickou oblast proudů. Je možné, že intenzity stříbra a vodíku v oblouku by dosahovaly menších hodnot, pokud by hodnota proudu nepatřila do kritické oblasti přístroje. Prodloužením doby hoření totiž dochází k většímu namáhání kontaktů i okolních krytů.

LITERATURA

- [1] SLADE, Paul G. *Electrical contacts: principles and applications. Second edition.* Boca Raton: CRC Press, Taylor Francis Group, [2014]. ISBN 1439881308
- [2] HAVELKA, Otto. *Elektrické přístroje: učebnice pro elektrotechnické fakulty vysokých škol technických.* Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1985. Dostupné také z: <http://www.digitalniknihovna.cz/mzk/uuid/uuid:e2cb1000-c461-11e79c14-005056827e51>
- [3] 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., dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=87667
- [4] MORAVEC, Jan. *Elektrický oblouk - jak vzniká a jak se zháší?* OENERGETICE.cz [online]. 2017, 2017 [cit. 2020-01-07]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektrina/elektricky-oblouk>
- [5] 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, dostupné z: <http://www.digitalniknihovna.cz/mzk/view/uuid:58f33d70-6eb8-11e2-b9fa-005056827e52?page=uuid:c51b25ea14bece9e7bf785ad2be3c5c6>
- [6] DRÁPALA Jaromír, KURSA Miroslav. *Elektrotechnické materiály, učební texty* [online]. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava 2012. ISBN 978-80-248-2570-0. Dostupné z: <http://www.person.vsb.cz/archivcd/FMMI/ETMAT/Elektrotechnicke%20materialy.pdf>
- [7] GROSS Boleslav a CHALUPA Zdeněk. *Elektrické přístroje II. druhé.* Brno: Rektorát vysokého učení technického v Brně, 1980.
- [8] GROSS, Boleslav. *Elektrické výboje v plynech.* Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1967. Populární přednášky o fyzice. Dostupné také z: <http://www.digitalniknihovna.cz/mzk/uuid/uuid:49ddae80-fbb7-11e5-8d5f-005056827e51>
- [9] HYTKA, Z., HELŠTÝN, D., KAČOR, P.: *Elektrické přístroje spínací, ochranné a jističí.* VŠB – TUO 2003, dostupné z: http://feil.vsb.cz/kat410/studium/studijni_materialy/ep/ep_II/Elektricke%20%20p%20ristroje%20spinac%ED%20ochranne%20a%20jistici.pdf
- [10] ČSN EN 60947-2 ed. 4. *Spínací a řídicí přístroje nízkého napětí - Část 2: Jističe.* Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018, XY s. Třídící znak 354101
- [11] *University information system MENDELU* [online]. Dostupné z: https://is.mendelu.cz/eknihovna/opory/zobraz_cast.pl?cast=52959

- [12] *Kalirna.cz. Spektrální analýza* [online]. Pardubice: MEDUNA vakuová kalírna, c2018 [cit. 2020-01-07]. Dostupné z: <https://www.kalirna.cz/cz/sluzby/item/38-spektralni-analyza.html>
- [13] BRABEC, Petr a Filip BARTŮNĚK. FYZIKA 007. *Spektrální analýza* [online]. 2012 [cit. 2020-01-07]. Dostupné z: <http://www.fyzika007.cz/optika/spektralni-analyza>
- [14] LEM. [online katalogový list]. LEM-IT-700-S. 2014 [cit. 7. 1. 2020]. Dostupné z: <https://www.newtons4th.com/wp-content/uploads/2014/07/LEM-IT-700-S.pdf>
- [15] FANTZ, U., *Basic Spect*, 2006, dostupné z: <http://stacks.iop.org/ps/15/S137>
- [16] MARTIŠOVIČ, Viktor. *Základy fyziky plazmy: Učebný text pre 3. Ročník magisterského štúdia* [online]. Bratislava, UNIBA, 2004
- [17] *NIST Atomic Spectra Database*. National Institute of Standards and Technology [online]. [cit. 2020-8-03]. Dostupné z: <https://www.nist.gov/pml/atomic-spectra-database>

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratky:

V-A	voltampérová charakteristika
nn	nízké napětí
vn	vysoké napětí
vvn	velmi vysoké napětí
ss	stejnoseměrný
<i>p</i>	úroveň p
<i>q</i>	úroveň q
<i>k</i>	úroveň k

Symboly:

U_{ob}	napětí oblouku	(V)
I_{ob}	proud procházející obloukem	(A)
U_A	napětí na anodě	(V)
U_K	napětí na katodě	(V)
α	konstanta Ayrtonové	(V)
β	konstanta Ayrtonové	(V·cm ⁻¹)
γ	konstanta Ayrtonové	(W)
δ	konstanta Ayrtonové	(W·cm ⁻¹)
l_a	délka oblouku	(m)
U_r	napětí na předřadném odporu	(V)
U_Z	napětí zdroje	(V)
R	odpor oblouku	(Ω)
E	průměrná intenzita elektrického pole	(N·C ⁻¹)
d	průměr oblouku	(m)
e	elementární náboj	(C)
n_e	počet volných elektronů	(-)
b_e	pohyblivost volných elektronů	(m ² ·V ⁻¹ ·s ⁻¹)
U_L	napětí na tlumivce	(V)
L	indukčnost	(H)
R_s	sériový odpor	(Ω)
E_p	energie na úrovni p	(J)
E_k	energie na úrovni k	(J)
λ_0	střední vlnová délka	(m)
f_0	základní frekvence	(Hz)
f	frekvence	(Hz)
v	rychlost atomů	(m·s ⁻¹)
c	rychlost světla	(m·s ⁻¹)

k_B	Boltzmannova konstanta	(J·K ⁻¹)
h	Planckova konstanta	(J·s)
T	termodynamická teplota	(K)
m	hmotnost molekuly	(kg)
A_{pk}	pravděpodobnost přechodu z úrovně p na úroveň k	(-)
ε_{pk}	koeficient čárové emise	(W·m ² ·sr ⁻¹)
ε_λ	koeficient spektrální čárové emise	(W·m ² ·sr ⁻¹)
I_{pk}	intenzita po přechodu z úrovně p na úroveň k	(m ³ ·s ⁻¹)
$n(p)$	počet excitovaných atomů na úrovni p	(m ³ ·s ⁻¹)
$n(q)$	počet excitovaných atomů na úrovni q	(m ³ ·s ⁻¹)
$n(k)$	počet excitovaných atomů na úrovni k	(m ³ ·s ⁻¹)
Δf_L	šířka čáry v poloviční výšce (Lorentzův profil)	(m)
Δf_D	šířka čáry v poloviční výšce (Gaussův profil)	(m)