

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Ing. Josef Barák

ZÁŘENÍ PLAZMATU ELEKTRICKÉHO OBLOUKU

RADIATION OF ELECTRIC ARC PLASMA

ZKRÁCENÁ VERZE PH.D. THESIS

Obor: Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika

Školitel: Doc. RNDr. Vladimír Aubrecht, CSc.

Oponenti: Prof. RNDr. Vratislav Kapička, DrSc.
RNDr. Milan Hrabovský, CSc.

Datum obhajoby: 27. 5. 2003

KLÍČOVÁ SLOVA

elektrický oblouk, záření plazmatu, SF6, PTFE

KEY WORDS

electric arc, plasma radiation, SF6, PTFE

MÍSTO ULOŽENÍ DISERTAČNÍ PRÁCE

Vědecké oddělení FEKT VUT v Brně, Údolní 53a, 602 00 Brno

© Josef Barák, 2003
ISBN 80-214-2446-X
ISSN 1213-4198

Obsah

1 Úvod	5
2 Současný stav řešené problematiky	7
3 Cíle disertační práce	8
4 Využití elektrického oblouku	9
5 Záření plazmatu a metody jeho výpočtu	12
6 Metoda parciálních charakteristik – teoretické podklady	13
7 Aplikace metody parciálních charakteristik	17
8 Stupňová metoda – teoretické podklady	20
9 Aplikace stupňové metody	21
10 Závěr	26
Literatura	28
Summary	32

1 Úvod

V posledních několika desetiletích se prudce rozvíjí moderní interdisciplinární oblast vědecko-výzkumné činnosti — vysokoteplotní dynamika plynů. V praxi je úspěšně používána řada plazmových technologií (obloukové svařování, napařování, naprašování apod.), ale stále existuje mnoho otevřených problémů, např. procesy probíhající v atmosférách hvězd, vstup kosmických těles vysokou rychlostí do atmosféry planet, oblouk v silnoproudé vypínací technice, laserové plazma, plazmatrony.

Z hlediska technických aplikací je nejrozšířenějším typem výboje v plynech elektrický oblouk. Od ostatních výbojů se liší především velkými hustotami proudu podmiňujícími jeho existenci a malými elektrodovými úbytky napětí. Jedním z hlavních znaků oblouku je intenzivní vyzařování energie z jeho plazmatu a s tím související vysoká teplota výbojové dráhy tvořené plynem s velkým stupněm ionizace.

Záření se v energetické bilanci plazmatu začíná významně projevovat při vysokých tlacích plazmatu (nad 0,101 MPa) a teplotách nad 10 000 K. V úlohách popisujících výše uvedené problémy proto není možné řešit dynamiku plynů bez znalosti vyzářené energie a naopak, nelze řešit přenos energie zářením bez určení dynamických parametrů plynu.

Experimentální sledování problémů přenosu energie zářením je spojeno se značnými obtížemi. Ty jsou způsobeny experimentálními podmínkami, při kterých se provádí sledování: vysoká teplota, tlak a rychlost plynu. V podobných situacích hraje neocenitelnou úlohu matematické modelování. Výpočet umožňuje zpracovat experimentální data, spojit výsledky měření v jeden celek, mnohdy i objevit kvalitativně nové fyzikální jevy. Nelinearita rovnic popisujících přenos energie zářením a silná závislost vstupních veličin na frekvenci záření a vlastnostech prostředí, činí matematické modely plazmatu velmi složitými.

Obtíže při teoretickém výpočtu přenosu záření jsou spojeny s nelineární povahou příslušných rovnic a silnou závislostí charakteristik pole záření na frekvenci záření a vlastnostech prostředí. Tok záření a jeho divergence – veličiny, které vystupují v rovnici zachování energie – jsou integrály přes frekvenci a objem.

Velkým problémem je složitá struktura reálného spektra horkých plynů obsahující tisíce spektrálních čar. Protože koeficient absorpce se mění o několik řádů v úzkém intervalu, je přímá integrace charakteristik záření přes frekvenci při řešení problému dynamiky plynů nemožná i za použití moderních počítačů.

Další potíže působí složitý algoritmus a vysoké nároky na operační paměť při výpočtu spektrálního koeficientu absorpce. Pokusy tabelovat koeficient absorpce narážely vždy na nedostatek operační paměti počítače. Algoritmus pro výpočet reálného spektra plynů je tak složitý, že je prakticky nemožné provádět tyto integrace současně bez použití aproximačních metod.

Většina publikovaných metod přibližného popisu přenosu záření má řadu nedostatků. Metody založené na empiricky získaných datech mají pouze úzký

okruh platnosti. Metody založené na předpokladu speciálního tvaru spektra (stupňovitý model), malé nebo velké optické tloušťky, separaci frekvenční a teplotní závislosti jsou velice hrubými aproximacemi. Čím jemnější spektrum (větší počet spektrálních čar) se zahrne do výpočtu, tím více bude výpočet vyžadovat strojového času a tím náročnější bude na paměť počítače.

Proto byla zpracována nová aproximační *metoda parciálních charakteristik* [9], která umožňuje současně popsat jak procesy emise v centrálních částech plazmatu, tak i absorpce na jeho chladnějších okrajích. V metodě se definují dvě nové materiálové funkce (*parciální charakteristiky*), S_{om} a ΔS_{im} , které jsou definované pro úsek plazmatu s lineárně rozloženou teplotou. Obě funkce závisí na délce tohoto segmentu a obou koncových teplotách. S využitím předem vytvořené databáze těchto dvou funkcí pro různé parametry je možné efektivně řešit problém přenosu energie zářením v plazmatu s libovolnou geometrií.

Metoda parciálních charakteristik umožňuje realizaci řešení přenosu energie zářením v plazmatu ve 3D geometrii. Tato metoda je však stále ještě časově náročná. Z tohoto důvodu se ve své práci zabývám „*stupňovou*“ metodou, která umožňuje řešit energetickou bilanci pro válcový oblouk se stěnovou stabilizací, a to v podstatně kratším čase (až o dva řády) než s využitím metody parciálních charakteristik. Pro výpočet energetické bilance *stupňovou* metodou se musí znát podíl záření na celkové energetické bilanci. Ten je dán parametrem C , jenž charakterizuje poměr vyzářeného výkonu P_{rad} a elektrického příkonu P_{ohm} .

Hlavní náplní práce je matematické modelování energetické bilance plazmatu, především pak přenosu energie zářením, a to s využitím výše uvedené metody parciálních charakteristik a rovněž metody *stupňové*. Přitom se vychází z metodiky zpracované v habilitační práci doc. Aubrechta [2].

Problematika energetické bilance spínacího oblouku a energiových ztrát způsobených zářením plazmatu je vysoce aktuální, o čemž svědčí ohlasy vědecké komunity na dosud publikované práce v odborných časopisech a na vědeckých konferencích. V této oblasti ÚVEE FEKT VUT spolupracuje s celou řadou zahraničních pracovišť a vysokých škol.

2 Současný stav řešené problematiky

Záření se v energetické bilanci plazmatu významně projevuje při vysokých tlacích plazmatu (nad 0,101 MPa) a teplotách nad 10 000 K. Experimentální sledování problémů přenosu energie zářením je velmi obtížné, což je způsobeno experimentálními podmínkami – vysokou teplotou, tlakem a rychlostí plynu. Navíc převažuje vyzařování v UV oblasti.

Při použití matematického modelu činí problémy nelinearita rovnic popisujících přenos energie zářením a silná závislost vstupních veličin na frekvenci záření a vlastnostech prostředí. Velký problém působí rovněž složitá struktura reálného spektra horkých plynů, složitý algoritmus a vysoké nároky na operační paměť při výpočtu spektrálního koeficientu absorpce. Algoritmus pro výpočet reálného spektra plynů je tak komplikovaný, že je prakticky nemožné provádět tyto integrace současně bez použití aproximačních metod.

Většina publikovaných metod přibližného popisu přenosu záření má řadu nedostatků. Proto byla zpracována nová aproximační *metoda parciálních charakteristik* [9], která umožňuje současně popsat jak procesy emise v centrálních částech plazmatu, tak i převládající absorpci na jeho chladnějších okrajích. Tato metoda efektivně řeší problém přenosu energie zářením v plazmatu s libovolnou geometrií.

Pomocí parciálních charakteristik je možné vypočítat intenzitu záření I_r elektrického oblouku pro různé vstupní hodnoty. Je možné rovněž určit tok záření F a jeho divergenci. Tak lze sledovat vliv tlaku, poloměru oblouku, maximální teploty, teploty okolí, tvaru teplotního profilu. Byly provedeny výpočty pro oblouk s válcovou geometrií hořící v SF₆ při tlaku až 2 MPa [2].

Metoda parciálních charakteristik umožňuje realizaci řešení přenosu energie zářením v plazmatu ve 3D případě, je však stále časově náročná.

3 Cíle disertační práce

Hlavním cílem práce je zpracovat matematický model přenosu energie zářením v plazmatu elektrického oblouku. Pro modelování budou použity jednak metoda parciálních charakteristik, jednak stupňová metoda a tyto metody budou vzájemně porovnány z hlediska přesnosti, použitelnosti, rychlosti výpočtu, apod.

Náplň disertační práce lze rozdělit na následující dílčí úkoly:

- Provést výpočet pole záření elektrického oblouku hořícího v čistém SF₆ pro tlak až 6 MPa.
- Provést výpočet pole záření pro oblouk hořící ve směsi SF₆ s teflonem a v čistém teflonu. Spínací oblouk vzniká v moderních vypínačích typu self-blast (pracujících s náplní plynu SF₆) uvnitř trysky z PTFE, přičemž dochází k odpařování tohoto materiálu. Za určitých okolností [4] může být uvnitř takového vypínače plazma obsahující pouze produkty rozpadu PTFE.
- Použít pro urychlení výpočtů fyzikálních veličin charakterizujících záření stupňovou metodu. S využitím metody parciálních charakteristik jako referenční vytvořit tabulky nezbytné pro stupňovou metodu.
- Stanovit chyby stupňové metody.
- Na základě výpočtů určit podíl záření v celkové energetické bilanci v závislosti na vstupních parametrech.
- Srovnat teoretické výsledky s dostupnými experimentálními výsledky.

4 Využití elektrického oblouku

Elektrický oblouk se využívá v řadě aplikací. Jsou to např. obloukové pece a plazmové hořáky v plazmové metalurgii, plazmové hořáky pro tavení, plazmové svařování a řezání. V neposlední řadě vzniká oblouk i v elektrických spínacích přístrojích.

Spínací přístroje

V elektrických přístrojích vzniká oblouk při přechodných dějích, tj. při zapínání (zapínací oblouk) a při vypínání (vypínací oblouk). Zatímco zapínací oblouk zpravidla zanikne bez znatelného vlivu na spínací pochod, vypínací oblouk je nutno přivést k zániku vhodným zásahem do jeho mechanismu hoření. Příkladem přístroje, v němž vzniká oblouk, je vypínač. Podle způsobu zániku oblouku se dělí vypínače z obecného hlediska na vypínače s cizí zhášecí energií a vypínače s vlastní zhášecí energií. K zániku oblouku se u vypínačů s vlastní zhášecí energií využívá přímo energie oblouku, kdežto v případě vypínače s cizí zhášecí energií se využije ke zhasnutí oblouku energie dodaná z vnějšku.

Jedním z typů vypínačů jsou vypínače *plynotlaké*. Jako zhášecí médium se u nich často využívá elektronegativní plyn fluorid sírový (SF_6). Ten se vyznačuje mimořádně příznivými vlastnostmi pro účely zhášení elektrického oblouku, zejména velkou elektrickou pevností, nehořlavostí, velkou chemickou stálostí, příznivými vlastnostmi při odvodu tepla a výbornými zhášecími vlastnostmi. Tyto výhody jsou způsobeny souborem fyzikálně chemických vlastností v ustáleném i přechodném režimu při velkém rozsahu teplot. Proto se stal fluorid sírový základem generace přístrojů a rozváděčů vn a vvn a našel i další použití v ostatních oblastech rozvodných zařízení, jako jsou transformátory nebo kabely izolované plynem.

Účinek SF_6 na oblouk je obecně dán konstrukcí zhášedla, což je část vypínače v níž zhasíná oblouk. Ve zhášedlech vypínačů s SF_6 je elektrický oblouk natahován oddalujícími se kontakty a zároveň je ofukován plynem. Zhášení oblouku v SF_6 probíhá velmi intenzívně, tj. s malou časovou konstantou.

Vypínače typu self-blast s teflonovou tryskou pracují s náplní plynu SF_6 uvnitř trysky z polytetrafluorethylenu (teflonu – PTFE), přičemž dochází k odpařování tohoto materiálu. Za určitých okolností [4] může být uvnitř tohoto vypínače plazma obsahující pouze produkty rozpadu PTFE. Vypínací schopnost, spolehlivost a životnost vypínače závisí právě na intenzitě odpařování materiálu trysky a změnách jejího geometrického tvaru.

Záření má dominantní úlohu v energetické bilanci spínacího procesu v průběhu silnoprůdeho intervalu. Získání informací, případně detailní fyzikální popis spínacího procesu na základě experimentálních měření je nemožné pro extrémní tlakové a teplotní podmínky uvnitř zhášecí trysky. Podrobné informace o struktuře spínacího oblouku a procesu odpařování materiálu trysky lze získat jen na základě správného modelu záření, který umožňuje popis emise i absorpce záření ve sledované oblasti. Tyto procesy lze v současnosti modelo-

vat pouze za předpokladu čistého plynu SF₆, bez jakýchkoli příměsí. Je proto zapotřebí získat vstupní data a vytvořit model pro popis pole záření v oblouku hořícím v SF₆ s příměsí PTFE.

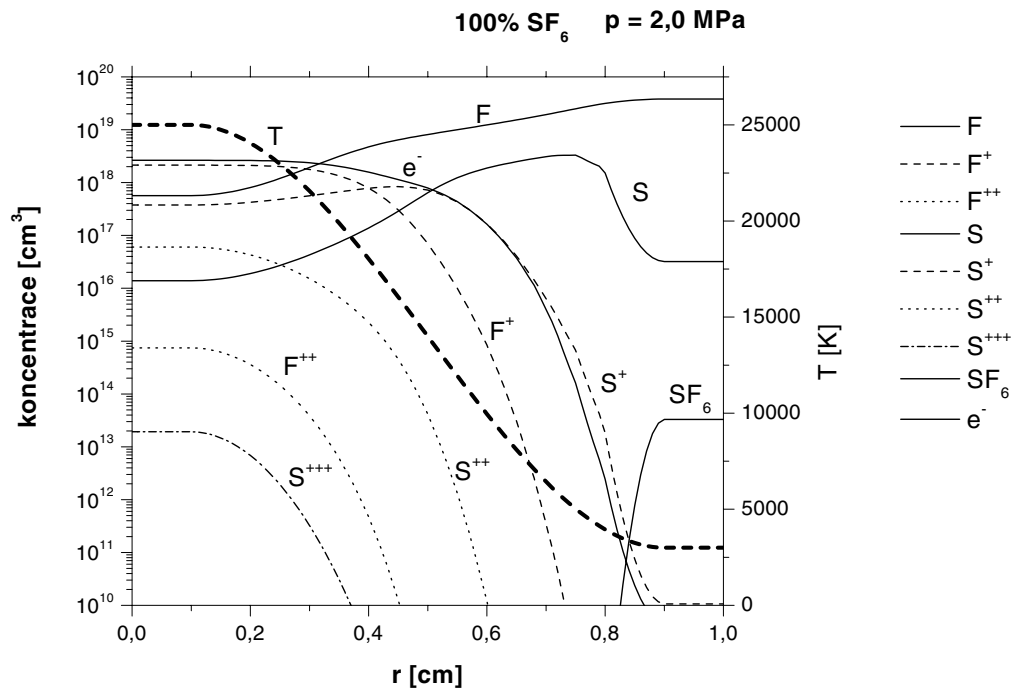
Složení plazmatu SF₆ a PTFE

Jedním z podkladů pro výpočet pole záření je složení plazmatu elektrického oblouku. Plazma SF₆ obsahuje následující nejdůležitější složky: elektrony e, neutrální atomy S, F a ionty S⁺, F⁺, S⁺⁺, F⁺⁺. Další složky, např. molekuly, vícenásobné ionty a záporné ionty se v uvažovaném teplotním intervalu (10 000 K až 30 000 K) vyskytují v zanedbatelném množství.

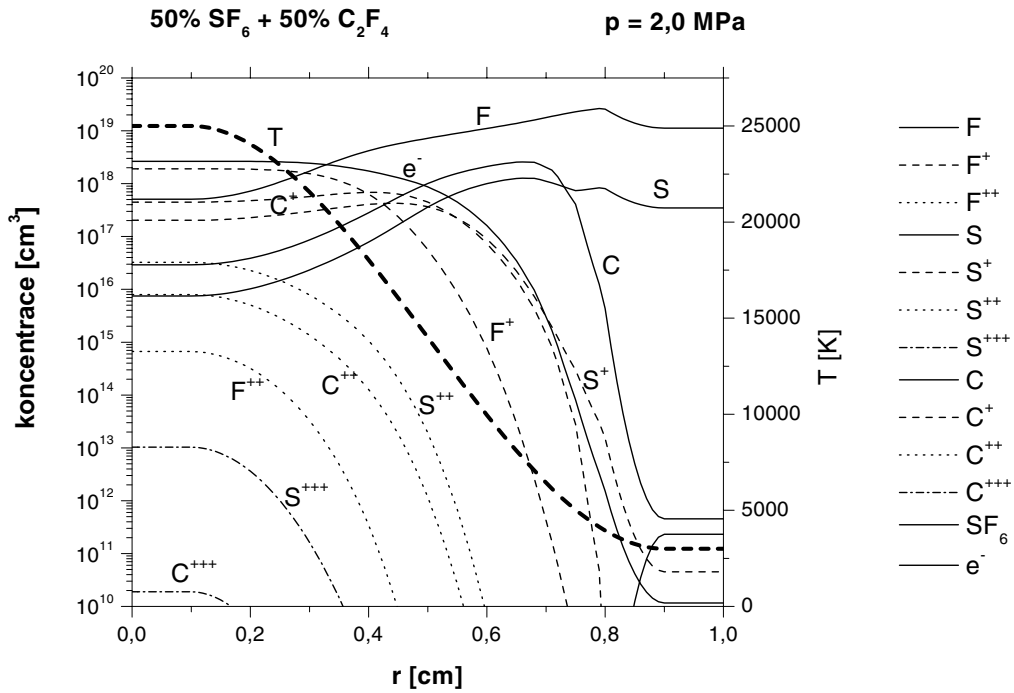
Plazma PTFE obsahuje následující nejdůležitější složky: elektrony e, neutrální atomy C, F a ionty C⁺, F⁺, C⁺⁺, F⁺⁺. Další složky, např. molekuly, vícenásobné ionty a záporné ionty se v uvažovaném teplotním intervalu (10 000 K až 30 000 K) vyskytují v zanedbatelném množství.

Plazma směsi SF₆ a PTFE obsahuje zejména elektrony e, neutrální atomy S, C, F a ionty S⁺, F⁺, C⁺, S⁺⁺, F⁺⁺, C⁺⁺.

Koncentrace jednotlivých složek plazmatu SF₆ a rovněž plazmatu 50 % SF₆ a 50 % PTFE pro modelový teplotní profil jsou na obr. 1 a 2 [2].



Obr. 1: Závislost koncentrace složek plazmatu SF₆ na teplotě.



Obr. 2: Závislost koncentrace složek plazmatu SF₆+PTFE na teplotě.

5 Záření plazmatu a metody jeho výpočtu

Záření plynu je elektromagnetické vlnění, které lze charakterizovat frekvencí ν (popřípadě kruhovou frekvencí $\omega = 2\pi\nu$) nebo vlnovou délkou λ .

Záření vysokotlakého oblouku v ustáleném stavu

Pro většinu vysokotlakých oblouků nelze záření plazmatu zanedbat. Zahrnutí záření značně komplikuje výpočty. Je proto nutné užívat zjednodušujících předpokladů.

Energetickou bilanci oblouku popisuje rovnice, v níž se srovnává energie do oblouku přivedená se ztrátami v důsledku tepelné vodivosti a záření

$$\sigma E^2 = \nabla \vec{F}_C + \nabla \vec{F}_R, \quad (5.1)$$

kde $\vec{F}_C = -\kappa \nabla T$ je hustota tepelného toku v důsledku tepelné vodivosti, \vec{F}_R je hustota toku záření, \vec{E} je intenzita elektrického pole, σ je měrná elektrická vodivost a κ je měrná tepelná vodivost.

Rovnice (5.1) je diferenciální druhého řádu pro neznámou funkci $T(r)$.

Přesné určení hustoty toku záření \vec{F}_R je obtížné a časově velmi náročné, proto byla vypracována řada přibližných metod používajících zjednodušení jak fyzikálních jevů, tak i matematických operací. V [7] provedl Lowke přesný výpočet \vec{F}_R . Z něj je možno posuzovat použitelnost přibližných metod.

Přibližné metody řešení rovnice přenosu energie zářením

Důležitým parametrem elektrického oblouku je jeho teplota. Pro určení rozložení teploty v plazmatu oblouku s respektováním vlivu záření je nutné v rovnici (5.1) znát člen $\nabla \vec{F}_R$, který charakterizuje velikost vyzářeného výkonu. Existuje celá řada přibližných metod. Tato práce se zabývá především metodou parciálních charakteristik. Tato metoda byla úspěšně použita pro řešení energetické bilance spínacího oblouku hořícího v SF_6 . Nově jsou provedeny výpočty pro vyšší tlaky až 6 MPa a rovněž výpočty pro směs SF_6 s teflonem (PTFE).

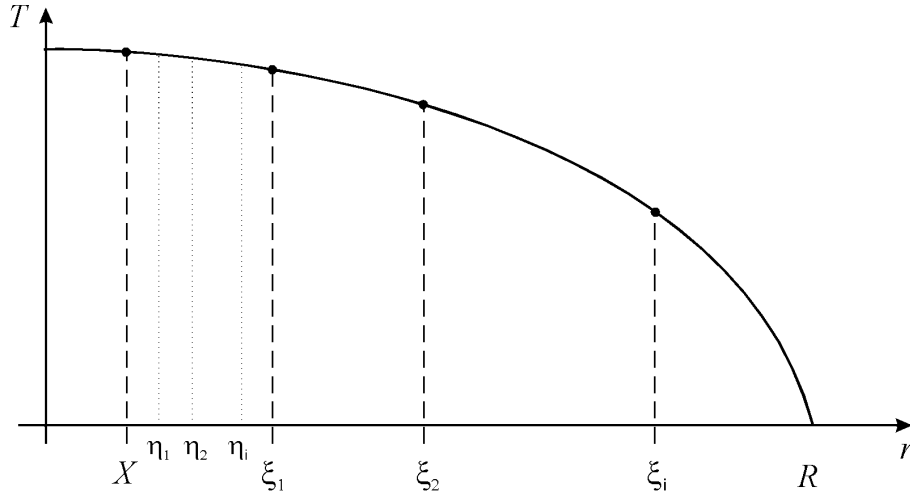
S radiálními průběhy teplot a rovněž s intenzitami elektrického pole, při jejichž stanovení se využívá pole záření určené metodou parciálních charakteristik, jsou srovnávány veškeré výpočty provedené metodou stupňovou.

6 Metoda parciálních charakteristik – teoretické podklady [2], [3]

Rovnice přenosu energie zářením v bodě X pro intenzitu záření šířícího se ve směru r je

$$\vec{r} \nabla I_\nu(X, \vec{r}) = \kappa_\nu(X) [B_\nu(X) - I_\nu(X, \vec{r})], \quad (6.2)$$

kde $B_\nu(X)$ je Planckova funkce vyjadřující intenzitu záření černého tělesa, $\kappa_\nu(X)$ je spektrální koeficient absorpce a \vec{r} je jednotkový vektor. Podle Kirchhoffova zákona je součin $B_\nu(X) \kappa_\nu(X)$ v rovnici (6.2) roven lokální emisi záření v bodě X a člen $\kappa_\nu(X) I_\nu(X, \vec{r})$ vyjadřuje úbytek záření po průchodu vzdálenosti mezi X a R (význam souřadnic a závislost teploty oblouku na radiální vzdálenosti je uveden na obr. 3). Vztah mezi intenzitou záření a tokem je dán



Obr. 3: Závislost teploty na radiální vzdálenosti, význam souřadnic.

rovnici

$$\vec{F}_R(X) = \int_{4\pi} I(X, \vec{r}) \vec{r} d\vec{\Omega}, \quad (6.3)$$

kde $d\vec{\Omega}$ je element prostorového úhlu.

Divergence toku záření je dána vztahem

$$\nabla \vec{F}_R(X) = \int_{4\pi} \nabla I(X, \vec{r}) d\vec{\Omega}. \quad (6.4)$$

Vztahy pro intenzitu záření $I(X, \vec{r})$ a $\nabla I(X, \vec{r})$ se získají integrací rovnice (6.2)

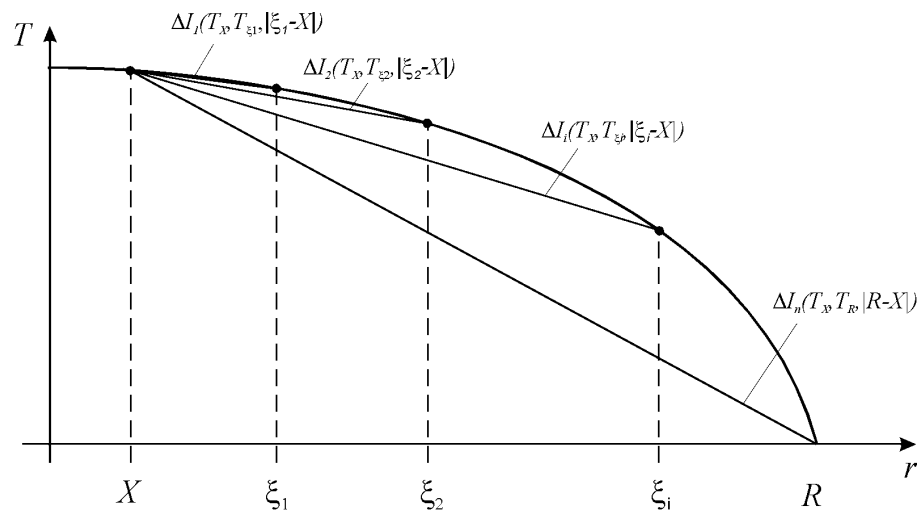
$$I(X, \vec{r}) = \int_X^R \int_0^\infty B_\nu(\xi) \kappa_\nu(\xi) e^{-\int_X^\xi \kappa_\nu(\eta) d\eta} d\nu d\xi, \quad (6.5)$$

$$\begin{aligned} \nabla I_\nu(X) &= \int_0^\infty B_\nu(X) \kappa_\nu(X) e^{-\int_X^R \kappa_\nu(\eta) d\eta} d\nu - \\ &- \int_X^R \int_0^\infty [B_\nu(\xi) - B_\nu(X)] \kappa_\nu(\xi) \kappa_\nu(X) e^{-\int_X^\xi \kappa_\nu(\eta) d\eta} d\nu d\xi. \end{aligned} \quad (6.6)$$

Přesné řešení rovnic (6.5) a (6.6) je pro složitost spektra záření časově velice náročné a současná integrace přes frekvence a úhly je prakticky možná jen pro jeden směr záření.

Parciální charakteristiky

Základním principem metody parciálních charakteristik je nahrazení integrační dráhy v exponentu rovnic (6.5) a (6.6) úsečkou. Za tohoto předpokladu je možné oddělit časově náročné integrace přes frekvence od integrace přes vzdálenosti a úhly. V praxi to znamená, že se může předem vytvořit databáze speciálních funkcí, které obsahují frekvenční integrace a tuto databázi pak využít při řešení dynamiky plynů. Rozložení teploty v jednorozměrném plazmatu na



Obr. 4: Aproximace teplotního profilu souborem úseček.

obr. 3 se nahradí souborem úseček. Každá úsečka je charakterizována dvěma hraničními teplotami T_X , T_ξ a vzdáleností $x = |X - \xi|$ (viz obr. 4). Rozložení teploty podél každé úsečky je dáno rovnicí

$$T_\eta = T_\xi + \frac{T_X - T_\xi}{X - \xi} (\eta - \xi). \quad (6.7)$$

Podobné úsečky se mohou vytvořit pro rozložení tlaku v plazmatu. Z důvodů zjednodušení výpočtů se předpokládá, že tlak v plazmatu je konstantní.

Každé úsečce je možné přiřadit tři funkce – *parciální charakteristiky*:

Parciální intenzita záření

$$\Delta I(T_X, T_\xi, x) = \int_0^\infty B_\nu(\xi) \kappa_\nu(\xi) e^{-\int_0^x \kappa_\nu(\eta) d\eta} d\nu, \quad (6.8)$$

parciální úbytek

$$\Delta \text{Sim}(T_X, T_\xi, x) = \int_0^\infty [B_\nu(\xi) - B_\nu(X)] \kappa_\nu(\xi) \kappa_\nu(X) e^{-\int_0^x \kappa_\nu(\eta) d\eta} d\nu \quad (6.9)$$

a zdroj

$$\text{Som}(X, R) = \int_0^{\infty} B_{\nu}(X) \kappa_{\nu}(X) e^{-\int_X^R \kappa_{\nu}(\eta) d\eta} d\nu. \quad (6.10)$$

Pokud se předpokládá lineární rozložení teploty podél absorpční dráhy podle rovnice (6.7), je možné předem vypočítat tabulky parciálních charakteristik, které budou funkcemi T_X , T_{ξ} a x . Takové tabulky je pak možné využít při výpočtu intenzity a toku záření a divergence toku záření. Z [2] vyplývá, že je potřeba tabelovat pouze dvě funkce ΔI a ΔSim .

S využitím tabelovaných hodnot parciálních charakteristik je nutné integrovat již jen přes vzdálenosti a úhly, což není tak časově náročné jako integrace přes frekvence záření. Uvedená metoda je výhodná také z toho hlediska, že se může řešit vyzařování plazmatu bez ohledu na přesnou znalost podrobné fyzikální teorie, protože podklady potřebné k výpočtům jsou dodány v podobě tabulek Som a ΔSim .

Popis tabulek parciálních charakteristik

Tabulky parciálních charakteristik mají čtyři vstupní parametry (T_{ξ} , T_X , p , x). Teploty T_{ξ} jsou v rozsahu 1 000 až 35 000 K s krokem $\Delta T_{\xi} = 1 000$ K a teploty T_X mají hodnoty 300 K, 500 K a dále pak 1 000 až 35 000 K s krokem $\Delta T_X = 1 000$ K. Teploty T_{ξ} jsou v ASCII formátu tabulek značeny jako $T2$ a teploty T_X jako $T1$. Podobně $p_{\xi} \doteq P2$ a $p_X \doteq P1$.¹ Tabulky jsou uloženy v souborech na pevném disku počítače.

Grafická prezentace tabulek parciálních charakteristik

Tabulky parciálních charakteristik je možné znázornit graficky. Důležité jsou zejména závislosti parciálních charakteristik na teplotě T_{ξ} nebo T_X při různých parametrech:

1. Parciální intenzita jako funkce T_{ξ} a L při vstupním parametru T_X (fyzikálně hodnoty $\Delta I(T_{\xi}, T_X, x)$ odpovídají intenzitě záření v lineárním úseku plazmatu o délce L se směrnici $(T_{\xi} - T_X)/L$).
2. Speciální případ závislosti a) nastává pro izotermické plazma, ve kterém $T_{\xi} = T_X$.
3. Parciální intenzita jako funkce T_{ξ} a T_X při vstupním parametru L .
4. Parciální intenzita jako funkce T_X a T_{ξ} při vstupním parametru L .

Veškeré výše uvedené případy navíc mohou nastat vždy pro určitý tlak a podíl SF_6 a PTFE.

Průběhy funkce ΔSim jsou ve srovnání s průběhy ΔI komplikovanější, neboť funkce ΔSim závisí na teplotě ve dvou bodech: v počátečním bodě X (ve

¹Ve všech tabulkách se předpokládá plazma o konstantním tlaku, tzn. $p_{\xi} = p_X$.

kterém se divergence toku záření počítá) a v bodě ξ , který se mění podél dráhy mezi X a okrajem plazmatu.

Z důvodů časté potřeby prezentace tabulek SOM a ΔSIM byl vytvořen program `SomSimTable`, který je schopen ošetřit všechny uvedené kombinace možností. Veškeré výsledky jsou ukládány do výstupních souborů.

7 Aplikace metody parciálních charakteristik

Vliv parametrů na intenzitu záření oblouku, tok záření a divergenci toku záření

Pomocí metody parciálních charakteristik je možné vypočítat pole záření (intenzitu záření, tok záření a divergenci toku záření) elektrického oblouku pro různé vstupní hodnoty. Lze tak sledovat vliv tlaku, poloměru oblouku, maximální teploty, teploty okolí, tvaru teplotního profilu – viz [25].

V disertační práci byly výpočty oproti [25] rozšířeny pro tlak až 6 MPa, protože se ukázalo, že tato data jsou žádána na jiných pracovištích (např. RWTH Aachen v Německu). Rovněž byly provedeny výpočty pro směsi SF₆ s teflonem, neboť spínací oblouk vzniká v moderních vypínačích typu self-blast (pracujících s náplní plynu SF₆) uvnitř trysky ze syntetického materiálu PTFE (polytetrafluorethylen), přičemž dochází k odpařování tohoto materiálu.

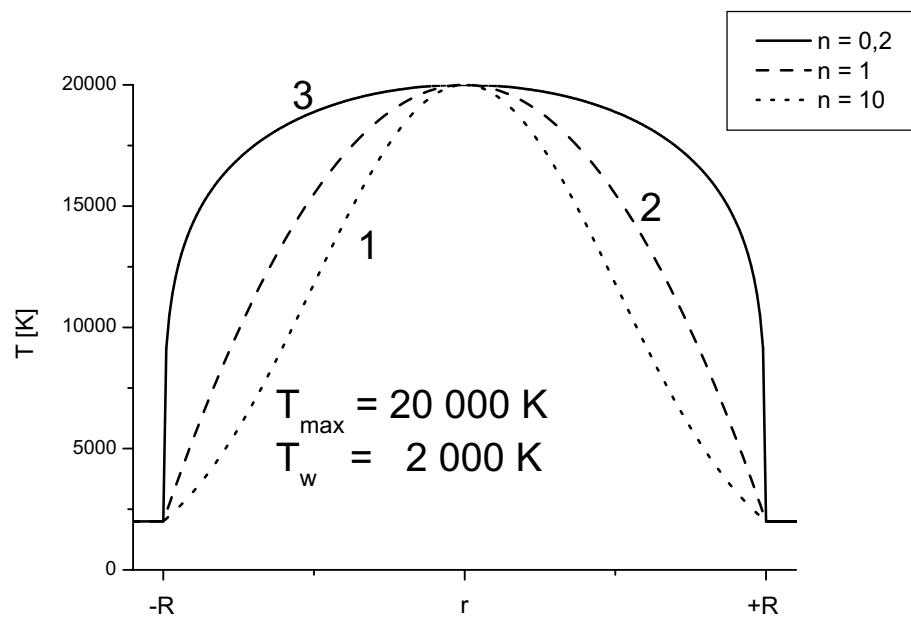
Pro účely výpočtu toku záření a jeho divergence pro 3D případ byl upraven existující fortranovský program FLUX.FOR a DIVFLUX.FOR a v Pascalu byl vytvořen původní program 3DF.PAS. Jedním ze vstupů těchto programů jsou teplotní profily, tedy radiální rozložení teploty v plazmatu elektrického oblouku, z nichž byly vybrány tři modelové. Tyto profily byly vytvořeny programem CREATET.

Teplotní profil č. 1 (koeficient tvaru $n = 10$) zhruba odpovídá rozložení teploty u volně hořícího oblouku. **Teplotní profil č. 3** (koeficient tvaru $n = 0,2$) odpovídá rozložení teploty pro válcový oblouk se stěnovou stabilizací. Vyznačuje se velkým gradientem teploty na hranicích oblouku. Parabolický **teplotní profil č. 2** ($n = 1$), tvořící mezistupeň mezi předchozími, byl zvolen především proto, že ho lze snadno modelovat i bez znalosti vzorce použitého v CREATET.

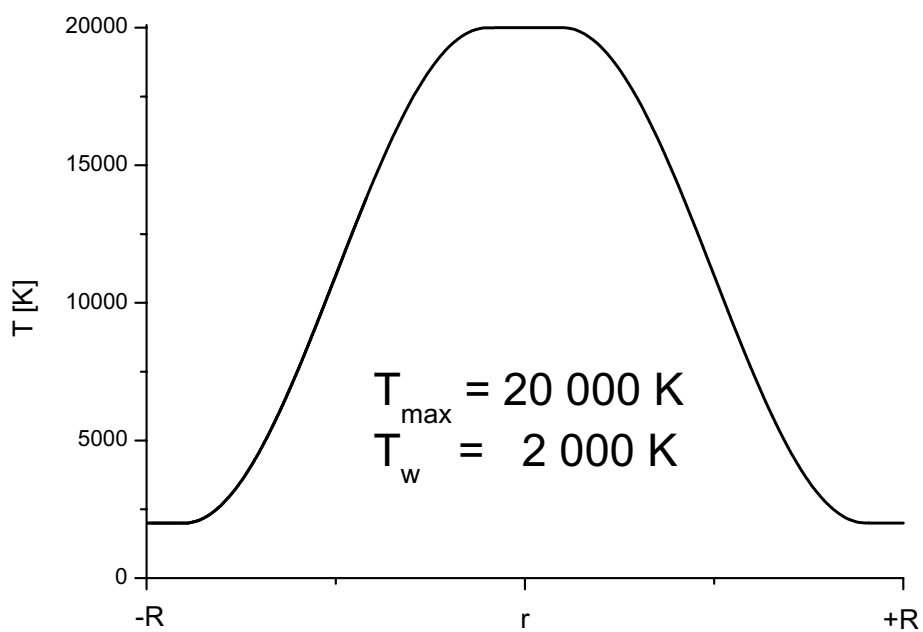
Teplotní profil č. 4 nebyl modelován výše uvedeným způsobem, ale byl vytvořen na základě experimentálních zkušeností pracoviště RWTH Aachen v Německu. Protože však byly dodány pouze profily pro některé hodnoty T_{\max} , T_w a R , byl sestaven matematický popis a následně i počítačový program, který modeluje takovýto profil pro různé hodnoty zmíněných parametrů při důsledném zachování celkového charakteru.

Uvedené profily i s hodnotami charakteristických parametrů jsou přehledně na obr. 5 a 6. Průběh těchto profilů je takového charakteru, že maximální teplota vždy leží v ose oblouku.

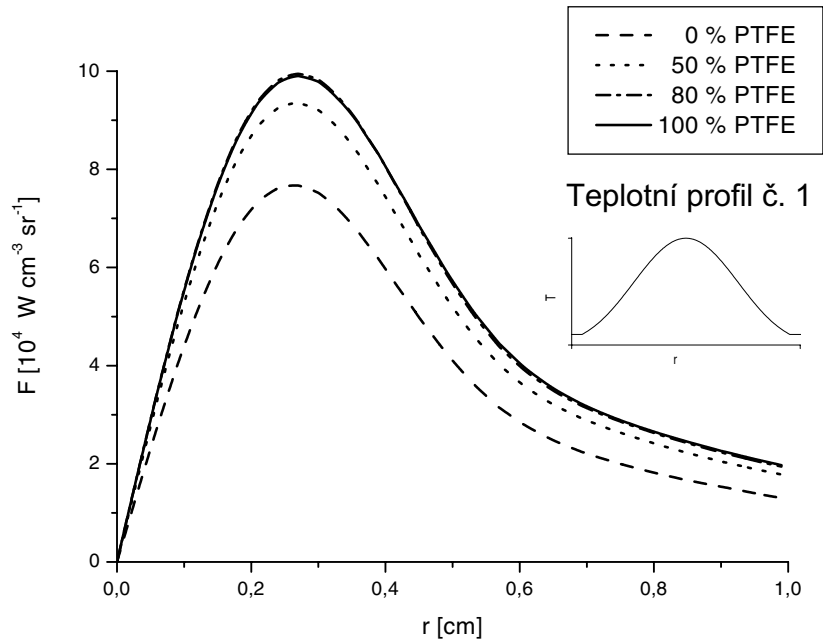
Příklad grafické prezentace výsledků je na obr. 7 a 8.



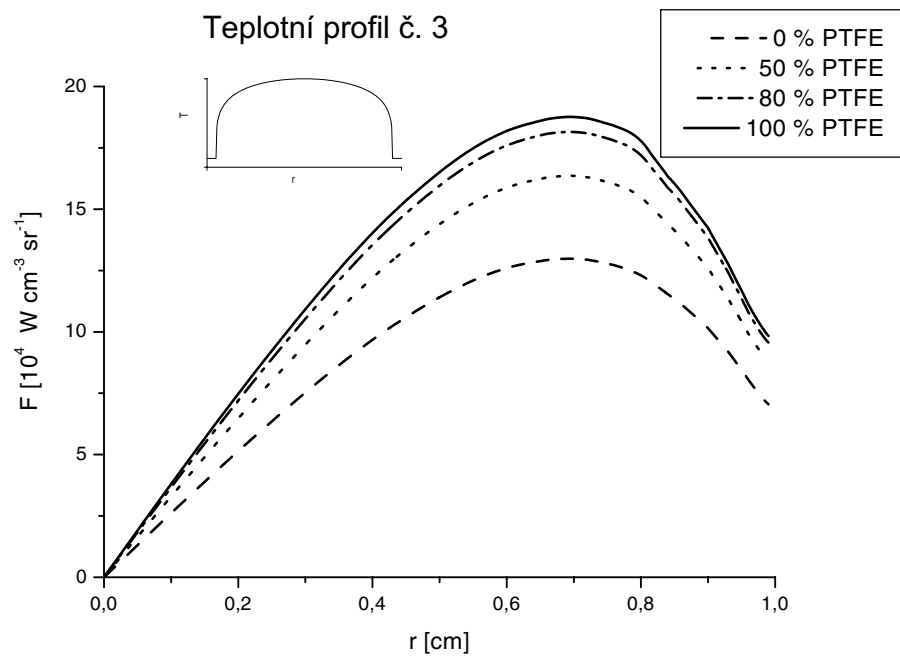
Obr. 5: Modelové teplotní profily vytvořené programem *Createt*.



Obr. 6: Experimentální teplotní profil (RWTH Aachen).



Obr. 7: Vliv složení plazmatu elektrického oblouku na radiální závislost toku záření ($p = 2,0$ MPa, $R = 10$ mm, $T_m = 20\,000$ K, $T_w = 2\,000$ K, teplotní profil 1).
 0 % PTFE – plazmatu hořící v prostředí čistého SF₆, 100 % PTFE – plazma obsahující pouze produkty rozpadu PTFE.



Obr. 8: Vliv složení plazmatu elektrického oblouku na radiální závislost toku záření ($p = 2,0$ MPa, $R = 10$ mm, $T_m = 20\,000$ K, $T_w = 2\,000$ K, teplotní profil 3).
 0 % PTFE – plazmatu hořící v prostředí čistého SF₆, 100 % PTFE – plazma obsahující pouze produkty rozpadu PTFE.

8 Stupňová metoda – teoretické podklady

Metoda parciálních charakteristik popsaná v kap. 6 slouží pro výpočet intenzity, toku, a divergence toku záření, tedy pole záření. Stupňová metoda se používá pro výpočet radiálního průběhu teploty a intenzity elektrického pole. V této metodě je pole záření popsáno parametrem C vyjadřujícím poměr vyzářeného výkonu P_{rad} a elektrického příkonu P_{ohm} podle rovnice (8.5). Ve srovnání s jednotkami až desítkami sekund trvajících výpočty teplotních profilů a intenzit elektrických polí při využití metody parciálních charakteristik pro popis pole záření, jsou výpočty provedené metodou stupňovou podstatně rychlejší a probíhají řádově desítky sekund.

Popis metody

Obecná rovnice energetické bilance pro válcově stabilizovaný oblouk je ve tvaru

$$\sigma E^2 = \nabla \vec{F}_R + \nabla \vec{F}_C, \quad (8.1)$$

kde σ je elektrická vodivost plazmatu, \vec{E} intenzita elektrického pole, \vec{F}_R představuje tok energie zářením a \vec{F}_C tok energie vedením tepla (kondukcí). Pro usnadnění řešení se uvažuje plazma osově souměrné. Užitím pomocné funkce

$$S = \int_0^T \kappa dT, \quad (8.2)$$

kteřá představuje funkci potenciálu tepelného toku (tzv. teplovodní funkce), nabude (8.1) tvaru

$$\sigma E^2 = \nabla \vec{F}_R - \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dS}{dr} \right). \quad (8.3)$$

Při řešení se $\nabla \vec{F}_R$ převede na levou stranu rovnice a rozdíl $\sigma E^2 - \nabla \vec{F}_R$ se předpokládá roven C násobku σE^2

$$\sigma E^2 - \nabla \vec{F}_R = \sigma E^2 C. \quad (8.4)$$

Pro výpočet musí být znám parametr C , jenž charakterizuje poměr vyzářeného výkonu P_{rad} a elektrického příkonu P_{ohm}

$$C = 1 - \frac{P_{\text{rad}}}{P_{\text{ohm}}}. \quad (8.5)$$

Pro $C = 1$, je odvod energie zářením nulový. Čím více se hodnota C blíží 0, tím větší je podíl vyzářené energie.

Rovnici 8.4 je možné numericky řešit metodou převzatou z [16]. Na základě teorie byl sestaven počítačový program EH1 řešící danou problematiku. Jako vstup se zadávají elektrický proud, poloměr plazmatu elektrického oblouku a teplota okolí. Výstupem je radiální průběh teploty v plazmatu oblouku a intenzita elektrického pole. Pro výpočet musí být rovněž znám parametr C .

9 Aplikace stupňové metody

Parametr C byl až dosud považován za konstantní v celém poloměru plazmatu oblouku, což by odpovídalo konstantní vyzářené energii. Vyzářená energie však konstantní není ([14], [15]) a její radiální závislost je přibližně ve tvaru uvedeném na obr. 9. Na tomto obrázku lze rozlišit dvě hlavní oblasti. Oblast 1 zde představuje energii vyzářenou a oblast 2 energii absorbovanou. Tomuto průběhu odpovídající průběh C je zřejmý ze stejného obrázku.

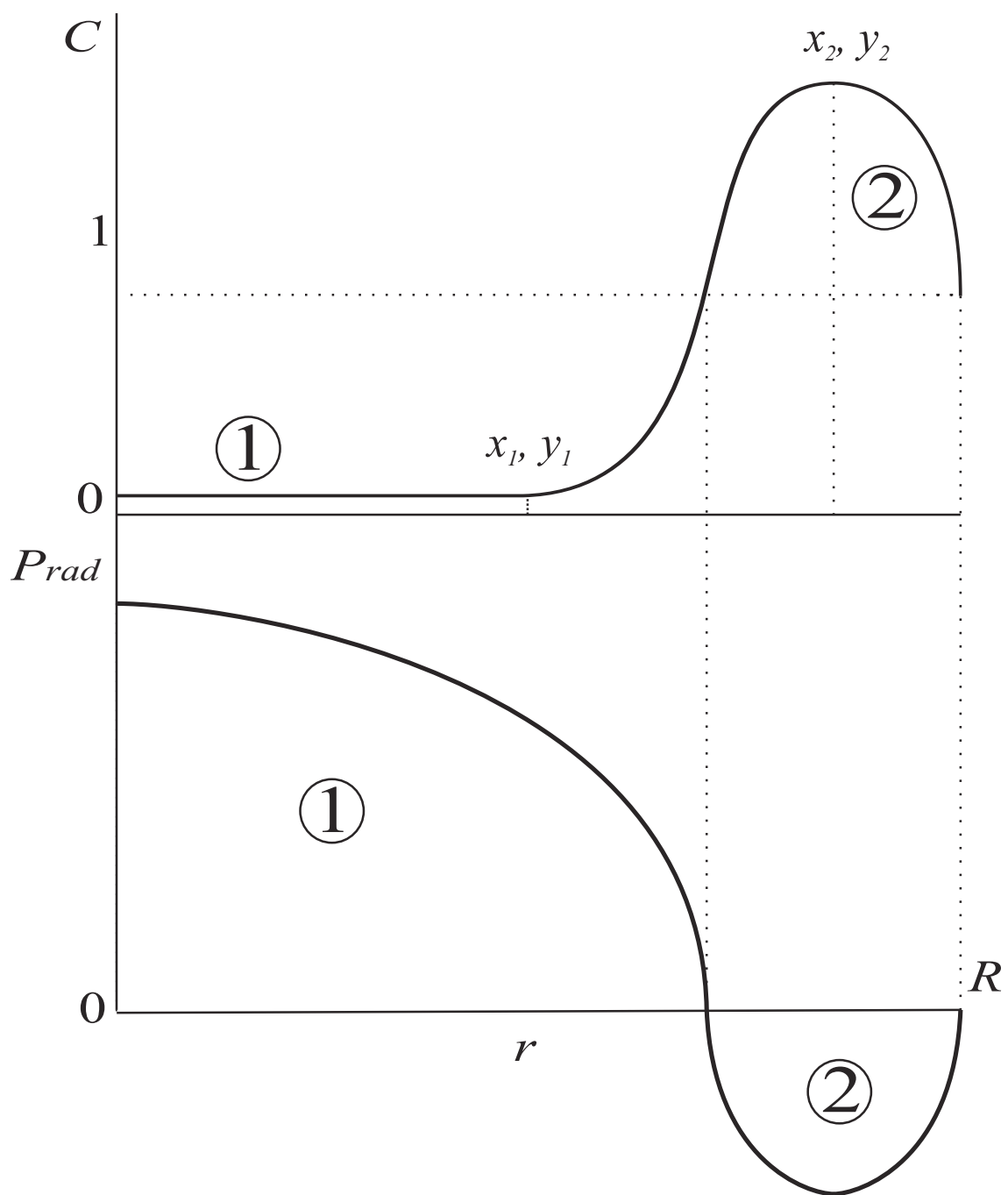
Bylo zahájeno hledání vhodného tvaru C . Nakonec byl použit průběh C přesně odpovídající vyzářenému výkonu (viz obr. 9).

Křivka popisující průběh C se skládá ze tří částí: přímky, sinusoidy a paraboly. Hranici mezi přímkou a sinusoidou tvoří bod x_1, y_1 , vrcholem paraboly je x_2, y_2 . Celkem je C popsán čtyřmi parametry: x_1, y_1, x_2, y_2 . Oblasti 1 a 2 si odpovídají.

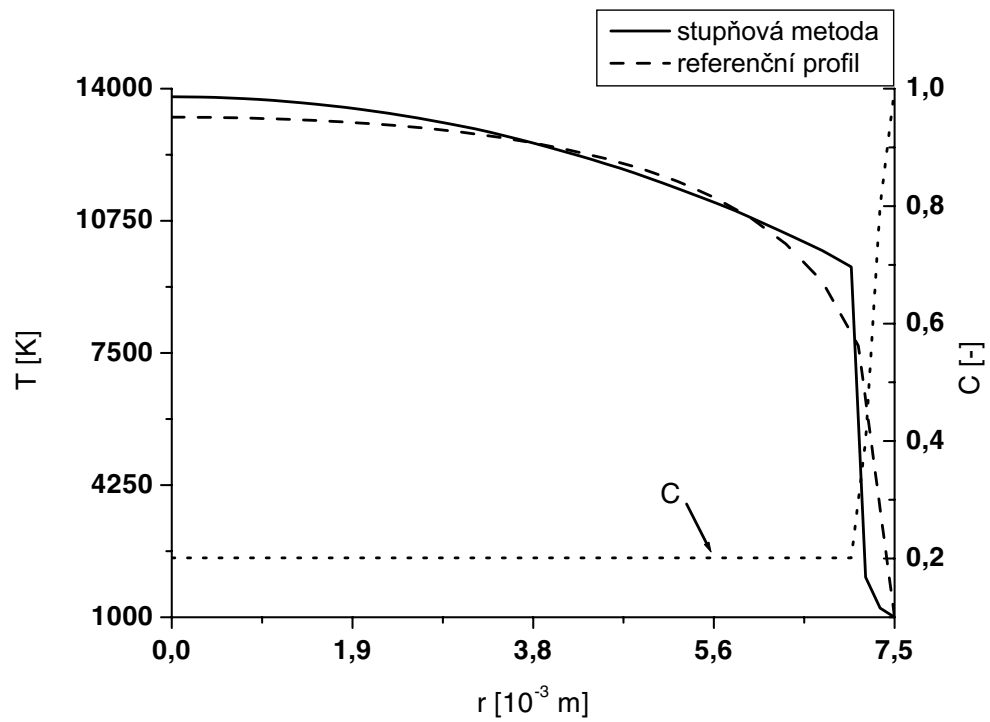
Uvedeným popisem C byla, podle předpokladů, dosažena nejvyšší shoda vypočtených radiálních průběhů teplot s referenčními. Odpovídajícím počítačovým programem EH2 byly sestaveny tabulky parametrů x_1, y_1, x_2, y_2 umožňující velmi rychle určit průběh C a tedy i radiální průběh teploty v plazmatu elektrického oblouku a intenzitu elektrického pole pro různé hodnoty vstupních parametrů. Hotové tabulky jsou uloženy v souborech `x1.dat`, `y1.dat`, `x2.dat` a `y2.dat`.

Uvedené tabulky používá program EH3. Tento program si po zadání vstupních veličin vyhledá (případně lineární interpolací dopočítá) odpovídající hodnoty x_1, y_1, x_2, y_2 a na jejich základě určí průběh parametru C . Tím jsou známy všechny potřebné vstupní hodnoty pro vlastní iterační postup stupňové metody. Výsledkem je radiální průběh teploty v plazmatu elektrického oblouku a intenzita elektrického pole. Celý výpočet trvá řádově desetiny sekundy.

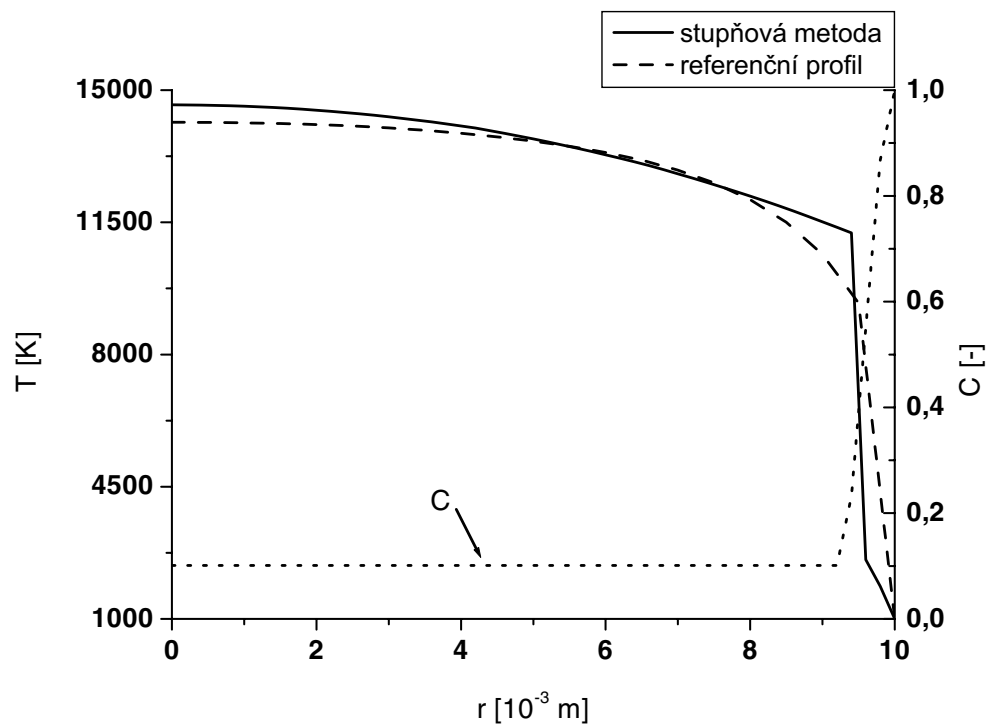
Na obr. 10 jsou uvedeny ukázky grafů pro různé proudy a poloměry (viz též [37] a [38]).



Obr. 9: Radiální závislost vyzářené energie a odpovídající průběh C



(a) $I = 500 \text{ A}$, $R = 7,5 \text{ mm}$



(b) $I = 1000 \text{ A}$, $R = 10 \text{ mm}$

Obr. 10: Radiální teplotní průběhy vypočtené stupňovou metodou ($p = 0,101 \text{ MPa}$, $T_w = 1000 \text{ K}$).

Numerické určení shody

Pro numerické určení shody radiálního teplotního profilu vypočteného stupňovou metodou a referenčního radiálního teplotního profilu vypočteného metodou parciálních charakteristik bylo jako nejvýhodnější zvoleno kritérium minimálního součtu relativních odchylek teplot. Po ukončení výpočtu daného teplotního profilu byla určena absolutní hodnota součtu relativních odchylek podle vztahu

$$S_{od}^{rel} = S_{od}^{rel} + \left| \frac{T_{ref,j} - T_j}{T_{ref,j}} \right|, \quad (9.6)$$

přičemž hodnoty T_j se vztahují k teplotnímu profilu vypočtenému metodou stupňovou a hodnoty $T_{ref,j}$ k teplotnímu profilu referenčnímu. Tento postup se opakoval i pro ostatní teplotní profily. Vypočtený profil nejbližší referenčnímu (tedy s minimální absolutní hodnotou součtu relativních odchylek teplot) byl zaznamenán do souboru včetně příslušných parametrů x_1, y_1, x_2, y_2 .

Chyby stupňové metody

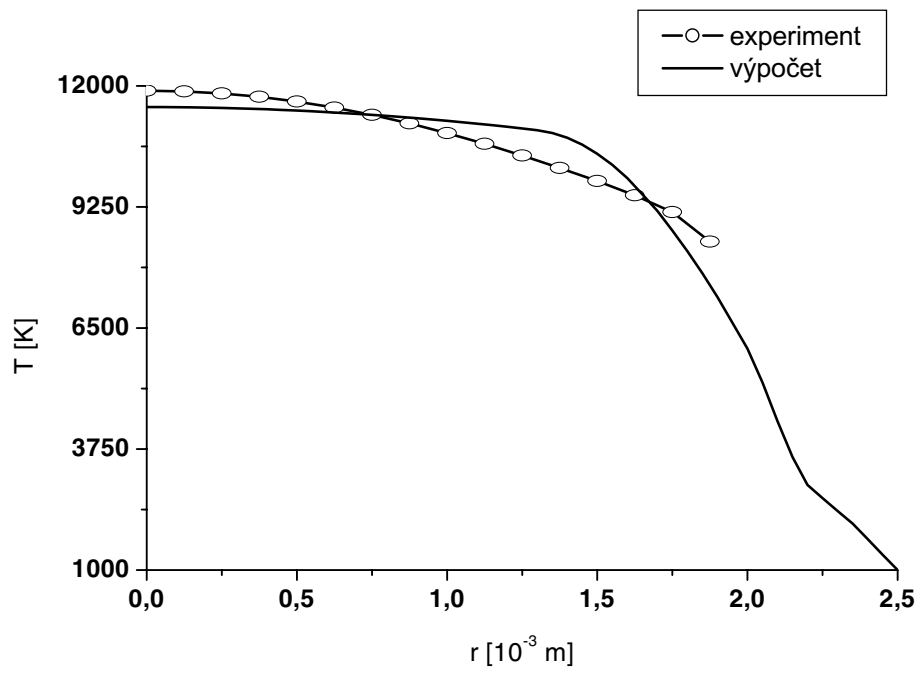
Pro porovnání hodnot vypočtených metodami stupňovou a referenční (parciálních charakteristik) byla zvolena absolutní hodnota relativní odchylky. Porovnávaly se dva hlavní údaje: intenzita elektrického pole E a teplota v ose T_0 . Bylo zjištěno, že maximální hodnota relativních odchylek teplot v ose je 22,8 %, ve většině případů nepřesahuje 10 %. Relativní odchylky intenzit elektrického pole se většinou pohybují v hodnotách do 20 %.

Srovnání s experimentem

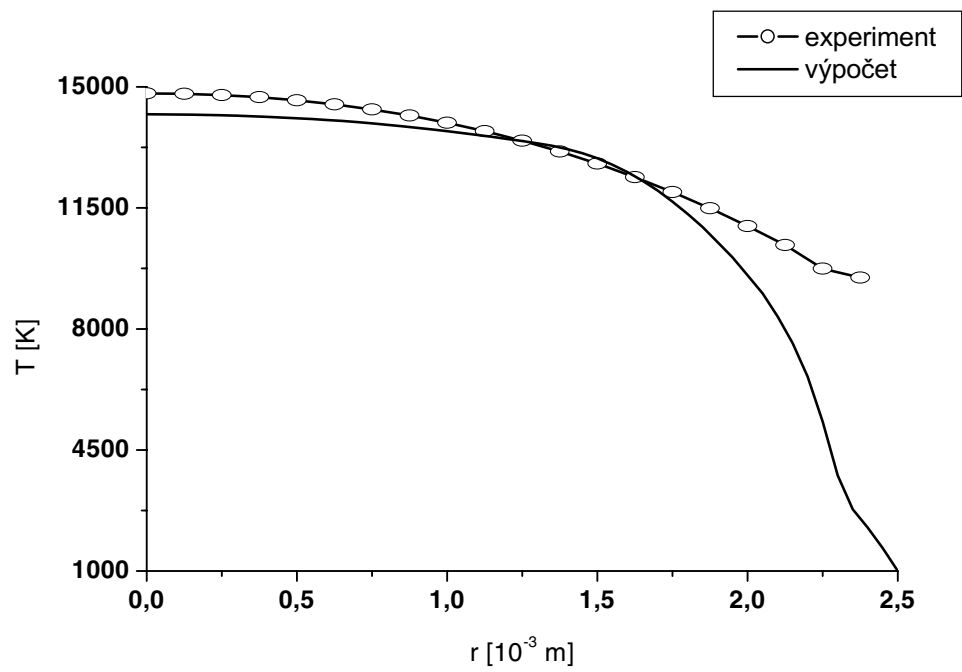
Radiální teplotní profily vypočtené stupňovou metodou byly rovněž porovnávány s teplotními profily získanými experimentálně. Experimentální data byla převzata z [23]. Srovnání je uvedeno v grafech na obr. 11.

V centrálních částech obou grafů je vidět vysoká shoda teplotního profilu vypočteného a teplotního profilu získaného experimentálně. Byly určeny relativní odchylky mezi teplotami v ose oblouku. Pro hodnoty $I = 50$ A, $R = 2,5$ mm tato odchylka činí 3,1 %, pro $I = 100$ A a $R = 2,5$ mm pak 4,1 %.

V okrajových částech oblouku jsou patrné odchylky mezi těmito profily. Ty jsou způsobeny tím, že při výpočtech není komplexně uvažován vliv teploty okolí a rovněž zjednodušeným přístupem aproximační metody k samoabsorpci záření v okrajových částech oblouku. Dalším důvodem je přesnost experimentálního měření, která klesá směrem k okraji oblouku. V případě prvního grafu dokonce nebylo měření provedeno až k okraji oblouku.



(a) $p = 0,101$ MPa, $I = 50$ A, $R = 2,5$ mm, $T_w = 1000$ K



(b) $p = 0,101$ MPa, $I = 100$ A, $R = 2,5$ mm, $T_w = 1000$ K

Obr. 11: Srovnání vypočtených průběhů teploty s experimentálními hodnotami převzatými z [23].

10 Závěr

Hlavní náplní práce je aplikace aproximační metody parciálních charakteristik při teoretickém rozboru transportu energie zářením v plazmatu elektrického oblouku hořícího v prostředí SF_6 a směsi $\text{SF}_6 + \text{PTFE}$.

Dále se tato práce zabývá aplikací aproximační metody „stupňové“ pro výpočet radiálního průběhu teploty a intenzity elektrického pole ve válcově stabilizovaném oblouku.

U většiny dosud užívaných aproximačních metod se podíl ztrát energie zářením jen odhaduje. V metodě parciálních charakteristik a rovněž v metodě stupňové, se tyto ztráty zářením počítají na základě fyzikálních zákonitostí.

Metoda parciálních charakteristik umožňuje efektivně řešit problém přenosu záření společně s problémy dynamiky plynů.

Pomocí parciálních charakteristik je možné vypočítat intenzitu záření I_r elektrického oblouku pro různé vstupní hodnoty. Je možné rovněž určit tok záření F a jeho divergenci. Lze tak sledovat vliv tlaku, poloměru oblouku, maximální teploty, teploty okolí, tvaru teplotního profilu – viz [25].

V disertační práci byly výpočty oproti [25] rozšířeny pro tlak až do 6 MPa, neboť se ukázalo, že tato data jsou žádána na jiných pracovištích (např. RWTH Aachen, Německo nebo School of Electrical Engineering, Seoul, Korea). Rovněž tak byly provedeny výpočty pro směsi SF_6 s teflonem. Polytetrafluorethylen, označovaný jako teflon nebo PTFE, má chemický sumární vzorec C_2F_4 . Spínací oblouk vzniká v moderních vypínačích typu self-blast (pracujících s náplní plynu SF_6) uvnitř trysky z PTFE, přičemž dochází k odpařování tohoto materiálu. Za určitých okolností [4] může být odpařování materiálu trysky tak intenzivní, že plazma oblouku obsahuje pouze produkty rozpadu PTFE. Bylo zjištěno, že se vzrůstajícím podílem PTFE roste i maximum toku záření F_{max} . Této závislosti neodpovídá případ 100 % PTFE. To je způsobeno tím, že zřejmě i malé množství síry má vliv na celkový efekt a plazma obsahující pouze produkty rozpadu PTFE žádnou síru neobsahuje. Rovněž se projevuje vliv tlaku při daném složení (zde jsou uvedeny průběhy pro tlak 0,5 MPa a 2,0 MPa). Pro větší tlak je vyšší nejen maximum, ale směrem k vyšším hodnotám je posunut i celkový charakter průběhu toku záření.

Pro větší urychlení výpočtů lze použít stupňovou metodu. Pro výpočet touto metodou musí být znám podíl záření na celkové energetické bilanci. Ten je dán parametrem C , jenž charakterizuje poměr vyzářeného výkonu P_{rad} a elektrického příkonu P_{ohm} . Tento parametr byl popsán čtyřmi souřadnicemi význačných bodů a tabelován pro různé hodnoty proudů a poloměrů plazmatu elektrického oblouku. S použitím těchto tabulek lze parametr C matematicky modelovat pro různé hodnoty vstupních veličin. Výstupem počítačového programu využívajícího stupňovou metodu je přímo teplotní profil, tedy radiální průběh teploty v plazmatu elektrického oblouku. Dalším výstupem je intenzita elektrického pole E . Výpočty teplotního profilu a intenzity elektrického pole pro konkrétní hodnoty vstupních parametrů trvají řádově desítky sekundy,

oproti jednotkám až desítkám sekund trvajícím výpočtům v případě, že se ke stanovení pole záření použije metoda parciálních charakteristik.

Metoda parciálních charakteristik byla použita jako referenční. Pro porovnání hodnot vypočtených metodou stupňovou a metodou referenční byla zvolena absolutní hodnota relativní odchylky. Porovnávaly se dva hlavní údaje: intenzita elektrického pole a teplota v ose plazmatu. Maximální hodnota relativních odchylek teplot v ose činí 22,8 %, přičemž ve většině případů nepřesahuje 10 %. Relativní odchylky intenzit elektrického pole se většinou pohybují v hodnotách do 20 %.

Radiální teplotní profily vypočtené stupňovou metodou byly rovněž porovnávány s teplotními profily získanými experimentálně. Experimentální data byla převzata z [23]. Byly určeny relativní odchylky mezi teplotami v ose oblouku. Pro vstupní hodnoty $I = 50$ A, $R = 2,5$ mm tato odchylka činí 3,1 %, pro $I = 100$ A a $R = 2,5$ mm pak 4,1 %.

Značná úspora strojového času při výpočtech je jedním z přínosů této práce, protože vyvinuté programové moduly pro řešení přenosu energie zářením lze implementovat do rozsáhlých programů (FLUENT, PHOENIX, CFX, apod.) pro řešení dynamiky plynů.

Výhodou obou metod je, že umožňuje řešit problémy přenosu energie zářením, aniž by byly vyžadovány hlubší znalosti z teorie záření plynů.

Výsledky této práce dokazují, že vyzářenou energii nelze v energetické bilanci elektrického oblouku zanedbat. Zejména při velkých proudech tekoucích obloukem je tato energie převažujícím činitelem při přenosu energie z plazmatu do jeho okolí.

Literatura

- [1] Aubrecht, V.: Ústní sdělení.
- [2] Aubrecht, V.: Radiální transport energie v plazmatu elektrického oblouku, habilitační práce, Brno, 1998.
- [3] Aubrecht, V., Lowke, J. J.: Calculations of radiation transfer in SF₆ plasmas using the method of partial characteristics, J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 27, pp. 2066–2073, 1994.
- [4] de Hesselle, M.: Modellierung der Strahlung und der Gasstromung in SF₆ Selbstblasleistungsschaltern, Dissertation RWTH Aachen, Shaker Verlag, 2001, ISBN 3-8265-9125-9.
- [5] Max F. Hoyaux: Arc Physics, Springer-Verlag, New York, 1968.
- [6] Boulos Maher I., Fauchais P., Pfender E.: Thermal Plasmas, Fundamentals and Applications, Vol. 1, Plenum Press, New York, 1994.
- [7] Lowke J. J., Capriotti E. R.: Calculation of temperature profiles of high pressure electric arcs using the diffusion approximation for radiation transfer, J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer, Vol. 9, pp. 207–236, 1969.
- [8] Griem, H. R., Spektroskopija plazmy, Atomizdat, Moskva, 1969.
- [9] Soloukhin, R. I., Radiative Heat Transfer in High-Temperature Gases, Hemisphere, London, 1980.
- [10] Shayler P. J., Fang M. T. C., Radiation transport in wall-stabilised nitrogen arcs, J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 11, pp. 1743–1756, 1978.
- [11] Bárta, K., Vostracký, Z.: Spínací přístroje velmi vysokého napětí, SNTL, Praha, 1983.
- [12] Novotný, V.: Využití elektronegativního plynu SF₆ v elektrotechnice, SNTL, Praha, 1982.
- [13] Aubrecht, V., Gross, B., Peška, L., Coufal, O.: Záření plazmatu spínacího oblouku hořícího v SF₆, sv. A-38, str. 219–234, Knihnice VUT, Brno, 1989.
- [14] Gross, B.: Ekvidenzitometrická diagnostika plazmatu spínacího oblouku I, sv. A-38, str. 9–79, Knihnice VUT, Brno, 1989.
- [15] Gross, B., Peška, L.: Ekvidenzitometrická diagnostika plazmatu spínacího oblouku II, sv. A-38, str. 207–217, Knihnice VUT, Brno, 1989.
- [16] Aubrecht, V., Gross, B., Peška, L.: Energetická bilance osově souměrného oblouku hořícího v SF₆ s respektováním vyzářené energie, Knihnice VUT, Brno, 1990.
- [17] Aubrecht, V.: Záření plazmatu spínacího oblouku hořícího v SF₆, diplomová práce UJEP, Brno 1987.
- [18] Gross, B.: Technika plazmatu, skriptum VUT, Brno, 1985.
- [19] Havelka, O.: Elektrické přístroje I, skriptum VUT, Brno, 1979.
- [20] Horák, Z., Krupka, F., Šindelář, V.: Technická fyzika, SNTL, Praha, 1961.
- [21] Šindelář, V., Smrž, L.: Nová soustava jednotek, SPN, Praha, 1968.

- [22] Černá, R., Machalický, M., Vogel, J., Zlatník, Č.: *Základy numerické matematiky a programování*, SNTL, ALFA, Praha, 1987.
- [23] Hardt, P., Schlenk, M., Schulz-Gulde, E., Electrical and thermal conductivities of sulfur hexafluoride wall-stabilized arcs, in *Proc. XXIst Int. Conf. Phen. in Ionized Gases* (G. Ecker, ed.), Vol. II, (Bochum, Germany), pp. 56–57, 1993.
- [24] Barák, J.: Záření plazmatu elektrického oblouku v SF₆, Mezinárodní studentská vědecká a odborná konference Elektroenergetika a silnoprúdová elektrotechnika '97, Bratislava, Slovakia, 1997.
- [25] Barák, J.: Energetická bilance spínacího oblouku s respektováním plazmatem vyzářené energie, diplomová práce FEI VUT, Brno, 1997.
- [26] Aubrecht V., Barák J., Bušov B., Hanáček P., Štefka J.: Počítačová vizualizace pohybu elektrického oblouku ve zhášecí komoře VN vypínače, *Inženýrská mechanika '98*, Vol. 1., pp. 11–15, Svratka, 1998.
- [27] Aubrecht V., Barák J.: Radiative Heat Transfer in Cylindrical SF₆ Arc Plasma, Proceedings of 11th Symposium on Elementary Processes and Chemical Reactions in Low Temperature Plasma, Book of Contributed Papers, Part 1, pp. 19–22, Low Tatras, Slovakia, 1998.
- [28] Aubrecht V., Barák J.: Radiative Heat Transfer in Cylindrical SF₆ Arc Plasma, Proceedings of XIIIth Symposium on Physics of Switching Arc, pp. 190–193, Brno, Czech Republic, 1998.
- [29] Aubrecht V., Barák J., Štefka J.: Radiation of SF₆ Arc Plasma as a Function of the Plasma Pressure, Proceedings of 12th Symposium on Application of Plasma Processes, pp. 130–131, Liptovský Jan, Slovakia, 1999.
- [30] Štefka J., Barák J., Aubrecht V.: Visualization of a Switching Arc Plasma, Proceedings of 12th Symposium on Application of Plasma Processes, pp. 232–233, Liptovský Jan, Slovakia, 1999.
- [31] Aubrecht V., Štefka J., Barák J.: Vizualizace spínacího oblouku ve zhášecí komoře VN vypínače, Conference Engineering Mechanics 99, pp.755–758, Svratka, Czech Republic, 1999.
- [32] Barák, J.: Záření plazmatu elektrického oblouku v SF₆, Transfer99, str. D3–4, Brno, 1999.
- [33] Aubrecht V., Barák J.: Radiative Heat Transfer in High-Pressure SF₆ Arc Plasmas, Proceedings of XXIVth International Conference on Phenomena In Ionized Gases, Vol. V, pp. 21–22, Warsaw, Poland, July 11–16, 1999.
- [34] Štefka J., Aubrecht V., Barák J.: Animation of Electric Arc in High-Power Circuit Breaker Proceedings of 3rd Czech-Russian Seminar on Project Contact No 101 (98) "Electrophysical and Thermophysical Processes in Low-Temperature Plasma", pp. 108–112, Brno, Czech Republic, 1999.
- [35] Barák, J.: Záření plazmatu elektrického oblouku v SF₆–SF₆ Arc Plasma Radiation, Sborník doktorandských prací, Brno, 1999.

- [36] Barák, J.: Calculation of an Arc Plasma Temperature, 3rd Czech-Russian Seminar "Electrophysical and Thermophysical Processes in Low Temperature Plasma", pp. 50–53, Brno, Czech Republic, 1999.
- [37] Barák, J.: The Cascade Method of Calculation of an SF₆ Arc Plasma Temperature, 4rd Czech-Russian Seminar "Electrophysical and Thermophysical Processes in Low Temperature Plasma", pp. 49–51, Brno, Czech Republic, 2000.
- [38] Barák, J.: Výpočet radiálního průběhu teploty v elektrickém oblouku, Aplikovaná elektromechanika, Brno, Czech Republic, 2000.

Curriculum vitae

Osobní údaje:

Jméno a příjmení: Josef Barák

Datum narození: 26. 6. 1971

Vzdělání a praxe:

- 1985–1989 Gymnázium Moravské Budějovice, maturita s vyznamenáním
- 1989–1997 Fakulta elektrotechniky a informatiky (FEI), VUT v Brně
1995 ukončeno bakalářské studium s prospěchem výborně (pořadí 5. z 12 v oboru), obhájen technický projekt na téma „Matematický model stejnosměrného motoru“
- 1997 účast na Mezinárodní studentské vědecké a odborné konferenci „Elektroenergetika a silnoproudá elektrotechnika '97“, konané ve dnech 23.–24. června v Bratislavě, čestné uznání za příspěvek na téma „Záření plazmatu elektrického oblouku v SF₆“
- 1997 ukončeno inženýrské studium s prospěchem výborně (pořadí 12. z 29 v oboru), obhájena diplomová práce na téma „Energetická bilance spínacího oblouku“
- 1997 přijat na interní formu postgraduálního doktorandského studia FEI VUT v Brně, obor Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika
- 1999 vykonána státní doktorská zkouška
- 1995–1997 doplňující studium pro získání pedagogické způsobilosti, závěrečná zkouška vykonána s vyznamenáním, obhájena závěrečná práce „Diagnosticke metody v procesu vyučování“
- 1999–dosud učitel na střední a vyšší odborné škole, správce počítačové sítě

Publikace

autor, resp. spoluautor 15 publikací vztahujících se k řešené problematice

Jazykové znalosti

angličtina, ruština

Summary

The thesis deals with Elenbaas-Heller equation calculation with respect to energy transfer radiation in the electric arc plasma. The energy transfer radiation becomes especially evident when high arc plasma pressure is over 0.101 MPa and temperatures higher than 10 000 K. Two methods are used while solving this problem: the partial characteristics method and the cascade one.

Partial characteristics method describes both the emission processes in the central parts of plasma and the predominant absorption in its cooler peripheral areas at the same time. It is based on definition of two material functions – SOM and ΔSIM . Taking full advantage of the previously developed database of these functions for different parameters enables to solve the radiation energy exchange in any arc plasma geometry in effective way.

The thesis contains calculations of radiation energy exchange which were extended for pressures up to 6 MPa. Calculations for plasma arc burning in composition of SF_6 and PTFE (Teflon, polytetrafluorethylen) gas (arc burning in self-blast circuit breakers) were carried out too.

Radiation in the cascade method is defined by a parameter C , which characterizes ratio of radiation power P_{rad} and electric input P_{ohm} (Ohmic heating). This parameter was described by means of four significant points and it was tabulated for various input parameters (arc current, arc radius, plasma pressure and wall temperature). Maximum correspondence between reference radial temperature profiles (computed by the method of partial characteristics, see [2]) and radial temperature profiles computed by the cascade method was acquired. Radial temperature profiles and the intensity of electric field E are results of the newly created computer program that uses the cascade method. The radial temperature profile as well as the intensity of electric field calculations take a number of tenths of the second in comparison with tens and units of seconds with the method of partial characteristics.

Calculations carried out by the cascade method and those by the method of partial characteristics as well as the results obtained from experiments are compared in the conclusion.