

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Brno, 2024

Michal Koreň



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

GENERÁTOR ELEKTRICKÉHO OBLOUKU A ANALÝZA JEHO PLAZMATU

ELECTRIC ARC GENERATOR AND ITS PLASMA ANALYSIS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Michal Koreň

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. David Šimek, Ph.D.

BRNO 2024



Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Student: Michal Koreň

ID: 230385

Ročník: 3

Akademický rok: 2023/24

NÁZEV TÉMATU:

Generátor elektrického oblouku a analýza jeho plazmatu

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Nastudujte metody analýzy plazmatu elektrického oblouku včetně jejich výhod a nevýhod.
2. Navrhněte a sestrojte generátor oblouku daných parametrů.
3. Aplikujte vybranou metodu na plazma generátoru oblouku za účelem zjištění jeho vybraných klíčových vlastností.
4. Kriticky zhodnoťte navržený generátor a sepište možnosti dalšího rozřízení/vylepšení vlastností.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] GROSS, Boleslav. Elektrické výboje v plynech. Praha: SNTL, 1967.
- [2] GROSS, Boleslav a Otto HAVELKA. Elektrické přístroje II. 2. vyd. Brno: Rektorát Vysokého učení technického v Brně, 1980.
- [3] HAVELKA, Otto. Elektrické přístroje I. 3. vyd. Brno: Rektorát Vysokého učení technického v Brně, 1982.
- [4] GROSS, Boleslav. Měření vysokých teplot. Praha: STÁTNÍ NAKLADATELSTVÍ TECHNICKÉ LITERATURY, 1962.

Termín zadání: 5.2.2024

Termín odevzdání: 29.5.2024

Vedoucí práce: Ing. David Šimek, Ph.D.

prof. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda rady studijního programu

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

Bakalárska práca sa zaoberá návrhom zariadenia na generáciu plazmy a spektroskopickou analýzou elektrického oblúka. Práca obsahuje teoretickú a praktickú časť. V prvej časti je vysvetlená teoretická problematika elektrického oblúka a plazmy. Ich vznik, správanie, vplyv na okolie a kľúčové vlastnosti. Popísané sú rôzne typy spektroskopických metód, ktoré môžu byť použité na meranie. V praktickej časti bolo navrhnuté zariadenie, ktoré generuje elektrický oblúk. Pomocou vybranej metódy boli určené kľúčové vlastnosti elektrického oblúka. Zdôvodnené sú výhody a nevýhody konkrétnej použitej metódy na analýzu. Pomocou nameraných hodnôt boli identifikované materiály prítomné v spektre a vypočítaná teplota plazmy elektrického oblúka vznikajúceho na medených elektródach pri rôznych vzdialenostiach a rôznych časoch. V závere je navrhnutý generátor plazmy kriticky zhodnotený, sú prediskutované jeho možné vylepšenia a využitie pre budúce účely výučby.

Kľúčové slová

Analýza plazmy, elektrický oblúk, generátor elektrického oblúka, plazma, spektroskopia

Abstract

The bachelor thesis deals with the design of a plasma generation device and spectroscopic analysis of the electric arc. The thesis contains a theoretical and a practical part. In the first part, the theoretical issues of electric arc and plasma are explained. Their origin, behaviour, effect on the surroundings and key properties. The different types of spectroscopic methods that can be used for measurements are described. In the practical part, a device that generates an electric arc has been designed. Using the selected method, the key properties of the electric arc were determined. The advantages and disadvantages of the particular method used for the analysis are justified. Using the measured values, the materials present in the spectrum were identified and the plasma temperature of the electric arc generated on the copper electrodes at different distances and different times was calculated. Finally, the proposed plasma generator is critically evaluated, its possible improvements and its use for future teaching purposes are discussed.

Keywords

Plasma analysis, electric arc, generator of electric arc, plasma, spectroscopy

Bibliografická citácia:

KOREŇ, Michal. *Generátor elektrického oblouku a analýza jeho plazmatu* [online]. Brno, 2024 [cit. 2024-03-10]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/159366>. Bakalárska práca. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky. Vedoucí práce David Šimek.

Prehlásenie

Prehlasujem, že som svoju bakalársku prácu na tému Generátor elektrického oblúka a analýza jeho plazmy vypracoval samostatne pod vedením vedúceho bakalárskej práce a s použitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce. Ako autor uvedenej bakalárskej práce ďalej prehlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto semestrálnej práce som neporušil autorské práva tretích osôb, nezasiahol som nedovoleným spôsobom do cudzích autorských osobnostných práv a som si plne vedomý následkov porušenia ustanovení § 11 a nasledujúcich paragrafov zákona č. 121/2000 Sb., vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovení druhej časti, hlavy VI. diel 4 Trestného zákonníka č. 40/2009 Sb.

V Brne dňa: 29.5.2024

.....
podpis autora

Pod'akovanie

Ďakujem vedúcemu bakalárskej práce, Ing. Davidovi Šimkovi, Ph.D., za účinnú pedagogickú a odbornú pomoc a ďalšie rady pri písaní bakalárskej práce. Taktiež ďakujem Ing. Michalovi Krbalovi, Ph.D., za veľkú pomoc pri konštruovaní zariadenia a za poskytnutie komponentov na meranie praktickej časti bakalárskej práce.

V Brne dňa: 29.5.2024

.....
podpis autora

Obsah

ZOZNAM TABULIEK	7
ZOZNAM OBRÁZKOV	7
1. Elektrický oblúk.....	10
1.1 Ionizácia	11
2. Plazma.....	12
3. Spektroskopia	13
3.1 Optická spektroskopia	13
3.2 Emisná spektroskopia	13
3.3 Absorpčná spektroskopia	14
4. Návrh a zostrojenie generátora	15
4.1 Kovové rameno.....	16
4.2 Zdroj	17
5. Meranie	18
5.1 Vysokorychlostná kamera.....	18
5.2 Vysokonapäťové sondy	19
5.3 Osciloskop a spektroskop.....	19
5.4 Ampérmeter	20
6. Priebeh merania.....	21
7. Spracovanie výsledkov	22
7.1 Spektrum v najkratšom oblúku	22
7.2 Spektrum v najdlhšom oblúku.....	23
8. Napätie a prúd	24
8.1 Napätie	24
8.2 Prúd.....	24
9. Výpočty teplôt.....	25
9.1 Príklad výpočtu teploty pre čas 200 ms a veľkosť oblúka 7 mm	25
9.2 Výpočet teploty pre čas 220 ms a vzdialenosť medzi elektródami 7,2 mm	27
9.3 Výpočet teploty pre čas 240 ms a vzdialenosť medzi elektródami 7,3 mm	28
9.4 Výpočet teploty pre čas 260 ms a vzdialenosť medzi elektródami 7,4 mm	29
9.5 Výpočet teploty pre čas 280 ms a vzdialenosť medzi elektródami 7,6 mm	30
9.6 Výpočet teploty pre čas 300 ms a vzdialenosť medzi elektródami 8 mm.....	31
9.7 Výpočet teploty pre čas 320 ms a vzdialenosť medzi elektródami 8,2 mm	32
9.8 Výpočet teploty pre čas 340 ms a vzdialenosť medzi elektródami 12 mm	33
9.9 Výpočet teploty pre čas 360 ms a vzdialenosť medzi elektródami 13,4 mm	34
9.10 Výpočet teploty pre čas 380 ms a vzdialenosť medzi elektródami 18,7 mm	35
9.11 Výpočet teploty pre čas 400 ms a vzdialenosť medzi elektródami 20,3 mm	36

9.12 Výpočet teploty pre čas 420 ms a vzdialenosť medzielektrodami 26,4 mm	37
9.13 Výpočet teploty pre čas 440 ms a vzdialenosť medzielektrodami 26,5 mm	38
9.14 Výpočet teploty pre čas 460 ms a vzdialenosť medzielektrodami 29,5 mm	39
9.15 Výpočet teploty pre čas 480 ms a vzdialenosť medzielektrodami 31,4 mm	40
9.16 Výpočet teploty pre čas 500 ms a vzdialenosť medzielektrodami 31,4 mm	41
9.17 Výpočet teploty pre čas 520 ms a vzdialenosť medzielektrodami 31,4 mm	42
9.18 Závislosť teploty na dĺžke oblúka	43
10. Zhodnotenie generátora.....	44
10.1 3D model	45
ZÁVER	46
ZOZNAM SYMBOLOV A SKRATIEK.....	47
REFERENCIE	48

ZOZNAM TABULIEK

Tabuľka 1 Namerané a vypočítané hodnoty pre čas 200ms	25
Tabuľka 2 Namerané a vypočítané hodnoty pre čas 220ms	27
Tabuľka 3 Namerané a vypočítané hodnoty pre čas 240ms	28
Tabuľka 4 Namerané a vypočítané hodnoty pre čas 260ms	29
Tabuľka 5 Namerané a vypočítané hodnoty pre čas 280ms	30
Tabuľka 6 Namerané a vypočítané hodnoty pre čas 300ms	31
Tabuľka 7 Namerané a vypočítané hodnoty pre čas 320ms	32
Tabuľka 8 Namerané a vypočítané hodnoty pre čas 340ms	33
Tabuľka 9 Namerané a vypočítané hodnoty pre čas 360ms	34
Tabuľka 10 Namerané a vypočítané hodnoty pre čas 380ms.....	35
Tabuľka 11 Namerané a vypočítané hodnoty pre čas 400ms	36
Tabuľka 12 Namerané a vypočítané hodnoty pre čas 420ms.....	37
Tabuľka 13 Namerané a vypočítané hodnoty pre čas 440ms.....	38
Tabuľka 14 Namerané a vypočítané hodnoty pre čas 460ms	39
Tabuľka 15 Namerané a vypočítané hodnoty pre čas 480ms.....	40
Tabuľka 16 Namerané a vypočítané hodnoty pre čas 500ms.....	41
Tabuľka 17 Namerané a vypočítané hodnoty pre čas 520ms	42

ZOZNAM OBRÁZKOV

Obr. 1 Elektrický oblúk.....	10
Obr. 2 Úbytky napätia na anóde a katóde pri horení oblúka [2].....	11
Obr. 3 Zjednodušený ionizačný proces	12
Obr. 4 Spektrálne čiary [9].....	13
Obr. 5 Navrhnuté zariadenie	15
Obr. 6 Miesto pre upevnenie optického vlákna	16
Obr. 7 Stojan na meranie a analýzu plazmy	16
Obr. 8 Rozptylový transformátor	17
Obr. 9 Štítok rozptylového transformátora.....	17
Obr. 10 Schéma transformátora [18]	17
Obr. 11 Objektív 16x300.....	18
Obr. 12 Vysokorýchlostná kamera	18
Obr. 13 Vysokonapäťová sonda	19
Obr. 14 Zapojenie vysokonapäťových sond.....	19
Obr. 15 Osciloskop Tektronix TPS 2014B	19
Obr. 16 Spektrometer Avantès – ULS-RS-TEC.....	19
Obr. 17 Zapojenie prúdovej sondy	20
Obr. 18 Schéma merania	21
Obr. 19 Spektrum namerané pri najmenšom oblúku.....	22
Obr. 20 Oblúk pri najmenšej vzdialenosti medzi elektródami	22
Obr. 21 Spektrum namerané najväčšom pri oblúku	23
Obr. 22 Oblúk pri najväčšej vzdialenosti medzi elektródami.....	23
Obr. 23 Priebeh napätia počas horenia oblúka	24
Obr. 24 Priebeh prúdu počas horenia oblúka	24
Obr. 25 Pyrometrická priamka pre vzdialenosť 7 mm.....	26
Obr. 26 Pyrometrická priamka pre vzdialenosť 7,2 mm medzi elektródami.....	27
Obr. 27 Pyrometrická priamka pre vzdialenosť 7,3 mm medzi elektródami.....	28
Obr. 28 Pyrometrická priamka pre vzdialenosť 7,4 mm medzi elektródami.....	29

Obr. 29 Pyrometrická priamka pre vzdialenosť 7,6 mm medzi elektródami	30
Obr. 30 Pyrometrická priamka pre vzdialenosť 8 mm medzi elektródami	31
Obr. 31 Pyrometrická priamka pre vzdialenosť 8,2 mm medzi elektródami	32
Obr. 32 Pyrometrická priamka pre vzdialenosť 12 mm medzi elektródami	33
Obr. 33 Pyrometrická priamka pre vzdialenosť 13,4 mm medzi elektródami	34
Obr. 34 Pyrometrická rovnica pre vzdialenosť 18,7 mm medzi elektródami	35
Obr. 35 Pyrometrická priamka pre vzdialenosť 20,3 mm medzi elektródami	36
Obr. 36 Pyrometrická priamka pre vzdialenosť 26,4 mm medzi elektródami	37
Obr. 37 Pyrometrická priamka pre vzdialenosť 26,5 mm medzi elektródami	38
Obr. 38 Pyrometrická priamka pre vzdialenosť 29,1 mm medzi elektródami	39
Obr. 39 Pyrometrická priamka pre vzdialenosť 31,4 mm medzi elektródami	40
Obr. 40 Pyrometrická priamka pre vzdialenosť 31,4 mm medzi elektródami	41
Obr. 41 Pyrometrická priamka pre vzdialenosť 31,4 mm medzi elektródami	42
Obr. 42 Závislosť teploty na dĺžke oblúka	43
Obr. 43 Transformátor z mikrovlnnej trúby	44
Obr. 44 Neónový transformátor [19]	44
Obr. 45 Približný 3D model možného vylepšeného zariadenia [20]	45

ÚVOD:

Spektroskopia je fyzikálna metóda, ktorá sa zaoberá štúdiom spektier po absorpcii alebo emisii svetla a iného žiarenia, ako aj závislosti týchto procesov na vlnovej dĺžke. Každá látka sa správa inak pri pôsobení žiarenia. Látka môže žiarenie pohlcovať alebo vyžarovať. Preto sú spektroskopické metódy vhodné pre skúmanie a analýzu spektier rôzneho druhu. Využívajú sa najmä v prírodovedeckých odboroch, napr. v geológii na analýzu minerálov, v astrofyzike na meranie vzdialeností kozmických objektov, určovanie atmosferického zloženia exoplanét alebo v medicíne a farmácii.

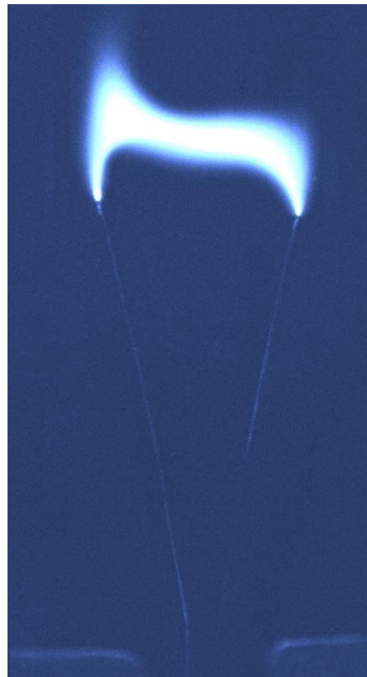
Bakalárska práca je rozdelená na dve časti. Prvá teoretická a druhá praktická časť. V prvej časti je popísaná podstata elektrického oblúka, ako vzniká, aké má vlastnosti a tiež využitie spektroskopických metód na analýzu plazmy elektrického oblúka. V bakalárskej práci sú spomenuté rôzne spektrálne metódy, ktorými môžeme vypočítať teplotu plazmy.

V druhej, praktickej časti práce bolo navrhnuté zariadenie, ktoré bude generovať plazmu, a na ktorom bola daná plazma analyzovaná. Navrhnuté zariadenie sa nazýva Jakubov rebrík. Dvojica elektród v tvare písmena „V“, medzi ktorými stúpa vysokonapäťový oblúk. Na analýzu plazmy elektrického oblúka bola vybraná a použitá konkrétna metóda, a to opticko – emisná spektroskopická metóda. Zdôvodnené sú výhody a nevýhody použitej metódy na rozbor a analýzu plazmy. Opticko – emisná spektroskopia bola využitá pre výpočet teploty elektrického oblúka.

Záverečná časť bakalárskej práce obsahuje kritické zhodnotenie navrhnutého generátora oblúka. Sú zhodnotené jeho výhody a nevýhody a navrhnuté možnosti ďalšieho rozšírenia a vylepšenia jeho vlastností. Táto časť je kľúčová pre pochopenie ďalších smerov budúceho výskumu a vývoja v oblasti generátorov elektrického oblúka.

1. Elektrický oblúk

Elektrický oblúk je výboj nahromadenej energie v elektrickom obvode, ktorý nastane po jeho vypnutí. Nahromadená energia sa nemôže len tak stratiť, ale musí sa uvoľniť v nejakej forme. Oblúk vzniká vo chvíli ako sa začnú od seba odďaľovať kontakty. Jadro oblúka tvorí vysoko ionizovaný plyn a preto je veľmi dobrým vodičom. Tento plyn nazývame plazma. Pri elektrickom oblúku sa energia uvoľní vo forme tepla a intenzívneho žiarenia. Oblúk môže vzniknúť aj pri poruche alebo počas vypínania a zapínania obvodu. V okamihu vypínania obvodu je medzi elektródami veľmi malá vzdialenosť čo má za následok prudké zvýšenie intenzity elektrického poľa $[E]$, ktorá prevyšuje ich elektrickú pevnosť. Hneď ako intenzita prekoná elektrickú pevnosť vznikne prírastok prostredia, tzv. ionizácia. Elektrický oblúk má svoje výhody aj nevýhody. Vďaka nemu môžeme úspešne uvoľniť nahromadenú energiu v podobe tepla a žiarenia. V oblúku nastáva premena elektromagnetickej energie na tepelnú. Vysoká teplota, ktorá môže byť väčšia ako na povrchu slnka, vedie ku taveniu kontaktov, čo výrazne zhoršuje ich kvalitu a celkovú životnosť elektrického prístroja. Množstvo úbytku materiálu závisí na veľkosti vypínacieho prúdu. Čím je väčší prúd, tým je teplota vyššia a hrozí väčšie množstvo roztaveného materiálu kontaktov. Tak isto je dôležité ako dlho oblúk horí. Čím je pôsobenie vysokej teploty dlhšie tým sa tavia viacej materiálu. Tento faktor je veľmi dôležitý, lebo hlavne od neho závisí životnosť prístroja. [1], [2], [3], [4]



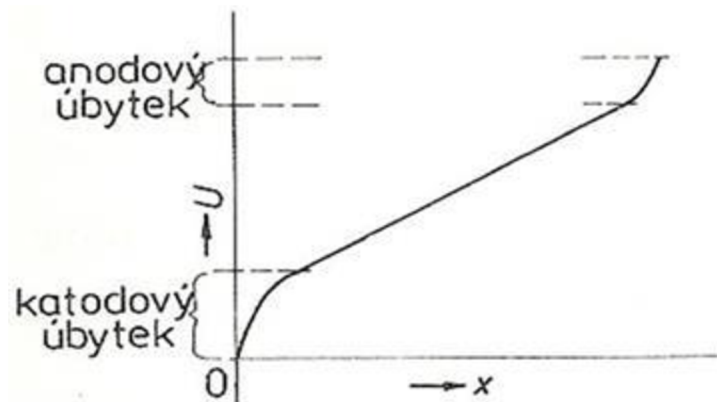
Obr. 1 Elektrický oblúk

1.1 Ionizácia

Pri vypínaní sa výboj naťahuje odd'ávaním kontaktov. Prieraz môže nastať pri zapínaní. Ak sú kontakty vyrobené z materiálu, ktoré majú nízku teplotu tavenia ako je napríklad meď alebo striebro, môže v okamihu rozpojovania kontaktov vzniknúť mostík z roztaveného kovu a vznikne oblúk. Ak sú kontakty vyrobené z materiálov, ktoré majú vysokú teplotu tavenia, ako je napríklad volfrám alebo uhlík, vtedy nevzniká mostík z roztaveného kovu, ale v miestach posledného styku je kov zahriaty na teplotu blízku teplote tavenia. Týmto vyhriatym miestam postačuje aj malá energia pre uvoľnenie elektrónov. Elektróny svojou kinetickou energiou ionizujú priestor a medzi kontaktmi a vzniká oblúk. [5]

Hlavné znaky oblúka sú:

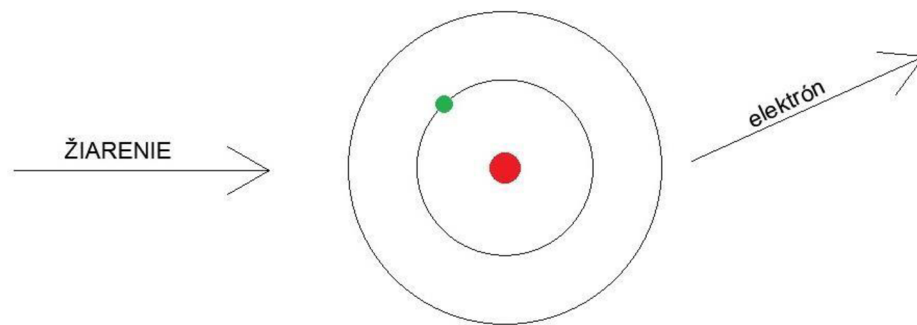
- Vysoká teplota na katóde
- Veľká hustota prúdu na katóde
- Malé úbytky napätia na oblúku
- Veľké úbytky napätia na elektródach



Obr. 2 Úbytky napätia na anóde a katóde pri horení oblúka [2]

2. Plazma

Pre určité látky sa plazma často nazýva "štvrtým stavom hmoty" spolu s pevným, kvapalným a plynným stavom (skupenstvom). Ako príklad si môžeme predstaviť kocku ľadu. Kocka ľadu pri kladnej teplote začne meniť svoje skupenstvo z tuhého na kvapalné. Kvapalina pri zohrievaní dosiahne bod varu, začne vriieť a mení sa na plyn. Pri zohrievaní plynu vzniká plazma. Plazma je horúca hmota, až taká horúca, že elektróny sú odtrhávané od atómov, čím sa tvoria voľné elektróny a pozitívne ióny. Tento proces sa nazýva ionizácia. Ak atóm získa elektrón, stáva sa z neho anión, čo je negatívne nabitá častica. Pri strate elektrónu sa z atómu stáva pozitívne nabitá častica, kation. Vysoká teplota a veľké množstvo voľných elektrónov v plazme z nej robí veľmi dobrý vodič elektrického prúdu. Veľkosť prúdovej hustoty $[J]$ dosahuje niekoľkotisíc A/cm^2 . Prúdová hustota sa mení v závislosti od veľkosti pretekajúceho prúdu. [6], [7]



Obr. 3 Zjednodušený ionizačný proces

3. Spektroskopia

Spektroskopia je fyzikálna metóda, ktorá sa zaoberá štúdiom spektra absorpcie alebo emisie svetla a iného žiarenia, ktoré vzniká interakciou elektromagnetického žiarenia so vzorkou. V poslednom čase sa definícia rozšírila o štúdium interakcií medzi časticami, ako sú elektróny, protóny a ióny. Spektroskopická analýza mala kľúčový význam pri vývoji najnákladnejších teórií vo fyzike vrátane kvantovej mechaniky, špeciálnej a všeobecnej teórie relativity a kvantovej elektrodynamiky. Pomocou optickej, rádiovkej a röntgenovej spektroskopie možno určiť zložky vzdialených hviezd, medzihalaktické molekuly, a dokonca aj prvotné množstvo prvkov pred vznikom prvých hviezd. Optická spektroskopia sa bežne používa na identifikáciu chemického zloženia hmoty a určenie jej fyzikálnej štruktúry. [8]

3.1 Optická spektroskopia

Optická spektroskopia je analytická metóda, ktorá sa zaoberá štúdiom interakcie svetla s látkou. Jej cieľom je získať optické spektrum, čiže závislosť intenzity látkou absorbovaného, odrazeného, emitovaného alebo rozptýleného žiarenia od vlnovej dĺžky. Zo získaného spektra potom vyplývajú vlastnosti študovaného materiálu. Skúmaná látka absorbuje časť dopadajúceho optického žiarenia. Dodaná energia môže vyvolať prechody v systéme na vyššie energetické hodnoty. Pri prechode na nižšie energetické hladiny môže systém emitovať optické žiarenie, detekciou ktorého získame emisné spektrum. [9]

3.2 Emisná spektroskopia

Optická emisná spektroskopia zahŕňa použitie elektrickej energie vo forme iskry generovanej medzi elektródou a kovovou vzorkou, čím sa odparené atómy dostanú do vysokoenergetického stavu, tzv. "výbojovej plazmy". Môžeme povedať, že svetlo generované výbojom je súborom spektrálnych čiar generovaných prvkami vo vzorke. Toto svetlo sa rozdelí difrakčnou mriežkou aby sa získalo emisné spektrum cieľových prvkov. Intenzita emisného spektra závisí na koncentrácii prvkov vo vzorke. [9]



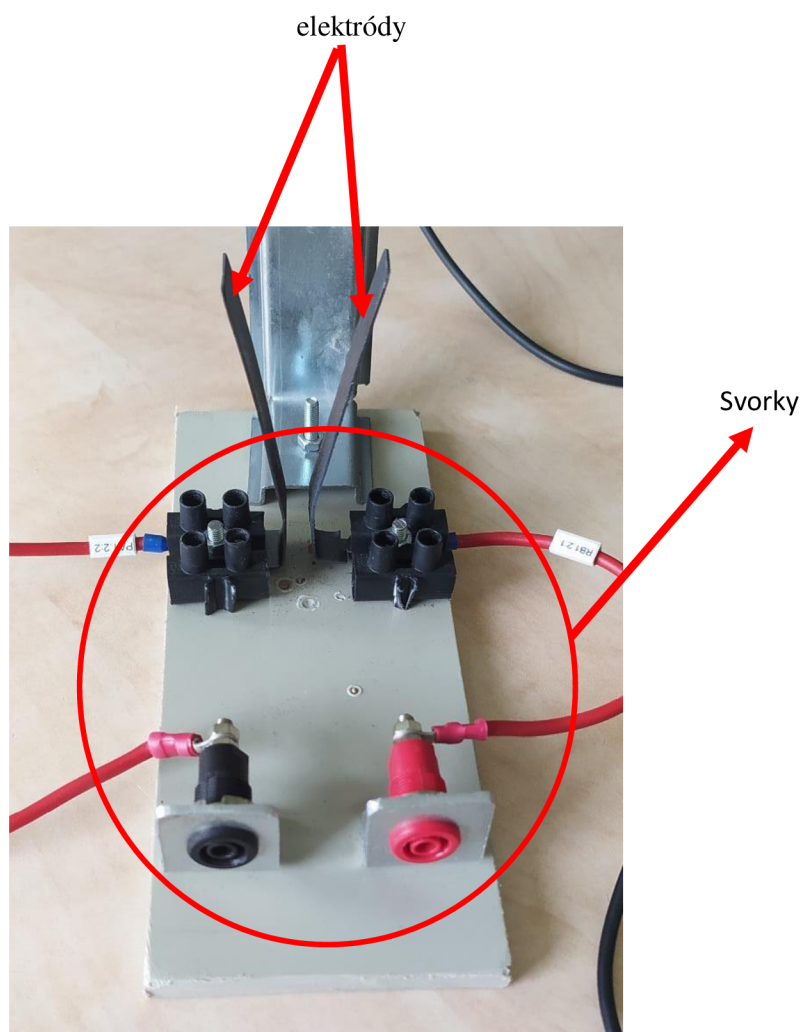
Obr. 4 Spektrálne čiary [9]

3.3 Absorpčná spektroskopia

Absorpčná spektroskopia je založená na princípe prenosu žiarenia cez zohriaty plyn (plazmu). Častice, ktoré sa presúvajú z nižšej energetickej hladiny do vyššej časti spektra absorbujú. Preto ak použijeme absorpčnú spektroskopiu, nebudeme schopní tieto časti spektra vidieť. [10], [11]

4. Návrh a zostrojenie generátora

Ako generátor bolo navrhnuté zariadenie, ktoré malo za úlohu generovať elektrický oblúk na elektródach vybraného materiálu. V návrhu bolo zohľadnené, aby bola konštrukcia schopná odolať tepelným a dynamickým účinkom elektrického oblúka. Cieľom návrhu bolo zaistiť plynulý prechod elektrického oblúka pozdĺž celej časti elektród. Jednalo sa o systém dvoch medených elektród do tvaru písmena „V“ tzv. Jakubov rebrík. Samotné zariadenie pozostáva z dvoch svoriek ktoré slúžia na upevnenie elektród a dvoch prívodových svoriek, na ktoré bol pripojený výstup z transformátora. Ako izolant bol použitý nízko hustotný polyetylén. [21]



Obr. 5 Navrhnuté zariadenie

4.1 Kovové rameno

Ďalšia časť navrhnutého zariadenia pozostávala z kovového ramena, ktoré slúžilo na zaistenie optického vlákna, ktorým bolo merané spektrum elektrického oblúka. Optické vlákno bolo pripevnené tesne nad horiaci oblúk aby sme boli schopní zmerať potrebné spektrum. Vlákno bolo uložené v bezpečnej vzdialenosti aby bolo schopné zachytiť spektrum z horiaceho oblúka a zároveň bolo chránené pred výbojmi horúcej plazmy a skokovým napätím.



Obr. 6 Miesto pre upevnenie optického vlákna



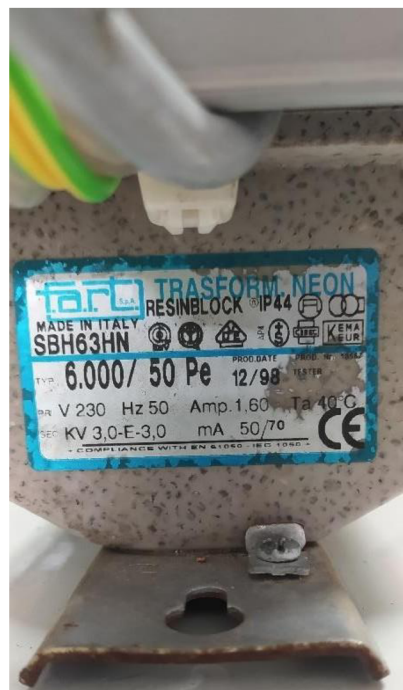
Obr. 7 Stojan na meranie a analýzu plazmy

4.2 Zdroj

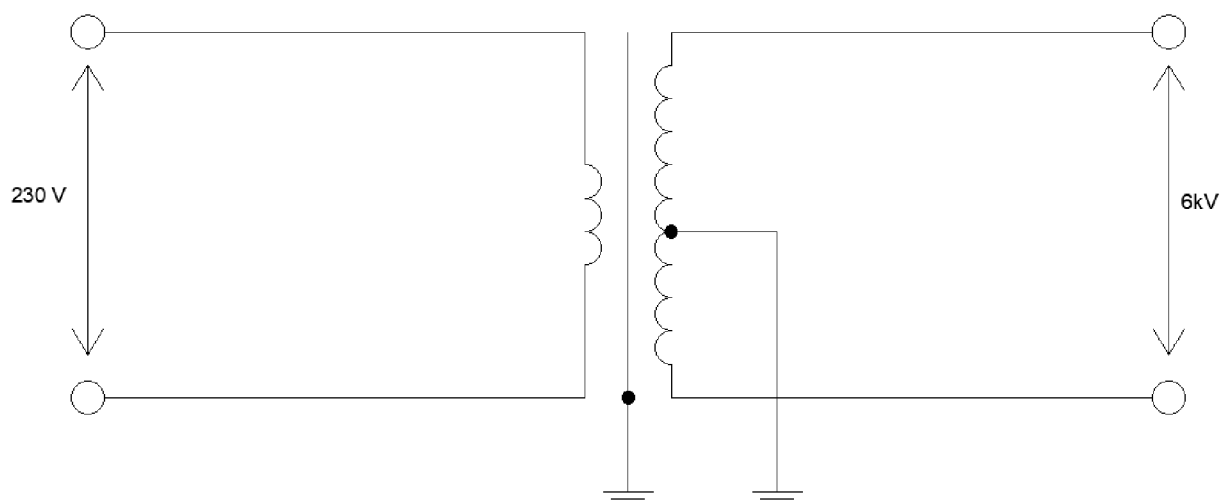
Jednou z najdôležitejších súčastí generátora elektrického oblúka je zdroj vysokého napätia. Ako zdroj bol použitý transformátor s dvoma výstupmi zapojenými do série, každý po 3 kV, čo znamená, že na výstupe bolo až 6 kV. Od výstupného napätia závisí preskok medzi elektródami. Čím je napätie vyššie, tým sa zvyšuje aj preskocová vzdialenosť. V našom prípade pri 6 kV bola preskocová vzdialenosť 4,1 mm.



Obr. 8 Rozptylový transformátor



Obr. 9 Štítok rozptylového transformátora



Obr. 10 Schéma transformátora [18]

5. Meranie

Na analýzu plazmy bola použitá metóda emisnej spektroskopie, pretože je výhodnejšia oproti absorpčnej v tom, že nebol potrebný cudzí zdroj spojitého spektra na určitých vlnových dĺžkach. Metóda nijako neovplyvňuje meraný oblúk. Cudzí zdroj spojitého spektra znamená, že nepotrebujeme zdroj žiarenia na meranie.

Meranie bolo uskutočnené v laboratóriu spínacích prístrojov na skúšobni VUT FEKT. Pri meraní bola použitá vysokorýchlostná kamera pre vizuálne potvrdenie elektrického oblúka. Kamera bola zosynchronizovaná so spektrometrom a osciloskopom, ktorý zaznamenával namerané hodnoty. Kľúčové bolo spustiť nahrávanie a meranie v danom okamihu, kedy bol elektrický oblúk vo vhodnej intenzite, aby na spektrometri boli vidieť spektrálne čiary elektrického oblúka. Na osciloskope bol zaznamenávaný priebeh napätia a prúdu na elektrickom oblúku, ktoré boli merané pomocou dvoch napäťových sond a prúdovou sondou.

5.1 Vysokorýchlostná kamera

Bola použitá vysokorýchlostná kamera značky PHOTRON. Kamera je schopná nahrávať až do 1 000 000 fps. My sme použili rýchlosť 1000 fps (frames per second) čo znamená, že jeden snímok predstavuje 1 milisekundu. Objektív sme použili 16x300 značky TAMRON. Pri používaní vysokorýchlostnej kamery je potrebné, aby bol objekt správne osvetlený, aby bolo video kvalitné a dobre viditeľné. Svetlo bolo použité značky NORDIC LIGHTS o výkone 50W. [12]



Obr. 12 Vysokorýchlostná kamera



Obr. 11 Objektív 16x300

5.2 Vysokonapäťové sondy

Pre meranie napätie na elektrickom oblúku boli použité dve vysokonapäťové sondy Tektronix P6015A. Je to vysokonapäťová sonda (20 kV) s nízkou vstupnou kapacitou. Používa sa pre aplikácie s vyššou frekvenciou. Sonda môže byť kompenzovaná tak, aby zodpovedala zásuvným modulom a osciloskopom s menovitým vstupom 7 – 49 pF. Pri meraní sme použili dve vysokonapäťové sondy a to preto, aby zem merania na osciloskope nebola spojená spolu so zemou na výboji. [13]



Obr. 13 Vysokonapäťová sonda



Obr. 14 Zapojenie vysokonapäťových sond

5.3 Osciloskop a spektroskop

Pomocou osciloskopu boli merané priebehy napätia a prúdu na elektrickom oblúku. Napätie bolo zmerané pomocou napäťových sond, ktoré sme spomenuli v kapitole 5.2. Sondy boli pripojené priamo na svorky oblúka a boli napojené na osciloskop. Prúd bol meraný prúdovou sondou. Spektroskop sme použili značky Avantes typu Avaspec 3648. Naše spektrálne vlákno malo priemer 600 μ m.



Obr. 15 Osciloskop Tektronix TPS 2014B



Obr. 16 Spektrometer Avantes – ULS-RS-TEC

5.4 Ampérmeter

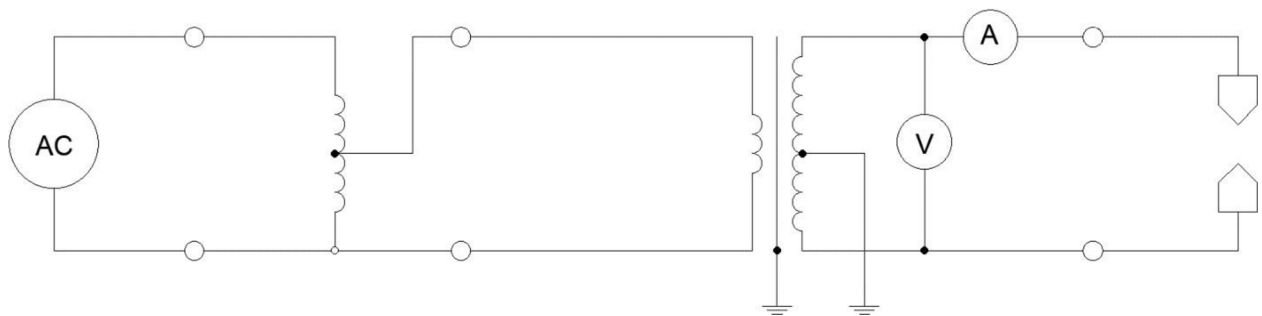
Prúd bol meraný prúdovou sondou značky CHAUVIN ARNOUX typ E3N. Prúdová sonda využíva technológiu Hallovho javu na meranie jednosmerných a striedavých prúdov. Dokáže merať v rozsahu niekoľkých mA až do 100 A so šírkou pásma 100 kHz. [14]



Obr. 17 Zapojenie prúdovej sondy

6. Priebeh merania

Po úspešnej synchronizácii všetkých meracích prístrojov bolo na stojan umiestnené spektrálne vlákno kolmo na elektrický oblúk, aby namerané hodnoty boli čo najlepšie. Meranie bolo realizované cez autotransfómator, pomocou ktorého sme priviedli napätie na rozptylový transformátor. Postupne bolo napätie zvyšované až na požadovanú hodnotu, ktorá zodpovedala preskokovému napätiu. Po uplynutí určitého času, ktorý bol potrebný pre zahriatie elektród a riadny chod oblúka bol spustený trigger a začali sme merať napätie a prúd na osciloskope a spektrálne čiary na spektrometri zároveň. Výsledkom boli priebehy napätia a prúdu počas chodu oblúka a namerané spektrum.

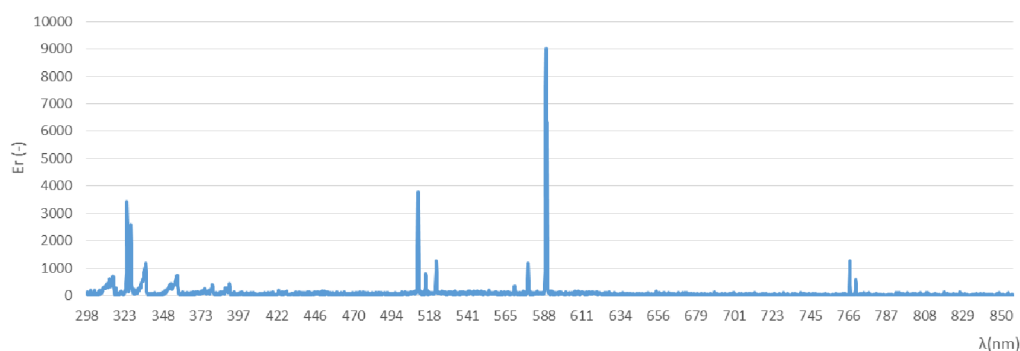


Obr. 18 Schéma merania

7. Spracovanie výsledkov

Pomocou programu AvaSoft boli zozbierané namerané dáta. Zozbierané dáta sme spracovali pomocou softvéru Microsoft Excel a zostrojili sme spektrálny graf pre každý časový meraný interval 20 ms. Namerané hodnoty sme porovnali so stránkou NIST (National Institute Standard Technology). Naším cieľom bolo nájsť spektrum odparenej medi, ktorá sa odparuje pri určitých vlnových dĺžkach. Naše výsledné spektrum bolo rozdielne v závislosti od vzdialenosti medzi elektródami.

7.1 Spektrum v najkratšom oblúku



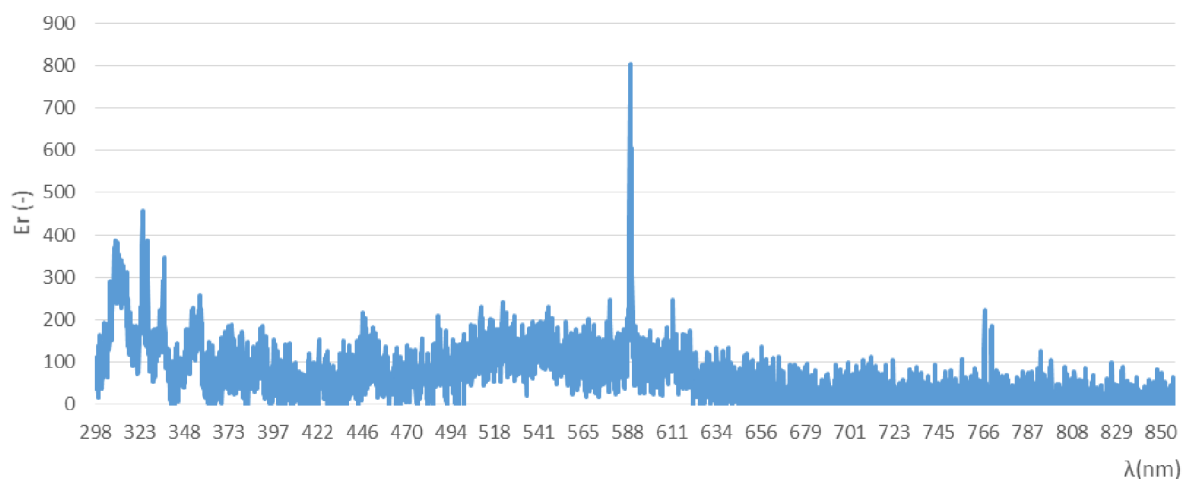
Obr. 19 Spektrum namerané pri najmenšom oblúku



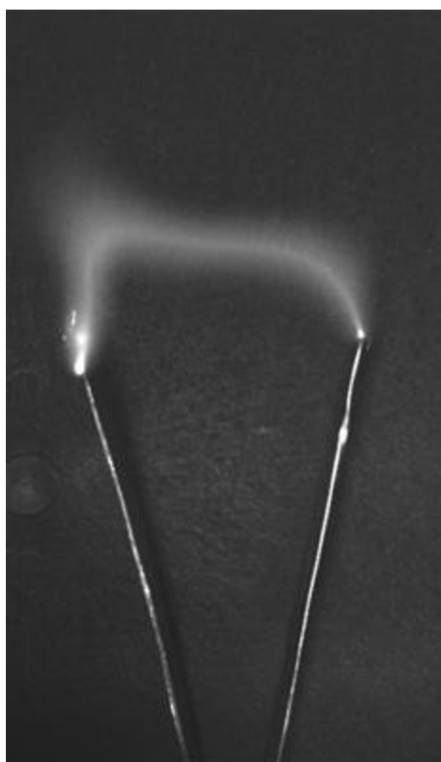
Obr. 20 Oblúk pri najmenšej vzdialenosti medzi elektródami

Podľa spektrálneho grafu môžeme vidieť, že spektrum v najkratšom oblúku je „pokojné“ a vyšplhalo sa na vysoké hodnoty len v určitých vlnových dĺžkach. Pri týchto vlnových dĺžkach dochádzalo ku odpareniu materiálu z ktorého boli vyrobené naše elektródy. V našom prípade to bola meď. [15]

7.2 Spektrum v najdlhšom oblúku



Obr. 21 Spektrum namerané najväčšom pri oblúku



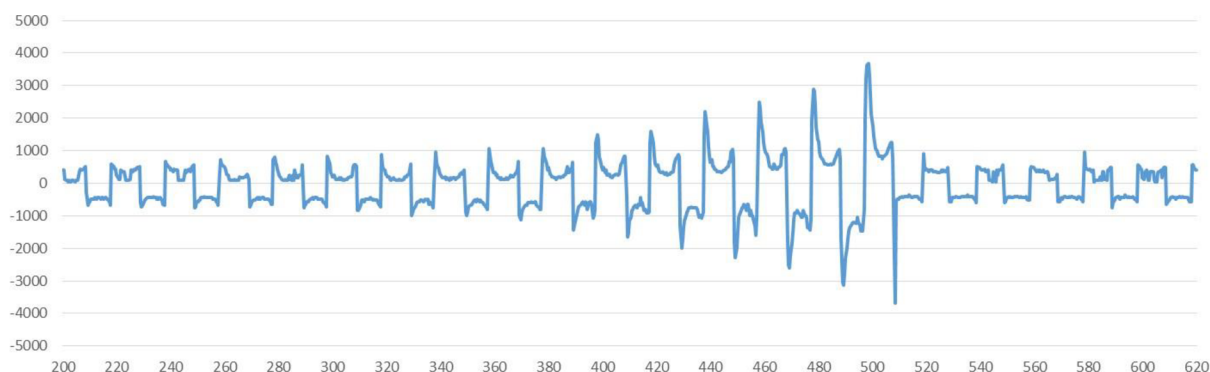
Obr. 22 Oblúk pri najväčšej vzdialenosti medzi elektródami

Ako môžeme vidieť z priložených obrázkov, spektrum je veľmi rozdielne čo sa týka intenzity vyžarovaného materiálu na rôznych vlnových dĺžkach. V prípade, kedy bol oblúk v svojom maxime sa intenzita nevyšplhala ani nad tisícovú hodnotu, pričom v oblúkovom minime sa hodnota vyšplhala až nad 9000.

8. Napätie a prúd

Pomocou prúdovej sondy a napät'ových sond sme boli schopní odmerať napätie a prúd počas horenia oblúka a pomocou osciloskopu sme boli schopní vidieť ich priebehy.

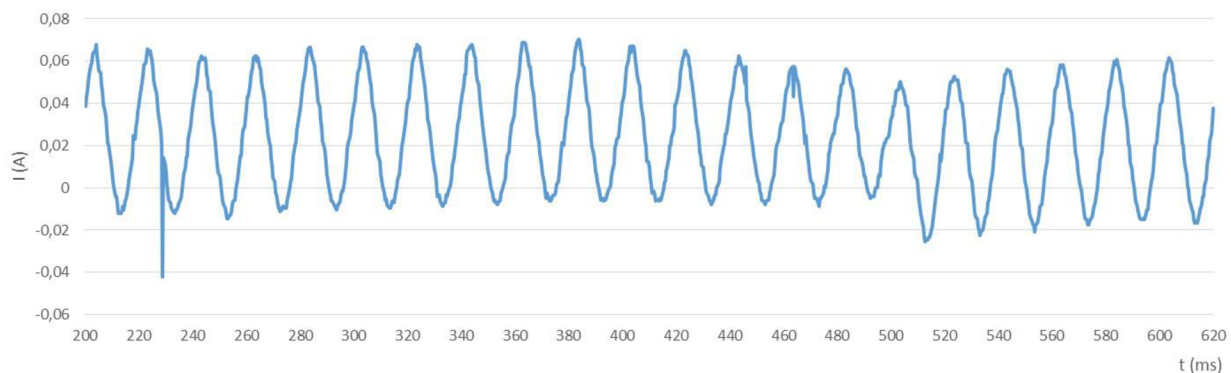
8.1 Napätie



Obr. 23 Priebeh napätia počas horenia oblúka

V zobrazenom priebehu napätia si môžeme všimnúť, že v momente, kedy sa oblúk blížil ku dosiahnutiu svojho maxima (to znamená, že jeho vzdialenosť medzi elektródami bola najväčšia), napätie nám začalo stúpať a vystúpilo takmer až na 4 násobok svojej pôvodnej hodnoty. Oblúk dosiahol svoje maximum v časovom rozmedzí 480 až 520 ms.

8.2 Prúd



Obr. 24 Priebeh prúdu počas horenia oblúka

Zo zobrazeného priebehu prúdu si môžeme všimnúť, že prúd mal istú tendenciu stúpať vo chvíli, keď sa veľkosť oblúku zväčšovala. Avšak po dosiahnutí maxima nám prúd poklesol na strednú hodnotu 35 mA z pôvodných 46 mA. Môže sa nám to zdať ako malý prúd, ale pri napätí takmer 4 kV môže dôjsť ku smrteľnému úrazu. Preto bolo nutné postupovať s veľkou pozornosťou.

9. Výpočty teplôt

Jednou z kľúčových vlastností oblúka je jeho vysoká teplota, ktorú sme boli schopní vypočítať vďaka spektroskopickému metóde. K tomu sme potrebovali poznať energetickú hodnotu U_m , ktorú sme zistili prostredníctvom NIST. Výpočty boli realizované pomocou Gaussovho integrálu a jeho následným zlogaritmovaním. Na vzorový príklad boli vybrané hodnoty z prvého riadku. [16]

9.1 Príklad výpočtu teploty pre čas 200 ms a veľkosť oblúka 7 mm

teplota pre 200ms						
λ [m]	a' [-]	$g_k \cdot A_{ki}$ [1/s]		integral	U_m [eV]	LN [-]
5,11E-07	11779,52	8,00E+06		3838,494	3,816692	-22,1295
5,15E-07	2384,226	2,40E+08		776,9279	6,191175	-27,119
5,22E-07	4770,678	4,50E+08		1554,581	6,192025	-27,0415
5,22E-07	4531,871	6,00E+07		1476,763	6,191175	-25,0777
5,70E-07	1167,455	9,60E+05		380,4289	3,816692	-22,2108
5,78E-07	5676,434	3,30E+06		1849,732	3,785898	-21,8495
σ [-]	0,13	k [eV]	8,62E-05	a [-]	-1,8243	

Tabuľka 1 Namerané a vypočítané hodnoty pre čas 200 ms

$$\text{Gaussov Integrál } \int_{-\infty}^{\infty} a' \cdot \sqrt{2\pi\sigma^2} \quad (1)$$

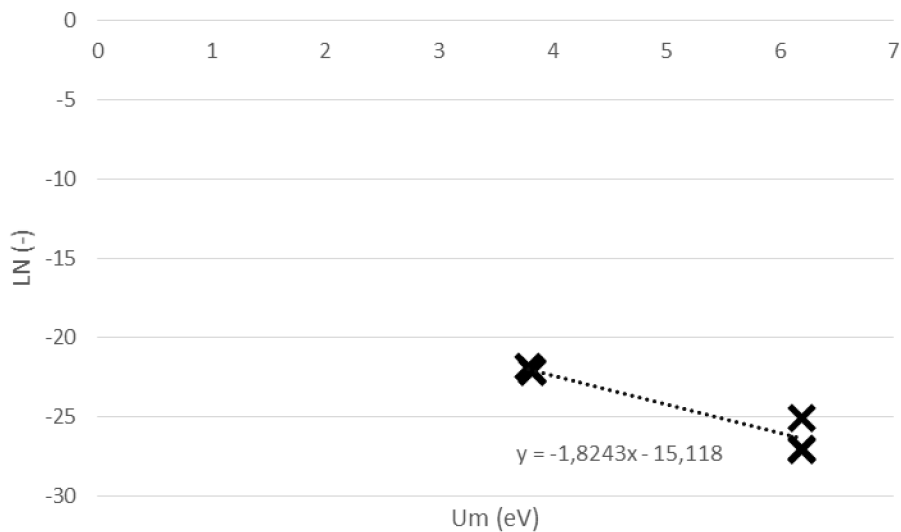
a' – je nameraná intenzita na určitej vlnovej dĺžke
 σ – smerodajná odchýlka

$$\int_{-\infty}^{\infty} a' \cdot \sqrt{2\pi\sigma^2} = 11\,779,52 \cdot \sqrt{2 \cdot \pi \cdot 0,13^2} = 3838,494$$

$$\text{Logaritmus } \ln \left(\frac{I_{m \rightarrow n} \cdot \lambda_{mn}}{A_{mn} \cdot g_m} \right) \quad (2)$$

$$\ln \left(\frac{I_{m \rightarrow n} \cdot \lambda_{mn}}{A_{mn} \cdot g_m} \right) = \ln \left(\frac{3838,494 \cdot 5,11 \cdot 10^{-7}}{8 \cdot 10^6} \right) = -22,1295$$

Čitateľ – je súčin hodnoty integrálu a vlnovej dĺžky
 Menovateľ – prechodová pravdepodobnosť



Obr. 25 Pyrometrická priamka pre vzdialenosť 7 mm

Po vypočítaní logaritmu bola vynesená závislosť logaritmu na energii. Vytvoríme pyrometrickú priamku a rovnicu priamky. Z nej sme schopní vypočítať teplotu elektrického oblúka. [16]

Výpočet teploty: $T = - \frac{1}{k \cdot a}$ (3)

$$T = - \frac{1}{k \cdot a} = - \frac{1}{8,62 \cdot 10^{-5} \cdot (-1,8243)} = 6361,08 \doteq 6400 \text{ K}$$

k – je boltzmanova konštanta v eV

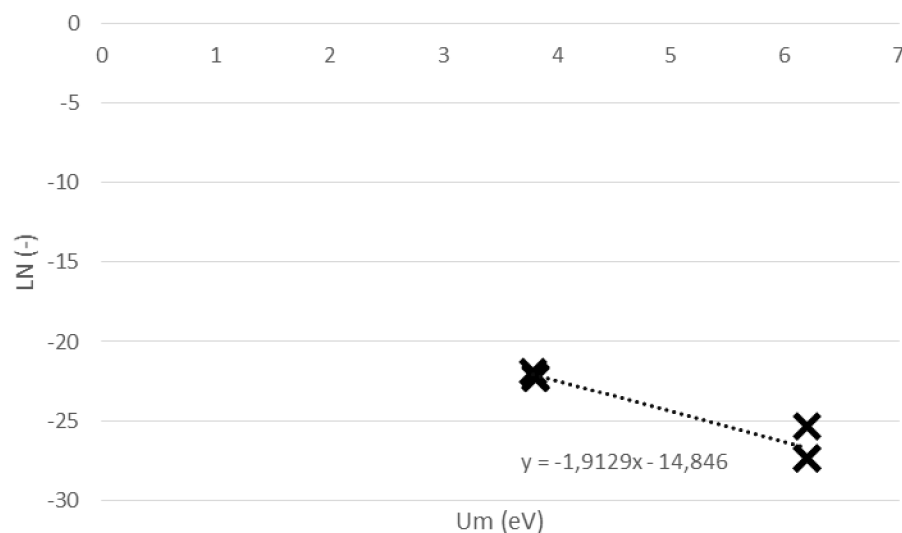
a – je sklon lineárnej priamky

Premena na °C = 6400 - 273,15 \doteq 6126 °C

9.2 Výpočet teploty pre čas 220 ms a vzdialenosť medzi elektródami 7,2 mm

teplota pre 220ms						
λ [m]	a' [-]	$g_k \cdot A_{ki}$ [1/s]		integral	U_m [eV]	LN [-]
5,11E-07	10054,2	8,00E+06		3276,278	3,816692	-22,2879
5,15E-07	1895,129	2,40E+08		617,5498	6,191175	-27,3486
5,22E-07	3454,172	4,50E+08		1125,582	6,192025	-27,3644
5,22E-07	3438,957	6,00E+07		1120,624	6,191175	-25,3536
5,70E-07	1173,471	9,60E+05		382,3892	3,816692	-22,2057
5,78E-07	5444,12	3,30E+06		1774,03	3,785898	-21,8913
σ [-]	0,13	k [eV]	8,62E-05	a [-]	-1,9129	

Tabuľka 2 Namerané a vypočítané hodnoty pre čas 220 ms



Obr. 26 Pyrometrická priamka pre vzdialenosť 7,2 mm medzi elektródami

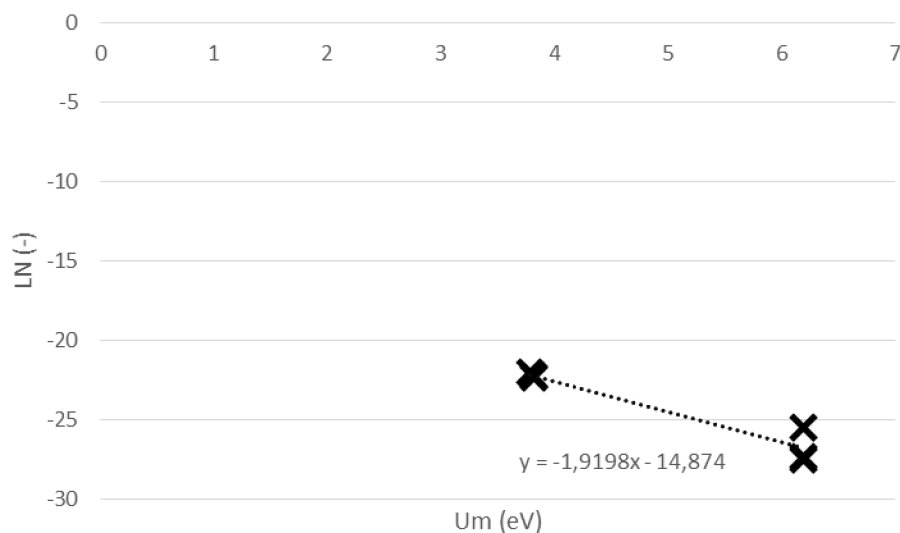
$$T = -\frac{1}{k \cdot a} = -\frac{1}{8,62 \cdot 10^{-5} \cdot (-1,9129)} = 6066,45 \doteq 6000 \text{ K}$$

Premena na °C = 6000 - 273,15 \doteq 5726 °C

9.3 Výpočet teploty pre čas 240 ms a vzdialenosť medzi elektródami 7,3 mm

teplota pre 240ms						
λ[m]	a' [-]	gk*Ak [1/s]		integral	Um [eV]	LN [-]
5,11E-07	10743,81	8,00E+06		3500,997	3,816692	-22,2216
5,15E-07	1976,219	2,40E+08		643,9742	6,191175	-27,3067
5,22E-07	3104,023	4,50E+08		1011,482	6,192025	-27,4713
5,22E-07	2970,579	6,00E+07		967,9978	6,191175	-25,5
5,70E-07	1019,002	9,60E+05		332,0537	3,816692	-22,3468
5,78E-07	4992,836	3,30E+06		1626,974	3,785898	-21,9779
σ [-]	0,13	k [eV]	8,62E-05	a [-]	-1,9198	

Tabuľka 3 Namerané a vypočítané hodnoty pre čas 240 ms



Obr. 27 Pyrometrická priamka pre vzdialenosť 7,3 mm medzi elektródami

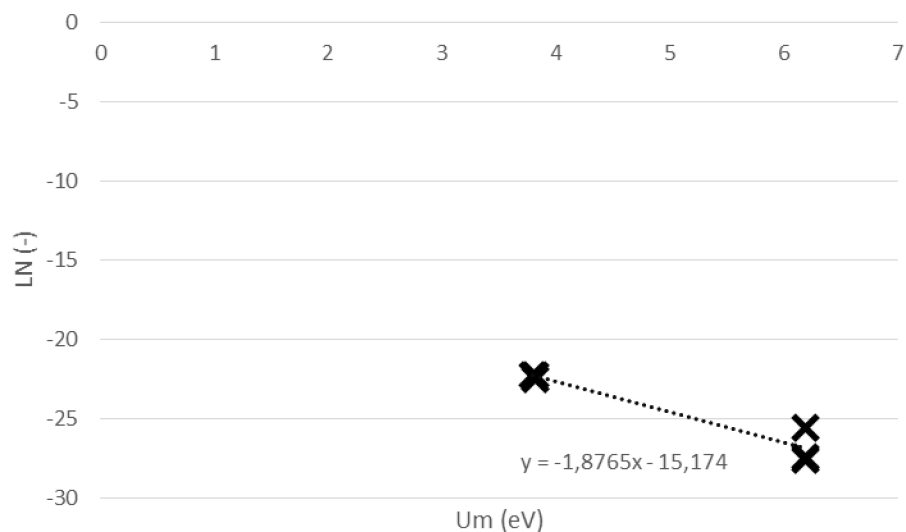
$$T = -\frac{1}{k \cdot a} = -\frac{1}{8,62 \cdot 10^{-5} \cdot (-1,9198)} = 6044,65 \doteq 6000 \text{ K}$$

Premena na °C = 6000 - 273,15 \doteq 5726 °C

9.4 Výpočet teploty pre čas 260 ms a vzdialenosť medzi elektródami 7,4 mm

teplota pre 260ms						
λ [m]	a' [-]	$g_k \cdot A_{ki}$ [1/s]		integral	U_m [eV]	LN [-]
5,11E-07	8433,131	8,00E+06		2748,034	3,816692	-22,4637
5,15E-07	1886,054	2,40E+08		614,5928	6,191175	-27,3534
5,22E-07	2949,932	4,50E+08		961,2699	6,192025	-27,5222
5,22E-07	2970,528	6,00E+07		967,9811	6,191175	-25,5001
5,70E-07	1130,128	9,60E+05		368,2654	3,816692	-22,2433
5,78E-07	3828,749	3,30E+06		1247,642	3,785898	-22,2433
σ [-]	0,13	k [eV]	8,62E-05	a [-]	-1,8765	

Tabuľka 4 Namerané a vypočítané hodnoty pre čas 260 ms



Obr. 28 Pyrometrická priamka pre vzdialenosť 7,4 mm medzi elektródami

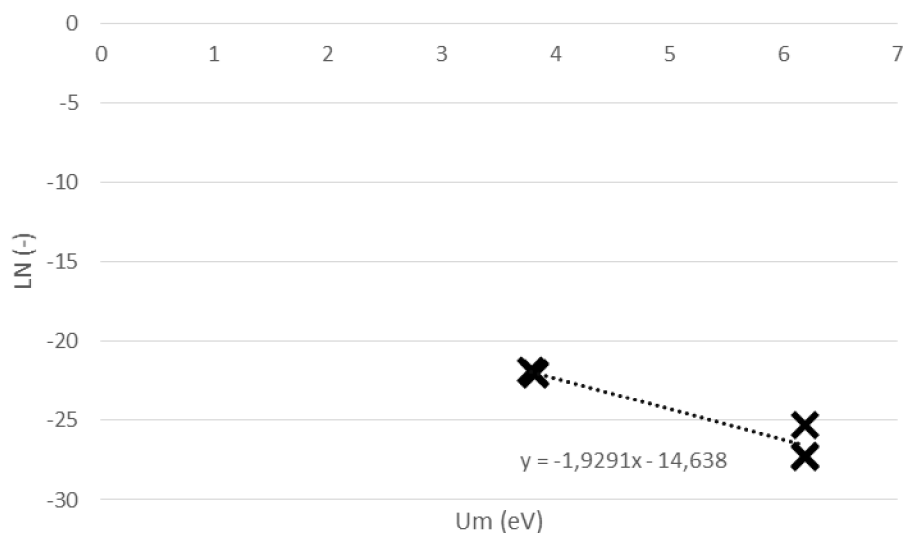
$$T = -\frac{1}{k \cdot a} = -\frac{1}{8,62 \cdot 10^{-5} \cdot (-1,8765)} = 6184,13 \doteq 6200 \text{ K}$$

Premena na °C = 6200 - 273,15 \doteq 5926 °C

9.5 Výpočet teploty pre čas 280 ms a vzdialenosť medzi elektródami 7,6 mm

teplota pre 280ms						
λ [m]	a' [-]	$g_k \cdot A_{ki}$ [1/s]		integral	U_m [eV]	LN [-]
5,11E-07	13382,5	8,00E+06		4360,844	3,816692	-22,002
5,15E-07	2217,175	2,40E+08		722,4924	6,191175	-27,1916
5,22E-07	3719,892	4,50E+08		1212,17	6,192025	-27,2903
5,22E-07	3767,133	6,00E+07		1227,564	6,191175	-25,2625
5,70E-07	1312,103	9,60E+05		427,5642	3,816692	-22,094
5,78E-07	5682,483	3,30E+06		1851,704	3,785898	-21,8485
σ [-]	0,13	k [eV]	8,62E-05	a [-]	-1,9291	

Tabuľka 5 Namerané a vypočítané hodnoty pre čas 280 ms



Obr. 29 Pyrometrická priamka pre vzdialenosť 7,6 mm medzi elektródami

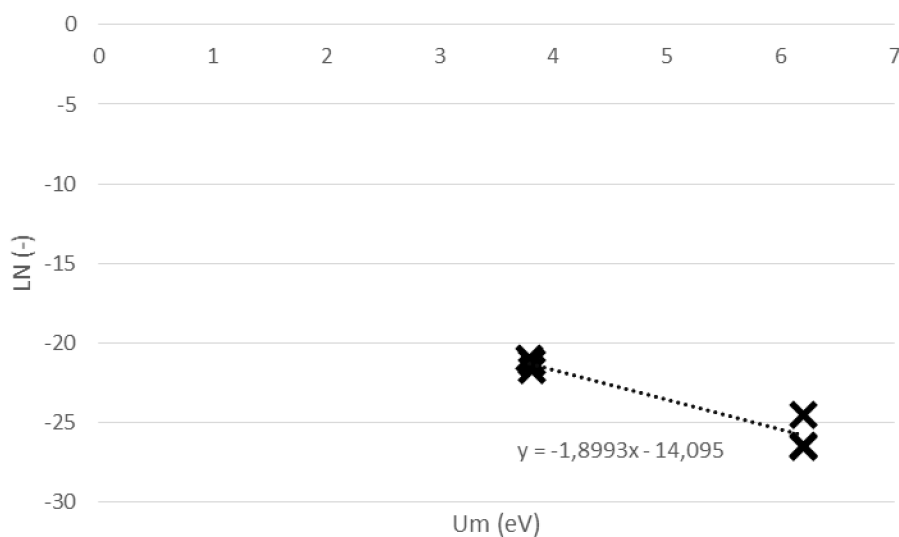
$$T = -\frac{1}{k \cdot a} = -\frac{1}{8,62 \cdot 10^{-5} \cdot (-1,9291)} = 6015,51 \doteq 6000 \text{ K}$$

Premena na °C = 6000 - 273,15 \doteq 5726 °C

9.6 Výpočet teploty pre čas 300 ms a vzdialenosť medzi elektródami 8 mm

teplota pre 300ms						
λ [m]	a' [-]	$g_k \cdot A_{ki}$ [1/s]		integral	U_m [eV]	LN [-]
5,11E-07	27916,12	8,00E+06		9096,792	3,816692	-21,2667
5,15E-07	4191,211	2,40E+08		1365,755	6,191175	-26,5549
5,22E-07	8315,415	4,50E+08		2709,675	6,192025	-26,4859
5,22E-07	7928,433	6,00E+07		2583,572	6,191175	-24,5183
5,70E-07	1948,283	9,60E+05		634,8706	3,816692	-21,6987
5,78E-07	13124,49	3,30E+06		4276,769	3,785898	-21,0114
σ [-]	0,13	k [eV]	8,62E-05	a [-]	-1,8993	

Tabuľka 6 Namerané a vypočítané hodnoty pre čas 300 ms



Obr. 30 Pyrometrická priamka pre vzdialenosť 8 mm medzi elektródami

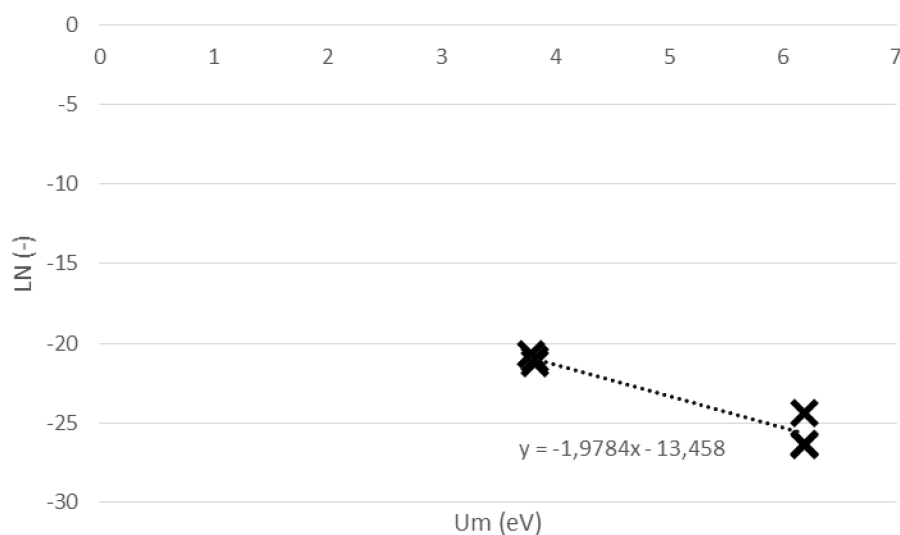
$$T = -\frac{1}{k \cdot a} = -\frac{1}{8,62 \cdot 10^{-5} \cdot (-1,8993)} = 6109,89 \doteq 6100 \text{ K}$$

$$\text{Premena na } ^\circ\text{C} = 6100 - 273,15 \doteq 5826 \text{ } ^\circ\text{C}$$

9.7 Výpočet teploty pre čas 320 ms a vzdialenosť medzi elektródami 8,2 mm

teplota pre 320ms						
λ [m]	a' [-]	$g^k \cdot A_{ki}$ [1/s]		integral	U_m [eV]	LN [-]
5,11E-07	35794,75	8,00E+06		11664,14	3,816692	-21,0181
5,15E-07	4839,993	2,40E+08		1577,168	6,191175	-26,411
5,22E-07	9584,699	4,50E+08		3123,286	6,192025	-26,3438
5,22E-07	9258,459	6,00E+07		3016,977	6,191175	-24,3633
5,70E-07	3065,851	9,60E+05		999,0433	3,816692	-21,2453
5,78E-07	17819,52	3,30E+06		5806,7	3,785898	-20,7056
σ [-]	0,13	k [eV]	8,62E-05	a [-]	-1,9784	

Tabuľka 7 Namerané a vypočítané hodnoty pre čas 320 ms



Obr. 31 Pyrometrická priamka pre vzdialenosť 8,2 mm medzi elektródami

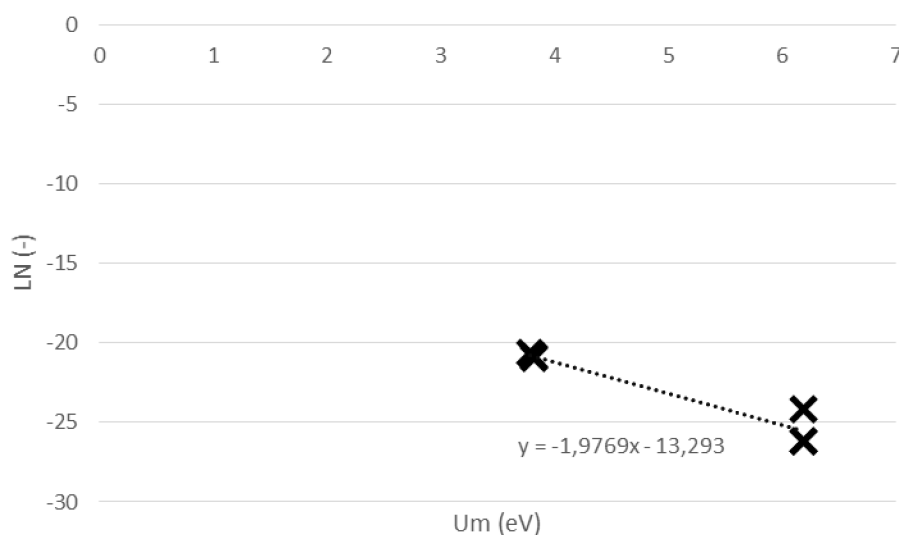
$$T = -\frac{1}{k \cdot a} = -\frac{1}{8,62 \cdot 10^{-5} \cdot (-1,9784)} = 5865,61 \doteq 5650 \text{ K}$$

$$\text{Premena na } ^\circ\text{C} = 5650 - 273,15 \doteq 5377 \text{ } ^\circ\text{C}$$

9.8 Výpočet teploty pre čas 340 ms a vzdialenosť medzi elektródami 12 mm

teplota pre 340ms						
λ [m]	a' [-]	$g_k \cdot A_{ki}$ [1/s]		integral	U_m [eV]	LN [-]
5,11E-07	40864,11	8,00E+06		13316,05	3,816692	-20,8857
5,15E-07	6045,705	2,40E+08		1970,064	6,191175	-26,1885
5,22E-07	10994,59	4,50E+08		3582,717	6,192025	-26,2066
5,22E-07	10889,62	6,00E+07		3548,51	6,191175	-24,201
5,70E-07	4088,238	9,60E+05		1332,2	3,816692	-20,9576
5,78E-07	19555,96	3,30E+06		6372,539	3,785898	-20,6126
σ [-]	0,13	k [eV]	8,62E-05	a [-]	-1,9769	

Tabuľka 8 Namerané a vypočítané hodnoty pre čas 340 ms



Obr. 32 Pyrometrická priamka pre vzdialenosť 12 mm medzi elektródami

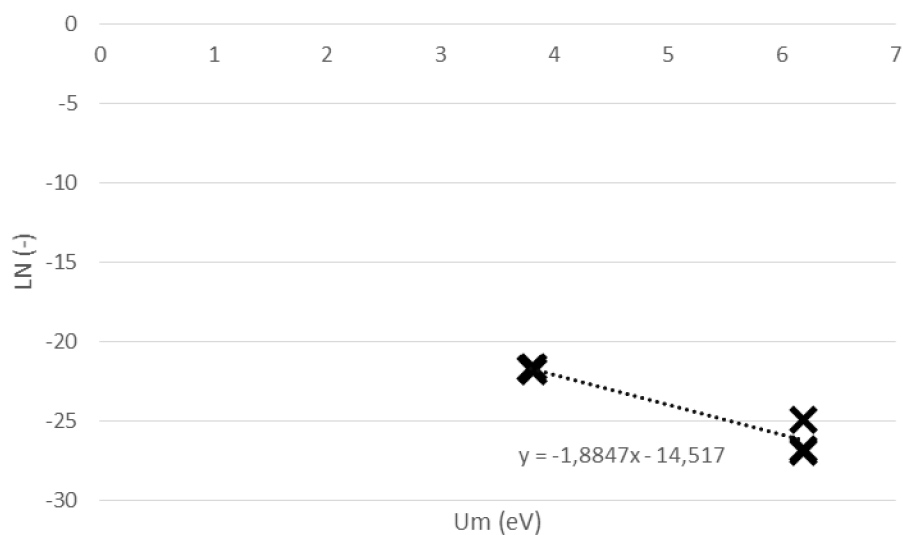
$$T = -\frac{1}{k \cdot a} = -\frac{1}{8,62 \cdot 10^{-5} \cdot (-1,9769)} = 5870,06 \doteq 5900 \text{ K}$$

Premena na °C = 5900 - 273,15 \doteq 5627 °C

9.9 Výpočet teploty pre čas 360 ms a vzdialenosť medzi elektródami 13,4 mm

teplota pre 360ms						
λ [m]	a' [-]	$g_k \cdot A_{ki}$ [1/s]		integral	U_m [eV]	LN [-]
5,11E-07	15992,37	8,00E+06		5211,299	3,816692	-21,8238
5,15E-07	3551,064	2,40E+08		1157,156	6,191175	-26,7206
5,22E-07	5309,023	4,50E+08		1730,007	6,192025	-26,9346
5,22E-07	5388,501	6,00E+07		1755,906	6,191175	-24,9045
5,70E-07	2191,976	9,60E+05		714,2809	3,816692	-21,5809
5,78E-07	6793,941	3,30E+06		2213,885	3,785898	-21,6698
σ [-]	0,13	k [eV]	8,62E-05	a [-]	-1,8847	

Tabuľka 9 Namerané a vypočítané hodnoty pre čas 360 ms



Obr. 33 Pyrometrická priamka pre vzdialenosť 13,4 mm medzi elektródami

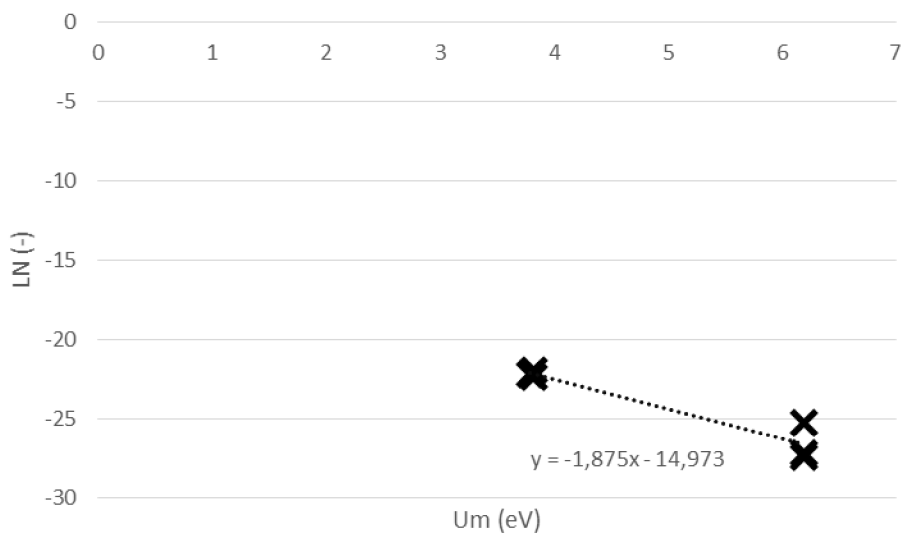
$$T = -\frac{1}{k \cdot a} = -\frac{1}{8,62 \cdot 10^{-5} \cdot (-1,8847)} = 6157,22 \doteq 6100 \text{ K}$$

Premena na °C = 6100 - 273,15 \doteq 5827 °C

9.10 Výpočet teploty pre čas 380 ms a vzdialenosť medzi elektródami 18,7 mm

teplota pre 380ms						
λ [m]	a' [-]	$g_k \cdot A_{ki}$ [1/s]		integral	U_m [eV]	LN [-]
5,11E-07	9685,936	8,00E+06		3156,275	3,816692	-22,3252
5,15E-07	2280,312	2,40E+08		743,0664	6,191175	-27,1636
5,22E-07	3488,903	4,50E+08		1136,9	6,192025	-27,3544
5,22E-07	3897,68	6,00E+07		1270,105	6,191175	-25,2284
5,70E-07	1624,08	9,60E+05		529,2254	3,816692	-21,8807
5,78E-07	4315,784	3,30E+06		1406,349	3,785898	-22,1236
σ [-]	0,13	k [eV]	8,62E-05	a [-]	-1,875	

Tabuľka 10 Namerané a vypočítané hodnoty pre čas 380 ms



Obr. 34 Pyrometrická rovnica pre vzdialenosť 18,7 mm medzi elektródami

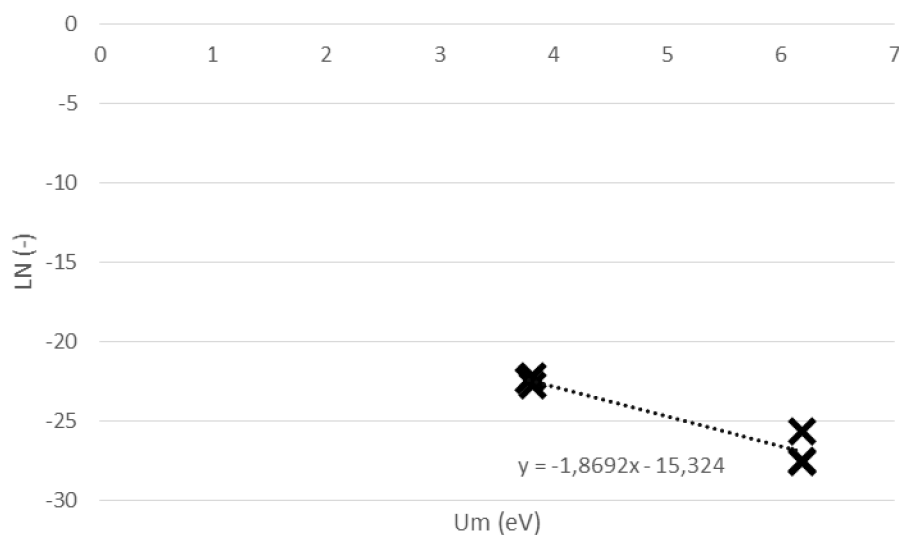
$$T = -\frac{1}{k \cdot a} = -\frac{1}{8,62 \cdot 10^{-5} \cdot (-1,875)} = 6189,08 \doteq 6200 \text{ K}$$

Premena na °C = 6200 - 273,15 \doteq 5927 °C

9.11 Výpočet teploty pre čas 400 ms a vzdialenosť medzi elektródami 20,3 mm

teplota pre 400ms						
λ [m]	a' [-]	$g_k \cdot A_{ki}$ [1/s]		integral	U_m [eV]	LN [-]
5,11E-07	6473,001	8,00E+06		2109,303	3,816692	-22,7283
5,15E-07	1660,866	2,40E+08		541,2126	6,191175	-27,4805
5,22E-07	2754,16	4,50E+08		897,4751	6,192025	-27,5909
5,22E-07	2635,292	6,00E+07		858,7407	6,191175	-25,6198
5,70E-07	1223,043	9,60E+05		398,5428	3,816692	-22,1643
5,78E-07	3194,678	3,30E+06		1041,023	3,785898	-22,4244
σ [-]	0,13	k [eV]	8,62E-05	a [-]	-1,8692	

Tabuľka 11 Namerané a vypočítané hodnoty pre čas 400 ms



Obr. 35 Pyrometrická priamka pre vzdialenosť 20,3 mm medzi elektródami

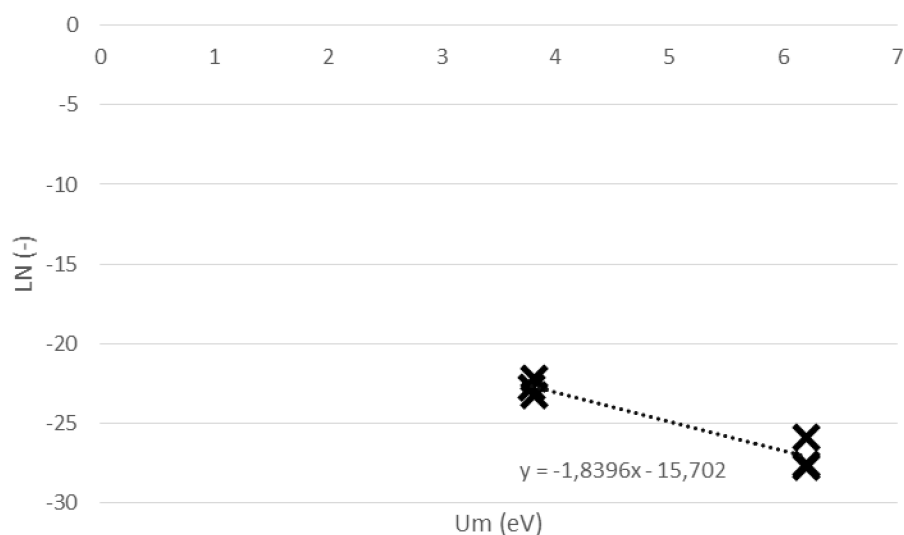
$$T = -\frac{1}{k \cdot a} = -\frac{1}{8,62 \cdot 10^{-5} \cdot (-1,8692)} = 6208,28 \doteq 6200 \text{ K}$$

$$\text{Premena na } ^\circ\text{C} = 6200 - 273,15 \doteq 5927 \text{ } ^\circ\text{C}$$

9.12 Výpočet teploty pre čas 420 ms a vzdialenosť medzi elektródami 26,4 mm

teplota pre 420ms						
λ [m]	a' [-]	$g_k \cdot A_{ki}$ [1/s]		integral	U_m [eV]	LN [-]
5,11E-07	3982,42	8,00E+06		1297,718	3,816692	-23,214
5,15E-07	1507,313	2,40E+08		491,1756	6,191175	-27,5775
5,22E-07	2293,82	4,50E+08		747,4679	6,192025	-27,7738
5,22E-07	1942,743	6,00E+07		633,0653	6,191175	-25,9247
5,70E-07	1219,42	9,60E+05		397,3623	3,816692	-22,1673
5,78E-07	2350,547	3,30E+06		765,9532	3,785898	-22,7312
σ [-]	0,13	k [eV]	8,62E-05	a [-]	-1,8396	

Tabuľka 12 Namerané a vypočítané hodnoty pre čas 420 ms



Obr. 36 Pyrometrická priamka pre vzdialenosť 26,4 mm medzi elektródami

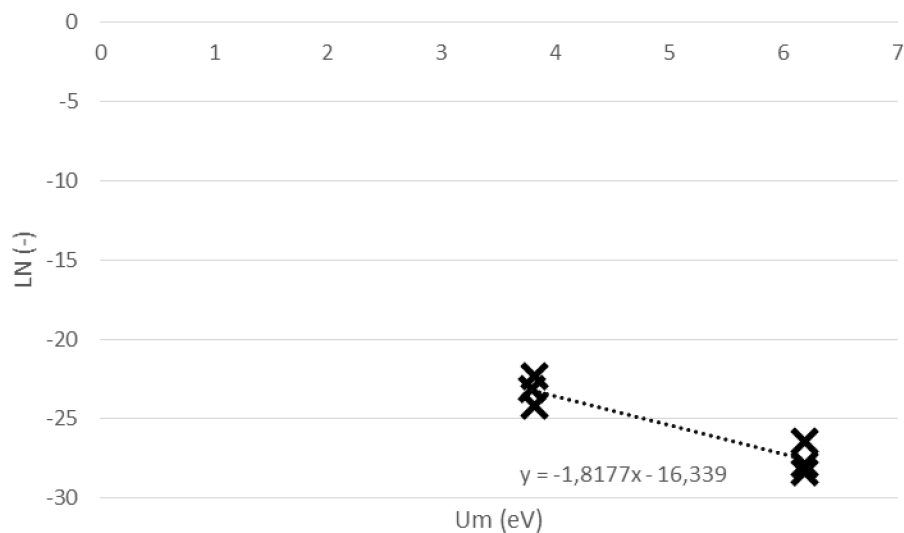
$$T = - \frac{1}{k \cdot a} = - \frac{1}{8,62 \cdot 10^{-5} \cdot (-1,8396)} = 6308,18 \doteq 6300 \text{ K}$$

$$\text{Premena na } ^\circ\text{C} = 6300 - 273,15 = 6026,85 \text{ } ^\circ\text{C} \doteq 6027 \text{ } ^\circ\text{C}$$

9.13 Výpočet teploty pre čas 440 ms a vzdialenosť medzi elektródami 26,5 mm

teplota pre 440ms						
λ [m]	a' [-]	$g_k \cdot A_{ki}$ [1/s]		integral	U_m [eV]	LN [-]
5,11E-07	1465,735	8,00E+06		477,6268	3,816692	-24,2135
5,15E-07	1047,813	2,40E+08		341,4421	6,191175	-27,9412
5,22E-07	1201,896	4,50E+08		391,6519	6,192025	-28,4201
5,22E-07	1185,865	6,00E+07		386,428	6,191175	-26,4183
5,70E-07	981,9714	9,60E+05		319,9868	3,816692	-22,3839
5,78E-07	1504,02	3,30E+06		490,1024	3,785898	-23,1777
σ [-]	0,13	k [eV]	8,62E-05	a [-]	-1,8177	

Tabuľka 13 Namerané a vypočítané hodnoty pre čas 440 ms



Obr. 37 Pyrometrická priamka pre vzdialenosť 26,5 mm medzi elektródami

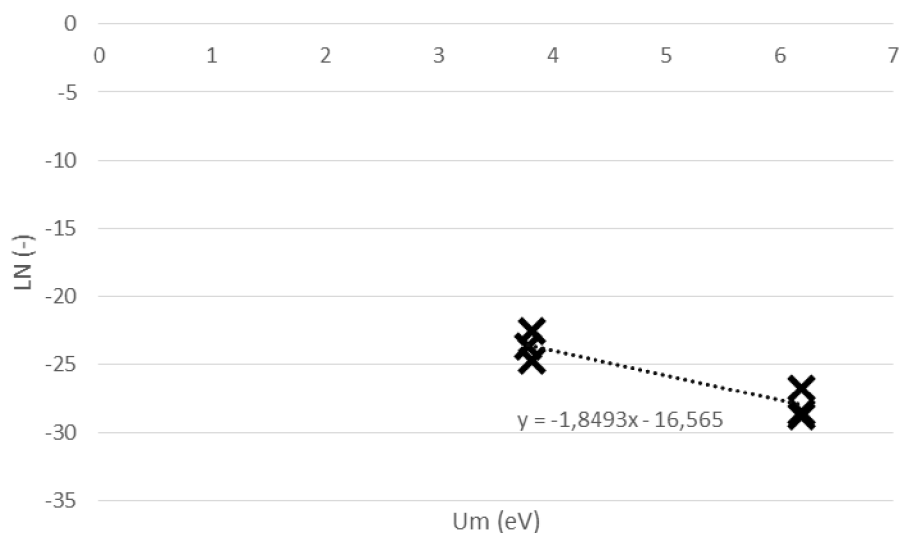
$$T = -\frac{1}{k \cdot a} = -\frac{1}{8,62 \cdot 10^{-5} \cdot (-1,8177)} = 6384,18 \doteq 6400 \text{ K}$$

Premena na °C = 6400 - 273,15 \doteq 6126 °C

9.14 Výpočet teploty pre čas 460 ms a vzdialenosť medzi elektródami 29,5 mm

teplota pre 460ms						
λ [m]	a' [-]	$g_k \cdot A_{ki}$ [1/s]		integral	U_m [eV]	LN [-]
5,11E-07	938,0145	8,00E+06		305,663	3,816692	-24,6599
5,15E-07	601,6778	2,40E+08		196,0637	6,191175	-28,4959
5,22E-07	830,8918	4,50E+08		270,7558	6,192025	-28,7893
5,22E-07	841,1236	6,00E+07		274,0899	6,191175	-26,7618
5,70E-07	873,9708	9,60E+05		284,7936	3,816692	-22,5004
5,78E-07	935,1644	3,30E+06		304,7342	3,785898	-23,6529
σ [-]	0,13	k [eV]	8,62E-05	a [-]	-1,8493	

Tabuľka 14 Namerané a vypočítané hodnoty pre čas 460 ms



Obr. 38 Pyrometrická priamka pre vzdialenosť 29,1 mm medzi elektródami

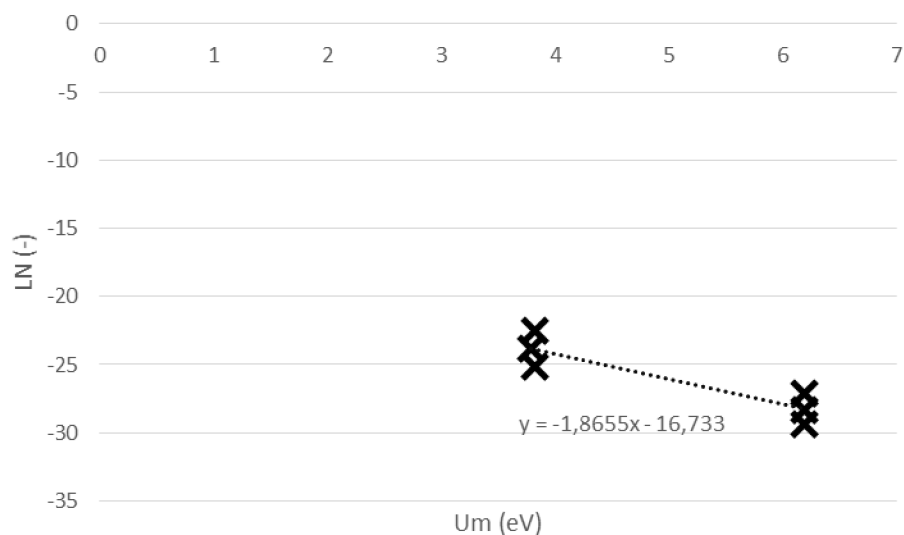
$$T = -\frac{1}{k \cdot a} = -\frac{1}{8,62 \cdot 10^{-5} \cdot (-1,8493)} = 6275,09 \doteq 6300 \text{ K}$$

Premena na °C = 6300 - 273,15 \doteq 6026 °C

9.15 Výpočet teploty pre čas 480 ms a vzdialenosť medzi elektródami 31,4 mm

teplota pre 480ms						
λ [m]	a' [-]	$g_k \cdot A_{ki}$ [1/s]		integral	U_m [eV]	LN [-]
5,11E-07	596,4524	8,00E+06		194,361	3,816692	-25,1127
5,15E-07	689,495	2,40E+08		224,68	6,191175	-28,3597
5,22E-07	452,6756	4,50E+08		147,5096	6,192025	-29,3966
5,22E-07	603,3498	6,00E+07		196,6086	6,191175	-27,094
5,70E-07	855,3273	9,60E+05		278,7184	3,816692	-22,5219
5,78E-07	755,2126	3,30E+06		246,0948	3,785898	-23,8666
σ [-]	0,13	k [eV]	8,62E-05	a [-]	-1,8655	

Tabuľka 15 Namerané a vypočítané hodnoty pre čas 480 ms



Obr. 39 Pyrometrická priamka pre vzdialenosť 31,4 mm medzi elektródami

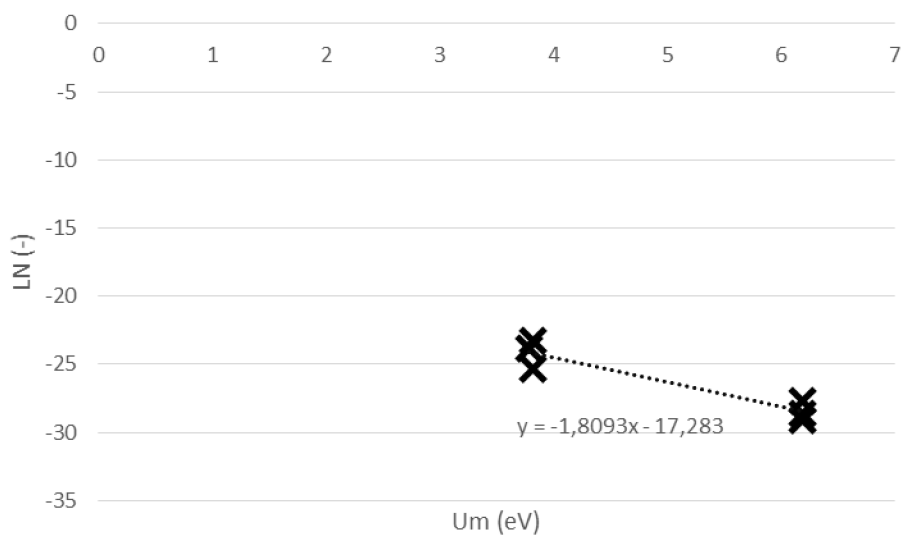
$$T = -\frac{1}{k \cdot a} = -\frac{1}{8,62 \cdot 10^{-5} \cdot (-1,8655)} = 6220,59 \doteq 6200 \text{ K}$$

Premena na °C = 6200 - 273,15 \doteq 5926 °C

9.16 Výpočet teploty pre čas 500 ms a vzdialenosť medzi elektródami 31,4 mm

teplota pre 500ms						
λ [m]	a' [-]	$g_k \cdot A_{ki}$ [1/s]		integral	U_m [eV]	LN [-]
5,11E-07	467,9517	8,00E+06		152,4875	3,816692	-25,3553
5,15E-07	529,6189	2,40E+08		172,5825	6,191175	-28,6235
5,22E-07	588,2514	4,50E+08		191,6886	6,192025	-29,1346
5,22E-07	330,9531	6,00E+07		107,8449	6,191175	-27,6946
5,70E-07	392,2975	9,60E+05		127,8347	3,816692	-23,3014
5,78E-07	761,9516	3,30E+06		248,2908	3,785898	-23,8577
σ [-]	0,13	k [eV]	8,62E-05	a [-]	-1,8093	

Tabuľka 16 Namerané a vypočítané hodnoty pre čas 500 ms



Obr. 40 Pyrometrická priamka pre vzdialenosť 31,4 mm medzi elektródami

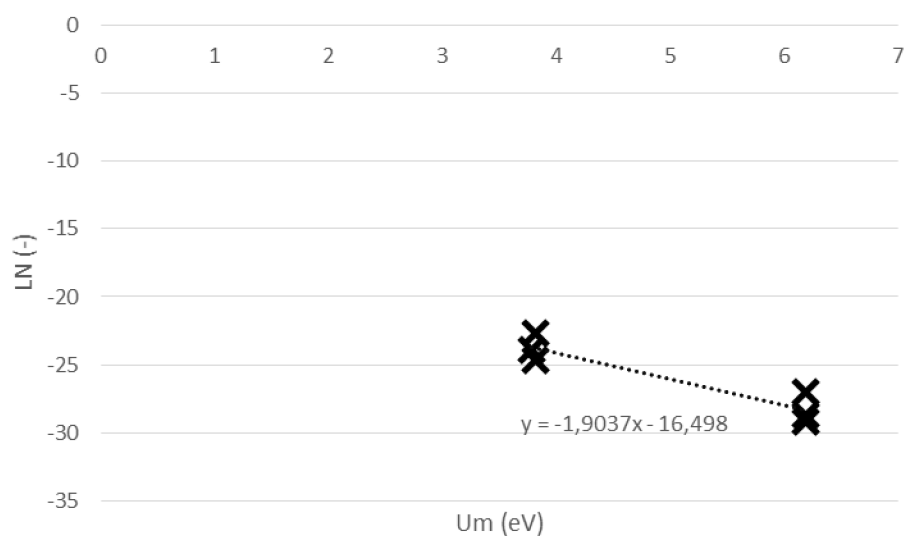
$$T = -\frac{1}{k \cdot a} = -\frac{1}{8,62 \cdot 10^{-5} \cdot (-1,8093)} = 6413,45 \doteq 6400 \text{ K}$$

Premena na °C = 6400 - 273,15 \doteq 6126 °C

9.17 Výpočet teploty pre čas 520 ms a vzdialenosť medzi elektródami 31,4 mm

teplota pre 520ms						
λ [m]	a' [-]	$g_k \cdot A_{ki}$ [1/s]		integral	U_m [eV]	LN [-]
5,11E-07	933,4819	8,00E+06		304,186	3,816692	-24,6647
5,15E-07	509,1846	2,40E+08		165,9237	6,191175	-28,6628
5,22E-07	559,9759	4,50E+08		182,4747	6,192025	-29,1839
5,22E-07	656,8781	6,00E+07		214,0514	6,191175	-27,009
5,70E-07	722,4759	9,60E+05		235,4272	3,816692	-22,6907
5,78E-07	748,6174	3,30E+06		243,9457	3,785898	-23,8754
σ [-]	0,13	k [eV]	8,62E-05	a [-]	-1,9037	

Tabuľka 17 Namerané a vypočítané hodnoty pre čas 520 ms



Obr. 41 Pyrometrická priamka pre vzdialenosť 31,4 mm medzi elektródami

$$T = -\frac{1}{k \cdot a} = -\frac{1}{8,62 \cdot 10^{-5} \cdot (-1,9037)} = 6095,77 \doteq 6100 \text{ K}$$

Premena na °C = 6100 - 273,15 \doteq 5826 °C

9.18 Závislosť teploty na dĺžke oblúka

Po vypočítaní teplôt pre každý časový interval bol zostrojený graf závislosti teploty na dĺžke oblúka medzi elektródami, ktorý nám ukazuje ako sa priemerná teplota elektrónov menila v závislosti na vzdialenosti medených elektród. Môžeme si všimnúť, že na začiatku je teplota najvyššia. To môže byť spôsobené rozptylovým transformátorom, ktorý má na začiatku nejakú akumulovanú energiu a na týchto prúdoch sa to prejaví. Potom teplota klesá, ale na konci trochu rastie a znova klesá. To môže byť spôsobené zmenou polomeru výbojového kanálu, keď sa znižuje polomer, teplota rastie. Na konci teplota klesá pretože oblúk sa pretiahol na okraj stability, čo ho ochladzuje a zhasína.



Obr. 42 Závislosť teploty na dĺžke oblúka

10. Zhodnotenie generátora

V druhej časti bakalárskej práce bolo navrhnuté zariadenie na generáciu elektrického oblúka. Výhodou navrhnutého zariadenia je jeho jednoduché a lacné prevedenie. Nevýhodou sú jeho odhalené kontakty, ktoré sú náchylné na dotyk a jeho nepraktické skladovanie. Dôležitou súčasťou každého navrhnutého zariadenia je aj úvaha o jeho možnom vylepšení. V tomto prípade môžeme naše navrhnuté zariadenie vylepšiť v zmysle kompaktnosti a bezpečnosti, aby bolo použiteľné aj pre osoby, ktoré nemajú elektrotechnické vzdelanie.

Kľúčovou súčasťou zariadenia je zdroj, pretože ten nám určuje intenzitu oblúka. Existujú rôzne druhy vysokonapäťových transformátorov, ktoré sú vhodné na demonštráciu elektrického oblúka a jeho účinky na okolie a elektródy. Dôležité je, aby bolo zariadenie bezpečné voči osobám a odolné voči vniknutím cudzích predmetov. Taktiež treba dbať na silné UV žiarenie, ktoré je oblúkom vyžarované. Preto je potrebné prítomné tienenie UV žiarenia pre ochranu zraku.

Ďalšia dôležitá časť pri návrhu je jednoduchosť ovládania a kompaktnosť. Preto je dôležité aby sa nové, vylepšené zariadenie ovládalo jednoduchým zapnutím a vypnutím obvodu. Nebude potrebné žiadne mechanické prepájanie vodičov alebo zapájanie transformátora. Zariadenie musí byť kompaktné, aby sa dalo ľahko prenášať a aby zaberalo čo najmenej miesta pri skladovaní.

Takéto zariadenie môže byť použité aj pri výučbe študentov, kde budú demonštrované účinky oblúka na elektródy a okolie. Pre efektívitu v zariadení môže byť použitých viacero druhov transformátorov. Napríklad, pre demonštráciu dynamických účinkov na elektródach použijeme transformátor z mikrovlnky, ktorý spôsobí veľké namáhanie elektród. Taktiež môžeme meniť vzdialenosť medzi elektródami pre demonštráciu preskokového napätia. Preto je potrebné aby sa dala vzdialenosť elektród meniť aj v prípade, keď sú pod napätím. Ako posledné môžeme na zariadení realizovať aj spektroskopické merania. Pre rôznosť spektier môžeme použiť elektródy, ktoré budú z rôznych materiálov. Preto musíme zariadenie prispôbiť tak, aby boli elektródy ľahko vymeniteľné.

Takto navrhnuté zariadenie je plne vhodné pre laboratórne vyučovanie či už na strednej alebo vysokej škole. Laboratórna úloha pomôže študentom lepšie porozumieť správaniu oblúka, jeho silovým účinkom a vlastnostiam. [17]



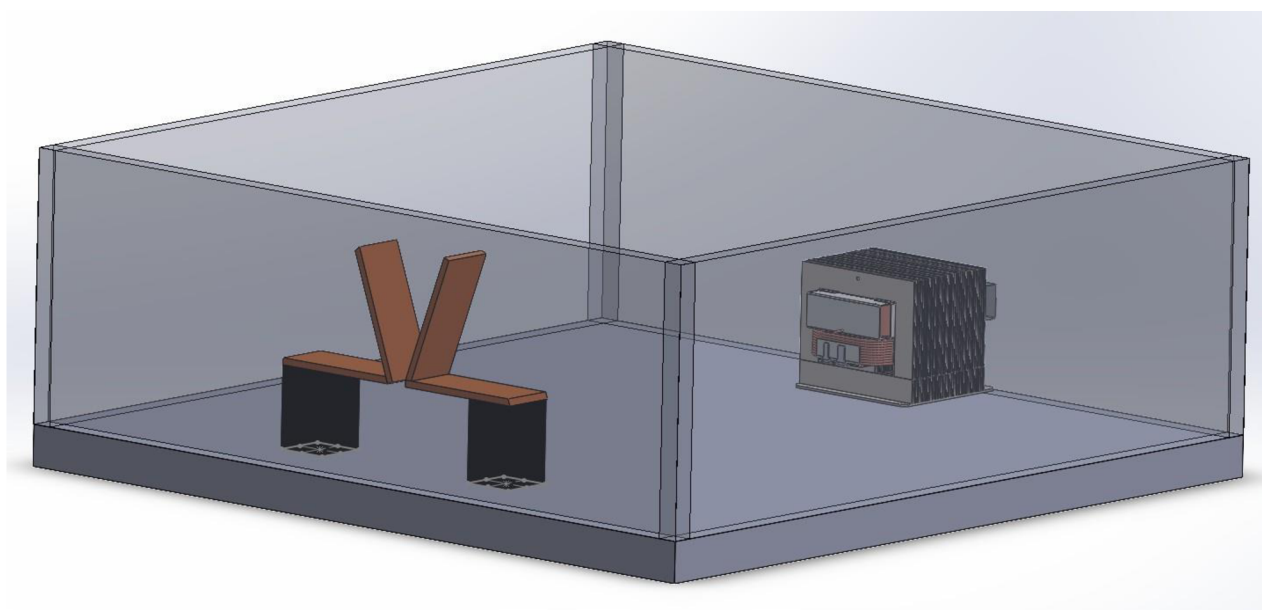
Obr. 43 Transformátor z mikrovlnnej trúby



Obr. 44 Neónový transformátor [19]

10.1 3D model

Po zhodnotení všetkých spomenutých vylepšeníach v kapitole 10. sme zostrojili približný 3D model ako by mohol vyzerat' daný vylepšený výrobok. Ako zdroj sme použili mikrovlnný transformátor a medené elektródy v tvare písmena „V“. Predná stena priamo pred elektródami bude slúžiť na pozorovanie elektrického oblúka. Preto musí byť vyrobená z materiálu, ktorý je priehľadný a zároveň zastaví nebezpečné UV žiarenie. Ideálny by bol zvaračský materiál. Podklad pod zariadenie musí byť pevný nehorľavý izolant (napríklad nízko hustotný polyetylén) s dostatočnou hrúbkou, ktorá zabezpečí sekundárnu izoláciu v prípade poruchy skratom alebo roztavenie elektródy. Primárnu izoláciu zabezpečia keramické izolátory, na ktorých budú elektródy pripevnené. Taktiež je potreba obmedzenie prúdu na primárnej cievke, ktoré by mohlo byť vyhotovené sériovým odporom. Odpor bude slúžiť ku ochrane transformátorového vinutia aby sa predišlo prehriatiu vinutia.



Obr. 45 Približný 3D model možného vylepšeného zariadenia [20]

3D model bol vypracovaný v programe Solidworks.

ZÁVER

Cieľom bakalárskej práce bolo zoznámiť sa s problematikou elektrického oblúka a jeho plazmy. Naštudovať si spektroskopické metódy na analýzu plazmy elektrického oblúka. Vybrať najvhodnejšiu spektroskopickú metódu a pomocou nej urobiť analýzu konkrétnej plazmy.

V prvej časti práce bola teoreticky popísaná problematika elektrického oblúka a plazmy, ako daný oblúk vzniká, v čom je užitočný a naopak škodlivý. Bol vysvetlený princíp vzniku plazmy a ionizácie, boli popísané rôzne druhy spektroskopie, optická, emisná a absorpčná, ich výhody a nevýhody. Nakoniec bola vybraná najvhodnejšia spektroskopická metóda pre praktickú časť bakalárskej práce.

Cieľom praktickej časti bol návrh zariadenia, ktorý bude generovať oblúk a následná analýza vygenerovanej plazmy na danom zariadení pomocou vybranej spektroskopической metódy. Vybraná bola opticko – emisná spektroskopia, ktorá bola na meranie najvýhodnejšia, pretože nepotrebovala cudzí zdroj spojitého spektra. Optické vlákno bolo nastavené kolmo na elektrický oblúk a pomocou programu AvaSoft sa zaznamenávali hodnoty intenzity žiarenia na rôznych vlnových dĺžkach. Namerané hodnoty sa porovnali s databázou NIST a boli ďalej spracované.

Ďalším cieľom bolo vypočítať teplotu elektrického oblúka. Údaje získané z databázy NIST boli porovnané s našim meraním a pre zhodné vlnové dĺžky bol vypočítaný Gaussov integrál. Bola zostrojená pyrometrická priamka a vypočítaná teplota elektrického oblúka. Niektoré spektrálne čiary sa museli z pyrometrickej priamky odstrániť pretože zanášali do výpočtu nepresnosti, ktoré mohli byť spôsobené veľmi malou intenzitou žiarenia. Po eliminácii nežiaducich spektrálnych čiar bola teplota elektrického oblúka úspešne vypočítaná a bol zostrojený graf závislosti teploty na dĺžke oblúka medzi elektródami.

V záverečnej časti sú kriticky zhodnotené výhody a nevýhody navrhnutého zariadenia. Obsahuje tiež diskusiu o jeho možných vylepšeniach z hľadiska bezpečnosti a kompaktnosti, aby zariadenie bolo vhodné na použitie pre výučbu študentov VUT ako laboratórna úloha. Nakoniec bol zostrojený približný 3D model vylepšeného zariadenia.

Ciele bakalárskej práce boli splnené. Bolo zistených niekoľko dôležitých poznatkov o správaní sa elektrického oblúka a presnosti použitých spektroskopických metód, ktoré môžu byť užitočné v ďalších výskumných odboroch.

ZOZNAM SYMBOLOV A SKRATIEK

Skratka

NIST	National Institute of Standards and Technology
VUT	Vysoké Učení Technické
FEKT	Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Fps	frames per second

Symbol:

E	intenzita elektrického poľa	(V/m)
J	prúdová hustota	(A/cm ²)
U	Elektrické napätie	(V)
I	Elektrický prúd	(A)
A_{mn}	prechodová pravdepodobnosť	(1/s)
g_m	váha prechodovej pravdepodobnosti	(-)
U_m	energia	(eV)
λ	vlnová dĺžka	(nm)
k	boltzmannová konštanta	(eV)
T	teplota	(K)
a'	intenzita	(-)
σ	smerodajná odchýlka	(-)
a	sklon lineárnej priamky	(-)

REFERENCIE

- [1] DOBRIJEVIC, Daisy, LEA, Robert, ed. How hot is the sun?. Space.com: Science & Astronomy [online]. 12.6.2022 [cit. 2022-11-23]. Dostupné z: <https://www.space.com/17137-how-hot-is-the-sun.html>.
- [2] BUŠOV, Bohuslav. Výboje v elektrických prístrojoch, zhášení spínacieho oblúka: Zhášení DC a AC oblouku, VA charakteristiky. Brno, 2022.
- [3] GRAHAM, Richard. *Zákon zachování energie*. Online. Khan Academy. Dostupné z: <https://cs.khanacademy.org/science/fyzika-vlneni-a-zvuk/x34b3f391df7f0014:periodicky-pohyb-a-kmitani/x34b3f391df7f0014:energie-harmonickeho-kmitani/a/conservation-of-energy-ap-physics-1>. [cit. 2024-05-10].
- [4] BRITANICCA. *Electric Arc*. Online. TIKKANEN, Amy, TIKKANEN, Amy (ed.). BRITANICCA. Britannica. 2022, 10.5.2024. Dostupné z: <https://www.britannica.com/science/electric-arc>. [cit. 2024-05-10].
- [5] Energy education: Ionization. Energyeducation.com [online]. Calgary, USA: University of Calgary, 3.9.2018 [cit. 2022-11-23]. Dostupné z: <https://energyeducation.ca/wiki/index.php?title=Ionization&direction=next&oldid=8023>
- [6] Plasma Science and Fusion Center Massachusetts Institute of Technology: What is Plasma?. Science & Astronomy [online]. 77 Massachusetts Avenue, Cambridge: MIT, 2022, 12.6.2022 [cit. 2022-11-23]. Dostupné z: <https://www.space.com/17137-how-hot-is-the-sun.html>
- [7] BAKER, Jim a Daniel ESQUIVES. FuseSchool - Global Education: What Is Plasma | Properties of Matter | Chemistry |. In: Youtube.com [online]. FuseSchool, 28. 1. 2016 [cit. 2022-11-23]. Dostupné z: <https://youtu.be/94tReSbyPYc>
- [8] BRITANICCA. *Spectroscopy*. Online. CHU, Steven; HURST, Geroge Samuel a STONER, John Oliver. BRITANICCA. Science & Tech. 2022, 30.4.2024. Dostupné z: <https://www.britannica.com/science/spectroscopy>. [cit. 2024-05-10].
- [9] Analytical and Measuring Instruments: Principle of Optical Emission Spectrometry. *Shimadzu.com* [online]. [cit. 2022-12-15]. Dostupné z: <https://www.shimadzu.com/an/products/elemental-analysis/oes-app/principle-of-optical-emission-spectrometry/index.html>
- [10] ENCYCLOPAEDIA BELIANA. *Atómová absorpčná spektroskopia*. Online. ENCYCLOPAEDIA BELIANA. Beliana. 1999, 24.7.2017. Dostupné z: <https://beliana.sav.sk/heslo/atomova-absorpcna-spektrometria>. [cit. 2024-05-10].
- [11] SCIENCEDIRECT. *Supercontinuum Time-of-Flight Absorption Spectroscopy*. Online. ScienceDirect. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/absorption-spectroscopy>. [cit. 2024-05-10].
- [12] Online. Photron. Dostupné z: <https://photron.com/>. [cit. 2024-05-10].

- [13] *P6015A 1000X High Voltage Probe*. Online. 2006. Dostupné z: <https://download.tek.com/manual/070822305.pdf>. [cit. 2024-05-22].
- [14] CHAUVIN ARNOUX. *E25 AC-DC CURRENT CLAMP*. Online. CHAUVIN ARNOUX. Dostupné z: https://catalog.chauvin-arnoux.com/fr_en/pince-e25.html. [cit. 2024-05-10].
- [15] KRAMIDA, Alexander; RALCHENKO, Yuri; READER, Joseph a OLSEN, Karen. *National Institute of Standards and Technology*. Online. National Institute of Standards and Technology. 1995, 1.12.2023. Dostupné z: <https://www.nist.gov/>. [cit. 2024-05-13].
- [16] ŠIMEK, D. *Působení spínacího oblouku na konstrukci výkonového přístroje nn*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015. 71 s. Vedoucí diplomové práce prof. RNDr. Vladimír Aubrecht, CSc. [cit. 2024-05-13].
- [17] EPA. *United States Environmental Protection*. Online. Health Effects of UV Radiation. 2015, 1.2.2024. Dostupné z: <https://www.epa.gov/>. [cit. 2024-05-13].
- [18] NEONSIGNSTUFF. *Neon Transformer Safety*. Online. 2021. Dostupné z: youtube.com, https://www.youtube.com/watch?v=OOAYq4us21w&t=315s&ab_channel=NeonSignStuff. [cit. 2024-05-13].
- [19] TORTECH PTY LTD. *Neon Transformer: Power Supply*. Online. In: . Dostupné z: <https://www.tortech.com.au/product/power-supply/neon-transformer/>. [cit. 2024-05-13].
- [20] SHUJA, Hasanian. *Class R Transformer for Microwave Oven*. Online. GRABCAD. 2022. Dostupné z: <https://grabcad.com/library/class-r-transformer-for-microwave-oven-1>. [cit. 2024-05-13].
- [21] *About Our Jacob's Ladder Plasma Displays*.: Online. Stratman Design. 1994. Dostupné z: <https://strattman.com/plasma-jacobs-ladder/>. [cit. 2024-05-15].