



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

VZÁJEMNÉ PŮSOBENÍ KONSTRUKČNÍCH MATERIÁLŮ A SPÍNACÍHO OBLOUKU VE SPÍNACÍCH PŘÍSTROJÍCH NÍZKÉHO NAPĚTÍ

INVESTIGATION ON THE INTERACTION BETWEEN CONSTRUCTION MATERIALS
AND SWITCHING ARC IN LOW VOLTAGE SWITCHING DEVICES

ZKRÁCENÁ VERZE PHD THESIS

SHORT VERSION OF PHD THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. David Šimek

ŠKOLITEL

SUPERVISOR

Mgr. Petr Kloc, Ph.D.

OPONENTI

OPPONENTS

doc. Ing. Pavel Mindl, CSc.

doc. Mgr. Pavel Slaviček, Ph.D.

Klíčová slova

Spínací přístroje nízkého napětí; elektrický oblouk; měření tlaku; optická emisní spektroskopie; plastové materiály.

Keywords

Low voltage switchgear; electric arc; pressure measurement; optical emission spectroscopy; plastic materials.

Místo uložení práce

Práce je k dispozici na Vědeckém oddělení děkanátu FEKT VUT v Brně.

© Ing. David Šimek, 2021

ISBN 80-214-

ISSN 1213-4198

OBSAH

1 ÚVOD	4
2 ZKOUMÁNÍ INTERAKCE OBLOUKU A KONSTRUKČNÍCH MATERIÁLŮ 1	6
2.1 POPIS EXPERIMENTŮ A METODIK	6
2.1.1 ZKOUMANÉ VZORKY	6
2.1.2 SCHÉMA A POPIS MĚŘICÍHO ŘETĚZCE	7
2.1.3 PARAMETRY EXPERIMENTŮ	8
2.2 VÝSLEDKY MĚŘENÍ A DISKUSE	8
2.2.1 SLEDOVÁNÍ OBLOUKU POMOCÍ VYSOKORYCHLOSTNÍ KAMERY	8
2.2.2 POMĚR ÚSPĚŠNÝCH A NEÚSPĚŠNÝCH VYPÍNAČÍCH CYKLŮ	8
2.2.3 VYPÍNAČÍ ČASY	9
2.2.4 OBLOUKOVÁ ENERGIE	10
2.2.5 HMOTNOSTNÍ ÚBYTEK MATERIÁLU IZOLAČNÍ ZHÁŠECÍ KOMORY	10
3 ZKOUMÁNÍ INTERAKCE OBLOUKU A KONSTRUKČNÍCH MATERIÁLŮ 2	12
3.1 POPIS EXPERIMENTŮ A METODIK	12
3.1.1 SCHÉMA A POPIS USPOŘÁDÁNÍ EXPERIMENTŮ	12
3.1.2 PROBLEMATIKA MĚŘENÍ TLAKU	13
3.1.3 PROBLEMATIKA DIAGNOSTIKY OBLOUKU POMOCÍ OPTICKÉ EMISNÍ SPEKTROSKOPIE	13
3.2 STUDIUM VÝVOJE PŘETLAKU VE ZHÁŠECÍ KOMOŘE	14
3.2.1 VÝVOJ PŘETLAKU VE ZHÁŠECÍ KOMOŘE PŘI POUŽITÍ MATERIÁLU POLY 3	14
3.2.2 VÝVOJ PŘETLAKU VE ZHÁŠECÍ KOMOŘE PŘI POUŽITÍ MATERIÁLU POLY 1	14
3.2.3 VÝVOJ PŘETLAKU VE ZHÁŠECÍ KOMOŘE PŘI POUŽITÍ MATERIÁLU POLY 2	15
3.2.4 VÝVOJ PŘETLAKU VE ZHÁŠECÍ KOMOŘE PŘI POUŽITÍ MATERIÁLU POLY 5	16
3.2.5 VÝVOJ PŘETLAKU VE ZHÁŠECÍ KOMOŘE PŘI POUŽITÍ MATERIÁLU POLY 4	16
3.3 ZKOUMÁNÍ SLOŽENÍ PLAZMATU POMOCÍ OPTICKÉ EMISNÍ SPEKTROSKOPIE	17
3.3.1 ZKOUMÁNÍ SLOŽENÍ PLAZMATU PŘI POUŽITÍ MATERIÁLU POLY 3	17
3.3.2 ZKOUMÁNÍ SLOŽENÍ PLAZMATU PŘI POUŽITÍ MATERIÁLU POLY 4	19
3.4 VÝPOČET TEPLoty ZE SPEKTER ZÁŘENÍ OBLOUKU	20
3.4.1 PRŮBĚH ELEKTRONOVÉ TEPLoty PLAZMATU PŘI POUŽITÍ MATERIÁLU POLY 3	21
3.4.2 PRŮBĚH ELEKTRONOVÉ TEPLoty PLAZMATU PŘI POUŽITÍ MATERIÁLU POLY 4	22
4 ZÁVĚR	23
LITERATURA	26

1 ÚVOD

Elektrickému obvodu k funkčnosti principiálně postačuje zdroj elektrické energie a spotřebič připojený vodiči přímo ke zdroji. Takový obvod pracuje nepřetržitě až do doby, kdy dojde k poruše, nebo vyčerpání energie zdroje. V případě poruchy může dojít u tohoto obvodu ke dvěma případům. Prvním případem je rozpojení obvodu, ukončení chodu spotřebiče a ponechání zbytkové energie ve zdroji. Toto může být způsobeno přerušením proudovodné dráhy, které je však trvalé, až do doby opravy. Druhou možností je vznik zkratu v obvodu a vybavení veškeré zbytkové energie zdroje do místa zkratu, kde se majoritní část elektrické energie přemění na energii tepelnou a světelnou.

Požadavky na moderní elektrické instalace jsou přímo v rozporu s použitím zmiňovaného jednoduchého obvodu. Hlavními požadavky jsou: bezpečnost, spolehlivost a co největší úspora pořizovacích i provozních nákladů. Je tedy nutné sledovat, zda elektrická energie z obvodu neuniká do součástí, kde by mohla ohrozit osoby a zvířata, popřípadě způsobit škody na majetku. V případě zkratu, nebo přetížení je nezbytné tento typ poruchy co nejrychleji detekovat a zamezit přívodu další energie do místa poruchy. Také je třeba do spotřebiče dodávat energii ideálně pouze v době, kdy se spotřebič využívá k plnění svojí funkce.

K zajištění výše zmíněných funkcí slouží spínací přístroje. Spínací přístroje umožňují připojování a odpojování, jištění a spínání elektrických obvodů. Při spínání zatížených elektrických obvodů vzniká mezi kontakty klasických spínacích přístrojů¹ elektrický oblouk. Tento jev nastává také ve spínačích domácích spotřebičů, nebo i v běžném elektroinstalačním spínači, tedy v zařízeních používaných v každodenním životě i laiky. V těchto přístrojích nastává za normálního provozu spínání při jmenovitých prouděch daných zařízením. Tyto spínací přístroje jsou ve většině případů opatřeny pouze kontakty z kompozitů s materiály odolnými proti působení oblouku, ale neobsahují speciální konstrukční řešení pro zhášení elektrického oblouku, jednak z důvodu spínání relativně nízkých proudů, ale v dnešní době především kvůli požadavku na nízkou cenu.

Problém s úspěšným uhašením oblouku výše popsaným systémem může nastat tehdy, když zapínáme a vypínáme proudy vyšších hodnot. Tento problém je spojen především s vyšší energií oblouku. Zmíněné spínače (jak elektroinstalační, tak běžné spínače na většině zařízeních používaných laiky) nejsou obvykle konstrukčně uzpůsobené ke zhášení elektrického oblouku vzniklého při vypínání proudu výrazně většího než jmenovitého. Tedy, když by se uživatel snažil o rozepnutí nejištěného obvodu elektroinstalačním spínačem při nadproudu (například zkrat v objímce, nebo na vlákne žárovky), byl by tento pokus s vysokou pravděpodobností neúspěšný. Oblouk se v elektroinstalačních spínačích ve většině případů zháší na základě vhodné rychlosti oddálení kontaktů. Předpokladem tohoto principu je, že oblouk nebude mít dostatek energie pro hoření a během oddalování kontaktů uhasne. Pokud by došlo k plnému oddálení kontaktů u těchto přístrojů a elektrický oblouk by nebyl uhašen, došlo by s největší pravděpodobností k poškození

¹ Spínací přístroje klasické koncepce využívající jako hlavní funkční prvek kontaktní dvojici. V poslední době se objevují na trhu také přístroje pracující na principu výkonových polovodičových součástek, těmito přístroji se práce nezabývá.

zařízení. Před takovými zařízení musejí být v elektrických rozvodech z těchto důvodů předřazeny ochranné a jisticí přístroje.

Vyšší hodnoty proudů (proudy u velkých spotřebičů, přetížení a zkratové proudy) jsou vypínány a zapínány pomocí zařízení s konstrukčními prvky určenými ke zvýšení vypínacího výkonu (masivní kontaktní ústrojí, vodiče oblouku, zhašecí komory, speciální tvar proudovodné dráhy, permanentní magnety, aj.). Pokud nedojde v těchto silnoproudých přístrojích k uhašení oblouku vlivem oddalování kontaktů, je hořící oblouk Lorentzovou silou přesunut z oblasti kontaktů po vodičích oblouku do zhašecí komory. Ve zhašecí komoře dochází k uhašení oblouku využitím některého z principů zhašení, popřípadě jejich kombinací.

Nejhojněji využívanými principy zhašení jsou: ochlazování oblouku prodloužením jeho délky v roštové izolační komoře, tlakovzdušný odfuk vodivého plazmatu² mimo oblast kontaktů, rozdělení oblouku v roštové feromagnetické komoře, nebo využitím termální disociace speciálních plynů na molekuly se schopností vazby volných elektronů.

I přesto, že je elektrický oblouk úspěšně uhašen, dochází vlivem vysoké teploty k poškození konstrukčních materiálů v těsné blízkosti, a především v kontaktu s obloukem. Míra poškození závisí na mnoha parametrech, např. teplota tání a vypařování, tepelná kapacita, tepelná vodivost použitých materiálů, délka expozice, teplota oblouku, aj.

Úkolem návrhářů přístrojů je optimalizovat konstrukci přístroje tak, aby byla zachována, případně vylepšena funkce a životnost při udržení požadovaného finančního rámce. Z hlediska konkurenceschopnosti je nezbytné také provádět neustálé inovace položek aktuálního produktového portfolia. Díky tomuto požadavku vzniká potřeba použití nových výkonných a cenově výhodných materiálů pro konstrukci elektrických přístrojů. Tyto materiály jsou nově vyvíjeny, popřípadě přebírány z jiných odvětví průmyslu. V drtivé většině u těchto materiálů není známé jejich chování v interakci se spínacím obloukem, protože to nebylo nutné pro dosavadní aplikační odvětví. V elektrotechnice se však jedná o jeden z nejdůležitějších údajů při zvažování použití daného materiálu. Pokročilé moderní experimentální metody umožňují podrobné zkoumání chování těchto pro elektrotechniku nových materiálů v souvislosti s působením spínacího oblouku. Vybrané metody budou použity v této disertační práci a výsledky budou využity právě pro optimalizaci konstrukce elektrických přístrojů v praxi.

² Je často označováno jako čtvrté skupenství hmoty. Jedná se o kvazi-neutrální plyn, ve kterém je způsobena vodivost přítomností volných nosičů elektrického náboje. Částice v plazmatu vykazují kolektivní chování.

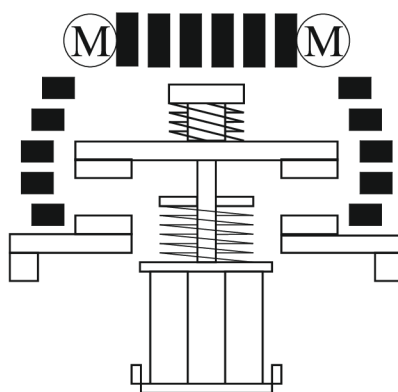
2 ZKOUMÁNÍ INTERAKCE OBLOUKU A KONSTRUKČNÍCH MATERIÁLŮ 1

Následující kapitola je zaměřena na experimentální zkoumání interakce oblouku a vybraných konstrukčních materiálů z hlediska elektrických parametrů vypínacího procesu (konkrétně úspěšnost vypínání při různých zátěžích, vypínací časy, spínací přepětí, Joulův integrál a oblouková energie) a vlivů oblouku na tyto materiály (hmotnostní úbytky součástí proudovodné dráhy a izolační zhášecí komory vyrobené z různých vysoce výkonných plastů). Pozornost je též věnována sledování chování spínacího oblouku pomocí vysokorychlostní kamery Photron SA-X2. Měření probíhala na experimentální zhášecí komoře s elektromagnetickým pohonem podobné stykači v laboratoři spínacích přístrojů ve Vědecko-technologickém parku profesora Lista na VUT v Brně.

2.1 Popis experimentů a metodik

2.1.1 Zkoumané vzorky

V rámci experimentů byl prověřován vliv použitého materiálu experimentální zhášecí komory na elektrické parametry vypínacího procesu experimentálního přípravku, viz obrázek 1.



Obrázek 1 – Principiální vnitřní schéma přípravku pro testování vlivu oblouku na blízké materiály (pohled z boku).

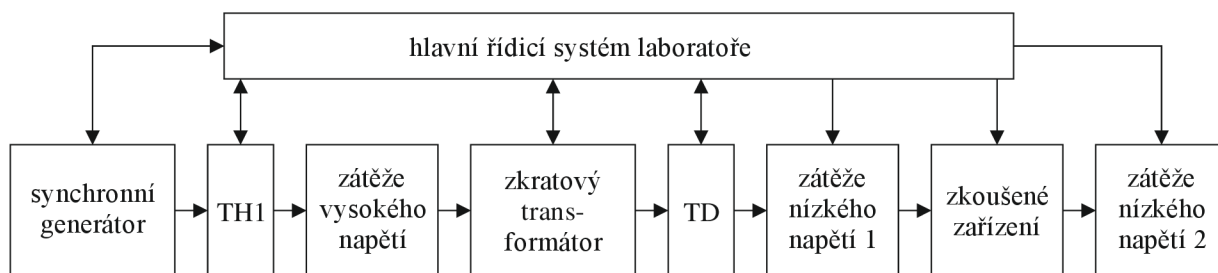
Byly provedeny experimenty ke zjištění vlivů oblouku na výkonné plastové materiály, z důvodu jejich porovnání. Tyto materiály se totiž vyznačují výbornou zpracovatelností a příznivou cenou a jsou hojně využívány v různých odvětvích průmyslu. Byly by tedy vhodnými adepty na použití v elektrických přístrojích jako hlavní plastové materiály pro kontakt se spínacím obloukem, ať už pro výrobu pouzdra, nebo roštové izolační zhášecí komory. V případě provedených experimentů byla z těchto materiálů vyrobena roštová izolační komora. Součásti roštové zhášecí komory jsou vyznačeny černou výplní, viz obrázek 1.

Označení materiálu používané při experimentech	Polymer
Poly 1	PA12
Poly 2	PA46
Poly 3	PA66
Poly 4	PBT-GF30 FR
Poly 5	PK

Tabulka 1 – Soupiska zkoumaných výkonných plastů.

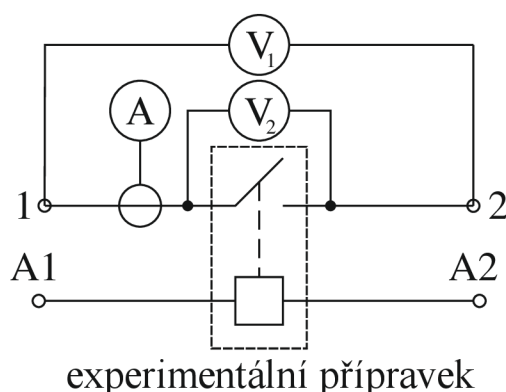
2.1.2 Schéma a popis měřicího řetězce

Vzhledem k širokým možnostem zmíněné laboratoře byly zváženy a odzkoušeny různé možnosti uspořádání měřicího řetězce. Zde je uvedeno konečné schéma, které se osvědčilo jako nejlepší řešení.



Obrázek 2 – Blokové schéma silové části obvodu.

Napětí na zkoumaném zařízení bylo měřeno duplicitně jednak přímo na svorkách zařízení (V_2) a také na zkušební stolici (V_1) pomocí měřicího systému laboratoře (především z důvodu dvojí kontroly). Proud byl měřen proudovým snímačem LEM IT-700S (A).



Obrázek 3 – Blokové schéma měření elektrických veličin.

2.1.3 Parametry experimentů

Parametry zkušebního obvodu zobrazuje tabulka 2.

Pořadové označení konfigurace zátěže	Typ napětí	U (V)	I (A)	τ (ms)
1	DC	900	104	0,10
2	DC	900	201	0,12
3	DC	900	308	0,11
4	DC	900	400	0,10

Tabulka 2 – Tabulka elektrických parametrů používaných při experimentech.

2.2 Výsledky měření a diskuse

Během měření bylo získáno velké množství dat. Rozšířená data lze nalézt v plné verzi práce.

2.2.1 Sledování oblouku pomocí vysokorychlostní kamery

Během všech testů byla pořízena vysokorychlostní videa o snímkovací frekvenci 20 000 snímků za sekundu (FPS) pomocí vysoko-rychlostní kamery Photron SA-X2. Důvod použití byla především vizuální kontrola chování oblouku ve zhášecí komoře a také ověření vlivu použitých materiálů na bezpečnost produktu. Plná verze práce obsahuje výstřižky s ohledem na klíčové (zlomové) momenty v pořízených videích.

Díky vysokorychlostnímu videu bylo možno pozorovat, jak horký plyn v případě neúspěšného pokusu s materiálem Poly 5 uniká z přístroje, což by mohlo stejně jako u materiálu Poly 4 ohrozit osoby v blízkosti zařízení.

2.2.2 Poměr úspěšných a neúspěšných vypínacích cyklů

Tato část pozorování je založena na zhodnocení počtu úspěšných uhašení elektrického oblouku. Experimentální přípravek byl vystaven čtyřem různým zátěžím, viz tabulka 2. Za úspěšný cyklus bylo zvoleno uhašení oblouku do 40 ms.

Tabulka 3 zobrazuje počty úspěšných a neúspěšných uhašení elektrického oblouku ve zhášecí komoře experimentálního přípravku pro různé parametry obvodu a všech pět zkoumaných materiálů.

Konfigurace zátěže	Poly 1		Poly 2		Poly 3		Poly 4		Poly 5	
	úspěšné	neúspěšné	úspěšné	neúspěšné	úspěšné	neúspěšné	úspěšné	neúspěšné	úspěšné	neúspěšné
1	10	0	10	0	10	0	10	0	10	0
2	10	0	10	0	10	0	9	1	10	0
3	10	0	10	0	10	0	1	1	1	1
4	10	1	7	3	10	0	0	1	1	1

Tabulka 3 – Shrnutí výsledků z hlediska úspěšnosti zhášení oblouku.

Pozn.: Při konfiguraci zátěže 3 a 4 došlo při některých neúspěšných pokusech k takovému poškození, že nebylo možné v experimentech pokračovat. Proto nebylo u materiálu Poly 4 a Poly 5 provedeno všech 10 testů na zátěžích 3 a 4.

Nejllepších výsledků bylo dosaženo s materiálem Poly 3, se kterým bylo provedeno 40 úspěšných testů.

Velmi dobrého výsledku bylo dosaženo i s materiálem Poly 1, který po 31. testu po vychlazení absolvoval celých 10 cyklů na nastavení 4.

Materiál Poly 2 lze vyhodnotit jako použitelný, nikoli však pro čtvrté nastavení výkonových parametrů obvodu.

Materiál Poly 5 úspěšně prošel testováním s parametry 1 a 2, u vyšších parametrů docházelo již k neúspěšným pokusům s cca 50% pravděpodobností. Verdiktem je tedy možnost použití pro parametry 1 a 2.

Nejhůře dopadl materiál Poly 4, u kterého nastaly problémy již u druhého výkonového nastavení. Je možné jej tedy použít pouze pro první nastavení.

2.2.3 Vypínací časy

Následující část zobrazuje doby trvání zhášení elektrického oblouku uvnitř experimentálního přípravku. Opět byla aplikována čtyři různá výkonová nastavení pro každý z materiálů.

Konfigurace zátěže	Poly 1		Poly 2		Poly 3		Poly 4		Poly 5	
	t_t		t_t		t_t		t_t		t_t	
	(ms)	σ	(ms)	σ	(ms)	σ	(ms)	σ	(ms)	σ
1	6,10	0,83	5,74	0,89	4,73	0,72	8,27	1,45	6,76	0,93
2	11,37	3,66	16,78	4,83	8,27	2,29	30,06	11,07	16,43	7,76
3	18,84	4,41	19,42	7,93	11,38	1,68	34,31*	10,19	42,41*	3,15
4	19,62	7,53	27,29*	10,28	16,93	4,94	46,20*	0,00	29,82*	11,16

*více než jeden pokus ze série byl neúspěšný.

Tabulka 4 – Přehled průměrných vypínacích časů a jejich odchylek při experimentech.

Tabulka 4 zobrazuje přehled průměrných vypínacích časů experimentálního přípravku za použití zkoumaných materiálů při různých parametrech zátěže. Z hlediska vypínacích časů dopadl nejlépe opět materiál Poly 3. Dosáhl nejkratších průměrných vypínacích časů pro všechny konfigurace zátěže. Pro nejnižší zátěž 1 jde o vypínací čas dokonce kratší než 5 ms. Stále dobrého výsledku dosáhl také materiál Poly 1, všechny jeho vypínací časy se pohybovaly pod 20 ms. Nejhorších výsledků dosáhl materiál Poly 4, již u druhé konfigurace zátěží je jeho výsledný průměrný vypínací čas více než 30 ms.

Lze konstatovat, že všechny materiály by bylo možné použít pro vypínání zátěže 1, pro zátěž 2 se jeví jako přijatelné všechny kromě Poly 4. Konfiguraci zátěže 3 úspěšně absolvovaly Poly 1-3 a pro nejtěžší zátěž 4 jsou vhodné pouze Poly 3 a Poly 1.

2.2.4 Oblouková energie

Oblouková energie udává množství elektrické energie, které je během vypínacího procesu přeměněno uvnitř elektrického přístroje na jiné typy energie. V případě elektrického oblouku se jedná především o energii kinetickou, která souvisí s pohybem částic ve výbojovém prostoru, potenciální energii částic, energii záření a tepelnou energii. Velikost této energie je jeden z klíčových parametrů, rozhodujících při posuzování možnosti poškození vnitřních součástí přístrojů. Oblouková energie během vypínacího procesu je dána:

$$W_a = \int_{t_a}^{t_t} i(t) u(t) dt \quad (\text{J}) \quad (1)$$

kde t_a je čas, kdy je zaznamenán růst odporu kontaktů vlivem poklesu přitlačné síly díky uvolnění elektromagnetu, t_t označuje konec průtoku proudu a výskyt zotaveného napětí, i je proud, a u je napětí. Tabulka 5 reprezentuje průměrné hodnoty obloukové energie pro zkoumané materiály při různých výkonových parametrech.

Konfigurace zátěže	Poly 1		Poly 2		Poly 3		Poly 4		Poly 5	
	W _a		W _a		W _a		W _a		W _a	
	(kJ)	σ	(kJ)	σ	(kJ)	σ	(kJ)	σ	(kJ)	σ
1	0,06	0,02	0,06	0,02	0,05	0,01	0,10	0,02	0,08	0,02
2	0,32	0,15	0,53	0,19	0,23	0,09	0,89	0,38	0,49	0,30
3	0,84	0,24	0,89	0,46	0,50	0,11	1,69*	0,59	2,15*	0,23
4	1,14	0,17	1,68*	0,77	1,00	0,32	3,13*	0,00	1,92*	0,86

*více než jeden pokus ze série byl neúspěšný.

Tabulka 5 – Přehled průměrné obloukové energie a jejich odchylek při experimentech.

Materiály Poly 3 a Poly 1 opět dopadly nejlépe, dosahují nejnižších hodnot obloukových energií při všech konfiguracích zátěže. Nejméně příznivých hodnot dosáhl materiál Poly 4.

2.2.5 Hmotnostní úbytek materiálu izolační zhášecí komory

Teplota elektrického oblouku je mnohem vyšší než doporučená provozní teploty plastů, dokonce vyšší než teplota kompletního rozpadu řetězců všech známých plastových materiálů. Při vystavení plastu tepelným a radiačním účinkům elektrického oblouku dochází ke sdílení tepla z oblouku do materiálu, degradaci materiálu UV zářením, měknutí plastu a jeho vypařování. Nedochozí jen k poškození vlastního materiálu, ale také k depozici jeho výparů na ostatních konstrukčních součástech. Tímto jevem může dojít k vytvoření parazitní vodivé cesty mezi součástmi s elektrickým potenciálem, což může způsobit selhání přístroje vlivem průrazu izolačních cest. V případě plastů jde nejčastěji o vrstvy deponovaného uhlíku.

V této části experimentu probíhalo vážení izolační zhášecí komory po každém experimentu a následný výpočet úbytku hmotnosti materiálu zhášecí komory. Tabulka 6 obsahuje průměrné hodnoty úbytku materiálu odpařením z konstrukce izolační zhášecí komory během působení oblouku při spínacím procesu.

Konfigurace zátěže	Poly 1 Δm_k (mg)	Poly 2 Δm_k (mg)	Poly 3 Δm_k (mg)	Poly 4 Δm_k (mg)	Poly 5 Δm_k (mg)
1	0,24	0,01	0,34	0,38	0,37
2	4,56	9,21	3,02	19,69	8,40
3	13,51	17,18	9,42	67,15	59,35
4	20,34	39,96	19,70	158,90	58,95

Tabulka 6 – Průměrné hmotnostní úbytky materiálů zhášecích komor při různých zátěžích.

Bylo zjištěno, že hmotnostní úbytek nelze prohlásit za přímo úměrný počtu spínacích cyklů. Jedním z požadavků na tuto dizertační práci bylo nalézt parametr, který lze vyhodnotit pouze z průběhu napětí a proudu a který by dostatečně přesně udal hodnotu úbytku materiálu konkrétní konstrukce zhášecí komory bez nutnosti vážení. Z tohoto důvodu bylo nutné nalézt tento parametr a stanovit empirické rovnice sloužící k nahrazení procesu vážení výpočtem.

Při hledání veličiny, která by byla vhodná pro výpočet úbytku hmotnosti zhášecí komory, bylo použito závislosti úbytku hmotnosti materiálu Poly 1 na zvolených vyhodnocených elektrických veličinách při experimentech se zátěží 4.

Z výpočtů bylo zjištěno, že nejvhodnější sledovanou veličinou pro výpočet úbytku hmotnosti je oblouková energie W_a s korelačním koeficientem 0,94.

Následně byly všechny úbytky hmotnosti vyneseny do grafů v závislosti na obloukové energii. K proložení vnesených dat byly použity různé funkce. Výběr typu závislosti byl proveden na základě Anscombeho kvartetu.

Empiricky zjištěná rovnice pro materiál Poly 1:

$$\Delta m_{tPoly1} = 0,0194 W_a - 2,1 \quad (\text{mg}) \quad (2)$$

$$W_a \in \langle 105; 1500 \rangle \quad (\text{J})$$

Empiricky zjištěná rovnice pro materiál Poly 2:

$$\Delta m_{tPoly1} = 0,0244 W_a - 3,6 \quad (\text{mg}) \quad (3)$$

$$W_a \in \langle 150; 1600 \rangle \quad (\text{J})$$

Empiricky zjištěná rovnice pro materiál Poly 3:

$$\Delta m_{tPoly1} = 0,0218 W_a - 2,1 \quad (\text{mg}) \quad (4)$$

$$W_a \in \langle 100; 1200 \rangle \quad (\text{J})$$

Empiricky zjištěná rovnice pro materiál Poly 4:

$$\Delta m_{tPoly1} = 0,000182 W_a^{1,7} \quad (\text{mg}) \quad (5)$$

$$W_a \in \langle 50; 3200 \rangle \quad (\text{J})$$

Empiricky zjištěná rovnice pro materiál Poly 5:

$$\Delta m_{tPoly1} = 0,00073 W_a^{1,48} \quad (\text{mg}) \quad (6)$$

$$W_a \in \langle 50; 2800 \rangle \quad (\text{J})$$

3 ZKOUMÁNÍ INTERAKCE OBLOUKU A KONSTRUKČNÍCH MATERIÁLŮ 2

Pokud dojde k výskytu oblouku v blízkosti konstrukčních materiálů, dochází k přenosu tepla dle Clausiovy formulace II. věty termodynamiky z oblouku do materiálů s nižší teplotou, než je teplota oblouku. To, co se s materiály stane, je otázkou mnoha fyzikálních okolností. Velmi záleží na tepelné vodivosti materiálu, která zajišťuje distribuci energie z oblasti vystavené účinkům oblouku do celého objemu materiálu. Pokud je tepelná vodivost malá, dochází k lokálnímu přehřívání. Dále také záleží na objemu materiálu, jeho tepelné kapacitě a míře jeho ochlazování v místech, kde oblouk nepůsobí.

3.1 Popis experimentů a metodik

Složení plazmatu oblouku, jeho teplota a tlak jsou velmi důležitými parametry pro pochopení chování spínacího oblouku v elektrickém přístroji.

Díky optické emisní spektroskopii jsme schopni změřit záření plazmatu oblouku a díky mezinárodním databázím určit dle spekter záření plazmatu jeho relativní složení a z naměřených dat získat výpočtem teplotu.

Tlak měříme především z důvodu získání informace o vlastnostech plazmatu, nebo také z důvodu ověření rezervy v pevnosti konstrukce. Výstupní data lze využít jako vstupy do simulací, referenční data, nebo data sloužící k porovnání vlivu použitých materiálů na parametry spínacího oblouku, což je případ toho měření.

Zkoumané vzorky byly totožné, jako v kapitole 2, tedy pět různých plastových materiálů běžně používaných v jiných odvětvích průmyslu. Cílem měření bylo získat data potřebná pro zkoumání vlivu daných materiálů na vlastnosti spínacího oblouku.

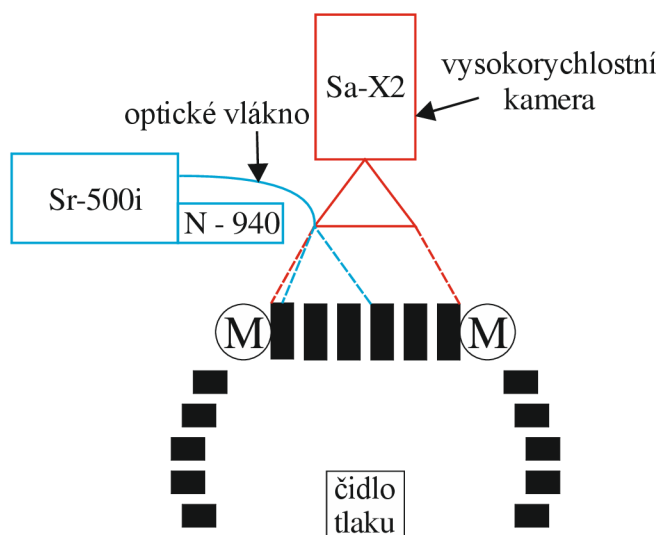
Byla provedena měření, ve kterých byl měřen vždy průběh tlaku ve zhašecí komoře, elektrické parametry oblouku, snímána spektra záření a vysokorychlostní video.

3.1.1 Schéma a popis uspořádání experimentů

Měření probíhala ve vědecko-technickém parku profesora Lista na VUT v Brně. Silový obvod i měření elektrických veličin bylo provedeno přesně shodně jako v kapitole 2.1.2.

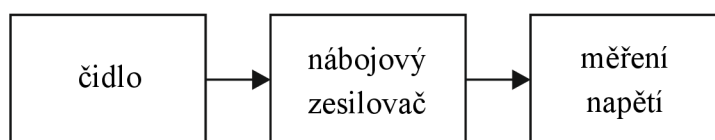
Navíc byly použity spektrografy a senzor pro měření tlaku uvnitř zhašecí komory.

Obrázek 4 zobrazuje pohled na experiment z boku. Je vidět, jak vysokorychlostní kamera zabírala zkoumaný objekt shora. Spektra byla zaznamenávána spektrografem Andor Shamrock 500i s CCD kamerou Newton 940. Součásti vyrobené ze zkoumaných plastů jsou opět vyobrazeny s černou výplní. Parametry experimentu byly aplikovány shodně jako při experimentech v kapitole 2, viz bod 2.1.3.



Obrázek 4 - Experimentální přípravek (pohled z boku), umístění rychlokamery.

3.1.2 Problematika měření tlaku

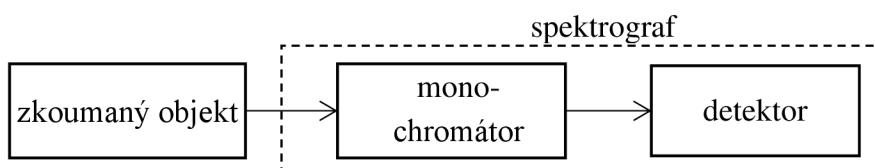


Obrázek 5 – Blokové schéma měření tlaku.

Obrázek 5 zobrazuje blokové schéma měření tlaku.

3.1.3 Problematika diagnostiky oblouku pomocí optické emisní spektroskopie

Optická emisní spektroskopie je velmi silnou měřicí metodou, která se používá v širokém spektru aplikací. Značnou výhodou atomové emisní spektroskopie je minimální ovlivnění měřeného objektu.



Obrázek 6 – Blokové schéma snímání emisního spektra.

Obrázek 6 zobrazuje základní měřicí řetězec při měření emisního spektra.

Byla použita metoda výpočtu teploty z pyrometrické přímky, která zohledňuje více spektrálních čar, což zvyšuje přesnost výpočtu. Předpokladem je, že spektrální čáry musejí být generované elektrony sestupujícími z různých energetických hladin. Metoda předpokládá lokální termodynamickou rovnováhu. Tato metoda je univerzální tím, že není nutné znát koncentrace částic.

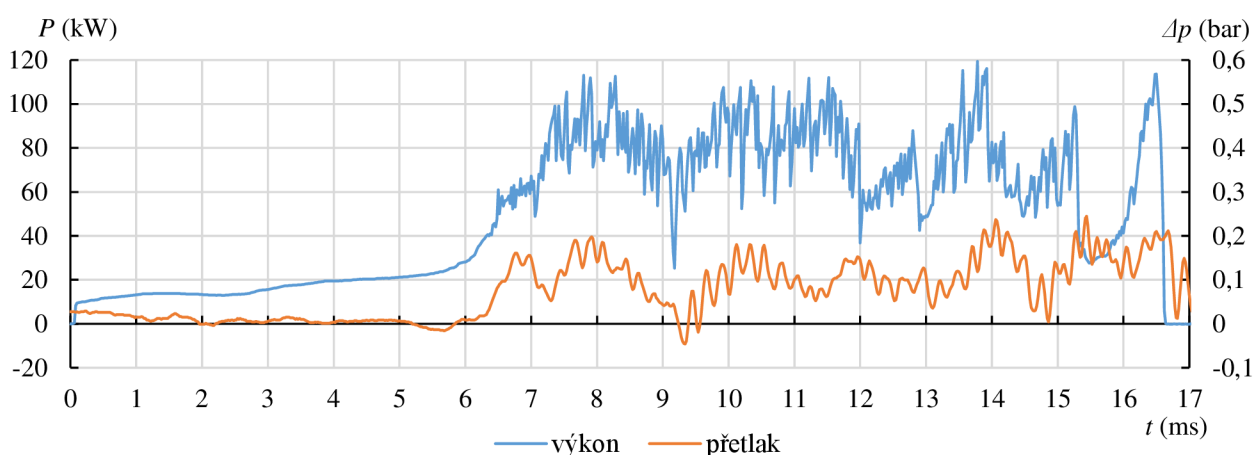
3.2 Studium vývoje přetlaku ve zhášecí komoře

Následující část je věnována vybraným průběhům přetlaku ve vývojové zhášecí komoře. Pořadí vzorků bylo upraveno dle výsledků z kapitoly 2, tedy od nejvýkonnějšího plastu v souvislosti s obloukem po plast nejméně úspěšný. Pořadí vzorků je tedy: Poly 3, Poly 1, Poly 2, Poly 5, Poly 4.

Tabulku naměřených a vypočítaných souhrnných parametrů testů obsahuje plná verze práce.

3.2.1 Vývoj přetlaku ve zhášecí komoře při použití materiálu Poly 3

Obrázek 7 obsahuje průběh přetlaku a okamžitého výkonu dodávaného do oblouku. Maximální výkon na oblouku dosahuje hodnoty 119 kW v čase 13,9 ms.



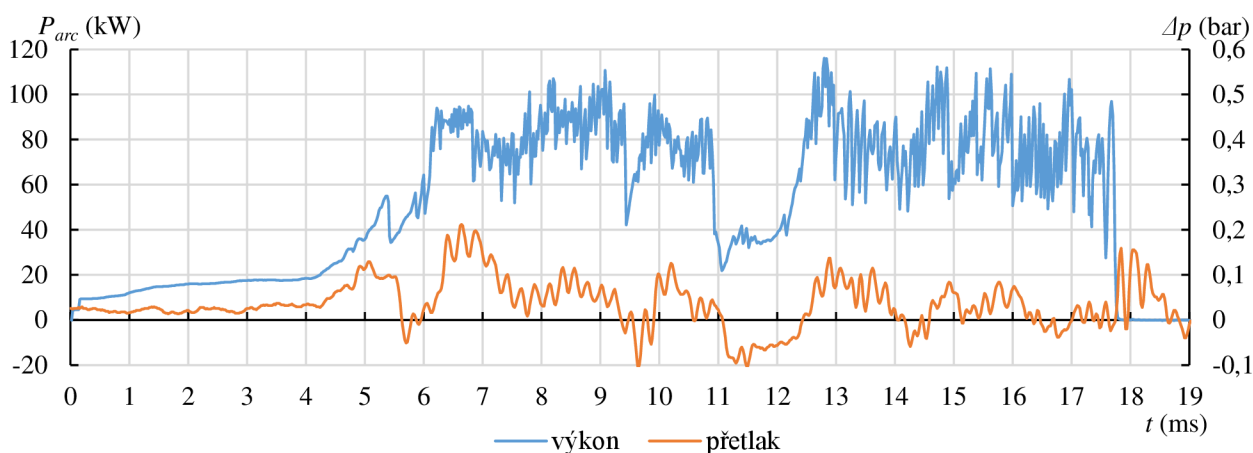
Obrázek 7 - Průběh výkonu a přetlaku v experimentální zhášecí komoře vyrobené z materiálu Poly 3 během testu 6.1.

Z průběhu přetlaku a okamžitého výkonu na oblouku lze pozorovat, jak koresponduje okamžitý výkon oblouku s přetlakem uvnitř přístroje. Lze si povšimnout také určitého zpoždění přetlaku za nárůstem výkonu, tento jev je zapříčiněn nenulovou vzdáleností čidla tlaku od oblouku. V místech největšího výkonu toto zpoždění dosahuje cca 0,2 ms. V průběhu lze také velmi dobře rozpoznat rozdíl mezi opětovným zápalením a pouhým zkrácením oblouku vlivem poklesu elektrodynamické síly. Pokud se totiž zaměříme na průběh výkonu na oblouku, zjistíme, že v časech znovu-zápalů se nachází výkonová lokální maxima, zatímco v čase pozvolného prodlužování oblouku je výkonové lokální minimum. Maximální přetlak dosahuje hodnoty 240 mbar v čase 15,4 ms.

3.2.2 Vývoj přetlaku ve zhášecí komoře při použití materiálu Poly 1

Obrázek 8 zobrazuje průběh okamžitého výkonu oblouku a přetlaku ve zhášecí komoře. Maximální výkon na oblouku dosahuje hodnoty 116 kW v čase 12,8 ms.

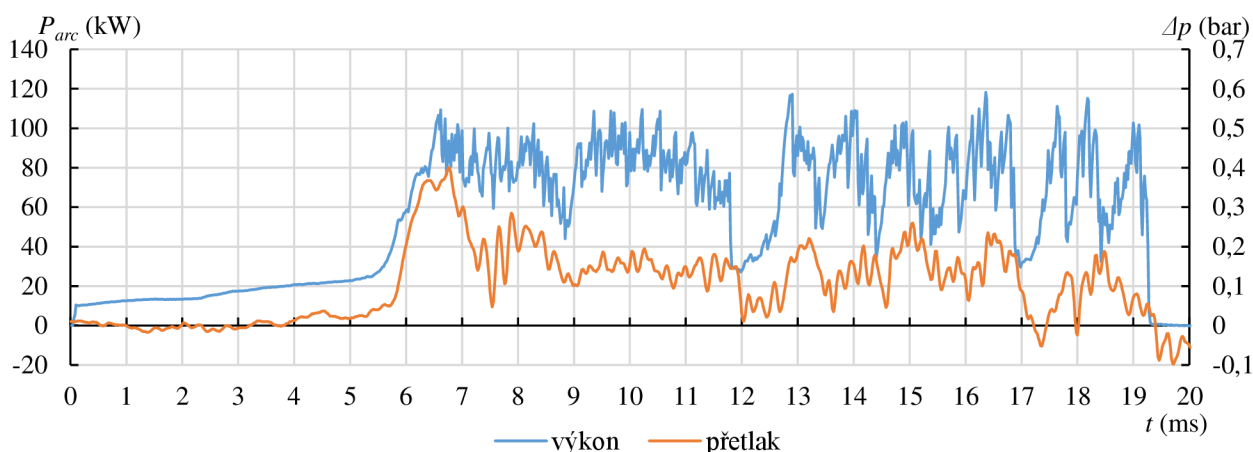
V intervalu od 5,7 ms do 6,6 ms dochází k nárůstu tlaku uvnitř komory a následně pokles až téměř k vyrovnání tlaku s okolím v čase 7,8 ms díky otevřenému systému zhášecí komory. Maximální přetlak dosahuje hodnoty 210 mbar v čase 6,7 ms.



Obrázek 8 - Průběh výkonu a přetlaku v experimentální zhášecí komoře vyrobené z materiálu Poly 1 během testu 6.10.

3.2.3 Vývoj přetlaku ve zhášecí komoře při použití materiálu Poly 2

Obrázek 9 obsahuje průběh okamžitého výkonu oblouku a přetlaku uvnitř zhášecí komory. Maximální výkon na oblouku nastal v čase 12,9 ms, a sice 117 kW.

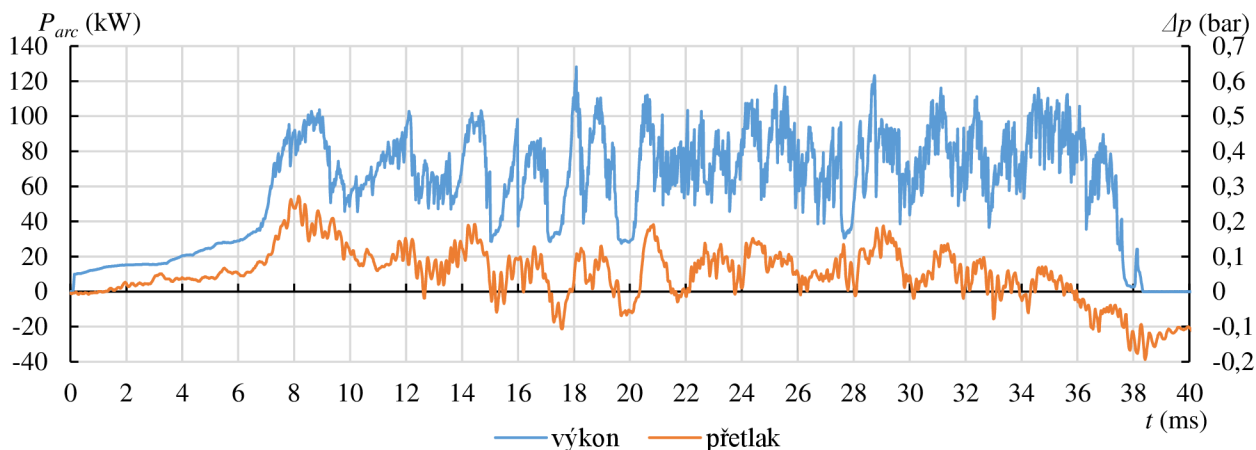


Obrázek 9 - Průběh výkonu a přetlaku v experimentální zhášecí komoře vyrobené z materiálu Poly 2 během testu 6.12.

Při počátečním výskytu oblouku došlo k rychlému nárůstu přetlaku na hodnotu 400 mbar. Z globálního hlediska lze rozdělit průběh do dvou oblastí dělených časem 11,8 ms. Oblast do tohoto času zobrazuje oblast pouze s jedním znovu-zápalem, což značí nižší obsah volných nosičů v oblasti kontaktů. Tento jev je zde pravděpodobně zapříčiněn nižší teplotou. Po čase 11,8 ms se naopak vyskytuje velké množství opakovaných zápalů mezi kontakty přístroje. V průběhu přetlaku lze opět pozorovat v časech 11,9 ms a 16,9 ms místa podtlaku, která značí průchod proudu po parazitní vodivé cestě na povrchu izolantu. Maximální přetlak dosahuje hodnoty 400 mbar v čase 6,8 ms. Díky této výrazně vyšší hodnotě přetlaku v porovnání s předchozími vzorky lze konstatovat, že materiál Poly 2 více zplyňuje při kontaktu s obloukem.

3.2.4 Vývoj přetlaku ve zhášecí komoře při použití materiálu Poly 5

Obrázek 10 zobrazuje průběh okamžitého výkonu a přetlaku uvnitř experimentální komory vyrobené z materiálu Poly 5. Při použití tohoto materiálu byl maximální okamžitý výkon na oblouku 128 kW v čase 18,1 ms.

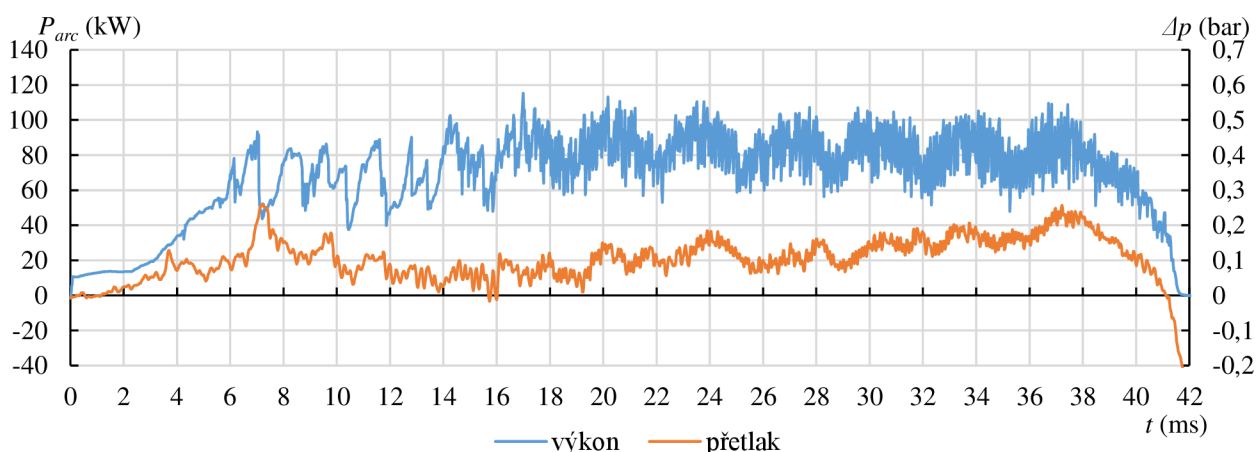


Obrázek 10 - Průběh výkonu a přetlaku v experimentální zhášecí komoře vyrobené z materiálu Poly 5 během testu 6.18.

Po počátečním výskytu oblouku došlo k nárůstu přetlaku na hodnotu maxima v celém průběhu. Z tohoto maxima docházelo k pozvolnému poklesu a vyrovnávání tlaku s okolím až do času 11 ms, kdy začal tlak opět růst. Po znovu-zápalu v čase 12,1 ms lze pozorovat mírný pokles tlaku z důvodu poklesu efektu zplyňování plastu. Maximální přetlak dosahuje hodnoty 270 mbar v čase 8,2 ms.

3.2.5 Vývoj přetlaku ve zhášecí komoře při použití materiálu Poly 4

Obrázek 11 obsahuje průběh okamžitého výkonu a přetlaku v experimentální zhášecí komoře. Maximální výkon na oblouku byl dosažen 112 kW v čase 17 ms.



Obrázek 11 - Průběh výkonu a přetlaku v experimentální zhášecí komoře vyrobené z materiálu Poly 4 během testu 6.22.

V průběhu výkonu lze pozorovat zlom, který nastal v čase 17,0 ms. Po tomto zlomu již výkon víceméně kopíruje průběh výstupu šestipulzního usměrňovače, který byl zapojen mezi generátor a zkoušený vzorek při testování. Z počátku průběhu tlak pozvolna roste, načež v čase 6,6 ms dojde k prudkému nárůstu, což vyhodnocujeme jako masivní odpaření materiálu komory. Toto potvrzuje i vývoj koncentrace uhlíku ve spektrech záření, viz obrázek 15. Další mírný nárůst se nachází v čase 9,8 ms, po tomto čase již tlak klesne a mění se velmi málo. Tedy lze konstatovat, že v průběhu přetlaku lze při porovnání s ostatními vzorky stabilní hoření detekovat již od času 10 ms. Tento jev je způsoben nežádoucím stabilním stavem hoření oblouku. Maximální přetlak dosahuje hodnoty 250 mbar v čase 7,4 ms.

3.3 Zkoumání složení plazmatu pomocí optické emisní spektroskopie

Během spínání kontaktů pod zatížením vzniká mezi těmito kontakty elektrický oblouk. Díky jeho vysoké teplotě a elektrickému poli dochází k emisi částic materiálů v jeho blízkosti do výbojového prostoru. Složení plazmatu oblouku se tedy během vypínacího procesu vyvíjí. Tento vývoj je dán okolními materiály, pozicí oblouku a dobou hoření oblouku v konkrétní pozici.

V této části je identifikováno složení plazmatu a vývoj relativní koncentrace vybraných prvků v čase při použití jednotlivých materiálů. Jako experimentální metoda byla použita optická emisní spektroskopie (OES). Z vývoje složení lze zjistit, v jakém okamžiku, ve kterých místech oblouk hoří. Také při porovnání vývoje složení plazmatu oblouku s ostatními naměřenými daty je možné pozorovat, jak změna relativní koncentrace prvků ovlivňuje chování oblouku z hlediska zhášecího procesu.

Pro identifikaci prvků byla použita databáze NIST [34] a kniha sloužící k identifikaci molekulových spekter napsaná Pearsem a Gaydonem [50]. Při identifikaci prvků bylo vždy použito souhrnné spektrum, které je vytvořeno součtem všech relevantních spekter záření konkrétního experimentu.

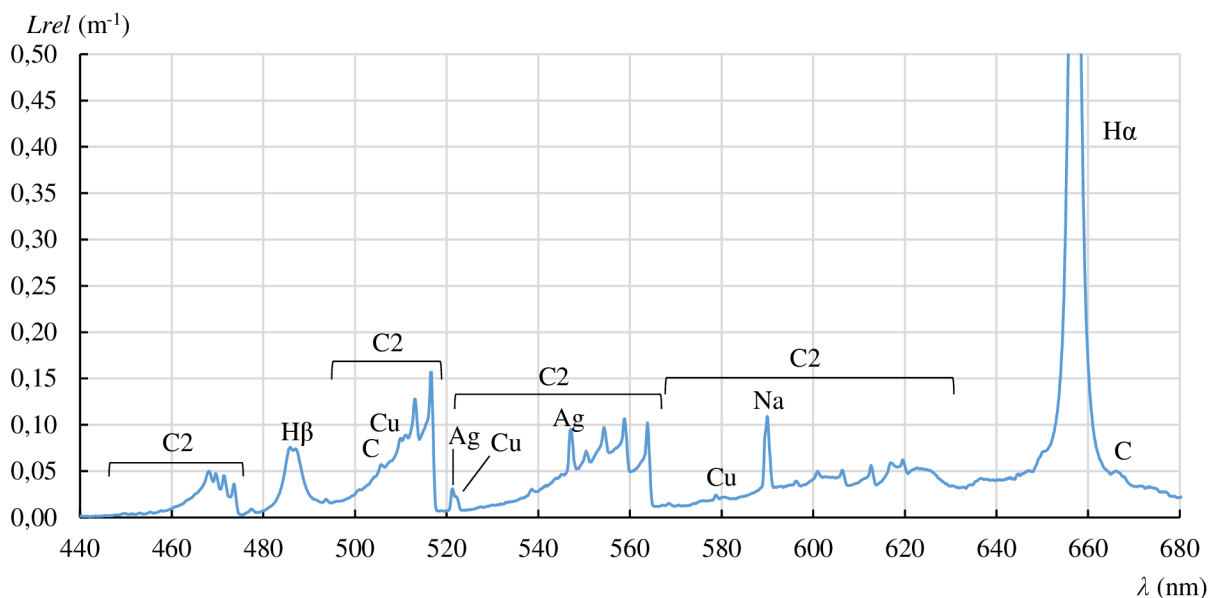
Pro výpočty relativních koncentrací uhlíku byly použity molekulární pásy v rozsahu 490 – 516 nm. Výpočty byly provedeny za předpokladu LTE.

V této zkrácené verzi dizertační práce jsou v této části prezentovány pouze dva vzorky (ten s nejlepšími výsledky a ten s nejhoršími výsledky).

3.3.1 Zkoumání složení plazmatu při použití materiálu Poly 3

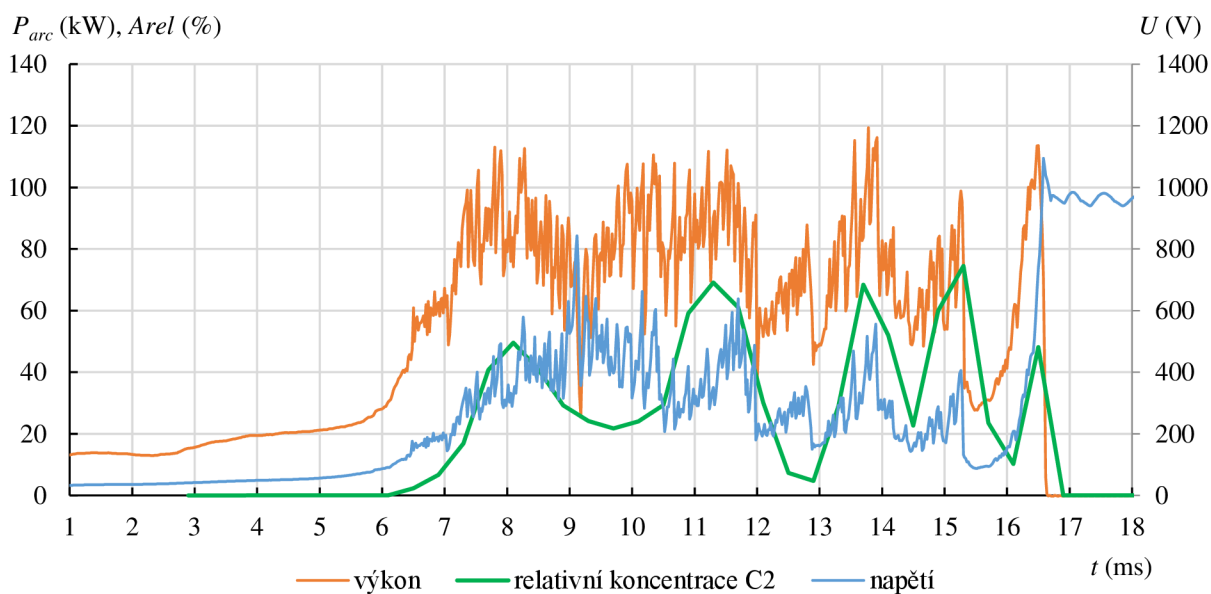
Pro identifikaci relativního složení plazmatu při použití tohoto materiálu bylo vybráno spektrum záření z testu 1, viz plná verze práce.

Ve spektru lze pozorovat výskyt mědi, stříbra a sodíku. Stříbro pochází z kontaktního materiálu, sodík, pravděpodobně z pájky použité k pájení kontaktů k ostatním částem proudovodné dráhy a měď z arc-runnerů.



Obrázek 12 – Spektrum záření plazmatu sledovaného oblouku při použití materiálu Poly 3.

Dále spektrum obsahuje vodík a uhlík pocházející ze zkoumaných plastů. Zde lze pozorovat dvě spektrální čáry dominující záření vodíku ve viditelném spektru, jedná se o H alfa a H beta z Balmerovy série³. Atomární uhlík je obsažen spíše minoritně, avšak molekulární právě naopak. Lze pozorovat molekulární pásy uhlíku patřící do Swanova systému.



Obrázek 13 – Průběh relativní koncentrace uhlíku při zkoumání materiálu Poly 3.

Během základních experimentů bylo zjištěno, že koncentrace uhlíku je pro konkrétní konstrukci velmi podstatná. Z tohoto důvodu bylo využito optické emisní spektroskopie také ke zjištění časového vývoje právě toho prvku. Obrázek 13 zobrazuje právě průběh relativní koncentrace

³ Série spektrálních čar vyzářených atomy vodíku, kdy dochází k přeskočení elektronu z různých vyšších energetických hladin vždy na 2. energetickou hladinu (značení H alfa, H beta, H gama, atd.).

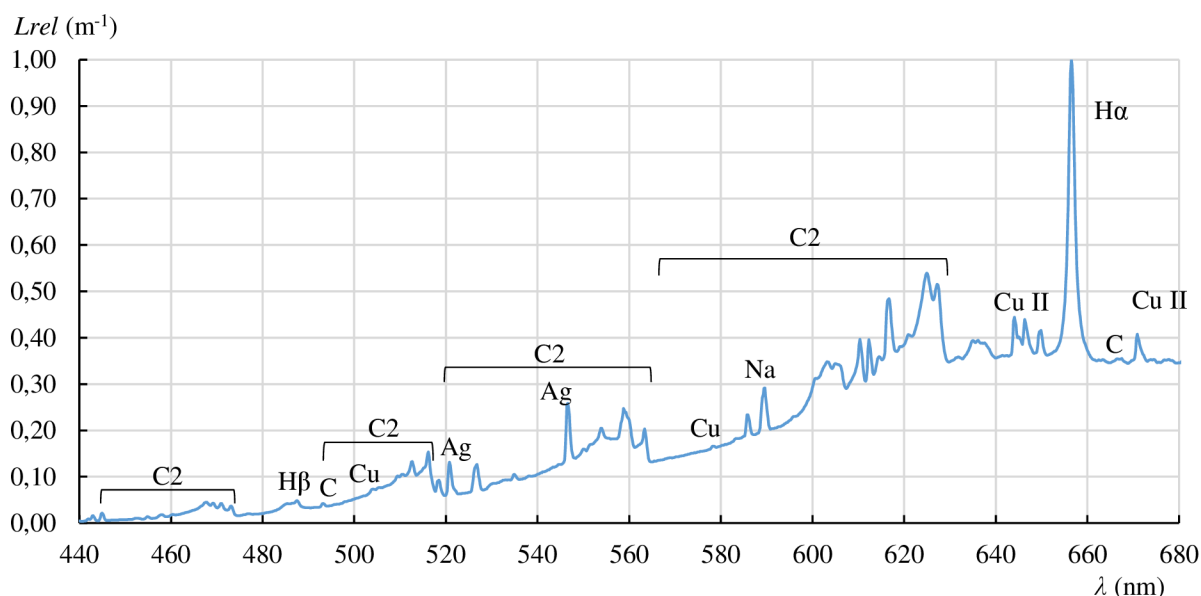
vybraného molekulárního pásu uhlíku. Je zde také zobrazen průběh napětí na oblouku a výkon oblouku.

Lze usuzovat, že systém magnetického vyfukování oblouku je navržen dostatečně, doba pohybu oblouku z kontaktního prostoru do zhašecí komory při opětovném zápalu je v průměru kolem 1 ms. Dle teoretických předpokladů lze pozorovat, jak koncentrace uhlíku roste s rostoucím výkonem oblouku. Během tohoto experimentu mohlo dojít k uhasnutí oblouku již v čase 9,12 ms, kde výrazně narostlo napětí a poklesl výkon. K tomuto nedošlo, pravděpodobně z důvodu zvýšené vodivosti média uvnitř experimentálního přípravku.

Z počátku průběhu mírně roste koncentrace uhlíku, ta však není dostatečná k opakovanému zápalu mezi kontakty. Oblouk se chladí do kapacit zhašecí komory a okolního vzduchu. Tímto zchlazením klesá výkon, kdy v již zmiňovaném čase 9,12 ms má oblouk tendenci zhasínat právě vlivem chlazení a prodloužení v komoře. Nicméně komora se začíná následně zahřívat a plastový materiál se odpařuje do výbojového prostoru. Lze pozorovat růst koncentrace uhlíku a v čase 11,7-12 ms opětovný průraz média mezi kontakty přístroje a následuje opětovné vtažení oblouku do zhašecí komory pomocí magnetického pole. Lze pozorovat další výraznější znovu-zápaly v časech 13,9 a 15,2 ms. Po posledním znovu-zápalu došlo k velmi rychlému vtažení oblouku do zhašecí komory a výkon oblouku netrval dostatečný čas k odpaření uhlíku, potřebného k opětovnému zápalu mezi kontakty. Oblouk uhasíná.

3.3.2 Zkoumání složení plazmatu při použití materiálu Poly 4

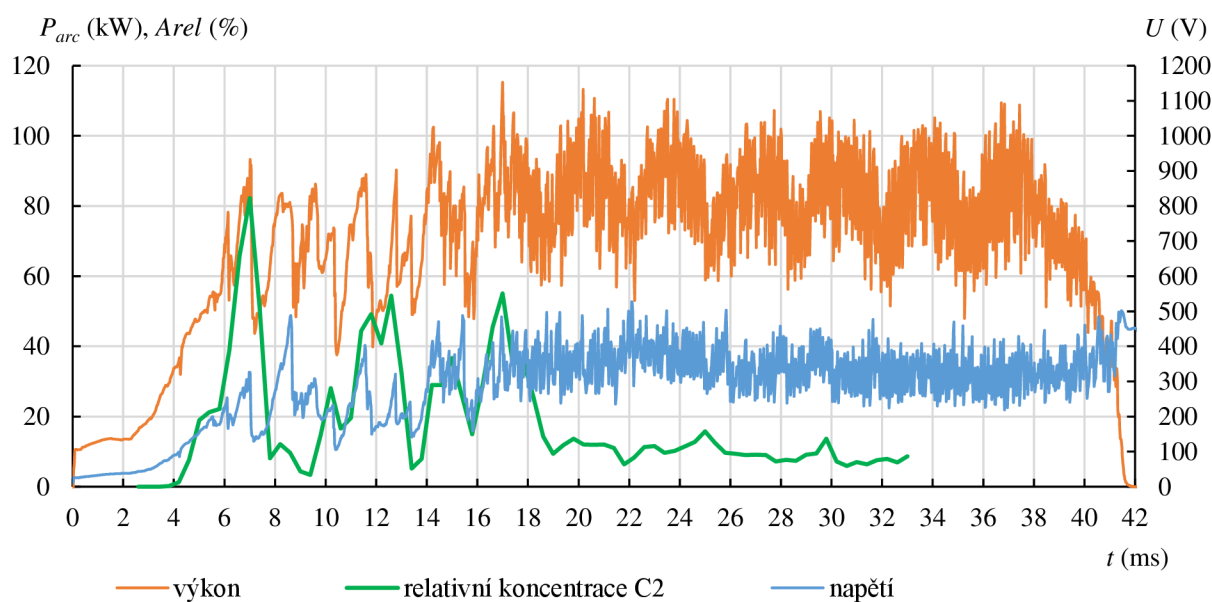
Pro účel identifikace relativního složení plazmatu při použití tohoto materiálu bylo zvoleno spektrum pořízené při experimentu 22.



Obrázek 14 – Spektrum záření plazmatu při použití materiálu Poly 4.

V tomto případě nejsou relativní koncentrace kovů z kontaktů ani z pájky příliš výrazné, v porovnání s koncentrací uhlíku a vodíku. Muselo zde tedy dojít ke stabilnímu hoření oblouku ve zhašecí komoře, nebo její části, což je nejméně příznivé ze všech materiálů. Pokud totiž dojde ke

stabilnímu hoření oblouku ve zhašecí komoře, je šance na jeho uhašení velmi malá. V případě opakovaných zápalů mezi kontakty, jak tomu bylo u předchozích materiálů je totiž šance, že v mezičase, kdy je oblouk mimo zhašecí komoru, může dojít k jejímu ochlazení a při návratu oblouku je zde reálná možnost jeho uhasnutí.



Obrázek 15 – Průběh relativní koncentrace uhlíku při použití materiálu Poly 4.

Při použití materiálu Poly 4 nebylo v této sérii dosaženo žádného úspěšného uhašení oblouku. Obrázek 15 zobrazuje průběhy napětí výkonu a relativní koncentrace uhlíku.

Z počátku by se mohlo zdát, že po čase dojde k úspěšnému uhašení oblouku, nicméně při bližším zkoumání bylo zjištěno, že obloukové napětí je příliš nízké, dosahuje pouze k hranici 500 V. Znamená to, že vodivost plazmatu v oblasti zhašecí komory je příliš vysoká. Toto je zapříčiněno z nejvyšší pravděpodobnosti právě nadměrnou stagnující produkcí uhlíku, což se potvrzuje i od času 18,5 ms, kdy se hoření oblouku v přípravku změnilo ve stabilní. I relativní koncentrace uhlíku je od tohoto okamžiku značně stabilizována. Znamená to, že oblouk hoří na hranici komory ve výparech uhlíku a nemá tendenci pro znovu-zápaly mezi kontakty. Ač je koncentrace uhlíku v přístroji relativně vysoká, tak obloukové napětí nedosahuje takových hodnot, aby došlo k průrazu mezi kontakty.

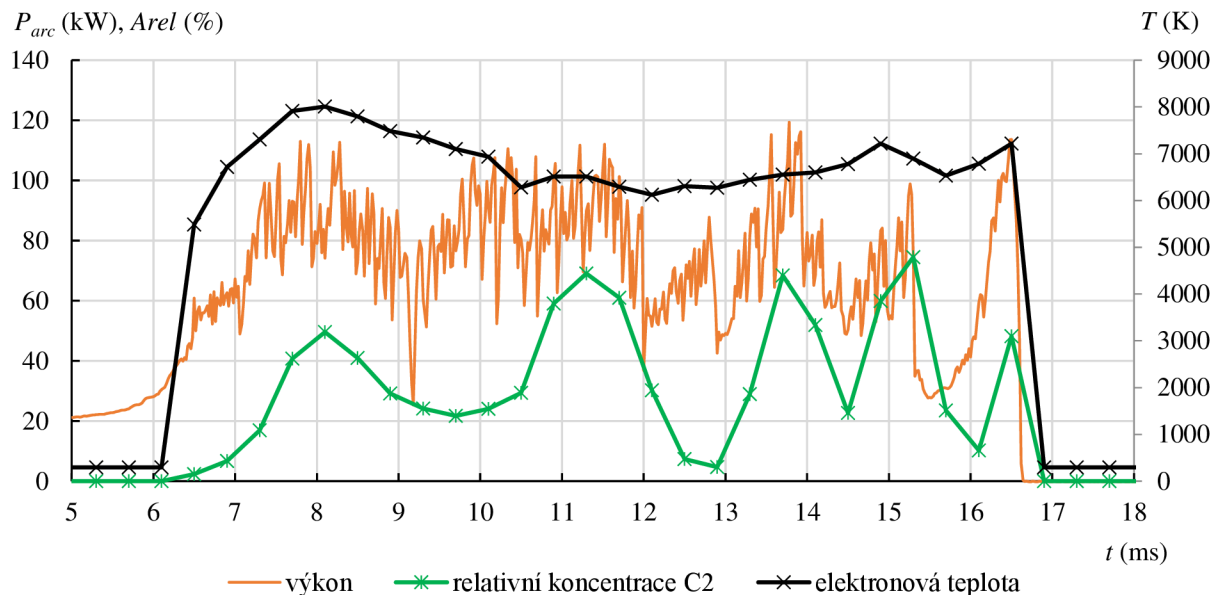
3.4 Výpočet teploty ze spekter záření oblouku

Při změně složení plazmatu se také mění jeho vlastnosti (např. tepelná vodivost, teplota, koncentrace částic, elektrická vodivost, aj.). Právě vlastnosti oblouku mají majoritní vliv na jeho chování při spínacím procesu a při interakci s okolními materiály.

V naprosté většině případů je teplota oblouku výrazně vyšší než teplota tání i vypařování všech běžně používaných konstrukčních materiálů. Z tohoto důvodu je podstatné, aby oblouk hořel v jedné pozici co nejkratší čas, za který jsou blízké materiály schopny přijatou energii ve formě tepla absorbovat a distribuovat do svého objemu, aniž by došlo k jejich tání, nebo vypařování.

3.4.1 Průběh elektronové teploty plazmatu při použití materiálu Poly 3

Obrázek 16 zobrazuje vývoj teploty, výkonu a relativní koncentrace uhlíku v čase při použití materiálu Poly 3. Výpočet byl proveden z testu s pořadovým číslem 1.

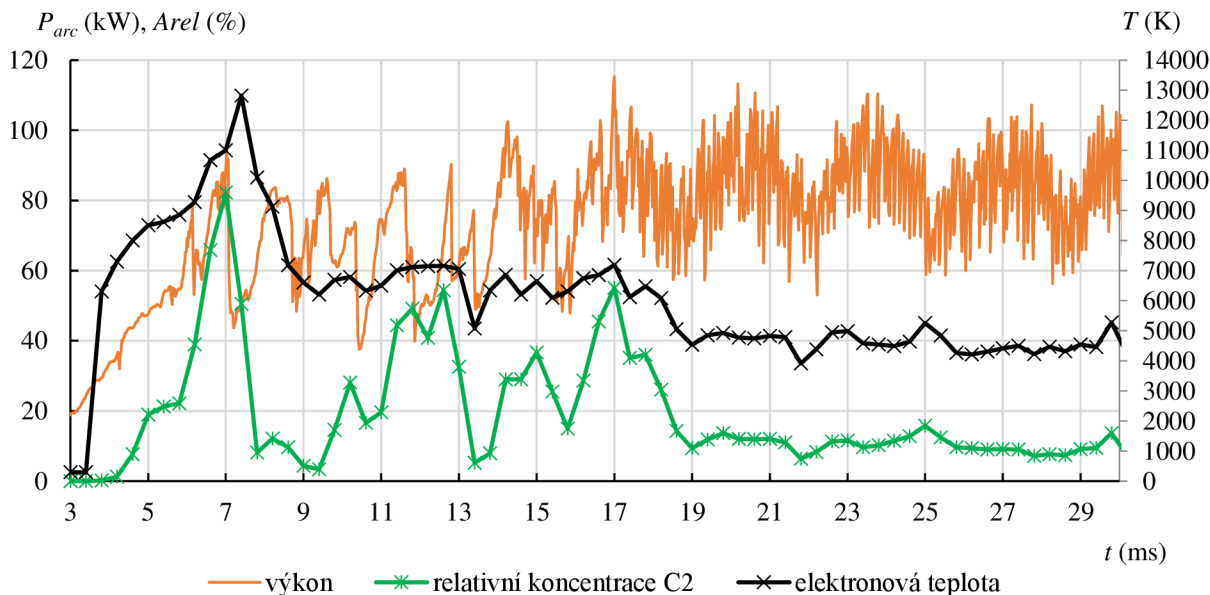


Obrázek 16 – Časový vývoj elektronové teploty při použití materiálu Poly 3.

Teplota plazmatu elektrického oblouku dle očekávání přesahuje všechny teploty tání i varu použitých materiálů. Nejvyšší hodnoty dosahuje teplota v čase 8,1 ms, kdy mírně přesahuje 8000 K. Dále již teplota klesá na hodnotu 6300 K v čase 10,5 ms. Relativní stagnaci přeruší až mírný nárůst na 7200 K v čase 14,9 ms. Následujících 800 μ s teplota klesá na 6500 K. Na konci zhasacího procesu pozorujeme nárůst opět na 7200 K. Teplota během vypínacího procesu s materiálem Poly 3 je tedy poměrně stabilní a pouze mírně kopíruje výkonové výkyvy na oblouku.

3.4.2 Průběh elektronové teploty plazmatu při použití materiálu Poly 4

Obrázek 17 zobrazuje vývoj teploty, výkonu a relativní koncentrace uhlíku v čase při použití materiálu Poly 4. Výpočet byl proveden z testu s pořadovým číslem 22.



Obrázek 17 - Časový vývoj elektronové teploty při použití materiálu Poly 3.

V případě materiálu Poly 4 dosáhlo plazma teploty 12800 K, což je nejvyšší teplota ze všech materiálů. Nicméně lze říci, že tento okamžik, který nastal v čase 7,4 ms nebyl pro spínací proces až tak kritický, protože lze pozorovat následný pokles koncentrace uhlíku odpařeného z materiálu zhášecí komory. Podstatným problémem zde je však stagnující koncentrace uhlíku, která je způsobena stabilizací oblouku v oblasti zhášecí komory. Ač se může z průběhu teploty zdát, že po čase cca 9 ms odezněly vysoké teploty, není tomu tak, protože i nadále se teplota drží v řádu tisíců Kelvinů a tím nevratně poškozuje blízké materiály, zejména zkoumané plasty. Výsledky zkoumání materiálu Poly 4 a 5 přinášejí velmi důležitá data pro porozumění chování oblouku v interakci s plasty. Jde o porovnání zbytkových relativních koncentrací uhlíku po poklesech koncentrací. Zatímco v případě materiálů Poly 1, 2 a 3 lze pozorovat téměř úplné vyhoření uhlíku, tak v případě Poly 4 a 5 se objevuje stabilizující se vývoj s relativně vysokými zbytkovými koncentracemi.

4 ZÁVĚR

Vzhledem k současnému velkému tlaku na snížení emisí dopravních prostředků dochází k vydávání stále přísnějších emisních norem, které prodražují výrobu dopravních prostředků se spalovacími motory. Výrobci stále více investují do rozvoje elektromobility. Elektromobita jako taková však vyžaduje velmi stabilní elektrickou síť, která je schopna rychle a s co nejmenšími ztrátami sledovat energetické výkyvy způsobené právě expresními nabíjecími stanicemi a podobně. Dalším podobným členem sítě jsou také solární elektrárny jejichž výkon je značně závislý na aktuálním počasí. Zmíněné systémy obvykle pracují se stejnosměrným napětím. S rostoucími požadavky na práci se stejnosměrnou soustavou rostou i počty instalovaných stejnosměrných spínacích přístrojů a požadavky na ně samotné (výkonové parametry, spolehlivost, životnost, provozuschopnost, cena).

Sporadičnost odběrů vyžaduje častější operování se spínacími přístroji. Roste tedy opotřebení součástí spínacích přístrojů mechanickými působeními, ale především působením stejnosměrného elektrického oblouku, jehož uhašení je obtížnější z důvodu stabilní polarizace. Díky jeho vysoké teplotě materiály v kontaktu s obloukem tají a odpařují se. Vývojová a konstrukční centra výrobců spínacích přístrojů po celém světě se stále snaží kopírovat požadavky trhu, kterým je ve většině případů zachování, nebo zlepšení deklarovaných parametrů s takovou tržní cenou, která je konkurenceschopná.

V případě stejnosměrného oblouku se využívá několik různých principů zhašení, ve většině přístrojů se využívá kombinace více z nich. Zhašení probíhá zpravidla ve zhašecích komorách, kterými jsou výrazně ovlivněny parametry přístrojů. V oblasti těchto komor nastává výrazná interakce elektrického oblouku a blízkých materiálů, která zásadně ovlivňuje nároky na údržbu a také životnost přístrojů, protože oblouk materiály nenávratně poškozuje. Samotný zhašecí proces a opotřebení materiálu ovlivňuje značně vybraný materiál, jehož základní cena a zpracovatelnost udává právě cenu zhašecí komory.

Díky stabilnímu dlouholetému propojení aplikační a výzkumné sféry bylo v rámci této disertační práce na VUT v Brně studováno pět vybraných materiálů vysoce výkonných plastů. Jednalo se o tři vzorky polyamidů PA12 (pracovní název - Poly 1), PA46 (pracovní název - Poly 2), PA66 (pracovní název - Poly 3), jeden vzorek polybutyléntereftalátu PBT-GF30-FR (pracovní název - Poly 4) a vzorek polyketonu PK (pracovní název - Poly 5). Z těchto vybraných materiálů byly vytvořeny shodné geometrie partnerem z průmyslu. Poté byly materiály podrobeny experimentálnímu zkoumání interakce s elektrickým obloukem dle předem stanovených metodik. Jak z pohledu parametrů spínacího procesu, tak z hlediska vybraných fyzikálních parametrů plazmatu spínacího oblouku.

První série experimentů byla zaměřena na vizuální kontrolu vlivů použitého materiálu na experimentální přípravek, sledování spínacího procesu pomocí vysokorychlostní kamery, zkoumání elektrických parametrů spínacího procesu a měření hmotnostních úbytků materiálu zhašecích komor přípravku. Vizuální kontrola vzorků byla prováděna průběžně, nejlepších výsledků bylo dosaženo při použití materiálu Poly 3, kde byly kontaktní plochy nejčistší, naopak nejhorší parazitní vrstvy,

kteře zvyšují kontaktní odpor spínacího přístroje, byly pozorovány u materiálu Poly 4. Vysokorychlostní video je přínosné především pro porovnání chování oblouku v úspěšných a neúspěšných pokusech. Lze sledovat, kde se nachází oblouk v konkrétních okamžicích, tedy také opakované zápaly oblouku mezi kontakty přípravku, což je místo nejkratší vzdušné izolační vzdálenosti v rozepnuté proudovodné dráze. Výrazně pomáhá kamera při sledování pohybu oblouku po vodičích oblouku, tedy, zda se oblouk pohybuje tak, jak je v dané konstrukci zamýšleno. V plné verzi práce jsou zobrazeny vybrané snímky z vysokorychlostní kamery, které odhalily nežádoucí emise ohřátého plynu, případně plazmatu ze zařízení do blízkého okolí v případech dlouhého hoření oblouku na vyšších výkonových parametrech u materiálů Poly 2, 4 a 5, což může způsobit přeskok na blízké vodivé části, pokud je přístroj instalován například v rozváděči, nebo také ohrožení zdraví osob. Z vysokorychlostního videa bylo také zjištěno, že k nejvyšší produkci kouře a emisí dochází při stabilizaci katodového paprsku v místě dotyku vodiče oblouku a zhašecí komory. Geometrie přípravku však nebyla předmětem zkoumání, a zpráva byla pouze předána příslušnému vývojovému týmu. Elektrické parametry byly zde zkoumány souhrnně (pohled na spínací proces jako celek). Při testování bylo zjištěno, že zhašecí komory ze všech materiálů jsou použitelné pro první konfiguraci zátěže 900 V, 104 A, 0,10 ms. I nejhorší materiál dosahoval vypínacích časů maximálně kolem 10 ms, což je v rámci požadavků. Vzhledem ke snadné výměně zhašecích komor přípravku lze tedy při požadavku na nižší parametry vybrat pro konstrukci zhašecí komory z materiálů ten, který je nejvýhodnější z hlediska technologické zpracovatelnosti, a tedy i ekonomicky. V neposlední řadě je také dobré zmínit, že při použití materiálů Poly 4 a Poly 5 dosahovala spínací špička napětí nižších hodnot, což méně namáhá izolační materiály a toto by se ještě více projevilo při delších časových konstantách. Pro zátěž 900 V, 201 A, 0,12 ms byly vyhovující všechny materiály kromě Poly 4, který již v jednom z deseti provedených testů selhal a v ostatních testech dosahoval vyšších vypínacích časů (průměr z 10 testů byl 30,1 ms), které jsou nepříznivé pro životnost přístroje. Pro zátěž 900 V, 308 A, 0,11 ms bylo zjištěno možné použití materiálů Poly 1, 2 a 3. Při nejvyšší zátěži 900 V, 400 A, 0,10 ms vyhověly už jen materiály Poly 1 a Poly 3. Hmotnostní úbytky materiálu proudovodné dráhy jako celku byly nejnižší v případě materiálu Poly 3 a nejvyšší v případě materiálu Poly 4. Hmotnostní úbytek komory pro nejnižší konfiguraci zátěže byl nejpříznivější u materiálu Poly 2, u ostatních zátěží byly nejlepší výsledky dosaženy u materiálu Poly 3. Byla také sledována korelace hmotnostních úbytků komor a vybraných elektrických parametrů spínacího procesu. Jako nejlépe korelující elektrický parametr byla vyhodnocena oblouková energie W_a , ze které byly vytvořeny empirické rovnice pro výpočet úbytku hmotnosti zhašecích komor (viz kapitola 2.2.5), což bylo součástí zadání, aby bylo možné zjistit pravděpodobnou velikost úbytku bez vážení.

Druhá série experimentů je obsažena v kapitole 3. Zde byly provedeny postupy ověřené z kapitoly 2, opět byla vyhodnocena tabulka elektrických parametrů pro jednotlivé testy z pohledu na spínací proces jako celek, které obsahuje plná verze práce. V této kapitole bylo provedeno také sledování a vyhodnocení průběhů elektrických parametrů během testů, které jsou doplněny o měření průběhů přetlaku uvnitř zhašecí komory přípravku a vypočítaný průběh okamžitého výkonu oblouku. Pomocí optické emisní spektroskopie bylo identifikováno relativní složení plazmatu při vybraných experimentech, časový vývoj relativní koncentrace vybraných prvků v plazmatu oblouku a vývoj elektronové teploty oblouku během spínacího procesu. Průběhy přetlaku a vybraných

elektrických veličin jsou hodnoceny v kapitole 3.2. Právě přetlak je veličina podstatná pro chování oblouku, protože v komoře s množstvím otvorů, jako je použita při experimentech, přetlak způsobuje odstranění částic zvyšujících vodivost média uvnitř komory a tím podporuje zhasací proces. Také naměřené hodnoty tlaku vstupují do simulací, kde je lze použít jako vstupní hodnoty, případně jako verifikaci výstupů. Dalším bodem byla identifikace relativního složení plazmatu během spínacího procesu a průběhu relativní koncentrace uhlíku za použití optické emisní spektroskopie. Složení plazmatu bylo ve všech případech podobné. U materiálu Poly 3 se ve spektru nevyskytovala ionizovaná měď, což naznačuje menší energii oblouku. Ve spektrech záření lze pozorovat spektrální čáry stříbra emitované atomy, které pochází z kontaktů, dále pozorujeme přítomnost sodíku z použité pájky pro tvrdé pájení kontaktů k ostatním částem proudovodné dráhy a také měď, která pochází z vodičů oblouku. Ze zkoumaných plastů se do výbojového prostoru dostává uhlík, který se v plazmatu vyskytuje jak v molekulární, tak i atomární podobě, což signalizuje přítomnost molekulárních pásů uhlíku Swanova systému i atomárních čar uhlíku. Pozorujeme i Balmerovu sérii vodíku, který pochází také z vyšetřovaných plastů. Dobrým znamením je naopak nepřítomnost tripletových čar ani molekulárních pásů kyslíku, což by mohlo způsobovat tvorbu toxického oxidu uhelnatého, jehož molekulární pásy také nejsou přítomny. Je nutné zde však zmínit, že se jedná o relativní složení, a tedy pokud by byly zmiňované prvky a molekuly obsaženy ve velmi malých množstvích, nemusely by být identifikovatelné. Byly vytvořeny průběhy relativních koncentrací vybraných prvků, konkrétně stříbra z kontaktů a uhlíku z materiálu zhasacích komor. Pokud bychom měli kvantifikovat výsledky, tak materiál Poly 3 dosahoval nejnižších hodnot relativní koncentrace stříbra, ale zase nejvyšší koncentrace uhlíku ve stejných časových intervalech jako u ostatních materiálů. Toto zjištění znamená, že daný materiál při kontaktu s obloukem dobře zplyňuje a dostává se na vysoké koncentrace uhlíku, které však záhy výrazně klesají, což signalizuje opětovný zápal oblouku mezi kontakty přístroje, toto opotřebovává kontakty, ale na druhé straně podporuje pohyblivost oblouku a tím jeho chlazení, také chlazení zhasací komory. Ideálním případem by byla pouze jedna cesta oblouku do zhasací komory s využitím celé komory a bez opětovných zápalů. Právě podstatný problém je setrvávání oblouku částečně v komoře a částečně v její blízkosti, což je právě problém většiny neúspěšných pokusů, přesným příkladem je průběh koncentrace uhlíku v případě materiálu Poly 4, viz obrázek 15. Oblouk zde není plně prodloužen a dochází k nežádoucímu ohřevu komory. Kapitola 3.4 obsahuje průběhy vypočítané teploty plazmatu při použití různých materiálů. Získané teploty odpovídají předpokladům a převyšují teploty tání i varu všech použitých materiálů přípravku. Nejvyšší teploty 12800 K bylo dosaženo při pokusu s použitím materiálu Poly 4.

Dle vhodnosti použití zkoumaných materiálů pro konstrukci zhasací komory je pořadí takovéto (od nejvhodnějšího po nejméně vhodný): Poly 3, Poly 1, Poly 2, Poly 5, Poly 4.

Výstupy z práce slouží k vývoji nových přístrojů a inovaci stávajících. Hlavní předností je redukce nákladů na výrobu, snížení produkce plastů (navýšení servisního intervalu přístrojů), možnost lepšího pochopení chování oblouku v interakci s blízkými materiály a v neposlední řadě získání dat do výpočtů a simulací.

LITERATURA

(kompletní seznam literatury je uveden v plné verzi práce)

- [6] KAVEH, Niayesh a Magne RUNDE. Power Switching Components: Theory, Applications and Future Trends. Norsko: Springer, 2017. ISBN 987-3-31951459-8.
- [9] JEWELL, David. Understanding Relays and Contactors. Spa Parts Plus [online]. Arizona, USA: Spa Parts Plus, 2013 [cit. 2018-10-18]. Dostupné z: https://spapartsplus.com/update/docs/spu0613_Relays.html
- [11] SCHWARTZ, Mel. M. Brazing. Second edition. USA: ASM International, 2003. ISBN 0-87170-784-5.
- [12] FAN, Shaodi et al., "Time-resolved radiation measurement and energy balance of air arcs," 2017 4th International Conference on Electric Power Equipment - Switching Technology (ICEPE-ST), Xi'an, 2017, pp. 200-203, doi: 10.1109/ICEPE-ST.2017.8188827.
- [14] ASM Handbook, vol. 6., Welding, Braying and Soldering, USA: ASM International, 1993, ISBN 0-87170-377-7.
- [16] FREY, Hartmut a Hamid R. KHAN. Handbook of Thin-Film Technology. Berlin: Springer, 2015. ISBN 978-3-642-05429-7.
- [17] ANNELL, C. S. a A. W. HELZ. "A Constant-Feed Direct-Current Arc", Wahington: United States Government Printing Office, 1961.
- [18] NOSTRÖM, Hans. A study of sputtering process, applied to schotky barrier formation and plasma deposition of carbon films. Uppsala: Institute of Technology, 1980.
- [21] GROSS, Boleslav. Elektrické výboje v plynech. 1. vyd. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1967.
- [23] FRIDMAN, Alexander a Lawrence A. KENNEDY. Plasma Physics and Engineering. New York: Taylor & Francis, 2004. ISBN 1-56032-848-7.
- [25] CHRISTOPOULOS, Christos a Arthur WRIGHT. Electrical Power System Protection. Druhé. Dordrecht: Kluwer Academic Publisher, 1999. ISBN 0-412-81760-8.
- [27] R. LIDE, David. CRC Handbook of Chemistry and Physics: A Ready-reference Book of Chemical and Physical Data. 84th. Londýn: CRC Press, 2003. ISBN 0-8493-0484-9.
- [33] GROSS, Boleslav. Měření vysokých teplot. Praha: STÁTNÍ NAKLADATELSTVÍ TECHNICKÉ LITERATURY, 1962.
- [34] NIST: AtomicSpectra Database Lines Form, [online], 2016. [cit. 2019-02-15]. URL: https://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/lines_form.html
- [43] ČERNOHORSKÝ, Tomáš a Pavel JANDERA. Atomová spektroskopie. Pardubice: Ediční středisko Univerzity Pardubice, 1997. ISBN 80-7194-114-X.
- [45] ELIEZER, Shalom et al. A generalised validity condition for local thermodynamic equilibrium in a laser-produced plasma. Journal of Physics D: Applied Physics. vol. 11, issue 12, S1693-S1701. DOI: 10.1088/0022-3727/11/12/007. Dostupné z: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/11/12/007>
- [47] GOUGH, W. The graphical analysis of a Lorentzian function and a differentiated Lorentzian function, [online]. Journal of Physics A: General Physics. vol. 1, issue 6, S704-S709. DOI: 10.1088/0305-4470/1/6/309. Dostupné z: <https://doi.org/10.1088/0305-4470/1/6/309>.
- [50] PEARSE, R. W. B. a A. G. GAYDON. The identification of molecular spectra. Second edition revised. London: Chapman & Hall LTD, 1950.

Autorovo CV

Osobní údaje:

Jméno: David Šimek
e-mail: simekd@vut.cz

Vzdělání:

2015 - VUT v Brně, Doktorský stupeň (Ústav silnoproudé elektrotechniky a elektroniky)
2013 - 2015 VUT v Brně, Magisterský stupeň (Ústav silnoproudé elektrotechniky a elektroniky)
2010 - 2013 VUT v Brně, Bakalářský stupeň (Ústav silnoproudé elektrotechniky a elektroniky)

Pracovní zkušenosti:

2014 - Laboratoř spínacích přístrojů, CVVOZE, VUT v Brně

Osobní dovednosti:

Další jazyky - Anglický jazyk, B2, aktivní slovem i písmem; Německý jazyk, A1, pasivní.

Organizační dovednosti - vůdčí a organizační dovednosti (každoroční vedení numerických konstrukčních cvičení na VUT v Brně, průměrně 30 studentů).

Komunikační dovednosti získané během působení v Laboratoři spínacích přístrojů, CVVOZE, VUT v Brně, komunikace se zákazníky, řešení požadavků, tvorba reportů.

Výborné prezentační dovednosti získané na mezinárodních konferencích a přednášením na VUT v Brně.

Další - pokročilé zkušenosti s pájením, odborná způsobilost v elektrotechnice dle 50/1978 Sb. §7, 8, 10.

Doplňující informace:

Ocenění a vyznamenání

2016 a 2017 – 1. místo v doktorské sekci studentské publikační soutěže STUDENT EEICT

2015 – absolvování magisterského studia VUT v Brně s vyznamenáním

2013 – ocenění bakalářské práce cenou děkanky

Pedagogická praxe

Od roku 2021 do současnosti – výuka cvičení z předmětu MPC – PRI – projektové řízení inovací

Od roku 2020 do současnosti – výuka v A.j. MPA – SPP - selected problems of power electrical engineering

Od roku 2015 do současnosti – vedení konstrukčních cvičení v kurzu MPC - SVP – stavba a výroba elektrických přístrojů, výuka laboratorních cvičení v kurzu BPC - EPR – elektrické přístroje a výuka laboratorních cvičení v kurzu MPC - LSP – laboratoře strojů a přístrojů.

Odvedeno 6 bakalářských a 5 diplomových prací.

Nejvýznamnější projekty

2020 – 2023 - Moderní technologie v elektrických pohonech a přístrojích

2019 – 2021 - 7AMB197UA Erozní vlastnosti nových kompozitních materiálů Cu-Cr pro elektroenergetiku, člen řešitelského týmu

2019 – 2020 - DP_03 - Spolehlivost, bezpečnost a optimalizace provozu energetických sítí,

2015 – 2017 - GA15-14829S - Studium termodynamických a elektromagnetických procesů ve spínacích přístrojích nízkého napětí, člen řešitelského týmu,

Semináře a stáže

2019 – stáž na univerzitě TARAS SCHEVCHENKO NATIONAL UNIVERSITY OF KYIV

2014 – absolvování kurzu projektové řízení a inovace (s certifikací)

Konference (nejvýznamnější)

2020 - 21th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)

2019 - 20th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE); XXIII Symposium on Physics of Switching Arc

2018 - 19th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE);

2017 - 18th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE); XXII Symposium on Physics of Switching Arc; 23rd Conference STUDENT EEICT

2016 - 22nd Conference STUDENT EEICT; 17th MECHATRONIKA

2015 - 21st Conference STUDENT EEICT; XXI Symposium on Physics of Switching Arc

Publikace (nejvýznamnější za posledních 5 let)

2021

- MURMANTSEV, A.; VEKLICH, A.; BORETSKIJ, V.; BARTLOVÁ, M.; DOSTÁL, L.; PÍŠKA, J.; ŠIMEK, D. Composite Cu-Cr materials under thermal action of electric arc discharge plasma. *PROBL ATOM SCI TECH*, 2021, roč. 131, č. 1, s. 98-101. ISSN: 1562-6016.

2020

- VALENTA, J.; ŠIMEK, D.; DOSTÁL, L.; KLOC, P.; KOUDELKA, F.; GRYZCZ, M. Simulation of Earthing Switch Behavior and Its Test Verification. In *Proceedings of the 2020 21th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)*. 1. Praha: IEEE, 2020. s. 1-6. ISBN: 978-1-7281-9479-0.
- MURMANTSEV, A.; VEKLICH, A.; BORETSKIJ, V.; BARTLOVÁ, M.; DOSTÁL, L.; PÍŠKA, J.; ŠIMEK, D.; GAJDOŠ, A. Thermal Plasma of Electric Arc Discharge Between Composite Cu-Cr Electrodes: Optical Emission and Electrode Surface Interaction. *Plasma Physics and Technology*, 2020, roč. 7, č. 2, s. 43-51. ISSN: 2336-2626.

2019

- ŠIMEK, D.; DOSTÁL, L.; VALENTA, J. Detection of Local Softening, Welding and Formation of Metallic Bridges between the Copper Contact Pair Using Temperature Measurement. In *Proceedings of the 2019 20th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)*. first. Ostrava: VSB – Technical University of Ostrava, 2019. s. 118-121. ISBN: 978-1-7281-1333-3.
- J. Cech, L. Prokes, M. Zemanek, L. Dostal, D. Simek, J. Valenta, R. Zebrak, L. Zapotocky, P. Stahel. Rotating gliding arc: innovative source for VOC remediation. *Plasma Physics and Technology*, 2019, roč. 6, č. 2, s. 156-160. ISSN: 2336-2626.
- MURASHOV, I.; FROLOV, V.; KVASHNIN, A.; VALENTA, J.; ŠIMEK, D.; DOSTÁL, L.; KLOC, P. Investigation and Numerical Simulation of a High-current AC Circuit Breaker. *Plasma Physics and Technology*, 2019, roč. 6, č. 3, s. 235-238. ISSN: 2336-2626.

2018

- ŠIMEK, D.; DOSTÁL, L. Thermal Design Related Errors of Assemblies for Constructing Sites Discovered During the Temperature Rise Tests. In *Proceedings of the 2018 19th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)*. first. Brno: Brno University of Technology, Faculty of Electrical Engineering and Communication, Department of Electrical Power Engineering, 2018. p. 355-358. ISBN: 978-1-5386-4611-3.
- DOSTÁL, L.; VALENTA, J.; ŠIMEK, D. Low-Voltage Circuit-Breaker Behavior under Overload Conditions. *Plasma Physics and Technology*, 2018, vol. 5, no. 1, p. 1-4. ISSN: 2336-2626.

2017

- ŠIMEK, D. Experimental DC Arc Endurance Test of Selected Materials Commonly Used in, Switching Devices. In *Proceedings of the 2017 18th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)*. Ostrava: VSB – Technical University of Ostrava, 2017. s. 364-368. ISBN: 978-1-5090-6405- 2.
- ŠIMEK, D.; PĚČEK, D. Experimental Temperature Measurements in Miniature Circuit Breaker. *Plasma Physics and Technology*, 2017, no. 4, vol. 3, p. 265-268. ISSN: 2336-2626.

Abstrakt

Dizertační práce je zaměřena na interakci konstrukčních materiálů a spínacího oblouku ve spínacích přístrojích nízkého napětí. V teoretické rovině je rozebrána problematika vybraných elektrických přístrojů nízkého napětí, elektrického oblouku v elektrických přístrojích a jeho diagnostiky pomocí optické emisní spektroskopie a vysokorychlostního videa. Těžiště práce tvoří experimentální zkoumání vzorků vybraných výkonných průmyslových plastů. Tyto plasty byly podrobeny důkladným testům odolnosti vůči elektrickému oblouku. Z provedených experimentů byly vyhodnoceny elektrické parametry spínacího procesu, hmotnostní úbytky materiálu zhašecích komor při aplikaci různých výkonových parametrů a stanoveny empirické rovnice pro výpočet úbytku jednotlivých materiálů v konkrétní konfiguraci. Dále byl zkoumán vliv použitého materiálu na samotné chování elektrického oblouku ve zhašecí komoře vyrobené právě z těchto plastů. V těchto měřeních bylo nahráváno vysokorychlostní video, měřen časový vývoj tlaku uvnitř komory, elektrické parametry oblouku a časově rozlišený vývoj spekter záření pomocí atomové emisní spektroskopie. Ze spekter záření byla provedena identifikace relativního složení plazmatu, vytvořen časový vývoj relativní kontaminace výbojového prostoru hlavním materiálem kontaktů a vybrané výpary použitých plastů. Neposledním důležitým parametrem elektrického oblouku je jeho teplota, která byla též vypočítána ze spekter záření. Na základě získaných dat bylo provedeno porovnání jednotlivých plastů a jejich použitelnosti pro aplikace v kontaktu s elektrickým obloukem.

Abstract

The doctoral thesis is focused on the interaction of construction materials and the switching arc in low voltage switchgear. An issue of selected low-voltage electrical devices, electric arc in electrical devices, and its diagnostics using optical emission spectroscopy and high-speed video are discussed at the theoretical level. The main part of the work is an experimental examination of samples of selected high-performance industrial plastics. A series of tests of resistance to an electric arc were performed on these plastics. The electrical parameters of the switching process, the weight losses of the material of the quenching chambers when applying various power parameters were evaluated from the experiments. The empirical equations were determined for the calculation of the loss of individual materials in a specific configuration. Furthermore, the influence of the used material on the behavior of the electric arc in the extinguishing chamber made of these plastics was investigated. A high-speed video was recorded, the time evolution of the pressure inside the chamber, the electrical parameters of the arc, and the time-resolved evolution of the radiation spectra were measured using atomic emission spectroscopy in these measurements. The relative composition of the plasma was identified from the radiation spectra, and the time evolution of the relative contamination of the discharge area by the main contact material and the selected vapors of the used plastics was created. The last important parameter of the electric arc is its temperature, which was also calculated from the radiation spectra. A comparison of individual plastics and their applicability for applications in contact with electric arc was performed based on the obtained data.