

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY**

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

TEORETICKÉ MODEL Y ELEKTRICKÉHO OBLOUKU

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS**

**AUTOR PRÁCE
AUTHOR**

BRNO 2015

MICHAL VONDRÁK



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor

Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika

Student: Michal Vondrák
Ročník: 3

ID: 146997
Akademický rok: 2014/2015

NÁZEV TÉMATU:

Teoretické modely elektrického oblouku

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Základní pojmy - plazma, elektrický oblouk, plazmatron.
2. Zjednodušené modely oblouku – základní rovnice pro popis, zjednodušující předpoklady, vlastnosti plazmatu.
3. Zjednodušený model – určení střední teploty a rychlosti plazmajetu na výstupu z plazmatronu.
4. Model axiálně chlazeného oblouku.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 9.2.2015

Termín odevzdání: 28.5.2015

Vedoucí práce: doc. Ing. Ilona Lázníčková, Ph.D.

Konzultanti bakalářské práce:

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.
Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

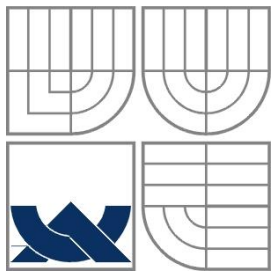
Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení částí druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Bibliografická citace práce:

VONDRÁK, M. *Teoretické modely elektrického oblouku*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015. 43 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Ilona Lázničková, Ph.D..

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. Díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

.....



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ



Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Ústav elektroenergetiky

Bakalářská práce

TEORETICKÉ MODEL ELEKTRICKÉHO OBLOUKU

Michal Vondrák

vedoucí: doc. Ing. Ilona Lázníčková, Ph.D.

Ústav elektroenergetiky, FEKT VUT v Brně, 2015

Brno



BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Faculty of Electrical Engineering and Communication
Department of Electrical Power Engineering

Bachelor's Thesis

Theoretical models of electric arc

by

Michal Vondrák

Supervisor: doc. Ing. Ilona Lázníčková, Ph.D.

Brno University of Technology, 2015

Brno

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá teoretickými modely elektrického oblouku. Vysvětlením pojmů plazmatu, elektrického oblouku a plazmatronů. Popsáním základního modelování elektrických oblouků. Popisem nepřímé metody pro stanovení střední teploty a rychlosti plazmaju na výstupu z plazmatronu. Popisem zjednodušeného modelu s axiálně chlazeným elektrickým obloukem.

KLÍČOVÁ SLOVA: plazma; elektrický oblouk; plazmatron; modelování elektrického oblouku; nepřímá metoda výpočtu výstupních parametrů

ABSTRACT

This thesis deals with theoretical models of the electric arc. Plasma arc and plasma torch are explained. Basic approaches of electric arc modeling are described. The indirect method for the determination of the mean temperature and velocity at the exit of plazma jet plasmatron are discussed. Finally the simplified model with axially-cooled electric arc is described.

KEY WORDS: plasma; arc; plasma torch; modeling arc; indirect method of calculating output parameters

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	9
SEZNAM TABULEK	10
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	11
1 ÚVOD	13
2 PLAZMA.....	14
2.1 DEFINICE PLAZMATU.....	14
2.2 TYPY PLAZMATU	15
2.3 APLIKACE PLAZMATU.....	16
3 ELEKTRICKÝ OBLOUK	19
3.1 VLASTNOSTI ELEKTRICKÉHO OBLOUKU	19
3.2 ČÁSTI ELEKTRICKÉHO OBLOUKU	19
3.3 V-A CHARAKTERISTIKA ELEKTRICKÉHO OBLOUKU	20
3.4 OBLOUKOVÉ NAPĚTÍ.....	21
4 PLAZMATRONY	22
4.1 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ PLAZMATRONU	22
4.2 DĚLENÍ PLAZMATRONŮ	23
4.3 TECHNOLOGICKÉ PŘÍSLUŠENSTVÍ PLAZMATRONU	23
5 ZÁKLADY MODELOVÁNÍ ELEKTRICKÉHO OBLOUKU	24
6 NEPŘÍMÁ METODA NA VÝSTUPU Z PLAZMATRONU	24
6.1 POPIS VÝPOČETNÍ METODY	25
6.2 POSTUP PŘI VÝPOČTU RYCHLOSTI PAPRSKU Z PLAZMATRONU A TEPLoty	27
6.3 ZADÁNÍ A VÝPOČET RYCHLOSTI PAPRSKU A TEPLoty Z PLAZMATRONU	27
7 ZJEDNODUŠENÝ MODEL AXIÁLNĚ CHLAZENÉHO OBLOUKU	30
7.1 POSTUP PŘI VÝPOČTU AXIÁLNĚ CHLAZENÉHO OBLOUKU.....	31
7.2 VÝPOČET AXIÁLNĚ CHLAZENÉHO OBLOUKU	33
7.3 GRAFICKÉ ZOBRAZENÍ VÝSLEDKŮ	39
8 ZÁVĚR.....	42
POUŽITÁ LITERATURA	43

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1 Změny skupenství vody a vznik plazmatu [1].....</i>	<i>14</i>
<i>Obr. 2 Výskyt plazmatu v závislosti na teplotě a koncentraci elektronů [1], [3].....</i>	<i>15</i>
<i>Obr. 3 Voltampérová charakteristika oblouku.</i>	<i>20</i>
<i>Obr. 4 Obloukové napětí [5]</i>	<i>21</i>
<i>Obr. 5 Zjednodušený nákres plazmatronu s vyznačením hlavních částí [3].....</i>	<i>22</i>
<i>Obr. 6 Zjednodušený nákres plazmatronu s popisem veličin [4].....</i>	<i>25</i>
<i>Obr. 7 Zjednodušený model axiálně chlazeného oblouku [3].....</i>	<i>31</i>
<i>Obr. 8 Závislost teploty na šířce kanálu.....</i>	<i>39</i>
<i>Obr. 9 Závislost intenzity elektrického pole na šířce kanálu</i>	<i>39</i>
<i>Obr. 10 Závislost Machova čísla na šířce kanálu</i>	<i>40</i>
<i>Obr. 11 Závislost napětí na šířce kanálu</i>	<i>40</i>
<i>Obr. 12 Velikost poloměru oblouku podél celé šířky kanálu</i>	<i>41</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1 Zadané parametry pro výpočet [4]</i>	28
<i>Tab. 2 Vlastnosti dusíku při atmosférickém tlaku [4]</i>	28
<i>Tab. 3 Shrnutí výsledků výstupních parametrů z plazmatronu</i>	30
<i>Tab. 4 Naměřené hodnoty na plazmatronu [3]</i>	34
<i>Tab. 5 Materiálové vlastnosti argonu [3]</i>	34
<i>Tab. 6 Shrnutí prvního kroku iterace pro tisíce stupňů kelvinů</i>	35
<i>Tab. 7 Shrnutí odchylky iterace pro tisíce stupňů kelvinů</i>	35
<i>Tab. 8 Shrnutí druhého kroku iterace pro stovky stupňů kelvinů</i>	36
<i>Tab. 9 Shrnutí odchylky iterace pro stovky stupňů kelvinů</i>	36
<i>Tab. 10 Shrnutí posledního kroku iterace pro desítky stupňů kelvinů</i>	36
<i>Tab. 11 Shrnutí finální odchylky iterace pro desítky stupňů kelvinů</i>	37
<i>Tab. 12 Výsledné hodnoty pro 1. variantu výpočtu</i>	37
<i>Tab. 13 Výsledné hodnoty pro 1. variantu výpočtu (pokračování)</i>	38
<i>Tab. 14 Výsledné hodnoty pro 2. variantu výpočtu</i>	38

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

U_{ob}	napětí oblouku	V
A, B, C, D	konstanty uspořádání oblouku	-
l	délka oblouku	m
I_{ob}	proud oblouku	A
I	proud	A
j_s	proudová hustota v katodě	A.m ⁻²
T_1	vstupní teplota plynu do plazmatronu	K
p_1	vstupní tlak plynu do plazmatronu	Pa
$Q_{m,p}$	hmotností průtok plynu	kg.s ⁻¹
T_{v1}	vstupní teplota chladicí vody	K
T_{v2}	výstupní teplota chladicí vody	K
$Q_{m,v}$	hmotnostní průtok chladicí vody	kg.s ⁻¹
U_{pl}	napětí na hořáku plazmatronu	V
I_{pl}	proud v plazmatronu	A
P_{pl}	příkon plazmatronu	W
ΔT	rozdíl teplot na výstupu a vstupu	K
ΔP	ztráty plazmatronu	W
T	střední teplota na výstupu z plazmatronu	K
$c_{p,v}$	měrná tepelná kapacita vody při konstantním tlaku	J.kg ⁻¹ .K ⁻¹
c_p	měrná tepelná kapacita při konstantním tlaku	J.kg ⁻¹ .K ⁻¹
c_v	měrná tepelná kapacita při konstantním objemu	J.kg ⁻¹ .K ⁻¹
Δi	změna vnitřní entalpie pracovního plynu	J.kg ⁻¹
i_1	vstupní entalpie pracovního plynu	J.kg ⁻¹
i_2	výstupní entalpie pracovního plynu	J.kg ⁻¹
v	výtoková rychlost z plazmatronu	m.s ⁻¹
v_v	měrný objem pracovního plynu pro tlak p a teplotu T	m ³ .kg ⁻¹
A_v	průřez trysky na výstupu plazmatronu	m ²
d	průměr otvoru výstupní trysky	m
ρ	hustota	kg.m ⁻³
κ	Poissonova konstanta	-
Ma	Machovo číslo	-

P_z	ztráty na oblouku	W
P_{zk}	ztráty na katodě	W
P_{zak}	ztráty na anodovém kanále	W
p_z	poměrné ztráty sloupce oblouku	-
Q_m	hmotnostní průtok	kg.s ⁻¹
T_0	teplota studené zóny	K
T_A	teplota v ose oblouku	K
c_s	rychlost zvuku	m.s ⁻¹
i	entalpie pracovního plynu	J.kg ⁻¹
j_s	proudová hustota	A.m ⁻²
E	intenzita elektrického pole	
r_0	poloměr katodové skvrny	m
r_A	poloměr oblouku	m
r_C	poloměr kanálu plazmatronu	m
z_L	délka kanálu	m
Δz	velikost kroku	m
π	Eulerovo číslo	-
σ	konduktivita	S.m ⁻¹
ρ	hustota	kg.m ⁻³

1 ÚVOD

Tato práce se zabývá teoretickými modely elektrického oblouku, kde cílem této práce bylo seznámení s problematikou elektrického oblouku a nahlédnutí do této složité části energetiky. Tato oblast má v dnešní době veliký význam a to proto, že mnoho vědců se snaží touto problematikou zabývat a pokusit zkoumat další efektivní využití elektrického oblouku, který by nám mohl být velice užitečný v mnoha dalších oblastech. V této práci bylo cílem se seznámit se základními pojmy jako je plazma a to hlavně nízkoteplotní plazma, elektrický oblouk a plazmatron. Dále se zaměřit na zjednodušené modely oblouku a poté samotný výpočet dvou nepřímých metod.

Práce začíná popsáním plazmatu a jeho chováním, plazma je potřebné pro existenci elektrického oblouku. Poté se v podkapitole popíše široká škála plazmatu a následně zaměření na nízkoteplotní plazma a jeho uplatnění v dnešní době, které je velice moderní a často používané.

Další kapitola se zabývá elektrickým obloukem, který hořením vytváří termické plazma. Tato část je důležitá pro další pokračování, kde bude popsána funkce plazmatronu, což je přístroj na vytváření termického plazmatu za pomoci již zmiňovaného elektrického oblouku.

Po vysvětlení vlastností a vzniku plazmatu se práce dále zaměřuje na modelování. Jedná se o velice složitý proces, a tak jsou zde popsány dvě z mnoha metod, konkrétně pak na výpočet z energetické bilance generace plazmatu a model s axiálně chlazeným obloukem.

První metoda je zaměřena na výpočet střední teploty a střední rychlosti plazmaju na výstupu z plazmatronu, která se používá z důvodu složitosti naměření těchto výstupních parametrů a tak se vypočítají přes jiné snadněji naměřené veličiny. Nepřímá metoda je následně vypočítána na konkrétním příkladu ze zadaných vstupních parametrů a dalších známých termodynamických veličin plazmatu.

Poslední část této práce je zaměřena na druhou nepřímou metodu, konkrétně pak na model s axiálně chlazeným obloukem. Kde za pomoci mnoha zjednodušujících předpokladů lze stanovit hledané parametry jako je teplota, napětí, Machovo číslo, poloměr oblouku nebo intenzita elektrického pole podél celé šířky kanálu. Tento výpočet bude proveden ve dvou variantách pro různé vstupní parametry. Výsledné hodnoty jsou pak znázorněny v grafu.

2 PLAZMA

V této kapitole se zaměříme na vysvětlení pojmu plazma, které je potřebné pro existenci elektrického oblouku a tedy hlavním tématem této práce. V celé práci je používáno plazma ve středním rodě, jakožto fyzikální plazma, nikoliv rodu ženského, kde by se jednalo o krevní plazma.

2.1 Definice plazmatu

Definice plazmatu vychází z [1], [2], [7] a je označováno jako další tedy čtvrté skupenství hmoty nebo jako plynné skupenství obsahující nabitě částice. Přecházení mezi skupenstvím je dosaženo tím, že danou hmotu ohříváme, jak je vidět na Obr. 1 uvažujme skupenské stavy vody. Při teplotě pod bodem mrazu je voda ve stavu ledu a má pevnou krystalickou formu. Při teplotě od 0 °C až do 100 °C je voda v klasickém tekutém stavu a pevná krystalická forma se přeruší, avšak stále obsahuje spoustu molekulárních struktur. Při teplotě nad 100 °C se začne voda vypařovat a přeměňovat na další skupenskou formu a to plynnou s volnými částicemi H₂O. Tento stav má vysoce narušené molekulární vazby. Při dalším zvyšování teploty dochází k disociaci tedy rozpadání molekul na jednotlivé volné atomy zapříčiněnými jednotlivými srážkami mezi molekulami a atomy, tím i ke vzniku volných atomů vodíku a kyslíku. Při dosažení teploty nad 10 000 °C se dostáváme do stavu, které se nazývá plazma. Dochází k rozpadu jednotlivých atomů, a tím i ke vzniku záporně nabitých elektronů a kladných iontů. Vzniká tedy kvazineutrální plyn obsahující nabitě a neutrální částice, který vykazuje kolektivní chování a nazývá se plazmatem.

Pevná látka	Kapalina	Plyn	Plazma
Příklad	Příklad	Příklad	Příklad
Led H ₂ O	Voda H ₂ O	Pára H ₂ O	Ionizovaný plyn $H^+ + H^+ + 2e^-$
Studený $T < 0\text{ °C}$	Teplá $0\text{ °C} < T < 100\text{ °C}$	Horký $T > 100\text{ °C}$	$T > 10\,000\text{ °C}$
			
Molekuly jsou fixovány v mřížce	Molekuly se mohou volně pohybovat	Molekuly se mohou volně pohybovat, větší vzdálenosti	Ionty a elektrony se mohou nezávisle pohybovat, větší vzdálenosti

Obr. 1 Změny skupenství vody a vznik plazmatu [1]

Plazma se vyznačuje chováním, které je pro plazma typické, jako je [1]:

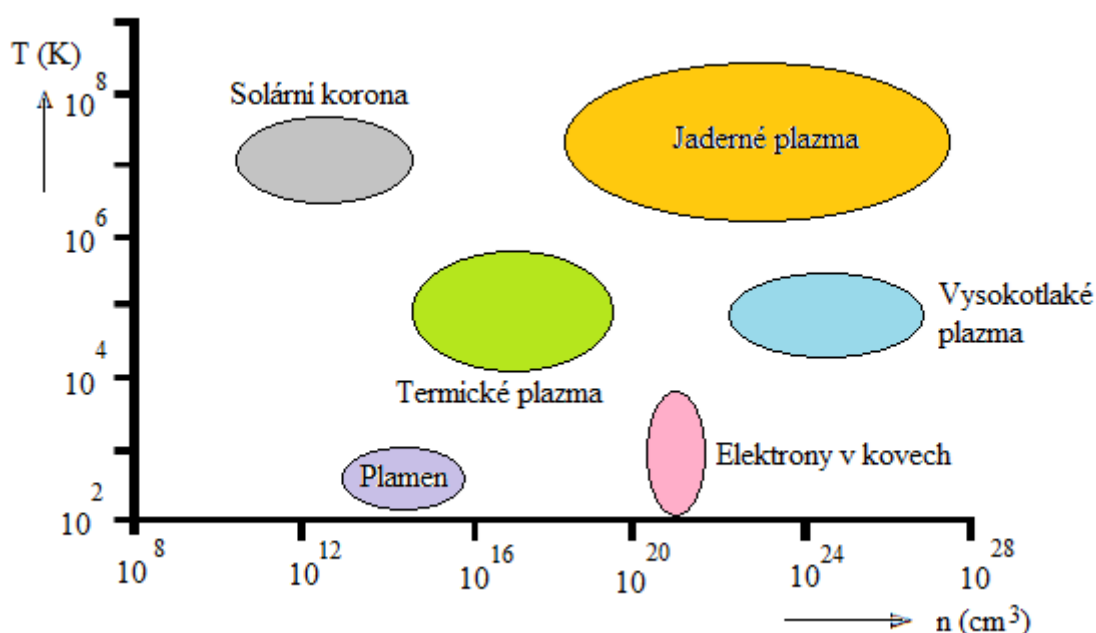
- **Kvazineutralita** - přibližně shodná velikost kladného náboje všech částic a záporného náboje částic v plazmatu, tj. chování plazmatu se z celkového pohledu jeví jako elektricky neutrální.
- **Kolektivní chování** – pohyby, které nejsou závislé pouze na lokálních podmínkách ale i na stavu plazmatu ve vzdálených místech.

- **Srážková frekvence** - dostatečně velký počet srážek jednotlivých částic mezi sebou.
- **Debyeova délka** [7] – vzájemné působení dvou nabitých elektrických částic v plazmatu se odvíjí od toho, jak jsou od sebe vzdálené. Pokud jsou blízko u sebe, budou se chovat podle Coulombova zákona. V plazmatu je i mnoho volných nosičů náboje, a pokud se nachází ve větší vzdálenosti, potom budou náboje stíněny. Debyeova délka tedy udává vzdálenost, do které jsou náboje v plazmatu nestíněné

2.2 Typy plazmatu

Plazma se dělí podle typu především na přirozené, které bývá nejčastěji zastoupeno ve vesmíru a to až v 99%. Jak plyne ze zdroje [8], vyskytuje se ve formě slunečního větru, ve složení planet a komet, u Jupiteru a Saturnu vytváří obrovský plazmový prstenec, hvězdy jsou veliké plazmatické koule, sluneční skvrny, většina mlhovin ve vesmíru. Dále významným přirozeným plazmatem je prachové plazma, jedná se o plazmatické prostředí, kde se vyskytuje i množství velice drobného prachu. Prachové plazma má velký význam například u Mléčné dráhy, kde jsou vidět místa zastíněná velkou oblastí prachového plazmatu. Prachové plazma nalezneme i u naší planety, které tu zanechali komety a kolize mezi planetkami.

Plazma vytvořené uměle podle [2], bývá nejčastěji laserové, pulsní, tokamak (magnetické nádoba pro uchování vysokoteplotního plazmatu) a studené plazma, kde nejkratší dobu života má laserové kolem 10^{-12} s a nejdelší dobu i v řádech dnů má plazma studené. Plazma se dá dělit například podle toho [3], jak je nebo není teplotně vyvážené. Pokud mají všechny částice v plazmatu stejnou teplotu, pak hovoříme o rovnovážném plazmatu a jako typický příklad jsou nitra hvězdy. Plazma se vytváří ohříváním plynného skupenství, elektrickým nebo magnetickým polem a u všech takto vytvořených plazmatických prostředí vzniká rychlejší pohyb částic a energií.



Obr. 2 Výskyt plazmatu v závislosti na teplotě a koncentraci elektronů [1], [3]

Na Obr. 2 vidíme výskyt různých typů plazmatu, kde na svislé ose máme teplotu v kelvinech a na vodorovné ose koncentraci počtu elektronů v jednom centimetru krychlovém. Teploty se řádově velice liší a to od 100 K, až po teploty 10^9 K, které jsou především v jaderných reakcích a ve hvězdách. Nás však především v další části této práce bude zajímat termické plazma a elektrický oblouk, který má teplotu přibližně na hodnotách 10^4 K, což je považováno za nízkoteplotní plazma. Dalším parametrem na obrázku je koncentrace částic, která se pohybuje ve velkém rozmezí a to od 1 do 10^{30} částic v jednom krychlovém centimetru a od toho se odvíjí vzdálenost, kterou urazí částice, než dojde k další srážce s jinou částicí. Tato vzdálenost se pak může pohybovat od mikrometrů až po několik kilometrů.

Plazma můžeme mít například rozdělené podle tlaku, ve kterém se nachází [1], ať už nízkotlaké, atmosférické, vysokotlaké nebo pulsní.

Nízkotlaké plazma vznikne vybuzením střídavým i stejnosměrným proudem nebo vysokofrekvenčním elektromagnetickým polem. Například pokud v prázdné trubici přivedeme napětí na konce dvou elektrod, může za určitých okolností dojít ke vzniku plazmatu. Z důvodu toho, že vyprázdněná trubice obsahuje malé částice, které po přivedení napětí zvýší svojí rychlost. Tím i šanci na srážky s jinou částicí a poté dojde ke vzniku plazmatu. Pokud budeme zvyšovat hodnotu napětí, dojde k lavinovým srážkám a tím i k zvyšování teploty elektrod. Po dostatečném zahřátí se energie uvolní do prostoru trubice a přejde v doutnavý výboj až k zapálení elektrického oblouku, který hoří mezi dvěma elektrodami. Tento způsob se využívá například ve světelné technice u obloukových lamp nebo u tavících obloukových pecí pro tavení materiálů s vysokým bodem tání.

Atmosférické plazma je především bariérový výboj nebo korona. Korona vzniká například u vedení vysokého napětí za zvýšené vlhkosti, projevuje se ztrátami na vedení jako únik energie do okolního prostředí. Další výskyt koróny je v okolí hrotových elektrod. Nachází se především tam, kde je nehomogenní elektrické pole, zatímco bariérový výboj je převážně homogenní a vzniká na dvou elektrodách, které jsou dielektricky oddělené.

Elektrický výboj ve vysokofrekvenčním magnetickém poli závisí na výskytu přirozených nosičů nábojů v plynu, které dokáží absorbovat energii pole a ionizovat atomy. Máme dva druhy plazmatu a to kapacitně a induktivně vázané. Kapacitně vázané plazma vzniká na elektrodách, které jsou odděleny dielektricky za přiloženého vysokofrekvenčního napětí, zatímco induktivní plazma vzniká v elektromagnetickém poli cívky.

U mikrovlnného plazmatu je energie přenášena pomocí oscilací s velmi vysokou frekvencí. Takto vytvořený výboj dosahuje vysoké hustoty plazmatu a je vhodný pro úpravu povrchů bez jejího poškození. Další část této práce bude zaměřená na přiblížení využití plazmatu v praxi a jeho hlavních výhod.

2.3 Aplikace plazmatu

Plazma se poprvé začalo používat ve dvacátých letech 20. století, jak je uvedeno v [8], a jako první s ním pracoval pan Langmuir, který chtěl vyvinout trubice, které by za nízkého tlaku dokázali vést velmi vysoké proudy. V trubici se nacházel plyn, který nebyl v té době známý, a později se zjistilo, že to byl ionizovaný plyn. Výboj v plynu je dnes velice využíván a to ve rtuťových usměrňovačích, jiskřístích, svařovacích obloucích, zářivkách, neonových trubicích nebo u blesků. Nyní se na různé jednotlivé aplikace zaměříme podrobněji podle zdroje [9].

Osvětlovací systémy s plazmatem – v různých plynech plazmové výboje vyzařují světlo, a proto je vhodné tuto jejich vlastnost využít. Pro osvětlování ulic se již dávno používali výbojky s uhlíkovými elektrodami, kde hořel plazmový výboj a až poté byla teprve vynalezena žárovka. Výbojky se dále vyvíjely a pomocí různých plynů bylo dosaženo různých efektů, jako je vysoká svítivost, různé barvy nebo vyzařování v neviditelné oblasti světla pro člověka. Plazma je využíváno také i v zářivkách v podobě UV záření a přes luminofor dále vyzařováno jako viditelné světlo.

Plazmová chemie – pro zvýšení rozmezí teplot při běžných chemických reakcích za normálního tlaku se používá chemických reakcí v plazmatu. To má za výhody, že reakce lze provádět za různého tlaku od vakua až po velmi vysoké tlaky a zároveň od jednotek až po desetitisíce stupňů celsia. Při používání chemických reakcí v plazmatu lze dosáhnout speciálních sloučenin, kterých by běžně nemělo být podle klasické chemie dosaženo a to z důvodu, že již před reakcí je plyn ionizovaný.

Zobrazovací systémy a lasery – plazmové televize a podobné zobrazovací systémy jsou již dlouhou dobu známé a využívají podobný princip jako neonové výbojky o třech barvách a to červené, zelené a modré. Zobrazovací plocha je složena spoustou malých bodů, kde v každý jsou obsaženy právě tři barevné složky. Přes elektrody lze různé barevné složky skládat v každém bodě a tak vytvoří obraz. Jeho hlavní výhody jsou možnost sledovat obraz z různých úhlů pohledu se stejnou kvalitou a nezávislost na magnetické pole, kdy se obraz i po přiblížení magnetu nezmění jak se děje u normální televize. Při využití plazmatu v laserech se plazma využívá jako aktivní látka v rezonátoru.

Zdravotnictví – velmi důležitou zásluhu má plazma i ve zdravotnictví, kde se využívá převážně k očištění použitých nástrojů pro zamezení infekcí, jinak řečeno sterilizace. Dříve se tyto nástroje vyvářely ve vodě, v dnešní době se dezinfikují za pomoci horké páry nebo právě plazmatu. Ionizovaný plyn o vysoké teplotě (několik set stupňů celsia) ničí veškeré živé mikroorganismy. Velký význam má plazma i v nanášení tenkých vrstev na kloubní implantáty, které pak díky tvrdosti nanesené vrstvy zvýší životnost kloubu, což je velmi důležité pro zmenšení rizika dalších operací, popřípadě výměny kloubu.

Plazmové přepínače – v dnešní době má plazma veliké uplatnění i v optických přepínačích. Plazmové přepínače mají velkou výhodu, že nemusí světlo detekovat a pak emitovat. Používá se jeden vstupní světlovod svítící na plazma a dva výstupní. Jeden je aktivní při odrazu od plazmatu s velkou hustotou elektronů a druhý je aktivní bez přítomnosti plazmatu, kdy paprsek projde a aktivuje druhý výstupní světlovod.

Generace elektrické a mechanické energie – plazma lze použít i ke generaci elektrické energie. Pokud plazma bude protékat prázdnou trubicí a na ní bude působit magnetické pole, potom se na jedné straně trubice začnou shromažďovat kladné ionty a k druhé elektrony, tím vznikne napětí. Dále lze napětí generovat pomocí termionukleární fúze. Tento proces je složitý na popsání, ale základ je zahřívání elektromagneticky uzavřeného plazmatu a následně spuštění termionukleární fúze. Pokud naopak v trubici přiložíme elektrické napětí a magnet, pak se plazma v elektromagnetickém poli začne pohybovat a může sloužit k tahu pro pohon. Takto vytvořená mechanická energie je vhodná pro malé výkony, za to však pro použití na trvalý provoz a tak se využívá převážně pro kosmické sondy.

Další aplikace plazmatu popsána podle informačního zdroje [1].

Automobilový průmysl – plazma se využívá i ve velkém v automobilovém průmyslu. Využívá se pro dosažení nízké spotřeby paliva, osvětlení, čištění výfukových plynů, nastřikování tenkých vrstev například v nádrži, kde pak dojde k lepší těsnosti, úpravu potahů na sedačky, úpravu plastů pomocí vysokofrekvenčního výboje k lepší přilnavosti barvy, plazmové displeje uvnitř auta aj. Plazma do budoucnosti bude využíváno v automobilovém průmyslu ještě více k zdokonalení spalovacího procesu nebo k lepšímu čištění emisí.

Další využívání plazmatu je v mnoha odvětvích jako je textilní průmysl, k výrobě nanostruktur, ke kontrole nad emisemi, k termojaderným reakcím a spoustě dalších velmi užitečných aplikací. V této práci je však významné termické plazma tak se další část zabývá využitím termického plazmatu.

Termické plazma

Využívání termického plazmatu v dnešní době je velice moderní a často využívané a to i především proto, že jeho využití je velice široké a vidíme to ve všech zdrojích informací [1], [3], [4]. Termické plazma používáme k nanášení tenkých vrstev (nástřiky), řezání, žíhání, likvidaci toxických a nebezpečných odpadů, vakuovým plazmovým technologiím a další. Jeho hlavní výhody jsou:

- velmi vysoké teploty,
- velmi vysoké gradienty teplot v malém prostoru,
- vysoká dynamika ohřevu,
- velmi vysoké rychlosti proudu plazmatu,
- vysoká entalpie plazmatu,
- vysoká kinetika ohřevu.

Plazma může mít v dnešní době různé složení, a to za pomoci různých plynů tak, aby bylo dosaženo různých vlastností plazmatu, které na danou aplikaci právě požadujeme. Potom můžeme dělit různé typy plazmatu na:

- **klasické** - mezi klasické aplikace termického plazmatu patří především plazmové tavení, řezání, nástřik, leptání, žíhání.
- **moderní** – pomocí moderních aplikací lze realizovat změny vlastností materiálů, vývoj nových materiálů, dokonale likvidovat nebezpečné odpady a recyklovat odpady.
- **špičkové** – mezi špičkové metody patří oblast nanotechnologií a vakuových plazmových technologií.

Dále se budeme zabývat plazmatem vznikajícím pomocí elektrického oblouku, který se využívá v plazmatronech pro vznik termického plazmatu, proto následující kapitola je zaměřena na elektrický oblouk.

3 ELEKTRICKÝ OBLOUK

Elektrický oblouk podle [1], [3], [5] je jeden z mnoha výbojů, který je vytvořen uměle nebo přírodně a to ve formě bouřkových blesků. Pro oblouk musí platit, že výboj je schopný po určitou dobu vzniknout v atmosférickém prostředí, který je nežádoucí nebo žádoucí. Nežádoucí obloukové jevy nastávají v mnoha stavech a to například u elektrických součástek jako jsou vypínače, stykače, jističe a jiné. Odstraňují se vhodným konstrukčním řešením například zhášecími komůrkami aj. Jako žádoucí elektrické oblouky jsou považovány ty, ve kterých využíváme jejich významných schopností a to převážně světelné a tepelné. Využívání světelných vlastností elektrického oblouku používáme u obloukových lamp a pro využití tepelných vlastností obloukové svařování, obloukové pece. Elektrické oblouky se mohou dělit různými způsoby a to například podle toho, zdali se jedná o stejnosměrný nebo střídavý proud, dále například podle tvaru elektrod nebo složení plazmatu, kde nám oblouk hoří. Jelikož má oblouk nesouměrný tvar hoření, dělíme jej taky na oblouk tvarově nesouměrný, který má tvar podle tepelné dráhy a souměrný, který je usměrněn a hoří ve tvaru, jaký mu určí jeho tvar nádoby jako například trubice a jiné.

3.1 Vlastnosti elektrického oblouku

Oblouk má spousty variant hoření při různých kritériích hoření jako je například nesouměrné a souměrné hoření a řadu jiných. Společné je naopak pro všechny typy oblouku podle [3]:

- Vysoká teplota katody emitující elektrony,
- Minimální hustota proudu větší než 10^5 A.m^{-2} ,
- Malý úbytek napětí na anodě a katodě,
- Malé napětí na elektrodách,
- Výbojový proud v dráze alespoň 1 A,
- Intenzivní světelné záření.

3.2 Části elektrického oblouku

Oblouk lze rozdělit na tři základní části, jak je uvedeno ve [3], [6]. Na katodovou skvrnu, anodovou skvrnu a samotný hořící oblouk.

Katodová skvrna

Je ohraničená oblast, která za pomoci termické emise generuje prvotní elektrony, které nám slouží k zapálení oblouku. Elektrony mají velkou kinetickou energii a tak jsou schopny srážkami ionizovat neutrální atomy na kladné ionty a sekundární elektrony a vrací se zpět na katodu, kde způsobuje její zahřátí a tak i termickou emisi, která je přibližně 2600°C .

Anodová skvrna

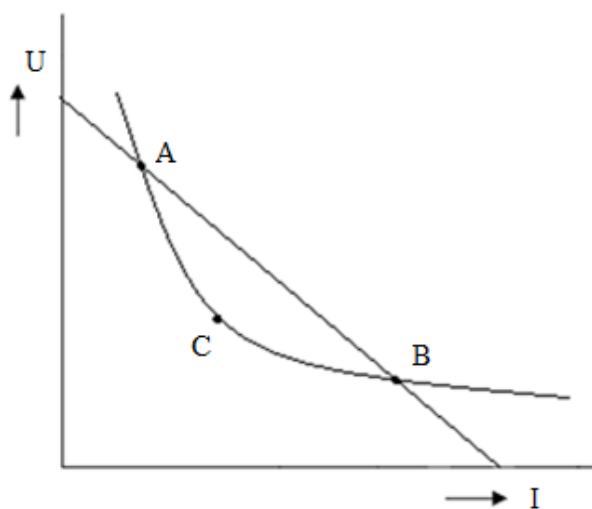
Anoda je naopak ohřívána elektrony a dosahuje vyšších teplot než katoda. Je to způsobené přeměnou kinetické energie na tepelnou a také elektromagnetickým zářením. Chlazení anodové elektrody je pouze předáváním tepla vedením a zářením. Zatímco katoda ještě navíc výstupní práci elektronu. Teplota anody se proto pohybuje okolo 3000°C .

Sloupec oblouku

Oblast mezi katodou a anodou, kde dochází k hoření oblouku a dochází zde k intenzivně zářící oblasti disociovaného a ionizovaného plynu v podobě plazmy. Teplota oblouku mezi elektrodami dosahuje okolo 4000 až 7000°C.

3.3 V-A Charakteristika elektrického oblouku

Voltampérová charakteristika elektrického oblouku vycházející z [3] má převážně hyperbolicky klesající průběh tzn., že s klesajícím napětím nám roste proud. Tvar hyperboly a její poloha je dána chemickým složením elektrody, geometrie elektrody a složením plazmatu.



Obr. 3 Voltampérová charakteristika oblouku.

Na Obr. 3 nám body *A*, *B*, *C* vyznačují druh hoření oblouku. Stabilní hoření máme pouze v případě *B*. U bodu *A* máme labilní hoření, kde nám lehce dojde k uhasnutí oblouku a mezi těmito body leží bod *C*, který se nachází na mezi stability. Všechny body určuje rozdílová přímka, kterou nám vymezují stabilizační odpory v obvodu. Pokud nechceme, aby oblouk stabilně hořel, máme tyto možnosti:

- zvětšit napětí oblouku natažením nebo ochlazením,
- zvětšit hodnotu odporu v obvodu,
- snížit napětí zdroje.

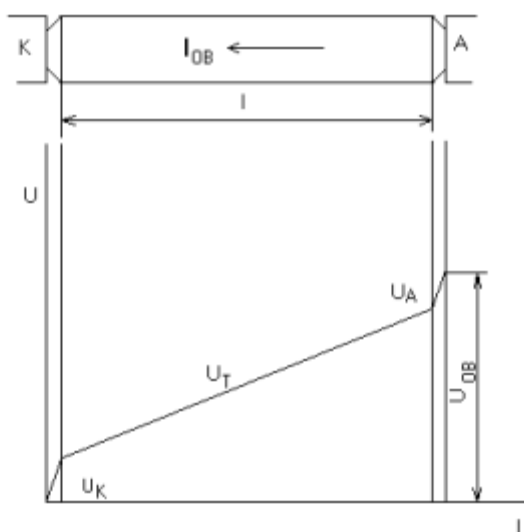
Pro stabilní hoření oblouku se používá v obvodu pasivních elektronických součástek a to převážně odporů a indukčností, které se zapojují do obvodu sériově a slouží k regulaci proudu v obvodu, lze použít i jinou regulaci proudu a to pomocí řízeného polovodičového usměrňovače. Sériově řazený odpor se používá v obvodech napájený stejnosměrným proudem a sériově řazená indukčnost se používá u střídavého napájení z důvodu menších ztrát, zvyšování doby hoření oblouku a odstranění problému uhasínání oblouku při průchodu napětí nulou. Oblouk lze stabilizovat i stěnou uvnitř kanálu, kde ke stabilizaci dochází chlazením o obal kanálu pomocí přestupu tepla, avšak tato stabilizace lze použít pro malé hodnoty výkonu, kde nedochází k poškození kanálu odpařováním.

3.4 Obloukové napětí

Obloukové napětí podle [5] je významná charakteristická veličina oblouku, která se vypočte následujícím vztahem

$$U_{ob} = U_k + U_A + U_T, \quad (4.1)$$

kde obloukové napětí je rovno součtu úbytku napětí na katodě a anodě a úbytku napětí podél oblouku, které se vypočítá součinem intenzity elektrického pole a délkou oblouku. Názorně zobrazeno na Obr. 4



Obr. 4 Obloukové napětí [5]

Obloukové napětí lze také vypočítat z rovnice Ayrtonové

$$U_{ob} = A + Bl + \frac{C + Dl}{I_{ob}}, \quad (4.2)$$

kde hodnoty A, B, C, D jsou konstanty uspořádání oblouku jako je druh plynu, tlak, poměr a rozměr elektrod a jsou dány tabulkami, l je délka oblouku a I_{ob} je proud oblouku. Pokud ovšem uvažujeme vysoké proudy v oblouku, můžeme zlomkový člen zanedbat a dostaneme tak zjednodušený tvar rovnice

$$U_{ob} = A + Bl. \quad (4.3)$$

Z této rovnice nám pak vyplývá, že můžeme rozeznávat dva druhy oblouku a to krátký a dlouhý. U krátkého oblouku můžeme zanedbat Bl , potom člen A představuje úbytky napětí na katodě a anodě. U dlouhého oblouku naopak zanedbáme člen A , zajímá nás především Bl , kde B bude znázorňovat intenzitu elektrického pole podél oblouku.

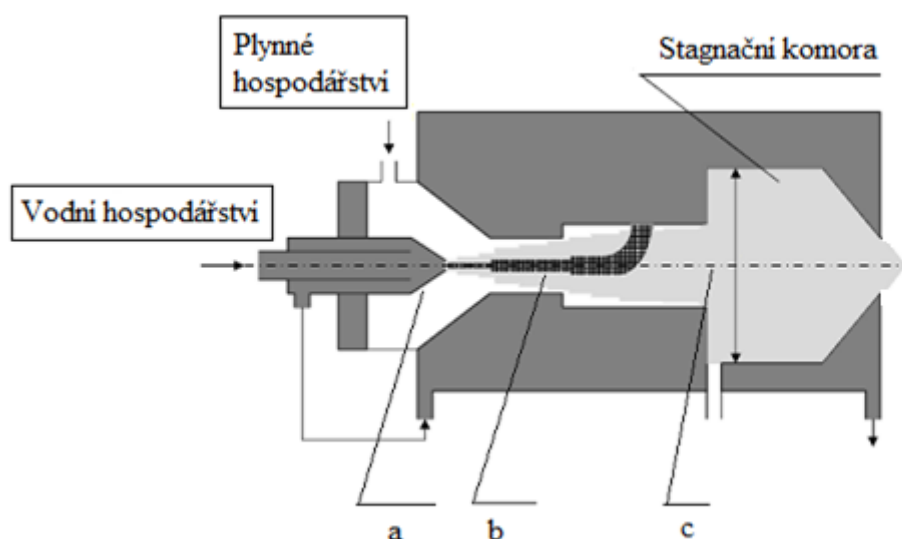
Následuje kapitola, která se zabývá plazmatrony, což jsou zařízení, které za pomoci elektrického oblouku vytváří plazma.

4 PLAZMATRONY

Plazmatronem se rozumí takové zařízení, které dokáže při atmosférickém tlaku generovat plazma podle [3]. Pracuje na ohřevu určitého média elektrickým obloukem, potom se jedná o plazmatrony, jinak řečeno také plazmometry, plazmové hořáky či generátory termického plazmatu. Aby se jednalo o termické plazma, musí se jednat o ionizovaný kvazineutrální plyn a musí být dosaženo poměrně vysokých teplot a to od několika tisíců stupňů až po desetitisíce stupňů celsia. Teploty pro daná kritéria plazmatu je dosaženo regulovatelným ohříváním, kterého musí být dosaženo i pro dlouhodobé provozy a to až v řádu stovek hodin. Pro ohřívání určitého média je použit elektrický oblouk, který je speciálně upraven, aby dokázal hořet v místě, kde je požadováno a hořel trvale. To je dosaženo nejčastěji válcovým kanálem nebo pomocí trysek s ofukováním. Plazma je vytvářeno v oblouku a poté proudí otvorem ve formě paprsku plazmatu neboli jetu.

4.1 Konstrukční řešení plazmatronu

Na Obr. 5 je vidět typický řez plazmatronem, kde jeho hlavní části se dají rozdělit do tří oblastí označené písmeny podle [3].



Obr. 5 Zjednodušený náčrtek plazmatronu s vyznačením hlavních částí [3]

V první oblasti pod písmenem „a“ se nachází katodová část. Ta slouží k emitaci elektronů v oblouku a je vytvořena většinou z wolframu nebo hafnia, které mají nejvhodnější tepelné vlastnosti pro katody.

V druhé oblasti pod písmenem „b“ se nachází kanál plazmatronu, který slouží k hoření oblouku a tak i ke generaci plazmatu. Jelikož zde dochází k obrovským teplotám, musí být chlazen pomocí chladicího média, které je znázorněno tmavě šedou barvou.

V poslední oblasti „c“ probíhá ukončení procesu výroby plazmatu. Nejdříve se zde ukončí hoření oblouku na pohyblivé anodě. Pohyblivá je proto, aby nedocházelo k poškození plazmatronu hořením v jednom místě, toho je dosaženo pomocí tangenciálního proudění pracovního plynu nebo za pomoci silného magnetického pole. Tento prostor

s ukončením hoření oblouku se nazývá anodová pata, poté už následuje rozšířený prostor, kde se plazma homogenizuje a výstupním otvorem vystupuje do požadované oblasti.

4.2 Dělení plazmatronů

Způsobů dělení plazmatronů je velice mnoho a to především dle různých vlastností jak je uvedeno v [3], kterých chceme, aby bylo dosaženo ve vytvořeném plazmatu. Pak tedy můžeme dělit plazmatrony následovně:

- Podle druhu napájení
 - stejnosměrný proud,
 - střídavý proud.
- Podle technologického působení
 - se závislým obloukem,
 - s nezávislým obloukem.
- Podle stabilizačního média
 - plynné,
 - kapalně.
- Podle stabilizace
 - s intenzivní chlazenou stěnou,
 - s intenzivním axiálním ofukováním oblouku,
 - s vírovou stabilizací oblouku,
 - s kapalinovou stěnou.

4.3 Technologické příslušenství plazmatronu

Plazmatron ke svému správnému fungování potřebuje další nezbytně nutné příslušenství jako je především [3]:

- vodní hospodářství k chlazení,
- plynné hospodářství jako zdroj pracovního média,
- elektrický napájecí obvod,
- stabilizační prvky,
- zapalovací obvod,
- magnetická rotace anodové paty.

Na Obr. 5 je názorné schéma technologického schématu plazmového hořáku, které se skládá ze základních potřebných částí jako je vodní hospodářství, plynné hospodářství a někdy i napájecí zdroj. Vodní hospodářství tvoří společně s plazmatronem uzavřený okruh a to má za následek velké úspory chladicího média. Plynné hospodářství nám slouží jako pracovní plyn v plazmatronu a je přiváděn z tlakové nádoby přes regulační ventily. Napájecí zdroj je tvořen tyristorovým usměrňovačem, který je pomocí rezistoru a indukčnosti ještě více stabilizován.

Po vysvětlení všech základů týkajících se plazmatu, elektrických oblouků a plazmatronů bude práce pokračovat hlavním tématem této práce a to základním modelováním elektrického oblouku.

5 ZÁKLADY MODELOVÁNÍ ELEKTRICKÉHO OBLOUKU

Modelování elektrického oblouku vychází z [3], [4]. Jedná se o velice náročný a zdoluhavý proces, je zde velice mnoho parametrů, které můžeme namodelovat a zkoumat. V této práci se zaměříme na dva z mnoha základních nepřímých modelů. První model bude zaměřen na nepřímé stanovení střední teploty a střední rychlosti plazmového paprsku na výstupu z plazmatronu. Druhý model bude zaměřen na zjednodušený model axiálně chlazeného oblouku. Při základním modelování v termickém plazmatu se vychází ze zjednodušujících předpokladů, bez kterých by jinak výpočet byl velice složitý, někdy až nereálný. Matematicky však vychází z rovnic momentové, energie, kontinua a k těmto dále základní vztahy termodynamiky a Ohmův zákon. Z těchto základních vztahů lze potom vypočíst parametry na výstupu z anodové části plazmatronu.

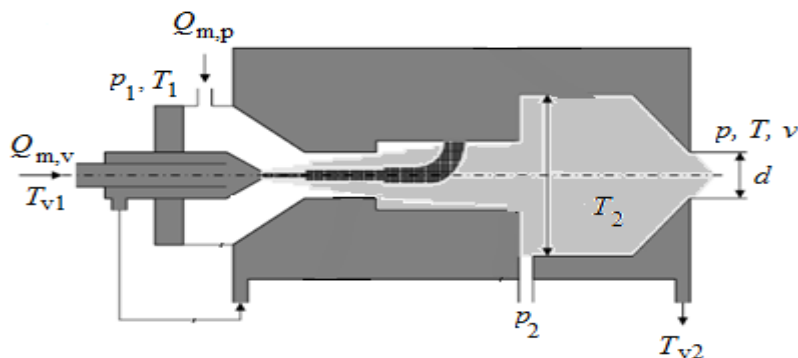
Některé parametry by bylo složité naměřit, a proto se používá nepřímé stanovení hodnoty pomocí naměření jiných parametrů a následného dopočítání požadované hodnoty. Jako první nepřímá metoda bude vypočtena nepřímá metoda pro stanovení střední teploty a rychlosti plazmového paprsku neboli jetu na výstupu z plazmatronu.

6 NEPŘÍMÁ METODA NA VÝSTUPU Z PLAZMATRONU

Nepřímá metoda je využívána v mnoha případech pro stanovení určité veličiny, která nelze jednoduše naměřit a tak se výsledná hodnota dopočítává z jiných naměřených veličin, jako například z energetické bilance generace plazmatu popřípadě u nízkoteplotního plazmatu lze z příkonu přes celkovou energetickou bilanci vypočítat střední teplotu plazmatu a rychlost plazmového paprsku na výstupu z plazmatronu na kterou se v této první metodě zaměříme [4]. Na Obr. 6 vidíme řez plazmatronem a vyznačení příslušných parametrů v různých částech, které se dělí na hlavní tři základní části a k nim patříčné veličiny:

- Okruh pracovního plynu
 - T_1 – teplota na vstupu do plazmatronu
 - p_1 – tlak na vstupu do plazmatronu
 - $Q_{m,p}$ – hmotnostní průtok pracovního plynu
- Okruh chladicí vody
 - T_{v1} – teplota chladicí vody na vstupu
 - T_{v2} – teplota chladicí vody na výstupu
 - $Q_{m,v}$ – hmotnostní průtok chladicí vody
- Elektrické parametry
 - U_{pl} – napětí na hořáku
 - I_{pl} – proud v plazmatronu.

Včetně těchto parametrů, kde důležité pro výpočet jsou vstupní parametry okruhu pracovního plynu a chladicí vody, musíme znát i základní termodynamické veličiny pro daný pracovní plyn jako jsou například rychlost zvuku, průřez trysky, hustota, měrná tepelná kapacita při konstantním tlaku nebo objemu, Poissonova konstanta a znát jejich teplotní závislosti.



Obr. 6 Zjednodušený náčrtek plazmatronu s popisem veličin [4]

6.1 Popis výpočetní metody

Výpočetní metoda je popsána podle [4]. Příkon plazmatronu při stejnosměrném napájení se vypočte podle

$$P_{pl} = U_{pl} I_{pl}. \quad (6.1)$$

Kalorimetrickou rovnicí můžeme vyjádřit ztráty plazmatronu, které jsou způsobeny katodovým úbytkem, zářením z oblouku, které pohltí plášť plazmatronu a přestupem plynu z plynu do stěn

$$Q = m c_{p,v} \Delta T, \quad (6.2)$$

kde $c_{p,v}$ je měrná tepelná kapacita vody za stálého tlaku a kde víme, že $\Delta T = T_{v2} - T_{v1}$. Ztráty lze vyjádřit z předchozích vztahů, při zanedbání kinetické složky energie potřebnou na urychlení plazmatu, potom dostaneme

$$\Delta P = Q_{m,v} c_{p,v} \Delta T. \quad (6.3)$$

Při zvýšení měrné entalpie pracovního plynu při hmotnostním průtoku plynu je rovno výkonu, který je vztažen na daný hmotnostní průtok

$$\Delta i = \frac{P}{Q_{m,p}} = \frac{P_{pl} - \Delta P}{Q_{m,p}}. \quad (6.4)$$

Měrná entalpie plazmatu ve stagnační komoře při zanedbání rychlostní složky odpovídá

$$i_2' = i_1 + \Delta i, \quad (6.5)$$

kde i_1 odpovídá měrné entalpii na vstupu. Po dosazení do vztahů (7.1), (7.3) a (7.4) dostaneme výslednou entalpii plazmatu na výstupu z plazmatronu bez uvažování rychlostní složky

$$i_2' = i_1 + \frac{U_{pl} I_{pl} - Q_{m,v} c_{p,v} \Delta T}{Q_{m,p}}. \quad (6.6)$$

Přes naměřenou hodnotu tlaku v klidové komoře pak lze určitě odpovídající teplotu v klidové komoře T_2 při znalosti teplotní závislosti měrné entalpie pracovního plynu.

Při uvažování kinetické energie ve ztrátách, která je důležitá pro urychlení plazmatu v konfuzoru musíme přičíst k celkovým ztrátám ještě kinetickou energii a pak dostaneme

$$\Delta P = Q_{m,v} c_{p,v} \Delta T + \frac{1}{2} Q_{m,p} v^2, \quad (6.7)$$

kde v je výtoková rychlost, která je cílem našich výpočtů a po vyjádření dostaneme vztah

$$v = \frac{Q_{m,p} v_v}{A_v} = \frac{4 Q_{m,p}}{\pi d^2 \rho}, \quad (6.8)$$

kde A_v je průřez trysky na výstupu, v_v je měrný objem pracovního plynu pro daný tlak (p) a teplotu (T), d je průměr výstupního otvoru a ρ je hustota stanovená pro daný tlak a teplotu. Při uvažování kinetické energie a tím i navýšení ztrát je nyní potřeba přepočítat novou entalpii i_2

$$i_2 = i_1 + \frac{U_{pl} I_{pl} - Q_{m,v} c_{p,v} \Delta T}{Q_{m,p}} - \frac{1}{2} v^2 = i_2' - \frac{1}{2} v^2, \quad (6.9)$$

která bude klesat. Této nové hodnotě entalpie bude odpovídat nová hodnota teploty T_2 . Jelikož proudění plazmatu výstupním konfuzorem je izoentropický děj, můžeme hodnotu T vyjádřit následujícím vztahem

$$T = \frac{T_2}{1 + \frac{(\kappa - 1)}{2} Ma^2}, \quad (6.10)$$

kde κ je Poissonova konstanta a Ma je Machovo číslo pracovního plynu. Poissonova konstanta se vypočte poměrem měrných tepelných kapacit při stálém tlaku a objemu

$$\kappa = \frac{c_p}{c_v}. \quad (6.11)$$

Machovo číslo je poměr rychlostí na výstupu plazmatronu a rychlosti zvuku

$$Ma = \frac{v}{v_z}. \quad (6.12)$$

6.2 Postup při výpočtu rychlosti paprsku z plazmatronu a teploty

Průměrnou teplotu a rychlost paprsku z plazmatronu určujeme iteračním způsobem, jak je uvedeno v [4]. Máme dvě iterační metody a to

- vnější iterace ke stanovení entalpie i_2 a poté teploty T_2 ,
- vnitřní iterace ke stanovení teploty T a rychlosti v .

Pro výpočet vnější iterace je potřeba znát výtokovou rychlost v , pro kterou musíme stanovit odhadem přibližnou teplotu T na výstupu z plazmatronu, poté vypočteme pro tuto odhadnutou teplotu výtokovou rychlost. Pro výpočet vnitřní iterace je zapotřebí určit předem hodnoty vlastností plynu jako je hustota, Poissonova konstanta, Machovo číslo, měrné tepelné kapacity a rychlosti pro určení teploty T_2 , která odpovídá entalpii i_2' .

Postup výpočtu v krocích

- vypočítat měrnou entalpii i_2' bez uvažování rychlostní složky – vzorec (7.6),
- stanovit teplotu T_2 z tabulek pro stanovenou entalpii – z Tab. 2,
- stanovit hustotu z tabulek pro stanovenou teplotu T_2 – z Tab. 2,
- vypočítat výtokovou rychlost v – vzorec (7.8),
- vypočítat měrnou entalpii i_2 s uvažováním rychlostní složky – vzorec (7.9),
- stanovit novou teplotu T_2 pro odpovídající vypočtenou entalpii – z Tab. 2,
- stanovit hustotu, Poissonovu konstantu a Machovo číslo z tabulek pro nově stanovenou teplotu T_2 – z Tab. 2,
- vypočítat teplotu T na výstupu z plazmatronu – vzorec (7.10),
- stanovit hustotu, Poissonovu konstantu a Machovo číslo z tabulek pro teplotu T – z Tab. 2
- vypočítat výtokovou rychlost pro novou hustotu – vzorec (7.8).

Iterace je třeba provádět tak dlouho, dokud se teplota na výstupu z plazmatronu neustálí podle přesnosti, které chceme dosáhnout. Následuje vzorový příklad, kde bude proveden výpočet dle zadání a bude zde ukázáno, jak provádět dané iterace.

6.3 Výpočet rychlosti paprsku a teploty z plazmatronu

V této části práce bude vypočítán konkrétní příklad, kde ze zadaných parametrů bude dopočítána střední teplota a rychlost na výstupu z plazmatronů (Obr. 6) pomocí předchozího postupu. V příkladu bude vidět, že pomocí pár kroků s iteracemi se dostaneme na velice přesnou hodnotu žádaných hodnot. Celý příklad vychází ze zadaných parametrů, které vidíme v Tab. 1, všechny tyto hodnoty byli naměřeny za atmosférického tlaku, který je 101 325 Pa. Jednotky ve vztazích budou uvedeny v základních jednotkách pro správnost výpočtu. Všechny vstupní údaje vychází z [4]. Průměr výstupního otvoru v plazmatronu je 8 mm. Pracovním plynem v plazmatronu je dusík. Potřebné vstupní údaje a vlastnosti pracovního plynu jsou uvedeny v Tab. 1. Ve výpočtu předpokládáme, že pracovní plyn je ideální, a tudíž Poissonova konstanta je konstantní, $\kappa = 1,401$. Hustotu a měrnou tepelnou kapacitu vody považujte konstantní, $\rho_{\text{H}_2\text{O}} = 1000 \text{ kg.m}^{-3}$, $c_{p,v} = 4186,8 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$.

Tab. 1 Zadané parametry pro výpočet [4]

Veličina	T_1 (K)	d (mm)	$c_{p,v}$ (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	ρ_v (kg.m ⁻³)	κ	i_1 (J.kg ⁻¹)
Hodnota	16	8	4186,8	1000	1,401	320,276
Veličina	T_{v1} (K)	T_{v2} (K)	Q_{mp} (g.s ⁻¹)	Q_{mv} (l.min ⁻¹)	I_{pl} (A)	U_{pl} (V)
Hodnota	12	20,5	1,51	2,4	36	300

Tab. 2 Vlastnosti dusíku při atmosférickém tlaku [4]

T (K)	ρ (kg.m ⁻³)	i (J.kg ⁻¹)	cs (m.s ⁻¹)
4000	0,085272	4,98E+06	1225,95
4100	0,083161	5,13E+06	1238,33
4200	0,08114	5,28E+06	1250,03
4300	0,079199	5,44E+06	1261,1
4400	0,077331	5,60E+06	1271,6
4500	0,075527	5,78E+06	1281,68
4600	0,073777	5,97E+06	1291,48
4700	0,072075	6,16E+06	1301,2
4800	0,070413	6,38E+06	1311,04
4900	0,068781	6,62E+06	1321,2
5000	0,067173	6,87E+06	1331,87
5100	0,06558	7,16E+06	1343,24
5200	0,063996	7,48E+06	1355,47
5300	0,062414	7,83E+06	1368,7
5400	0,060827	8,22E+06	1383,05
5500	0,059228	8,66E+06	1398,64
5600	0,057614	9,16E+06	1415,6
5700	0,055979	9,71E+06	1434,02
5800	0,054322	1,03E+07	1454,03
5900	0,052639	1,10E+07	1475,72
6000	0,050932	1,18E+07	1499,2

Nejprve je potřeba si určit měrnou entalpii bez uvažování rychlostní složky a k tomu bude potřeba vypočítat příkon a ztráty v plazmatronu. Příkon plazmatronu se vypočte ze vztahu (6. 1)

$$P_{pl} = 300V \cdot 36A = 10800 \text{ W}.$$

Dále pak ztráty v plazmatronu ze vztahu (6. 3)

$$\Delta P = \frac{2,4}{60} \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1} \cdot 1000 \text{ kg m}^{-3} \cdot 4186,8 \text{ J.kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \cdot (20,5 - 12) \text{ K} = 1423,512 \text{ W}.$$

Nyní už lze dopočítat měrnou entalpii, ze které si následně z tabulky určíme teplotu T_2 a hustotu ρ . Měrná entalpie se vypočte ze vztahu (6. 6)

$$i_2' = 320276 \text{ J.kg}^{-1} + \left(\frac{10800 - 1423,512}{1,51 \cdot 10^{-3}} \right) \text{ J.kg}^{-1} = 6,530 \cdot 10^6 \text{ J.kg}^{-1},$$

z Tab. 2 určíme teplotu a hustotu pro měrnou entalpii $6,530 \cdot 10^6 \text{ J.kg}^{-1}$

$$T_2 = 4863,775 \text{ K}$$

$$\rho = 0,069372 \text{ kg.m}^{-3}.$$

Pro odečtenou hodnotu hustoty z Tab. 2 nyní vypočteme výstupní rychlost z plazmatronu ze vztahu (6. 8)

$$v = \frac{4 \cdot 0,00151 \text{ kg.s}^{-1}}{3,1416 \cdot (0,008 \text{ m})^2 \cdot 0,069372 \text{ kg.m}^{-3}} = 433,034 \text{ m.s}^{-1}.$$

1. vnější iterace

Nyní zahájíme vnější iteraci, kde budeme uvažovat rychlostní složku a přepočítáme měrnou entalpii podle vztahu (6. 9)

$$i_2 = 6,530 \cdot 10^6 \text{ J.kg}^{-1} - \frac{1}{2} \cdot (433,034 \text{ m.s}^{-1})^2 = 6,436 \cdot 10^6 \text{ J.kg}^{-1},$$

z Tab. 2 určíme teplotu, hustotu a rychlost zvuku pro měrnou entalpii $6,436 \cdot 10^6 \text{ J.kg}^{-1}$

$$T_2 = 4823,877 \text{ K}$$

$$\rho = 0,0700 \text{ kg.m}^{-3}$$

$$v_z = 1313,466 \text{ m.s}^{-1}.$$

Následně se zahájí postup pro vnitřní iteraci, kde se vždy vypočte výstupní rychlost a teplota, poté se z Tab. 2 určí nová hustota a rychlost zvuku a opakuje se tak dlouho, dokud se hodnoty nemění.

1. vnitřní iterace

$$v = \frac{4 \cdot 0,00151 \text{ kg.s}^{-1}}{3,1416 \cdot (0,008 \text{ m})^2 \cdot 0,0700 \text{ kg.m}^{-3}} = 429,007 \text{ m.s}^{-1},$$

$$T = \frac{4823,877 \text{ K}}{1 + \frac{(1,401 - 1)}{2} \cdot \left(\frac{429,007}{1313,466} \text{ m.s}^{-1} \right)^2} = 4722,857 \text{ K},$$

z Tab. 2 určíme vlastnosti pro teplotu 4722,857 K

$$\rho = 0,07169 \text{ kg.m}^{-3}$$

$$v_z = 1303,449 \text{ m.s}^{-1}.$$

2. vnitřní iterace

$$v = \frac{4 \cdot 0,00151 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}}{3,1416 \cdot (0,008 \text{ m})^2 \cdot 0,07169 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}} = 419,003 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1},$$

$$T = \frac{4\,823,877 \text{ K}}{1 + \frac{(1,401 - 1)}{2} \cdot \left(\frac{419,003}{1303,449} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \right)^2} = 4725,962 \text{ K},$$

z Tab. 2 určíme vlastnosti pro teplotu 4725,962 K

$$\rho = 0,07164 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

$$v_z = 1303,755 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

3. vnitřní iterace

$$v = \frac{4 \cdot 0,00151 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}}{3,1416 \cdot (0,008 \text{ m})^2 \cdot 0,07164 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}} = 419,305 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1},$$

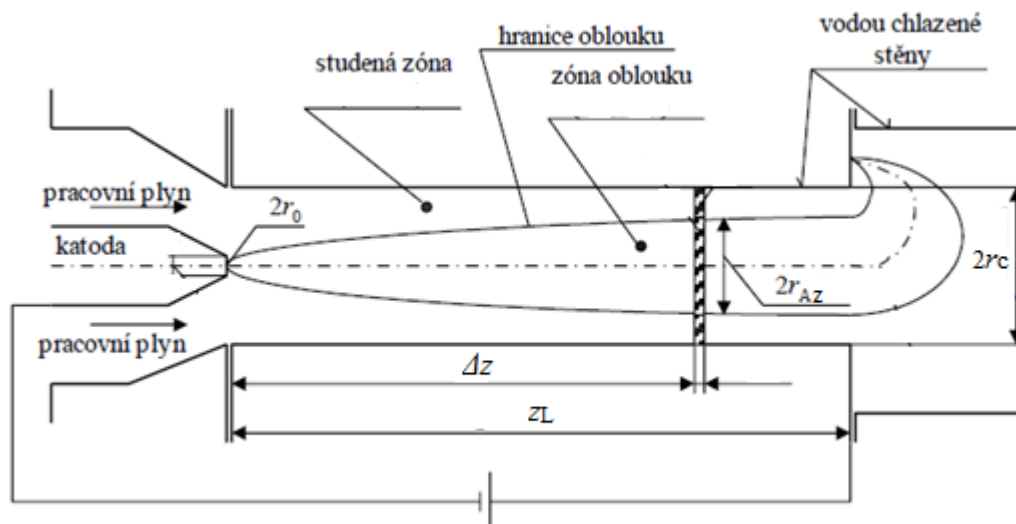
$$T = \frac{4\,823,877 \text{ K}}{1 + \frac{(1,401 - 1)}{2} \cdot \left(\frac{419,305}{1303,755} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \right)^2} = 4725,869 \text{ K}.$$

Tab. 3 Shrnutí výsledků výstupních parametrů z plazmatronu

	výstupní teplota (K)	výstupní rychlost ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
1. vnitřní iterace	4722,9	429,0
2. vnitřní iterace	4726,0	419,0
3. vnitřní iterace	4726,0	419,3

7 ZJEDNODUŠENÝ MODEL AXIÁLNĚ CHLAZENÉHO OBLOUKU

Zjednodušený model axiálně chlazeného oblouku vycházejícího z [3] je hořící válcový oblouk ve válcovém tvaru, který je po obvodu stěn chlazen vodou. Tento model využívá jednoduchost naměření integrálních veličin plazmatronu a to napětí, proud, radiální ztráty nebo průtok chladicí vody, potom ze základních vztahů termodynamiky lze vypočíst výstupní parametry plazmatronu. V našem případě se bude počítat teplota plazmatu podél celého kanálu a napětí za určitého proudu.



Obr. 7 Zjednodušený model axiálně chlazeného oblouku [3]

Na Obr. 7 vidíme uspořádání tohoto modelu, kde hořící oblouk, s postupně se zvětšujícím válcovým tvarem, má za následek změnu charakteru proudění a vytváří stabilitu délky oblouku. Z důvodu rozdílného výpočtu parametrů uvnitř oblouku a vně je objem rozdělen na dvě oblasti, a to zónu oblouku a studenou zónu. Uvnitř oblouku jsou procesy více skupinové a prováděny ve vodivém prostředí. Ve studené zóně se jedná o neutrální plyn. Hranice těchto zón je na povrchu elektrického oblouku a je určena podle toho, kdy začíná být plyn vodivý.

Metoda zjednodušeného modelu axiálně chlazeného oblouku se používá proto, že lze uvažovat spoustu zjednodušení podle [3], mezi které patří především:

- možnost uvažování válcové symetrie,
- neuvažování momentové rovnice, protože změny tlaku uvnitř kanálu jsou minimální a proudění je generováno vně kanálu,
- zanedbání třecích sil a kinetické energie v rovnici energie,
- členy s časovou derivací jsou nulové, neuvažujeme změny v průběhu hoření oblouku
- pro obě zóny platí, že v radiální ose z je konstantní teplota,
- Machovo číslo je konstantní podél celé osy z ,
- proudění, vedení a radiace představují radiální ztráty a ve výpočtu se neuvažují,
- integrace na jednotlivé elementy nikoliv na celou šířku kanálu.

V následující podkapitole bude popsán výpočet modelu s axiálně chlazeným obloukem, který byl použit v této práci.

7.1 Postup při výpočtu axiálně chlazeného oblouku

Tato část bude zaměřená na konkrétní postup výpočtu, který byl použit v této práci, a podle které byla druhá metoda počítána, vychází z [3]. Hlavním cílem je určit osově závislosti podél celého oblouku jako jsou $T_A(z)$, $U(z)$, $r_A(z)$, $Ma(z)$ a $E(z)$. Výpočet se provádí iterační metodou podél celého oblouku.

Při postupu je potřeba dávat pozor na indexy veličin, v této nepřímé metodě se setkáváme s:

- index 0 – hodnoty ve studené zóně při teplotě T_0 (např. $\rho_0, r_0, c_0, Ma_0, i_0$),
- index z – hodnoty závislé na vzdálenosti v ose z (např. r_{Az}, E_z, Ma_z, U_z),
- s indexem T-z – hodnoty závislé na teplotě i ose z (např. $\rho_{T-z}, c_{T-z}, i_{T-z}, \sigma_{T-z}$).

Hlavní parametry anodového kanálu jsou poloměr kanálu r_c a délka kanálu Z_L . Tyto parametry jsou dány konstrukcí plazmatronu. Poloměr katodové skvrny r_0 se vypočítá z následujícího vztahu

$$r_0 = \sqrt{\frac{I}{\pi \cdot j_s}}, \quad (7.1)$$

kde I je proud plazmatronu a j_s je proudová hustota plazmatronu. Poloměr oblouku r_A vypočítáme ze vztahu

$$r_{Az} = r_0 \left[1 + \left(\frac{z}{r_0} \right)^{\frac{1}{n_r}} \right], \quad (7.2)$$

kde parametr n_r lze volit v rozmezí 3 -3,5 podle [3]. Hodnota z je vzdálenost, ve které se bude provádět výpočet od katody s krokem po 4 mm. První výpočet bude proveden na 4 mm a nebude se počítat v 0 mm ihned u katody a poslední výpočet na hodnotě 108 mm, i když má kanál pouze 107 mm. Dále je potřeba znát hodnotu Machova čísla ve studené zóně (na okraji oblouku), která se vypočte

$$Ma_0 = \frac{Q_m}{\rho_0 \cdot c_0 \cdot \pi \cdot r_c^2}, \quad (7.3)$$

kde Q_m je hmotnostní průtok pracovního plynu, v našem případě argonu. ρ_0 a c_0 jsou vstupní hodnoty hustoty a rychlosti zvuku. V dalším postupu se vždy zvolí teplota a provede se výpočet $Ma(z)$, $E(z)$ a $U(z)$, který se pak podle rovnice (7. 7) porovná a zjistí se, kam se teplota a ostatní veličiny blíží. Postupně se výpočet zpřesňuje podle teploty z tisíců, stovek, až na desítky stupňů kelvinů. Další zpřesňování je s velmi malou chybou neefektivní, a to i s ohledem na přesnost stanovení vstupních parametrů. Hodnotu Machova čísla vypočteme ze vztahu

$$Ma_z = \frac{Q_m}{\pi \cdot [\rho_{T-z} \cdot c_{T-z} \cdot r_{Az}^2 + \rho_0 \cdot c_0 \cdot (r_c^2 - r_{Az}^2)]}. \quad (7.4)$$

Intenzitu elektrického pole vypočteme podle

$$E_z = \frac{I}{\pi \cdot r_{Az}^2 \cdot \sigma_{T-z}}, \quad (7.5)$$

kde σ_{T-z} je konduktivita. Posledním výpočtem vždy pro jednu teplotu je hodnota napětí, která se určí ze vztahu

$$U_z = \sum_{j=1}^k E_z \cdot \Delta z, \quad (7.6)$$

kde napětí je rovno sumě intenzity elektrického pole krát kroku po kterém se provádí výpočet v našem případě 4 mm. V praxi to znamená, že hodnota napětí v kroku 4mm se připočte k hodnotě v kroku 8 mm a vznikne tak rostoucí napětí podél oblouku. Pokud tyto hodnoty máme vypočtené pro různé hodnoty, můžeme je porovnat podle rovnice (7. 7). V této rovnici zkoumáme odchylku Δ , která musí být co nejmenší na přesnosti, kterou si předem určíme. Rovnice má dvě části, které porovnáváme, celá rovnice se vypočte podle vztahu

$$\pi \cdot Ma_z \left[r_{Az}^2 \cdot \rho_{T-z} \cdot c_{T-z} \cdot i_{T-z} + \pi (r_c^2 - r_{Az}^2) \cdot \rho_0 \cdot c_0 \cdot i_0 \right] = (1 - p_z) \cdot I \cdot U_z, \quad (7.7)$$

kde i_1 je entalpie a p_z jsou měrné ztráty. Pokud je teplota nízká může být entalpie rovno nule, lze pak tuto rovnici zjednodušit na vztah

$$\pi \cdot Ma_z \cdot r_{Az}^2 \cdot \rho_{T-z} \cdot c_{T-z} \cdot i_{T-z} = (1 - p_z) \cdot I \cdot U_z. \quad (7.8)$$

Poslední úprava této rovnice bude vyjádření hledané odchylky, potom výsledná rovnice bude vypadat takto

$$\pi \cdot Ma_z \cdot r_{Az}^2 \cdot \rho_{T-z} \cdot c_{T-z} \cdot i_{T-z} - (1 - p_z) \cdot I \cdot U_z = \Delta. \quad (7.9)$$

V další kapitole bude proveden výpočet na konkrétním plazmatronu podle Obr. 7 podle postupu, který je popsán v této kapitole.

7.2 Výpočet axiálně chlazeného oblouku

V této části práce bude proveden konkrétní výpočet podélného rozložení veličin podél oblouku, podle obrázku Obr. 7. Ze vstupních parametrů bude zjištěna teplota, intenzita elektrického pole, napětí, poloměr oblouku a Machovo číslo. Výpočet těchto parametrů se provádí podél celého oblouku s krokem po 4 milimetrech pomocí předchozího postupu. V příkladu bude uveden jeden postup výpočtu pro hodnotu 4 milimetry a první variantu, tzn. hodnota proudu bude 82 A, tento výpočet se opakuje ještě mnohokrát. Všechny jednotky ve výpočtech budou uvedeny v základních jednotkách pro správnost výpočtu. Pro stanovení podélných parametrů se používá iterační metoda. Podle zdroje [3] jsme vycházeli ze vstupních naměřených parametrů. Krok $\Delta z = 4$ mm, počáteční teplota (teplota u katody) $T_A(0) = 8000$ K a teplotu ve studené zóně $T_0 = 300$ K. Hmotnostní průtok pracovního plynu (argonu) plazmatronem je $2,2 \cdot 10^{-2} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$. Poloměr anodového kanálu $r_c = 8 \cdot 10^{-3} \text{ m}$, délka anodového kanálu je $z_L = 107$ mm. Další vstupní veličiny jsou v Tab. 4 Naměřené hodnoty na plazmatronu, kde tyto hodnoty byli naměřeny na plazmatronu s konstrukčním uspořádáním jako na Obr. 7. Následující veličiny se volí nebo předpokládají. Exponent $n_r = 3$. Proudová hustota v katodové skvrně se předpokládá $j_s = 10^8 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$. Materiálové vlastnosti argonu potřebné k výpočtu jsou uvedeny v Tab. 5.

Tabulky vstupních veličin a vlastností argonu:*Tab. 4 Naměřené hodnoty na plazmatronu [3]*

	I (A)	U (V)	p_z (-)	P_{zak} (W)	P_{zk} (W)	P_z (W)
1. varianta	82	103	0,11	1418	526	892
2. varianta	102	90,1	0,145	1927	592	1335

Tab. 5 Materiálové vlastnosti argonu [3]

T (K)	σ (S.m ⁻¹)	ρ (kg.m ⁻³)	i (MJ.kg ⁻¹)	c_s (m.s ⁻¹)
300	0	1,622	0	323
8000	973	6,07E-02	4,1	1592
9000	1899	5,37E-02	4,8	1605
10000	2895	4,77E-02	6	1630
11000	3892	4,19E-02	8	1697
12000	4881	3,61E-02	11,7	1811
13000	5839	3,02E-02	17,6	1976
14000	6731	2,47E-02	26	2191
15000	7522	2,04E-02	35,6	2430

Výpočet:

Výpočet bude proveden podle předchozího postupu pro 1. variantu a krok $\Delta z = 4$ mm. Nejprve je potřeba si vypočítat poloměr katodové skvrny podle vztahu (7. 1)

$$r_0 = \sqrt{\frac{82 \text{ A}}{10^8 \text{ Am}^{-2} \cdot \pi}} = 5,109 \cdot 10^{-4} \text{ m} ,$$

tento výpočet bude pro celou první variantu stejný a nebude se měnit stejně jako počáteční hodnota Machova čísla, která se vypočte podle vztahu (7. 3)

$$Ma_0 = \frac{2,2 \cdot 10^{-2} \text{ kg.s}^{-1}}{1,622 \text{ kg.m}^{-3} \cdot 323 \text{ m.s}^{-1} \cdot \pi \cdot (8 \cdot 10^{-3})^2 \text{ m}} = 0,20885 .$$

Nyní se začínají počítat hodnoty, které se pro každé posunutí v ose z změní. Nejprve podle vztahu (7. 2) vypočteme poloměr oblouku

$$r_{Az} = 5,109 \cdot 10^{-4} \text{ m} \left[\left(\frac{4 \cdot 10^{-3} \text{ m}}{5,109 \cdot 10^{-4} \text{ m}} \right)^{\frac{1}{3}} \right] = 1,525 \cdot 10^{-3} \text{ m} ,$$

tato hodnota se změní pouze s každým posunutím v ose. Nyní začíná iterační metoda, kde pro každou hodnotu teploty zjistíme Machovo číslo (7. 4), intenzitu elektrického pole (7. 6) a napětí (7. 6). Iterací zpřesňujeme výpočet nejdříve pro tisíce pak stovky a nakonec desítky stupňů kelvinů. Ukázka výpočtu pro $T_A = 8000$ K

$$Ma_{8000} = \frac{2,2 \cdot 10^{-2} \text{ kg.s}^{-1}}{\pi \cdot [6,07 \cdot 10^{-2} \text{ kg.m}^{-3} \cdot 1592 \text{ m.s}^{-1} \cdot (1,525 \cdot 10^{-3})^2 \text{ m}^2 + 1,622 \text{ kg.m}^{-3} \cdot 323 \text{ m.s}^{-1} \cdot ((8 \cdot 10^{-3})^2 - (1,525 \cdot 10^{-3})^2) \text{ m}^2]}$$

$$= 0,21523,$$

$$E_{8000} = \frac{82 \text{ A}}{\pi \cdot (1,525 \cdot 10^{-3})^2 \text{ m}^2 \cdot 973 \text{ S.m}^{-1}} = 11529,24 \text{ V.m}^{-1},$$

$$U_{8000} = 11529,24 \text{ V.m}^{-1} \cdot 4 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 46,117 \text{ V}.$$

Tyto výpočty provedeme ještě pro další teploty. V našem případě do $T_A = 15\,000 \text{ K}$ a výsledky můžeme vidět v Tab. 6.

Tab. 6 Shrnutí prvního kroku iterace pro tisíce stupňů kelvinů

$T_A \text{ (K)}$	Ma	$E \text{ (V.m}^{-1}\text{)}$	$U \text{ (V)}$
8000	0,21523	11529,2	46,12
9000	0,21539	5907,3	23,63
10000	0,21553	3874,9	15,5
11000	0,21563	2882,3	11,53
12000	0,21572	2298,3	9,19
13000	0,2158	1921,2	7,69
14000	0,21589	1666,6	6,67
15000	0,21596	1491,4	5,97

Pro tyto hodnoty je potřeba provést porovnávací výpočet. V našem případě můžeme použít rovnici (7. 8). V Tab. 7 bude posuzována levá a pravá část rovnice pro lepší viditelnost výsledků. Pro zjištění odchylky, kde porovnáváme levou a pravou stranu rovnice použijeme upravený vztah (7. 9)

$$\pi \cdot 0,21523 \cdot (1,525 \cdot 10^{-3})^2 \text{ m}^2 \cdot 6,07 \cdot 10^{-2} \text{ kg.m}^{-3} \cdot 1592 \text{ m.s}^{-1} \cdot 4,1 \cdot 10^6 \text{ J.kg}^{-1} - (1 - 0,11) \cdot 82 \text{ A} \cdot 46,12 \text{ V}$$

$$= -2741,9 \text{ W}.$$

Další výsledky porovnávání budou v tabulce Tab. 7, kde uvidíme, jak se mění levá a pravá část rovnice a výsledná odchylka porovnávající tyto rovnice.

Tab. 7 Shrnutí odchylky iterace pro tisíce stupňů kelvinů

$T_A \text{ (K)}$	levá (W)	pravá (W)	$\Delta \text{ (W)}$
8000	623,8	3365,6	-2741,8
9000	651,5	1724,5	-1073,0
10000	734,2	1131,2	-397,0
11000	897,0	841,4	55,6
12000	1206,5	670,9	535,6
13000	1657,3	560,8	1096,5
14000	2223,2	486,5	1736,7
15000	2780,4	435,4	2345,0

V Tab. 7 je vidět, že odchylka je nejnižší mezi teplotou 10 000 K a 11 000 K, proto další výpočet zpřesňování s krokem sto stupňů kelvinů bude mezi těmito hodnotami. Výpočet je stejný jako u kroku s tisícem. Výsledky pak budou shrnuty v tabulkách. Po zjištění odchylky pro krok iterace po stovkách stupňů kelvinů bude vybrána stejným způsobem poslední část. Poslední iterace bude na desítky stupňů kelvinů. Další výpočet na jednotky kelvinů by byl s chybou pod 1%.

Tab. 8 Shrnutí druhého kroku iterace pro stovky stupňů kelvinů

T_A (K)	E (V.m ⁻¹)	Ma	U (V)
10100	3745,9	0,21554	14,98
10200	3625,2	0,21555	14,50
10300	3512,1	0,21556	14,05
10400	3405,8	0,21557	13,62
10500	3305,7	0,21558	13,22
10600	3211,4	0,21559	12,85
10700	3122,3	0,21560	12,49
10800	3038,0	0,21561	12,15
10900	2958,1	0,21562	11,83
11000	2882,3	0,21563	11,53

Tab. 9 Shrnutí odchylky iterace pro stovky stupňů kelvinů

T_A (K)	levá (W)	pravá (W)	Δ (W)
10100	752,6	1093,5	-340,9
10200	770,6	1058,3	-287,6
10300	788,2	1025,2	-237,1
10400	805,2	994,2	-189,0
10500	821,8	965,0	-143,2
10600	837,8	937,5	-99,6
10700	853,4	911,4	-58,0
10800	868,5	886,8	-18,4
10900	883,0	863,5	19,5
11000	897,0	841,4	55,6

Tab. 10 Shrnutí posledního kroku iterace pro desítky stupňů kelvinů

T_A (K)	E (V.m ⁻¹)	Ma	U (V)
10810	3029,8	0,21561	12,12
10820	3021,6	0,21561	12,09
10830	3013,5	0,21561	12,05
10840	3005,5	0,21561	12,02
10850	2997,5	0,21561	11,99
10860	2989,5	0,21561	11,96
10870	2981,6	0,21561	11,93
10880	2973,7	0,21561	11,89
10890	2965,9	0,21562	11,86
10900	2958,1	0,21562	11,83

Tab. 11 Shrnutí finální odchylky iterace pro desítky stupňů kelvinů

T_A (K)	levá (W)	pravá (W)	Δ (W)
10810	869,9	884,5	-14,5
10820	871,4	882,1	-10,7
10830	872,9	879,7	-6,8
10840	874,3	877,4	-3,0
10850	875,8	875,0	0,8
10860	877,2	872,7	4,5
10870	878,7	870,4	8,3
10880	880,1	868,1	12,0
10890	881,6	865,8	15,8
10900	883,0	863,5	19,5

V Tab. 9 je vidět, že odchylka je nejmenší mezi teplotou 10 800 K a 10 900 K, proto další výpočet zpřesňování bude mezi těmito hodnotami po desítkách stupňů kelvinů. V Tab. 11 vidíme, že odchylka je nejmenší při teplotě 10 850 K a tuto hodnotu můžeme brát pro $\Delta z = 4$ mm jako výslednou. Potom lze v Tab. 10 zvýraznit hledané hodnoty. Tyto hodnoty je nyní potřeba provést po celé délce oblouku s krokem 4 mm. Výsledné hodnoty jsou shrnuty v Tab. 12 a Tab. 13 pro 1. variantu a v Tab. 14 pro 2. variantu.

Tab. 12 Výsledné hodnoty pro 1. variantu výpočtu

z (mm)	T_A (K)	E (V.m ⁻¹)	Ma	U (V)	r_A (mm)
4	10850	2997,5	0,21561	11,99	1,525
8	11390	1906,4	0,21833	19,62	1,789
12	11590	1496,6	0,22054	25,60	1,974
16	11700	1265,3	0,22249	30,66	2,121
20	11750	1117,0	0,22426	35,13	2,246
24	11780	1009,8	0,22593	39,17	2,354
28	11790	929,3	0,22750	42,89	2,452
32	11790	865,8	0,22899	46,35	2,540
36	11790	813,0	0,23044	49,60	2,621
40	11780	769,8	0,23183	52,68	2,697
44	11760	734,1	0,23319	55,62	2,767
48	11750	701,6	0,23451	58,42	2,833
52	11730	674,4	0,23580	61,12	2,896
56	11710	650,2	0,23707	63,72	2,956
60	11700	627,3	0,23831	66,23	3,013
64	11680	607,8	0,23953	68,66	3,067
68	11660	590,2	0,24074	71,02	3,119
72	11640	574,2	0,24193	73,32	3,170
76	11620	559,5	0,24310	75,56	3,218
80	11600	546,0	0,24426	77,74	3,265
84	11580	533,6	0,24541	79,88	3,310
88	11560	522,1	0,24654	81,97	3,353
92	11550	510,2	0,24768	84,01	3,396
96	11530	500,3	0,24879	86,01	3,437

Tab. 13 Výsledné hodnoty pro 1. variantu výpočtu (pokračování)

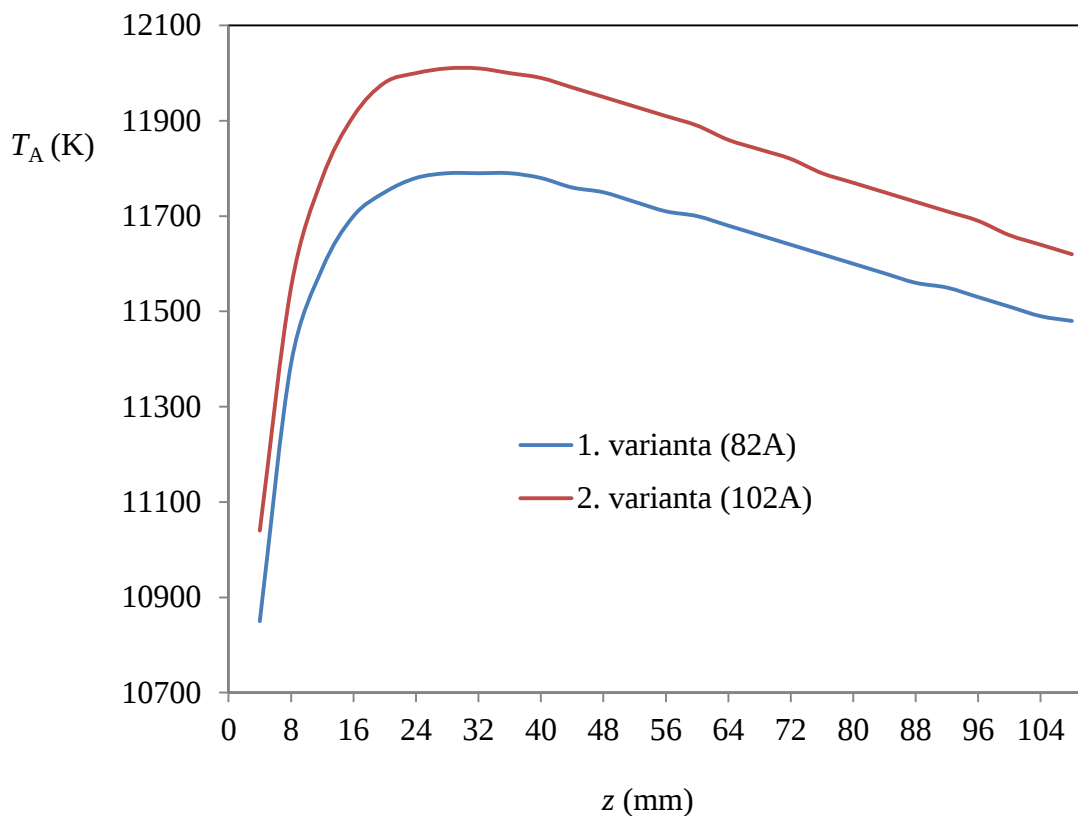
z (mm)	T_A (K)	E (V.m ⁻¹)	Ma	U (V)	r_A (mm)
100	11510	491,0	0,24990	87,97	3,477
104	11490	482,3	0,25100	89,90	3,516
108	11480	473,1	0,25211	91,79	3,554

Tab. 14 Výsledné hodnoty pro 2. variantu výpočtu

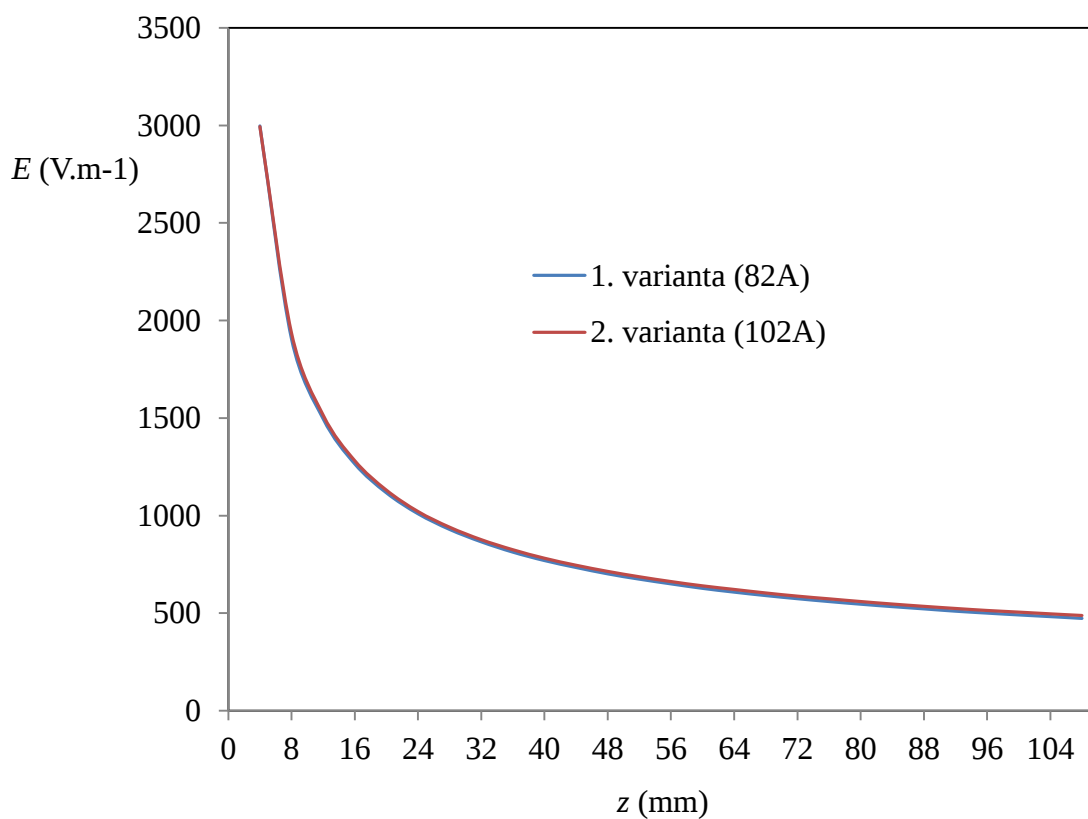
z (mm)	T_A (K)	E (V.m ⁻¹)	Ma	U (V)	r_A (mm)
4	11040	2993,9	0,21694	11,98	1,661
8	11550	1935,9	0,22017	19,72	1,944
12	11780	1515,5	0,22281	25,78	2,143
16	11950	1281,5	0,22514	30,91	2,302
20	11980	1130,6	0,22728	35,43	2,435
24	12000	1021,1	0,22928	39,51	2,552
28	12010	940,5	0,23117	43,28	2,657
32	12010	876,7	0,23298	46,78	2,752
36	12000	825,2	0,23473	50,08	2,839
40	11990	781,5	0,23642	53,21	2,920
44	11970	745,5	0,23807	56,19	2,996
48	11950	714,1	0,23967	59,05	3,068
52	11930	686,5	0,24125	61,79	3,135
56	11910	661,9	0,24279	64,44	3,199
60	11890	640,0	0,24432	67,00	3,261
64	11860	621,5	0,24581	69,49	3,319
68	11840	603,5	0,24729	71,90	3,375
72	11820	587,1	0,24875	74,25	3,429
76	11790	573,3	0,25019	76,54	3,481
80	11770	559,5	0,25163	78,78	3,531
84	11750	546,7	0,25305	80,97	3,580
88	11730	534,9	0,25446	83,11	3,627
92	11710	524,0	0,25586	85,20	3,673
96	11690	513,8	0,25725	87,26	3,717
100	11660	505,3	0,25862	89,28	3,760
104	11640	496,4	0,26000	91,27	3,802
108	11620	488,0	0,26136	93,22	3,843

Pro obě varianty je počítána i hodnota 108 mm ačkoliv kanál plazmatronu má pouze 107 mm. Jelikož byl zvolen krok 4 mm po celou šířku kanálu, nebylo by vhodné ani matematicky přesné na konci tento krok měnit. Výsledná hodnota by se ovšem o moc nelišila od hodnot pro 108 mm. Pro přehlednost výsledků se výsledné hodnoty vynesou do grafu v závislosti na šířce kanálu. Vyneseny budou obě varianty v jednom grafu, aby bylo vidět, jak se mění vlastnosti se změnou proudu a ostatních veličin v Tab. 4.

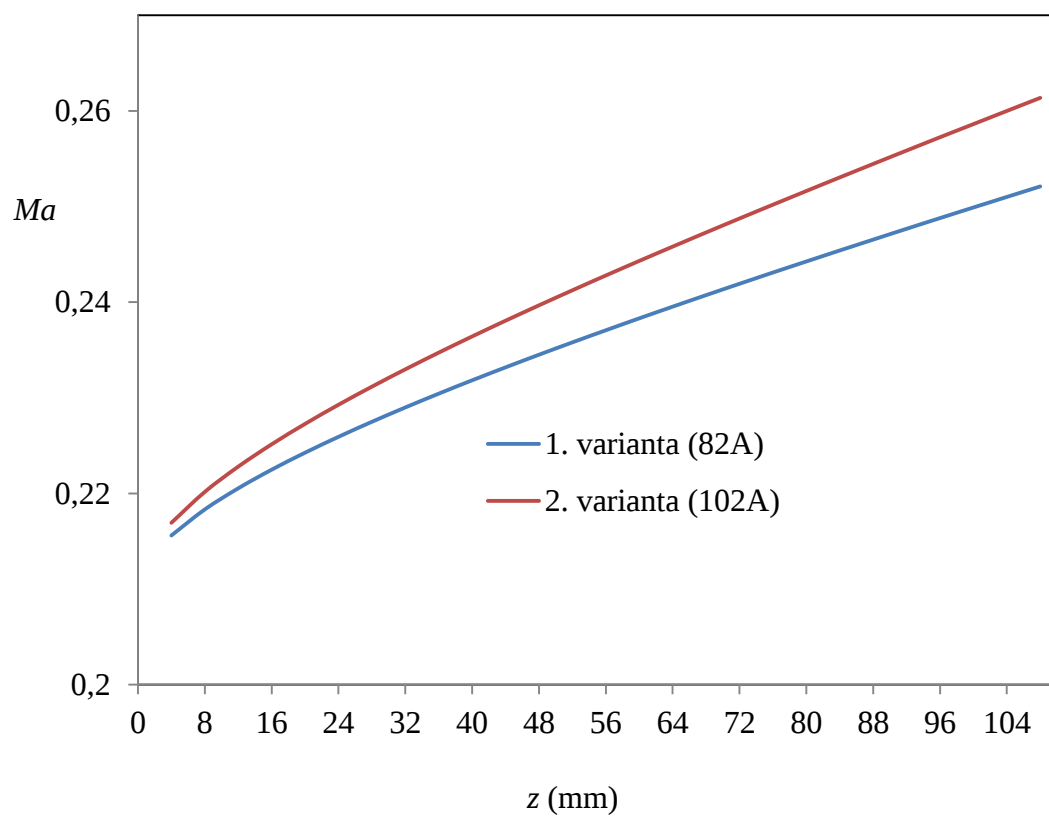
7.3 Grafické zobrazení výsledků



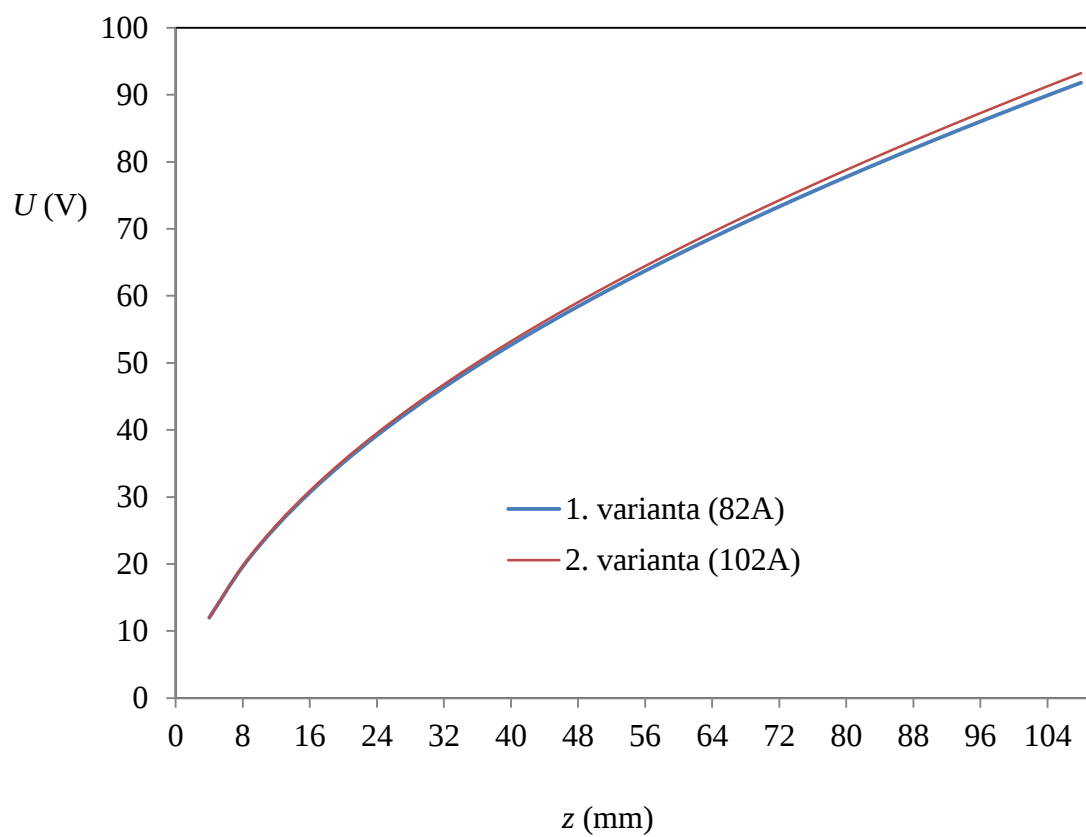
Obr. 8 Závislost teploty na šířce kanálu



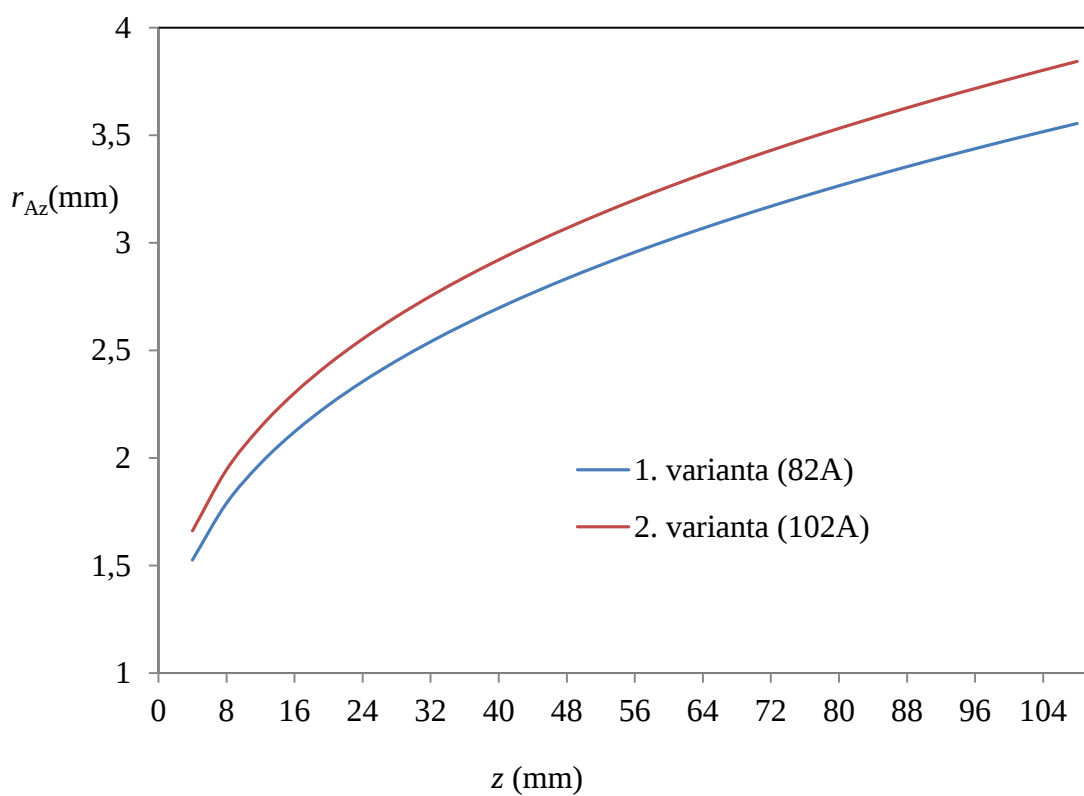
Obr. 9 Závislost intenzity elektrického pole na šířce kanálu



Obr. 10 Závislost Machova čísla na šířce kanálu



Obr. 11 Závislost napětí na šířce kanálu



Obr. 12 Velikost poloměru oblouku podél celé šířky kanálu

8 ZÁVĚR

Cílem této práce bylo seznámit se se základními pojmy v oblasti modelování elektrického oblouku, jako je plazma, elektrický oblouk nebo plazmatron. Další důležitý cíl bylo nahlédnutí do základů nepřímého modelování a výpočet dvou nepřímých metod. První metoda pro výpočet střední hodnoty teploty a střední rychlosti plazmaju na výstupu z plazmatronu. Druhá metoda byla zaměřená na zjednodušený model s axiálně chlazeným obloukem. Metody vychází z experimentálního měření na plazmatronu a jsou důležité pro výpočet na konkrétním plazmatronu.

V první části práce bylo vysvětleno plazma a jeho široké uplatnění v praxi, dále pak různé typy plazmatů a jeho aplikace v dnešní době, kde vidíme velice široké uplatnění v různých oblastech. Dále pak vysvětlení elektrického oblouku, který je důležitý v plazmatronech a využívá se pro výrobu termického plazmatu.

V druhé části byla popsána první nepřímá metoda pro vypočtení střední hodnoty teploty a rychlosti plazmaju na výstupu z plazmatronu. Vycházelo se ze vstupních naměřených parametrů, jako jsou parametry pracovního plynu, parametry chladicí vody a provozní parametry. Jedná se o tlaky, teploty, průtoky, napětí, proudy, průřezy. Mimo tyto parametry je potřeba k výpočtu znát i termodynamické veličiny použitého plynu, jako je Poissonova konstanta, rychlost zvuku, hustota, měrná tepelná kapacita za stálého tlaku a objemu.

V této použité nepřímé metodě se z příkonu plazmatronu a jeho celkové energetické bilance vypočetla teplota a rychlost na výstupu z plazmatronu. Při výpočtu konkrétního příkladu se dospělo ke konečnému výsledku střední výstupní teploty, která vyšla na $T = 4726 \text{ K}$ s rychlostí na výstupu $v = 419,3 \text{ m.s}^{-1}$. K výsledku se došlo pomocí vnější iterace ke stanovení entalpie i_2 a poté teploty T_2 a vnitřní iterace ke stanovení teploty T a rychlosti v . Opakovaným postupem se počítá nová teplota a rychlost, dokud se hodnota nemění na přesnost, které chceme dosáhnout. Výsledné hodnoty jsou zaokrouhlovány na rozdíl od hodnot ve výpočtech, kde se počítalo na více desetinných míst k viditelnosti přesnosti iterace. Výsledné hodnoty však nelze uvažovat s takovouto přesností, jedná o setiny procent celkového výsledku.

Druhá nepřímá metoda byla zaměřena na oblouk s axiálním chlazením. Ze vstupních parametrů bylo za úkol pomocí zjednodušujících parametrů vypočítat vlastnosti oblouku podél celého kanálu. Počítáno bylo napětí, intenzita elektrického pole, Machovo číslo, poloměr oblouku a teplota. Exponent n_r pro určení poloměru byl zvolen 3. Pomocí iterace se vždy zpřesňovala teplota až na desítky stupňů kelvinů. Další zpřesňování by bylo pod 1% vzhledem k vysokým teplotám. První krok výpočtu se neprováděl přímo na katodě, ale až ve vzdálenosti 4 mm od katody a následně s krokem po 4mm po celé šířce kanálu. Poslední pak na hodnotě 108 mm, i když má kanál pouze 107 mm, z důvodu dodržení kroku.

Po vypočtení všech hodnot, pro dvě varianty s různými proudy, se výsledné hodnoty vynesly do grafu. Průběh teploty podél kanálu, na začátku strmě narůstá a přibližně okolo 16 mm začne mírně klesat. Průběh intenzity elektrického pole podél kanálu je pro obě varianty podobný, průběh je na začátku strmě klesající s pozvolným přechodem na mírně klesající. Změna Machova čísla podél kanálu je mírně rostoucí, převážně lineární. Průběh napětí podél celého kanálu je rostoucí v obou variantách podobný, liší se maximálně o jednotky voltu. Velikost poloměru oblouku v obou případech pozvolna narůstá.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] Aubrecht V.: Fyzika a diagnostika plazmatu. Elektronická skripta. FEKT VUT v Brně, Brno, 2002.
- [2] Aldebaran. *Aldebaran* [online]. [cit. 2014-11-25]. Dostupné z: <http://www.aldebaran.cz/astrofyzika/plazma/basics.html>
- [3] Lázničková I., Šenk J.: Aplikace elektrického oblouku. Elektronická skripta. FEKT VUT v Brně, Brno, 2014.
- [4] Lázničková I., Šenk J.: Aplikace elektrického oblouku. Nepřímá metoda výpočtu. FEKT VUT v Brně, Brno, 2013.
- [5] Silnoproudá elektrotechnika. *VŠB: studijní materiály* [online]. [cit. 2014-11-25]. Dostupné z: http://fei1.vsb.cz/kat410/studium/studijni_materialy/se/SEL1a.pdf
- [6] KUBÍČEK, Jaroslav. Technologie svařování. *FSI VUT* [online]. 2006 [cit. 2014-11-25]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory_soubory/technologie_vyroby_I_svarovani_kubicek.pdf
- [7] UNIVERZITA TOMÁŠE BATI - ÚSTAV FYZIKY A MATERIÁLOVÉHO INŽENÝRSTVÍ. *Definice plazmatu, základní charakteristiky plazmatu* [online]. [cit. 2014-12-09]. Dostupné z: http://ufmi.ft.utb.cz/texty/plazmochemie/PCH_02.pdf
- [8] SCHMIEDT, Lukáš. UNIVERZITA KARLOVA - FAKULTA MATEMATICKO-FYZIKÁLNÍ. *Úvod do fyziky plazmatu* [online]. [cit. 2014-12-17]. Dostupné z: <http://physics.mff.cuni.cz/kfpp/s4r/plazma/>
- [9] VARJU, Jozef. UNIVERZITA KARLOVA - FAKULTA MATEMATICKO-FYZIKÁLNÍ. *Aplikace plazmatu* [online]. [cit. 2014-12-17]. Dostupné z: <http://physics.mff.cuni.cz/kfpp/s4r/plazma/?p=5>