



# 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

### DIZERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. David Šimek

### ŠKOLITEL

SUPERVISOR

Mgr. Petr Kloc, Ph.D.

BRNO 2021

## **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 zhášecích 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 zhášecí 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.

## **Klíčová slova**

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

## **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.

## **Keywords**

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

## **Bibliografická citace**

ŠIMEK, David. Vzájemné působení konstrukčních materiálů a spínacího oblouku ve spínacích přístrojích nízkého napětí [online]. Brno, 2022 [cit. 2021-12-16]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/122593>. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky. Vedoucí práce Petr Kloc.

## Prohlášení autora o původnosti díla

**Jméno a příjmení studenta:** Ing. David Šimek

**VUT ID studenta:** 134628

**Typ práce:** Dizertační práce

**Akademický rok:** 2021/22

**Téma závěrečné práce:** Vzájemné působení konstrukčních materiálů a spínacího oblouku ve spínacích přístrojích nízkého napětí

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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

V Brně dne .....

Podpis autora .....

## Poděkování

Děkuji svým školitelům prof. RNDr. Vladimíru Aubrechtovi, CSc. a Mgr. Petru Klocovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé doktorské práce. Dále bych rád poděkoval za pomoc a spolupráci svým kolegům z VTPPL, centru CVVOZE a UVEE za poskytnutí možnosti využití špičkového vybavení laboratoře spínacích přístrojů. Rovněž patří můj dík rodině za podporu při studiu a tvorbu potřebného zázemí. Děkuji také mojí manželce za její trpělivost při mojí práci na tomto tématu a její podporu.

V Brně dne .....

Podpis autora .....

# OBSAH

<b>SEZNAM OBRÁZKŮ</b> .....	<b>9</b>
<b>SEZNAM TABULEK</b> .....	<b>15</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>16</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>18</b>
<b>2 CÍLE PRÁCE</b> .....	<b>20</b>
<b>3 VYBRANÉ SPÍNACÍ PŘÍSTROJE NÍZKÉHO NAPĚTÍ</b> .....	<b>21</b>
<b>3.1 ELEKTRICKÝ JISTIČ</b> .....	<b>21</b>
<b>3.2 STYKAČ</b> .....	<b>23</b>
<b>4 ELEKTRICKÝ OBLOUK</b> .....	<b>25</b>
<b>4.1 OBECNÉ VLASTNOSTI ELEKTRICKÉHO OBLOUKU</b> .....	<b>25</b>
<b>4.2 KLASIFIKACE ELEKTRICKÉHO OBLOUKU</b> .....	<b>26</b>
<b>4.3 PRINCIPY ZAPALOVÁNÍ A ZHÁŠENÍ SPÍNACÍHO OBLOUKU V PŘÍSTROJÍCH</b> .....	<b>27</b>
<b>4.4 FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI ELEKTRICKÉHO OBLOUKU</b> .....	<b>29</b>
<b>4.5 ELEKTRODOVÉ OBLASTI</b> .....	<b>29</b>
4.5.1 KATODOVÁ OBLAST .....	29
4.5.2 ANODOVÁ OBLAST.....	30
<b>5 ZKOUMÁNÍ INTERAKCE OBLOUKU A KONSTRUKČNÍCH MATERIÁLŮ 1</b> .....	<b>31</b>
<b>5.1 POPIS EXPERIMENTŮ A METODIK</b> .....	<b>31</b>
5.1.1 ZKOUMANÉ VZORKY .....	31
5.1.2 SCHÉMA A POPIS MĚŘICÍHO ŘETĚZCE .....	33
5.1.3 MĚŘICÍ PŘÍSTROJE.....	34
5.1.4 VYSOKORYCHLOSTNÍ KAMERA .....	34
5.1.5 PARAMETRY EXPERIMENTŮ .....	35
5.1.6 POSTUP MĚŘENÍ .....	35
5.1.7 STANOVENÍ PEARSONOVA KORELAČNÍHO KOEFICIENTU .....	36
<b>5.2 VÝSLEDKY MĚŘENÍ A DISKUSE</b> .....	<b>37</b>
5.2.1 VIZUÁLNÍ KONTROLA SOUČÁSTÍ PROUDOVODNÉ DRÁHY .....	37
5.2.2 SLEDOVÁNÍ OBLOUKU POMOCÍ VYSOKORYCHLOSTNÍ KAMERY .....	39
5.2.3 POMĚR ÚSPĚŠNÝCH A NEÚSPĚŠNÝCH VYPÍNACÍCH CYKLŮ .....	48
5.2.4 VYPÍNACÍ ČASY .....	50
5.2.5 ŠPIČKA PŘEPĚTÍ .....	53

5.2.6 JOULŮV INTEGRÁL .....	55
5.2.7 OBLOUKOVÁ ENERGIE .....	57
5.2.8 Hmotnostní úbytky materiálu součástí proudovodné dráhy .....	60
5.2.9 Hmotnostní úbytek materiálu izolační zhášecí komory .....	61
<b>6 ZKOUMÁNÍ INTERAKCE OBLOKU A KONSTRUKČNÍCH MATERIÁLŮ 2 .....</b>	<b>66</b>
<b>6.1 POPIS EXPERIMENTŮ A METODIK.....</b>	<b>67</b>
6.1.1 SCHÉMA A POPIS USPOŘÁDÁNÍ EXPERIMENTŮ .....	68
6.1.2 PROBLEMATIKA MĚŘENÍ TLAKU.....	69
6.1.3 PROBLEMATIKA DIAGNOSTIKY OBLOKU POMOCÍ OPTICKÉ EMISNÍ SPEKTROSKOPIE ..	70
6.1.4 MĚŘICÍ PŘÍSTROJE.....	83
6.1.5 POSTUP MĚŘENÍ .....	83
<b>6.2 STUDIUM VÝVOJE PŘETLAKU VE ZHÁŠECÍ KOMOŘE .....</b>	<b>84</b>
6.2.1 VÝVOJ PŘETLAKU VE ZHÁŠECÍ KOMOŘE PŘI POUŽITÍ MATERIÁLU POLY 3.....	84
6.2.2 VÝVOJ PŘETLAKU VE ZHÁŠECÍ KOMOŘE PŘI POUŽITÍ MATERIÁLU POLY 1.....	86
6.2.3 VÝVOJ PŘETLAKU VE ZHÁŠECÍ KOMOŘE PŘI POUŽITÍ MATERIÁLU POLY 2.....	87
6.2.4 VÝVOJ PŘETLAKU VE ZHÁŠECÍ KOMOŘE PŘI POUŽITÍ MATERIÁLU POLY 5.....	89
6.2.5 VÝVOJ PŘETLAKU VE ZHÁŠECÍ KOMOŘE PŘI POUŽITÍ MATERIÁLU POLY 4.....	90
<b>6.3 ZKOUMÁNÍ SLOŽENÍ PLAZMATU POMOCÍ OPTICKÉ EMISNÍ SPEKTROSKOPIE .....</b>	<b>92</b>
6.3.1 ZKOUMÁNÍ SLOŽENÍ PLAZMATU PŘI POUŽITÍ MATERIÁLU POLY 3.....	92
6.3.2 ZKOUMÁNÍ SLOŽENÍ PLAZMATU PŘI POUŽITÍ MATERIÁLU POLY 1.....	94
6.3.3 ZKOUMÁNÍ SLOŽENÍ PLAZMATU PŘI POUŽITÍ MATERIÁLU POLY 2.....	95
6.3.4 ZKOUMÁNÍ SLOŽENÍ PLAZMATU PŘI POUŽITÍ MATERIÁLU POLY 5.....	96
6.3.5 ZKOUMÁNÍ SLOŽENÍ PLAZMATU PŘI POUŽITÍ MATERIÁLU POLY 4.....	98
6.3.6 PŘÍKLAD ČASOVÉHO VÝVOJE RELATIVNÍ KONTAMINACE VÝBOJOVÉHO PROSTORU MATERIÁLEM KONTAKTŮ EXPERIMENTÁLNÍHO PŘÍPRAVKU .....	99
<b>6.4 VÝPOČET TEPLoty ZE SPEKTER ZÁŘENÍ OBLOKU .....</b>	<b>101</b>
6.4.1 PRŮBĚH ELEKTRONOVÉ TEPLoty PLAZMATU PŘI POUŽITÍ MATERIÁLU POLY 3.....	101
6.4.2 PRŮBĚH ELEKTRONOVÉ TEPLoty PLAZMATU PŘI POUŽITÍ MATERIÁLU POLY 1.....	102
6.4.3 PRŮBĚH ELEKTRONOVÉ TEPLoty PLAZMATU PŘI POUŽITÍ MATERIÁLU POLY 2.....	103
6.4.4 PRŮBĚH ELEKTRONOVÉ TEPLoty PLAZMATU PŘI POUŽITÍ MATERIÁLU POLY 5.....	104
6.4.5 PRŮBĚH ELEKTRONOVÉ TEPLoty PLAZMATU PŘI POUŽITÍ MATERIÁLU POLY 4.....	105
<b>7 ZÁVĚR .....</b>	<b>106</b>
<b>LITERATURA .....</b>	<b>109</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH .....</b>	<b>112</b>

<b>PŘÍLOHA 1</b>	<b>– DATA ZÍSKANÁ PŘI ZKOUMÁNÍ VLIVU OBLOUKU NA VYBRANÉ MATERIÁLY SPÍNACÍCH PŘÍSTROJŮ NN .....</b>	<b>113</b>
<b>PŘÍLOHA 2</b>	<b>– ZÁVISLOSTI ÚBYTKU HMOTNOSTI NA OBLOUKOVÉ ENERGII POUŽITÉ PRO ZÍSKÁNÍ EMPIRICKÝCH ROVNIC PRO VÝPOČET ÚBYTKU HMOTNOSTI Z ELEKTRICKÝCH PARAMETRŮ .....</b>	<b>121</b>
<b>PŘÍLOHA 3</b>	<b>– VYHODNOCENÁ NAMĚŘENÁ DATA Z TESTŮ KAPITOLY 6...123</b>	
<b>PŘÍLOHA 4</b>	<b>– PRŮBĚHY PŘETLAKU, NAPĚTÍ A PROUDU V EXPERIMENTÁLNÍ ZHÁŠECÍ KOMOŘE PŘI EXPERIMENTECH KAPITOLY 6.....</b>	<b>124</b>
<b>PŘÍLOHA 5</b>	<b>– PRŮBĚHY PŘETLAKU A VÝKONU OBLOUKU V EXPERIMENTÁLNÍ ZHÁŠECÍ KOMOŘE PŘI TESTECH KAPITOLY 6.....</b>	<b>131</b>

# SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 1 – Pohled na vnitřní komponenty modulárního jističe [4].....</i>	<i>22</i>
<i>Obrázek 2 – Principiální schéma stykače. ....</i>	<i>23</i>
<i>Obrázek 3 – Elektrický oblouk hořící ve vzduchu (v plazmatu dominuje dusík).....</i>	<i>25</i>
<i>Obrázek 4 - Pomyslné rozdělení výbojového prostoru oblouku a jeho okolí na celky s podobnými fyzikálními vlastnostmi [10]. ....</i>	<i>26</i>
<i>Obrázek 5 – Přehledová charakteristika elektrických výbojů [10].....</i>	<i>27</i>
<i>Obrázek 6 – Principiální vnitřní schéma přípravku pro testování vlivu oblouku na blízké materiály (pohled z boku). ....</i>	<i>31</i>
<i>Obrázek 7 – Blokové schéma silové části obvodu. ....</i>	<i>33</i>
<i>Obrázek 8 – Blokové schéma měření elektrických veličin. ....</i>	<i>34</i>
<i>Obrázek 9 – Experimentální přípravek - pohled shora (oblast záběru rychlokamery).....</i>	<i>34</i>
<i>Obrázek 10 – Vysokorychlostní kamera Photron SA-X2 [30]. ....</i>	<i>35</i>
<i>Obrázek 11 – Pevný kontakt 1 (kladný - anoda) experimentálního přípravku po testech. ....</i>	<i>38</i>
<i>Obrázek 12 – Pevný kontakt 2 (záporný - katoda) experimentálního přípravku po testech. ....</i>	<i>38</i>
<i>Obrázek 13 – Kontaktní můstek experimentálního přípravku po testech. ....</i>	<i>39</i>
<i>Obrázek 14 – Vybrané snímky příkladového zhasnutí oblouku v izolační zhasací komoře Poly 1. ....</i>	<i>40</i>
<i>Obrázek 15 – Vybrané snímky neúspěšného zhasnutí oblouku v izolační zhasací komoře Poly 1. ....</i>	<i>41</i>
<i>Obrázek 16 - Vybrané snímky příkladového zhasnutí oblouku v izolační zhasací komoře Poly 2. ....</i>	<i>42</i>
<i>Obrázek 17 – Vybrané snímky neúspěšného zhasnutí oblouku v izolační zhasací komoře Poly 2. ....</i>	<i>43</i>
<i>Obrázek 18 – Důležité snímky oblouku při úspěšném vypínání v komoře z materiálu Poly 3. ....</i>	<i>44</i>
<i>Obrázek 19 – Snímky z úspěšného vypínání pomocí komory z materiálu Poly 4.....</i>	<i>45</i>
<i>Obrázek 20 – Vybrané snímky z neúspěšného testu komory z materiálu Poly 4.....</i>	<i>45</i>
<i>Obrázek 21 – Snímky z úspěšného vypínání pomocí komory z materiálu Poly 5.....</i>	<i>46</i>
<i>Obrázek 22 – Důležité momenty neúspěšného vypínacího děje komory s materiálem Poly 5. ....</i>	<i>47</i>
<i>Obrázek 23 – Počty úspěšných a neúspěšných vypínacích cyklů s použitím materiálu Poly 1.....</i>	<i>48</i>
<i>Obrázek 24 - Počty úspěšných a neúspěšných vypínacích cyklů s použitím materiálu Poly 2. ....</i>	<i>48</i>
<i>Obrázek 25 - Počty úspěšných a neúspěšných vypínacích cyklů s použitím materiálu Poly 3. ....</i>	<i>48</i>
<i>Obrázek 26 - Počty úspěšných a neúspěšných vypínacích cyklů s použitím materiálu Poly 4. ....</i>	<i>49</i>
<i>Obrázek 27 - Počty úspěšných a neúspěšných vypínacích cyklů s použitím materiálu Poly 5. ....</i>	<i>49</i>
<i>Obrázek 28 – Vypínací časy při použití konfigurace zátěže 1 (900 V, 104 A, 0,1 ms).....</i>	<i>50</i>

Obrázek 29 – Vypínací časy při použití konfigurace zátěže 2 (900 V, 201 A, 0,12 ms).....	51
Obrázek 30 - Vypínací časy při použití konfigurace zátěže 3 (900 V, 308 A, 0,11 ms). ....	51
Obrázek 31 - Vypínací časy při použití konfigurace zátěže 4 (900 V, 400 A, 0,10 ms). ....	52
Obrázek 32 – Špičková přepětí při použití konfigurace zátěže 1 (900 V, 104 A, 0,10 ms). ....	53
Obrázek 33 – Špičková přepětí při použití konfigurace zátěže 2 (900 V, 201 A, 0,12 ms). ....	53
Obrázek 34 – Špičková přepětí při použití konfigurace zátěže 3 (900 V, 308 A, 0,11 ms). ....	54
Obrázek 35 – Špičková přepětí při použití konfigurace zátěže 4 (900 V, 400 A, 0,10 ms). ....	54
Obrázek 36 – Joulův integrál při použití konfigurace zátěže 1 (900 V, 104 A, 0,10 ms).....	55
Obrázek 37 – Joulův integrál při použití konfigurace zátěže 2 (900 V, 201 A, 0,12 ms).....	56
Obrázek 38 – Joulův integrál při použití konfigurace zátěže 3 (900 V, 308 A, 0,11 ms).....	56
Obrázek 39 – Joulův integrál při použití konfigurace zátěže 4 (900 V, 400 A, 0,10 ms).....	57
Obrázek 40 – Oblouková energie při použití konfigurace zátěže 1 (900 V, 104 A, 0,10 ms). ....	58
Obrázek 41 – Oblouková energie při použití konfigurace zátěže 2 (900 V, 201 A, 0,12 ms). ....	58
Obrázek 42 – Oblouková energie při použití konfigurace zátěže 3 (900 V, 308 A, 0,11 ms). ....	59
Obrázek 43 – Oblouková energie při použití konfigurace zátěže 4 (900 V, 400 A, 0,10 ms). ....	59
Obrázek 44 – Hmotnostní úbytek materiálu zhášecí komory při konfiguraci zátěže 1 (900 V, 104 A, 0,10 ms). ....	61
Obrázek 45 – Hmotnostní úbytek materiálu zhášecí komory při konfiguraci zátěže 2 (900 V, 201 A, 0,12 ms). ....	62
Obrázek 46 – Hmotnostní úbytek materiálu zhášecí komory při konfiguraci zátěže 3 (900 V, 308 A, 0,11 ms). ....	62
Obrázek 47 – Hmotnostní úbytek materiálu zhášecí komory při konfiguraci zátěže 4 (900 V, 400 A, 0,10 ms). ....	63
Obrázek 48 – Experimentální přípravek (pohled shora), oblast snímaná rychlokamerou (červený obdélník) a oblast snímaná spektrografem (ohraňováno modrou kružnicí). ....	68
Obrázek 49 - Experimentální přípravek (pohled z boku), umístění rychlokamery. ....	69
Obrázek 50 – Blokové schéma měření tlaku. ....	69
Obrázek 51 – Teoretické spojitě spektrum pro teploty 3000 K (zelená), 4000 K (oranžová) a 5000 K (modrá). ....	71
Obrázek 52 – Ukázka reálného spojitěho spektra záření katody o teplotě 2300 K.....	72
Obrázek 53 – Změny rozložení hustoty spektrálního toku s měnícím se tlakem v plazmatu obsahujícím s rtuťové výpary [31]. ....	72
Obrázek 54 – Vznik záření při přeskoku elektrou[32]. ....	73

<i>Obrázek 55 – Blokové schéma snímání emisního spektra.....</i>	<i>73</i>
<i>Obrázek 56 – Monochromátor s disperzní mřížkou – uspořádání Czerny Turner [37]. .....</i>	<i>74</i>
<i>Obrázek 57 – Avantes AvaSpec ULS 3648 – TEC [40]. .....</i>	<i>74</i>
<i>Obrázek 58 – Sestava spektrografů 2xAndor Sr-500i + 2x Newton 940. ....</i>	<i>75</i>
<i>Obrázek 59 – Spektrální účinnost disperzních mřížek se 150 vrypy na milimetr [41]. .....</i>	<i>76</i>
<i>Obrázek 60 – Kvantová účinnost CCD detektorů pro různá provedení kamer Newton 940 [42].</i>	<i>76</i>
<i>Obrázek 61 – Příklad spektra záření obloukové lampy. ....</i>	<i>77</i>
<i>Obrázek 62 – Spektrum obloukové lampy s identifikovanými prvky. ....</i>	<i>77</i>
<i>Obrázek 63 – Profil a důležité parametry spektrální čáry. ....</i>	<i>79</i>
<i>Obrázek 64 – Příklad proložení spektrální čáry draslíku (šedá) Gaussovou funkcí (modrá). .....</i>	<i>80</i>
<i>Obrázek 65 – Příklad proložení spektrálních čar draslíku (šedá) Cauchy-Lorentzovou funkcí (modrá). ....</i>	<i>81</i>
<i>Obrázek 66 - Průběh napětí, proudu a přetlaku v experimentální zhasací komoře vyrobené z materiálu Poly 3 během testu 6.1.....</i>	<i>84</i>
<i>Obrázek 67 - Průběh výkonu a přetlaku v experimentální zhasací komoře vyrobené z materiálu Poly 3 během testu 6.1.....</i>	<i>85</i>
<i>Obrázek 68 - Průběh napětí, proudu a přetlaku v experimentální zhasací komoře vyrobené z materiálu Poly 1 během testu 6.10.....</i>	<i>86</i>
<i>Obrázek 69 - Průběh výkonu a přetlaku v experimentální zhasací komoře vyrobené z materiálu Poly 1 během testu 6.10.....</i>	<i>87</i>
<i>Obrázek 70 - Průběh napětí, proudu a přetlaku v experimentální zhasací komoře vyrobené z materiálu Poly 2 během testu 6.12.....</i>	<i>88</i>
<i>Obrázek 71 - Průběh výkonu a přetlaku v experimentální zhasací komoře vyrobené z materiálu Poly 2 během testu 6.12.....</i>	<i>88</i>
<i>Obrázek 72 - Průběh napětí, proudu a přetlaku v experimentální zhasací komoře vyrobené z materiálu Poly 5 během testu 6.18.....</i>	<i>89</i>
<i>Obrázek 73 - Průběh výkonu a přetlaku v experimentální zhasací komoře vyrobené z materiálu Poly 5 během testu 6.18.....</i>	<i>90</i>
<i>Obrázek 74 - Průběh napětí, proudu a přetlaku v experimentální zhasací komoře vyrobené z materiálu Poly 4 během testu 6.22.....</i>	<i>91</i>
<i>Obrázek 75 - Průběh výkonu a přetlaku v experimentální zhasací komoře vyrobené z materiálu Poly 4 během testu 6.22.....</i>	<i>91</i>
<i>Obrázek 76 – Spektrum záření plazmatu sledovaného oblouku při použití materiálu Poly 3. ....</i>	<i>92</i>
<i>Obrázek 77 – Průběh relativní koncentrace uhlíku při zkoumání materiálu Poly 3.....</i>	<i>93</i>

<i>Obrázek 78 - Spektrum záření plazmatu sledovaného oblouku při použití materiálu Poly 1.</i>	<i>94</i>
<i>Obrázek 79 – Časový vývoj relativní koncentrace uhlíku při použití materiálu Poly 1.</i>	<i>95</i>
<i>Obrázek 80 - Spektrum záření plazmatu sledovaného oblouku při použití materiálu Poly 2.</i>	<i>95</i>
<i>Obrázek 81 – Časový vývoj koncentrace uhlíku při použití materiálu Poly 2.</i>	<i>96</i>
<i>Obrázek 82 – Spektrum záření plazmatu při použití materiálu Poly 5.</i>	<i>97</i>
<i>Obrázek 83 – Vývoj koncentrace uhlíku při zkoumání materiálu Poly 5.</i>	<i>97</i>
<i>Obrázek 84 – Spektrum záření plazmatu při použití materiálu Poly 4.</i>	<i>98</i>
<i>Obrázek 85 – Průběh relativní koncentrace uhlíku při použití materiálu Poly 4.</i>	<i>99</i>
<i>Obrázek 86 – Vývoj relativní kontaminace výbojového prostoru nosným materiálem kontaktů (Ag).</i>	<i>100</i>
<i>Obrázek 87 – Časový vývoj elektronové teploty při použití materiálu Poly 3.</i>	<i>101</i>
<i>Obrázek 88 - Časový vývoj elektronové teploty při použití materiálu Poly 1.</i>	<i>102</i>
<i>Obrázek 89 - Časový vývoj elektronové teploty při použití materiálu Poly 2.</i>	<i>103</i>
<i>Obrázek 90 - Časový vývoj elektronové teploty při použití materiálu Poly 5.</i>	<i>104</i>
<i>Obrázek 91 - Časový vývoj elektronové teploty při použití materiálu Poly 3.</i>	<i>105</i>
<i>Obrázek 92 – Závislost úbytku materiálu Poly 1 na obloukové energii.</i>	<i>121</i>
<i>Obrázek 93 – Závislost úbytku materiálu Poly 2 na obloukové energii.</i>	<i>121</i>
<i>Obrázek 94 – Závislost úbytku materiálu Poly 3 na obloukové energii.</i>	<i>122</i>
<i>Obrázek 95 – Závislost úbytku materiálu Poly 4 na obloukové energii.</i>	<i>122</i>
<i>Obrázek 96 – Závislost úbytku materiálu Poly 5 na obloukové energii.</i>	<i>122</i>
<i>Obrázek 97 – Průběh napětí, proudu a přetlaku v experimentální zhášecí komoře vyrobené z materiálu Poly 3 během testu 6.1.</i>	<i>124</i>
<i>Obrázek 98 – Průběh napětí, proudu a přetlaku v experimentální zhášecí komoře vyrobené z materiálu Poly 3 během testu 6.2.</i>	<i>124</i>
<i>Obrázek 99 – Průběh napětí, proudu a přetlaku v experimentální zhášecí komoře vyrobené z materiálu Poly 3 během testu 6.3.</i>	<i>124</i>
<i>Obrázek 100 - Průběh napětí, proudu a přetlaku v experimentální zhášecí komoře vyrobené z materiálu Poly 3 během testu 6.4.</i>	<i>125</i>
<i>Obrázek 101 - Průběh napětí, proudu a přetlaku v experimentální zhášecí komoře vyrobené z materiálu Poly 3 během testu 6.5.</i>	<i>125</i>
<i>Obrázek 102 - Průběh napětí, proudu a přetlaku v experimentální zhášecí komoře vyrobené z materiálu Poly 1 během testu 6.6.</i>	<i>125</i>

<i>Obrázek 103 - Průběh napětí, proudu a přetlaku v experimentální zhášecí komoře vyrobené z materiálu Poly 1 během testu 6.7.....</i>	<i>126</i>
<i>Obrázek 104 - Průběh napětí, proudu a přetlaku v experimentální zhášecí komoře vyrobené z materiálu Poly 1 během testu 6.8.....</i>	<i>126</i>
<i>Obrázek 105 - Průběh napětí, proudu a přetlaku v experimentální zhášecí komoře vyrobené z materiálu Poly 1 během testu 6.9.....</i>	<i>126</i>
<i>Obrázek 106 - Průběh napětí, proudu a přetlaku v experimentální zhášecí komoře vyrobené z materiálu Poly 1 během testu 6.10.....</i>	<i>127</i>
<i>Obrázek 107 - Průběh napětí, proudu a přetlaku v experimentální zhášecí komoře vyrobené z materiálu Poly 2 během testu 6.11.....</i>	<i>127</i>
<i>Obrázek 108 - Průběh napětí, proudu a přetlaku v experimentální zhášecí komoře vyrobené z materiálu Poly 2 během testu 6.12.....</i>	<i>127</i>
<i>Obrázek 109 - Průběh napětí, proudu a přetlaku v experimentální zhášecí komoře vyrobené z materiálu Poly 2 během testu 6.13.....</i>	<i>128</i>
<i>Obrázek 110 - Průběh napětí, proudu a přetlaku v experimentální zhášecí komoře vyrobené z materiálu Poly 2 během testu 6.14.....</i>	<i>128</i>
<i>Obrázek 111 - Průběh napětí, proudu a přetlaku v experimentální zhášecí komoře vyrobené z materiálu Poly 2 během testu 6.15.....</i>	<i>128</i>
<i>Obrázek 112 - Průběh napětí, proudu a přetlaku v experimentální zhášecí komoře vyrobené z materiálu Poly 5 během testu 6.16.....</i>	<i>129</i>
<i>Obrázek 113 - Průběh napětí, proudu a přetlaku v experimentální zhášecí komoře vyrobené z materiálu Poly 5 během testu 6.17.....</i>	<i>129</i>
<i>Obrázek 114 - Průběh napětí, proudu a přetlaku v experimentální zhášecí komoře vyrobené z materiálu Poly 5 během testu 6.18.....</i>	<i>129</i>
<i>Obrázek 115 - Průběh napětí, proudu a přetlaku v experimentální zhášecí komoře vyrobené z materiálu Poly 4 během testu 6.21.....</i>	<i>130</i>
<i>Obrázek 116 - Průběh napětí, proudu a přetlaku v experimentální zhášecí komoře vyrobené z materiálu Poly 4 během testu 6.22.....</i>	<i>130</i>
<i>Obrázek 117 - Průběh výkonu a přetlaku v experimentální zhášecí komoře vyrobené z materiálu Poly 3 během testu 6.1.....</i>	<i>131</i>
<i>Obrázek 118 - Průběh výkonu a přetlaku v experimentální zhášecí komoře vyrobené z materiálu Poly 3 během testu 6.2.....</i>	<i>131</i>
<i>Obrázek 119 - Průběh výkonu a přetlaku v experimentální zhášecí komoře vyrobené z materiálu Poly 3 během testu 6.3.....</i>	<i>131</i>
<i>Obrázek 120 - Průběh výkonu a přetlaku v experimentální zhášecí komoře vyrobené z materiálu Poly 3 během testu 6.4.....</i>	<i>132</i>

Obrázek 121 - Průběh výkonu a přetlaku v experimentální zhášecí komoře vyrobené z materiálu Poly 3 během testu 6.5.....	132
Obrázek 122 - Průběh výkonu a přetlaku v experimentální zhášecí komoře vyrobené z materiálu Poly 1 během testu 6.6.....	132
Obrázek 123 - Průběh výkonu a přetlaku v experimentální zhášecí komoře vyrobené z materiálu Poly 1 během testu 6.7.....	133
Obrázek 124 - Průběh výkonu a přetlaku v experimentální zhášecí komoře vyrobené z materiálu Poly 1 během testu 6.8.....	133
Obrázek 125 - Průběh výkonu a přetlaku v experimentální zhášecí komoře vyrobené z materiálu Poly 1 během testu 6.9.....	133
Obrázek 126 - Průběh výkonu a přetlaku v experimentální zhášecí komoře vyrobené z materiálu Poly 1 během testu 6.10.....	134
Obrázek 127 - Průběh výkonu a přetlaku v experimentální zhášecí komoře vyrobené z materiálu Poly 2 během testu 6.11.....	134
Obrázek 128 - Průběh výkonu a přetlaku v experimentální zhášecí komoře vyrobené z materiálu Poly 2 během testu 6.12.....	134
Obrázek 129 - Průběh výkonu a přetlaku v experimentální zhášecí komoře vyrobené z materiálu Poly 2 během testu 6.13.....	135
Obrázek 130 - Průběh výkonu a přetlaku v experimentální zhášecí komoře vyrobené z materiálu Poly 2 během testu 6.14.....	135
Obrázek 131 - Průběh výkonu a přetlaku v experimentální zhášecí komoře vyrobené z materiálu Poly 2 během testu 6.15.....	135
Obrázek 132 - Průběh výkonu a přetlaku v experimentální zhášecí komoře vyrobené z materiálu Poly 5 během testu 6.16.....	136
Obrázek 133 - Průběh výkonu a přetlaku v experimentální zhášecí komoře vyrobené z materiálu Poly 5 během testu 6.17.....	136
Obrázek 134 - Průběh výkonu a přetlaku v experimentální zhášecí komoře vyrobené z materiálu Poly 5 během testu 6.18.....	136
Obrázek 135 - Průběh výkonu a přetlaku v experimentální zhášecí komoře vyrobené z materiálu Poly 4 během testu 6.21.....	137
Obrázek 136 - Průběh výkonu a přetlaku v experimentální zhášecí komoře vyrobené z materiálu Poly 4 během testu 6.22.....	137

## SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 1 – Soupiska zkoumaných výkonných plastů. ....</i>	<i>32</i>
<i>Tabulka 2 – Zdůvodnění pokusu transferu materiálu pro použití v kontaktu s obloukem [44]. ....</i>	<i>32</i>
<i>Tabulka 3 – Tabulka použitých měřicích přístrojů pro experimenty kapitoly 5. ....</i>	<i>34</i>
<i>Tabulka 4 – Tabulka elektrických parametrů používaných při experimentech.....</i>	<i>35</i>
<i>Tabulka 5 – Shrnutí výsledků z hlediska úspěšnosti zhášení oblouku. ....</i>	<i>49</i>
<i>Tabulka 6 – Přehled průměrných vypínacích časů a jejich odchylek při experimentech. ....</i>	<i>52</i>
<i>Tabulka 7 – Průměrná špičková přepětí během vypínacího procesu a jejich odchylky.....</i>	<i>54</i>
<i>Tabulka 8 – Přehled průměrné hodnoty Joulova integrálu a jeho odchylek při experimentech. ..</i>	<i>57</i>
<i>Tabulka 9 – Přehled průměrné obloukové energie a jejich odchylek při experimentech. ....</i>	<i>59</i>
<i>Tabulka 10 – Hmotnostní úbytek proudovodné dráhy a jejích součástí. ....</i>	<i>60</i>
<i>Tabulka 11 – Průměrné hmotnostní úbytky materiálů zhášecích komor při různých výkonových parametrech.....</i>	<i>63</i>
<i>Tabulka 12 – Korelační koeficienty při hledání veličiny popisující nejlépe úbytek hmotnosti materiálu izolační zhášecí komory. ....</i>	<i>64</i>
<i>Tabulka 13 – Vybrané parametry spektrografu Avanteas AvaSpec ULS 3648 TEC. ....</i>	<i>75</i>
<i>Tabulka 14 – Měřicí přístroje použité pro experimenty kapitoly 6.....</i>	<i>83</i>
<i>Tabulka 15 – Data získaná při zkoumání vlivu oblouku na materiál Poly 1 – část 1.....</i>	<i>113</i>
<i>Tabulka 16 - Data získaná při zkoumání vlivu oblouku na materiál Poly 1 – část 2 (neúspěšné testy vyznačeny červeně).....</i>	<i>114</i>
<i>Tabulka 17 - Data získaná při zkoumání vlivu oblouku na materiál Poly 2 – část 1.....</i>	<i>115</i>
<i>Tabulka 18 - Data získaná při zkoumání vlivu oblouku na materiál Poly 2 – část 2 (neúspěšné testy vyznačeny červeně).....</i>	<i>116</i>
<i>Tabulka 19 - Data získaná při zkoumání vlivu oblouku na materiál Poly 3 – část 1.....</i>	<i>117</i>
<i>Tabulka 20 - Data získaná při zkoumání vlivu oblouku na materiál Poly 3 – část 2.....</i>	<i>118</i>
<i>Tabulka 21 - Data získaná při zkoumání vlivu oblouku na materiál Poly 4 (neúspěšné testy vyznačeny červeně).....</i>	<i>119</i>
<i>Tabulka 22 - Data získaná při zkoumání vlivu oblouku na materiál Poly 5 (neúspěšné testy vyznačeny červeně).....</i>	<i>120</i>
<i>Tabulka 23 – Data získaná při zkoumání interakce spínacího oblouku a blízkých materiálů z hlediska fyzikálních parametrů plazmatu (neúspěšné testy vyznačeny červeně).....</i>	<i>123</i>

## SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Veličina	Jednotka
$a$	rychlost zvuku	( $\text{ms}^{-1}$ )
$A_{ki}$	pravděpodobnost přechodu (Einsteinův koeficient)	( $\text{s}^{-1}$ )
$A_{rel}$	relativní koncentrace	(-)
$c$	rychlost světla	( $\text{ms}^{-1}$ )
$c_v$	měrná objemová tepelná kapacita	( $\text{Jm}^{-3}\text{K}^{-1}$ )
$E_0$	počáteční intenzita elektrického pole	( $\text{Vm}^{-1}$ )
$f$	frekvence	(Hz)
$g$	statistická váha pravděpodobnosti hladiny	(-)
$h$	Planckova konstanta	(eVs)
$I$	proud	(A)
$I_e$	intenzita záření	( $\text{Wm}^{-2}$ )
$I_r$	relativní intenzita záření	(-)
$I^2t$	Joulův integrál	( $\text{A}^2\text{s}$ )
$l$	střední volná dráha letu	(m)
$k$	Boltzmannova konstanta	( $\text{eVK}^{-1}$ )
$L$	spektrální tok	( $\text{Wm}^{-1}$ )
$L_r$	relativní spektrální tok	( $\text{m}^{-1}$ )
$m$	hmotnost	(g)
$\Delta m$	úbytek hmotnosti	(g)
$n$	otáčky	( $\text{min}^{-1}$ )
$N$	koncentrace částic	( $\text{m}^{-3}$ )
$N_r$	relativní koncentrace částic	(-)
$p$	tlak	(bar)
$P$	výkon	(W)
$S$	obsah	( $\text{m}^2$ )
$t$	čas	(s)

$T$	termodynamická teplota	(T)
$U$	napětí	(V)
$U_e$	energie hladiny	(eV)
$V$	objem	(m <sup>3</sup> )
$W_a$	oblouková energie	(J)
$\alpha$	součinitel přestupu tepla	(WK <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup> )
$\varepsilon$	deformace	(-)
$\theta$	oteplení	(K)
$\lambda$	vlnová délka	(nm)
$\nu$	frekvence záření	(Hz)
$\sigma$	směrodatná odchylka	(jednotka posuzované veličiny)
$\sigma_e$	účinný průřez	(m <sup>2</sup> )
$\tau$	časová konstanta	(s)

---

AC	střídavé napětí
DC	stejnoseměrné napětí
FWHM	full width at half maximum (plná šířka čáry v polovině maxima intenzity)
MCB	miniature circuit breaker (modulární jistič)
nn	nízké napětí (v ČR do 1000 V mezi fázemi [22])
PA	polyamid
PK	polyketon
PBT	polybutyléntereftalát
vn	vysoké napětí (v ČR od 1 kV do 52 kV mezi fázemi [22])
vvn	velmi vysoké napětí (v ČR nad 52 kV do 300 kV mezi fázemi [22])
SO	směrodatná odchylka

# 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 přístrojů<sup>1</sup> 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 proudech daných zařízení. Tyto spínací přístroje jsou ve většině případů opatřeny pouze kontakty z kompozitů s materiály odolnými proti působení oblouku, ale neobsahují speciální konstrukční řešení pro zhašení 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 zhašení 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 vlákně žárovky), byl by tento pokus s vysokou pravděpodobností neúspěšný. Oblouk se v elektroinstalačních spínačích ve většině případů zhaší 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

---

<sup>1</sup> 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 takovátó 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 (masívní kontaktní ústrojí, vodiče oblouku, zhášecí 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 zhášecí komory. Ve zhášecí komoře dochází k uhašení oblouku využitím některého z principů zhášení, popřípadě jejich kombinací.

Nejhojněji využívanými principy zhášení jsou: ochlazování oblouku prodloužením jeho délky v roštové izolační komoře, tlakovzdušný odkuk vodivého plazmatu<sup>2</sup> 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.

---

<sup>2</sup> 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 CÍLE PRÁCE

### 1. Návrh metodiky pro laboratorní zkoumání interakce oblouku a v oblasti spínacích přístrojů nových konstrukčních materiálů zhašecích izolačních komor

Prvním cílem práce je na základě požadavků kladených na konstrukční materiály nacházející se v elektrických přístrojích nízkého napětí v kontaktu se spínacím obloukem vytvořit a ověřit metodiku pro zkoumání vlivu elektrického oblouku na tyto materiály. Horké plazma elektrického oblouku taví blízké materiály a ty se poté vypařují. Je nutné vytvořit také metodiku zkoumání změn fyzikálních vlastností plazmatu oblouku ve výparech s příměsemi zkoumaných materiálů.

### 2. Experimentální zkoumání vybraných materiálů z hlediska vlivů na elektrické parametry spínacího oblouku a také z hlediska působení oblouku na dané materiály

Účelem této části je provedení experimentálního zkoumání materiálů vybraných partnerskou zahraniční firmou z hlediska vlivu jejich použití v kontaktu se spínacím obloukem na elektrické parametry spínacího oblouku během spínacího procesu. Dílčím cílem je také vývojové posouzení působení spínacího oblouku na použitý materiál. Je třeba zhodnotit míru poškození součástí přístroje v kontaktu se spínacím obloukem pro zadané materiály. Pro tento účel lze zvolit různé fyzikálně-chemické metody. Například měření povrchové izolační pevnosti, zkoumání mikroskopem, měření odolnosti plazivým proudům atd. Pro účely této práce byla zvolena metoda sledování úbytku hmotnosti, která byla vyhodnocena jako nejlepší poměr mezi přesností a časovou a technologickou náročností. Navíc hlavním problémem většiny metod je nevratné ovlivnění zkoumaného vzorku, což by bylo nežádoucí pro pokračování v testování.

### 3. Experimentální zkoumání vybraných materiálů z hlediska vlivů na fyzikální parametry plazmatu

Třetím cílem práce je prozkoumání vlivu daných materiálů izolačních zhašecích komor na fyzikální parametry plazmatu spínacího oblouku. Odpařováním materiálů do výbojového prostoru při hoření oblouku se vytváří plazma s neznámým složením. Relativní složení plazmatu lze určit pomocí nejrůznějších metod. Je nutné však opět zvolit takovou metodu, která neovlivní průběh testu samotného ani nezmění vlastnosti zkoumaného vzorku. Z tohoto důvodu byla zvolena optická emisní spektroskopie, většina ostatních metod totiž využívá externí zdroje záření, které ovlivňují experiment, nebo, jako většina chemických analýz, analyzují zachycený vzorek bez možnosti časového rozlišení. Dále je vhodné znát vliv použitých materiálů na velikost tlaku uvnitř zhašecí komory z důvodu jeho vlivu na vypínací proces. Velmi důležitým fyzikálním parametrem oblouku je také jeho teplota, která působí na blízké materiály a způsobuje jeho poškození.

### 4. Zhodnocení získaných výsledků a aplikační doporučení

Experimentálně zjištěná data všech pěti předložených materiálů budou vyhodnocena z různých hledisek důležitých pro chování spínacího oblouku přístrojů nízkého napětí. Výstupem z práce bude zhodnocení a porovnání zadaných materiálů. Výsledky budou použity k vývoji nových a inovaci stávajících produktů zahraničního partnera z průmyslu.

## 3 VYBRANÉ SPÍNACÍ PŘÍSTROJE NÍZKÉHO NAPĚTÍ

Následující kapitola obsahuje informace týkající se elektrických přístrojů nízkého napětí, které byly vybrány z důvodu existence kontaktu oblouku s konstrukčními plastovými materiály. Při výběru byla také brána v potaz míra vlivu plastů na spínací proces. Z tohoto důvodu byly vyřazeny například přístroje plněné směsmi vodíku a dusíku, výkonové pojistky a další.

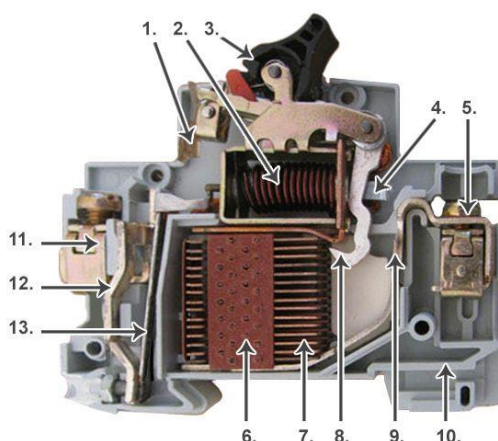
### 3.1 Elektrický jistič

Elektrický jistič je nejhojněji používaný výkonový elektrický přístroj, který slouží k ochraně zařízení a vedení proti účinkům nadproudů. Mezi nadproudy patří přetížení a zkrat. Zkratové proudy jsou z těchto dvou ty vyšší a mohou dosahovat hodnot až několik tisíc ampérů. [1]

Ve většině dnešních elektrických rozvodů nahrazují jističe funkci dříve hojně používaných pojistek. Je nutné však zmínit, že už jen co se principu týče, nejde o plně ekvivalentní zařízení, i když si to mnoho laiků i pracovníků v oboru myslí. Hlavní výhodou jističe je možnost jeho opakovatelného použití. Pojistky jsou však schopny vypnout vyšší zkratové proudy při nízké pořizovací ceně. Z tohoto důvodu je vhodné v obvodech s vysokým předpokládaným proudem použít kombinaci pojistek s vysokou vypínací schopností a například odpínače, který je schopný odpínat obvod pod zatížením při potřebě práce, revize apod. [1, 2]

Existuje mnoho parametrů, podle kterých lze jističe klasifikovat. Například je lze rozdělit z hlediska pracovního proudu na stejnosměrné a střídavé. Konstrukční řešení těchto jističů je velmi podobné, u stejnosměrných přístrojů bývají někdy přidávány permanentní magnety pro zlepšení pohybu oblouku do zhášecí komory. Další možné dělení je z hlediska použitých spouští na termo-magnetické a elektronické. Konstrukce částí, které přicházejí do kontaktu s obloukem, není typem spouště ovlivněna. Termo-magnetických spouští je využíváno především u většiny modulárních jističů. Na druhé straně elektronické spouště je využíváno nejčastěji u jističů vzduchových a kompaktních, například OEZ BL1600S [3]. Hlavním důvodem použití termo-magnetické spouště je její cena. Implementace elektronické spouště do běžných modulárních jističů je technicky proveditelná, ale vzhledem k ceně tohoto typu spouště by došlo k výraznému nárůstu ceny produktu, který by zapříčinil v současné době neprodejnost produktu.

Vnější vzhled jističe je obecně známý, proto se zaměříme na jeho vnitřní komponenty a jejich funkci. Vnitřní strukturu jističe s termo-magnetickou spouští zobrazuje obrázek 1.



Obrázek 1 – Pohled na vnitřní komponenty modulárního jističe [4].

Západka 1 slouží k fixaci systému v zapnuté poloze. Pod číslem 2 je v obrázku zobrazena cívka elektromagnetu zkratové (časově nezávislé) spouště, kotva elektromagnetu je označena číslem 4. Páčkou jističe 3 je možné jistič manuálně zapnout, popřípadě vypnout. Svorčky 5 a 11 slouží k fixaci vstupního a výstupního vodiče. Držák plechů zhášecí komory 6 bývá obvykle vyroben z tvrzeného papíru s nehořlavými příměsemi, nebo ze sklolaminátu. Číslo 7 odkazuje na feromagnetické plechy zhášecí komory, které slouží k rozdělení oblouku na více malých oblouků, čímž vzroste napětí na oblouku vlivem vzniku anodových a katodových úbytků. Vodiče oblouku 8 a 9 vedou oblouk z oblasti kontaktního styku do zhášecí komory<sup>3</sup>. Vodiče oblouku z obou stran obvykle také obklopuje dílec z plastu, který vytváří izolační štěrbinu, a tím navyšuje obloukové napětí. Plastové pouzdro 10 fixuje pozici všech komponent a ve spodní části obsahuje výřez, pomocí kterého je možné ukotvit jistič na DIN lištu. Pomocí proudovodné dráhy 12 je elektrický proud veden do bimetalu 13, který tvoří časově závislou spoušť. [4, 5]

Z hlediska této práce jsou důležité především oblasti, ve kterých se vyskytuje elektrický oblouk, ostatním částem nebude tedy věnována přílišná pozornost.

Z pohledu interakce oblouku a konstrukčních částí v podstatě nezáleží na typu použité spouště, ani na tom, který prvek iniciuje rozpojení kontaktů. Míra interakce s okolními materiály je především ovlivněna dobou existence spínacího oblouku, jeho parametry a vlastnostech okolních materiálů. Doba hoření oblouku je ovlivněna mnoha faktory. Jedním z nich je konstrukce proudovodné dráhy a vodičů oblouku, která ovlivňuje pohyb oblouku do zhášecí komory [6]. Dále také příměsemi, které se do plazmatu oblouku vypařují, a účinností zhášecí komory (v případě roštové zhášecí komory počet, tvar a tloušťka feromagnetických plechů). Během cesty do zhášecí komory přichází oblouk do styku s blízkými materiály. Tedy elektrovodnými vodiči oblouku, feromagnetickými plechy zhášecí komory, držákem feromagnetických plechů, pouzdem jističe (obvykle vyrobeno z polymerních termoplastů).

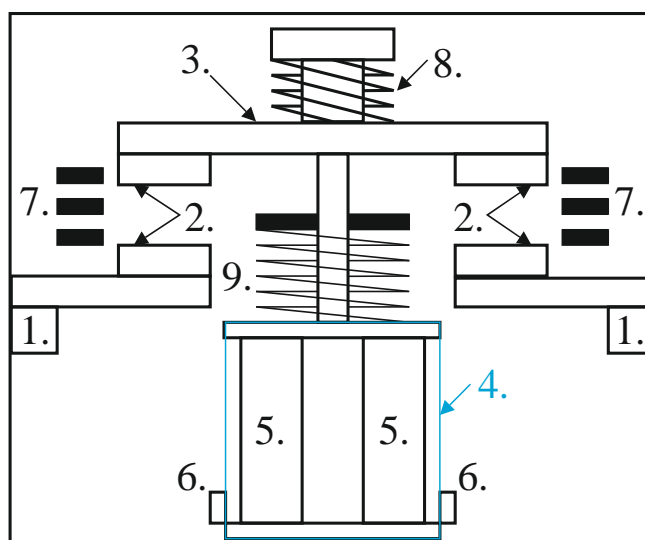
<sup>3</sup> Pozn.: Konstrukční řešení některých typů jističů neobsahuje vodiče oblouku.

## 3.2 Stykač

Stykač patří mezi provozní přístroje používané k častému spínání větších výkonů zátěže, např. motory a topná tělesa, pomocí malé energie přivedené na ovládací prvek. Většina dnešních stykačů zvládne až řádově miliony mechanických spínacích cyklů a stovky tisíc cyklů pod zatížením [7].

Stykače lze rozdělit stejně jako jističe dle pracovního proudu na stejnosměrné a střídavé. Další dělení je možné dle typu pohonu na elektromagnetické, pneumatické a hydraulické. K uvedení kontaktního můstku do pohybu se u elektromagnetických stykačů používá elektromagnet, u stykačů pneumatických pohon na principu stlačeného plynu a u hydraulických systém kapaliny pod tlakem. Nejčastěji používaným typem je stykač elektromagnetický, především pro jeho příznivou cenu a také proto, že není nutné používat v systému další médium (např. vzduch, olej). Jiné dělení dělí stykače zase na monostabilní a bistabilní. Bistabilní stykače obsahují obvykle dva elektromagnety a permanentní magnety, které drží stykač v požadovaných stabilních polohách. Tento systém se používá zpravidla tam, kde je kladen důraz na úsporu elektrické energie a spínání přístroje není příliš časté. [8]

Obrázek 2 zobrazuje principiální schéma typického elektromagnetického stykače. Stykače tohoto schématu se používají v širokém spektru aplikací, od trakce, až po pevné instalace ve výrobních linkách.



Obrázek 2 – Principiální schéma stykače.

Přívodní a vývodní svorka (1) slouží k připojení silových kabelů (kabelů ovládaného obvodu). Kontakty (2) jsou hlavním pracovním prvkem stykače, který zapíná a vypíná ovládaný obvod. Pevné kontakty jsou propojeny materiálem s dobrou elektrickou vodivostí se svorkami (1). Pohyblivé kontakty jsou vzájemně propojeny a s propojením tvoří jeden celek, tzv. „kontaktní můstek“, označeno číslem 3. Kontaktní můstek je pohyblivý za pomoci elektromagnetu 4. Ovládací napětí je přivedeno do budicí cívky (5) elektromagnetu přes svorky (6), které bývají typicky označeny A1 a A2. Zhášecí komora (7) může být vyrobena, stejně jako u jističe, z feromagnetických plechů, nebo může být tzv. „izolační“, což znamená, že rošty jsou vyrobeny z odolného izolantu (např. plastu, nebo keramiky) a obloukové napětí je navyšováno pomocí

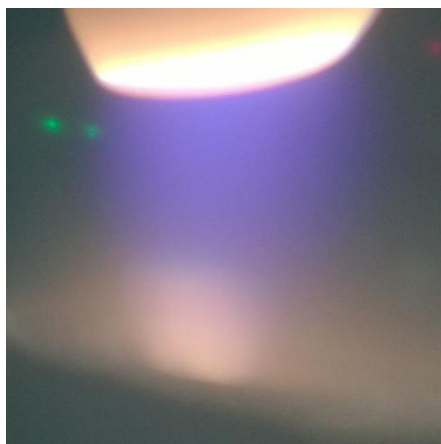
prodlužování oblouku. Kontaktní pružina (8) slouží k vytvoření rovnoměrného kontaktního přitlaku mezi pevnými a pohyblivými kontakty. Vypínací pružina (9) jednak fixuje kontakty ve stabilní poloze při stavu vypnuto a také určuje dynamiku při vypínacím procesu. Při zapínání přístroje působí síla jak vypínacích, tak kontaktních pružin proti síle vyvíjené elektromagnetem. [8]

Při vypínacím procesu pod zatížením dochází k výskytu elektrického oblouku. Stykač nevypíná až tak velké proudy jako jistič, proto ve většině stykačů, stejně jako v obrázku 2 chybí vodiče oblouku a oblouk hoří pouze na hranách kontaktů. Interakce materiálů a spínacího oblouku je ve stykači neméně důležitá jako v jističi. Oblouk při vypínacím procesu může přijít do styku s kontaktním materiálem (u stykače velice často slinutiny stříbra a oxidů cínu), s materiálem proudovodné dráhy (obvykle měď s povrchovou úpravou stříbrem), s tvrdou pájkou (pájka s teplotou tání více než 450 °C, slitiny mědi, stříbra, niklu, hliníku, zinku a dalších [11]), kterou jsou připevněny kontakty, s materiálem zhášecí komory (feromagnetické ocelové plechy, výkonné izolační materiály, nebo keramika) a v neposlední řadě s materiálem pouzdra stykače (obvykle polymerní termoplast).

## 4 ELEKTRICKÝ OBLOUK

### 4.1 Obecné vlastnosti elektrického oblouku

Elektrický oblouk zmiňovaný v předchozí kapitole, často označovaný jako obloukový výboj, se svým vzhledem podobá hoření plynového hořáku, viz obrázek 3. Hoření oblouku provází generace tepla, výskyt elektromagnetického pole a záření v širokém spektru vlnových délek [12]. Vysoká teplota a silné ultrafialové záření může být pro člověka nebezpečné, proto je nezbytné při pozorování elektrického oblouku chránit nejen zrak, ale také pokožku [13].

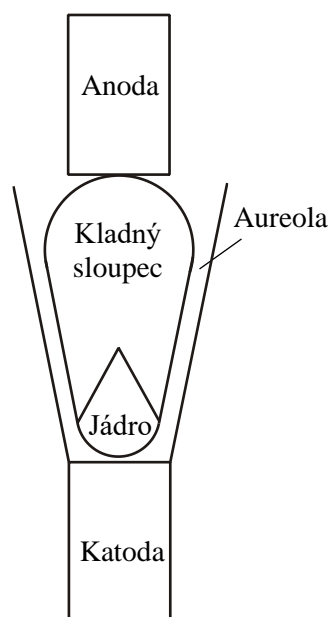


Obrázek 3 – Elektrický oblouk hořící ve vzduchu (v plazmatu dominuje dusík).

Vodivé horké médium mezi elektrodami při hoření oblouku se nazývá, za splnění podmínek, které budou diskutovány v pozdějších kapitolách, plazma.

Teplota elektrického oblouku může dosahovat až několika desítek tisíc Kelvinů. Teoreticky tato vlastnost vytváří prostor pro možnost roztavení, popřípadě odpaření jakéhokoli známého materiálu ve styku, popřípadě v blízkosti hořícího oblouku. Tohoto jevu se využívá například při svařování [14], řezání plazmatickým paprskem [15], plazmatickým naprašováním [16], nebo také při separaci prvků ze sloučenin [17] a dalších technologických procesech. Při plazmatickém naprašování lze dosáhnout nanesení velmi tenkých homogenních vrstev, čehož lze využít při výrobě např. polovodičových součástek [18].

V technice spínacích přístrojů nazýváme elektrický oblouk obloukem spínacím, v anglickém jazyce switching arc. Objevuje se mezi kontakty přístrojů při zapínání nebo vypínání obvodů pod zatížením. Ve spínacích elektrických přístrojích je paradoxně spínací oblouk v mnoha případech žádoucí. Především díky přeměně akumulované energie v obvodu na teplo, což pokud by nenastalo, mohlo by dojít k výskytu nežádoucího přepětí. Také vysoká teplota oblouku je částečně žádoucí z důvodu vzniku tlaku, který přispívá ke zhašení vlastního oblouku a vyfukování plazmatu z přístroje. Na druhé straně vysoká teplota poškozuje materiál jednotlivých dílů přístrojů. V ideálním případě by měl být elektrický přístroj navržen tak, aby spínací oblouk uvnitř přístroje hořel po definovaný omezený čas, za který by došlo ke snížení akumulované energie v obvodu na přípustnou mez, a teplota média uvnitř přístroje by vzrostla na potřebnou hodnotu k vytvoření vhodného tlaku, ale aby zároveň nedošlo k poškození žádných konstrukčních součástí.

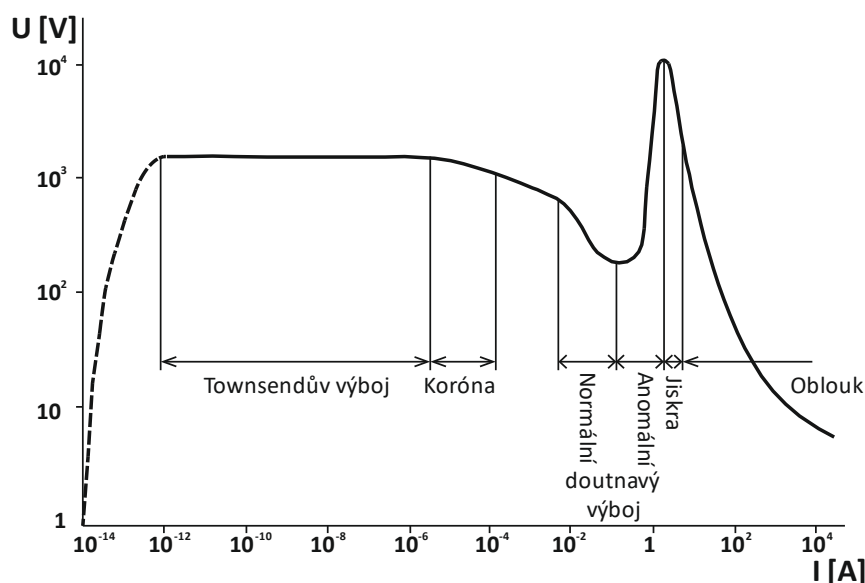


Obrázek 4 - Pomyslné rozdělení výbojového prostoru oblouku a jeho okolí na celky s podobnými fyzikálními vlastnostmi [10].

Na obrázku 4 je zobrazeno schéma stejnosměrného elektrického oblouku. Toto schéma odpovídá i střídavému oblouku, s tím rozdílem, že v každé nule napětí se vzájemně prohodí anoda s katodou a dojde k otočení celého výboje jádrem vždy ke katodě. Jádro, nazývané také často katodovým paprskem, vychází z katody a směrem k anodě přechází v kladný sloupec výboje. Kladný sloupec a jádro obklopuje aureola, což lze volně přeložit jako mrak zářících plynů. Barva oblouku závisí především na složení plazmatu ve výbojovém prostoru (například: dominující měď = zelená barva, dominující dusík = fialová barva, apod.), viz obrázek 3 [19]. Složení plazmatu se majoritně odvíjí od složení média ve výbojovém prostoru, materiálu elektrod a složení součástí tak blízkých oblouku, že dochází k emisi jejich atomů do výbojového prostoru. [10, 20]

## 4.2 Klasifikace elektrického oblouku

Elektrický oblouk řadíme z hlediska fyzikálních vlastností mezi elektrické výboje. Ze skupiny elektrických výbojů se jedná o výboj s relativně nízkým napětím mezi elektrodami, ale vysokou hodnotou protékajícího proudu, viz obrázek 5. Co do doby trvání, platí, že oblouk je výboj ustálený. Ustálený výboj se vyznačuje delší dobou života než výboje přechodné (korona, jiskra apod.). Z hlediska existence je spínací oblouk klasifikován jako samostatný výboj, což znamená, že může existovat samostatně bez přísunu vnější ionizační energie. Ionizační energií se rozumí například ozařování výbojového prostoru. Oblouk lze dále rozdělit dle typu proudu protékajícího obvodem na stejnosměrný a střídavý, dle materiálu elektrod, nebo dle tvaru výbojové dráhy na stabilizovaný a volně hořící oblouk. Stabilizovaného oblouku se využívá například při plazmovém řezání, stabilizace se provádí proudem vzduchu, vodou, apod. Stabilizovaný oblouk se vyznačuje velmi vysokou teplotou jádra a značným gradientem radiálního průběhu teploty. Volně hořícím obloukem se rozumí například oblouk volně na vzduchu. [10, 20, 21]



Obrázek 5 – Přehledová charakteristika elektrických výbojů [10].

### 4.3 Principy zapalování a zhašení spínacího oblouku v přístrojích

Aby mohl vzniknout elektrický oblouk, musí dojít k výskytu volných nosičů elektrického náboje v médiu mezi katodou a anodou, které je za běžných podmínek izolantem. Toho lze dosáhnout ionizací média, nebo emisí nosičů do výbojového prostoru z elektrod, popřípadě z externího zdroje. Ionizace plynu je proces, kdy dochází k nepružným srážkám částic<sup>4</sup> ve výbojovém prostoru. Zásadním parametrem pro nepružnou srážku je velikost kinetické energie srážejících se částic. Například pokud je kinetická energie předaná při srážce elektronu s atomem, nebo molekulou plynu vyšší než velikost ionizační energie, dojde k odrazu elektronu, který srážku vyvolal, a navíc k vytržení elektronu z atomu, nebo molekuly plynu. Po takovéto srážce tedy vzniknou dva samostatně se pohybující elektrony a jeden kladný iont. Nárůstu kinetické energie částic v plynu při atmosférickém tlaku lze dosáhnout působením elektrického pole.

Emise elektronů z elektrod popřípadě externího zdroje je podmíněna překonáním tzv. „výstupní práce elektronu“. Podle způsobu překonání výstupní práce rozlišujeme několik principů emise. V elektrických přístrojích se nejčastěji uplatňuje termoemise, autoemise, popřípadě sekundární emise. U termoemise je k překonání výstupní práce využíváno zvyšování energie elektronů ohřevem materiálu. Dalším principem je autoemise, kdy dochází k tunelování elektronů skrz zúženou potenciálovou bariéru pomocí silného elektrického pole. Sekundární emise je způsobena vyražením elektronů z materiálu ostřelováním materiálu jinými elektrony.

Při zapínání elektrického obvodu dochází k přibližování kontaktní dvojice, čímž roste intenzita elektrického pole mezi kontakty a v určité vzdálenosti nastane elektrický průraz izolačního média. Tento průraz nastává tehdy, když intenzita elektrického pole mezi kontakty překročí elektrickou pevnost izolačního média. Velikosti elektrické intenzity při prvotním průrazu izolačního média

<sup>4</sup> Rozeznáváme srážky pružné a nepružné, při pružných srážkách dochází pouze ke změně kinetické energie srážejících se částic, při nepružných srážkách dochází k přeměně části kinetické energie v energii jinou, nejčastěji vnitřní [21].

říkáme počáteční intenzita a značíme ji  $E_0$ . Při prvotním průrazu dojde k částečné ionizaci izolačního média, čímž se zvýší jeho vodivost a prostorem mezi kontakty začíná procházet proud. Elektrický oblouk v tomto případě zaniká v čase vytvoření vodivého mechanického spojení kontaktního systému. Zapínání musí být dostatečně rychlé, aby nedošlo k přílišnému nárůstu teploty, která by ohřála kontaktní materiál natolik, že by mohlo dojít ke slepení kontaktů, nebo dokonce k lokálnímu svaření a následnému selhání přístroje při vypínání elektrického obvodu.

Při vypínání elektrických obvodů dochází k oddalování kontaktní dvojice z výchozího vodivého mechanického spojení kontaktního systému do stavu rozpojeno. S klesající přitlačnou silou roste odpor ve styku a dochází k růstu teploty v kontaktu. Vlivem teploty dochází k emisi elektronů z katody a k ionizaci okolního izolačního média (např. vzduch, olej, aj.). Se vzdalujícími se kontakty dochází k nárůstu obloukového napětí a tím ke snižování stability oblouku. V okamžiku kdy střídavý proud prochází nulou, dochází obvykle během vypínacího cyklu k uhašení oblouku, pokud k tomu nedojde již dříve. Ač to není lidským okem pozorovatelné, vždy při průchodu nulou dochází k uhasnutí oblouku vlivem otočení polaritě elektrod a změny směru pohybu částic v obloukovém prostoru. Pokud během tohoto uhasnutí dojde k takovému nárůstu izolační pevnosti média mezi elektrodami, že odolá růstu napětí na elektrodách, nedojde již k opětovnému zapálení oblouku v další půlvině a může tak pokračovat proces rekombinace volných nosičů elektrického náboje ve výbojovém prostoru. Tento děj způsobí další nárůst izolační pevnosti zhasacího média a spolehlivé rozepnutí elektrického obvodu.

Pokud není možné oblouk uhasit mezi oddalujícími se kontakty ve vzduchu, přicházejí na řadu zhasedla. Zhasedla slouží k vylepšení vypínací schopnosti spínacích přístrojů. Existuje poměrně velké množství různých typů zhasedel. Nejčastěji používaným zhasedlem v nízkonapěťové technice je roštová zhasací komora. Její nespornou výhodou je, že nevyžaduje žádné doplňkové médium. Roštová zhasací komora již byla zmíněna v odstavci 3.1. Dalším možným způsobem je použití speciálních plynů (např.  $SF_6$ ), nebo olejů, které při výskytu oblouku oblouk ochlazují a navíc disociují na takové molekuly a atomy, které jsou schopny vázat volné elektrony a tím snižovat vodivost plazmatu. Tento způsob se naopak využívá hojně ve vysokonapěťové technice. Je také možné působením tlaku média odstranit ionizované médium z výbojové dráhy prouděním. Tohoto se využívá u tlakovzdušných vn a vvn výkonových vypínačů. V poslední době je velmi populární také vakuová technika, která využívá nedostatku částic potřebných k vytvoření vodivosti ve výbojovém prostoru.

V případě stejnosměrných proudů je situace poněkud jiná, protože zde nelze využívat průchodu nulou. U stejnosměrných spínacích přístrojů je tedy nutné dostat oblouk za mez jeho stability jiným způsobem. Existují dva možné přístupy ke zhasení stejnosměrného oblouku. Prvním z nich je využití elektrodových úbytků a zhaset, stejně jako u střídavých přístrojů, s využitím roštové zhasací komory s feromagnetickými plechy. Tento způsob má však jedno úskalí, a sice to, že stejnosměrný oblouk je poměrně stabilní a Lorentzova síla působící mezi obloukem a feromagnetickými plechy nepulzuje, což u nízkých hodnot proudu způsobuje časté problémy se stabilním hořením oblouku přímo mezi kontakty přístroje bez jakékoli snahy oblouku o přesun do zhasací komory. Druhým přístupem je využívání účinného chlazení oblouku společně s extrémním prodloužením v izolační zhasací komoře za přítomnosti cizího magnetického pole. Tento způsob je výhodný i pro zhasení

velmi malých proudů, protože magnetické pole je možno pomocí cívek, popřípadě permanentních magnetů rozdělit přesně od kontaktního prostoru přes vodiče oblouku až do zhášecí komory. Izolační roštová komora bývá vyrobena z výkonných plastů, na kterých se oblouk díky speciálnímu žebrování prodlužuje a tak se stává nestabilním a uhasíná. V celém procesu je klíčová volba použitého izolantu, protože tento se za působení oblouku odpařuje a výrazně ovlivňuje vlastnosti plazmatu spínacího oblouku. V některých případech také zvyšuje svým vypařováním tlak a přispívá tak k deionizaci. [10, 20, 21]

## 4.4 Fyzikální vlastnosti elektrického oblouku

Výbojová dráha elektrického oblouku je silně ionizována, a tudíž obsahuje velké množství volných nosičů náboje. Díky velkému množství nosičů náboje je vodivost výbojové dráhy vysoká, obvodem s hořícím obloukem prochází velký proud a napěťový úbytek na výbojové dráze je relativně nízký. Vysoký stupeň ionizace znamená pohyb velkého množství nabitých částic ve výbojovém prostoru. Tyto částice získávají kinetickou energii z elektrického pole. Díky jejich množství dochází k velkému počtu srážek i s neutrálními částicemi, což způsobuje ohřev média ve výbojovém prostoru.

Plazma elektrického oblouku je termické. V termickém plazmatu je relativní teplota elektronů, neutrálních částic a iontů velmi blízká až shodná. Plazma elektrického oblouku je kvazi-neutrální, což znamená, že i přes to, že ve výbojovém prostoru existují volné nabitě částice, je počet kladně nabitých částic přibližně stejný jako počet záporně nabitých částic. Z globálního hlediska, se tedy plazma oblouku jeví jako neutrální. Plazma oblouku se vyznačuje kolektivním chováním částic. Kolektivní chování částic se projevuje schopností plazmatu generovat globální elektromagnetická pole a interagovat s vnějšími elektromagnetickými poli. Tato vlastnost je velice důležitá, protože při zhášení oblouku se využívá elektrodynamických sil, které vyvolávají interakci elektromagnetického pole oblouku s vnějšími elektromagnetickými poli. [10, 20, 21]

## 4.5 Elektrodové oblasti

Elektrody zprostředkovávají elektricky vodivé spojení mezi elektrickým obvodem a plazmatem ve výbojovém prostoru. Tento přechod se vyznačuje velkým gradientem teploty a elektrické vodivosti. V plazmatu je kinetická energie mnohonásobně vyšší než kinetická energie elektronů v kovu, proto v elektrodových oblastech směrem z plazmatu k elektrodám kinetická energie elektronů klesá. [10, 20, 21]

### 4.5.1 Katodová oblast

Díky vysoké teplotě a působení elektrického pole zde dochází k emisi elektronů z katody do výbojového prostoru, část elektronů je spotřebována na neutralizaci kladných iontů v blízkosti katody a zbylé elektrony odcházejí přes výbojový prostor, kde se účastní srážek až na anodu a zpět do elektrického obvodu. Část oblouku, která je nejbližší katody nazýváme patou oblouku a je tvořena katodovou skvrnou. V oblasti katodové skvrny je vlivem malého průměru oblouku vysoká proudová hustota i teplota. V blízkosti katodové skvrny dochází k velkému množství ionizačních srážek. [10, 20, 21]

### 4.5.2 Anodová oblast

V této oblasti je dobře patrný přechod mezi vedením proudu ve výbojovém prostoru a vedením proudu ve vnějším elektrickém okruhu. Vzhledem k tomu, že kladné ionty jsou přitahovány katodou, je oblast anody o tyto ionty ochuzená a vzniká zde anodový úbytek napětí. V oblasti anody je nejdůležitějším procesem přeměna neutrálních částic na ionty, které podporují elektrickou vodivost plazmatu. Pro tvorbu iontů je důležité, aby v oblasti anody probíhala ionizace, což vyžaduje dostatečnou kinetickou energii těchto elektronů. Kinetickou energii elektrony získávají působením elektrického pole. Čím je elektrické pole silnější, je anodový úbytek větší. Typickým projevem existence anodového úbytku je kontrakce plazmatu<sup>5</sup>. [10, 20, 21]

---

<sup>5</sup> Kontrakce plazmatu je nestabilita spojená s tzv. "samosmrštěním plazmatu" do jednoho nebo více jasných proudových vláken [23].

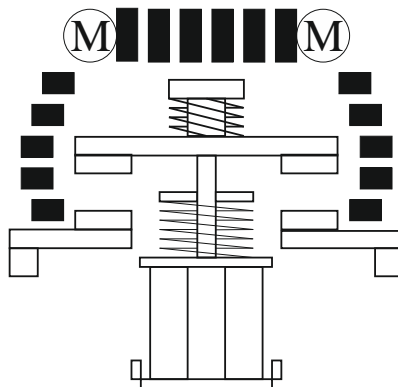
# 5 ZKOUMÁNÍ INTERAKCE OBLOUKU A KONSTRUKČNÍCH MATERIÁLŮ 1

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.

## 5.1 Popis experimentů a metodik

### 5.1.1 Zkoumané vzorky

V rámci experimentů byl prověřován vliv použitého materiálu experimentální zhášecí komory na elektrické parametry vypínacího procesu experimentálního přípravku, viz obrázek 6.



Obrázek 6 – Principiální vnitřní schéma přípravku pro testování vlivu oblouku na blízké materiály (pohled z boku).

Přípravek principiálně odpovídá stykači popsanému v kapitole 3.2. Proudovodná dráha přípravku byla vyrobena z elektrotechnické mědi a kontakty ze slinutiny  $\text{AgSnO}_2$ . Tato slinutina se hojně používá k výrobě kontaktů stejnosměrných přístrojů a je vhodná pro spínání zátěží s induktivním charakterem. Slinutina  $\text{AgSnO}_2$  je méně vhodná pro spínání zátěží ohmického charakteru [24].

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 6.

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

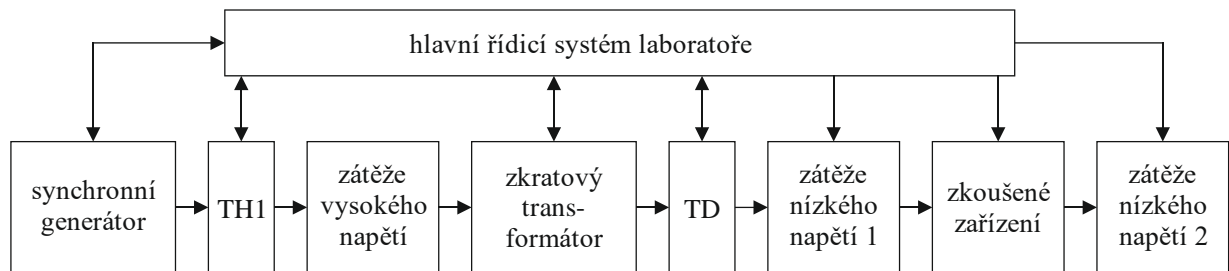
Tabulka 1 – Soupiska zkoumaných výkonných plastů.

Materiál	Zdůvodnění
<b>PA12 – polyamid</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- minimální absorpce vlhkosti</li> <li>- výborná rozměrová stálost</li> <li>- dobrá zpracovatelnost (svařitelnost i obrábění)</li> <li>- dosavadní obor užití: strojírenství (ložiska, kryty, apod.)</li> </ul>
<b>PA46 – polyamid</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- na druhé straně oproti PA12 vysoká absorpce vlhkosti</li> <li>- široký rozsah provozních teplot</li> <li>- dobrá zpracovatelnost (svařitelnost i obrábění)</li> <li>- vysoká tuhost i při vyšší teplotě</li> <li>- dosavadní obor užití: elektrotechnika (nosné konstrukce cívek), strojírenství (vodící lišty, ložiska, apod.)</li> </ul>
<b>PA66 – polyamid</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- oproti PA12 vysoká absorpce vlhkosti</li> <li>- široký rozsah provozních teplot</li> <li>- excelentní obrobiteľnosť a kluzné vlastnosti</li> <li>- vysoká tuhost i při vyšší teplotě</li> <li>- dosavadní obor užití: strojírenství (komponenty vystavované vysokému zatížení při vysokých provozních teplotách)</li> </ul>
<b>PBT-GF30 FR – polybutyléntereftalát</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- výborná chemická odolnost (odolnost např. olejům, tukům, aj.)</li> <li>- výborná odolnost proti stárnutí</li> <li>- nevýhodou je nízká odolnost vůči horké vodě</li> <li>- dosavadní obor užití: strojírenství (páky, ovládací prvky strojů těžkého strojírenství, apod.)</li> </ul>
<b>PK – polyketon</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- silná chemická vazba mezi polymerními řetězci</li> <li>- vlastnost vázat oxid uhelnatý</li> <li>- vysoká odolnost vlivů prostředí</li> <li>- dosavadní obor užití: automobilový průmysl (vedení paliva)</li> </ul>

Tabulka 2 – Zdůvodnění pokusu transferu materiálu pro použití v kontaktu s obloukem [44].

### 5.1.2 Schéma a popis měřicího řetězce

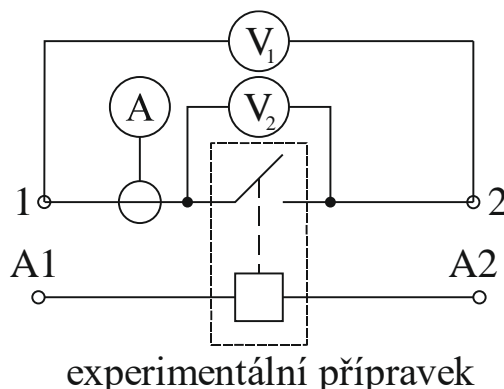
Vzhledem k širokým možnostem zmíněné laboratoře byly zváženy a odzkoušeny různé možnosti uspořádání měřicího řetězce. Zde je uvedeno konečné schéma, které se osvědčilo jako nejlepší řešení.



Obrázek 7 – Blokové schéma silové části obvodu.

Obrázek 7 zobrazuje blokové schéma silové části testovacího obvodu. Jako zdroj pro testy byl zvolen synchronní generátor o výkonu 16 MVA z důvodu možnosti rychlé korekce napětí pomocí změny buzení. Jedná se o cize buzený šestipólový rotační stroj, tedy výstupní frekvenci  $f = 50$  Hz odpovídají otáčky  $n = 1000 \text{ min}^{-1}$ . Generátor laboratoře spínacích přístrojů je poháněn asynchronním motorem o výkonu 560 kW s frekvenčním měničem. Tento systém je výhodný především z důvodu oddělení výkonové části laboratoře od distribuční sítě. Energie z generátoru je dále přivedena do tyristorového rozváděče TH1, který slouží v dané konfiguraci ke spínání celého obvodu. Za tyristory jsou zařazeny třífázově zapojené zátěže vysokého napětí. Zátěže se skládají ze tří sad cívek a tří sad rezistorů, pomocí kterých lze nastavit velikost proudu a účinník (při stejnosměrných zkouškách velikost proudu) před zkratovým transformátorem. Cívky byly vyzkratovány z důvodu umístění zátěží před usměrňovačem a zapojení obvodu na stejnosměrný proud. Za vysokonapěťovými zátěžemi se nachází zkratový transformátor o stejném výkonu jako generátor, a sice 16 MVA. Převod transformátoru lze nastavit pomocí dálkově přepínatelných odboček vinutí na primární straně, popřípadě manuálním přepojením vinutí na straně sekundární. V případě prováděných experimentů byl převod transformátoru nastaven 6/1 kV. Následujícím prvkem silového obvodu byl šestipulzní usměrňovač TD s maximální zatížitelností 50 kA. Zkoušené zařízení bylo umístěno na zkušební stolici ZS2. Finální hodnota proudu byla doladěna pomocí zátěží nízkého napětí 1 a 2. Tyto zátěže jsou v případě stejnosměrného zapojení tvořeny dvěma sadami cívek a rezistorů. Pomocí rezistorů lze nastavit hodnotu proudu a pomocí cívek časovou konstantu  $\tau$ .

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 8 – Blokové schéma měření elektrických veličin.

Vysokorychlostní videa byla snímána vysokorychlostní kamerou Photron SA-X2, viz kapitola 5.1.4. Snímaná oblast byla shora experimentálního přípravku. Obrázek 9 zobrazuje sledovanou oblast vysokorychlostní kamerou (červený obdélník).



Obrázek 9 – Experimentální přípravek - pohled shora (oblast záběru rychlokamery).

### 5.1.3 Měřicí přístroje

Při experimentech byly použity kalibrované měřicí přístroje, vzorkovací frekvence pro měření elektrických veličin byla 50 kHz. Kompletní soupis použitých přístrojů obsahuje tabulka 3.

Měřená veličina a značení ve schématu	Přístroj (typ)	Identifikační číslo
$U, V_1$	napěťový dělič 1 kV	U.1k.2
$U, V_2$	napěťový dělič 1 kV	U.1k.1
$I, A$	LEM IT-700S	LEM_3+U.10.1
$m$	Radwag AS 60/220.R2	479027
$\vartheta, p$ , relativní vlhkost	Meteo Comet T 7510	13963392
Sa-X2	1000K-M2	10132701006

Tabulka 3 – Tabulka použitých měřicích přístrojů pro experimenty kapitoly 5.

### 5.1.4 Vysokorychlostní kamera

Pro snímání vysokorychlostního videa byla použita kamera Photron SA-X2, viz obrázek 10. Tato kamera je schopna pořizovat záznam v rozlišení 1024x1024 pixelů o rychlosti 12 500 snímků za sekundu. Při redukovaném rozlišení až 1 000 000 snímků za sekundu. Výhodou této kamery je vysoká citlivost jejího čipu CMOS v širokém rozsahu vlnových délek. Dále také 12 bitový dynamický rozsah. V neposlední řadě je dobré zmínit závěrku, kterou lze redukovat až na 293 ns, což je vhodné zejména při velmi rychlých dějích, při kterých by mohlo docházet k rozmazání

obrazu. Přínos při sledování objektů touto vysokorychlostní kamerou přináší i použití spektrálních filtrů. Díky výborné citlivosti čipu kamery v celém spektru je možné použít spektrálních filtrů k odfiltrování, popřípadě propuštění pouze některých vlnových délek. Tohoto lze využít při diagnostice plazmatu především při znalosti složení plynu, popřípadě jeho spektra záření. Například pokud hoří oblouk ve výparech plastů a mědi, je možné například pomocí spektrálního filtru 656 nm s šířkou pásma 2 nm odfiltrovat záření mědi a soustředit pozorování pouze na výpary plastů. Důvodem je absence záření mědi ve jmenované oblasti a na druhé straně přítomnost typické intenzivní čáry vodíku H- $\alpha$  na vlnové délce 656,3 nm, který je obsažen ve většině výparů známých plastů.



Obrázek 10 – Vysokorychlostní kamera Photron SA-X2 [30].

### 5.1.5 Parametry experimentů

Parametry zkušebního obvodu zobrazuje tabulka 4. Experimenty byly prováděny stejnosměrným napětím se zvlněním o frekvenci 300 Hz (použití šesti-pulzního usměrňovače). Napětí bylo zvoleno s ohledem na konstrukci přípravku a také na chování oblouku při experimentech, pokud by oblouk uhasínal příliš snadno, nebylo by to žádoucí z hlediska příliš malého namáhání vzorků. Z důvodu hodnocení vlivu rostoucího spínaného výkonu byly zvoleny čtyři hodnoty proudu tvořící řadu. Indukčnost obvodu odpovídá zátěži majoritně odporového charakteru, tedy například brzdné odpory trakční lokomotivy.

Pořadové označení konfigurace zátěže	Typ napětí	$U$ (V)	$I$ (A)	$\tau$ (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 4 – Tabulka elektrických parametrů používaných při experimentech.

### 5.1.6 Postup měření

Návaznost práce, popřípadě ověřování výsledků mezi různými výzkumnými týmy je velice důležitá pro zvýšení kvality vědeckých dat jako celku. I pro spolupracující firmu je důležitý popis

postupu měření, který přesně udává, co bylo s jejich experimentálním přípravkem prováděno. Experimentální přípravek bude totiž ve firmě rozebrán, a ještě jednou zkoumán z důvodu opotřebení konkrétních částí součástí. Následující body proto popisují postup experimentů:

1. Byla provedena kalibrace testovacího obvodu zkušebny naprázdno na potřebné napětí 900 V pomocí změny buzení generátoru.
2. Přes experimentální přípravek v sepnutém stavu byly provedeny kalibrace proudů (100 A, 200 A, 300 A, 400 A) s časovou konstantou 0,1 ms. Tento způsob eliminuje odchylku kalibračních a testovacích parametrů způsobenou vlivem odporu přívodních vodičů, odporem proudovodné dráhy a kontaktů přístroje. parametry byly změřeny a zaznamenány, viz tabulka 4.
3. Zkušební obvod byl nastaven s parametry s pořadovým číslem 1, viz tabulka 4.
4. Experimentální přípravek byl sestaven v konfiguraci s materiálem izolační komory Poly 1 a bylo provedeno vážení všech součástí v kontaktu s obloukem.
5. Na svorky rozpojeného přístroje bylo přivedeno napětí, přístroj byl sepnut pomocí elektromagnetického pohonu, doba toku proudu byla nastavena na cca 120 ms. V tomto čase bylo odpojeno napájení budící cívky elektromagnetu, pomocí stlačené vypínací a kontaktní pružiny došlo k oddálení můstku do otevřené pozice, viz obrázek 6 – principiální vnitřní schéma přípravku pro testování vlivu oblouku na blízké materiály (pohled z boku). Poté hořel v přístroji elektrický oblouk po dobu, která byla ovlivněna použitým materiálem.
6. Během měření byly zaznamenávány okolní podmínky, snímána vysokorychlostní videa a měřeny elektrické parametry, ze kterých byly následně vyhodnoceny a vypočítány klíčové parametry vypínacího procesu (Joulův integrál  $I^2t$ , maximální hodnota proudu  $I_{max}$ , maximální hodnota obloukového napětí  $U_{amax}$ , oblouková energie  $W_a$ , a důležité časy:  $t_p$  – čas toku proudu před počátkem vypínacího procesu,  $t_a$  – doba hoření oblouku,  $t_t$  – celkový čas testu).
7. Po skončení testu bylo provedeno odsátí výparů, rozebrání přístroje, vizuální kontrola součástí, pořízení fotografií a zvážení zkoumaných součástí.
8. Bylo provedeno 10 opakování od bodu 4. až po bod 7.
9. Postupně byly navyšovány parametry (pořadové číslo 2, 3, 4, tabulka 4), pro každé nastavení parametrů byly vždy opakovány body 4. až 8.
10. Postup od 3. až 9. byl opakován pro materiály Poly 2 až Poly 5.
11. Bylo provedeno vyhodnocení naměřených dat.

### 5.1.7 Stanovení Pearsonova korelačního koeficientu

Pro účely zjištění korelací bude použit Pearsonův korelační koeficient mezi naměřenými, popř. vypočítanými elektrickými veličinami a úbytkem hmotnosti izolační zhášecí komory

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

kde  $x$  je vždy zkoumaná elektrická veličina a  $y$  úbytek hmotnosti.

Předchozí rovnice lze zjednodušit do tvaru

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - n \bar{x} \bar{y}}{(n-1) s_x s_y} \quad (2)$$
$$r \in (-1; 1)$$

kde  $n$  je počet hodnot použitých ke zjištění korelace,  $\bar{x}$  a  $\bar{y}$  jsou výběrové průměry a  $s_x$  a  $s_y$  jsou výběrové směrodatné odchylky zkoumaných dat. Výsledné znaménko před Pearsonovým korelačním koeficientem určuje, zda se jedná o korelaci, či anti korelaci a vzdálenost od 0 určuje míru korelace zkoumaných veličin, kdy  $|r| = 1$  znamená 100% korelaci a 0 žádnou korelaci.

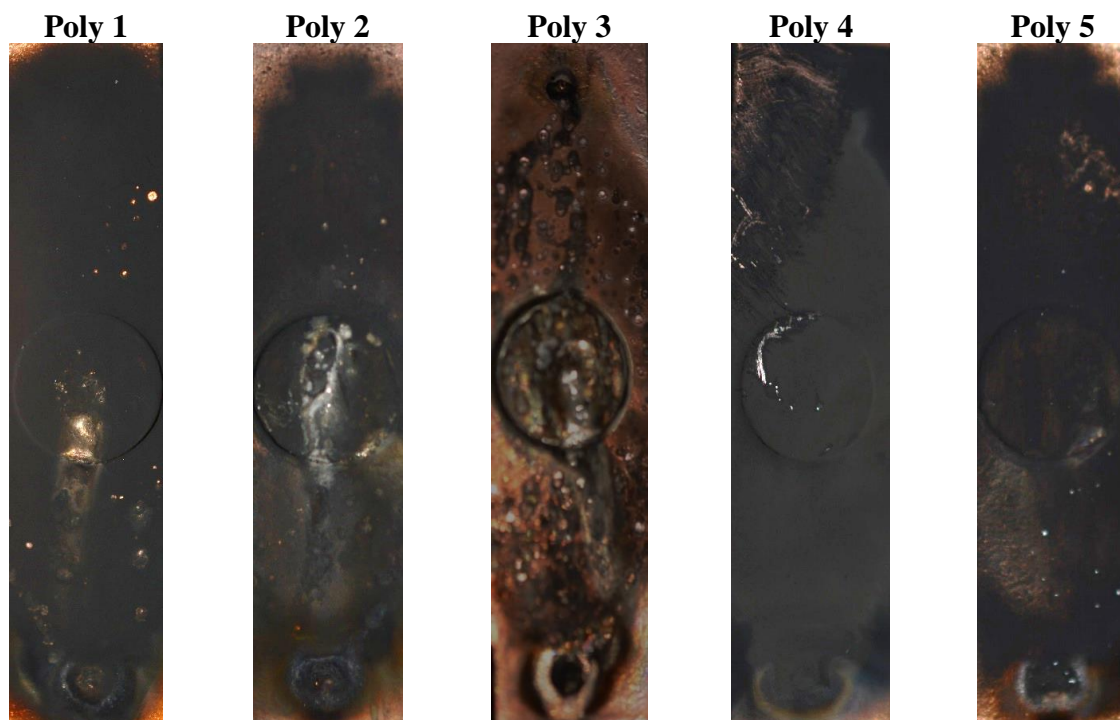
## 5.2 Výsledky měření a diskuse

Během měření bylo získáno velké množství dat. Rozšířená data lze nalézt v příloze, viz příloha 1. Z důvodu přehlednosti zde nejsou uvedena kompletní data.

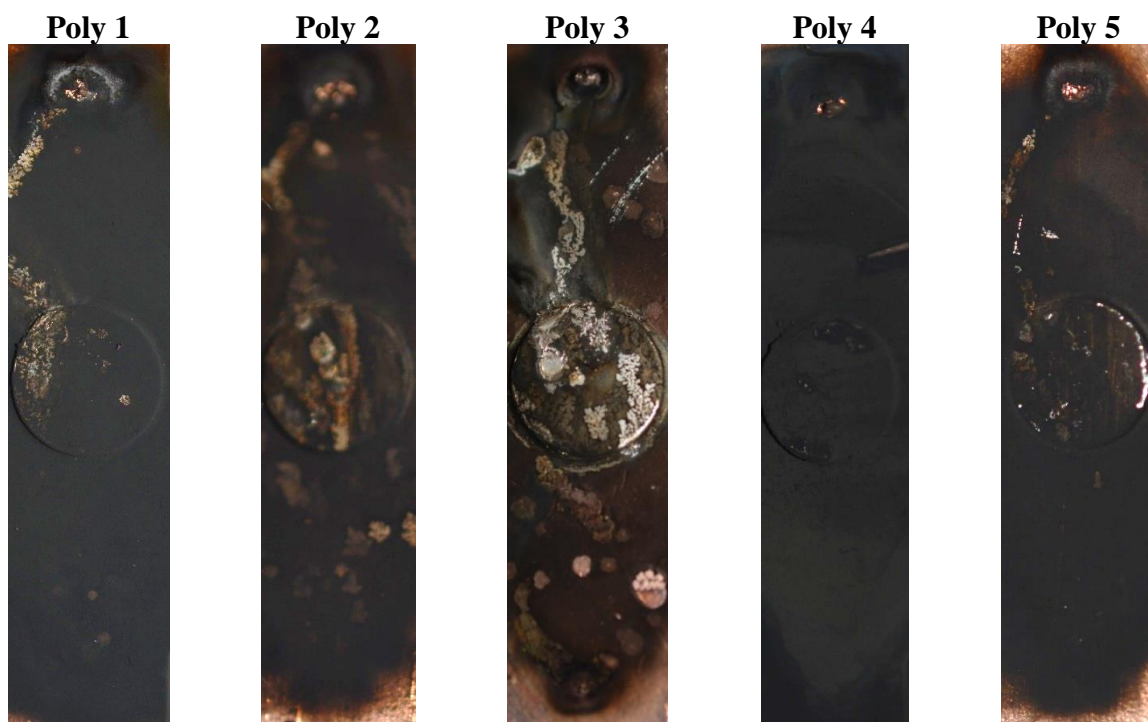
Postup měření byl plánován dle bodu 5.1.6, nicméně, některé materiály nebyly schopné odolat účinkům oblouku a docházelo k selhání vypínacího procesu, popřípadě hoření materiálů. Z tohoto důvodu byly testy po neúspěšných pokusech zastaveny a vizuální inspekce provedena po těchto neúspěšných testech, neúspěšné testy jsou vyznačeny v tabulkách červeně, viz příloha 1.

### 5.2.1 Vizuální kontrola součástí proudovodné dráhy

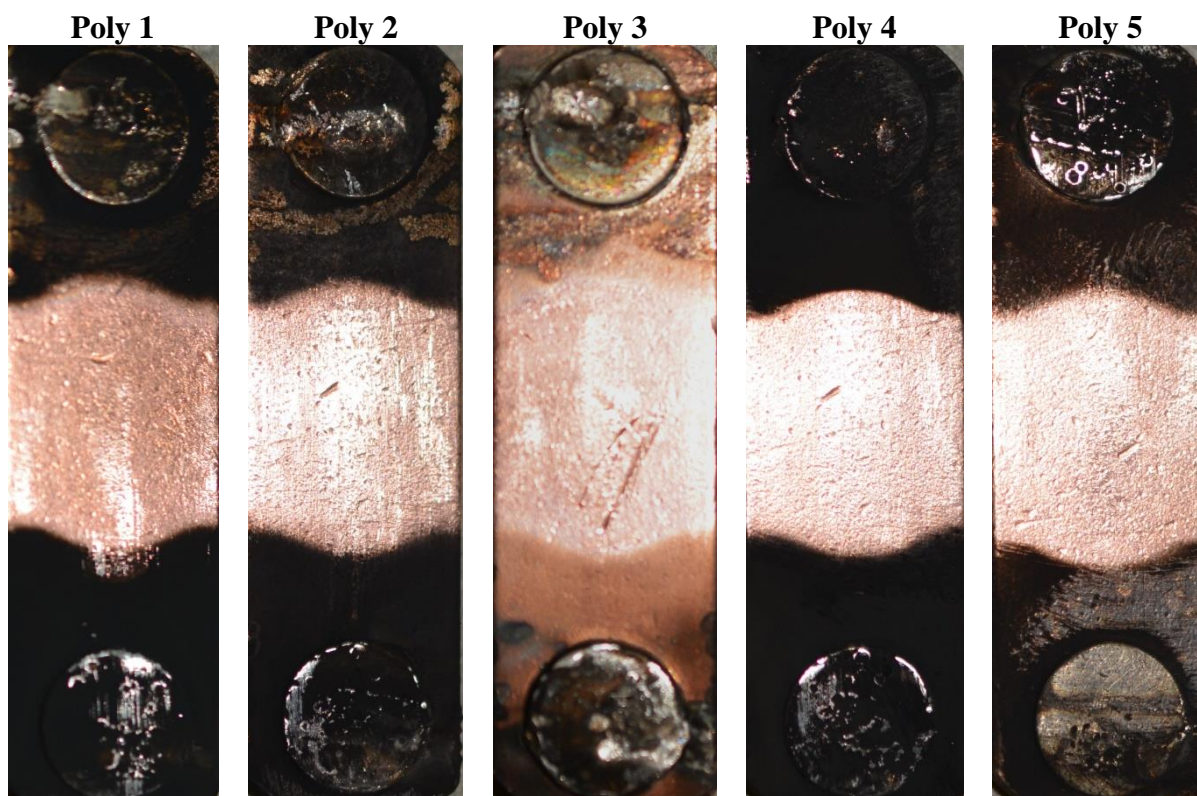
Jedna ze základních a nejstarších metod analýzy je vizuální kontrola. Během vizuální kontroly lze odhalit v našem případě poškození a karbonizaci kontaktů a součástí proudovodné dráhy. Karbonizace je v našem případě jedním z hlavních ukazatelů použitelnosti daných materiálů, protože vysoký stupeň karbonizace za určitých okolností umožňuje vytvoření nežádoucích vodivých cest po povrchu izolačních materiálů a zapříčiňuje následné selhání vypínání elektrického oblouku. Dalším aspektem je usazování karbonu v kontaktním styku. Tento jev razantně navyšuje kontaktní odpor, protože karbon disponuje výrazně nižší elektrickou i tepelnou vodivostí než materiál kontaktů  $\text{AgSnO}_2$ . Při průchodu proudu přes kontakty se zvyšujícím se odporem rostou také tepelné ztráty v kontaktech, které mohou způsobit přehřívání přístroje. Tepelné ztráty mohou být v některých případech pozitivní (například při vyhřívání rozváděčů při nízkých teplotách), nicméně ve většině aplikací se jedná o nežádoucí ztrátový výkon, který je pouze odveden do okolního prostředí, bez konání jakékoli užitečné funkce. Tedy dalším důležitým faktem ke zmínění jsou také dodatečné finanční náklady spotřebitele na pokrytí ztrátového výkonu přístroje, které mohou v rozsáhlých instalacích tvořit poměrně výraznou sumu.



Obrázek 11 – Pevný kontakt 1 (kladný - anoda) experimentálního přípravku po testech.



Obrázek 12 – Pevný kontakt 2 (záporný - katoda) experimentálního přípravku po testech.



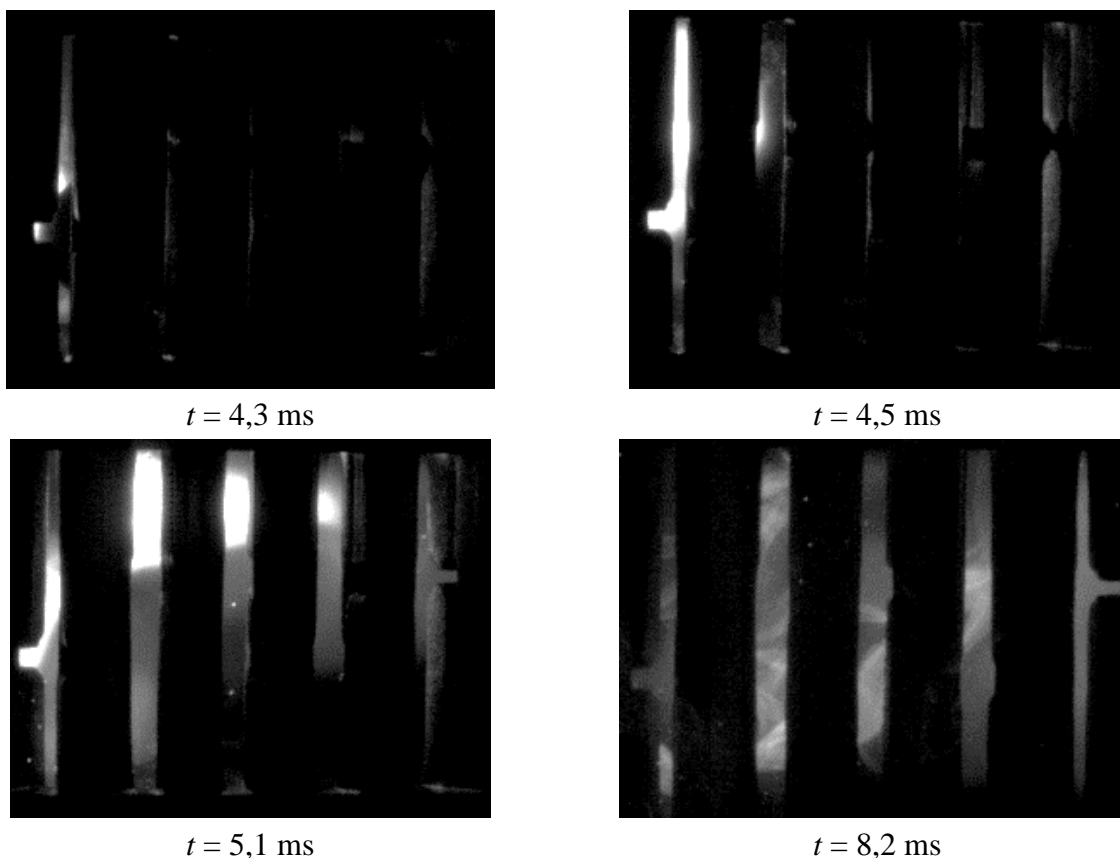
Obrázek 13 – Kontaktní můstek experimentálního přípravku po testech.

Nejlépeších výsledků bylo dosaženo při použití materiálu Poly 3, kdy byla karbonizace součástí proudovodné dráhy a kontaktů nejmenší. V některých případech, např. Poly 1 mírná karbonizace přispěla ke stabilizaci dráhy pohybu oblouku, tento jev by bylo možné při změně konstrukce využít, nicméně v našem případě je spíše nežádoucí, protože je stále namáhána stejná část kontaktu a vodiče oblouku. Nejhoršího výsledku dosáhl materiál Poly 4, u kterého došlo téměř ke kompletnímu pokrytí pevných kontaktů karbonem a ostatními produkty hoření oblouku.

### 5.2.2 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. Důvodem použití byla především vizuální kontrola chování oblouku ve zhasací komoře a také ověření vlivu použitých materiálů na bezpečnost produktu. Následující část je věnována pouze výstřížkům z vybraných záběrů vysokorychlostní kamerou, z důvodu velkého množství dat. Snímky byly voleny s ohledem na klíčové (zlomové) momenty v pořízených videích a kvalitu pořízených snímků. Byly tedy vyřazeny přesvícené snímky, tmavé snímky, periodicky opakující se a dlouho trvající jevy a podobně.

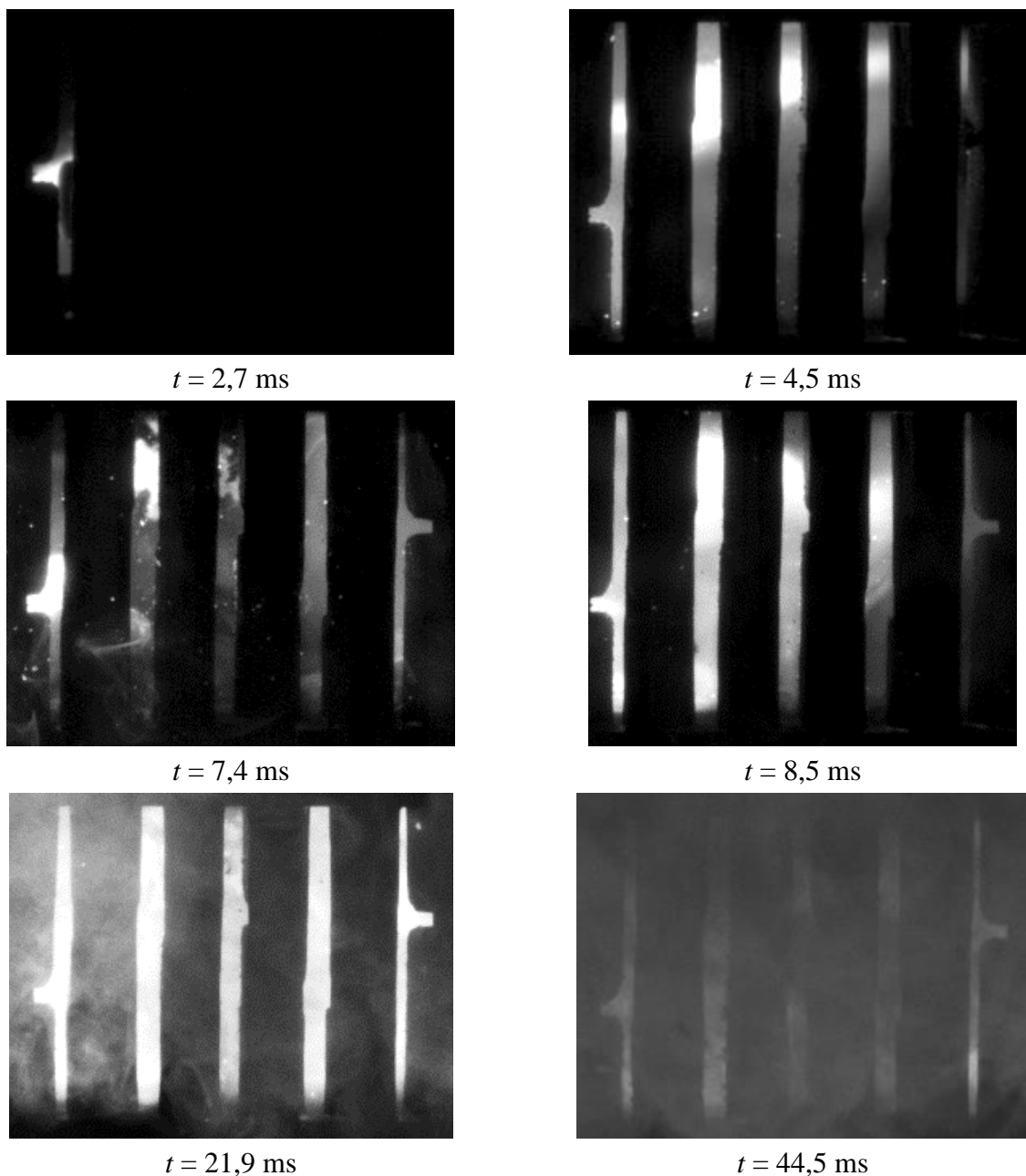
První sada vybraných snímků zobrazuje chování oblouku při úspěšném zhasení ve vývojové komoře při použití materiálu Poly 1. Jedná se o test 23, viz příloha 1. Obvod byl zatížen zátěží konfigurace 3. Doba hoření oblouku byla v tomto případě pouze 8,1 ms.



Obrázek 14 – Vybrané snímky příkladového zhasnutí oblouku v izolační zhasací komoře Poly 1.

Obrázek 14 zobrazuje důležité momenty v úspěšném zhasacím cyklu v izolační zhasací komoře z materiálu Poly 1. Oblouk hořel poměrně dlouhou dobu mezi kontakty, až v čase  $t = 4,3 \text{ ms}$  došlo k přesunu oblouku na kraj kontaktního můstku směrem ke zhasací komoře. V čase  $t = 4,5 \text{ ms}$  se oblouk dostal do kontaktu s plastovým materiálem, což se projevilo výskytem výraznější aureoly oblouku, z důvodu odpaření materiálu plastů do výboje a snížení jeho vodivosti. Oblouk se postupně prodlužoval do podoby v čase  $t = 5,1 \text{ ms}$ , čímž na něm rostlo napětí. V roštové komoře hořel oblouk přibližně 3 ms. V čase  $t = 8,2 \text{ ms}$  můžeme vidět dohasínání horkého plynu. V tomto okamžiku dochází k rychlé rekombinaci částic a sestupu posledních elektronů excitovaných atomů na původní hladiny do stavu nejnižší možné stavové energie.

Druhá sada snímků je věnována neúspěšnému pokusu číslo 31 materiálu zhasací komory Poly 1. Obvod byl v tomto případě zatížen zátěží konfigurace 4. Doba hoření oblouku byla v tomto případě 44,4 ms, po této době byl obvod rozpojen nadřazenými tyristory, aby nedošlo k destrukci experimentálního přípravku.

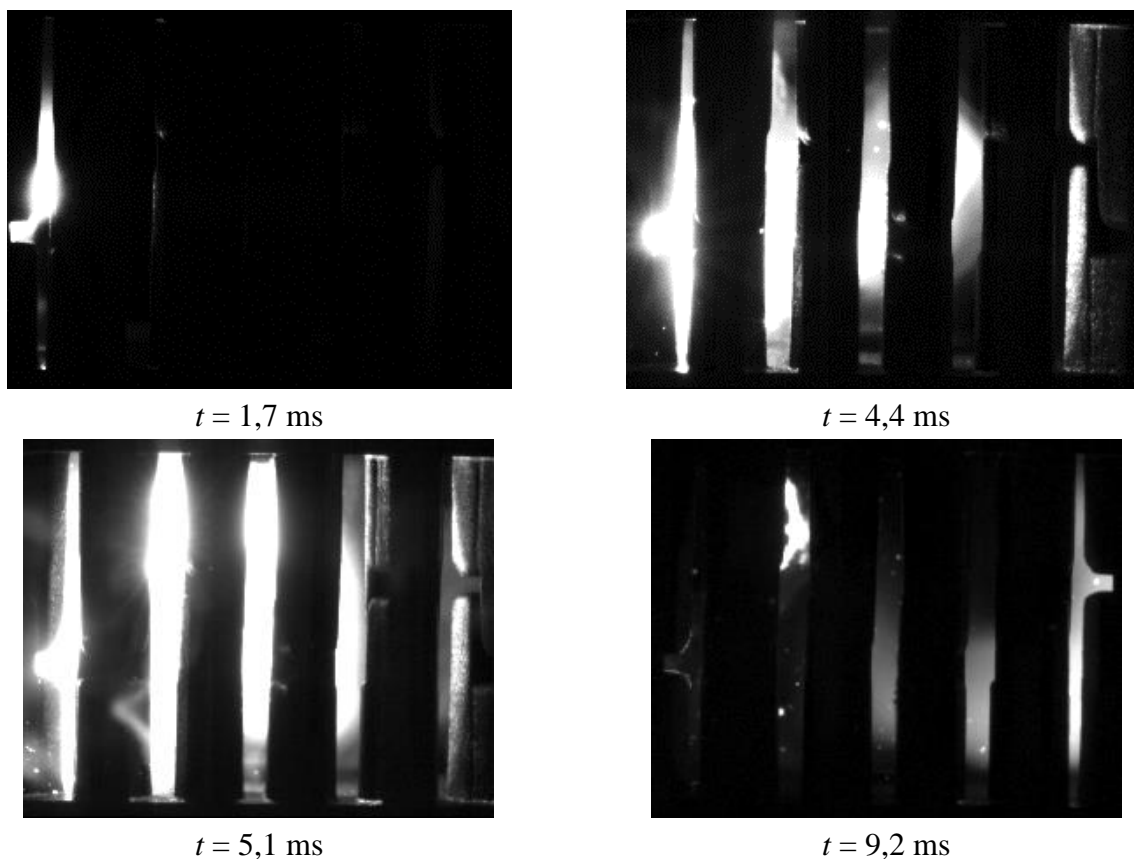


Obrázek 15 – Vybrané snímky neúspěšného zhašení oblouku v izolační zhašecí komoře Poly 1.

Obrázek 15 zobrazuje vybrané momenty neúspěšného vypínacího děje roštové izolační komory z materiálu Poly 1. V čase  $t = 2,7$  ms oblouk odchází na kraj kontaktního můstku, čas je kratší než v případě testu 23 z důvodu aplikace vyššího proudu při nastavení zátěží 4, protože interakce magnetického pole oblouku s vnějšími magnetickými poli s proudem narůstá. K plnému prodloužení oblouku došlo již v čase  $t = 4,5$  ms, kdy měl oblouk zůstat ve zhašecí komoře a uhasínat, nicméně v čase  $t = 7,4$  ms došlo k opětovnému zápalu oblouku v oblasti kontaktů (tedy mimo oblast zhašecích izolačních roštů). V čase  $t = 8,5$  ms opět pozorujeme oblouk ve zhašecí komoře. Následně docházelo k několikanásobným opětovným zápalům oblouku a přestupu oblouku do zhašecí komory. V čase  $t = 21,9$  ms došlo k takovému poškození komory, že oblouk již hořel stabilně přímo na rostech komory, pravděpodobně vlivem karbonizace z plastu. Přerušování obvodu bylo provedeno nadřazenými tyristory v čase  $t = 44,4$  ms. Na posledním obrázku této série lze pozorovat značný výskyt kouře a zbytkové záření horkého plynu.

Materiál Poly 1 prošel jako jeden z nejlepších, bohužel při delší expozici dochází k nadměrné tvorbě kouře, jehož depozice na okolních předmětech by mohla při dlouhodobém používání přístroje v rozváděči s jinými přístroji narušit izolační pevnost povrchových cest použitých izolantů v rozváděči.

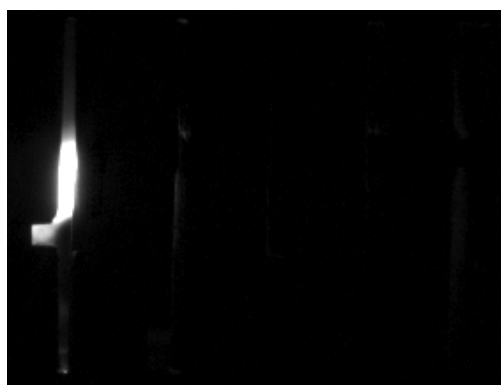
Třetí série vybraných snímků zobrazuje chování oblouku při úspěšném zhášení ve vývojové komoře při použití materiálu Poly 2. Jedná se o test 30, viz příloha 1. Obvod byl zatížen zátěží konfigurace 3. Doba hoření oblouku byla v tomto případě 9,1 ms.



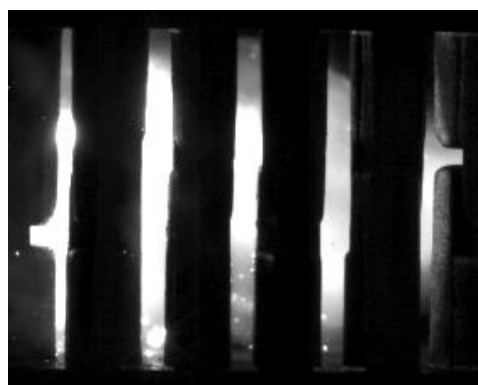
Obrázek 16 - Vybrané snímky příkladového zhášení oblouku v izolační zhášecí komoře Poly 2.

Obrázek 16 zobrazuje vybrané snímky z rychlokamery získané při úspěšném vypínání obvodu pomocí komory z materiálu Poly 2. Spínací oblouk se v komoře choval velmi podobně případu materiálu Poly 1. Odlišností byla výraznější intenzita oblouku, také bylo možné pozorovat více kouře a kousků odletujícího rozžhaveného materiálu, patrné v čase  $t = 5,1$  ms.

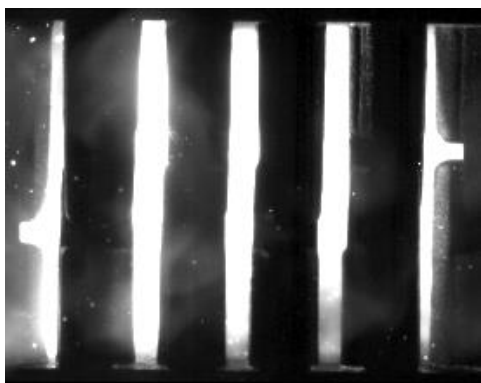
Čtvrtá vybraná série se zabývá neúspěšným pokusem s komorou s materiálem Poly 2. Jedná se o číslo testu 31 s parametry konfigurace 4. Po čase  $t = 43,7$  ms došlo k přerušení obvodu nadřazenými spínacími prvky.



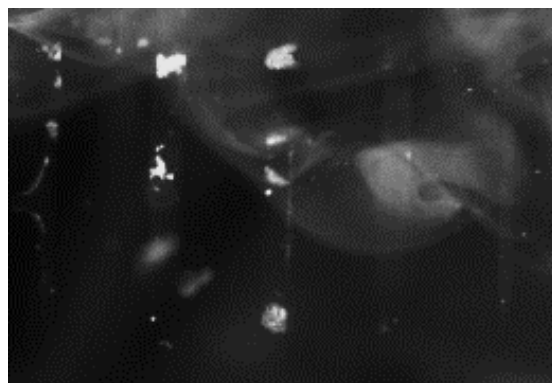
$t = 1,4 \text{ ms}$



$t = 3,3 \text{ ms}$



$t = 6,5 \text{ ms}$



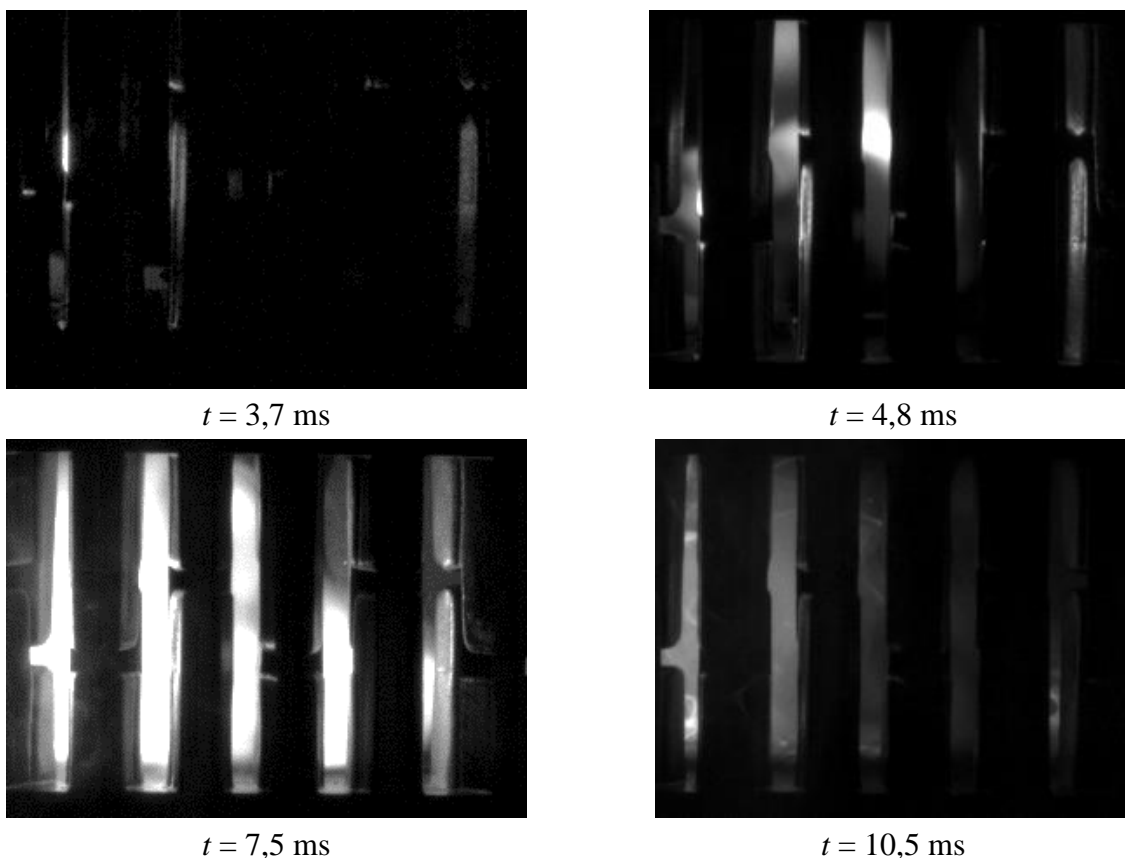
$t = 43,8 \text{ ms}$

Obrázek 17 – Vybrané snímky neúspěšného zhášení oblouku v izolační zhášecí komoře Poly 2.

Obrázek 17 zobrazuje čtyři podstatné okamžiky z vypínacího cyklu izolační roštové komory z materiálu Poly 2. Oblouk se objevil na okraji kontaktu již v čase  $t = 1,4 \text{ ms}$ , po vstupu do komory v čase  $t = 3,3 \text{ ms}$  bylo patrné větší množství zářících kousků materiálu uvnitř komory. Od času  $t = 6,5 \text{ ms}$  hořel již oblouk víceméně stabilně uvnitř přípravku, s občasnými znovuzápaly, je možné též pozorovat výskyt kouře a odletující kousky materiálu. Poslední snímek je pro výzkum velmi důležitý, protože je zde patrné, že malé odletující částičky materiálu hoří i po uhasnutí oblouku plamenem, což je u takovéhoho přístroje vysoce nežádoucí.

U materiálu Poly 2 tedy dochází k hoření malých částíček materiálu uvnitř zhášecí komory i po odpojení zdroje elektrické energie.

Další série obrázků se zabývá úspěšným vypínacím procesem v komoře z materiálu Poly 3. Jedná se o číslo testu 29 s parametry konfigurace 3. Po čase  $t = 10,4 \text{ ms}$  došlo k přerušení obvodu experimentální komorou.

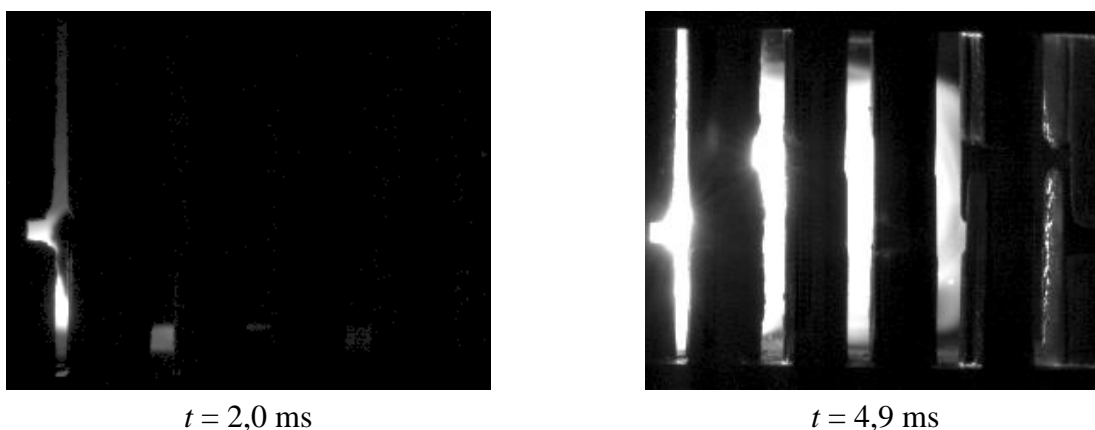


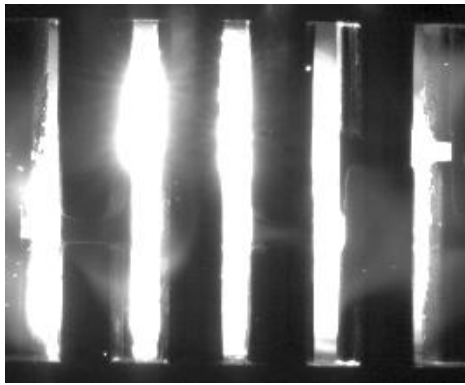
Obrázek 18 – Důležité snímky oblouku při úspěšném vypínání v komoře z materiálu Poly 3.

Obrázek 18 zobrazuje vybrané snímky při úspěšném vypínání oblouku v komoře vyrobené z materiálu Poly 3. Oblouk se dostal ke hraně kontaktů v čase  $t = 3,7 \text{ ms}$ . Po  $4,8 \text{ ms}$  dosáhl prodloužení na roštích zhášecí komory. Na snímku z času  $t = 7,5 \text{ ms}$  můžeme pozorovat, že i přes jasné hoření oblouku nedochází k poletování kousků materiálu v experimentální zhášecí komoře, ani k nadměrnému výskytu kouře. Po uhasnutí oblouku v čase  $t = 10,4 \text{ ms}$  nedochází k hoření materiálu.

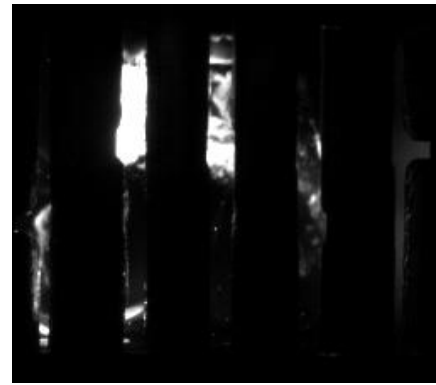
Pozn.: Materiál Poly 3 prošel všemi testy úspěšně, proto neúspěšný pokus tohoto materiálu není prezentován a nebylo možné zhodnotit chování materiálu Poly 3 při delší expozici oblouku.

Následující série výstřížků z vysokorychlostního videa byla pořízena během testu 17 zhášecí komory s materiálem Poly 4 při parametrech konfigurace 2. Oblouk byl uhašen během  $9,9 \text{ ms}$ .





$t = 6,9 \text{ ms}$

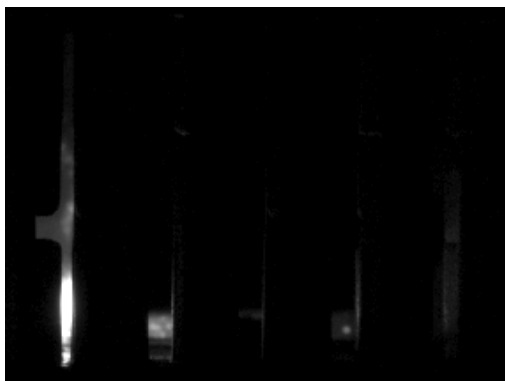


$t = 10,0 \text{ ms}$

Obrázek 19 – Snímky z úspěšného vypínání pomocí komory z materiálu Poly 4.

Obrázek 19 zobrazuje důležité výstřižky z úspěšného pokusu zhášení oblouku v izolační roštové komoře z materiálu Poly 4. Oblouk došel ke kraji kontaktního můstku za 2 ms, v komoře hořel od času  $t = 4,9 \text{ ms}$ . Je patrné, že do výboje se odpařuje velké množství materiálu, protože na rozdíl od předchozích vzorků je celý vnitřní prostor komory od času  $t = 6,9 \text{ ms}$  vyplněn zářícím plynem. Po uhasnutí oblouku v čase  $t = 9,9 \text{ ms}$  je patrné, že plastový materiál je značně rozžhavený a částečně hoří, což je při takto malé energii negativním ukazatelem.

Následující skupina obrázků zobrazuje neúspěšný pokus číslo 31 s komorou z materiálu Poly 4. Komora s tímto materiálem nebyla schopna oblouk uhasit a po 46,2 ms byl obvod přerušen pomocí nadřazených tyristorů.



$t = 1,1 \text{ ms}$



$t = 9,4 \text{ ms}$



$t = 11,0 \text{ ms}$



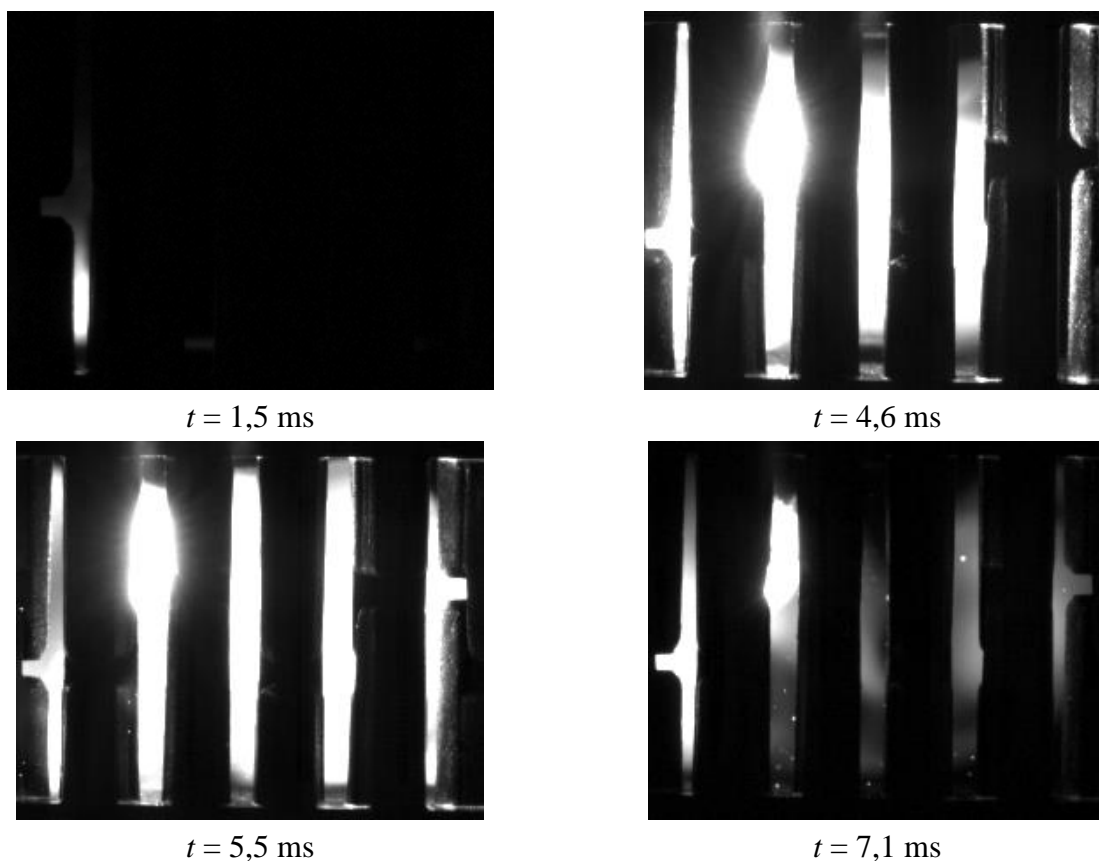
$t = 70,3 \text{ ms}$

Obrázek 20 – Vybrané snímky z neúspěšného testu komory z materiálu Poly 4.

Obrázek 20 zobrazuje čtyři snímky z neúspěšného testu materiálu Poly 4 s konfigurací zátěže 4. Oblouk lze pozorovat na okraji kontaktního můstku v čase  $t = 1,1$  ms. Do zhášecí komory se oblouk dostal až v čase 9,4 ms, což mohlo být způsobeno nadměrným vypařováním materiálu a tím vytlačování oblouku zpět do prostoru kontaktního můstku. Po 11 ms lze pozorovat významné hoření oblouku a značný únik horkého hořícího plynu ven ze zhášecí komory. Od tohoto okamžiku již nebylo možno komoru pozorovat, z důvodu hoření materiálu a zahalení celé komory do oblaku plamene. První viditelný snímek byl pořízen až několik desítek milisekund po rozpojení obvodu nadřazeným systémem. I přes to, že oblouk již v komoře dlouho nehořel a nebyla tedy přiváděna cizí energie, v komoře pozorujeme výskyt plamene a značné množství kouře.

Díky vysokorychlostnímu videu lze pozorovat, jak horký plyn v případě neúspěšných pokusů s materiálu Poly 4 uniká z přístroje, což by mohlo ohrozit osoby v blízkosti zařízení. V případě tohoto materiálu také dochází k produkci značného množství kouře. Tento materiál produkoval největší množství kouře ze všech vzorků.

Následující skupina obrázků zobrazuje úspěšný pokus číslo 59 s komorou z materiálu Poly 5. Konfigurace zátěže byla v tomto případě 2. Oblouk byl uhašen po 7 ms.

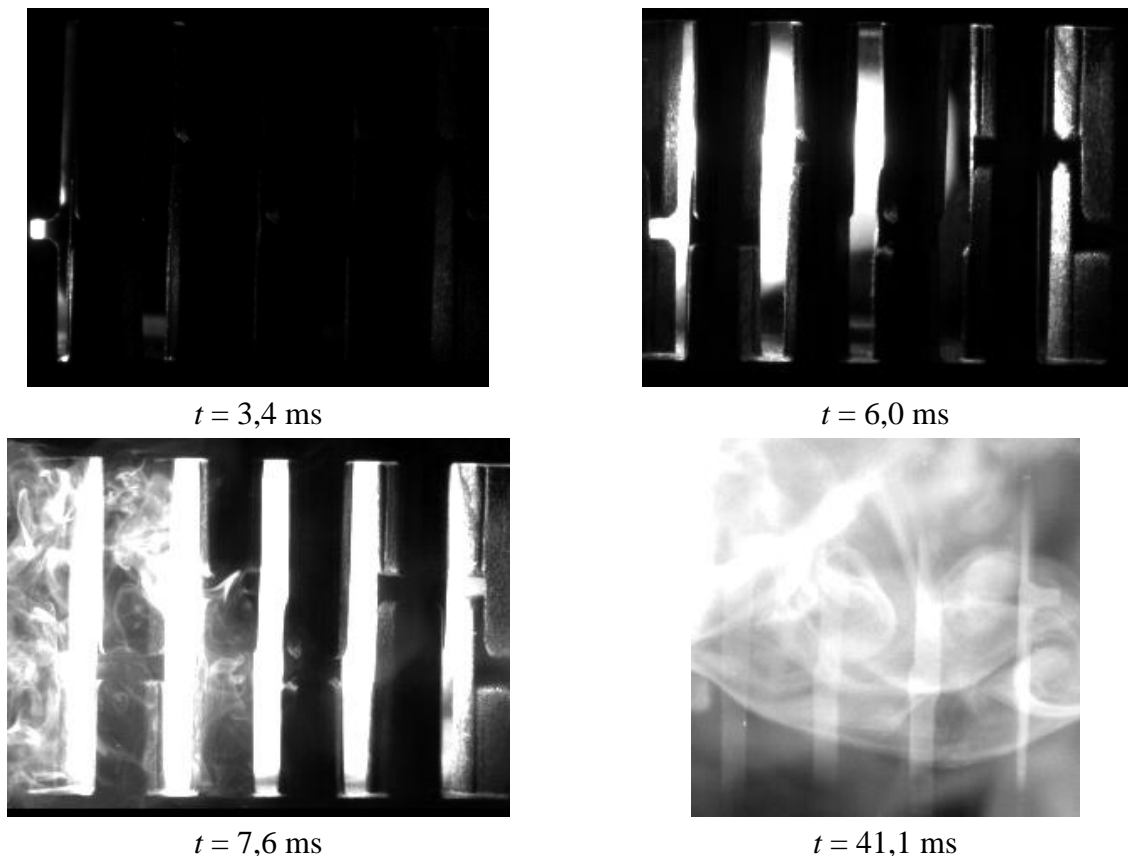


Obrázek 21 – Snímky z úspěšného vypínání pomocí komory z materiálu Poly 5.

Obrázek 21 zachycuje klíčové okamžiky zhášení oblouku v komoře z materiálu Poly 5. Oblouk se dostává na okraj kontaktního můstku za 1,5 ms. Po čase 4,6 ms se prodlužuje do roštové zhášecí komory, kde pozorujeme značné zaplnění komory plazmatem, což by svědčilo jeho nižší vodivosti. V čase  $t = 5,5$  ms nevidíme téměř žádné poletující kousky materiálu, ani nijak významný kouř, který by prozrazoval hoření materiálu. Po uhasnutí oblouku lze již pozorovat částičky materiálu

odletující z opáleného prostoru, mimo jiné lze pozorovat také značné rozžhavení materiálu uvnitř komory a hoření uvnitř komory. Na druhé straně není přítomno téměř žádné množství kouře, což by nasvědčovalo tomu, že produktem hoření budou mikročástice, nebo je hoření velmi účinné.

Následující skupina obrázků zobrazuje neúspěšný pokus číslo 72 s komorou z materiálu Poly 5. Komora s tímto materiálem nebyla schopna oblouk uhasit a po 41,0 ms byl obvod přerušen pomocí nadřazených tyristorů.



Obrázek 22 – Důležité momenty neúspěšného vypínacího děje komory s materiálem Poly 5.

Obrázek 22 zobrazuje výstřižky z vysokorychlostního záznamu neúspěšného zhášení oblouku ve zhášecí komoře vyrobené z materiálu Poly 5. Oblouk se po 3,4 ms dostává na hranu kontaktního můstku. V čase  $t = 6 \text{ ms}$  je prodlužován ve zhášecí komoře. Od času  $t = 7,6 \text{ ms}$  již intenzivně hoří uvnitř komory. Po odpojení vnější energie pomocí tyristorů lze pozorovat kouř a zbytkový zářící plyn uvnitř komory, kterého však není mnoho.

Díky vysokorychlostnímu videu lze 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.

### 5.2.3 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 4. Za úspěšný cyklus bylo zvoleno uhašení oblouku do 40 ms. Úspěšné cykly jsou vyznačeny zelenou barvou a neúspěšné cykly oranžovou.



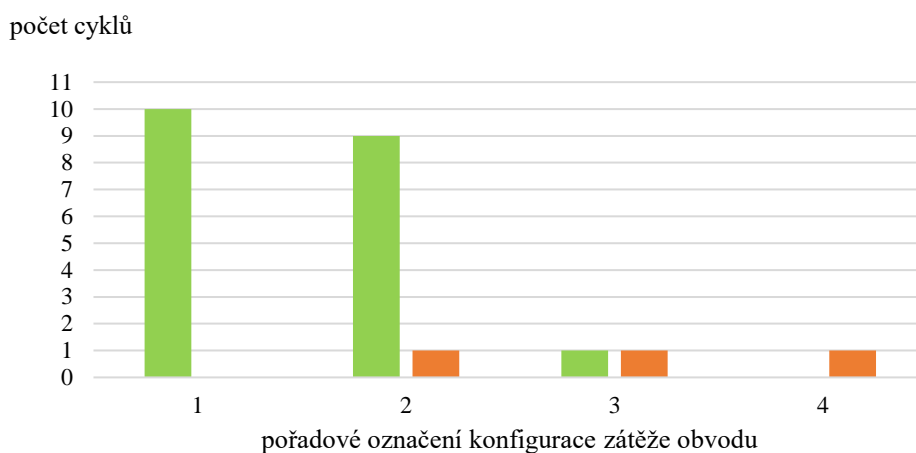
Obrázek 23 – Počty úspěšných a neúspěšných vypínacích cyklů s použitím materiálu Poly 1.



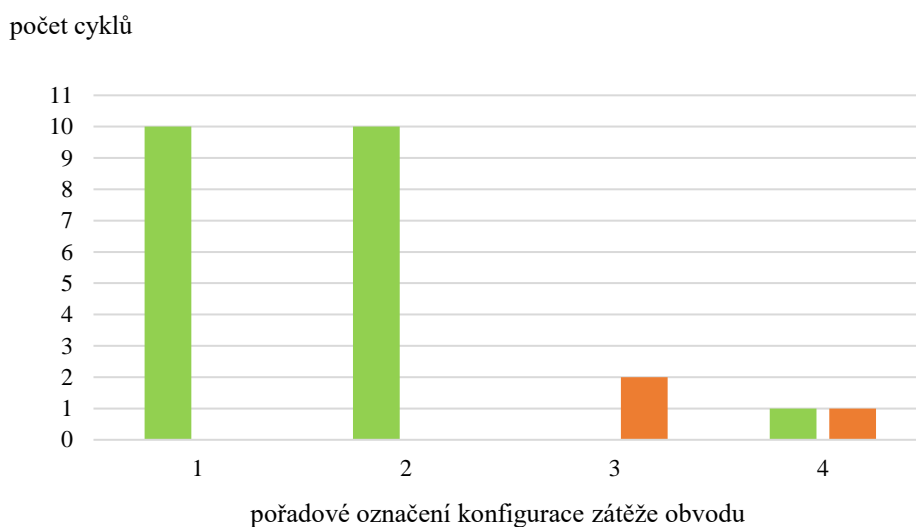
Obrázek 24 - Počty úspěšných a neúspěšných vypínacích cyklů s použitím materiálu Poly 2.



Obrázek 25 - Počty úspěšných a neúspěšných vypínacích cyklů s použitím materiálu Poly 3.



Obrázek 26 - Počty úspěšných a neúspěšných vypínacích cyklů s použitím materiálu Poly 4.



Obrázek 27 - Počty úspěšných a neúspěšných vypínacích cyklů s použitím materiálu Poly 5.

Tabulka 5 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
<b>1</b>	10	0	10	0	10	0	10	0	10	0
<b>2</b>	10	0	10	0	10	0	9	1	10	0
<b>3</b>	10	0	10	0	10	0	1	1	1	1
<b>4</b>	10	1	7	3	10	0	0	1	1	1

Tabulka 5 – 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.

Nejlépeších 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.

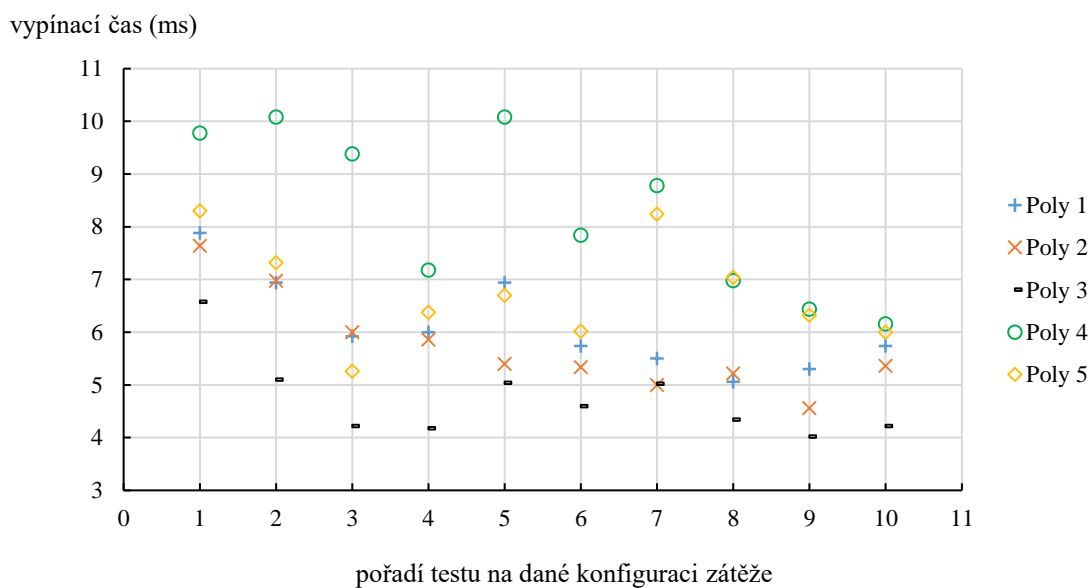
Materiál Poly 2 lze vyhodnotit jako použitelný, nikoli však pro čtvrté nastavení výkonových parametrů obvodu.

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.

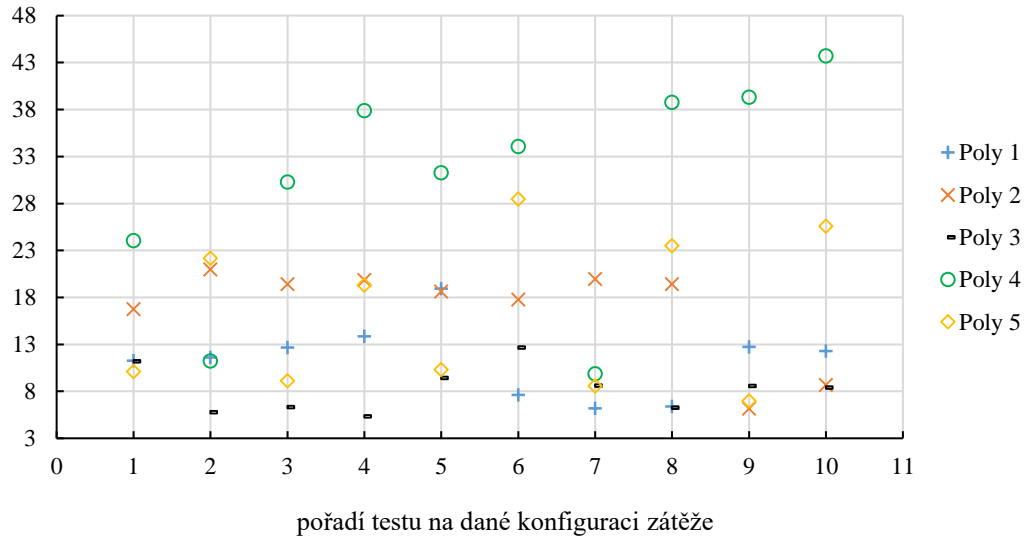
### 5.2.4 Vypínací časy

Následující část zobrazuje doby trvání zhasnutí elektrického oblouku uvnitř experimentálního přípravku. Opět byla aplikována čtyři různá výkonová nastavení pro každý z materiálů. Vypínací čas je čas od počátku nárůstu ohmického odporu na kontaktech vlivem poklesu přitlačné síly z důvodu uvolnění elektromagnetu do nuly proudu a obnovení napětí na kontaktech přístroje.



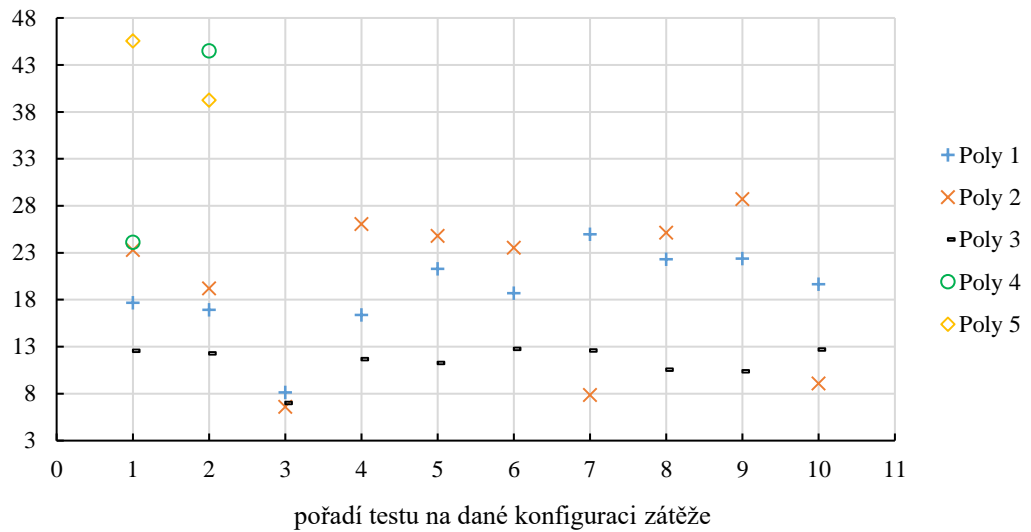
Obrázek 28 – Vypínací časy při použití konfigurace zátěže 1 (900 V, 104 A, 0,1 ms).

vypínací čas (ms)

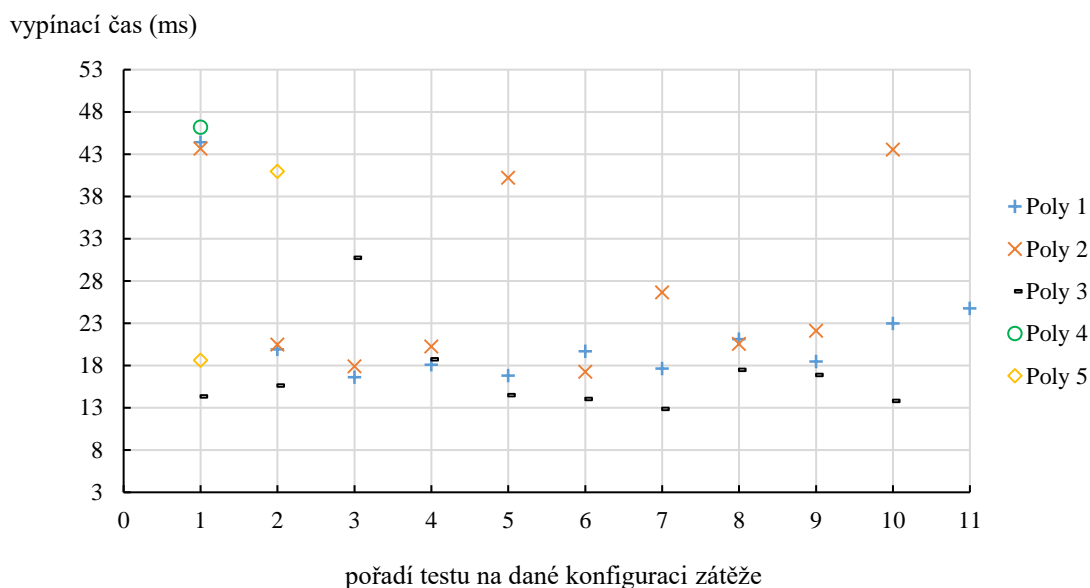


Obrázek 29 – Vypínací časy při použití konfigurace zátěže 2 (900 V, 201 A, 0,12 ms).

vypínací čas (ms)



Obrázek 30 - Vypínací časy při použití konfigurace zátěže 3 (900 V, 308 A, 0,11 ms).



Obrázek 31 - Vypínací časy při použití konfigurace zátěže 4 (900 V, 400 A, 0,10 ms).

Vypínací čas je jedním z klíčových údajů procesu zhášení elektrického oblouku v přístrojích nízkého napětí. Konstrukteři přístrojů musejí volit kompromis mezi dlouhým a krátkým vypínacím časem. Ač se na první pohled zdá, že čím kratší vypínací čas, tím lépe, ale není tomu tak. Krátký vypínací čas s vysokým gradientem proudu totiž může v obvodu s nenulovou indukčností (prakticky všechny reálné obvody) vytvořit vysokou hodnotu přepětí, čímž jsou namáhány povrchové i vzdušné izolační cesty. Pokud by v tomto případě došlo k překročení izolačních pevností, může dojít k poškození až zničení celého zařízení v blízkosti průrazu a následného oblouku. Na druhé straně, dlouhý vypínací čas znamená značné tepelné namáhání konstrukčních součástí uvnitř přístroje.

Konfigurace zátěže	Poly 1		Poly 2		Poly 3		Poly 4		Poly 5	
	$t_t$		$t_t$		$t_t$		$t_t$		$t_t$	
	(ms)	$\sigma$	(ms)	$\sigma$	(ms)	$\sigma$	(ms)	$\sigma$	(ms)	$\sigma$
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.

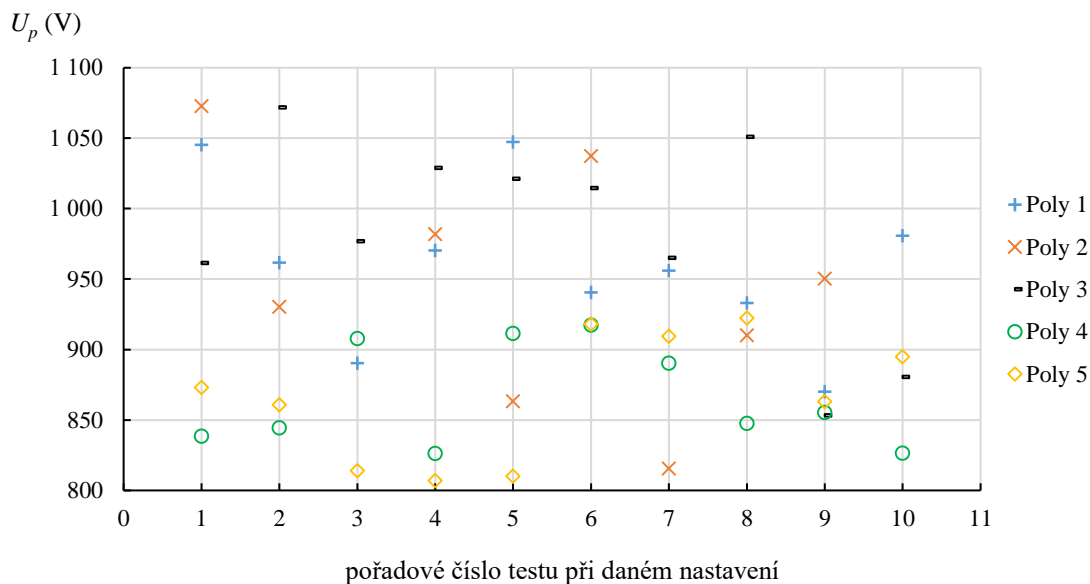
Tabulka 6 – Přehled průměrných vypínacích časů a jejich odchylek při experimentech.

Tabulka 6 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 zátěže je jeho výsledný průměrný vypínací čas více než 30 ms.

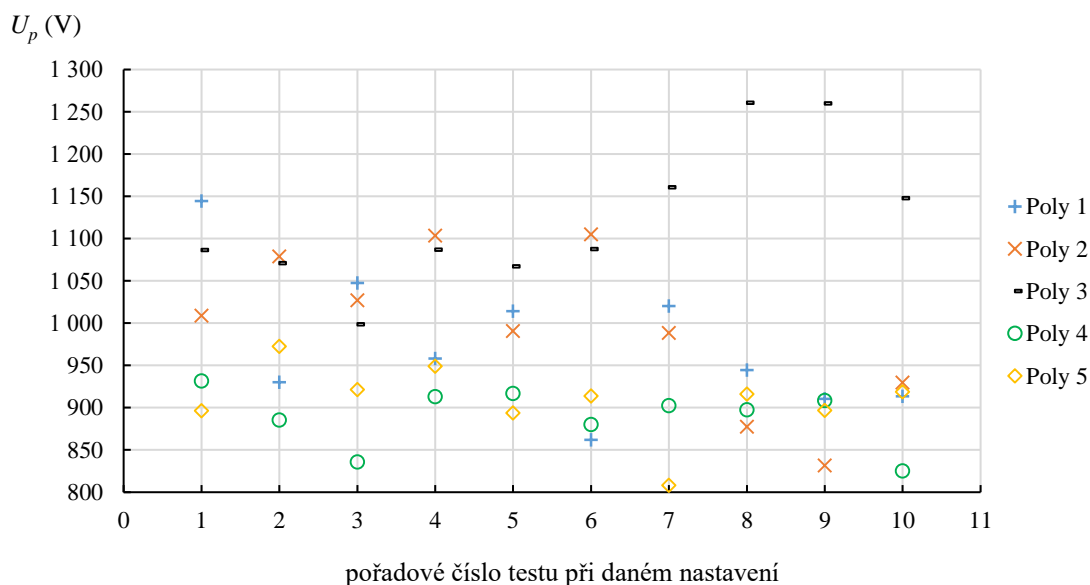
Lze konstatovat, že všechny materiály by bylo možné použít pro vypínání zátěže 1, pro zátěž 2 se jeví jako přijatelné všechny kromě Poly 4. Konfiguraci zátěže 3 úspěšně absolvovaly Poly 1-3 a pro nejtěžší zátěž 4 jsou vhodné pouze Poly 3 a Poly 1.

### 5.2.5 Špička přepětí

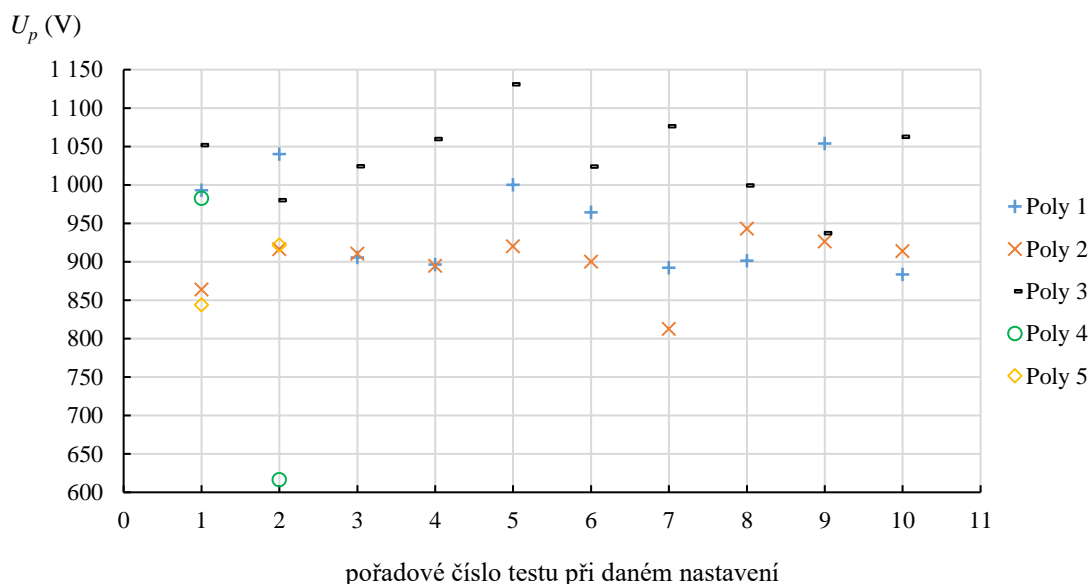
Následující část obsahuje porovnání špičkových přepětí vyskytujících se během vypínacího procesu. Tato přepětí se mohou objevit při příliš vysoké strmosti vypínání proudu, jak již bylo zmíněno v kapitole 5.2.4. Velikost špičkového přepětí je nutné sledovat z důvodu namáhání izolace, které může vyústit až v průraz izolace, popřípadě znovu-zápaly oblouku.



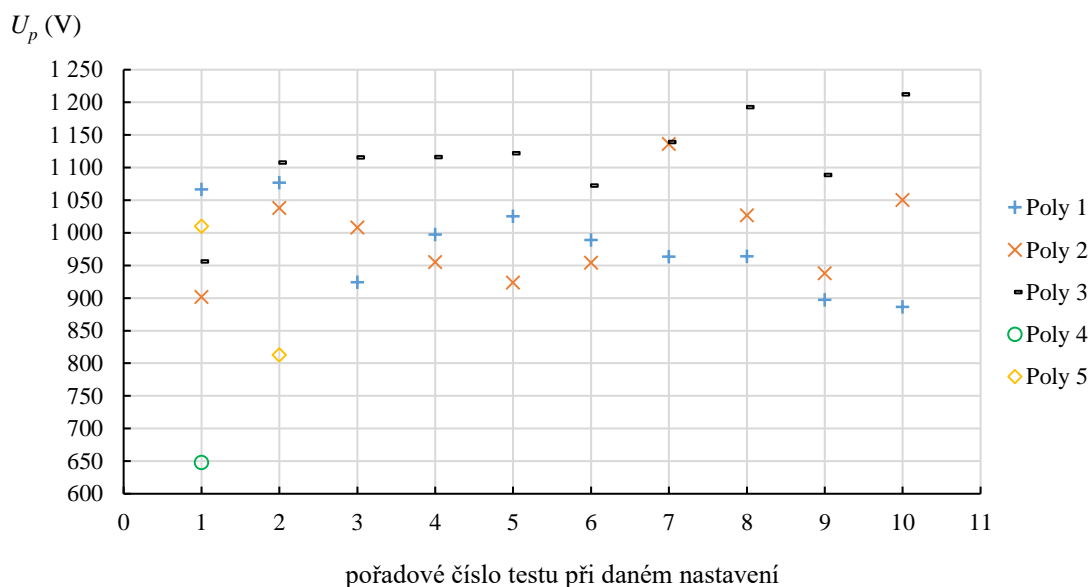
Obrázek 32 – Špičková přepětí při použití konfigurace zátěže 1 (900 V, 104 A, 0,10 ms).



Obrázek 33 – Špičková přepětí při použití konfigurace zátěže 2 (900 V, 201 A, 0,12 ms).



Obrázek 34 – Špičková přepětí při použití konfigurace zátěže 3 (900 V, 308 A, 0,11 ms).



Obrázek 35 – Špičková přepětí při použití konfigurace zátěže 4 (900 V, 400 A, 0,10 ms).

Tabulka 7 obsahuje průměrná přepětí během vypínacího procesu pro jednotlivé materiály zhášecích izolačních komor.

Konfigurace zátěže	Poly 1		Poly 2		Poly 3		Poly 4		Poly 5	
	$U_p$		$U_p$		$U_p$		$U_p$		$U_p$	
	(V)	$\sigma$	(V)	$\sigma$	(V)	$\sigma$	(V)	SO	(V)	SO
1	960	54	950	109	983	67	867	34	867	42
2	974	78	994	88	1123	81	890	33	909	41
3	953	62	900	35	1035	52	800*	183	883*	39
4	979	62	993*	68	1112	66	648*	0	912*	99

\*více než jeden pokus ze série byl neúspěšný.

Tabulka 7 – Průměrná špičková přepětí během vypínacího procesu a jejich odchylky.

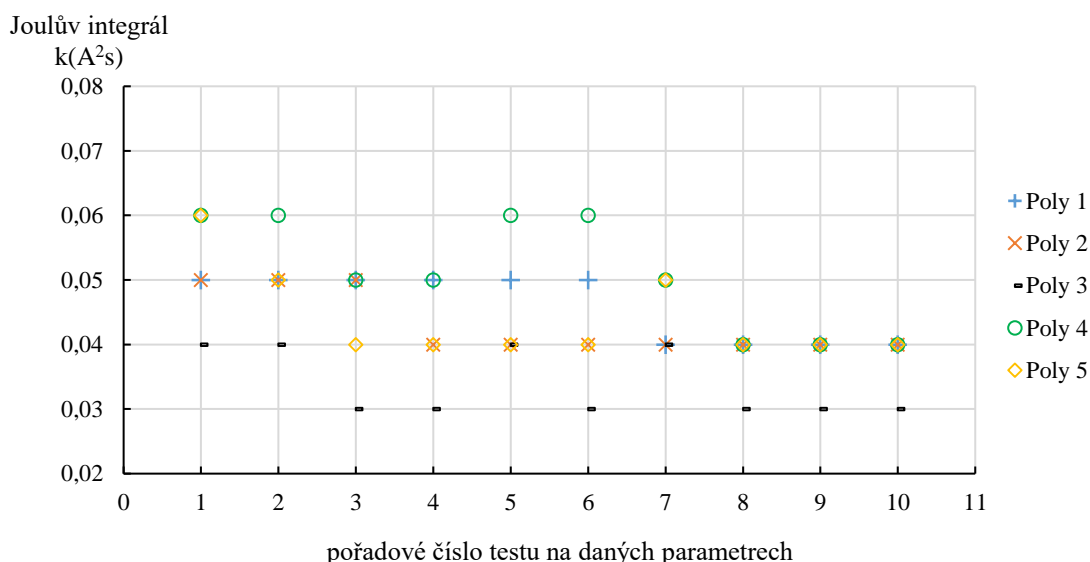
Lze zde dobře pozorovat vliv strmosti proudu. Materiály s kratšími vypínacími časy, dosahují vyšších hodnot přepětí. V případě hodnocení přepětí je naopak materiál Poly 3 nejméně vhodným. Průměr přepětí zde dosahuje u nejtěžší zátěže o 133 V, tedy o více než 10 % vyšší hodnoty než u materiálu Poly 1. Tato skutečnost by mohla generovat problémy u zařízení určených na nižší napětí a vyšší proudy. Především z toho důvodu, že izolační vzdálenosti přístrojů na nižší napětí jsou kratší a přepětí by mohlo vytvářet znovu-zápaly. Tento problém by se mohl vyskytnout také v obvodech s vyšší indukčností neboli delší časovou konstantou  $\tau$ .

## 5.2.6 Joulův integrál

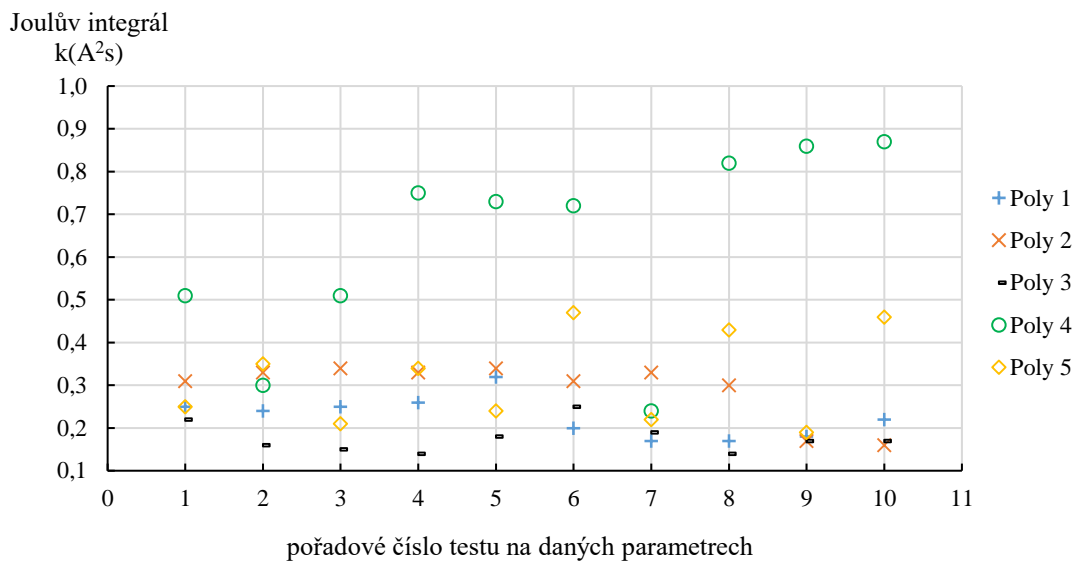
V této části budou graficky porovnány Joulovy integrály během vypínacího děje opět při všech zátěžích. Joulův integrál je dalším důležitým údajem o vypínacím ději. Hodnota tohoto integrálu udává součinitel, kterým když vynásobíme odpor proudovodné dráhy dostaneme hodnotu energie od povelu k vypnutí přístroje od nadřazeného řízení do konce průchodu proudu, tedy úspěšného vypnutí obvodu. Hodnota Joulova integrálu je klíčová především pro jisticí prvky, jejichž hodnota Joulova integrálu při vypínání musí být vždy nižší než maximální tepelný ekvivalent této energie u vedení a jištěného zařízení za jisticím prvkem. Joulův integrál je tedy úměrný energii propuštěné přístrojem při vypínání obvodu a je dán:

$$I^2 t_a = \int_{t_a}^{t_t} i^2(t) dt \quad (A^2s) \quad (3)$$

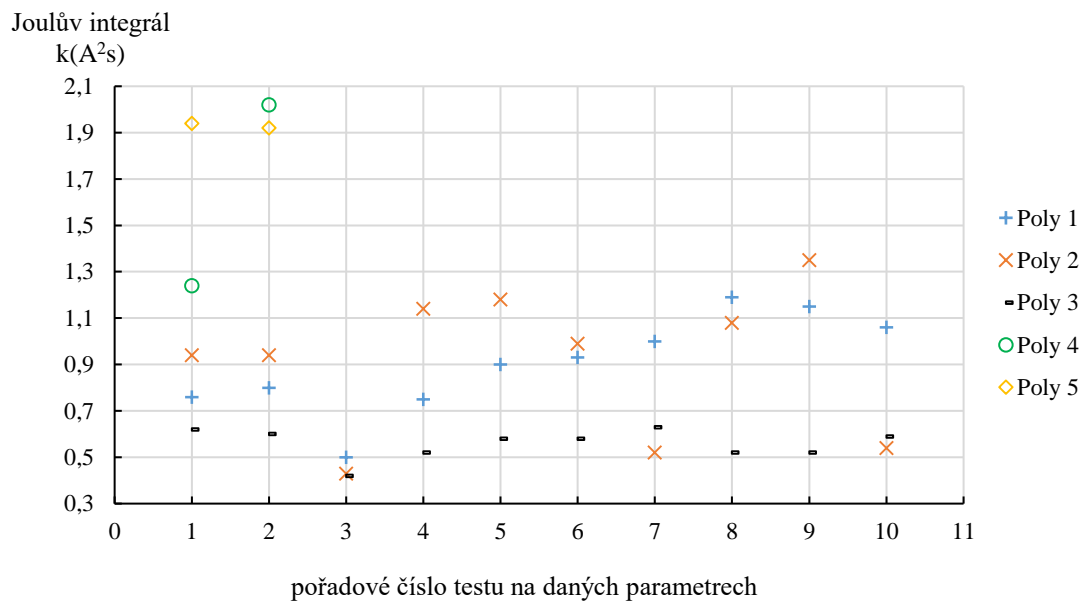
kde  $t_a$  je čas, kdy je zaznamenán růst odporu kontaktů vlivem poklesu přitlačné síly díky uvolnění elektromagnetu,  $t_t$  označuje konec průtoku proudu a výskyt zotaveného napětí a  $i$  je proud [25].



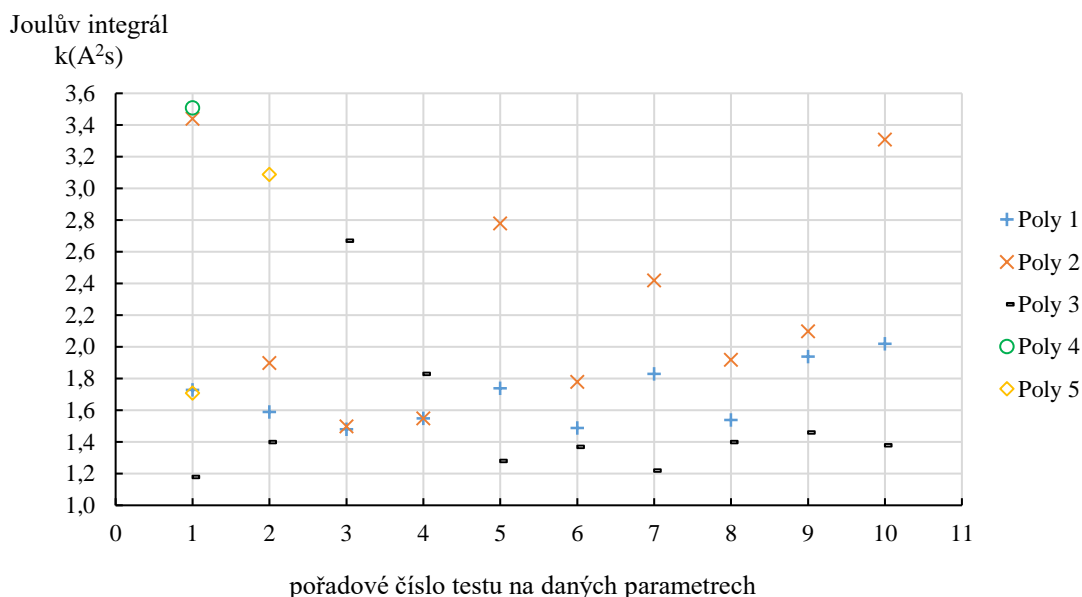
Obrázek 36 – Joulův integrál při použití konfigurace zátěže 1 (900 V, 104 A, 0,10 ms).



Obrázek 37 – Joulův integrál při použití konfigurace zátěže 2 (900 V, 201 A, 0,12 ms).



Obrázek 38 – Joulův integrál při použití konfigurace zátěže 3 (900 V, 308 A, 0,11 ms).



Obrázek 39 – Joulův integrál při použití konfigurace zátěže 4 (900 V, 400 A, 0,10 ms).

Tabulka 8 zobrazuje průměrnou hodnotu Joulova integrálu pro zkoumané materiály při různých parametrech zátěže.

Konfigurace zátěže	Poly 1		Poly 2		Poly 3		Poly 4		Poly 5	
	$I^2t$		$I^2t$		$I^2t$		$I^2t$		$I^2t$	
	k(A²s)	$\sigma$	k(A²s)	$\sigma$	k(A²s)	$\sigma$	k(A²s)	$\sigma$	k(A²s)	$\sigma$
1	0,05	0,005	0,04	0,005	0,03	0,005	0,05	0,008	0,04	0,007
2	0,23	0,045	0,29	0,065	0,18	0,033	0,63	0,217	0,32	0,103
3	0,90	0,199	0,91	0,296	0,56	0,060	1,63*	0,390	1,93*	0,010
4	1,69	0,182	2,27*	0,661	1,52	0,419	3,51*	0,000	2,40*	0,690

\*více než jeden pokus ze série byl neúspěšný.

Tabulka 8 – Přehled průměrné hodnoty Joulova integrálu a jeho odchylek při experimentech.

Nejnižší průměrné hodnoty Joulova integrálu připadají materiálu Poly 3 při všech zátěžích. Při nejtěžší zátěži byl Joulův integrál 1520 A²s. Velice blízko k těmto hodnotám je také materiál Poly 1 s hodnotou 1690 A²s pro nejtěžší zátěž. Stále únosnou velikost Joulova integrálu propustil vzorek za použití materiálu Poly 2, nicméně, jak již bylo zmíněno, není vhodný pro zátěž 4 z důvodu 30% neúspěšnosti uhašení oblouku. Nejhuře dopadl materiál Poly 4, který již při zátěži 2 dosahoval více než trojnásobku Joulova integrálu materiálu Poly 3. Na druhé straně při konfiguraci zátěže 1 je průměr Joulova integrálu porovnatelný s ostatními vzorky.

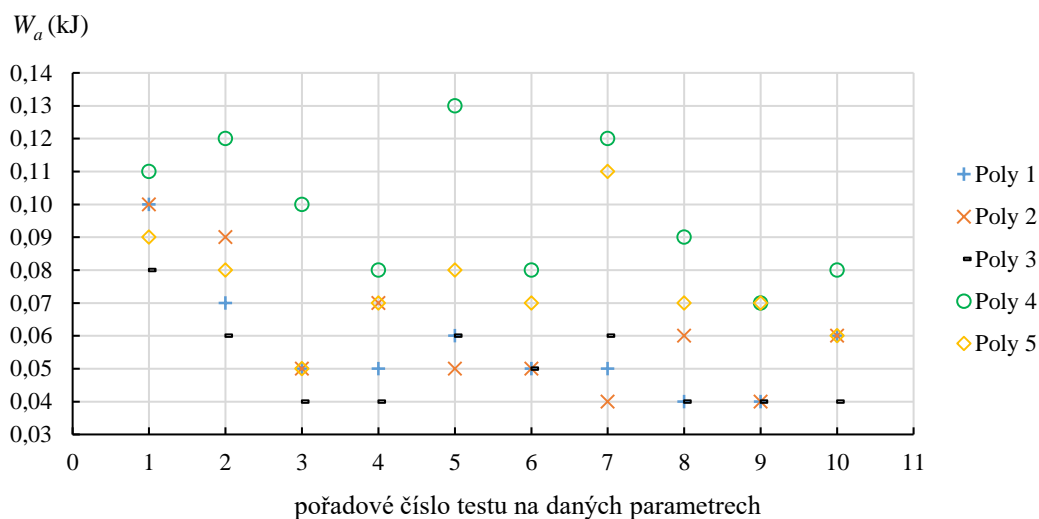
### 5.2.7 Oblouková energie

V této části budou graficky porovnány obloukové energie během vypínacího děje opět při všech zátěžích. 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

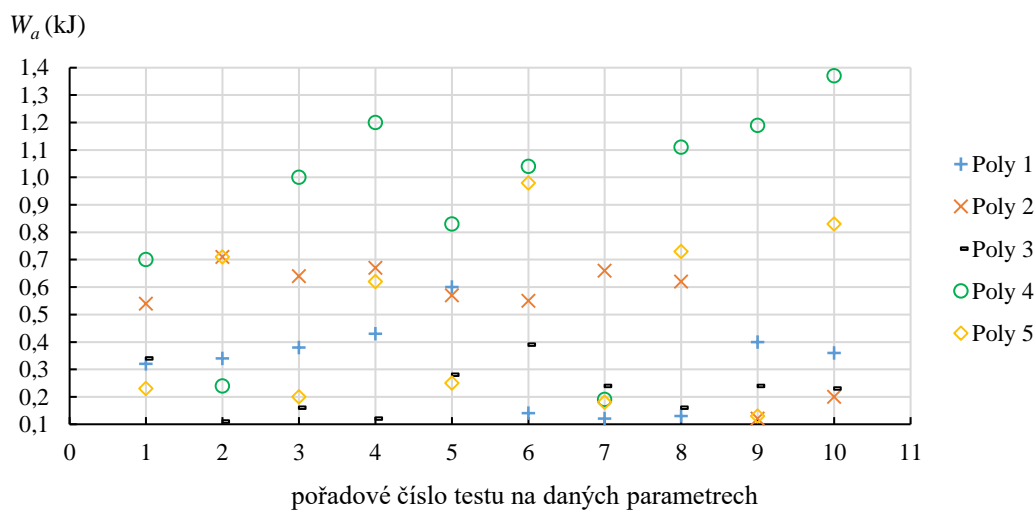
z klíčových parametrů, rozhodujících při posuzování možnosti poškození vnitřních součástí přístrojů. Oblouková energie během vypínacího procesu je dána:

$$W_a = \int_{t_a}^{t_t} i(t) u(t) dt \quad (\text{J}) \quad (4)$$

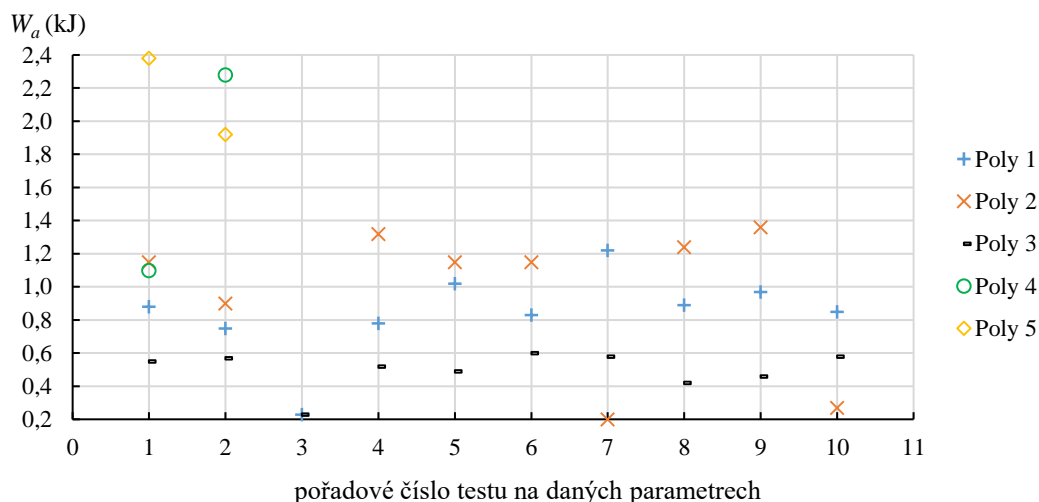
kde  $t_a$  je čas, kdy je zaznamenán růst odporu kontaktů vlivem poklesu přitlačné síly díky uvolnění elektromagnetu,  $t_t$  označuje konec průtoku proudu a výskyt zotaveného napětí,  $i$  je proud, a  $u$  je napětí.



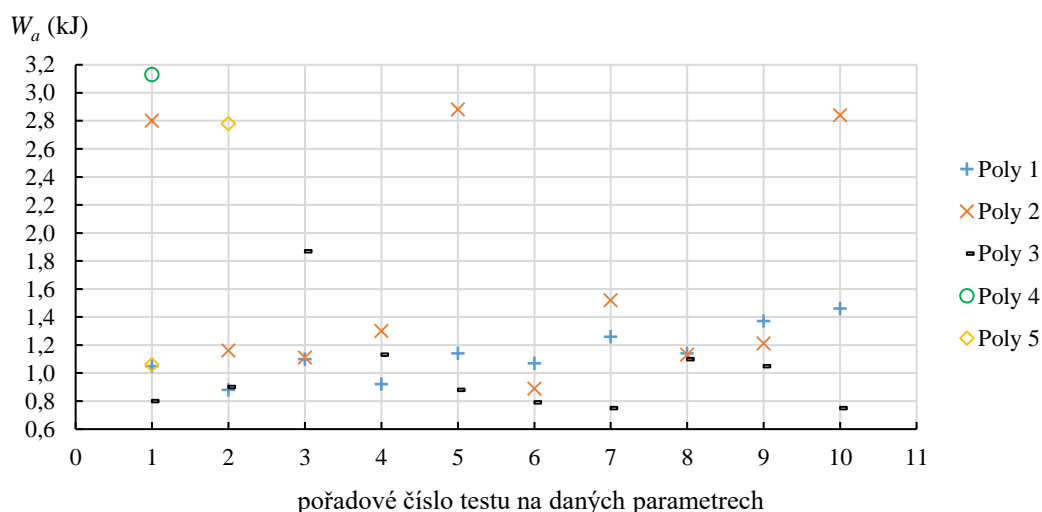
Obrázek 40 – Oblouková energie při použití konfigurace zátěže 1 (900 V, 104 A, 0,10 ms).



Obrázek 41 – Oblouková energie při použití konfigurace zátěže 2 (900 V, 201 A, 0,12 ms).



Obrázek 42 – Oblouková energie při použití konfigurace zátěže 3 (900 V, 308 A, 0,11 ms).



Obrázek 43 – Oblouková energie při použití konfigurace zátěže 4 (900 V, 400 A, 0,10 ms).

Tabulka 9 reprezentuje průměrné hodnoty obloukové energie pro zkoumané materiály při různých výkonových parametrech.

Konfigurace zátěže	Poly 1		Poly 2		Poly 3		Poly 4		Poly 5	
	Wa		Wa		Wa		Wa		Wa	
	(kJ)	$\sigma$	(kJ)	$\sigma$	(kJ)	$\sigma$	(kJ)	$\sigma$	(kJ)	$\sigma$
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 9 – Přehled průměrné obloukové energie a jejích odchylek při experimentech.

Materiály Poly 3 a Poly 1 opět dopadly nejlépe, dosahují nejnižších hodnot obloukových energií při všech konfiguracích zátěže. Při nejvyšší zátěži něco přes 1 kJ. Tyto hodnoty jsou předpokladem nejnižšího poškození součástí uvnitř experimentálního přípravku. Nejméně

příznivých hodnot dosáhl materiál Poly 4, který již při druhé konfiguraci zátěže překročil ve více než 50 % experimentů hranici 1 kJ.

### 5.2.8 Hmotnostní úbytky materiálu součástí proudovodné dráhy

Teplota elektrického oblouku je velmi vysoká. Je vyšší, než teplota tání i vypařování (varu) většiny kovů. Z oblouku dochází k přenosu tepla prouděním, vedením i zářením do blízkých kovových materiálů. Při dostatečně dlouhé expozici dochází k zahřátí kovu na teplotu tání, na které, když je do materiálu dodána energie ekvivalentní, nebo vyšší skupenskému teplu tání, dojde k roztavení materiálu a při následném zahřátí na teplotu vypařování a dodání skupenského tepla vypařování dochází k vypaření materiálu do výbojového prostoru. Čímž je jednak materiál poškozován, ale také při následném ochlazování dochází k depozici výparů na ostatních konstrukčních součástech. Tímto jevem může dojít k vytvoření parazitní kovové vodivé cesty po izolačních materiálech. Úbytek kovového materiálu proudovodné dráhy je tedy velmi důležitou informací pro výrobce zařízení, protože může vést ke znehodnocení celého přístroje.

Před započítáním experimentů byly na laboratorní váze zváženy konstrukční součásti proudovodné dráhy. Prvním zkoumaným celkem byl kontaktní můstek, kteréhož součástí jsou pohyblivé kontakty. Druhým vyšetřovaným celkem byl pevný kontakt zapojený jako anoda. Součástí tohoto kontaktu je kladná přípojovací svorka a vodič oblouku. Třetím celkem byl pevný kontakt zapojený jako katoda, jehož součástí je záporná přípojovací svorka a vodič oblouku. Vzhledem ke zjištění velmi malého úbytku materiálu součástí proudovodné dráhy během měření, byla četnost vážení těchto komponentů snížena. Ověření hmotnosti komponentů probíhalo vždy po ukončení celé série měření na konkrétní konfiguraci zátěže. Do tabulky níže byly ze zmíněného důvodu uvedeny pouze souhrnné výsledky, kdy úbytek hmotnosti značí změnu hmotnosti součástí mezi novými součástmi a součástmi po absolvování celé série experimentů všech modifikací zátěží při použití zhášecí komory z konkrétního materiálu.

	Úbytek hmotnosti součástí proudovodné dráhy			Úbytek hmotnosti proudovodné dráhy jako celku
	$\Delta m_m$ (mg)	$\Delta m_{p+}$ (mg)	$\Delta m_{p-}$ (mg)	$\Delta m$ (mg)
<b>Poly 1</b>	2,8	0,3	0,2	3,3
<b>Poly 2</b>	2,4	0,4	2,2	5
<b>Poly 3</b>	3	0,5	0,7	4,2
<b>Poly 4</b>	5,2	6,7	5,5	17,4
<b>Poly 5</b>	2,9	1,5	1,3	5,7

Tabulka 10 – Hmotnostní úbytek proudovodné dráhy a jejích součástí.

Hmotnostní úbytek součástí proudovodné dráhy vlivem odpařování materiálu během spínacího procesu shrnuje tabulka 10, kde  $\Delta m_m$  reprezentuje hmotnostní úbytek prvního zkoumaného celku (kontaktního můstku a pohyblivých kontaktů),  $\Delta m_{p+}$  značí hmotnostní ztrátu celku 2 (kladný pevný kontakt, vodič oblouku a kladná svorka) a  $\Delta m_{p-}$  značí hmotnostní ztrátu celku 3 (záporný pevný kontakt, vodič oblouku a záporná svorka).

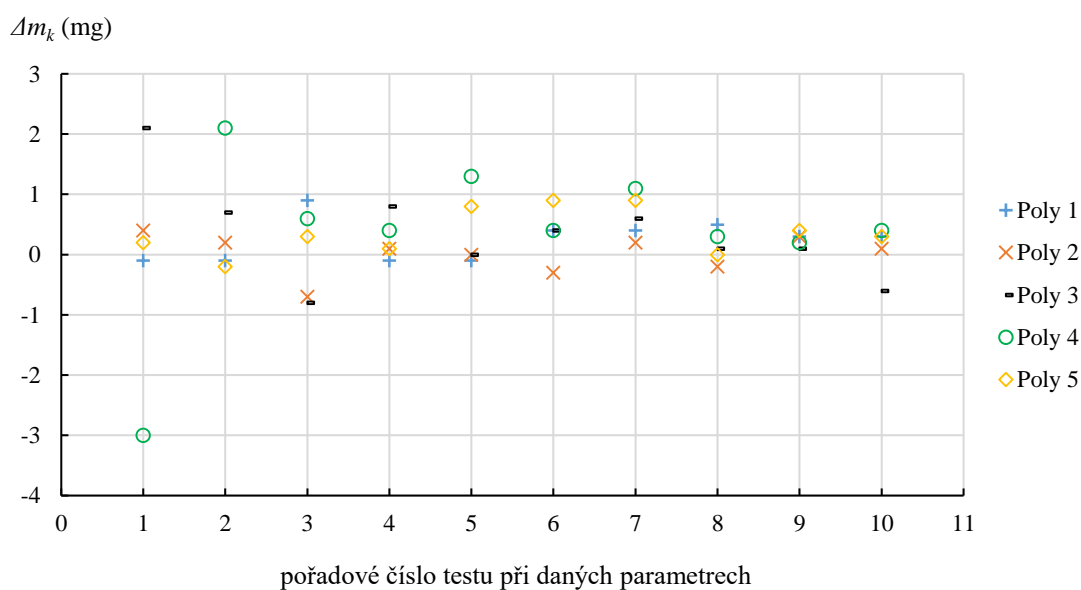
Z tohoto měření vychází nejlépe použití materiálu Poly 1, u kterého došlo k úbytku hmotnosti na celé proudovodné dráze pouhých 3,3 mg. Na druhé straně nejvyššího úbytku dosáhl materiál Poly 4 s hodnotou 17,4 mg, tedy téměř 5,3krát tolik.

Nicméně, vzhledem k výchozí hmotnosti součástí, která se pohybuje v desítkách gramů, je úbytek materiálu proudovodné dráhy během testů pohybující se v setinách procent původní hmotnosti zanedbatelný.

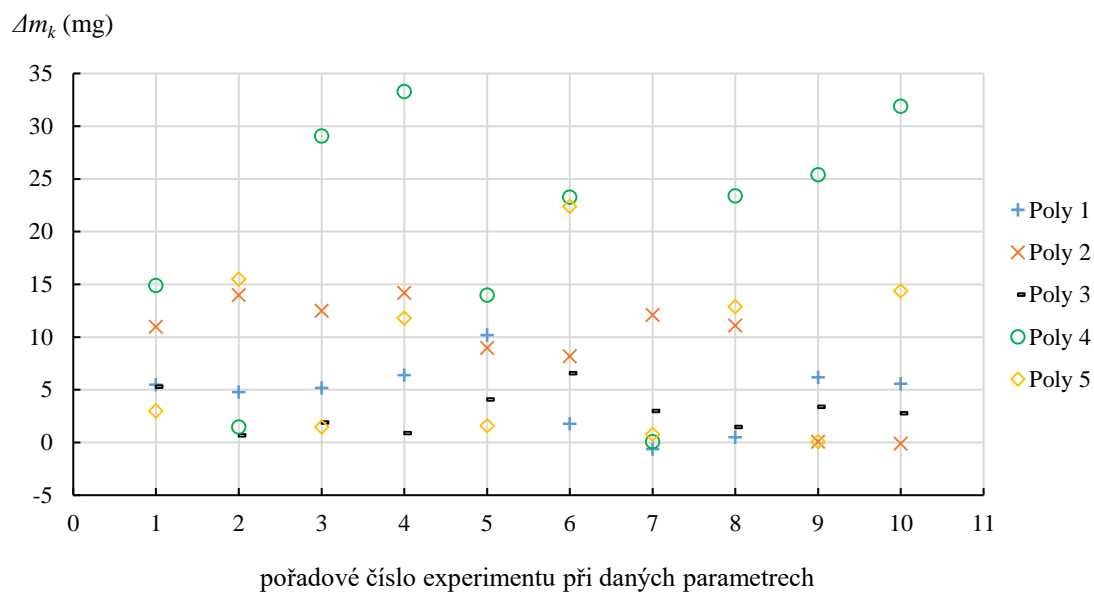
### 5.2.9 Hmotnostní úbytek materiálu izolační zhášecí komory

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.

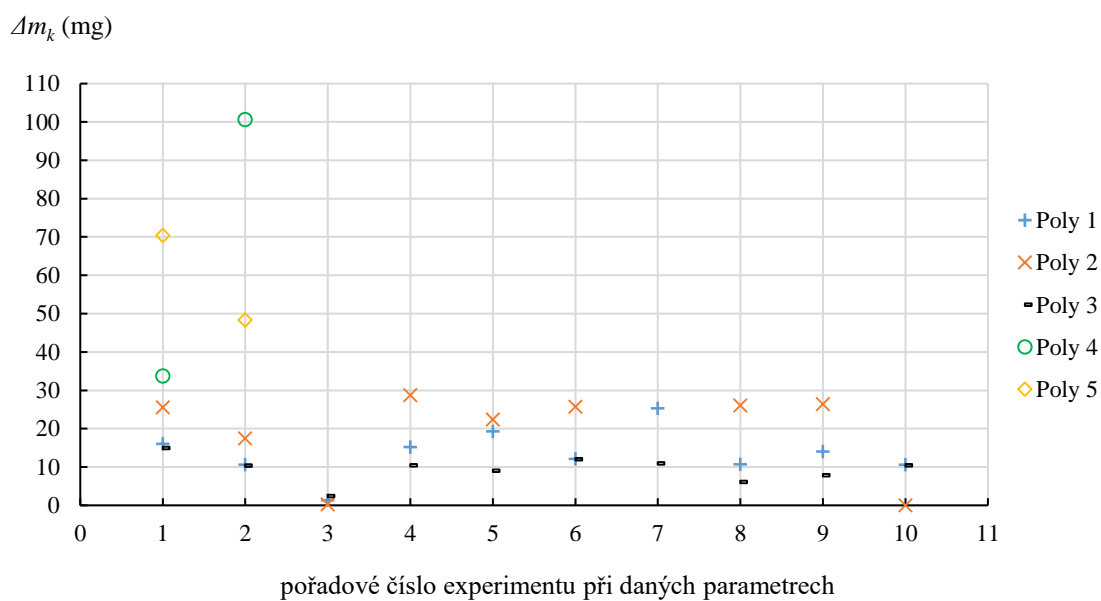
V této části experimentu probíhalo vážení izolační zhášecí komory po každém experimentu a následný výpočet úbytku hmotnosti materiálu zhášecí komory, který zobrazují následující grafy.



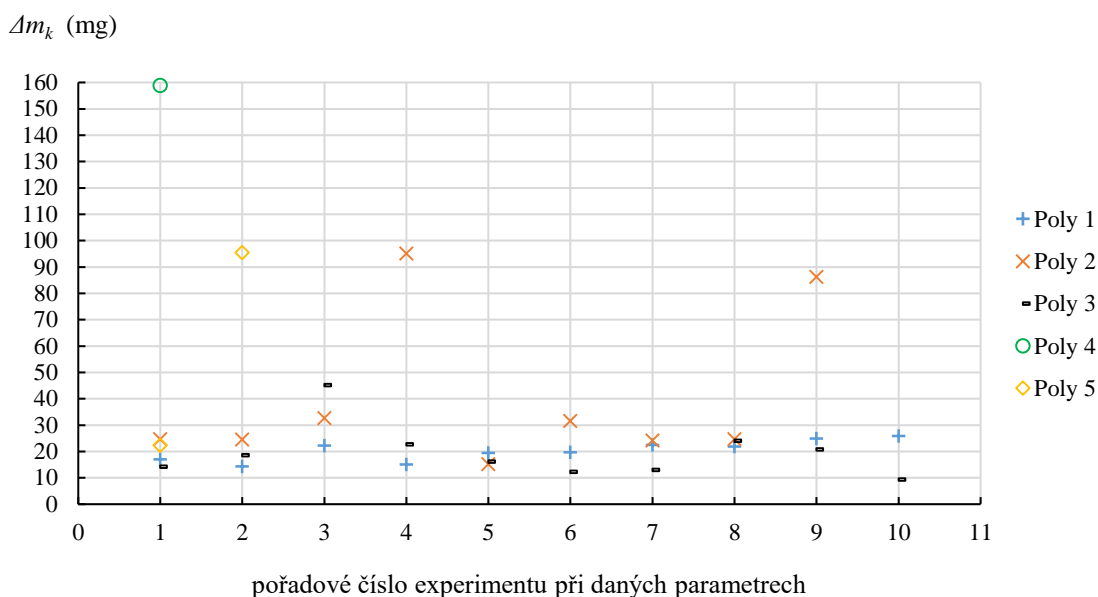
Obrázek 44 – Hmotnostní úbytek materiálu zhášecí komory při konfiguraci zátěže 1 (900 V, 104 A, 0,10 ms).



Obrázek 45 – Hmotnostní úbytek materiálu zhášecí komory při konfiguraci zátěže 2 (900 V, 201 A, 0,12 ms).



Obrázek 46 – Hmotnostní úbytek materiálu zhášecí komory při konfiguraci zátěže 3 (900 V, 308 A, 0,11 ms).



Obrázek 47 – Hmotnostní úbytek materiálu zhášecí komory při konfiguraci zátěže 4 (900 V, 400 A, 0,10 ms).

Tabulka 11 obsahuje průměrné hodnoty úbytku materiálu odpařením z konstrukce izolační zhášecí komory během působení oblouku při spínacím procesu.

Konfigurace zátěže	Poly 1 $\Delta m_k$ (mg)	Poly 2 $\Delta m_k$ (mg)	Poly 3 $\Delta m_k$ (mg)	Poly 4 $\Delta m_k$ (mg)	Poly 5 $\Delta m_k$ (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 11 – Průměrné hmotnostní úbytky materiálů zhášecích komor při různých výkonových parametrech.

Z grafů je patrné, že hmotnostní úbytek nelze prohlásit za přímo úměrný počtu spínacích cyklů. Do jisté míry by jej šlo odhadnout z karbonizace dílů proudovodné dráhy, což však může sloužit pouze jako hrubý odhad. 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. Pro získání rovnice byly vždy naměřené body proloženy funkcí pomocí metody nejmenších čtverců.

Rozhodování o vhodnosti použití dané veličiny pro výpočet úbytku hmotnosti bylo provedeno na základě Pearsonova korelačního koeficientu úbytku hmotnosti a ostatními veličinami materiálu

Poly 1 při zátěži 4 (900V, 400 A, 0,1 ms). Personovy korelační koeficienty při použití různých vyhodnocených veličin zobrazuje tabulka 12.

Veličina	<i>r</i>
Joulův integrál $I^2t$	0,58
doba hoření oblouku - $t_a$	0,80
pořadové číslo experimentu	0,81
špičkové přepětí - $U_a$	-0,90
oblouková energie - $W_a$	0,94

Tabulka 12 – Korelační koeficienty při hledání veličiny popisující nejlépe úbytek hmotnosti materiálu izolační zhášecí komory.

Z výpočtů bylo zjištěno, že nevhodnější 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, viz příloha 2. K proložení vnesených dat byly použity různé funkce. Výběr typu závislosti byl proveden na základě Anscombeho kvartetu. Výsledné vztahy jsou definované a platí s dostatečnou přesností pouze pro omezený rozsah obloukových energií, který je udán vždy u konkrétní rovnice.

Empiricky zjištěná rovnice pro materiál Poly 1 odpovídá lineární závislosti úbytku hmotnosti na obloukové energii a její ověřený rozsah použitelnosti je pro konkrétní zhášecí komoru je od 105 do 1500 J. Směrodatná odchylka  $\sigma = 1,47$  mg.

$$\begin{aligned} \Delta m_{tPoly1} &= 0,0194 W_a - 2,1 && \text{(mg)} \\ W_a &\in \langle 105; 1500 \rangle && \text{(J)} \end{aligned} \quad (5)$$

Empiricky zjištěná rovnice pro materiál Poly 2 odpovídá lineární závislosti úbytku hmotnosti na obloukové energii a její ověřený rozsah použitelnosti je pro konkrétní zhášecí komoru je od 150 do 1600 J. Směrodatná odchylka  $\sigma = 1,53$  mg.

$$\begin{aligned} \Delta m_{tPoly1} &= 0,0244 W_a - 3,6 && \text{(mg)} \\ W_a &\in \langle 150; 1600 \rangle && \text{(J)} \end{aligned} \quad (6)$$

Empiricky zjištěná rovnice pro materiál Poly 3 odpovídá opět lineární závislosti úbytku hmotnosti na obloukové energii a její ověřený rozsah použitelnosti je pro konkrétní zhášecí komoru je od 100 do 1200 J. Směrodatná odchylka  $\sigma = 0,90$  mg.

$$\begin{aligned} \Delta m_{tPoly1} &= 0,0218 W_a - 2,1 && \text{(mg)} \\ W_a &\in \langle 100; 1200 \rangle && \text{(J)} \end{aligned} \quad (7)$$

Empiricky zjištěná rovnice pro materiál Poly 4 odpovídá mocninné funkci úbytku hmotnosti na obloukové energii a její ověřený rozsah použitelnosti je pro konkrétní zhášecí komoru je od 50 do 3200 J. Směrodatná odchylka  $\sigma = 4,01$  mg.

$$\begin{aligned} \Delta m_{tPoly1} &= 0,000182 W_a^{1,7} && \text{(mg)} \\ W_a &\in \langle 50; 3200 \rangle && \text{(J)} \end{aligned} \quad (8)$$

Empiricky zjištěná rovnice pro materiál Poly 5 odpovídá mocninné funkci úbytku hmotnosti na obloukové energii a její ověřený rozsah použitelnosti je pro konkrétní zhášecí komoru je od 50 do 2800 J. Směrodatná odchylka  $\sigma = 1,75$  mg.

$$\begin{aligned} \Delta m_{tPoly1} &= 0,00073 W_a^{1,48} && \text{(mg)} \\ W_a &\in \langle 50; 2800 \rangle && \text{(J)} \end{aligned} \tag{9}$$

Nutnost použití mocninné funkce v posledních dvou případech je prisuzován vlastnímu lokálnímu hoření materiálu po některých testech. Tato skutečnost byla velmi dobře pozorovatelná na vysokorychlostním videozáznamu.

## 6 ZKOUMÁNÍ INTERAKCE OBLOKU A KONSTRUKČNÍCH MATERIÁLŮ 2

Teplota spínacího oblouku je velmi vysoká, i v malém elektroinstalačním modulárním jističi může obvykle přesáhnout teplotu 10 000 K [26]. Takto vysoká teplota převyšuje teplotu tání i vypařování všech běžně používaných plastových i kovových materiálů v konstrukci elektrických přístrojů nízkého napětí. Jedním z nejvíce odolných materiálů používaných v přístrojích je wolfram, jehož teplota vypařování (varu) je za normálního tlaku okolo 5800 K [27]. Přesná hodnota závisí na čistotě kovu, okolních podmínkách experimentu a technologii zpracování.

Pokud tedy 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 materiálem 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. Tepelná kapacita je materiálová konstanta, která může být vztažena na hmotnost (měrná), nebo na objem materiálu (objemová). Pro vysvětlení bude názornější objemová tepelná kapacita  $c_v$ . Akumulace tepla v materiálu a sdílení tepla do okolí je dáno:

$$p(t)dt = S\alpha\theta dt + c_v V d\theta, \quad (\text{W}) \quad (10)$$

kde  $p(t)dt$  je výkon přenesený z oblouku do blízkého materiálu za jednotku času, část rovnice  $S\alpha\theta dt$  vyjadřuje část energie, která je odváděna z povrchu  $S$  konstrukční součásti do okolí s koeficientem přestupu tepla  $\alpha$  a část  $c_v V d\theta$  reprezentuje tu část energie, která v součásti zůstává a zapříčiňuje změnu jejího energetického stavu, tedy ohřev objemu  $V$  s objemovou tepelnou kapacitou  $c_v$ . Objemová tepelná kapacita udává množství tepla, které je potřebné k ohřátí objemové jednotky dané látky o jeden Kelvin. Tepelná kapacita v kombinaci s odvodem tepla z místa dotyku oblouku s materiálem určuje, jak dlouhý čas může oblouk hořet v daném místě materiálu, než dojde k jeho ohřátí obloukem na kritickou mez.

Pokud u kovů dojde k dosažení teploty tání a následnému přijetí měrného skupenského tepla tání přechází materiál do roztaveného stavu. Pokud expozice obloukem neustává a zároveň nepřevažuje odvod energie z exponovaného místa nad přenosem energie z oblouku do materiálu, dochází k ohřátí materiálu až na teplotu vypařování (varu) po následném dodání skupenského tepla vypařování (varu) dochází k odpaření materiálu do výbojového prostoru a vytvoření směsi plazmatu stávajícího oblouku a výparů materiálu exponovaného, čímž dochází ke změně složení plazmatu spínacího oblouku.

Při přenosu tepla a následnému nárůstu teploty plastů nastává v určitém rozmezí teplot k rozpadu plastových řetězců a odpařování materiálu.

Výpary materiálů ovlivňují fyzikální vlastnosti plazmatu ve výbojovém prostoru mnoha způsoby. Například výpary většiny kovů zvyšují vodivost plazmatu, což je pozorovatelné snížením průměru jádra výboje. Na druhé straně výpary některých plastů mohou vodivost snižovat.

Pokud se výpary kovů dostanou do styku s látkou, která je ochladí natolik, aby mohla vzniknout krystalická mřížka typická pro daný kov, dojde k jejich usazení na materiál, který je ochladil. Tohoto jevu se využívá při plazmatickém pokovování. V elektrických přístrojích je tento jev však nežádoucí, protože film kovu vytvoření na izolantech snižuje, až potlačuje jejich elektroizolační vlastnosti.

Pokud dojde k rozpadu plastového řetězce a odpaření jednotlivých prvků struktury do plazmatu elektrického oblouku, zpravidla již při styku s okolními materiály nedojde k opětovnému vytvoření stejného řetězce na povrchu materiálu. Složky řetězce se účastní oxidačně-redukčních, acidobazických a koordinačních reakcí. Z těchto reakcí mohou vznikat další produkty. Vzniklé produkty a zbytky původního řetězce odcházející z plazmatu a usazují se na blízkých materiálech, kde tvoří většinou nežádoucí povrchové vrstvy, které zapříčiňují zásadní změny fyzikálních vlastností postižených povrchů.

Dále také výpary mění tlak ve zhašecí komoře. Změna tlaku může přispívat ke zhašení oblouku, protože s tlakem se mění koncentrace částic  $N$  a s ní střední volná dráha letu částic  $l$ . Střední volná dráha letu je průměrná hodnota vzdálenosti, kterou částice urazí mezi jednotlivými interakcemi (srážkami) s jinými částicemi. Pokud je tlak plynu příliš vysoký, je volná dráha letu nízká a není možné, aby částice mezi srážkami získaly dostatečnou kinetickou energii k excitaci, nebo ionizaci ostatních částic. Na druhé straně, pokud je tlak příliš nízký, snižuje se i koncentrace částic a klesá pravděpodobnost srážky. Oblouk lze tedy dostat do nestabilního stavu jak poklesem tlaku, tak nárůstem tlaku. [23]

## 6.1 Popis experimentů a metodik

Jak již bylo zmíněno v úvodu této kapitoly, 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. Složení plazmatu je velmi důležité hned z několika aspektů. Jedním z nich je zjištění, zda se v plazmatu nevznikají toxické výpary. Další užitečnou informací je výskyt složek jednotlivých konstrukčních materiálů během vypínacího procesu, lze tak například zjistit, jaké materiály se do oblouku odpařovaly např. před opětovným zápalom oblouku mezi kontakty a na základě této znalosti omezit kontakt mezi obloukem a inkriminovaným materiálem. V neposlední řadě je nutné znát složení plynu při simulacích oblouku. Informaci o teplotě oblouku nelze jednoduše změřit termokamerou, jak je tomu u pevných látek. Teplotu oblouku je možné vypočítat ze spektra jeho záření získaného spektrografem. Experimentálně zjištěná teplota oblouku může sloužit jako data do simulací, nebo jako dodatečná informace o vypínacím cyklu. Jak již bylo řečeno, vysoká teplota oblouku poškozuje materiály v jeho blízkosti, tedy díky složení a teplotě lze

zjistit, kdy se v přístroji během vypínacího cyklu vyskytuje nejvyšší teplota a na jakých materiálech právě oblouk hoří, čímž lze odhalit kritické body vypínacího procesu.

Tlak měříme především z důvodu získání informace o vlastnostech plazmatu, nebo také z důvodu ověření rezervy v pevnosti konstrukce, toto je stěžejní především v případě pojistek a dalších výkonových spínacích přístrojů. 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.

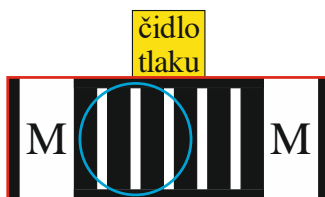
Zkoumané vzorky byly totožné, jako v kapitole 5, tedy pět různých plastových materiálů běžně používaných v jiných odvětvích průmyslu. Cílem měření bylo získat data potřebná pro zkoumání vlivu daných materiálů na vlastnosti spínacího oblouku.

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

### 6.1.1 Schéma a popis uspořádání experimentů

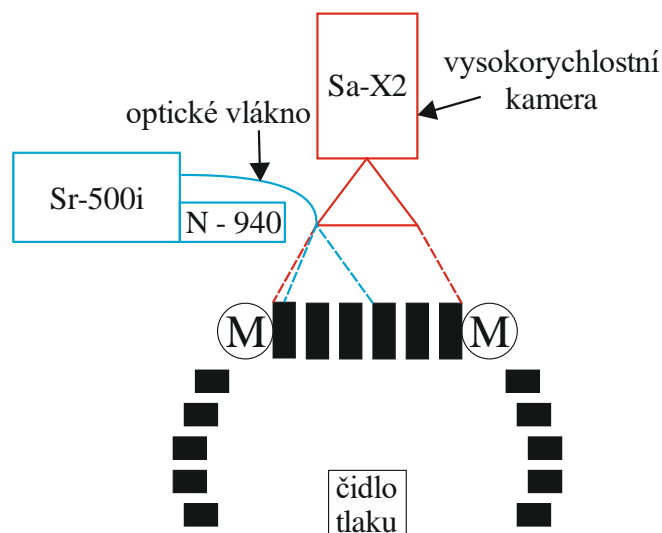
Měření probíhala ve vědecko-technickém parku profesora Lista na VUT v Brně. Silový obvod i měření elektrických veličin bylo provedeno přesně shodně jako v kapitole 5.1.2.

Navíc byly použity spektrografy a senzor pro měření tlaku uvnitř zhášecí komory, jehož ústí bylo umístěno v místě vypínací pružiny (uprostřed kontaktního můstku), viz obrázek 48 a obrázek 49. Čidlo tlaku bylo uchyceno pomocí adaptéru se závitem o velikosti M3.



Obrázek 48 – Experimentální přípravek (pohled shora), oblast snímána rychlokamerou (červený obdélník) a oblast snímána spektrografem (ohraničeno modrou kružnicí).

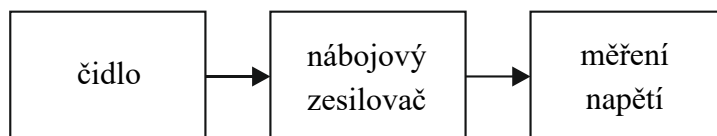
Obrázek 48 zobrazuje pohled na experimentální přípravek shora, M značí umístění magnetů. Červeným obdélníkem je naznačena oblast, která byla zabírána vysokorychlostní kamerou Photron Sa-X2. Modrá kružnice značí ohraničení oblasti, která byla snímána spektrografem Andor Shamrock Sr-500i.



Obrázek 49 - Experimentální přípravek (pohled z boku), umístění rychlokamery.

Obrázek 49 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 shodné jako při experimentech v kapitole 5, viz bod 5.1.4.

### 6.1.2 Problematika měření tlaku



Obrázek 50 – Blokové schéma měření tlaku.

Obrázek 50 zobrazuje blokové schéma měření tlaku. Byla použita piezoelektrická čidla, která patří do skupiny přímých (intrinsických) čidel. Tlak média v prostoru vytváří sílu na plochu čidla, čímž se čidlo deformuje. Deformace  $\varepsilon$  je u piezoelektrických senzorů převáděna na náboj, který je integrován v nábojovém zesilovači a poté převeden na napětí. Pomocí takovýchto senzorů lze měřit například tlak ve spalovacím prostoru spalovacích motorů. [28]

Měření tlaku je značně problematické. Je nutné měřit s dostatečnou přesností, ale měřit pouze tlak měřeného média, nikoli parazitní vibrace způsobené mechanickými, popřípadě elektrodynamickými silami. Tento jev lze rozpoznat tak, že i po uhašení oblouku dochází k výskytu mechanických kmitů v průběhu tlaku. K potlačení těchto kmitů byla původní klasická čidla nahrazena čidly se speciální úpravou proti vibracím pomocí vestavěného kompenzačního akcelerometru. Podstatná je také vhodná volba umístění čidla a pevné ukotvení celého experimentálního přípravku. Další komplikací, kterou bylo nutné vzít v úvahu je skutečnost, že při použití kombinace adaptér – čidlo vzniká tzv. „Helmholzův rezonátor“ s rezonanční frekvencí:

$$f_r = \frac{a}{2\pi} \sqrt{\frac{S_p}{V l_p}}, \quad (\text{Hz}) \quad (11)$$

kde  $a$  je rychlost šíření zvuku v daných podmínkách,  $S_p$  je průřez průchodu adaptéru,  $l_p$  je délka průchodu adaptéru a  $V$  je objem vnitřního prostoru u čidla. Z důvodu potlačení právě těchto rezonančních kmitů bylo nutné použít dolní pásmovou propust. Výpočtem byl stanoven rezonanční kmitočet použité sestavy 10,2 kHz. Experimentálním ověřováním byla dále určena dolní pásmová propust 600 Hz, která přinášela v dané kombinaci nejlepší výsledky. Další komplikací měření tlaku v prostorech s vysokou teplotou je tzv. „teplotní šok“. Teplotní šok se projevuje výskytem náhlého kolapsu měřené hodnoty tlaku a následným výskytem neočekávané hodnoty tlaku. Z těchto důvodů je nutné čidlo umístit tak, aby nepřišlo do přímého kontaktu s obloukem a také jej chránit proti účinkům vysoké teploty. S tím souvisí volba umístění čidla při experimentech v oblasti vypínací pružiny, kde by se oblouk za normálních okolností neměl vyskytovat a také použití velmi tenké vrstvy speciální vazelíny na bázi silikonu aplikované přímo na povrch čidla. [29]

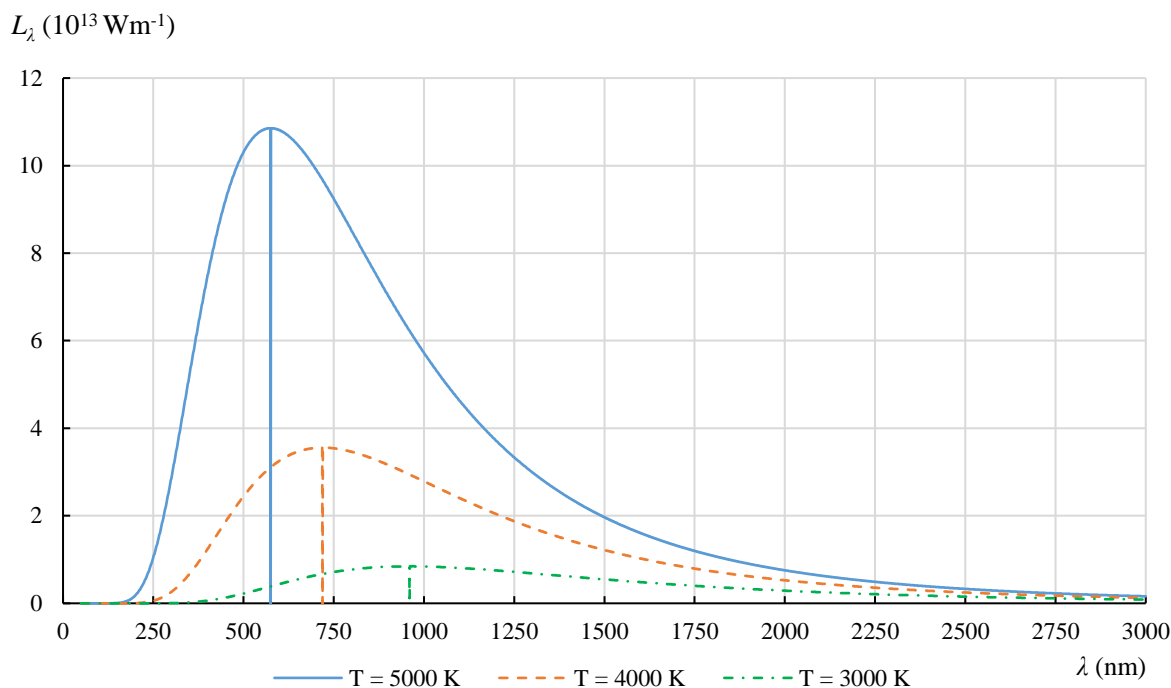
Byla zde zmíněna poloha čidla, což je jedna z nejdůležitějších okolností měření tlaků vůbec. Je nutné si uvědomit, že tlak uvnitř přístroje není v celém objemu zdaleka konstantní. Je značně závislý na konstrukci komory, aktuální poloze oblouku vůči čidlu a také na vektoru rychlosti jeho pohybu. Ač by se mohlo zdát, že se jedná o komplikaci, není tomu tak. Díky znalosti změn výkonových parametrů a sledování změny tlaku lze právě sledovat změnu polohy oblouku.

### 6.1.3 Problematika diagnostiky oblouku pomocí optické emisní spektroskopie

Všechny látky vyzařují záření v určité formě. I pevné látky, tedy předměty kolem nás, vyzařují záření v podobě spojitého spektra, tzv. „kontinua“. Z hlediska záření je ideálním pevným tělesem tzv. „absolutně černé těleso“. Spektrum záření takového tělesa je popsáno Planckovým zákonem:

$$L_{\lambda}(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \quad (\text{Wm}^{-1}) \quad (12)$$

kde  $h$  je Planckova konstanta,  $c$  je rychlost světla,  $\lambda$  je vlnová délka,  $k$  je Boltzmannova konstanta a  $T$  je teplota tělesa, které záření vyzařuje. Pro určení teploty z Planckovy funkce není paradoxně důležitý přesný spektrální tok, což je při měření teploty pevných látek značná výhoda, proto ke zjištění teploty není nutná absolutní kalibrace spektrografu. Pokud neprovedeme absolutní kalibraci spektrografu, výstupem z měření není závislost absolutní hodnoty spektrálního toku na vlnové délce, nýbrž závislost pouze relativní hodnoty spektrálního toku. Nicméně, jak bylo řečeno výše, pro určení teploty není nutné znát absolutní spektrální tok. Pokud využijeme Wienova posunovacího zákona zjistíme, že k určení výsledné teploty stačí znát polohu, tedy vlnovou délku maxima spektrálního toku. Grafické znázornění Wienova posunovacího zákona zobrazuje obrázek 51.

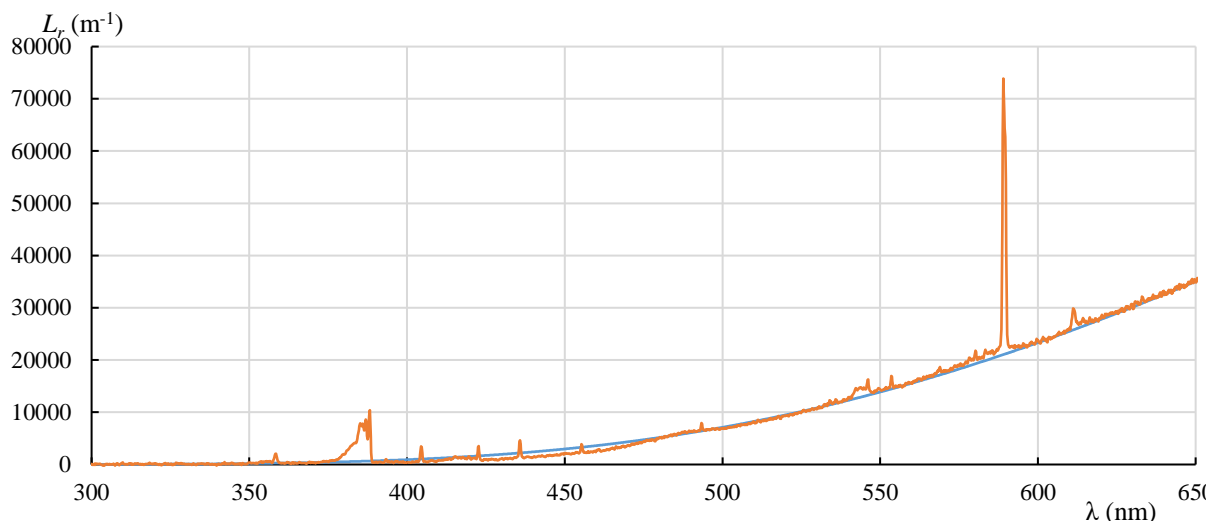


Obrázek 51 – Teoretické spojité spektrum pro teploty 3000 K (zelená), 4000 K (oranžová) a 5000 K (modrá).

Pro příklad jsou zde zobrazeny tři spojité Planckovy funkce. Funkce modrou spojitou čarou je pro teplotu vyzařovanou absolutně černým tělesem o teplotě 5000 K, funkce červenou čárkovanou čarou pro 4000 K a funkce zelenou čerchovanou čarou pro teplotu 3000 K. Poloha maxima spektrálního toku (znázorněna svislicí spuštěnou kolmo k vodorovné ose) se s rostoucí teplotou posouvá směrem k nižším vlnovým délkám.

Dosavadní informace platí pro tzv.: „absolutně černé těleso“. Určitou nevýhodnou vlastností reálných těles při těchto měřeních je emisivita  $\varepsilon(\lambda)$ . Emisivita je součinitel, který koriguje odchylku záření reálného tělesa od absolutně černého tělesa. Emisivita je proměnná s vlnovou délkou i teplotou, nikoli konstantní, jak je často pro zjednodušení uváděno. Proto je nutné pro určení teploty ze spojitého spektra znát také emisivitu měřeného objektu.

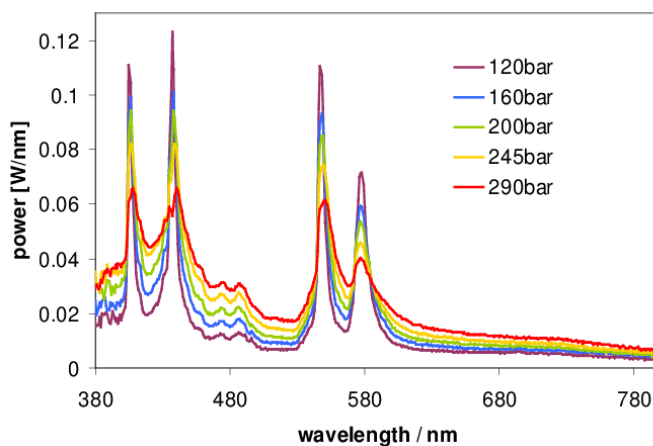
Pro lepší představu obrázek 52 zobrazuje reálné spektrum záření katody stejnosměrné obloukové lampy naměřené spektrografem (oranžová) proložené Planckovou funkcí (modrá). Vzhledem k tomu, že spektrum bylo měřeno pouze ve viditelné oblasti, může se stát, jako například zde, že nevidíme přímo polohu maxima spektrálního toku, které se v tomto případě nachází v infračervené oblasti spektra. Zde lze teplotu získat proložením známé části Planckovy funkce.



Obrázek 52 – Ukázka reálného spojitého spektra záření katody o teplotě 2300 K.

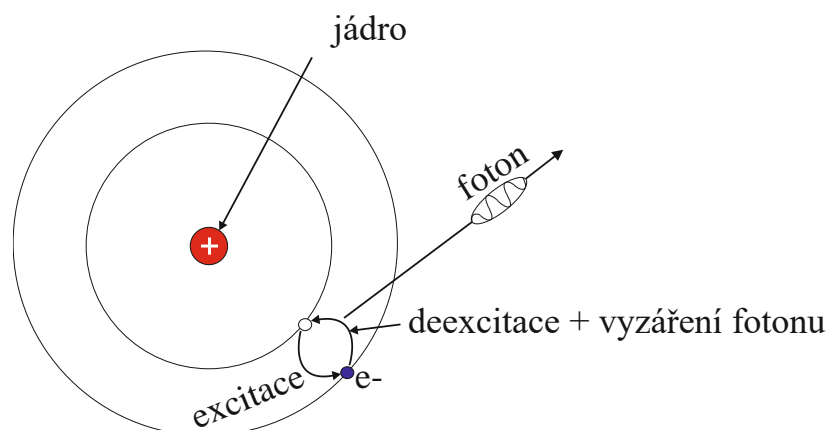
Hlavním důvodem prezentování obrázků výše však nebyl výpočet teploty. Je možné si povšimnout, že spektrum záření katody není pouze spojitém zářením popsaným Planckovým zákonem, obsahuje také určité anomálie. Tyto odchylky od spojitého spektra jsou majoritně způsobeny přítomností plazmatu v okolí katody.

S přechodem od pevné látky k plazmatu, tedy se změnou vazby mezi jednotlivými atomy se totiž spektra záření zásadně mění. Vazba mezi částicemi v pevné látce je velmi silná a vzdálenost mezi atomy malá, do značné míry se tedy blízké částice vzájemně ovlivňují. U plynů je naopak vzdálenost částic výrazně větší, vazba slabá a vzájemné ovlivňování také slabé. Jev ovlivňování okolních částic lze velmi dobře pozorovat u plynů při zvyšování tlaku, viz obrázek 53.



Obrázek 53 – Změny rozložení hustoty spektrálního toku s měnícím se tlakem v plazmatu obsahujícím s rtuťové výpary [31].

Plyny obsahující volné atomy, popř. ionty mohou za určitých okolností vyzářovat spektrum, které se skládá z několika energetických špiček o velmi úzkém rozsahu, viz obrázek 53. Těmto špičkám říkáme spektrální čáry. Pokud atomy přijmou energii potřebnou k jejich excitaci, dochází k navýšení energetického stavu atomu přeskokem elektronů z nižších hladin na vyšší. Excitovaný stav není stavem stabilním a dochází k samovolným přeskokům elektronů z vyšší energetické hladiny na nižší energetickou hladinu a k vyzáření energie, viz obrázek 54. [33]



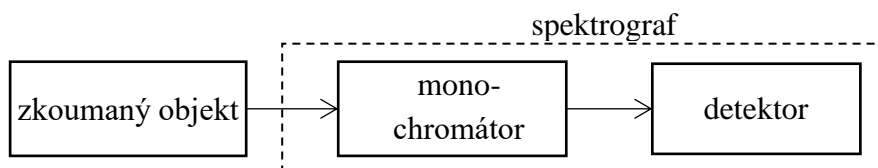
Obrázek 54 – Vznik záření při přeskoce elektronu[32].

Emisní spektroskopie tedy zkoumá spektrální čáry vyzářené plazmatem při změně energie vázaných elektronů z vyšší energetické hladiny na nižší energetickou hladinu. Každý chemický prvek má vlastní originální strukturu povolených energetických hladin, na kterých se elektrony mohou pohybovat. Tedy i velikosti excitačních a vyzářených energií jsou originální pro každý prvek. Poloha konkrétních spektrálních čar je dána:

$$\lambda = \frac{hc}{\Delta E}, \quad (\text{nm}) \quad (13)$$

kde  $\lambda$  je vlnová délka,  $h$  Planckova konstanta,  $c$  rychlost světla a  $\Delta E$  rozdíl energie vázaného elektronu před změnou a po změně energie. Díky této skutečnosti umožňuje atomová emisní spektroskopie určit složení zkoumaného plazmatu pomocí jeho spektra záření a příslušné databáze. CVVOZE FEKT VUT v Brně obvykle využívá databáze NIST [34], což je databáze národního institutu standardů a technologií v USA. [33]

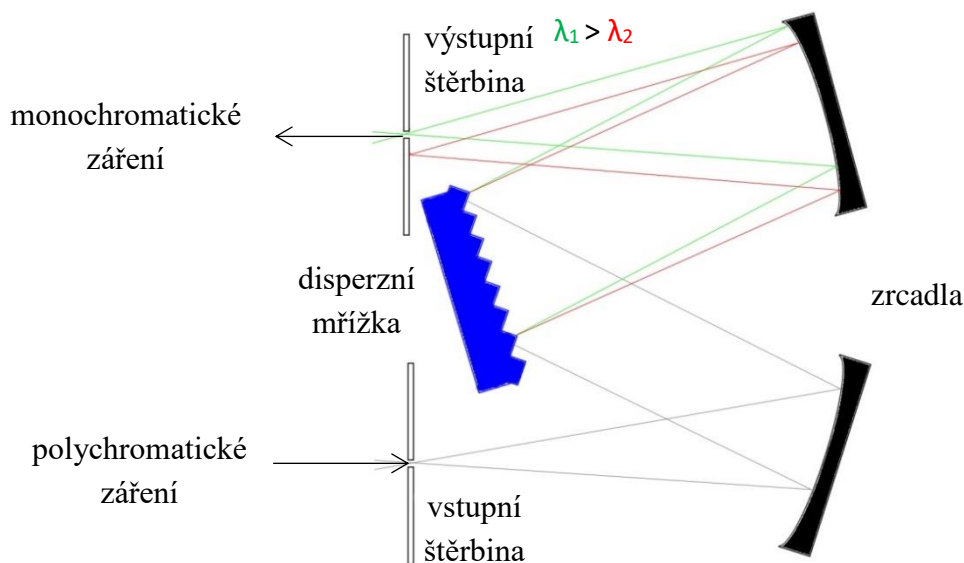
Optická emisní spektroskopie je velmi silnou měřicí metodou, která se používá v širokém spektru aplikací. Značnou výhodou atomové emisní spektroskopie je minimální ovlivnění měřeného objektu. Občasným problémem u spektroskopických měření je nedostatek intenzity záření měřeného objektu, toto však není u spektroskopie oblouku problém, protože jeho vyzářování je výrazné. [35]



Obrázek 55 – Blokové schéma snímání emisního spektra.

Obrázek 55 zobrazuje základní měřicí řetězec při měření emisního spektra. Zkoumaný objekt vyzářuje energii do soupravy spektrografu. Spektrograf je v základní konfiguraci složen ze dvou funkčních celků, monochromátoru a detektoru. Monochromátor je velmi důležitou součástí spektrografu, která obsahuje vstupní a výstupní štěrbinu, zrcadla a disperzní mřížku. Štěrbiny slouží k omezení intenzity záření a vylepšení přesnosti měření. Disperzní mřížka rozkládá vstupní polychromatické záření na jednotlivé úseky vlnových délek, které odpovídají rozlišení monochromátoru. Rozlišení monochromátoru je dáno majoritně délkou jeho optické cesty a počtem drážek (vrypů) disperzní mřížky. Monochromátory mohou mít různá uspořádání jednotlivých

komponent, námi používané a zároveň nejčastěji používané je uspořádání Czerny-Turner, viz obrázek 56. [36], [38]



Obrázek 56 – Monochromátor s disperzní mřížkou – uspořádání Czerny Turner [37].

Další důležitou součástí spektrografu je detektor. Obvykle se používá CCD, EMCCD nebo CMOS čip. Je důležité, aby čipy měly vysokou citlivost, na druhé straně s vysokou citlivostí čipů roste úroveň bílého (tepelného) šumu [39]. Obvyklým řešením k redukci bílého šumu je chlazení detektoru. Elegantním řešením chlazení jsou Peltierovy články. Peltierovy články mají sice nízkou účinnost, nicméně mají malé rozměry a ke chlazení není nezbytně nutné další chladicí médium kromě vzduchu. Chladicí účinnost Peltierových článků lze vylepšit přidáním aktivního vzduchového chlazení na jejich teplou stranu, popřípadě cirkulační kapalínový systém. Nejčastějším řešením je systém proudícího vzduchu díky nízké ceně a snadné údržbě. Takovýto systém dokáže detektor CCD kamery Newton 940, která je součástí spektrografů laboratoře spínacích přístrojů, vychladit až na  $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ , popřípadě  $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$  při použití vodního cirkulačního okruhu.

Součástí vybavení laboratoře spínacích přístrojů na VUT v Brně jsou celkem tři spektrografy. Prvním z nich je Avantes AvaSpec – ULS 3648, viz obrázek 57.



Obrázek 57 – Avantes AvaSpec ULS 3648 – TEC [40].

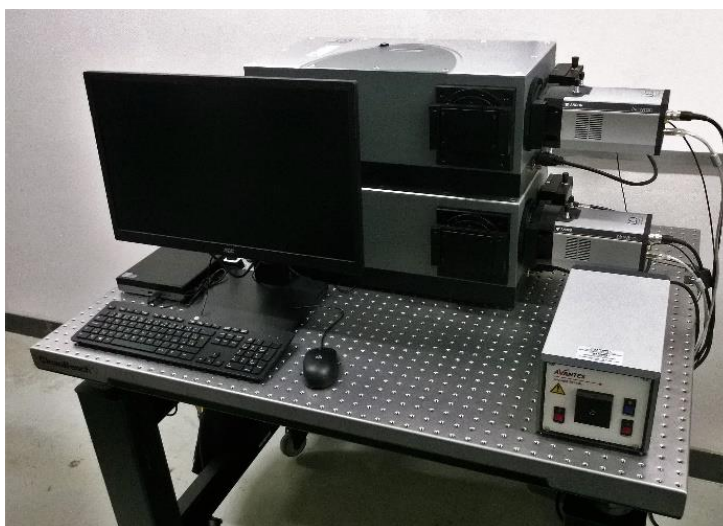
Tento spektrograf je výhodný díky svojí kompaktní konstrukci, pevné disperzní mřížce a systému zrcadel především k měření mimo laboratoř spínacích přístrojů. V laboratoři je využíván pro získání přehledových spekter záření, protože má poměrně široký rozsah vlnových délek 550 nm na jedno měření. Nevýhodou tohoto spektrografu je nižší rozlišení a pouze jednořádkový detektor

s poměrně dlouhou dobou vyčítání. Díky jednořádkovému detektoru a dlouhé době vyčítání je s tímto spektrografem problematické zaznamenat rychlé děje s dostatečným časovým rozlišením. Další důležité parametry, viz tabulka 13.

<b>spektrální rozsah CCD čipu</b>	200 – 1100 nm
<b>poměr signál : šum</b>	350:1
<b>A/D převodník</b>	16 - bit
<b>CCD</b>	Toshiba 3648 pixelů
<b>doba čtení CCD</b>	3,7 ms
<b>hmotnost</b>	3,6 kg
<b>rozměry</b>	250 mm x 179 mm x 144 mm

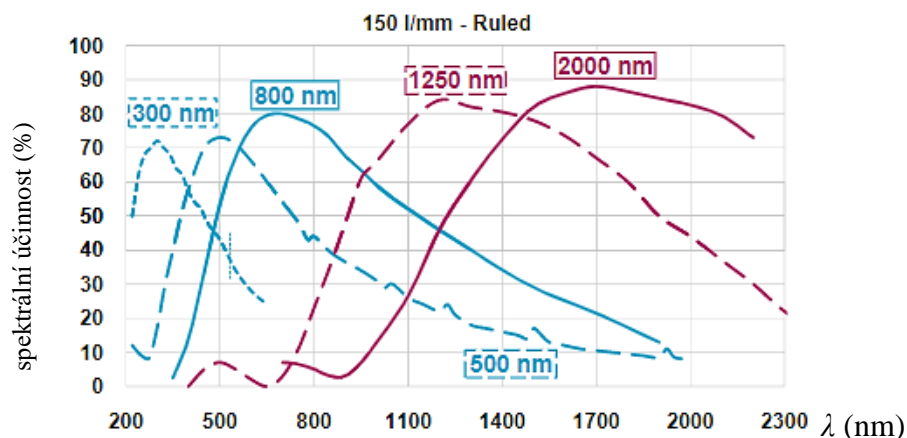
*Tabulka 13 – Vybrané parametry spektrografu Avanteas AvaSpec ULS 3648 TEC.*

Další dva spektrografy v laboratoři spínacích přístrojů jsou pokročilé spektrografy Schamrock 500i od firmy Andor v kombinaci s externími kamerami Newton 940. Jedná se o dvě vzhledově podobné sestavy, viz obrázek 58, nicméně s mírně odlišnými parametry.



*Obrázek 58 – Sestava spektrografů 2xAndor Sr-500i + 2x Newton 940.*

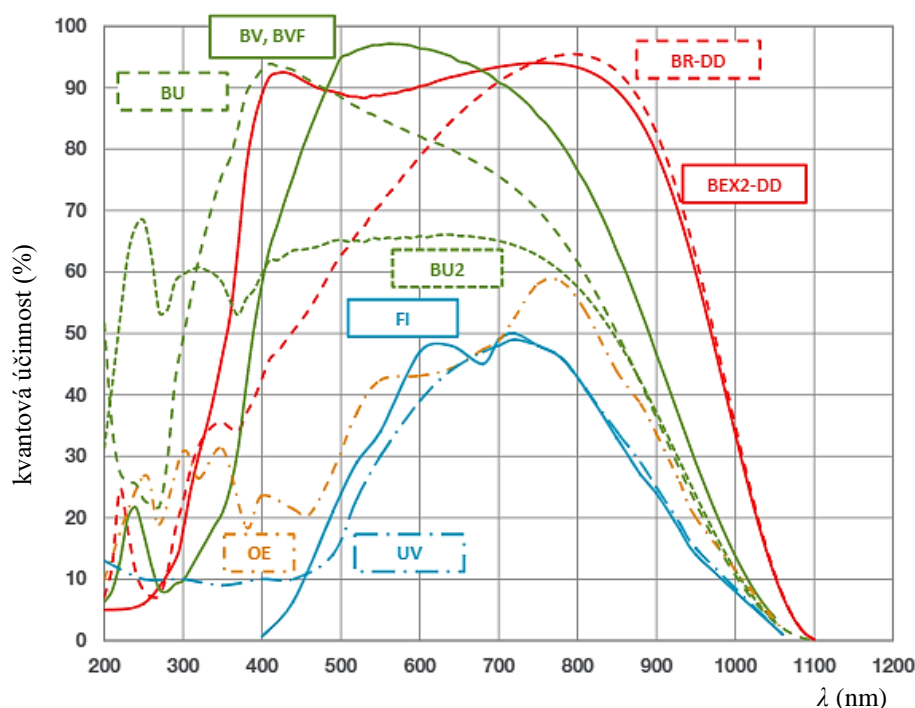
Konfigurace součástí uvnitř spektrografů je opět v uspořádání Czerny-Turner. Rozdílem od spektrografu Avantes je delší optická vzdálenost, zde 500 mm a použití elektronicky ovládané otočné věže s více disperzními mřížkami. Každý z těchto spektrografů obsahuje věž se třemi disperzními mřížkami se 150, 600 a 1200 vrypů na milimetr, rozlišení spektrografů je tak volitelné. S rostoucím počtem vrypů se mění přímo úměrně rozlišení a nepřímo úměrně rozsah měření. I přes to, že oba spektrografy obsahují mřížky se stejným počtem vrypů, je zde odlišnost ve spektrální účinnosti mřížek. Spektrální účinnost mřížek je závislá na vlnové délce a je dána geometrickým provedením vrypů a povrchovou úpravou odrazné plochy mřížky. Do značné míry o spektrální účinnosti mřížky vypovídá údaj označený anglickým slovem „blaze“, který je číselným údajem udávajícím přibližnou polohu maxima spektrální účinnosti mřížky, viz obrázek 59.



Obrázek 59 – Spektrální účinnost disperzních mřížek se 150 vrypy na milimetr [41].

Jeden ze spektrografů obsahuje mřížky s polohou maxima 500 nm a druhý s polohou maxima 700 nm a 800 nm. Pokud se očekává výskyt spektrálních čar v oblasti pod 600 nm, je vhodné použít spektrograf s mřížkami s polohou maxima 500 nm, na druhé straně pokud očekáváme pozorování spektrálních čar prvků s majoritním výskytem čar nad 600 nm, je vhodný druhý spektrograf.

K dosažení nejvyšší účinnosti je nezbytné použít vhodnou kombinaci mřížek a detektorů. V laboratoři spínacích přístrojů jsou použity kamery Newton 940. Pro spektrograf s mřížkami s polohou maxima účinnosti 500 nm je použita kamera Newton 940-BU s vyšší citlivostí pro nižší vlnové délky. Pro spektrograf s mřížkami s polohou maxima 700 a 800 nm je použita kamera Newton 940-BV. Spektrální citlivost čipů těchto kamer je opět rozdílná, viz obrázek 60.

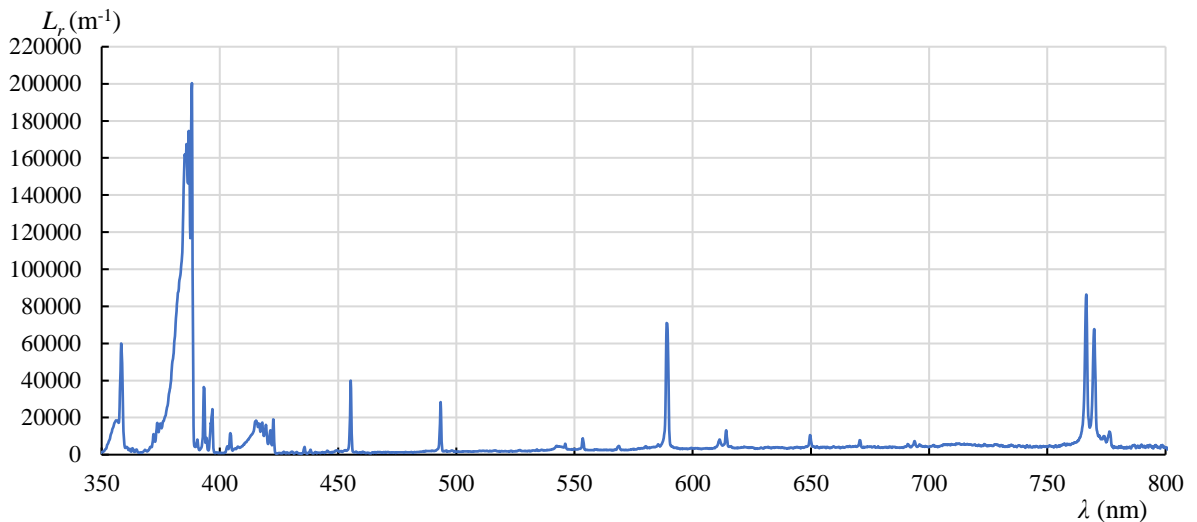


Obrázek 60 – Kvantová účinnost CCD detektorů pro různá provedení kamer Newton 940 [42].

Kamery Newton 940 obsahují opět chlazení Peltierovými články s nastavitelnou teplotou až do -100 °C, kvůli redukci bílého šumu. Čip těchto kamer již není jednořádkový, ale disponuje rozlišením 2048x512 bodů, což umožňuje použít speciální mód s názvem „fast kinetics“ pro

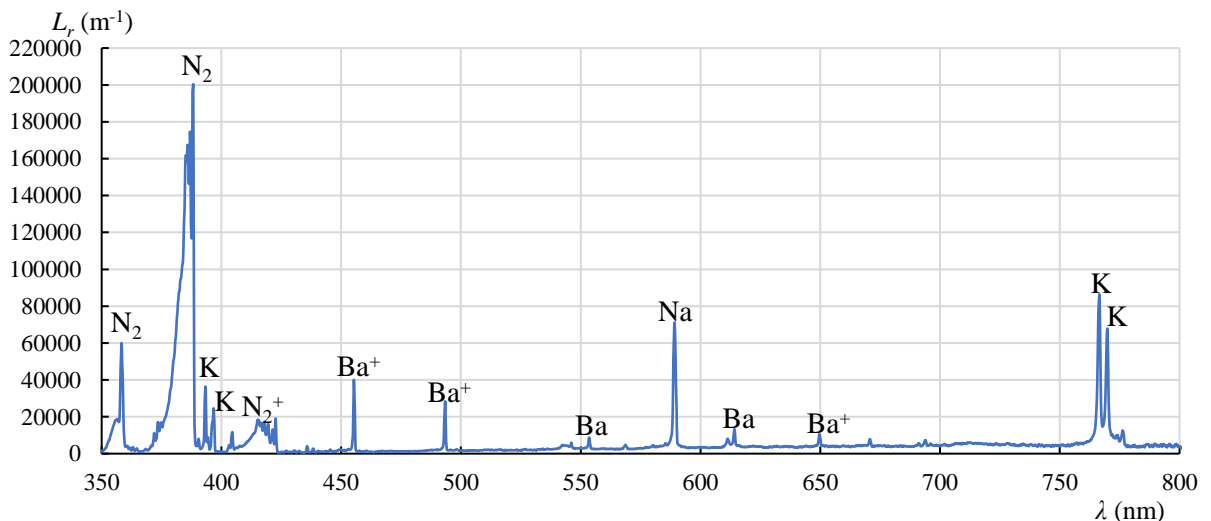
snímání spekter při rychlých dějích. V tomto módu je osvětlena pouze omezená část čipu, generovaný náboj je posouván do neosvětlených částí čipu a vyčtení celého čipu probíhá až po ukončení měření, což eliminuje nevýhodu časově náročného čtení CCD čipů.

Díky spektrografům je tedy možné sejmout spektra záření spínacího oblouku. Výstupem spektrografu je v případě měření na oblouku čárové spektrum, které může obsahovat i molekulové pásy, pokud se v plazmatu nacházejí i zářící molekuly. Obrázek 61 zobrazuje příklad spektra záření oblouku stejnosměrné vzduchové obloukové lampy s elektrodami neznámého složení. Aplikovaný proud 5 A a napětí na oblouku 55 V.



Obrázek 61 – Příklad spektra záření obloukové lampy.

Přiřazením polohy spektrálních čar spektra za pomoci databáze NIST [34] je možné provést identifikaci relativního složení plazmatu, viz obrázek 62.



Obrázek 62 – Spektrum obloukové lampy s identifikovanými prvky.

Baryum, sodík a draslík pochází s největší pravděpodobností z elektrod obloukové lampy. Na druhé straně molekulární pásy dusíku jsou způsobeny zářením vzdušného dusíku ve výbojovém prostoru.

Další část se bude zabývat výpočtem teploty z čárového spektra dvěma různými metodami.

První metoda s názvem výpočet teploty ze dvou spektrálních čar vychází z porovnání intenzity dvou spektrálních čar. Předpokladem metody je dostatečná přesnost spektrometru a jeho relativní kalibrace. Výhodou je, že není nutné znát koncentraci částic v plazmatu.

Vyzářená intenzita při sestupu elektronu z hladiny  $m$  na hladinu  $n$  je dána vztahem:

$$I_{m \rightarrow n} = A_{mn} h \nu_{mn} n_m, \quad (14)$$

kde  $A_{mn}$  je pravděpodobnost přechodu elektronu mezi konkrétními energetickými hladinami také často označována jako Einsteinův koeficient spontánní emise,  $h$  je Planckova konstanta,  $\nu$  je frekvence záření a  $n_m$  je koncentrace elektronů na energetické hladině  $m$ .

Za předpokladu lokální termodynamické rovnováhy<sup>6</sup> lze koncentraci elektronů na hladině  $m$  vyjádřit vztahem:

$$n_m = n \frac{g_m e^{-\frac{U_{em}}{kT}}}{z(T)}, \quad (15)$$

kde  $T$  je termodynamická teplota,  $g_m$  statistická váha hladiny  $m$  (počet stavů se s tejnou energií),  $U_{em}$  je energie hladiny  $m$ ,  $z(T)$  je stavová suma a  $k$  je Boltzmannova konstanta.

Frekvence vyzářené energie je dána podílem rychlosti světla a vlnové délky vyzářené energie. Dosadíme-li do předchozí rovnice za frekvenci záření vztah  $c/\lambda$  a vztah pro určení koncentrace elektronů na hladině  $m$  dostáváme:

$$I_{m \rightarrow n} = A_{mn} h \frac{c}{\lambda_{mn}} n \frac{g_m e^{-\frac{U_{em}}{kT}}}{z}, \quad (16)$$

kde  $\lambda_{mn}$  je vlnová délka vyzářené energie, tedy poloha spektrální čáry a  $c$  rychlost světla.

Intenzita vyzářené energie při sestupu elektronu z hladiny  $k$  na hladinu  $l$  je dána stejným vztahem, akorát s odlišnými indexy, které přísluší daným hladinám:

$$I_{k \rightarrow l} = A_{kl} h \frac{c}{\lambda_{kl}} n \frac{g_k e^{-\frac{U_{ek}}{kT}}}{z} \quad (17)$$

Podělíme-li rovnici pro intenzitu vyzářené energie při přechodu z hladiny  $m$  na hladinu  $n$  rovnicí pro přechod z hladiny  $k$  na hladinu  $l$ , příhodně se nám vykrátí ve zlomku koncentrace částic, kterou neznáme a dostáváme:

$$\frac{I_{m \rightarrow n}}{I_{k \rightarrow l}} = \frac{A_{mn} g_m \lambda_{kl}}{A_{kl} g_k \lambda_{mn}} e^{\frac{U_{ek} - U_{em}}{kT}} \quad (18)$$

Abychom mohli vyjádřit z rovnice teplotu, musíme rovnici logaritmovat a dostaneme:

---

<sup>6</sup> Lokální termodynamická rovnováha (LTE) je podmíněna tím, že dynamické vlastnosti částic v plazmatu, jako například rychlost elektronů a iontů, rozdělení mezi excitované stavy a parciální hustoty ionizovaných stavů, odpovídají Maxwell-Boltzmannovu rozdělení. Na rozdíl od celkové termodynamické rovnováhy však může z plazmatu unikat záření a gradient teploty uvnitř plazmatu nemusí být roven nule [45].

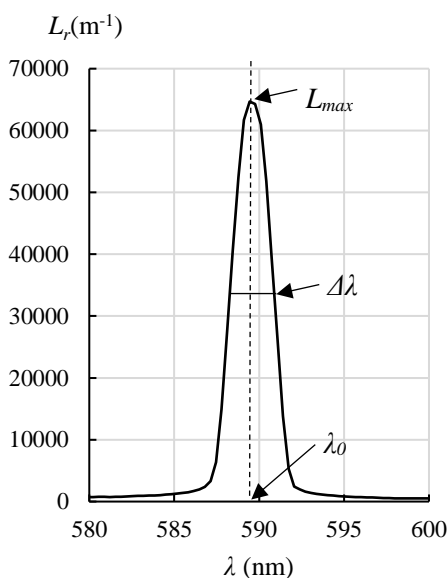
$$\ln\left(\frac{I_{m \rightarrow n}}{I_{k \rightarrow l}}\right) = \ln\left(\frac{A_{mn} g_m \lambda_{kl}}{A_{kl} g_k \lambda_{mn}}\right) + \frac{U_{ek} - U_{em}}{k T} \quad (19)$$

Použitím standardních matematických úprav a pravidel dostáváme vztah pro výpočet teploty:

$$T = \frac{U_{ek} - U_{em}}{k \ln\left(\frac{A_{kn} g_k \lambda_{mn} I_{m \rightarrow n}}{A_{mn} g_m \lambda_{kl} I_{k \rightarrow l}}\right)} \quad (20)$$

Vlnovou délku a ostatní neznámé kromě intenzity záření získáme z databáze NIST [34]. Intenzitu záření získáme z čárového spektra integrací příslušné spektrální čáry.

Ač se na první pohled může zdát, že spektrální čára je nekonečně tenká, není tomu tak. Každá spektrální čára má určitý tzv.: „profil“. Výsledný profil je vytvořen součtem záření mnoha atomů s drobnými odchylkami ve vyzářené vlnové délce. Příklad profilu spektrální čáry zobrazuje obrázek 63. Tentýž obrázek také zobrazuje důležité údaje o spektrální čáře:  $L_{max}$  je maximální spektrální tok,  $\Delta\lambda$  je tzv. „polovinová šířka“, což je plná šířka čáry v polovině její výšky (často označováno jako FWHM) a  $\lambda_0$ , která určuje polohu čáry.



Obrázek 63 – Profil a důležité parametry spektrální čáry.

Čára by tedy byla nekonečně tenká pouze v případě, že by všechny sestupující elektrony z konkrétní hladiny na jinou hladinu vyzářili naprosto stejnou energii v podobě záření (tzn.: nebyly by ovlivňovány okolními částicemi, ani vnějšími poli), všechny atomy daného prvku byly v naprosto stejné vzdálenosti od spektrometru a neplatil by Heisenbergův princip neurčitosti, tedy znali bychom exaktně přesně jak polohu, tak hybnost vyšetřované částice. Toto však není možné.

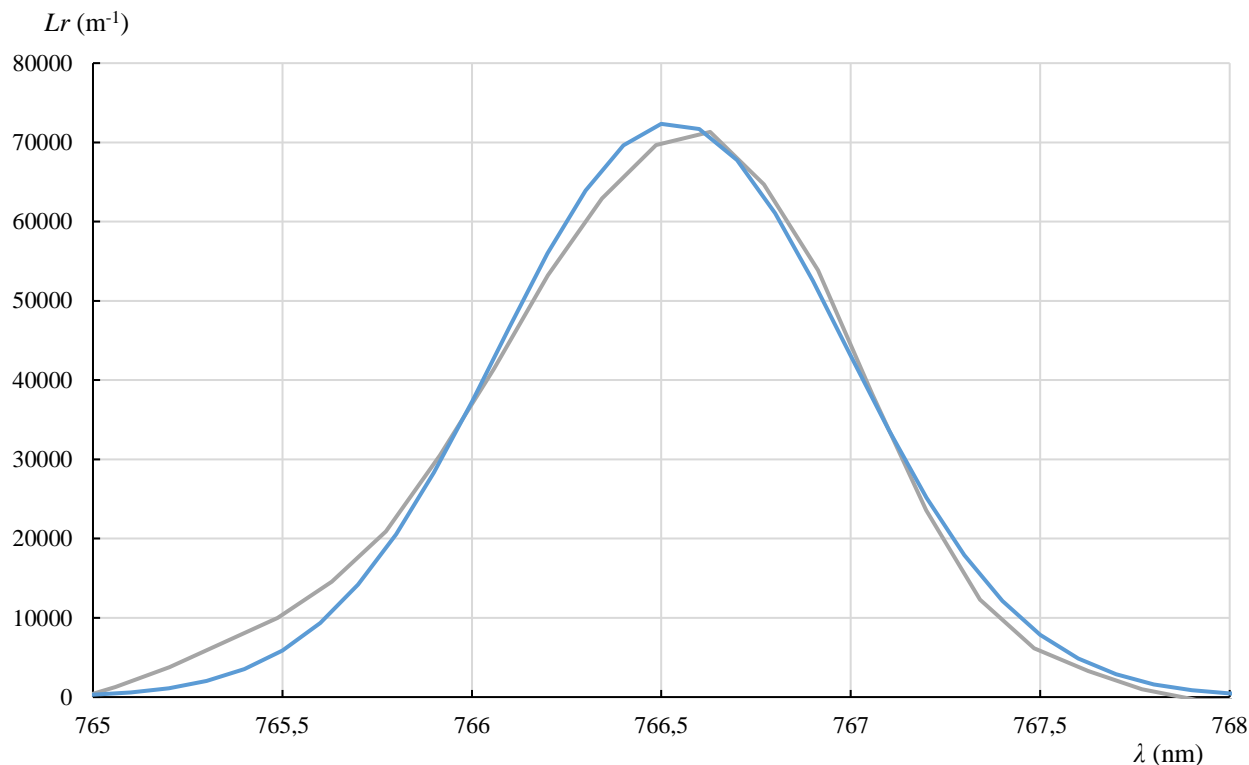
Nejčastějším rozšířením je Dopplerovo rozšíření způsobené chaotickým pohybem částic v plazmatu všemi směry, tedy Dopplerovým efektem<sup>7</sup>. Dopplerovo rozšíření způsobí rozšíření čáry dle Maxwell-Boltzmannova rozdělení, které popisuje Gaussova funkce s předpisem:

<sup>7</sup> Dopplerův efekt se projevuje změnou frekvence vlnění vlivem změny polohy vyšetřovaného objektu vysílajícího vlnění vůči pozorovateli.

$$f(\lambda) = ae^{-\frac{(\lambda-\lambda_0)^2}{2\sigma^2}} \quad (21)$$

kde  $\lambda_0$  značí polohu maxima spektrální čáry,  $a$  výšku spektrální čáry a  $\sigma$  šířku čáry [46].

S využitím této znalosti můžeme aplikovat předpis Gaussovy funkce k proložení naměřených spektrálních čar vybraných prvků, kterým dané rozdělení vyhovuje, čímž můžeme dosáhnout vylepšení přesnosti výsledků, viz obrázek 64. Získáním předpisu Gaussovy funkce nám také umožňuje provést integraci spektrálního toku čáry analyticky.



Obrázek 64 – Příklad proložení spektrální čáry draslíku (šedá) Gaussovou funkcí (modrá).

Zvolená matematická funkce s dostatečnou přesností kopíruje naměřená data pro vybrané spektrální čáry. Relativní intenzitu vyzářené energie získáme:

$$I_r = \int L_r d\lambda. \quad (22)$$

Po dosazení předpisu Gaussovy funkce ve zvoleném tvaru dostáváme:

$$I_r = \int ae^{-\frac{(\lambda-\lambda_0)^2}{2\sigma^2}} d\lambda \quad (23)$$

a po integraci dostaneme vhodný vztah pro výpočet relativní vyzářené energie:

$$I_r = a\sigma\sqrt{2\pi}. \quad (24)$$

Odchylka vyzářené energie získané numerickou integrací originálních naměřených dat a analytickou integrací aplikované Gaussovy funkce je v tomto případě pouze 0,4 %.

Dalším možným rozšířením je Lorentzovo rozšíření, které je dáno deformací orbitalů (tedy energetických hladin) vlivem srážek částic. Lorentzovo rozšíření lze dále rozdělit na Starkovo

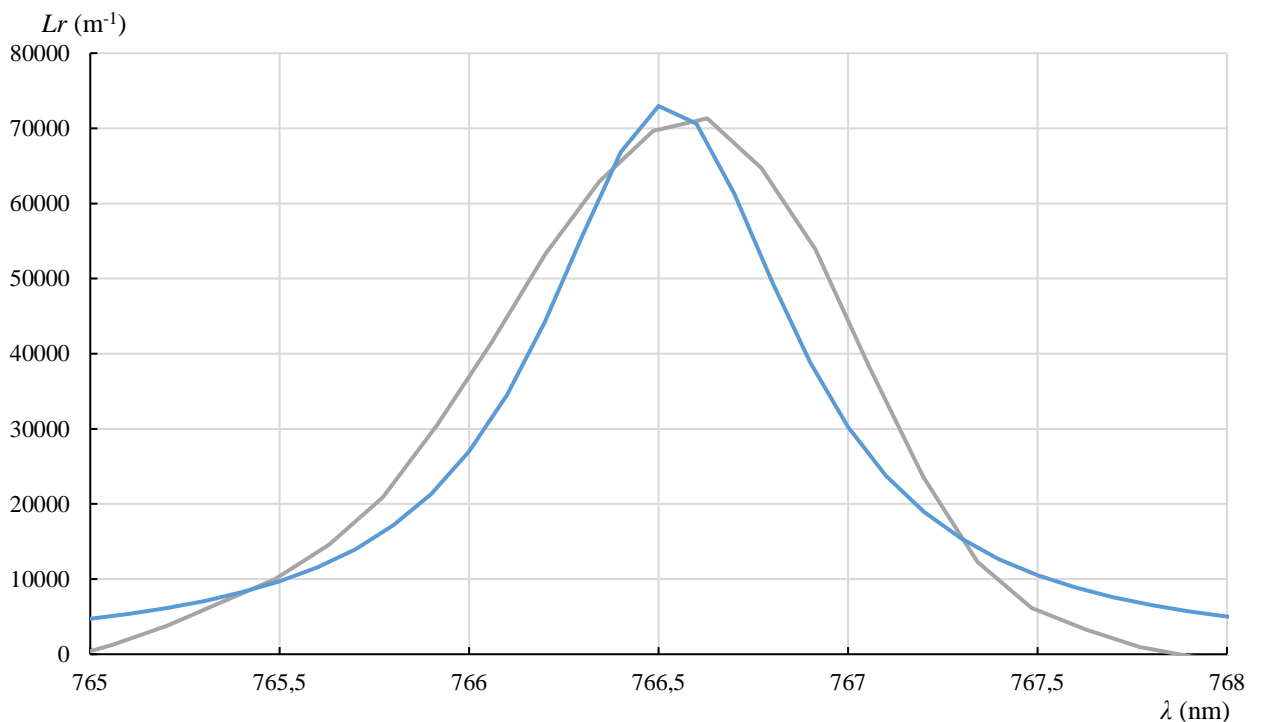
rozšíření (interakce s nabitými částicemi v elektrickém poli), Van Der Walsovo rozšíření (srážky s neutrálními částicemi) a Holtsmarkovo rozšíření (srážky s atomy stejného druhu).

Lorentzovo rozšíření, resp. Lorentzův tvar spektrální čáry je popsán Cauchy-Lorentzovou funkcí rozdělení pravděpodobnosti:

$$f(\lambda) = a \frac{1}{1 + \left(\frac{2(\lambda_0 - \lambda)}{w}\right)^2} \quad (25)$$

kde  $a$  značí výšku spektrální čáry,  $\lambda_0$  polohu maxima spektrální čáry a  $w$  plnou šířku čáry v polovině její výšky [47].

Nyní se pokusíme o aplikaci Lorentzovy funkce na naměřená data z předchozího obrázku.



Obrázek 65 – Příklad proložení spektrálních čar draslíku (šedá) Cauchy-Lorentzovou funkcí (modrá).

Cauchy-Lorentzovo rozdělení v tomto případě neodpovídá rozdělení vyzářených energií atomy draslíku, viz obrázek 65. Lze tedy říci, že v případě prezentované spektrální čáry výrazně dominuje Dopplerovo rozšíření spektrální čáry.

Nesmíme také opomenout přístrojové rozšíření, které je způsobeno konstrukcí a nastavením spektrografu, toto rozšíření je většinou popsáno tzv.: „přístrojovou funkcí“, což je funkce Gaussova.

Celkové rozšíření je tedy konvolucí Gaussovy a Cauchy-Lorentzovy funkce která se nazývá Voigtova funkce. Ve většině případů však lze jednu z funkcí považovat za dominantní, a tedy je

možné tu, jejíž vliv je minimalizován, zanedbat. Toto zjednodušení je velmi důležité, protože práce s Voigtovou funkcí je komplikovaná.

I po aplikaci proložení výše zmíněnými funkcemi je metoda výpočtu teploty ze dvou spektrálních čar vhodná spíše pro hrubší odhad teploty, protože teplotu určujeme pouze ze dvou čar spektra a při omezené přesnosti spektrometru může dojít k velké chybě. Další významnou nejistotu tvoří také možná odchylka měřeného plazmatu od předpokládané lokální termodynamické rovnováhy.

Z hlediska přesnosti je proto lepší 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 opět předpokládá lokální termodynamickou rovnováhu. Tato metoda je stejně jako metoda porovnání dvou spektrálních čar univerzální tím, že není nutné znát koncentrace částic.

Metoda je založena na následující úměrnosti:

$$I_{m \rightarrow n} \sim \frac{A_{mn} g_m}{\lambda_{mn}} e^{-\frac{U_{em}}{kT}} \quad (26)$$

Pokud vyneseme závislost následujícího logaritmu na energii horní hladiny, ze které elektron sestupoval dle následující rovnice:

$$f(U_{em}) = \ln \left( \frac{I_{m \rightarrow n} \lambda_{mn}}{A_{mn} g_m} \right) \quad (27)$$

do grafu, dostaneme body, které by v ideálním případě měly tvořit přímku, v praxi je nutné body přímkou proložit. Obecný předpis takové přímky bude:

$$f(U_{em}) \cong a \ln \left( \frac{I_{m \rightarrow n} \lambda_{mn}}{A_{mn} g_m} \right) + b \quad (28)$$

směrnice  $a$  této tzv. „pyrometrické (Boltzmannovy) přímky“ je rovna  $-\frac{1}{kT}$ . Teplotu tedy získáme výpočtem ze vztahu:

$$T = -\frac{1}{k a} \quad (29)$$

Pro vylepšení přesnosti metody je stejně jako u metody porovnání intenzity dvou čar možné použít proložení všech použitých čar Gaussovou funkcí. [33][43]

## 6.1.4 Měřicí přístroje

Při experimentech byly použity následující měřicí přístroje. Vzorkování systému měření elektrických veličin bylo 50 kHz.

Měřená veličina a značení ve schématu	Přístroj (typ)	Identifikační číslo
$U, V_1$	napěťový dělič 1 kV	U.1k.2
$U, V_2$	napěťový dělič 1 kV	U.1k.1
$I, A$	LEM IT-700S	LEM_3+U.10.1
$p$	Kistler Charge Amplifier 5018	5193751
$\vartheta, p$ , relativní vlhkost	Meteo Comet T 7510	13963392
Sa-X2	1000K-M2	10132701006
2xSr500i + N940	2xSchamrock 500i + Newton 940	SR-2754 + SR-2755
ULS 3648	Avaspec ULS 3648 TEC	1510216U1

Tabulka 14 – Měřicí přístroje použité pro experimenty kapitoly 6.

## 6.1.5 Postup měření

Za účelem zjištění vlivu použitého materiálu zhášecí komory na parametry plazmatu spínacího oblouku byly provedeny testy zahrnující měření elektrických parametrů, podobně jako v kapitole 5, natáčení vysokorychlostního videa, měření přetlaku ve zhášecí komoře a snímání spekter záření oblouku. Experimenty probíhaly dle následujících kroků:

1. Bylo provedeno ověření předem získané kalibrace testovacího obvodu zkušebny, viz tabulka 4, naprázdno napětí 900 V a proudu 400 A s časovou konstantou 0,1 ms.
2. Experimentální přípravek byl sestaven v konfiguraci s materiálem izolační komory Poly 3.
3. Na svorky rozpojeného přístroje bylo přivedeno napětí, přístroj byl sepnut pomocí elektromagnetického pohonu, doba toku proudu byla nastavena na cca 120 ms, v tomto čase bylo odpojeno napájení budící cívky elektromagnetu, pomocí stlačené vypínací a kontaktní pružiny došlo k oddálení můstku do otevřené pozice, viz obrázek 6. Poté hořel v přístroji elektrický oblouk po dobu, která byla ovlivněna použitým materiálem. Časová osa je nastavena tak, že čas 0 ms značí počátek oddalování kontaktů.
4. Během měření byly měřeny okolní podmínky, elektrické parametry, ze kterých byly následně vyhodnoceny a vypočítány klíčové parametry vypínacího procesu (Joulův integrál  $I^2t$ , maximální hodnota proudu  $I_{max}$ , maximální hodnota obloukového napětí  $U_{amax}$ , oblouková energie  $W_a$ , a důležité časy:  $t_p$  – čas toku proudu před počátkem vypínacího procesu,  $t_a$  – doba hoření oblouku,  $t_t$  – celkový čas testu), byla snímána vysokorychlostní videa a spektra záření oblouku.
5. Bylo provedeno 5 opakování od bodu 3. až po bod 4.
6. Body 2. až 5. byly postupně opakovány pro další materiály v pořadí: Poly 1, Poly 2, Poly 5 a Poly 4.
7. Bylo provedeno vyhodnocení naměřených dat.

## 6.2 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 5, 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.

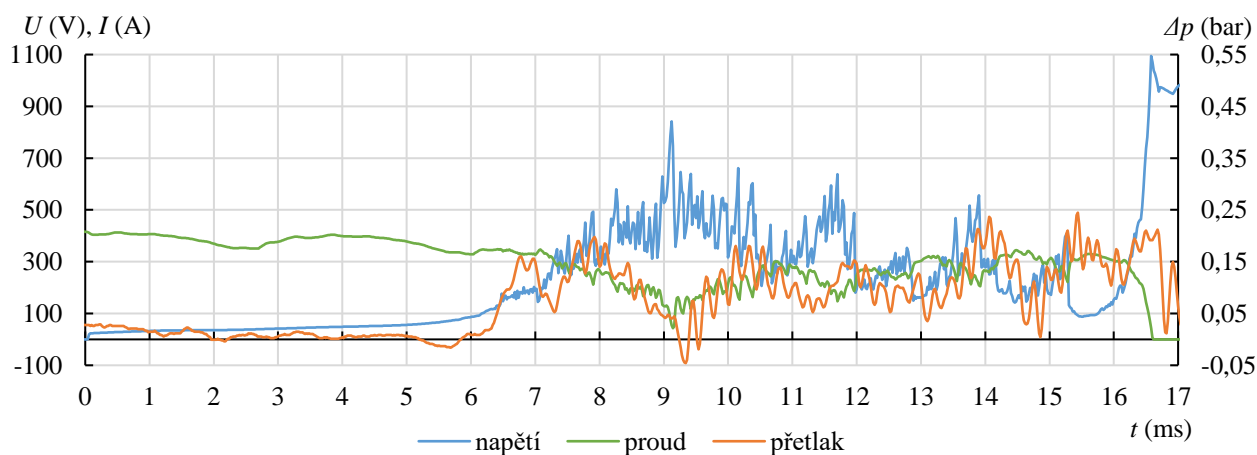
Tabulku naměřených a vypočítaných souhrnných parametrů testů obsahuje příloha 3.

Cílem vývojářů elektrických přístrojů stejnosměrného napětí z pohledu zhašení oblouku je hladký přechod oblouku z kontaktního prostoru do zhášecí komory. Ve zhášecí komoře dojde k narušení stability oblouku pomocí prodlužování a chlazení, vlivem čehož by měl obvykle uhasnout. Během experimentů bylo zaznamenáváno, mimo jiné, také napětí, proud a přetlak. Příloha 4 zahrnuje kompletní přehled všech průběhů přetlaku, napětí, proudu na experimentálním přípravku. Z těchto průběhů lze vyhodnotit průběh zhášecího cyklu, chování oblouku, opakované zápaly, atd.

Ze začátku vypínacího procesu dochází pouze ke snižování přítlačné síly kontaktu, čímž narůstá jeho přechodový odpor a s tím také úbytek napětí. K oddělení kontaktů a vzniku oblouku dochází až s určitým malým zpožděním. Dalším mezníkem je přesun oblouku z kontaktního prostoru, který lze pozorovat díky měření tlaku. Použitá zhášecí komora je otevřený tlakový systém, tedy naplněný vzduchem s atmosférickým tlakem a průduchy vně komory. Tlak uvnitř takovéto komory se mění vlivem ohřevu vzduchu a zplyňování blízkých pevných látek v objemu uvnitř komory a s určitou časovou odezvou dochází k jeho vyrovnávání s vnějším okolím komory. Vzhledem k tomu, že se jedná o ohřev, lze tedy říci, že změna tlaku bude závislá na okamžitém výkonu dodávaném oblouku. Průběhy přetlaku a okamžitého výkonu zobrazuje příloha 5, kde je patrné, že úvaha o závislosti přetlaku na výkonu je správná.

### 6.2.1 Vývoj přetlaku ve zhášecí komoře při použití materiálu Poly 3

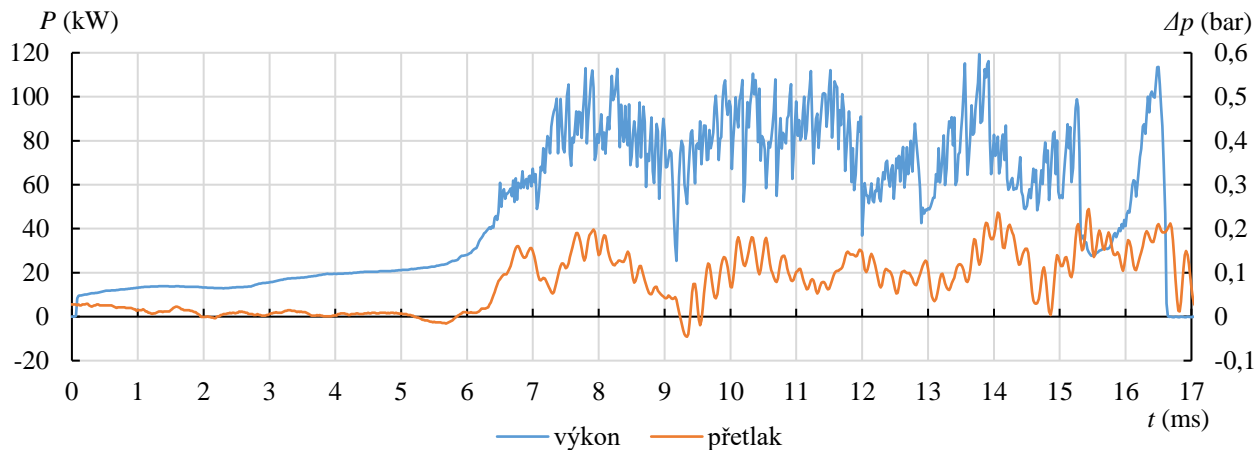
Při použití materiálu Poly 3 ke konstrukci experimentální zhášecí komory bylo v předchozí kapitole dosaženo nejlepších výsledků, co se týče úspěšnosti zhašení elektrického oblouku. Vybraný průběh napětí, proudu a přetlaku zobrazuje obrázek 66.



Obrázek 66 - Průběh napětí, proudu a přetlaku v experimentální zhášecí komoře vyrobené z materiálu Poly 3 během testu 6.1.

Z průběhu lze vyhodnotit chování oblouku během zhášecího procesu. Lze si povšimnout, že vždy při nárůstu napětí dochází k poklesu proudu, je to proto, že dochází k prodlužování oblouku, čímž se lépe chladí a snižuje se jeho vodivost. Začátek vypínacího procesu je zasazen do nulové polohy časové osy, zatímco výskyt oblouku mimo kontaktní prostor pozorujeme až v čase 4,84 ms. S určitým zpožděním roste přetlak na hodnotu 150 mbar. Růst napětí na oblouku lze z globálního pohledu pozorovat až do časového okamžiku 9,12 ms, kde můžeme vidět jak pokles proudu, tak i přetlaku. Nestabilita oblouku v tomto případě nebyla tak markantní a nedošlo k úspěšnému uhašení oblouku, lze pozorovat následný pozvolný pokles napětí a nárůst proudu i tlaku, kdy dochází k ohřevu média uvnitř zhášecí komory. Tento pochod je způsoben odrazem oblouku ze zhášecí komory směrem zpět ke kontaktům. Následný pozvolný nárůst napětí až do času 11,7 ms je způsoben opětovným vtažením oblouku do zhášecí komory vlivem interakce magnetického pole permanentních magnetů a proudu, jehož nárůstem po prvním neúspěšném uhašení došlo k posílení elektrodynamických účinků proudu na elektrický oblouk. Opět nedošlo k uhašení oblouku, ale můžeme pozorovat výrazný pokles napětí. Tento pokles je způsoben opětovným zapálením oblouku mezi kontakty přístroje. Tento jev se opakuje ještě v časech 12,8 ms, 13,9 ms a 15,3 ms. Po posledním opětovném zápalu mezi kontakty v čase 15,3 ms došlo k příkladovému přesunu oblouku do zhášecí komory a uvedení do dostatečné nestability. Tato nestabilita dostačuje k úspěšnému uhasnutí ve zhášecí komoře v čase 16,6 ms, kde můžeme pozorovat také spínací přepětí neboli tzv. “zhášecí špičku“.

Následuje obrázek 67, který obsahuje průběh přetlaku a okamžitého výkonu dodávaného do oblouku. Maximální výkon na oblouku dosahuje hodnoty 119 kW v čase 13,9 ms.



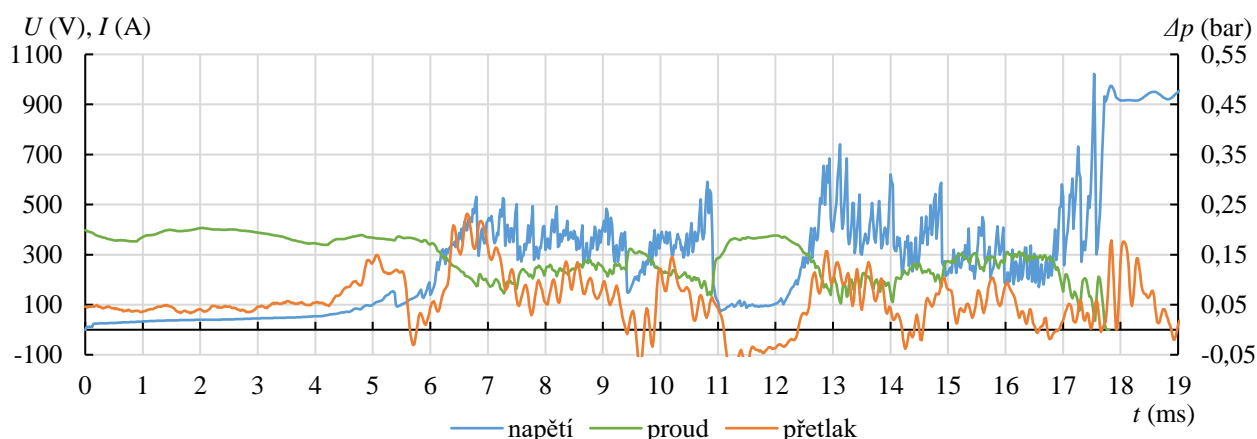
Obrázek 67 - Průběh výkonu a přetlaku v experimentální zhášecí komoře vyrobené z materiálu Poly 3 během testu 6.1.

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. Pokud laboratoř leží v nadmořské výšce 285 m n. m. dle [48] a rychlost šíření zvukového vlnění odpovídající této nadmořské výšce je  $339 \text{ ms}^{-1}$  dle [49], tak průměrná vzdálenost mezi obloukem a čidlem odpovídá zhruba 6,8 cm. Je nutno poznamenat, že výpočet by platil pro suchý vzduch o teplotě  $15 \text{ }^\circ\text{C}$ , ale v experimentálním

přípravku byl vzduch zahřátý na výrazně vyšší teplotu a také obsahoval příměsi odpařené z konstrukčních součástí uvnitř experimentální komory. I přes tato podstatná zanedbání, vypočítaný odhad po porovnání s geometrickými rozměry přístroje odpovídá s poměrně přijatelnou odchylkou cca 10 %. V průběhu lze také velmi dobře rozpoznat rozdíl mezi opětovným zápalom 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.

## 6.2.2 Vývoj přetlaku ve zhášecí komoře při použití materiálu Poly 1

Obrázek 68 zobrazuje vybraný průběh napětí na oblouku, proudu obloukem a přetlaku v experimentální zhášecí komoře vyrobené z materiálu s označením Poly 1. Tento materiál dosáhl při dosavadních testech velmi dobrých výsledků. S tímto materiálem bylo dosaženo úspěšného uhašení oblouku ve všech pokusech. V porovnání s materiálem Poly 3 však vypínací proces dosahoval vyšších vypínacích časů, což způsobovalo větší namáhání plastových materiálů. Tímto dochází k většímu odpařování a tím pádem i usazování karbonu na vnitřních součástech vývojového vzorku.

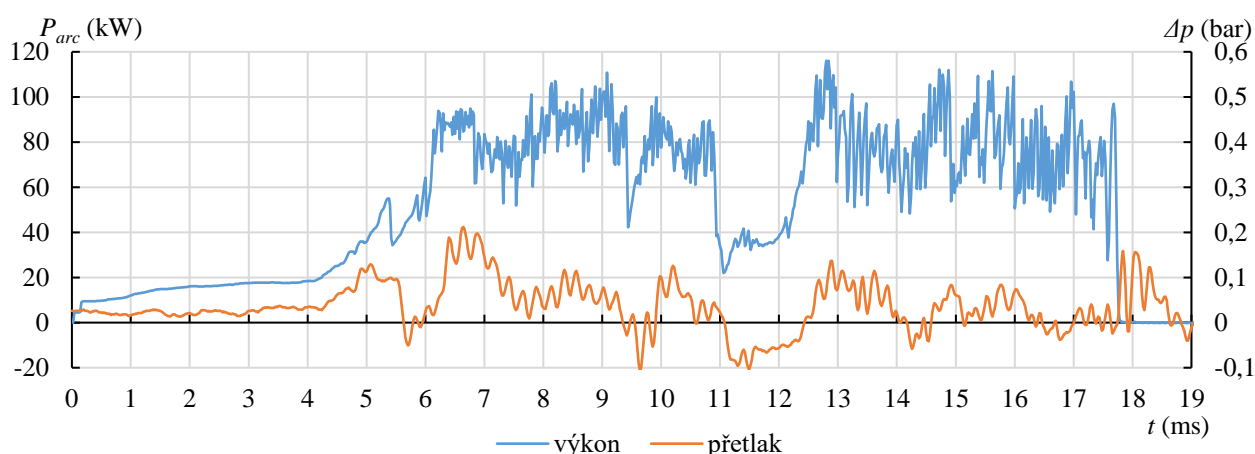


Obrázek 68 - Průběh napětí, proudu a přetlaku v experimentální zhášecí komoře vyrobené z materiálu Poly 1 během testu 6.10.

Počátek vypínání byl opět usazen do času  $t = 0$  ms. Po 4,2 ms od separace kontaktního páru lze pozorovat nárůst napětí, což signalizuje přemístování oblouku mimo kontaktní prostor. Ze začátku průběhu lze pozorovat strmý růst napětí na oblouku až do času 6,8 ms, kde lze pozorovat opakované mírné poklesy a nárůsty napětí. V tomto okamžiku proud poklesl na hodnotu kolem 200 A, tedy polovinu plné hodnoty. Závislost velikosti elektrodynamické síly na velikosti proudu je kvadratická, tedy elektrodynamické síly, které jsou důvodem pohybu oblouku, díky této změně poklesly na čtvrtinu původní hodnoty. Tento pokles zapříčinil navracení se oblouku z roštové izolační komory zpět do vnitřního prostoru přístroje. V čase 9,4 ms došlo ke znovu-zápalu oblouku mezi kontakty. Po dalším přesunu oblouku mezi rošty komory dochází v čase 10,9 ms k zápalu oblouku přes vodivou cestu vytvořenou úsadami na stěnách zhášecí komory. Oblouk zůstává 1,1 ms jako stabilní. Tento jev je pro vypínací proces nežádoucí, protože dochází ke značnému odpařování materiálu a zvyšování vodivosti plazmatu, bez jakékoli šance v tuto chvíli obnovit

pevnost izolačního média uvnitř přístroje. Díky redoxní reakci došlo pravděpodobně k poklesu množství karbonu uvnitř přístroje, který podporoval stabilní hoření oblouku a oblouk se opět přesouvá do zhášecí komory, kde od času 13 ms opět fluktuuje. V čase 14,9 ms dochází ke znovu-zápalu mezi kontakty. Následně se oblouk z kontaktního prostoru přesunul do zhášecí komory. Na konci naměřeného průběhu lze pozorovat několik opakovaných špiček, jedná se o průrazy izolačního média vlivem vypínacího přepětí. Tento proces trvá až do okamžiku, kdy dojde k dostatečné rekombinaci volných nosičů v prostoru vyplněného izolačním médiem. Zde v čase 17,7 ms.

Obrázek 69 zobrazuje průběh okamžitého výkonu oblouku a přetlaku ve zhášecí komoře. Maximální výkon na oblouku dosahuje hodnoty 116 kW v čase 12,8 ms.



Obrázek 69 - Průběh výkonu a přetlaku v experimentální zhášecí komoře vyrobené z materiálu Poly 1 během testu 6.10.

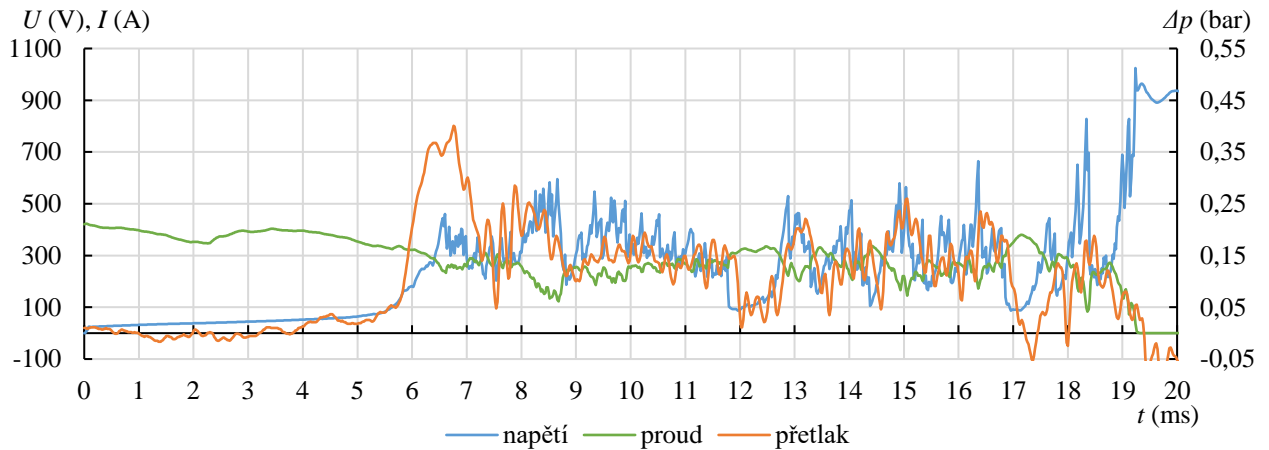
Zde je možné pozorovat opět zpoždění mezi průběhem výkonu a průběhem přetlaku okolo 0,2 ms. V intervalu od 5,7 ms do 6,6 ms dochází k nárůstu tlaku uvnitř komory a následně pokles až téměř k vyrovnání tlaku s okolím v čase 7,8 ms díky otevřenému systému zhášecí komory. V místě výskytu propojení vodivé cesty došlo k vytvoření podtlaku v přístroji vlivem prudkého ochlazení vzduchu uvnitř přístroje, podobně jak k tomu dochází při úspěšném uhašení oblouku na konci vypínacího procesu. Maximální přetlak dosahuje hodnoty 210 mbar v čase 6,7 ms.

### 6.2.3 Vývoj přetlaku ve zhášecí komoře při použití materiálu Poly 2

Obrázek 70 zobrazuje průběh napětí na oblouku, proudu obvodem a přetlaku ve zhášecí komoře vyrobené z materiálu Poly 2. Zhášecí komora vyrobená z materiálu Poly 2 při dosavadních testech již při tomto nastavení zátěže (400 A, 900 V) neprošla celou sérií bez selhání. Testy byly i opakovány se stejným výsledkem. V porovnání s předchozími materiály byly však vypínací časy delší, což lze pozorovat i zde. Je nutno zmínit skutečnost, že u všech těchto testů byl vždy použit nový kus vývojové zhášecí komory.

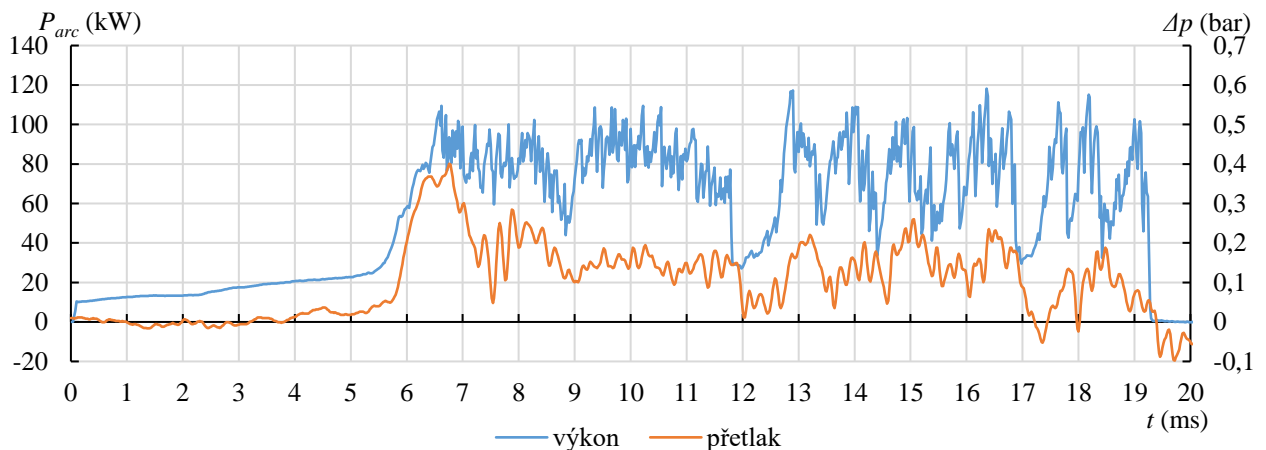
V průběhu můžeme pozorovat počátek vypínání, který byl opět synchronizován s počátkem časové osy. K přesunu oblouku mimo kontaktní prostor došlo po čase 4,9 ms, od kterého se oblouk postupně natahoval do izolační zhášecí komory, kam se dostal v čase 6,6 ms. Až do okamžiku

8,7 ms, kdy došlo k opětovnému zápalu oblouku mezi kontakty, oblouk hořel ve zhášecí komoře, nebo na jejím kraji. V intervalu od 9,0 ms po 11,8 ms lze pozorovat fluktuaci napětí způsobenou opět pohybem oblouku na rozhraní zhášecí komory a v komoře. V čase 11,8 ms došlo stejně jako u materiálu Poly 1 k propojení kontaktů přes vodivou povrchovou cestu. Až v čase 12,7 ms dochází k přesunu oblouku do roštové izolační komory a opět k neúspěšnému pokusu o uhašení. Následují znovu-zápaly v časech 13,2 ms, 14,0 ms, 15,0 ms a 16,4 ms. V čase 16,8 ms lze pozorovat propojení vodivé cesty, kdy po jejím vyhoření narůstá opět napětí oblouku. Další opětovné zápaly nastaly v čase 17,8 ms a 18,3 ms. Oblouk byl uhašen v čase 19,2 ms.



Obrázek 70 - Průběh napětí, proudu a přetlaku v experimentální zhášecí komoře vyrobené z materiálu Poly 2 během testu 6.12.

Obrázek 71 obsahuje průběh okamžitého výkonu oblouku a přetlaku uvnitř zhášecí komory. Maximální výkon na oblouku nastal v čase 12,9 ms, a sice 117 kW.



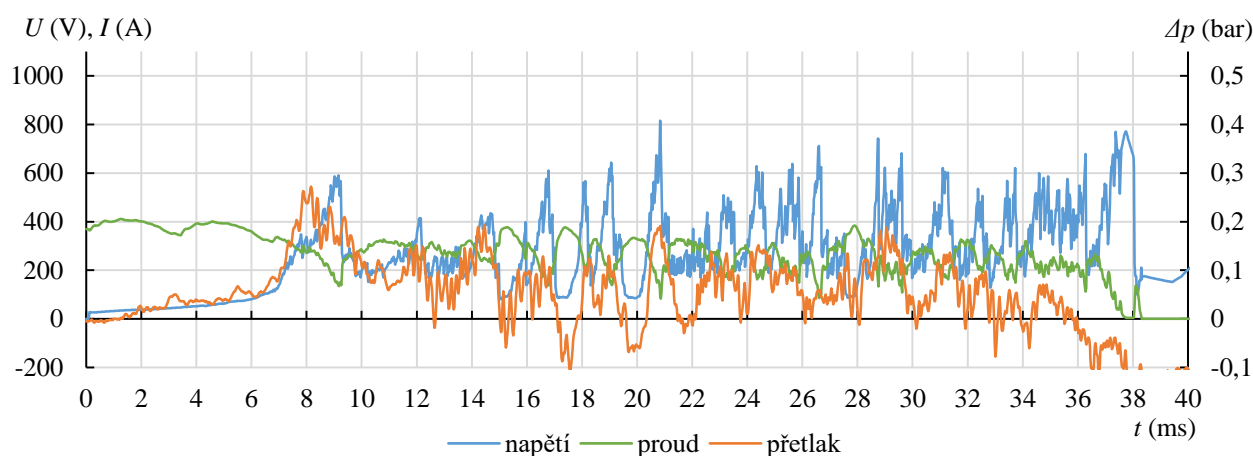
Obrázek 71 - Průběh výkonu a přetlaku v experimentální zhášecí komoře vyrobené z materiálu Poly 2 během testu 6.12.

Při počátečním výskytu oblouku došlo k rychlému nárůstu přetlaku na hodnotu 400 mbar. Nárůst přetlaku uvnitř zhášecí komory může napomoci odfouknutí plazmatu obsahujícího volné nosiče náboje pryč z přístroje, nebo popřípadě změnit poměry tak, že dojde ke snížení počtu nepružných srážek v plazmatu. V tomto případě došlo však pravděpodobně k odpaření většího množství materiálu zhášecí komory, což způsobilo nárůst tlaku, ale také zvýšení vodivosti

plazmatu a nárůst výkonu na oblouku. 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.

## 6.2.4 Vývoj přetlaku ve zhášecí komoře při použití materiálu Poly 5

Materiál Poly 5 byl úspěšný při experimentech v kapitole 5 pouze pro nižší výkonová nastavení, proto zde není překvapením, že opět nedošlo k úspěšnému uhašení oblouku ve stanoveném časovém rozsahu a proud obvodem musel být přerušen systémem zkušebny. Nicméně pomocí dalších experimentálních metod lze lépe pochopit proč tomu tak bylo.

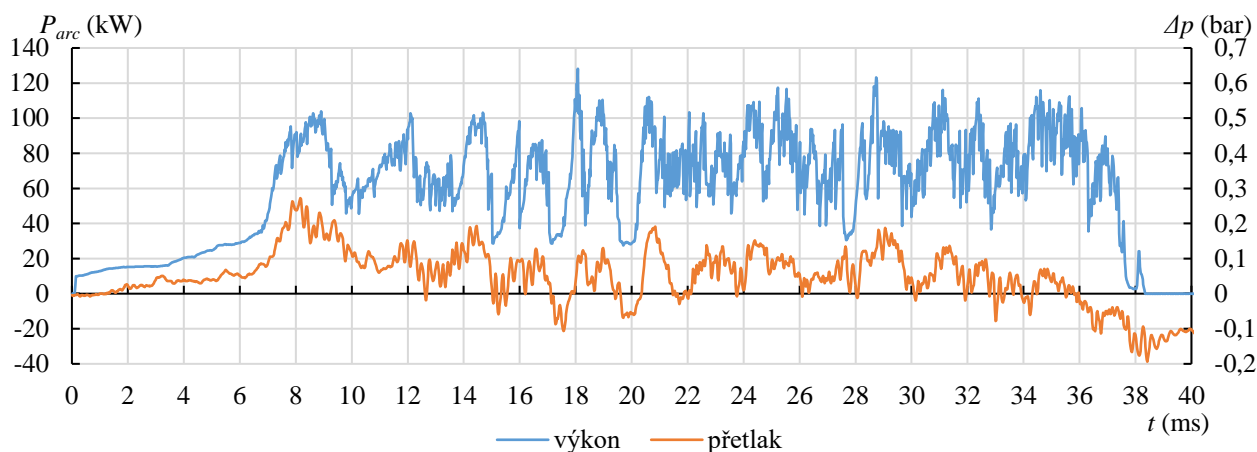


Obrázek 72 - Průběh napětí, proudu a přetlaku v experimentální zhášecí komoře vyrobené z materiálu Poly 5 během testu 6.18.

Počátek vypínacího děje je zasazen do 0 ms na časové ose. Oblouk mimo kontakty se vyskytuje od okamžiku 4,5 ms. V průběhu napětí a proudu lze pozorovat na začátku téměř ukázkový zhášecí děj. Napětí poměrně plynule narůstá a proud pozvolna klesá. Takto napětí roste až na hodnotu 590 V a proud klesá na 140 A. Poté v čase 9,3 ms dochází k opětovnému zápalu a výskytu oblouku mezi kontakty. Z toho lze usuzovat, že pokud by bylo aplikováno nižší napětí, například 500 V, bylo by dosti pravděpodobné, že by došlo k uhašení oblouku v komoře z tohoto materiálu. Po tomto znovu-zápalu opět přechází oblouk do komory a v čase 12,1 ms dochází k dalšímu znovu-zápalu, tentokrát při nižším napětí, což značí vyšší kontaminaci izolačního média volnými nosiči náboje. Další opakované zápaly mezi kontakty nastávají v čase 14,7 ms, 15,7 ms a 18,1 ms. V čase 16,7 ms a 19,1 ms lze pozorovat opět průchod proudu po parazitní vodivé cestě. Po opětovném přesunu oblouku do zhášecí komory dochází k dalšímu znovu-zápalu v čase 20,8 ms, kde se zároveň vyskytuje nejvyšší hodnota napětí v celém rozsahu 816 V. Opakované zápaly oblouku se poté opakují, až v čase 26,6 ms lze vidět prohoření parazitní vodivé cesty. Poté lze až do konce průběhu

pozorovat změny napětí způsobené pohybem oblouku do a z komory. Oblouk byl uhašen vlivem přerušení proudu obvodem pomocí systému laboratoře.

Obrázek 73 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 73 - Průběh výkonu a přetlaku v experimentální zhášecí komoře vyrobené z materiálu Poly 5 během testu 6.18.

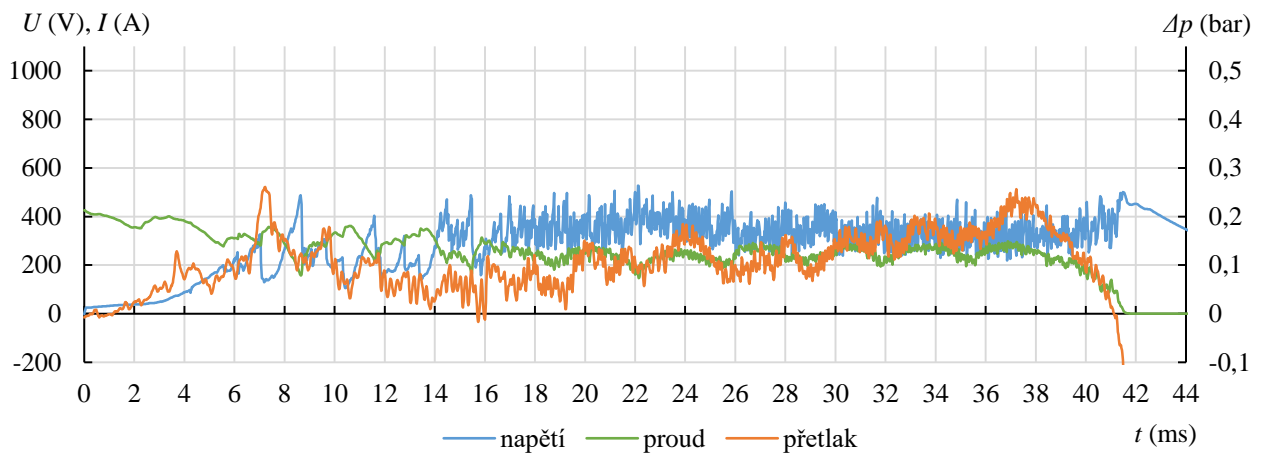
Zpoždění průběhu tlaku za okamžitým výkonem je opět cca 0,2 ms. Po počátečním výskytu oblouku došlo k nárůstu přetlaku na hodnotu maxima v celém průběhu. Z tohoto maxima docházelo k pozvolnému poklesu a vyrovnávání tlaku s okolím až do času 11 ms, kdy začal tlak opět růst. Po znovu-zápalu v čase 12,1 ms lze pozorovat mírný pokles tlaku z důvodu poklesu efektu zplyňování plasty. Během průchodu proudu parazitní vodivou cestou lze pozorovat výskyt podtlaku vlivem nárazového ochlazení média uvnitř přístroje. Maximální přetlak dosahuje hodnoty 270 mbar v čase 8,2 ms.

### 6.2.5 Vývoj přetlaku ve zhášecí komoře při použití materiálu Poly 4

Materiál Poly 4 je zařazen při těchto experimentech jako poslední, protože při předchozích experimentech vykazoval nejméně vhodné vlastnosti pro použití v kontaktu s elektrickým obloukem. Materiál velmi ubývá na svojí hmotnosti, což indikuje velké množství emitovaných částic do výbojového prostoru. Také u tohoto materiálu byl experimentální přípravek nevíce zanesen karbonem, což není vhodné z důvodu jednak navyšování přechodového odporu kontaktů vlivem cizí vrstvy a také z důvodu omezení izolační pevnosti povrchových cest.

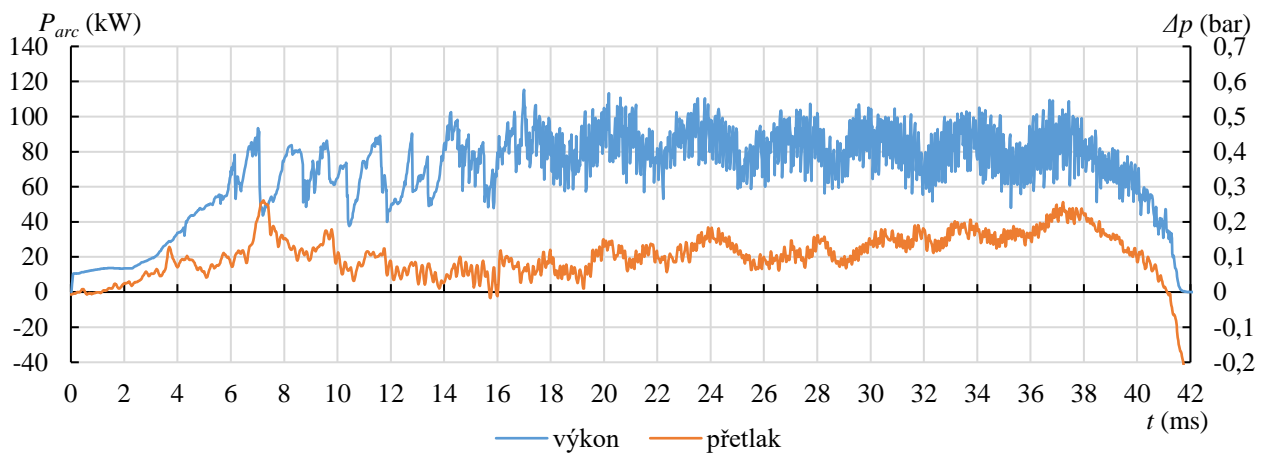
Obrázek 74 zobrazuje průběhy napětí na oblouku, proudu obvodem a přetlaku ve zhášecí komoře. Oblouk se v tomto případě vytáhl z kontaktního prostoru již v čase 2,6 ms. Lze si na první pohled povšimnout, že napětí na oblouku dosahuje velmi nízkých hodnot. Maximum je 528 V v čase 22,1 ms. Celý průběh lze rozdělit do dvou částí dělených časovým okamžikem 17,0 ms. V první části lze nazvat hoření oblouku za nestabilní, v druhé části však dochází k hoření stabilnímu, kdy se napětí na oblouku téměř nemění a proud pozvolna roste. Počátek průběhu napětí je pozvolna rostoucí až do okamžiku 7,5 ms, kde dochází ke znovu-zápalu oblouku mezi kontakty.

Až do času 8,6 ms se oblouk přesouvá z kontaktního prostoru do roštů izolační komory, ale není uhašen a dochází k dalšímu opětovnému zapálení oblouku. Další znovu-zápaly nastaly v časech 9,6 ms, 10,3 ms, 11,5 ms, 13,0 ms a 13,3 ms. Oblouk byl uhašen vlivem přerušení proudu obvodem pomocí systému laboratoře v čase 41,8 ms.



Obrázek 74 - Průběh napětí, proudu a přetlaku v experimentální zhášecí komoře vyrobené z materiálu Poly 4 během testu 6.22.

Obrázek 75 obsahuje průběh okamžitého výkonu a přetlaku v experimentální zhášecí komoře. Maximální výkon na oblouku byl dosažen 112 kW v čase 17 ms.



Obrázek 75 - Průběh výkonu a přetlaku v experimentální zhášecí komoře vyrobené z materiálu Poly 4 během testu 6.22.

I 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 85. 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.

## 6.3 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.

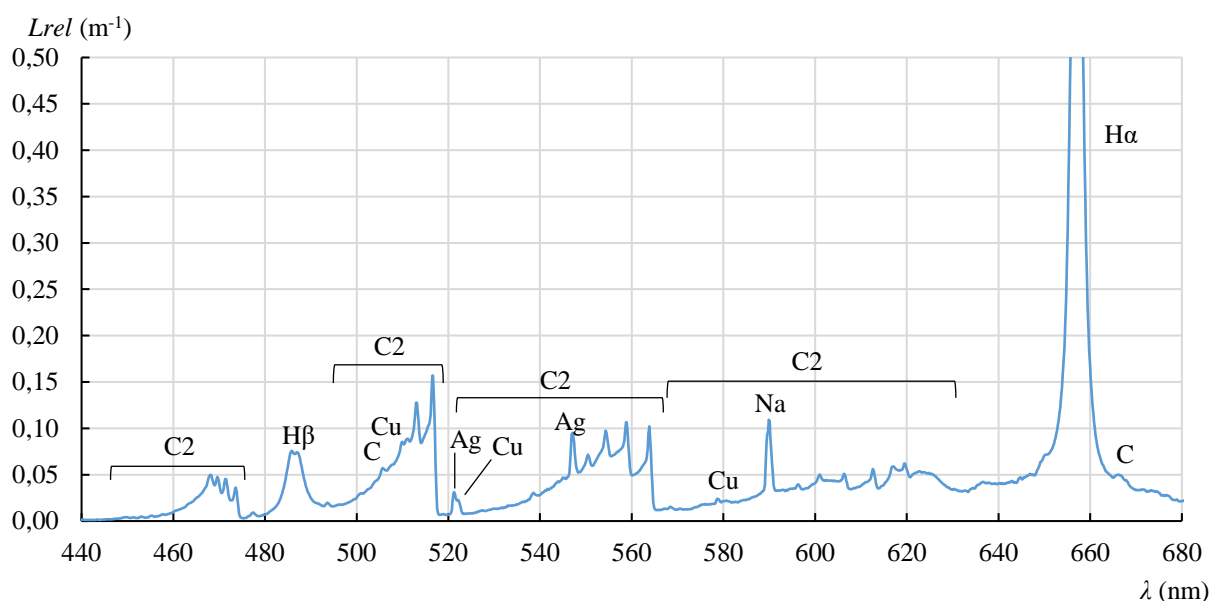
V této části je identifikováno složení plazmatu a vývoj relativní koncentrace vybraných prvků v čase při použití jednotlivých materiálů. Jako experimentální metoda byla použita optická emisní spektroskopie (OES), která již byla rozebrána, viz kapitola 6.1.3. Z vývoje složení lze zjistit, v jakém okamžiku, 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. Funkce rozdělení uhlíku C2 (partition function) byla převzata z [51]. Pro stříbro byla použita spektrální čára na vlnové délce 546,6 nm a data z databáze NIST [34]. Výpočty byly provedeny za předpokladu LTE.

### 6.3.1 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 příloha 3.

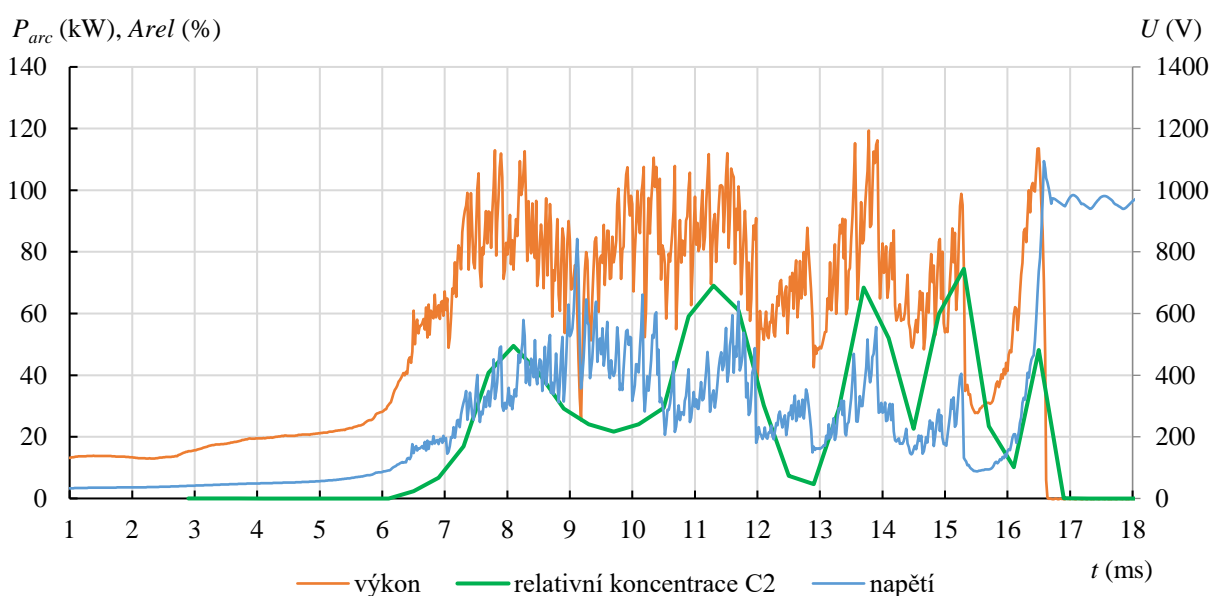


Obrázek 76 – Spektrum záření plazmatu sledovaného oblouku při použití materiálu Poly 3.

Ve spektru lze pozorovat výskyt kovů, konkrétně 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, tedy z částí, po kterých se pohybují paty oblouku při pohybu do zhášecích komor.

Dále spektrum obsahuje vodík 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 série<sup>8</sup>. Vodíková čára H alfa odpovídá přesunu elektronů z energetické hladiny 3 na hladinu 2 a vodíková čára H beta je vyzářena atomy, ve kterých dochází k přesunu elektronů z energetické hladiny 4 na 2.

Dalším prvkem obsaženým ve spektru záření je uhlík, který stejně jako vodík pochází ze zkoumaných plastů. Atomární uhlík je obsažen spíše minoritně, avšak molekulární právě naopak. Lze pozorovat molekulární pásy uhlíku patřící do Swanova systému.



Obrázek 77 – 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 77 zobrazuje právě průběh relativní koncentrace 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 zhášecí 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,

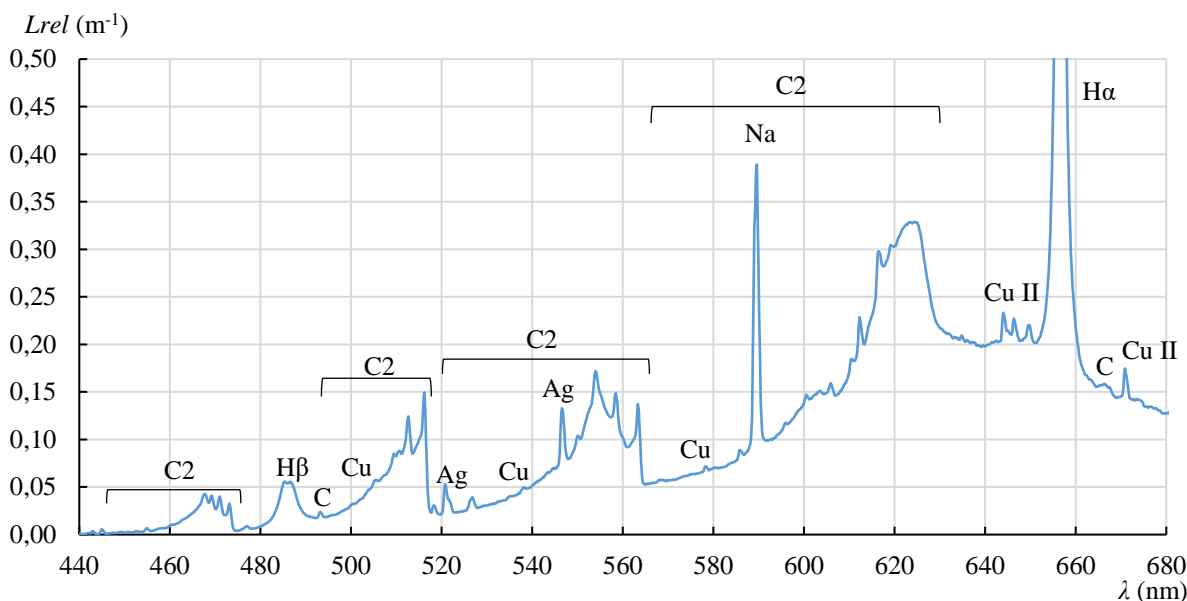
<sup>8</sup> Série spektrálních čar vyzářených atomy vodíku, kdy dochází k přeskočení elektronu z různých vyšších energetických hladin vždy na 2. energetickou hladinu (značení H alfa, H beta, H gama, atd.).

kde výrazně narostlo napětí a poklesl výkon. K tomuto nedošlo, pravděpodobně z důvodu zvýšené vodivosti média uvnitř experimentálního přípravku.

Získaný průběh podává důležité informace o chování oblouku z hlediska interakce s blízkými materiály. Z počátku průběhu mírně roste koncentrace uhlíku, ta však není dostatečná k opakovanému zápalu mezi kontakty. Oblouk se chladí do kapacit zhášecí 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 zhášecí 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 zhášecí komory a výkon oblouku netrval dostatečný čas k odpaření uhlíku, potřebného k opětovnému zápalu mezi kontakty. Oblouk uhasíná.

### 6.3.2 Zkoumání složení plazmatu při použití materiálu Poly 1

Pro identifikaci relativního složení plazmatu při použití tohoto materiálu bylo vybráno spektrum záření z testu 9, viz příloha 3.

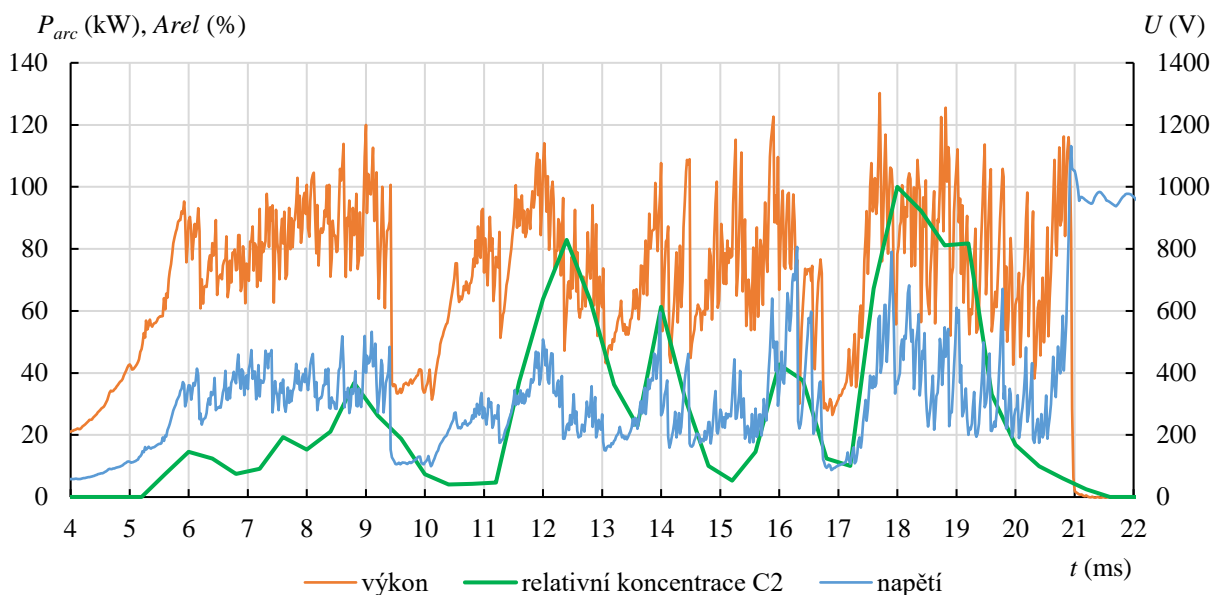


Obrázek 78 - Spektrum záření plazmatu sledovaného oblouku při použití materiálu Poly 1.

Ve spektru záření se opět vyskytují kovy: sodík, měď a stříbro. Nyní lze pozorovat také iont mědi, což vypovídá o vyšší energii. Stejně jako v předchozím spektru je obsaženo relativně málo stříbra, což vypovídá o krátké době působení oblouku na kontakty, což je pozitivní.

Uhlík a vodík pocházející z plastů v kontaktu s obloukem se zde také vyskytuje.

Ke konci spektra lze pozorovat jistý vertikální off-set spektrálních čar oproti spektru materiálu Poly 3. Tento jev je způsoben superpozicí spektrálních čar a molekulových pásů a spojitého záření. Znamená to, že součásti uvnitř přístroje jsou již více zahřáté, než v případě testu 1 a tedy více vyzařují.



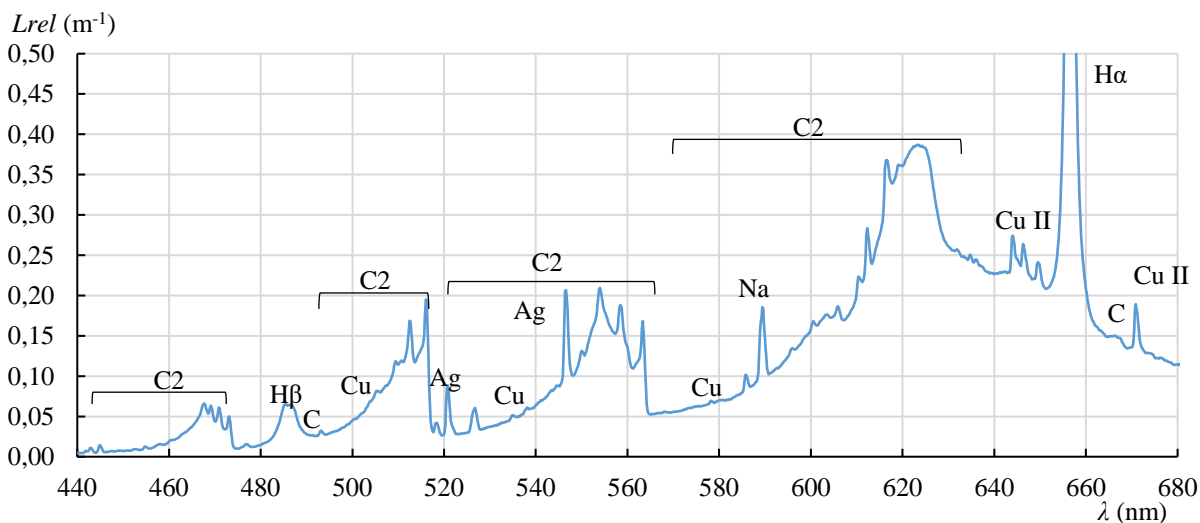
Obrázek 79 – Časový vývoj relativní koncentrace uhlíku při použití materiálu Poly 1.

Z vývoje koncentrace uhlíku při použití materiálu Poly 1 je patrné velmi podobné chování materiálu Poly 3.

Stejně jako u materiálu Poly 3 i zde můžeme pozorovat téměř úspěšný pokus o dřívější uhašení s vystoupaním napětí na oblouku až k hranici 800 V, a to v čase 16,3 ms. Nicméně zde opět hraje roli významná koncentrace uhlíku, která zapříčinila opětovný zápal v kontaktním prostoru (tedy přesun oblouku ze zhašecí komory mezi kontakty přístroje). Zde pravděpodobně došlo k uhasnutí vlivem vyhoření uhlíku, kdy jeho koncentrace od času 19 ms klesá až do uhasnutí samotného oblouku.

### 6.3.3 Zkoumání složení plazmatu při použití materiálu Poly 2

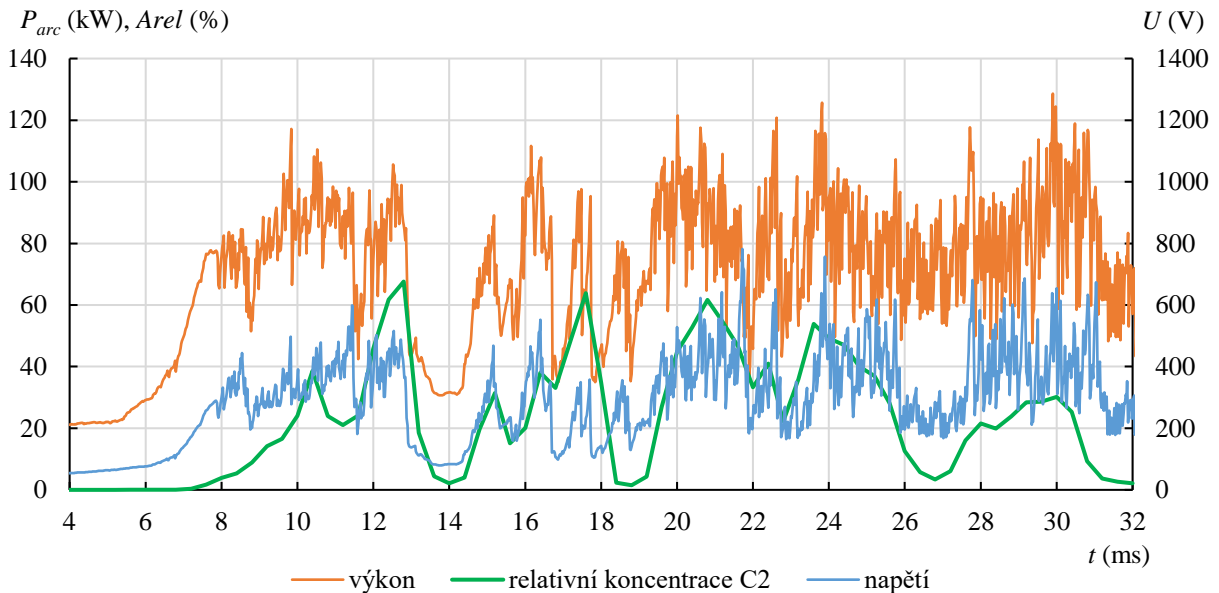
Pro účel identifikace relativního složení plazmatu při použití tohoto materiálu bylo zvoleno spektrum pořízené při experimentu 15, viz příloha 3.



Obrázek 80 - Spektrum záření plazmatu sledovaného oblouku při použití materiálu Poly 2.

V získaném spektru záření jsou obsaženy kovy z proudovodné dráhy: sodík, měď, stříbro. Spektrum obsahuje čáry vyzářené ionty mědi, zde jsou ještě o něco výraznější, než v případě materiálu Poly 1, tedy relativní koncentrace iontů mědi v plazmatu je vyšší.

Relativní poměr koncentrace uhlíku ke koncentraci vodíku, na který jsou spektra kalibrována, je o něco vyšší než v případě předchozích materiálů. To odpovídá i vyšší karbonizaci při vizuální kontrole experimentálního přípravku.



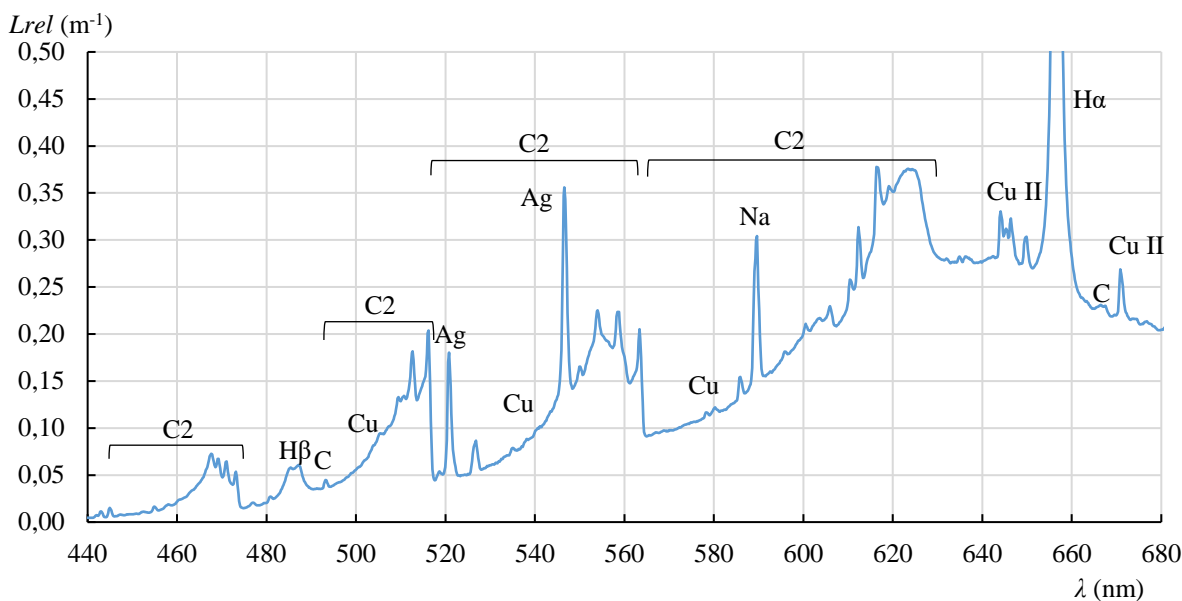
Obrázek 81 – Časový vývoj koncentrace uhlíku při použití materiálu Poly 2.

Obrázek 81 zobrazuje průběh relativní koncentrace uhlíku, výkonu a napětí při použití materiálu Poly 2. Pokus, který je zaznamenán v grafech nebyl úspěšný, což je patrné z absence zotaveného i obnoveného napětí.

Obloukové napětí v tomto případě nedosahuje příliš vysokých hodnot a je při vyšších časech poměrně stabilní v porovnání s předchozími materiály. Oblouk se přesouvá mezi komorou a kontaktním prostorem v téměř pravidelných intervalech, což naznačuje nevhodnost použití tohoto materiálu z hlediska přílišné produkce uhlíku, a tedy i vyšší opotřebení komory. Na druhé straně lze konstatovat, že tento materiál by spolehlivě fungoval na nižší napěťové hladině, bylo by tedy možné jej, hlavně díky jeho výhodnější ceně oproti Poly 3 použít v kombinaci se současnou proudovodnou dráhou na nižší napětí.

### 6.3.4 Zkoumání složení plazmatu při použití materiálu Poly 5

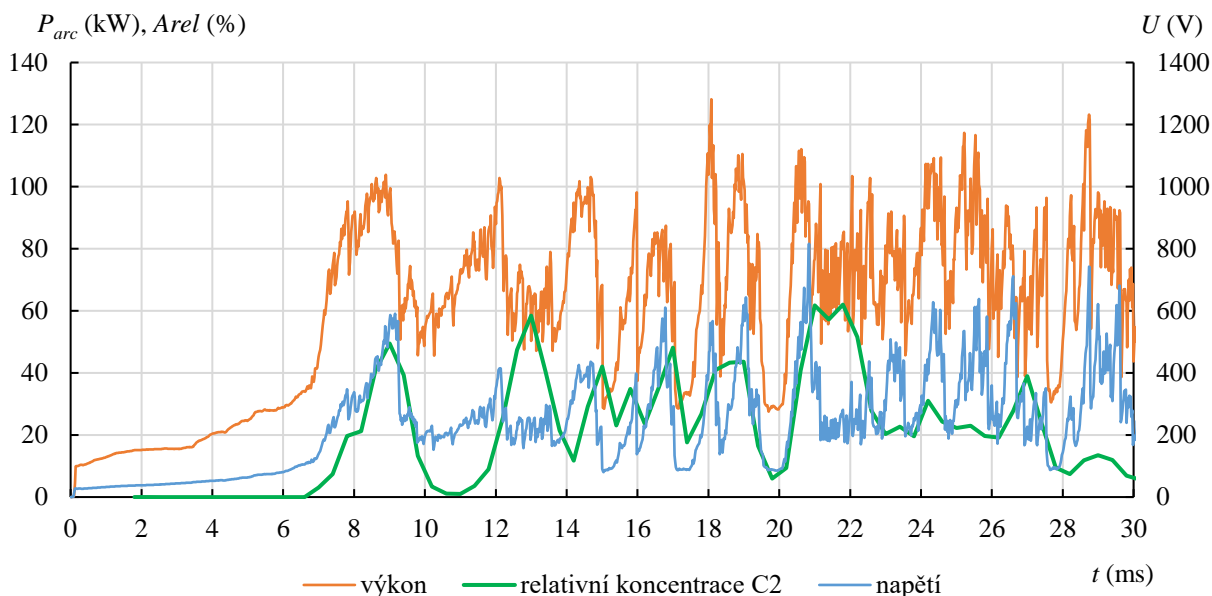
Pro identifikaci relativního složení plazmatu při použití tohoto materiálu bylo vybráno spektrum záření z testu 18, viz příloha 3.



Obrázek 82 – Spektrum záření plazmatu při použití materiálu Poly 5.

Ve spektru pořízeném při použití materiálu Poly 5 je obsažena měď, její iont, který je přítomen ještě ve větší míře než u předchozího materiálu. Podstatně více výrazný je zde obsah stříbra z kontaktů. Tato koncentrace stříbra naznačuje častější hoření oblouku mezi kontakty přístroje a jejich erozi, tedy četné opakované zápaly v kontaktním prostoru, což je velmi nežádoucí efekt. Při vysokém poškození kontaktů může tento jev vést až k přehřátí přístroje, protože s úbytkem materiálu kontaktů, se zvyšuje propad kontaktního můstku a klesá přítlačná síla.

Relativní poměr obsahu uhlíku ku obsahu vodíku je podobný jako v případě materiálu Poly 2.



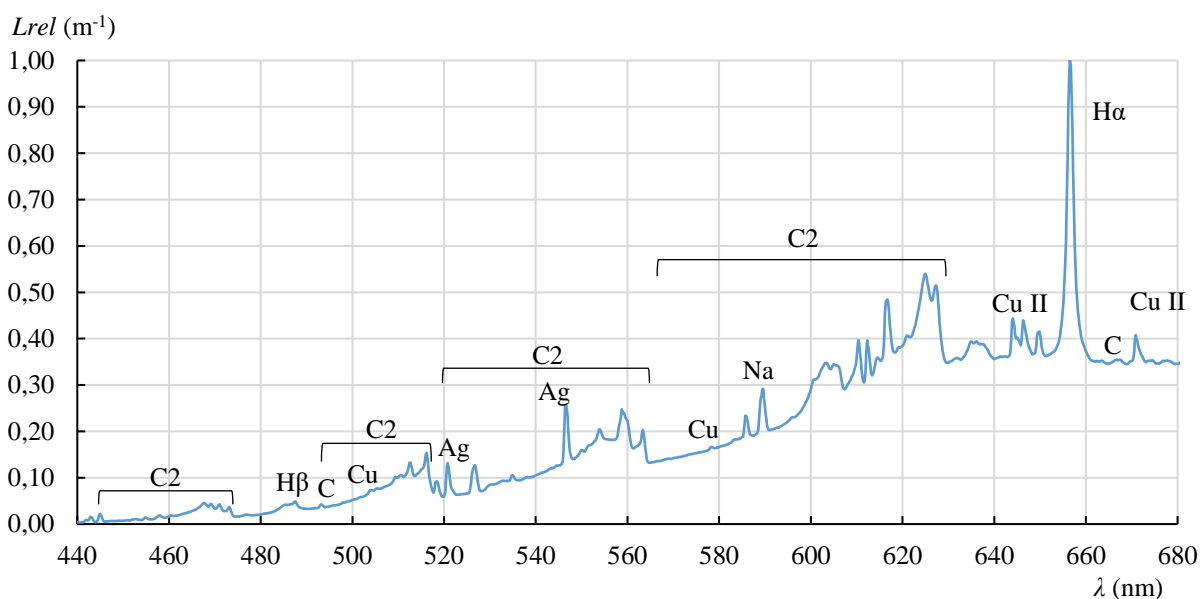
Obrázek 83 – Vývoj koncentrace uhlíku při zkoumání materiálu Poly 5.

Obrázek 83 obsahuje průběhy napětí, výkonu a relativní koncentrace uhlíku při experimentu s komorou z materiálu Poly 5.

Z počátku se materiál chová velmi dobře. Dokonce v čase 20,8 ms dosahuje napětí na oblouku hodnoty přes 800 V. Nicméně od okamžiku v čas 23 ms lze už pozorovat pouze menší relativní koncentrace uhlíku s menšími výkyvy, což naznačuje hoření oblouku buď pouze na okraji zhášecí komory, nebo její značné opotřebení dané právě typem použitého materiálu.

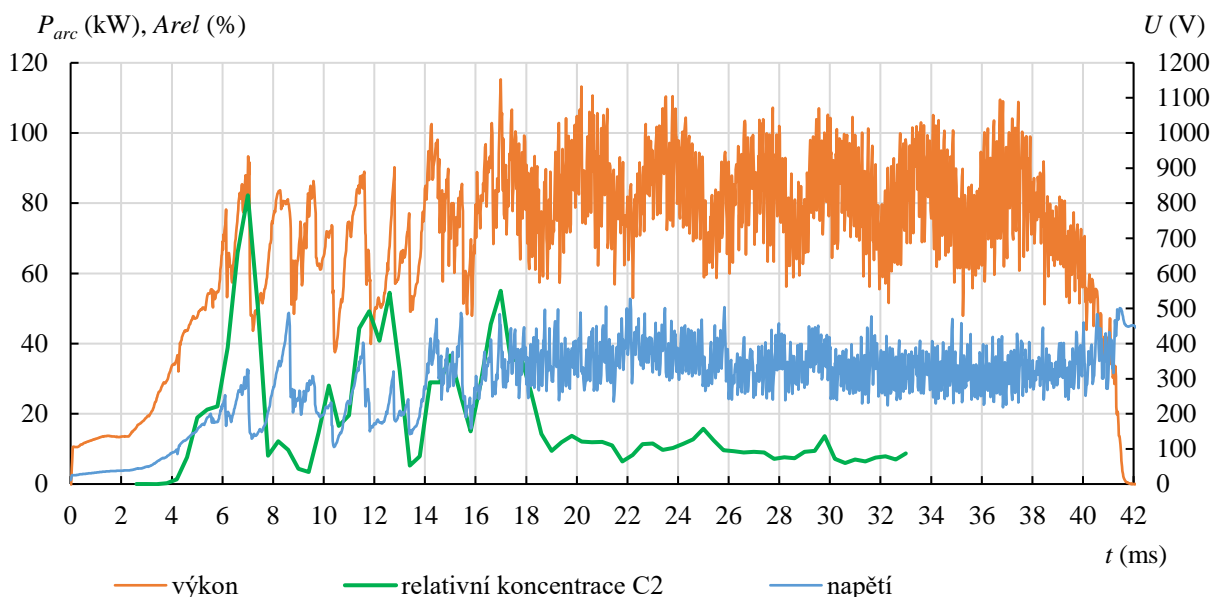
### 6.3.5 Zkoumání složení plazmatu při použití materiálu Poly 4

Pro účel identifikace relativního složení plazmatu při použití tohoto materiálu bylo zvoleno spektrum pořízené při experimentu 22, viz příloha 3.



Obrázek 84 – 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 zhášecí komoře, nebo její části, což je nejméně příznivé ze všech materiálů. Pokud totiž dojde ke stabilnímu hoření oblouku ve zhášecí komoře, je šance na jeho uhašení mizivá. V případě opakovaných zápalů mezi kontakty, jak tomu bylo u předchozích materiálů je totiž šance, že v mezích, kdy je oblouk mimo zhášecí komoru, může dojít k jejímu ochlazení a při návratu oblouku je zde reálná možnost jeho uhasnutí.



Obrázek 85 – Průběh relativní koncentrace uhlíku při použití materiálu Poly 4.

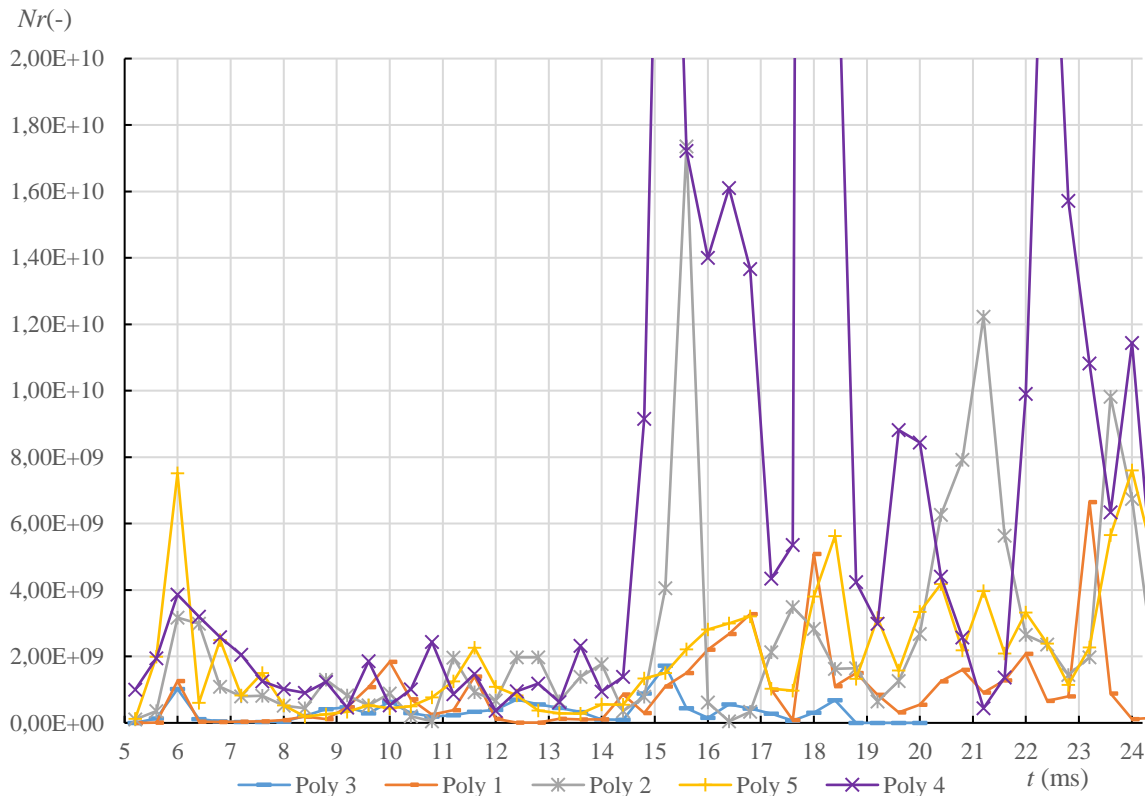
Při použití materiálu Poly 4 nebylo v této sérii dosaženo žádného úspěšného uhašení oblouku. Obrázek 85 zobrazuje průběhy napětí výkonu a relativní koncentrace uhlíku.

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 zhášecí 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 ne 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.

### 6.3.6 Příklad časového vývoje relativní kontaminace výbojového prostoru materiálem kontaktů experimentálního přípravku

Jak již bylo několikrát zmiňováno, během spínacího procesu dochází vlivem hoření oblouku k odpařování blízkých materiálů. Velmi podstatné je především množství odpařeného materiálu z kontaktů do výbojového prostoru. Jednak pro to, že kontaktní materiály disponují poměrně značnou vodivostí a zvyšují tak vodivost plazmatu. Také z důvodu možné následné depozice na izolantech. Neméně důležitým problémem je také ztráta materiálu z kontaktů, čímž dochází k poškození jejich povrchu a snadnější oxidaci, případně k propadům. Propadem se rozumí změna pozice pohyblivého kontaktu v sepnutém stavu vzhledem ke kontaktu pevnému. Tímto dochází k poklesu přítláčné síly tvořené kontaktní pružinou a v extrémním případě může dojít i k takové ztrátě materiálu, že vůbec nemusí nastat vodivé elektrické propojení proudovodné dráhy přístroje.

Následující průběhy zobrazují relativní koncentraci stříbra ve výbojovém prostoru přípravku během vybraných vypínacích pochodů. Časová osa je záměrně posunuta.



Obrázek 86 – Vývoj relativní kontaminace výbojového prostoru nosným materiálem kontaktů (Ag).

Při zaměření se na samotný vývoj relativní koncentrace kontaktního materiálu v plazmatu, je z něj velmi dobře čitelné, jakým způsobem se oblouk chová při použití jednotlivých vyšetřovaných plastů, viz obrázek 86. Vždy při působení oblouku na kontaktní materiál dochází k nárůstu koncentrace stříbra v plazmatu.

U materiálů Poly 3 a Poly 1 lze pozorovat velmi podobné relativně pozitivní chování. Koncentrace stříbra je v porovnání s ostatními vzorky na velmi nízké úrovni (v celkovém úhrnu rozdíl mezi Poly 3 případně Poly 1 a materiálem Poly 4 tvoří více než 90 %). I přes ověřenou velikost magnetického pole uvnitř přípravku je patrné, že dochází ke značnému působení oblouku na kontaktní materiál, což evokuje nedostatečné okolnosti k udržení oblouku ve zhasací komoře. Paradoxně však někdy tento jev stále vracejícího se oblouku působí na zhasení pozitivně. Důvodem je omezení doby hoření oblouku na jednom místě a tím snížení opotřebení materiálů. Samozřejmě ideálním případem by byl pouze jeden cyklus od kontaktů do zhasací komory. Optimalizace geometrie a magnetického pole však není předmětem této práce ani cílem zadání.

Klíčovou informací z tohoto vyhodnocení je, že v dané konstrukci a parametrech při působení oblouku déle než cca 15 ms dochází pravděpodobně k narušení struktury a fázovému přechodu stříbra v kompozitu kontaktů do taveniny, která vytéká ze struktury kompozitního kontaktu a tím tvoří v jeho struktuře nežádoucí nehomogenity. Tento jev byl naším týmem pozorován i u

výkonových jističů s kompozitními kontakty stříbro-wolfram-karbid. Po vytavení stříbra dochází ke ztrátě mechanické pevnosti kontaktu a jeho rozpadání vlivem mechanického přtlaku kontaktních pružin a cyklování mechanismu. Prohlubují se tím dále propady kontaktů a razantně se zhoršuje vodivost kontaktního páru.

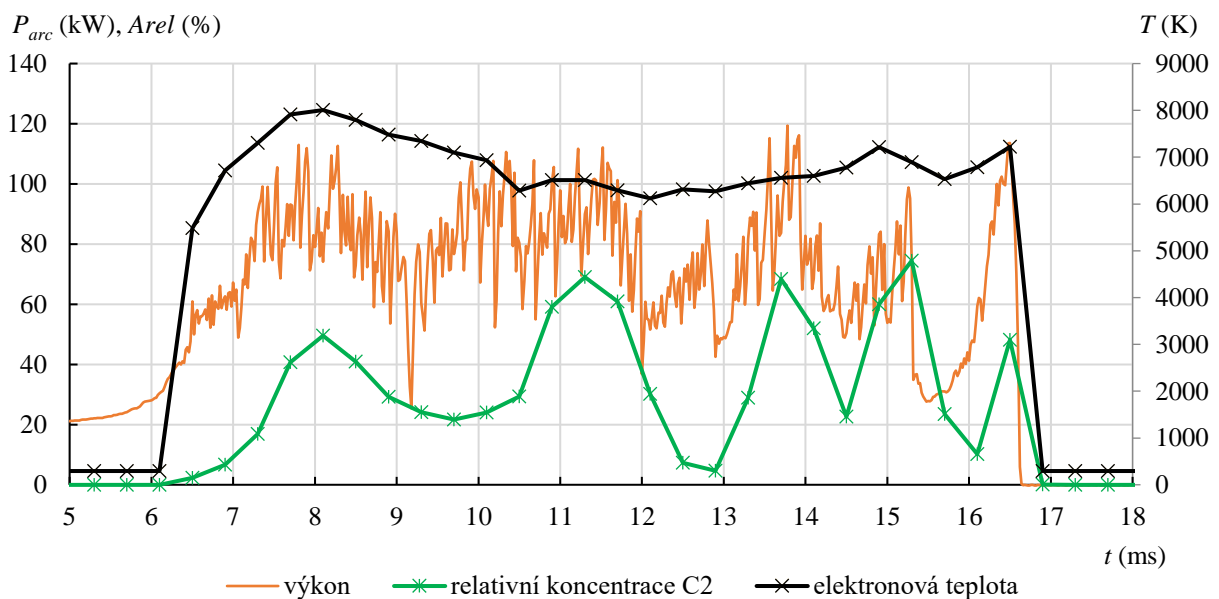
## 6.4 Výpočet teploty ze spekter záření oblouku

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.

Jedním z klíčových parametrů oblouku z hlediska interakce s okolními materiály je jeho teplota. 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 časový úsek, 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.

### 6.4.1 Průběh elektronové teploty plazmatu při použití materiálu Poly 3

Obrázek 87 zobrazuje vývoj teploty, výkonu a relativní koncentrace uhlíku v čase při použití materiálu Poly 3. Výpočet byl proveden z testu s pořadovým číslem 1.

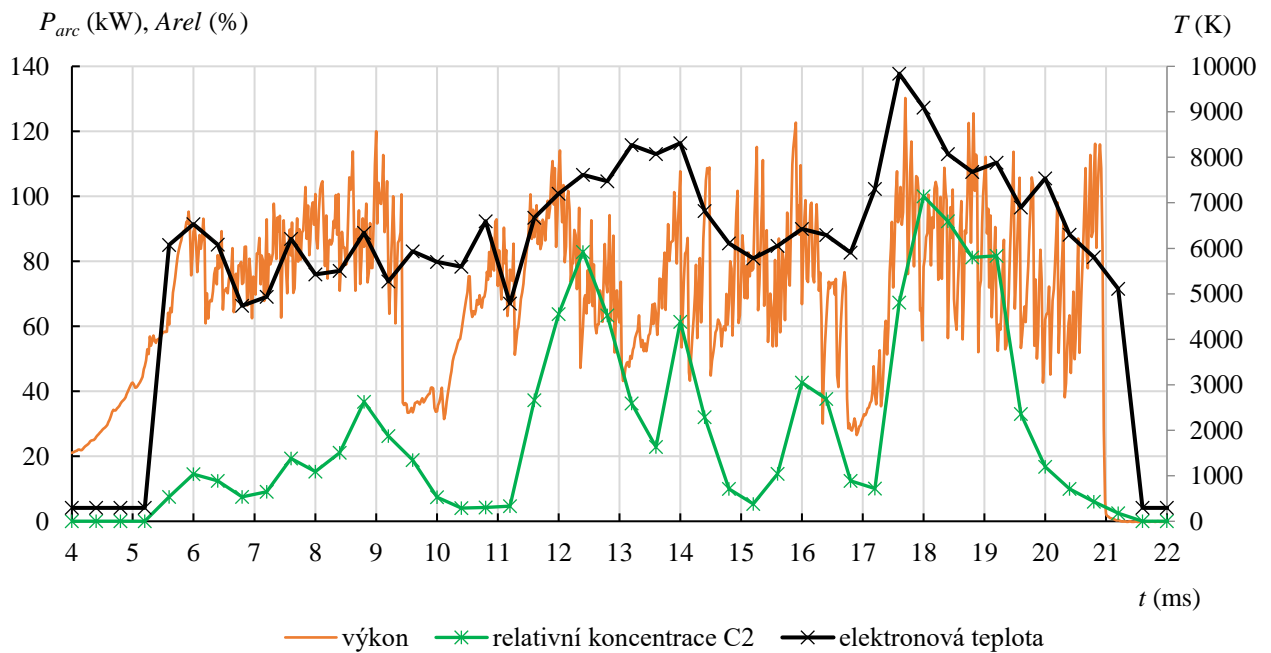


Obrázek 87 – Časový vývoj elektronové teploty při použití materiálu Poly 3.

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  $\mu$ s teplota klesá na 6500 K. Na konci zhášecího 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.

## 6.4.2 Průběh elektronové teploty plazmatu při použití materiálu Poly 1

Obrázek 88 zobrazuje vývoj teploty, výkonu a relativní koncentrace uhlíku v čase při použití materiálu Poly 1. Výpočet byl proveden z testu s pořadovým číslem 9.

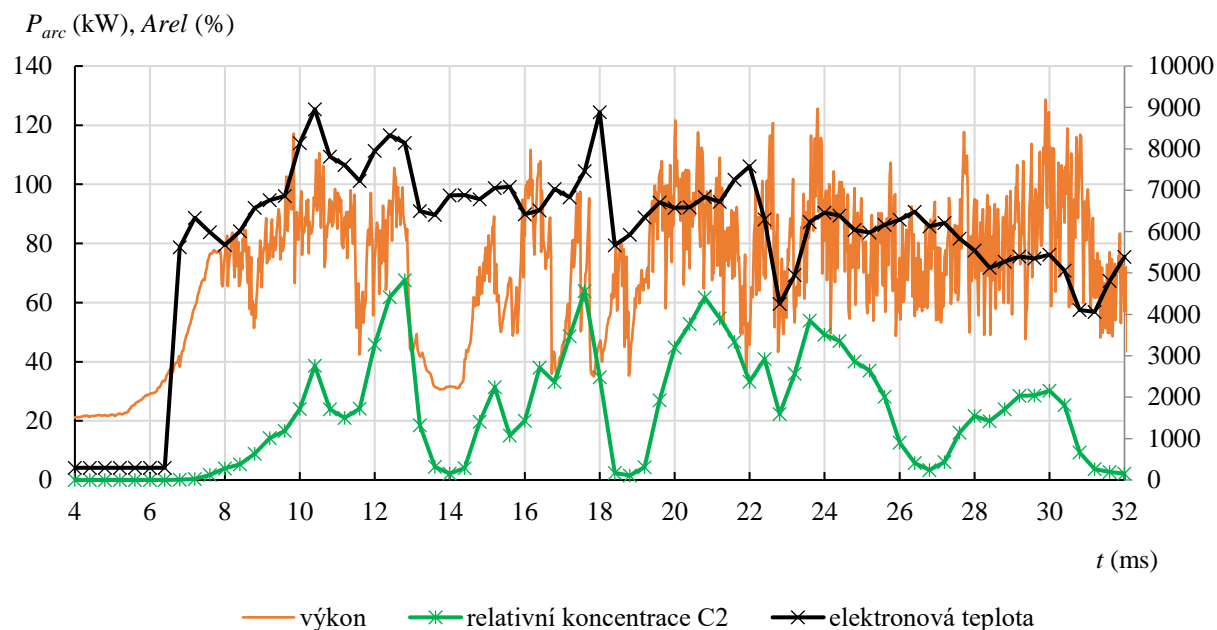


Obrázek 88 - Časový vývoj elektronové teploty při použití materiálu Poly 1.

V případě materiálu Poly 1 dosáhla teplota plazmatu maxima převyšujícího 9800 K v čase 17,6 ms. Na začátku děje se v porovnání s Poly 3 vyskytují teploty v pásmu nižších hodnot od 4700 K do 6500 K. Dalo by se tedy očekávat nižší opotřebení materiálů obloukem. Bohužel zde však přístroj vypínal delší čas, čímž nižší počáteční teplota ztratila svou váhu. Vývoj teploty částečně kopíruje změny výkonu oblouku. Vývoj koncentrace stříbra (Obrázek 86) odhaluje, že prudké nárůsty teploty byly zde pravděpodobně zapříčiněny právě navýšením koncentrace stříbra, což mimo jiné ve většině případů vede i k růstu vodivosti výbojového kanálu a snižuje jeho průměr. Při tomto jevu výrazně roste teplota jádra oblouku. Která vstupuje do výsledku, protože v grafech je zobrazena průměrná elektronová teplota.

### 6.4.3 Průběh elektronové teploty plazmatu při použití materiálu Poly 2

Obrázek 89 zobrazuje vývoj teploty, výkonu a relativní koncentrace uhlíku v čase při použití materiálu Poly 2. Následující výpočet byl proveden z testu s pořadovým číslem 15.

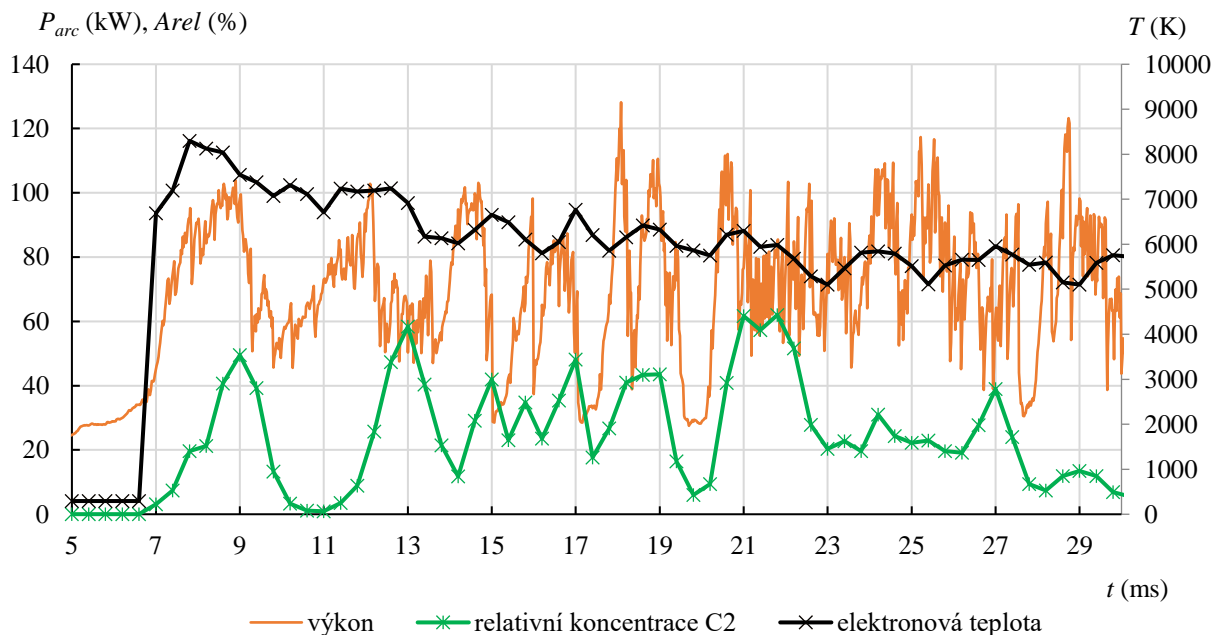


Obrázek 89 - Časový vývoj elektronové teploty při použití materiálu Poly 2.

I zde se vyskytují velmi vysoké teploty, které v kombinaci s charakterem záření není možné měřit pomocí prostých metod. Maximální teploty 8950 K dosahuje plazma v čase 10,4 ms, tedy mírně vyšší nežli v případě materiálu Poly 3. Lze pozorovat, že i fluktuace teplot je vyšší než v případě materiálu Poly 3. Za další lokální maximum lze považovat čas 18 ms, kde teplota dosahuje 8900 K. V tomto okamžiku je napětí na oblouku relativně nízké a proud vysoký, oblouk se tedy před tímto okamžikem dostal zpět mezi kontakty, čímž se snížila jeho délka a odpařil stříbro, které zvýšilo jeho vodivost, což následně navýšilo i teplotu elektronů. Také je nutno zmínit výrazně nižší chlazení oblouku vlivem jeho zkrácení. Toto je hlavní důvod, proč je vhodné jej prodlužovat v roštové izolační komoře. Aby bylo dosaženo lepšího chlazení, poklesu vodivosti a proudu, čehož následkem je vysoká nestabilita hoření a případné uhašení oblouku.

#### 6.4.4 Průběh elektronové teploty plazmatu při použití materiálu Poly 5

Obrázek 90 zobrazuje vývoj teploty, výkonu a relativní koncentrace uhlíku v čase při použití materiálu Poly 5. Výpočet byl proveden z testu s pořadovým číslem 18.

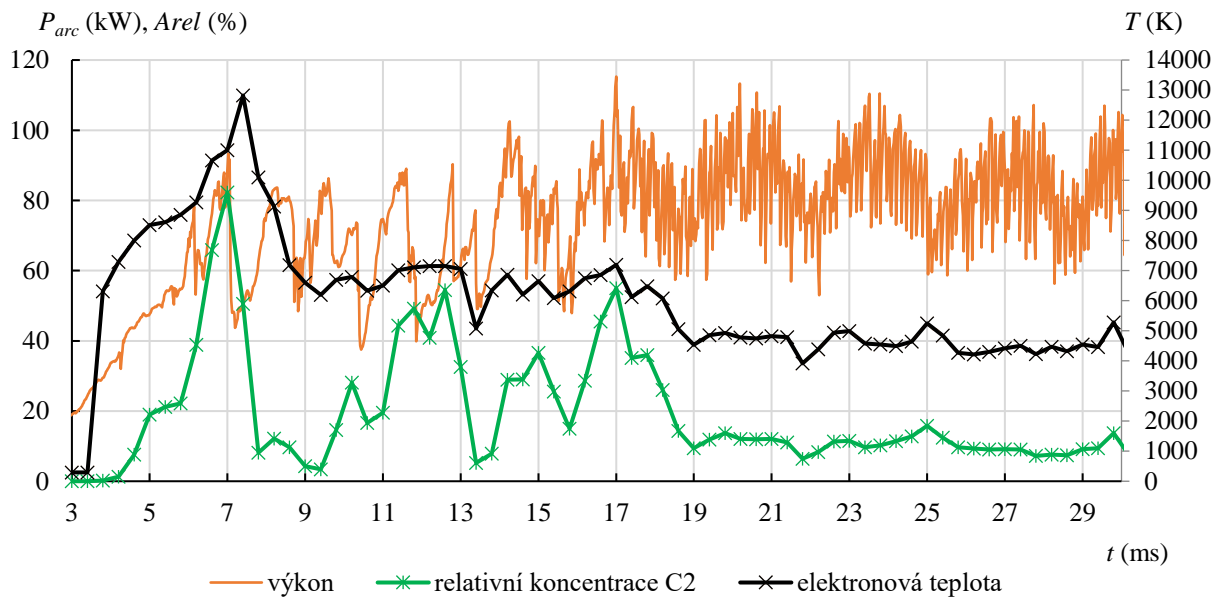


Obrázek 90 - Časový vývoj elektronové teploty při použití materiálu Poly 5.

Během hoření oblouku v experimentu 18 s materiálem Poly 5 bylo dosaženo nejvyšší teploty 8300 K v čase 7,8 ms, což je hned po materiálu Poly 3 nejnižší vypočítaná maximální teplota plazmatu. Lze tedy konstatovat, že při teplotách, ve kterých se pohybujeme není až tak podstatná maximální teplota, jako doba vzájemného působení blízkých materiálů a oblouku. Také lze pozorovat, že vyšší teplota napomáhá vyhoření uhlíku uvnitř přístroje.

### 6.4.5 Průběh elektronové teploty plazmatu při použití materiálu Poly 4

Obrázek 91 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 91 - 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 zapříčiněna 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.

## 7 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. Elektromobilita 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).

Sporadická odběra vyžaduje častější operování se spínacími přístroji. Roste tedy opotřebením součástí spínacích přístrojů mechanickými působeními, ale především působením stejnosměrného elektrického oblouku, jehož uhašení je obtížnější z důvodu stabilní polarity. 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 zhášení, ve většině přístrojů se využívá kombinace více z nich. Zhášení probíhá zpravidla ve zhášecích 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 zhášecí proces a opotřebením materiálu ovlivňuje značně vybraný materiál, jehož základní cena a zpracovatelnost udává právě cenu zhášecí 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 (kapitola 5) 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 zhášecích 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, které zvyšují kontaktní odpor spínacího přístroje, byly pozorovány u materiálu Poly 4, viz obrázek 11, obrázek 12 a obrázek 13. 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 zápalý 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 kapitole 5.2.2 jsou zobrazeny vybrané snímky z vysokorychlostní kamery, které odhalily nežádoucí emisi 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 zhášecí 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 zhášecí 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 zhášecích komor přípravku lze tedy při požadavku na nižší parametry vybrat pro konstrukci zhášecí 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, viz tabulka 7, 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, celkové výsledky zobrazuje tabulka 10. Hmotnostní úbytek komory pro nejnižší konfiguraci zátěže byl nejprůzračnější 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 zhášecích komor (viz kapitola 5.2.9), což bylo součástí zadání, aby bylo možné zjistit pravděpodobnou velikost úbytku bez vážení, které je v daných rozsazích časově náročné a prodlužuje testovací procesy.

Druhá série experimentů je obsažena v kapitole 6. Zde byly provedeny postupy ověřené z kapitoly 5, opět byla vyhodnocena tabulka elektrických parametrů pro jednotlivé testy z pohledu na spínací proces jako celek, které obsahuje příloha 3. V této kapitole bylo provedeno také sledování a vyhodnocení průběhů elektrických parametrů během testů, které jsou doplněny o měření průběhů přetlaku uvnitř zhášecí 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 6.2. 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 zhášecí 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 zhášecích 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 zhášecí komory. Ideálním případem by byla pouze jedna cesta oblouku do zhášecí 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 85. Oblouk zde není plně prodloužen a dochází k nežádoucímu ohřevu komory. Kapitola 6.4 obsahuje průběh 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 zhášecí 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

- [1] DEDAD, John A. Practical guide to overcurrent protection. Overland Park, Kan.: EC&M, Intertec Pub., 1996. ISBN 0872886360.
- [2] MCB (Miniature Circuit Breaker) – Construction, Working, Types & Uses. Electrical Technology [online], 2016. [cit. 2018-10-16]. Dostupné z: <https://www.electricaltechnology.org/2016/02/mcb-miniature-circuit-breaker-types-construction-working-uses>.
- [3] MOULDED CASE CIRCUIT BREAKERS BL1600S. OEZ, s.r.o. [online]. Letohrad: OEZ, 2017 [cit. 2018-09-26]. Dostupné z: [http://www.oez.com/uploads/oez/files/ks\\_b11600s-mo01-2017\\_en\\_de\\_es\\_hu\\_pl\\_ro.pdf](http://www.oez.com/uploads/oez/files/ks_b11600s-mo01-2017_en_de_es_hu_pl_ro.pdf)
- [4] What is an MCB and how does it work?. Consumer Unit World [online]. [cit. 2018-09-29]. Dostupné z: <https://www.consumerunitworld.co.uk/what-is-an-mcb-and-how-does-it-work-328-c.asp>.
- [5] Star Switch Gears : known for quality. Star Switch Gears [online]. Delhi: Star Switch Gears, 2010 [cit. 2018-10-17]. Dostupné z: <http://www.starswitchgears.com/mcb.html>
- [6] KAVEH, Niayesh a Magne RUNDE. Power Switching Components: Theory, Applications and Future Trends. Norsko: Springer, 2017. ISBN 987-3-31951459-8.
- [7] Technical Information - Contactors. Hager [online]. Hager, 2018 [cit. 2018-10-18]. Dostupné z: [https://www.hagerelectro.com.au/files/download/0/30875\\_1/0/TECHINFO\\_CONTACTORS.PDF](https://www.hagerelectro.com.au/files/download/0/30875_1/0/TECHINFO_CONTACTORS.PDF)
- [8] GROSS, Boleslav a kol., Laboratorní a numerická cvičení z elektrických přístrojů. 1. vyd. Brno: Rektorát Vysokého učení technického v Brně, 1983.
- [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](https://spapartsplus.com/update/docs/spu0613_Relays.html)
- [10] HAVELKA, Otto. Elektrické přístroje I. 3. vyd. Brno: Rektorát Vysokého učení technického v Brně, 1982.
- [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.
- [13] JEŽDÍK, Josef. Bezpečnost práce při svařování. 6. vyd. Praha: Výzkumný ústav bezpečnosti práce, v.v.i., 2010.
- [14] ASM Handbook, vol. 6., Welding, Brazing and Soldering, USA: ASM International, 1993, ISBN 0-87170-377-7.
- [15] FEIN, Samuel. Plasma arc cutting torch. USA. US3567898A. Uděleno 1.7.1968.
- [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.
- [19] ŠIMEK, David. "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.
- [20] GROSS, Boleslav a Otto HAVELKA. Elektrické přístroje II. 2. vyd. Brno: Rektorát Vysokého učení technického v Brně, 1980.
- [21] GROSS, Boleslav. Elektrické výboje v plynech. 1. vyd. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1967.
- [22] ČSN 330010 ed.2. Elektrická zařízení - Rozdělení a pojmy. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.
- [23] FRIDMAN, Alexander a Lawrence A. KENNEDY. Plasma Physics and Engineering. New York: Taylor & Francis, 2004. ISBN 1-56032-848-7.
- [24] ZATÍŽITELNOST VÝROBKŮ. ELKO EP. [online]. Všetuly: ELKO EP s.r.o., 2016 [cit. 2018-11-26]. Dostupné z: <https://www.elkoep.cz/>
- [25] CHRISTOPOULOS, Christos a Arthur WRIGHT. Electrical Power System Protection. Druhé. Dordrecht: Kluwer Academic Publisher, 1999. ISBN 0-412-81760-8.
- [26] ŠIMEK, D. a PĚČEK, D. EXPERIMENTAL TEMPERATURE MEASUREMENTS IN MINIATURE CIRCUIT BREAKER. Plasma Physics and Technology, 2017, roč. 4, č. 3, s. 265-268. ISSN: 2336-2626.
- [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.
- [28] ĎAĎO, Stanislav a Marcel KREIDL. Senzory a měřicí obvody. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1996. ISBN 80-01-01500-9.
- [29] VALENTA, J., L. DOSTÁL a P. DOHNAL. Diagnostics of Extinguishing Process in Low Voltage Devices by Pressure Field. Plasma Physics and Technology. 2015, 2(3), p. 328 - 331.
- [30] PHOTRON SA-X2. In: Slowmo [online]. Salford: Slowmo, 2019 [cit. 2019-01-29]. Dostupné z: <https://slowmo.co.uk/wp-content/uploads/PHOTRON-SAX2-450x330.jpg>
- [31] Weichmann, U. et al. UHP lamps for projection systems: getting always brighter, smaller, and even more colorful. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. 5289(1). 255-265. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/234905010\\_UHP\\_lamps\\_for\\_projection\\_systems\\_getting\\_always\\_brighter\\_smaller\\_and\\_even\\_more\\_colorful](https://www.researchgate.net/publication/234905010_UHP_lamps_for_projection_systems_getting_always_brighter_smaller_and_even_more_colorful)
- [32] Ullmann, Vojtěch.: Struktura atomu, [online]. [cit. 2019-02-08]. <http://astronuklfyzika.cz/StrukturaAtomu.gif>
- [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](https://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/lines_form.html)
- [35] MILDE, David. Optická emisní spektrometrie. In: Katedra analytické chemie - UP v Olomouci [online]. 2010 [cit. 2018-12-03]. Dostupné z: <http://ach.upol.cz/user-files/intranet/05-asx-oes-1321623178.pdf>
- [36] MILDE, David. Základní části spektrometrů. In: Katedra analytické chemie - UP v Olomouci [online]. 2010 [cit. 2018-12-03]. Dostupné z: <http://ach.upol.cz/user-files/intranet/02-asx-instrument-1321623142.pdf>
- [37] FANTZ, U. Basics of plasma spectroscopy. Plasma Sources Science and Technology. vol. 15, issue 4, S137-S147. DOI: 10.1088/0963-0252/15/4/S01. Dostupné z: <http://stacks.iop.org/0963-0252/15/i=4/a=S01?key=crossref.55c2687ff5694740c0db81c4b07cacd0>

- [38] Chemricool: Definition of monochromator, [online]. Massachusetts: Chemicool, 2017 [cit. 2019-03-12]. URL: <https://www.chemicool.com/definition/monochromators.html>
- [39] Magnan, P.: Detection of visible photons in CCD and CMOS: A comparative view, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Vol. 504, Issues 1–3, 2003, pp. 199-212, ISSN 0168-9002.
- [40] Avantes: Avaspec ULS, [online]. Avantes, 2018 [cit. 2019-07-12]. URL: <https://www.avantes.com/products/spectrometers/sensline/item/333-avaspec-uls-tec>
- [41] Oxford Instruments : Shamrock 500i, [online]. Andor, 2018 [cit. 2019-07-15]. URL: [https://www.andor.com/pdfs/specifications/Andor\\_Shamrock\\_500\\_Specifications.pdf](https://www.andor.com/pdfs/specifications/Andor_Shamrock_500_Specifications.pdf)
- [42] Oxford Instruments : Newton 940, [online]. Andor, 2018 [cit. 2019-07-15]. URL: [https://www.andor.com/pdfs/specifications/Andor\\_Newton\\_CCD\\_Specifications.pdf](https://www.andor.com/pdfs/specifications/Andor_Newton_CCD_Specifications.pdf)
- [43] ČERNOHORSKÝ, Tomáš a Pavel JANDERA. *Atomová spektroskopie*. Pardubice: Ediční středisko Univerzity Pardubice, 1997. ISBN 80-7194-114-X.
- [44] TechPlasty, [online]. TechPlasty, 2019 [cit. 2019-08-12]. URL: <https://www.techplasty.cz/technicke-plasty/polyamidy>
- [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>
- [46] WEISSTEIN, Eric W. Gaussian Function, [online]. MathWorld - A Wolfram Web Resource, [cit.2019-11-05]. Dostupné z: <http://mathworld.wolfram.com/GaussianFunction.html>
- [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>.
- [48] Mapy.cz: OpenStreetMap [online]. Praha: Seznam.cz, 2020 [cit. 2020-01-21]. Dostupné z: <https://mapy.cz/>.
- [49] HALL, Nancy. Speed of Sound. National Aeronautics and Space Administration: NASA [online]. Washington, DC: NASA, 2018 [cit. 2020-01-21]. Dostupné z: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/sound.html>
- [50] PEARSE, R. W. B. a A. G. GAYDON. *The identification of molecular spectra*. Second edition revised. London: Chapman & Hall LTD, 1950.
- [51] Furtenbacher, T. et al. Experimental Energy Levels and Partition Function of the  $^{12}\text{C}_2$  Molecule. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, Vol. 224, Issue 2, 2016, DOI: 10.3847/0067-0049/224/2/44. Dostupné z: <https://iopscience.iop.org/article/10.3847/0067-0049/224/2/44>.

## SEZNAM PŘÍLOH

<b>PŘÍLOHA 1</b>	<b>– DATA ZÍSKANÁ PŘI ZKOUMÁNÍ VLIVU OBLOUKU NA VYBRANÉ MATERIÁLY SPÍNACÍCH PŘÍSTROJŮ NN .....</b>	<b>113</b>
<b>PŘÍLOHA 2</b>	<b>– ZÁVISLOSTI ÚBYTKU HMOTNOSTI NA OBLOUKOVÉ ENERGII POUŽITÉ PRO ZÍSKÁNÍ EMPIRICKÝCH ROVNIC PRO VÝPOČET ÚBYTKU HMOTNOSTI Z ELEKTRICKÝCH PARAMETRŮ .....</b>	<b>121</b>
<b>PŘÍLOHA 3</b>	<b>– VYHODNOCENÁ NAMĚŘENÁ DATA Z TESTŮ KAPITOLY 6...</b>	<b>123</b>
<b>PŘÍLOHA 4</b>	<b>– PRŮBĚHY PŘETLAKU, NAPĚTÍ A PROUDU V EXPERIMENTÁLNÍ ZHÁŠECÍ KOMOŘE PŘI EXPERIMENTECH KAPITOLY 6 .....</b>	<b>124</b>
<b>PŘÍLOHA 5</b>	<b>– PRŮBĚHY PŘETLAKU A VÝKONU OBLOUKU V EXPERIMENTÁLNÍ ZHÁŠECÍ KOMOŘE PŘI TESTECH KAPITOLY 6.....</b>	<b>131</b>

**Příloha 1 – data získaná při zkoumání vlivu oblouku na vybrané materiály spínacích přístrojů nn**

Číslo testu	$I^2t$	$I^2ta$	$I^2tp$	$I_{max}$	$U_{amax}$	$W_a$	$t_t$	$t_a$	$t_p$	Teplota okolí	Rel. vlhkost	Tlak
	k(A <sup>2</sup> s)	k(A <sup>2</sup> s)	k(A <sup>2</sup> s)	(kA)	(V)	(kJ)	(ms)	(ms)	(ms)	(°C)	(%)	(hPa)
1	1,35	0,05	1,30	0,11	1045	0,10	127,4	7,9	119,5	21,8	25,7	988,6
2	1,33	0,05	1,28	0,11	962	0,07	125,6	6,9	118,7	21,8	25,7	988,6
3	1,37	0,05	1,32	0,11	890	0,05	127,4	5,9	121,5	21,4	26,2	988,6
4	1,31	0,05	1,26	0,11	970	0,05	122,3	6,0	116,3	21,6	26,1	988,5
5	1,32	0,05	1,27	0,11	1047	0,06	123,9	6,9	117,0	21,6	26,0	988,5
6	1,34	0,05	1,29	0,11	941	0,05	124,8	5,7	119,0	21,7	25,9	988,5
7	1,33	0,04	1,29	0,11	956	0,05	124,0	5,5	118,5	21,7	25,9	988,6
8	1,34	0,04	1,30	0,11	933	0,04	124,7	5,1	119,6	21,7	25,9	988,6
9	1,32	0,04	1,28	0,11	870	0,04	122,9	5,3	117,6	21,8	25,7	988,6
10	1,34	0,04	1,30	0,11	981	0,06	125,7	5,7	119,9	21,8	25,6	988,6
11	5,09	0,25	4,85	0,21	1144	0,32	130,7	11,3	119,4	21,8	25,8	988,6
12	5,12	0,24	4,88	0,21	930	0,34	132,1	11,6	120,5	21,7	26,1	988,6
13	5,11	0,25	4,86	0,21	1047	0,38	132,4	12,7	119,7	21,6	26,2	988,6
14	5,13	0,26	4,88	0,21	958	0,43	134,4	13,9	120,6	21,7	26,0	988,6
15	5,32	0,32	5,00	0,21	1014	0,60	142,5	19,0	123,6	21,6	26,3	988,6
16	4,99	0,20	4,80	0,21	862	0,14	126,2	7,6	118,6	21,6	26,2	988,5
17	5,12	0,17	4,95	0,21	1020	0,12	128,6	6,2	122,4	21,7	26,2	988,6
18	5,09	0,17	4,92	0,21	944	0,13	127,8	6,4	121,4	21,6	26,4	988,5
19	5,10	0,18	4,91	0,21	910	0,40	134,4	12,8	121,6	21,5	26,5	988,3
20	5,18	0,22	4,95	0,21	914	0,36	134,7	12,3	122,4	21,4	26,7	988,4

*Tabulka 15 – Data získaná při zkoumání vlivu oblouku na materiál Poly I – část 1.*

Číslo testu	$I^2t$	$I^2ta$	$I^2tp$	$I_{max}$	$U_{amax}$	$W_a$	$t_t$	$t_a$	$t_p$	Teplota okolí	Rel. vlhkost	Tlak
	k(A <sup>2</sup> s)	k(A <sup>2</sup> s)	k(A <sup>2</sup> s)	(kA)	(V)	(kJ)	(ms)	(ms)	(ms)	(°C)	(%)	(hPa)
21	12,04	0,76	11,28	0,33	993	0,88	136,6	17,7	118,9	21,7	26,3	988,4
22	12,13	0,80	11,33	0,33	1040	0,75	136,2	16,9	119,3	21,9	26,1	988,3
23	12,03	0,50	11,53	0,33	906	0,23	129,1	8,1	121,0	21,8	26,2	988,4
24	12,37	0,75	11,62	0,33	897	0,78	138,7	16,4	122,3	21,8	26,4	988,4
25	12,56	0,90	11,66	0,33	1000	1,02	143,7	21,3	122,4	21,6	26,5	988,4
26	12,51	0,93	11,58	0,33	964	0,83	141,1	18,7	122,4	20,5	28,2	988,4
27	12,46	1,00	11,46	0,33	893	1,22	145,9	25,0	120,9	20,8	27,7	988,5
28	12,76	1,19	11,57	0,33	902	0,89	143,9	22,3	121,6	20,7	27,9	988,5
29	12,73	1,15	11,58	0,33	1054	0,97	144,3	22,4	122,0	21,0	27,5	988,5
30	12,74	1,06	11,67	0,33	884	0,85	142,3	19,7	122,6	20,9	27,7	988,5
31	22,52	3,25	19,27	0,43	856	2,97	164,0	44,4	119,6	21,5	26,8	988,6
32	20,89	1,73	19,17	0,43	1067	1,05	137,8	19,9	117,9	18,2	33,0	988,6
33	21,18	1,59	19,58	0,43	1077	0,88	138,1	16,6	121,4	19,6	30,7	988,6
34	20,27	1,48	18,78	0,43	925	1,10	135,0	18,1	116,9	19,9	30,0	988,6
35	20,73	1,55	19,18	0,43	997	0,92	135,9	16,8	119,1	20,2	29,4	988,6
36	21,08	1,74	19,34	0,43	1025	1,14	140,2	19,7	120,5	20,0	29,8	988,6
37	20,64	1,49	19,15	0,43	989	1,07	136,7	17,6	119,1	20,4	29,0	988,6
38	21,20	1,83	19,37	0,43	963	1,26	140,9	21,1	119,7	20,5	28,9	988,7
39	20,79	1,54	19,24	0,43	964	1,14	137,9	18,5	119,5	20,4	29,0	988,6
40	21,35	1,94	19,40	0,43	898	1,37	144,0	23,0	121,0	20,3	29,1	988,7
41	21,58	2,02	19,56	0,43	886	1,46	146,4	24,8	121,6	20,6	28,7	988,7

Tabulka 16 - Data získaná při zkoumání vlivu oblouku na materiál Poly 1 – část 2 (neúspěšné testy vyznačeny červeně).

Číslo testu	$I^2t$	$I^2ta$	$I^2tp$	$I_{max}$	$U_{amax}$	$W_a$	$t_t$	$t_a$	$t_p$	Teplota okolí	Rel. vlhkost	Tlak
	k(A <sup>2</sup> s)	k(A <sup>2</sup> s)	k(A <sup>2</sup> s)	(kA)	(V)	(kJ)	(ms)	(ms)	(ms)	(°C)	(%)	(hPa)
1	1,33	0,05	1,29	0,11	1073	0,10	126,5	7,6	118,9	22,7	18,3	987,8
2	1,37	0,05	1,33	0,11	930	0,09	128,8	7,0	121,8	19,0	22,2	987,2
3	1,33	0,05	1,28	0,11	786	0,05	124,1	6,0	118,1	18,0	23,5	987,3
4	1,37	0,04	1,33	0,11	982	0,07	127,4	5,9	121,6	18,0	23,6	987,4
5	1,33	0,04	1,28	0,11	863	0,05	123,4	5,4	118,0	17,9	23,8	987,4
6	1,37	0,04	1,32	0,11	1037	0,05	127,0	5,3	121,7	17,8	23,9	987,4
7	1,36	0,04	1,32	0,11	816	0,04	126,5	5,0	121,5	17,7	24,0	987,4
8	1,36	0,04	1,32	0,11	910	0,06	127,0	5,2	121,7	17,7	24,0	987,4
9	1,40	0,04	1,36	0,11	950	0,04	130,1	4,6	125,6	17,6	24,1	987,4
10	1,39	0,04	1,35	0,11	1149	0,06	129,5	5,4	124,1	17,5	24,2	987,4
11	5,22	0,31	4,91	0,21	1009	0,54	137,9	16,8	121,1	17,5	24,3	987,6
12	5,32	0,33	4,99	0,21	1079	0,71	143,7	21,0	122,7	17,5	24,3	987,6
13	5,24	0,34	4,90	0,21	1027	0,64	140,6	19,4	121,1	17,5	24,4	987,5
14	5,24	0,33	4,91	0,21	1103	0,67	140,8	19,9	120,9	17,5	24,5	987,4
15	5,25	0,34	4,91	0,21	991	0,57	140,4	18,6	121,7	17,4	24,6	988,1
16	5,23	0,31	4,91	0,21	1105	0,55	139,4	17,8	121,6	17,6	24,4	987,4
17	5,30	0,33	4,97	0,21	988	0,66	142,3	20,0	122,3	17,4	24,7	987,4
18	5,27	0,30	4,96	0,21	877	0,62	142,2	19,4	122,8	17,4	24,8	987,4
19	5,21	0,17	5,04	0,21	832	0,12	130,5	6,2	124,3	17,3	24,9	987,4
20	5,19	0,16	5,03	0,21	930	0,20	132,6	8,7	123,9	17,1	25,3	987,4

Tabulka 17 - Data získaná při zkoumání vlivu oblouku na materiál Poly 2 – část 1.

Číslo testu	$I^2t$	$I^2ta$	$I^2tp$	$I_{max}$	$U_{amax}$	$W_a$	$t_t$	$t_a$	$t_p$	Teplota okolí	Rel. vlhkost	Tlak
	k(A <sup>2</sup> s)	k(A <sup>2</sup> s)	k(A <sup>2</sup> s)	(kA)	(V)	(kJ)	(ms)	(ms)	(ms)	(°C)	(%)	(hPa)
21	12,55	0,94	11,61	0,33	864	1,15	145,3	23,3	122,0	16,9	25,6	987,3
22	12,42	0,94	11,49	0,33	917	0,90	139,7	19,2	120,5	17,0	25,6	987,3
23	12,10	0,43	11,67	0,33	911	0,15	129,6	6,6	123,0	17,0	25,5	987,3
24	12,62	1,14	11,48	0,33	895	1,32	146,8	26,0	120,7	17,0	25,7	987,3
25	12,73	1,18	11,55	0,33	920	1,15	146,1	24,8	121,3	16,9	25,7	987,4
26	12,47	0,99	11,48	0,33	900	1,15	144,0	23,5	120,5	16,9	25,8	987,3
27	12,20	0,52	11,68	0,33	813	0,20	130,9	7,8	123,0	16,9	25,7	987,3
28	12,68	1,08	11,60	0,33	943	1,24	146,9	25,1	121,7	16,9	25,7	987,3
29	13,11	1,35	11,77	0,33	927	1,36	152,5	28,7	123,8	17,0	25,6	987,3
30	12,44	0,54	11,90	0,33	914	0,27	134,2	9,1	125,1	17,0	25,7	987,3
31	23,29	3,44	19,85	0,43	902	2,80	166,8	43,7	123,2	17,9	24,3	987,3
32	21,80	1,90	19,90	0,43	1038	1,16	142,3	20,5	121,8	19,5	22,4	987,3
33	21,27	1,50	19,76	0,43	1008	1,11	140,9	17,9	123,0	17,2	25,4	987,3
34	21,38	1,55	19,83	0,43	955	1,30	143,1	20,3	122,8	17,0	25,7	987,3
35	22,56	2,78	19,77	0,43	924	2,88	162,5	40,2	122,2	17,0	25,8	987,4
41	20,95	1,78	19,17	0,43	954	0,89	134,8	17,3	117,6	17,3	28,5	994
42	22,52	2,42	20,10	0,43	1136	1,52	150,9	26,7	124,2	20,5	23,4	994,7
43	21,86	1,92	19,94	0,43	1027	1,13	144,0	20,6	123,4	19,8	24,2	993,8
44	21,75	2,10	19,65	0,43	938	1,21	144,0	22,1	121,9	19,0	25,5	993,8
45	23,08	3,31	19,77	0,43	1050	2,84	166,9	43,6	123,3	18,4	26,5	993,7

Tabulka 18 - Data získaná při zkoumání vlivu oblouku na materiál Poly 2 – část 2 (neúspěšné testy vyznačeny červeně).

Číslo testu	$I^2t$	$I^2ta$	$I^2tp$	$I_{max}$	$U_{amax}$	$W_a$	$t_t$	$t_a$	$t_p$	Teplota okolí	Rel. vlhkost	Tlak
	k(A <sup>2</sup> s)	k(A <sup>2</sup> s)	k(A <sup>2</sup> s)	(kA)	(V)	(kJ)	(ms)	(ms)	(ms)	(°C)	(%)	(hPa)
1	1,34	0,04	1,29	0,11	962	0,08	125,7	6,6	119,1	22,4	24,8	983,7
2	1,36	0,04	1,33	0,11	1072	0,06	126,9	5,1	121,8	22,4	24,9	983,7
3	1,32	0,03	1,29	0,11	977	0,04	123,0	4,2	118,8	22,4	24,7	983,7
4	1,34	0,03	1,30	0,11	1029	0,04	124,4	4,2	120,3	22,2	25,0	983,6
5	1,33	0,04	1,29	0,11	1021	0,06	124,1	5,0	119,0	22,3	25,0	983,7
6	1,35	0,03	1,31	0,11	1015	0,05	126,0	4,6	121,4	22,3	24,9	983,7
7	1,34	0,04	1,31	0,11	965	0,06	125,6	5,0	120,5	22,3	24,9	983,7
8	1,34	0,03	1,31	0,11	1051	0,04	125,0	4,3	120,6	22,1	25,1	983,8
9	1,36	0,03	1,33	0,11	853	0,04	126,6	4,0	122,6	21,3	25,8	983,1
10	1,38	0,03	1,35	0,11	881	0,04	128,1	4,2	123,9	21,3	26,4	983,9
11	4,96	0,22	4,74	0,21	1087	0,34	128,3	11,2	117,1	18,7	30,2	983,2
12	5,15	0,16	4,98	0,21	1071	0,11	129,0	5,8	123,2	18,3	31,0	983,2
13	5,06	0,15	4,91	0,21	999	0,16	127,9	6,3	121,6	18,4	31,1	984,1
14	4,96	0,14	4,82	0,21	1087	0,12	124,3	5,3	119,0	20,1	28,6	984,1
15	5,05	0,18	4,87	0,21	1067	0,28	130,2	9,4	120,8	20,5	27,1	983,4
16	5,06	0,25	4,82	0,21	1087	0,39	131,6	12,7	118,9	19,0	30,2	984,2
17	5,09	0,19	4,90	0,21	1161	0,24	129,4	8,6	120,8	20,5	27,7	984,3
18	5,00	0,14	4,85	0,21	1261	0,16	126,3	6,3	120,0	20,9	26,9	984,3
19	5,03	0,17	4,86	0,21	1260	0,24	128,8	8,6	120,2	21,4	26,0	984,4
20	5,06	0,17	4,89	0,21	1148	0,23	129,2	8,4	120,7	21,5	25,9	984,4

Tabulka 19 - Data získaná při zkoumání vlivu oblouku na materiál Poly 3 – část 1.

Číslo testu	$I^2t$	$I^2ta$	$I^2tp$	$I_{max}$	$U_{amax}$	$W_a$	$t_t$	$t_a$	$t_p$	Teplota okolí	Rel. vlhkost	Tlak
	k(A <sup>2</sup> s)	k(A <sup>2</sup> s)	k(A <sup>2</sup> s)	(kA)	(V)	(kJ)	(ms)	(ms)	(ms)	(°C)	(%)	(hPa)
21	11,50	0,62	10,89	0,00	1052	0,55	127,4	12,6	114,9	22,0	23,8	987,9
22	12,20	0,60	11,60	0,33	981	0,57	134,2	12,3	121,9	20,8	25,8	987,9
23	11,40	0,42	10,98	0,32	1025	0,23	128,5	7,0	121,5	21,5	24,8	988
24	11,39	0,52	10,87	0,32	1060	0,52	131,8	11,7	120,1	21,6	24,7	988
25	12,13	0,58	11,55	0,33	1131	0,49	132,4	11,3	121,1	21,6	24,6	988
26	11,84	0,58	11,26	0,32	1024	0,60	134,5	12,8	121,8	21,5	24,6	988,1
27	12,05	0,63	11,41	0,33	1077	0,58	132,4	12,6	119,8	21,5	25,0	988,1
28	11,81	0,52	11,29	0,32	1000	0,42	132,6	10,6	122,0	19,5	27,5	988
29	12,15	0,52	11,63	0,33	938	0,46	132,3	10,4	121,9	20,4	26,7	988
30	11,60	0,59	11,02	0,32	1063	0,58	132,1	12,7	119,4	20,9	25,9	988,1
31	20,19	1,18	19,01	0,41	956	0,80	138,0	14,4	123,7	21,3	25,3	988,3
32	21,35	1,40	19,95	0,43	1108	0,90	139,0	15,6	123,3	21,3	25,3	988,4
33	22,88	2,67	20,21	0,43	1116	1,87	152,7	30,8	121,9	21,2	25,6	988,4
34	22,64	1,83	20,80	0,44	1116	1,13	138,1	18,8	119,3	21,2	25,8	988,5
35	21,73	1,28	20,45	0,44	1122	0,88	135,5	14,5	121,0	21,2	25,9	988,5
36	22,04	1,37	20,67	0,44	1072	0,79	136,0	14,1	121,9	21,3	25,9	988,5
37	21,43	1,22	20,21	0,43	1139	0,75	134,9	12,9	122,0	21,3	25,9	988,5
38	21,59	1,40	20,20	0,43	1193	1,10	139,6	17,5	122,1	21,3	26,0	988,5
39	21,39	1,46	19,93	0,43	1089	1,05	137,8	16,9	120,9	21,3	26,2	988,5
40	21,23	1,38	19,85	0,43	1212	0,75	134,3	13,8	120,4	21,4	25,9	988,5

Tabulka 20 - Data získaná při zkoumání vlivu oblouku na materiál Poly 3 – část 2.

Číslo testu	$I^2t$	$I^2ta$	$I^2tp$	$I_{max}$	$U_{amax}$	$W_a$	$t_t$	$t_a$	$t_p$	Teplota okolí	Rel. vlhkost	Tlak
	k(A <sup>2</sup> s)	k(A <sup>2</sup> s)	k(A <sup>2</sup> s)	(kA)	(V)	(kJ)	(ms)	(ms)	(ms)	(°C)	(%)	(hPa)
1	1,41	0,06	1,34	0,11	839	0,11	133,5	9,8	123,7	22,6	20,0	994,6
2	1,37	0,06	1,31	0,11	844	0,12	130,8	10,1	120,7	22,5	20,0	993,9
3	1,42	0,05	1,37	0,11	908	0,10	135,2	9,4	125,8	20,1	22,9	993,9
4	1,37	0,05	1,33	0,11	826	0,08	129,5	7,2	122,3	19,2	24,4	993,9
5	1,41	0,06	1,34	0,11	912	0,13	133,8	10,1	123,7	18,6	25,3	993,9
6	1,40	0,06	1,35	0,11	917	0,08	131,6	7,8	123,8	18,4	25,8	993,9
7	1,40	0,05	1,34	0,11	890	0,12	132,6	8,8	123,8	18,2	26,1	993,9
8	1,37	0,04	1,33	0,11	848	0,09	129,3	7,0	122,3	18,1	26,3	993,8
9	1,38	0,04	1,34	0,11	855	0,07	130,0	6,4	123,6	17,8	26,7	993,9
10	1,37	0,04	1,33	0,11	827	0,08	128,5	6,2	122,4	17,8	26,8	993,8
11	5,37	0,51	4,87	0,21	931	0,70	144,3	24,1	120,2	20,5	23,1	994,7
12	5,21	0,30	4,91	0,21	885	0,24	132,8	11,2	121,5	19,6	24,2	993,9
13	5,41	0,51	4,91	0,21	836	1,00	151,5	30,3	121,2	18,6	25,7	993,9
14	5,67	0,75	4,93	0,21	913	1,20	159,9	37,9	122,0	18,2	26,4	993,9
15	5,66	0,73	4,93	0,21	917	0,83	153,3	31,3	122,0	18	26,8	993,9
16	5,66	0,72	4,95	0,21	880	1,04	156,6	34,1	122,5	17,8	27,1	993,9
17	5,22	0,24	4,97	0,21	902	0,19	132,5	9,9	122,6	17,7	27,3	993,9
18	5,80	0,82	4,98	0,21	897	1,11	162,1	38,8	123,3	17,6	27,4	993,8
19	5,85	0,86	5,00	0,21	909	1,19	162,8	39,3	123,5	17,6	27,7	993,9
20	5,88	0,87	5,01	0,21	825	1,37	167,7	43,7	123,9	17,5	27,8	993,9
21	13,05	1,24	11,81	0,33	983	1,10	145,8	24,1	121,7	20,2	24,0	994
22	13,83	2,02	11,81	0,33	617	2,28	168,7	44,5	124,2	18,8	25,8	994,1
31	23,31	3,51	19,80	0,43	648	3,13	166,8	46,2	120,6	17,6	27,9	994,1

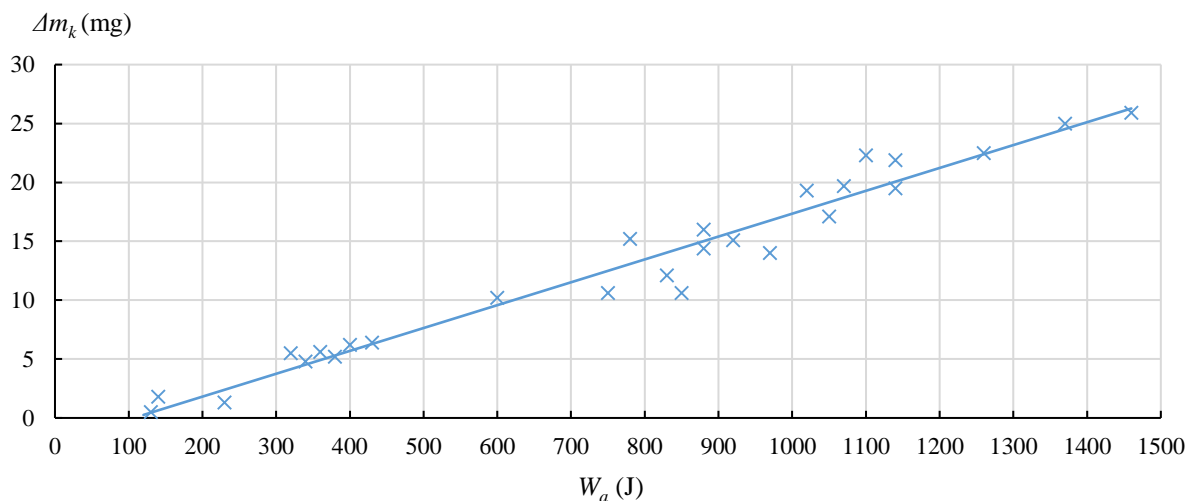
Tabulka 21 - Data získaná při zkoumání vlivu oblouku na materiál Poly 4 (neúspěšné testy vyznačeny červeně).

Číslo testu	$Pt$	$Pta$	$Ptp$	$I_{max}$	$U_{amax}$	$W_a$	$t_t$	$t_a$	$t_p$	Teplota okolí	Rel. vlhkost	Tlak
	k(A <sup>2</sup> s)	k(A <sup>2</sup> s)	k(A <sup>2</sup> s)	(kA)	(V)	(kJ)	(ms)	(ms)	(ms)	(°C)	(%)	(hPa)
41	1,37	0,06	1,31	0,11	873	0,09	127,6	8,3	119,3	21,6	20,1	988,7
42	1,35	0,05	1,30	0,11	861	0,08	126,4	7,3	119,1	20,2	21,4	988
43	1,34	0,04	1,30	0,11	814	0,05	124,9	5,3	119,7	18,5	23,6	988
44	1,33	0,04	1,28	0,11	807	0,07	124,4	6,4	118,0	18,1	24,4	988,1
45	1,35	0,04	1,31	0,11	810	0,08	127,1	6,7	120,4	17,8	24,7	988,1
46	1,36	0,04	1,31	0,11	918	0,07	126,8	6,0	120,8	17,7	24,9	988,1
47	1,36	0,05	1,31	0,11	910	0,11	129,3	8,2	121,1	17,6	25,0	988,1
48	1,32	0,04	1,28	0,11	923	0,07	124,6	7,0	117,6	17,4	25,4	988,1
49	1,37	0,04	1,32	0,11	863	0,07	127,9	6,3	121,5	17,4	25,5	988
50	1,36	0,04	1,32	0,11	895	0,06	127,3	6,0	121,3	17,3	25,6	988
51	5,16	0,25	4,91	0,21	896	0,23	131,7	10,1	121,6	19,2	23,0	988,2
52	5,17	0,35	4,82	0,21	973	0,71	141,3	22,2	119,1	18,3	24,2	988,2
53	5,12	0,21	4,91	0,21	921	0,20	130,5	9,1	121,3	17,7	24,9	988,3
54	5,26	0,34	4,92	0,21	949	0,62	141,2	19,3	121,9	17,5	25,4	988,3
55	5,13	0,24	4,89	0,21	894	0,25	131,4	10,3	121,0	17,3	25,7	988,4
56	5,41	0,47	4,93	0,21	914	0,98	150,1	28,5	121,6	17,2	25,9	988,4
57	5,09	0,22	4,88	0,21	808	0,18	128,9	8,6	120,3	17,1	26,0	988,5
58	5,40	0,43	4,97	0,21	916	0,73	146,7	23,5	123,2	17	26,2	988,5
59	5,04	0,19	4,85	0,21	897	0,13	127,3	7,0	120,3	17	26,3	988,5
60	5,35	0,46	4,89	0,21	919	0,83	146,2	25,6	120,6	17	26,3	988,6
61	13,28	1,94	11,34	0,33	844	2,38	164,7	45,6	119,1	19	23,6	988,7
62	13,40	1,92	11,48	0,33	922	1,92	158,6	39,3	119,3	17,5	25,5	988,7
71	20,10	1,71	18,39	0,43	1010	1,06	132,5	18,7	113,9	20,3	22,0	989,9
72	22,97	3,09	19,88	0,43	813	2,78	163,9	41,0	122,9	20,3	21,7	989,1

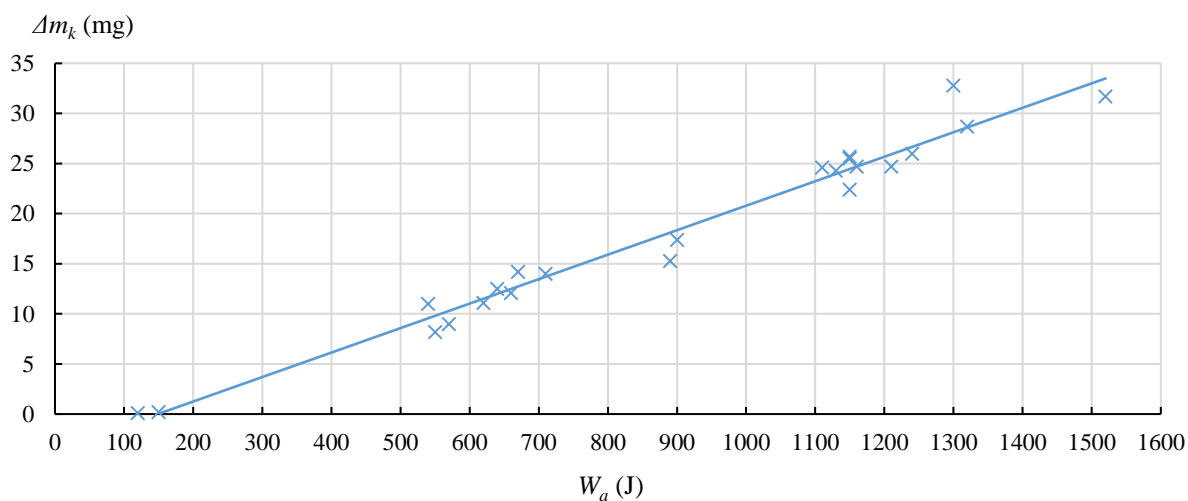
Tabulka 22 - Data získaná při zkoumání vlivu oblouku na materiál Poly 5 (neúspěšné testy vyznačeny červeně).

## Příloha 2 – závislosti úbytku hmotnosti na obloukové energii použité pro získání empirických rovnic pro výpočet úbytku hmotnosti z elektrických parametrů

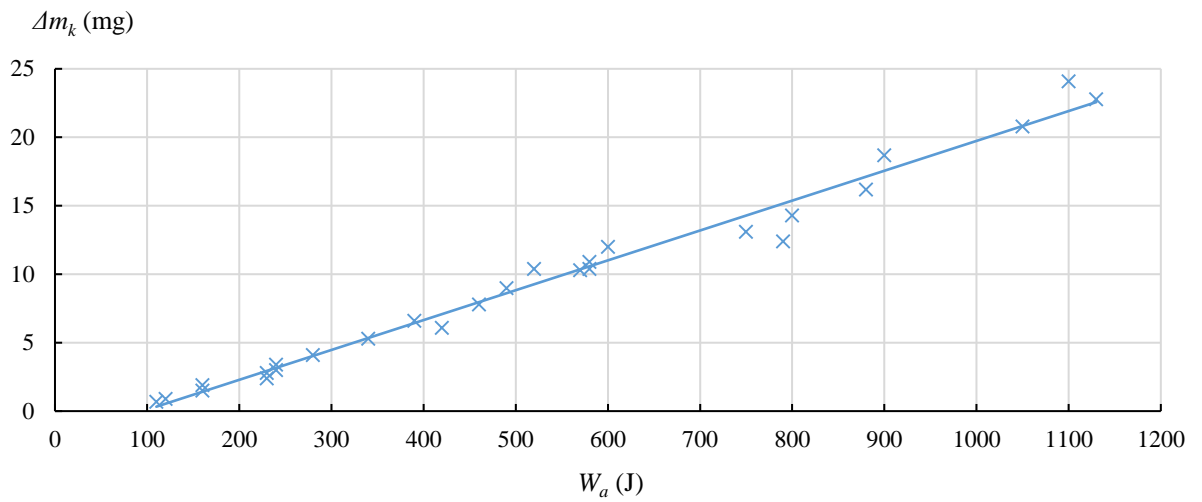
Poznámka.: Z důvodu velmi nízkých relativních úbytků hmotnosti komor při nastavení zátěže 1 nebyla větší část těchto měření do výpočtů zařazena. Dále byly také vyřazeny vždy tři hodnoty s největší odchylkou, která byla pravděpodobně způsobena nahodilou chybou vážení vzorků.



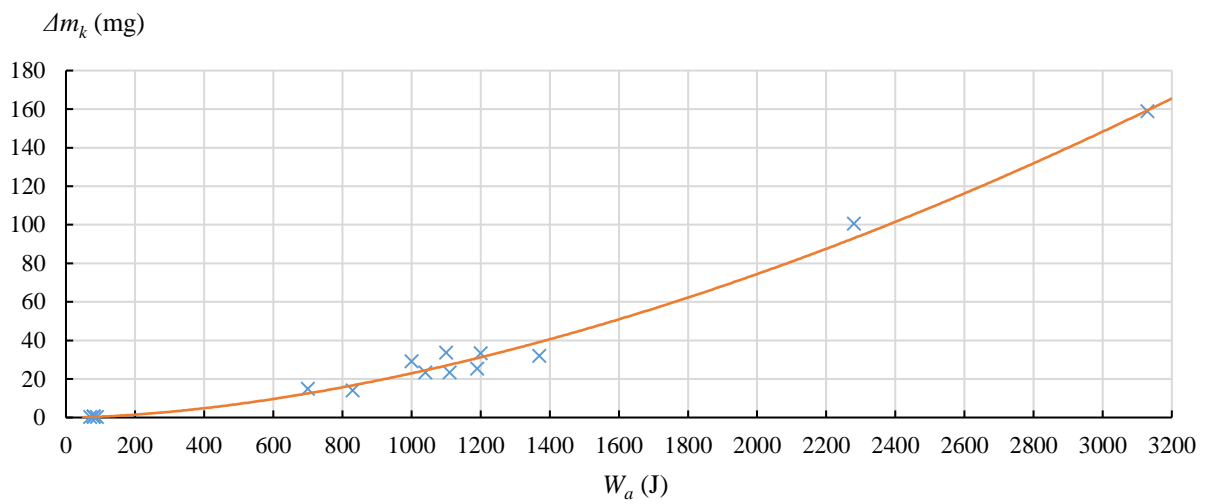
Obrázek 92 – Závislost úbytku materiálu Poly 1 na obloukové energii.



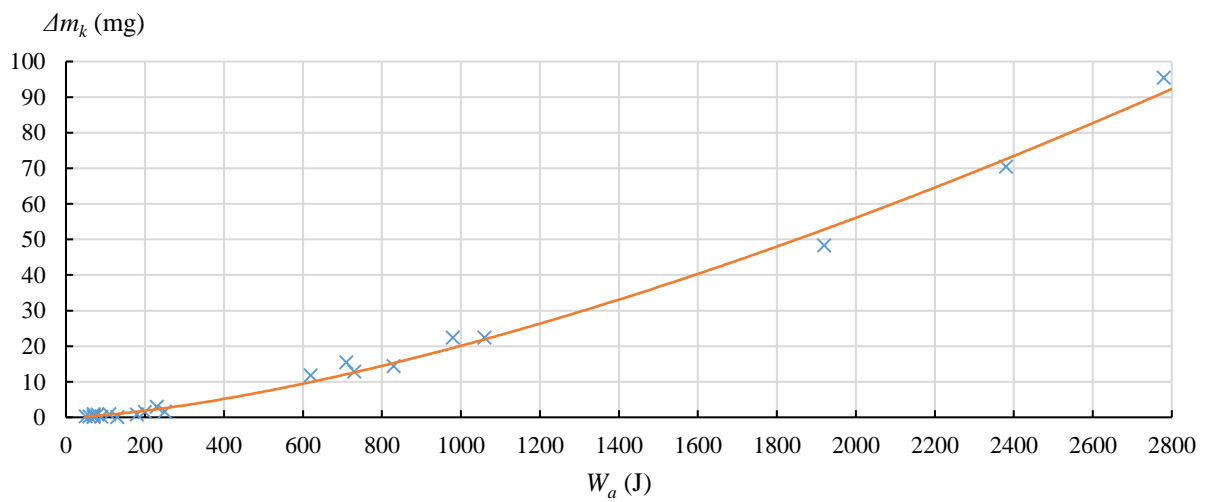
Obrázek 93 – Závislost úbytku materiálu Poly 2 na obloukové energii.



Obrázek 94 – Závislost úbytku materiálu Poly 3 na obloukové energii.



Obrázek 95 – Závislost úbytku materiálu Poly 4 na obloukové energii.



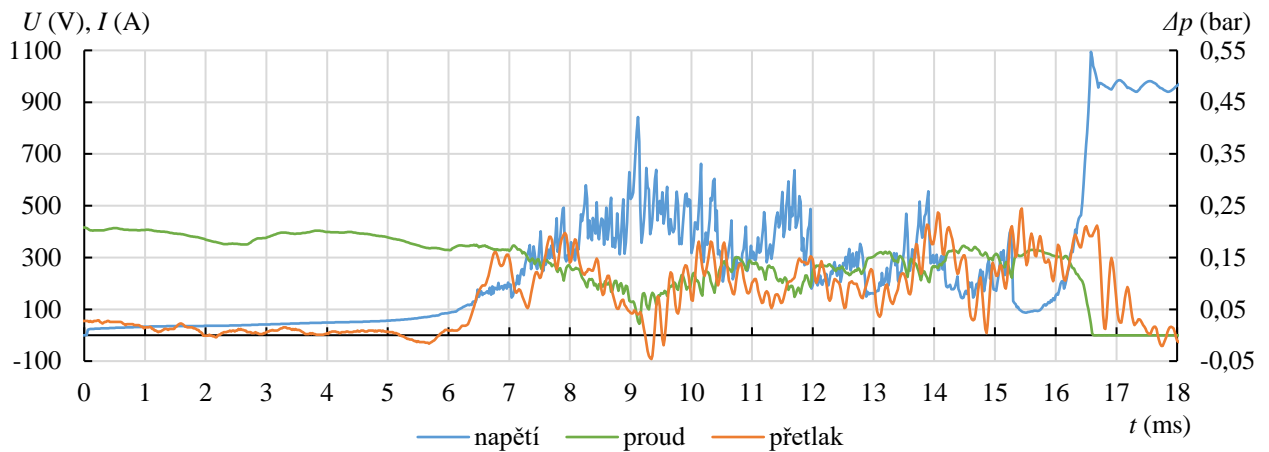
Obrázek 96 – Závislost úbytku materiálu Poly 5 na obloukové energii.

### Příloha 3 – vyhodnocená naměřená data z testů kapitoly 6

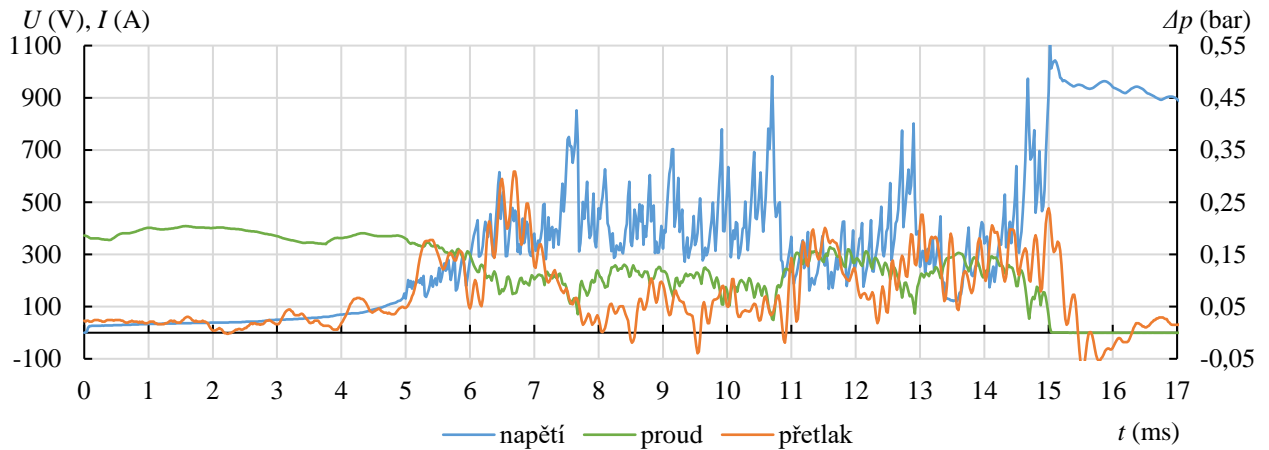
Číslo testu	$I^2t$	$I^2ta$	$I^2tp$	$I_{max}$	$U_{amax}$	$W_a$	$t_i$	$t_a$	$t_p$	Teplota okolí	Rel. vlhkost	Tlak
	k(A <sup>2</sup> s)	k(A <sup>2</sup> s)	k(A <sup>2</sup> s)	(kA)	(V)	(kJ)	(ms)	(ms)	(ms)	(°C)	(%)	(hPa)
6.1	21,58	1,63	19,95	0,43	1094	0,87	140,0	16,6	123,4	21,4	18,4	986,2
6.2	21,73	1,28	20,45	0,43	1118	0,88	141,2	15,0	126,1	20,9	19,1	987,0
6.3	21,09	1,12	19,97	0,43	1062	0,77	137,0	13,1	123,8	21,2	18,8	986,9
6.4	20,92	0,87	20,05	0,43	981	0,43	133,0	8,7	124,3	21,2	18,2	986,1
6.5	21,17	1,05	20,12	0,43	1085	0,76	137,0	12,6	124,5	20,6	18,8	986,7
6.6	21,58	1,37	20,21	0,43	1044	0,86	140,1	15,0	125,0	21,0	17,9	985,7
6.7	22,07	1,59	20,48	0,43	1094	1,09	145,3	18,8	126,5	20,5	18,6	986,3
6.8	21,92	1,72	20,20	0,43	1009	1,06	143,0	18,5	124,5	20,0	18,7	985,9
6.9	22,34	1,84	20,49	0,43	1132	1,27	147,8	21,1	126,7	19,9	18,8	985,5
6.10	22,42	1,61	20,81	0,43	1022	1,00	146,7	17,8	128,9	19,7	19,5	986,1
6.11	21,70	1,75	19,95	0,43	1149	1,39	145,7	22,1	123,6	20,7	18,2	985,7
6.12	22,43	1,78	20,65	0,43	1024	1,11	146,9	19,3	127,7	19,4	19,8	985,9
6.13	22,15	1,95	20,20	0,43	991	1,36	147,5	22,2	125,3	19,5	19,3	985,9
6.14	23,24	2,92	20,32	0,43	942	2,97	167,6	42,2	125,4	18,9	20,0	985,5
6.15	23,93	3,19	20,74	0,43	831	2,66	167,0	40,6	126,4	17,5	20,4	985,5
6.16	22,16	1,57	20,59	0,43	882	0,85	140,1	15,7	124,3	19,7	17,9	985,4
6.17	22,37	2,68	19,68	0,43	900	3,02	163,9	42,4	121,5	19,7	18,2	985,4
6.18	24,28	3,15	21,13	0,43	816	2,40	166,9	38,2	128,7	19,4	18,6	985,3
6.21	23,45	3,10	20,35	0,43	648	2,96	166,8	42,1	124,6	20,0	17,8	985,2
6.22	24,05	3,17	20,89	0,43	528	2,88	168,8	41,8	127,0	19,6	18,1	984,4

Tabulka 23 – Data získaná při zkoumání interakce spínacího oblouku a blízkých materiálů z hlediska fyzikálních parametrů plazmatu (neúspěšné testy vyznačeny červeně).

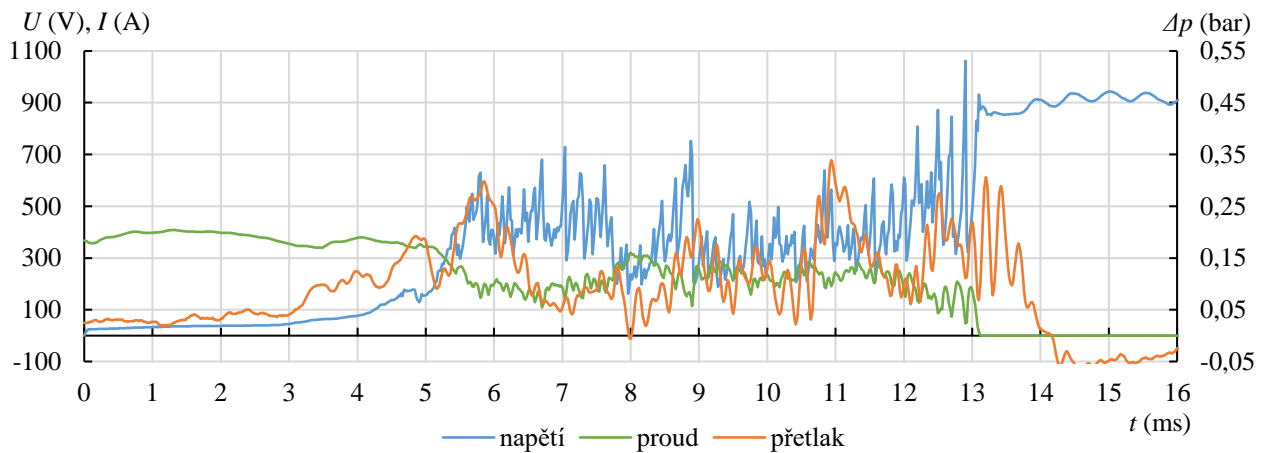
## Příloha 4 – průběhy přetlaku, napětí a proudu v experimentální zhášecí komoře při experimentech kapitoly 6



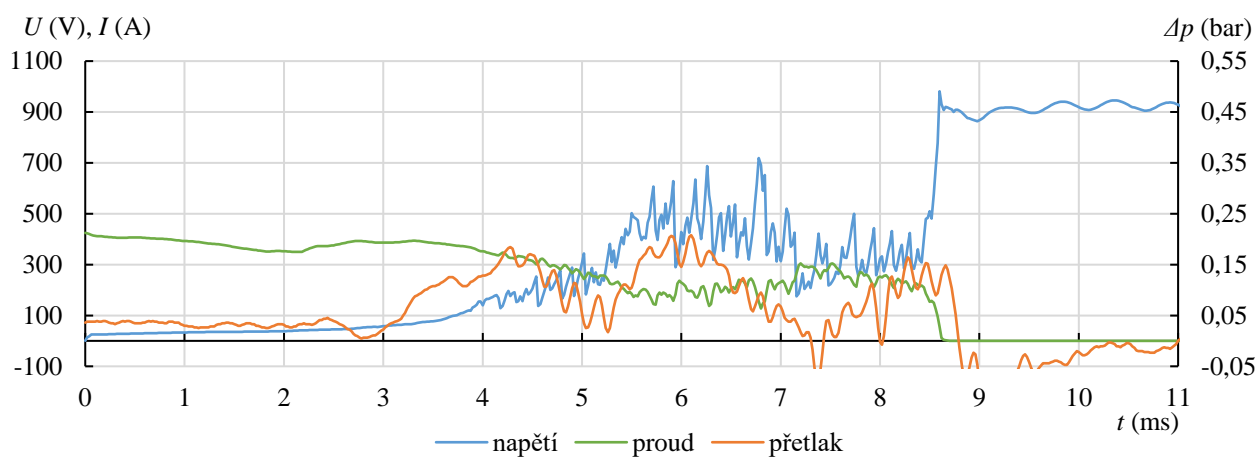
Obrázek 97 – Průběh napětí, proudu a přetlaku v experimentální zhášecí komoře vyrobené z materiálu Poly 3 během testu 6.1.



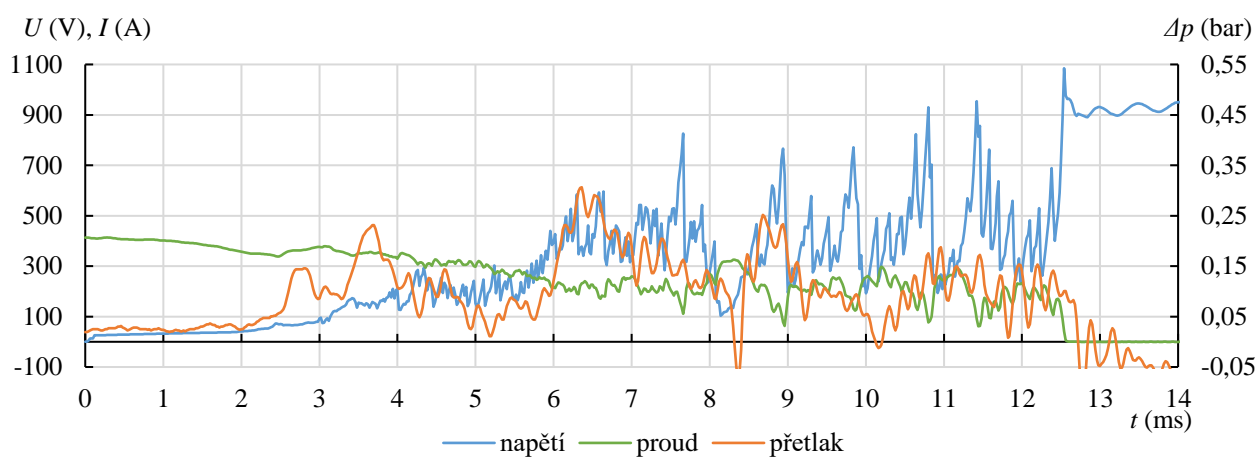
Obrázek 98 – Průběh napětí, proudu a přetlaku v experimentální zhášecí komoře vyrobené z materiálu Poly 3 během testu 6.2.



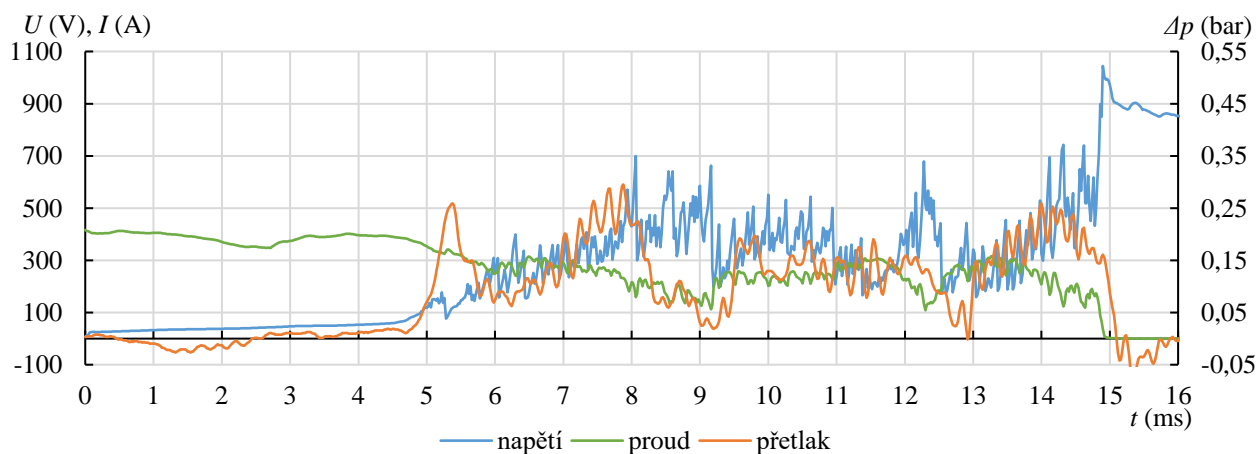
Obrázek 99 – Průběh napětí, proudu a přetlaku v experimentální zhášecí komoře vyrobené z materiálu Poly 3 během testu 6.3.



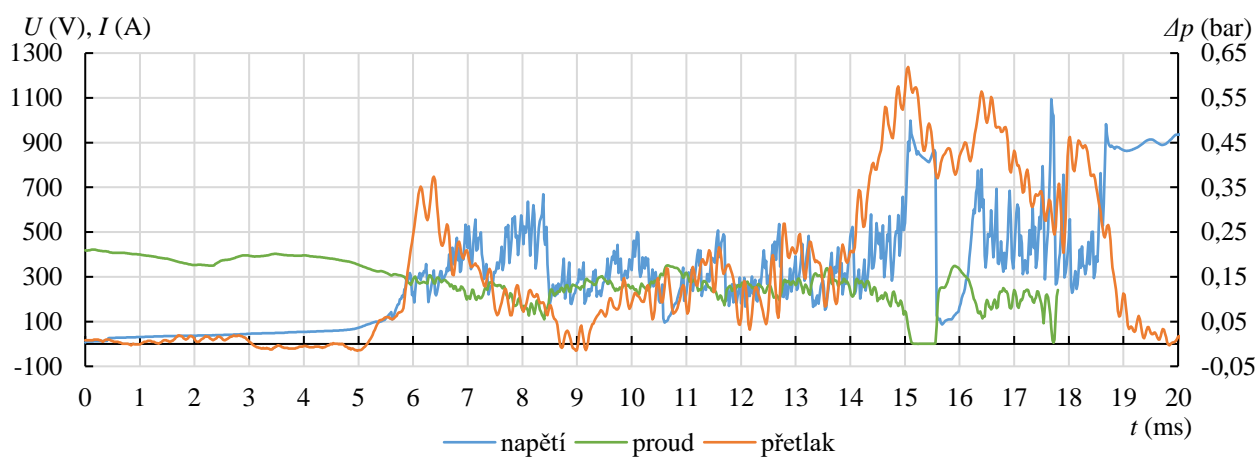
Obrázek 100 - Průběh napětí, proudu a přetlaku v experimentální zhášecí komoře vyrobené z materiálu Poly 3 během testu 6.4.



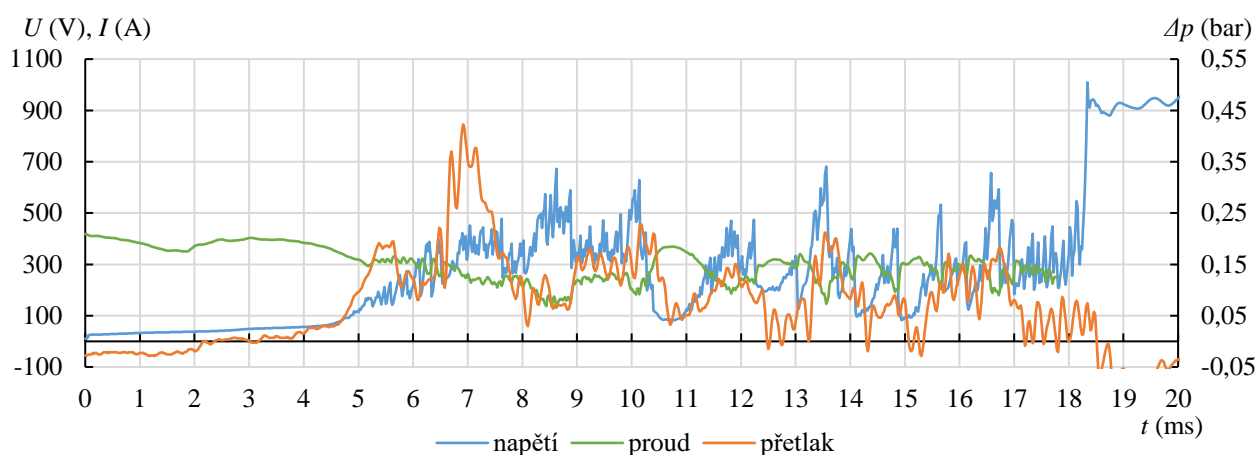
Obrázek 101 - Průběh napětí, proudu a přetlaku v experimentální zhášecí komoře vyrobené z materiálu Poly 3 během testu 6.5.



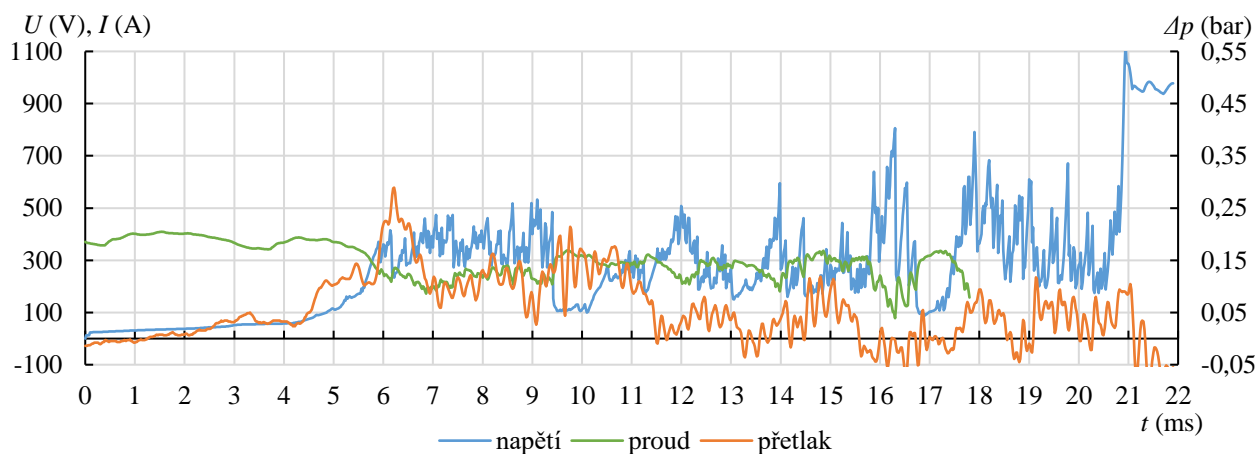
Obrázek 102 - Průběh napětí, proudu a přetlaku v experimentální zhášecí komoře vyrobené z materiálu Poly 1 během testu 6.6.



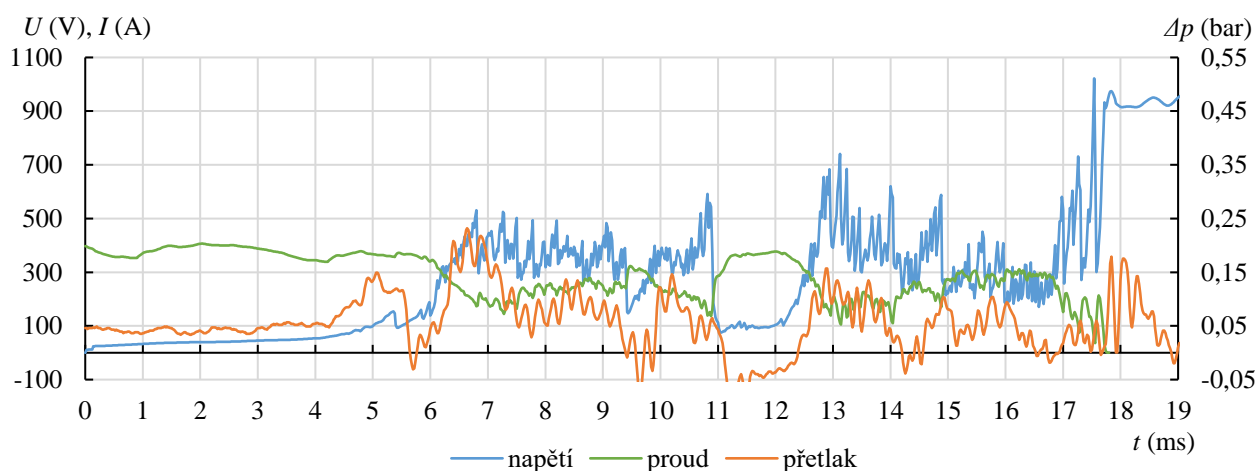
Obrázek 103 - Průběh napětí, proudu a přetlaku v experimentální zhášecí komoře vyrobené z materiálu Poly 1 během testu 6.7.



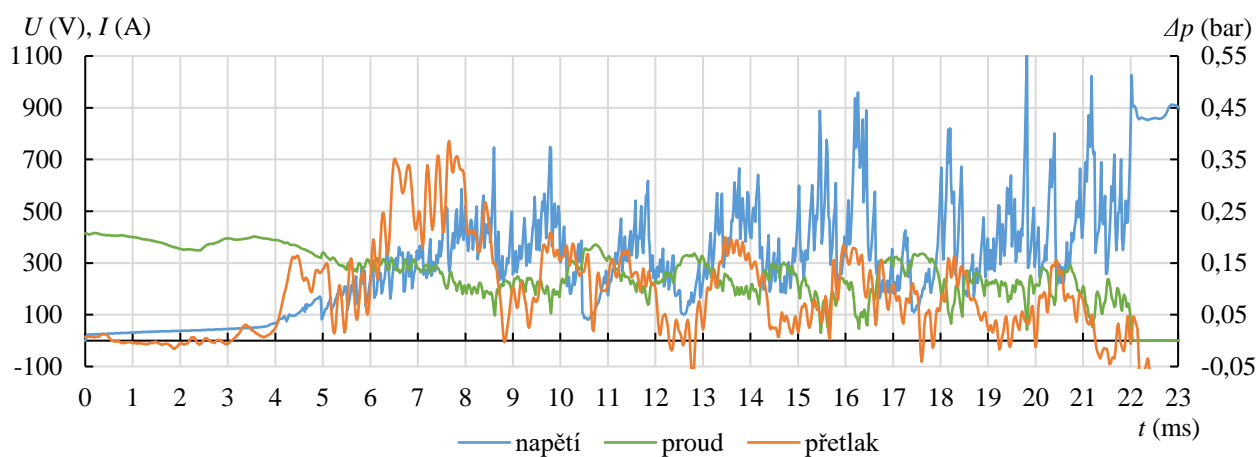
Obrázek 104 - Průběh napětí, proudu a přetlaku v experimentální zhášecí komoře vyrobené z materiálu Poly 1 během testu 6.8.



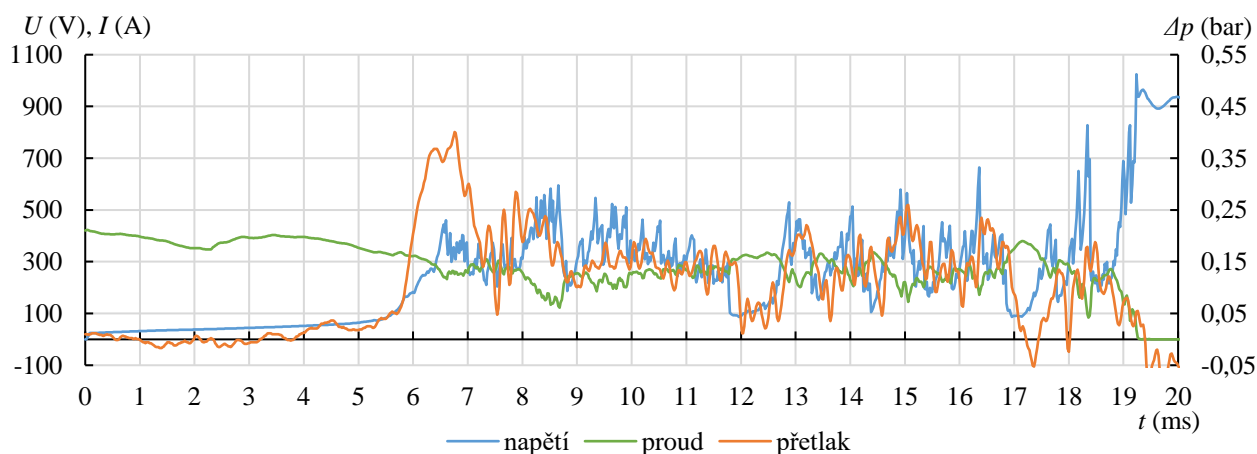
Obrázek 105 - Průběh napětí, proudu a přetlaku v experimentální zhášecí komoře vyrobené z materiálu Poly 1 během testu 6.9.



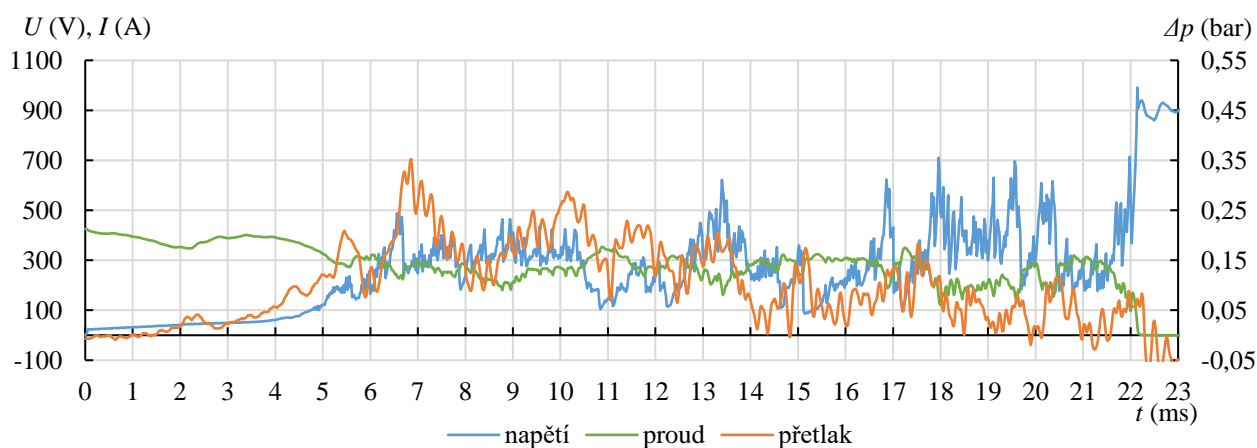
Obrázek 106 - Průběh napětí, proudu a přetlaku v experimentální zhášecí komoře vyrobené z materiálu Poly 1 během testu 6.10.



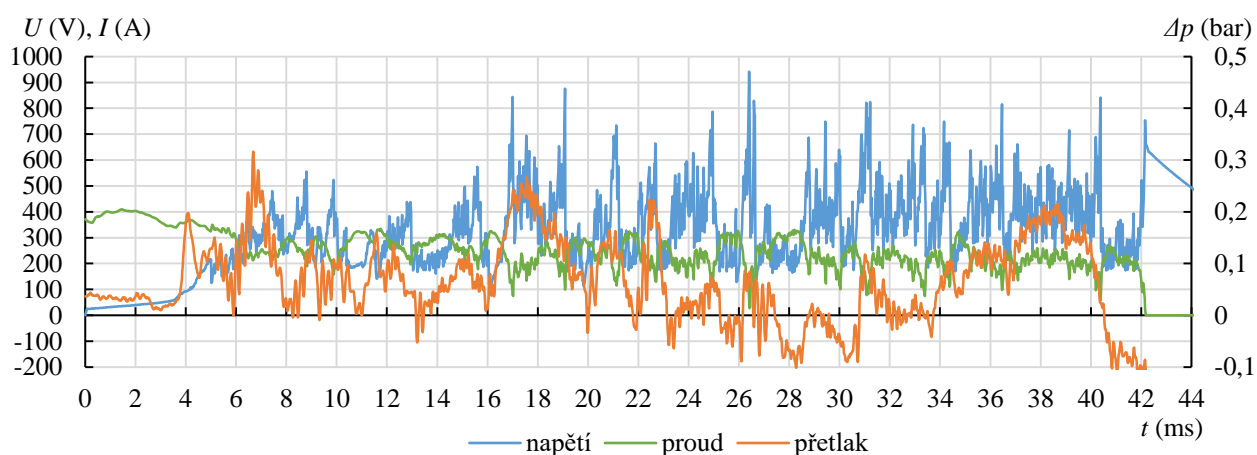
Obrázek 107 - Průběh napětí, proudu a přetlaku v experimentální zhášecí komoře vyrobené z materiálu Poly 2 během testu 6.11.



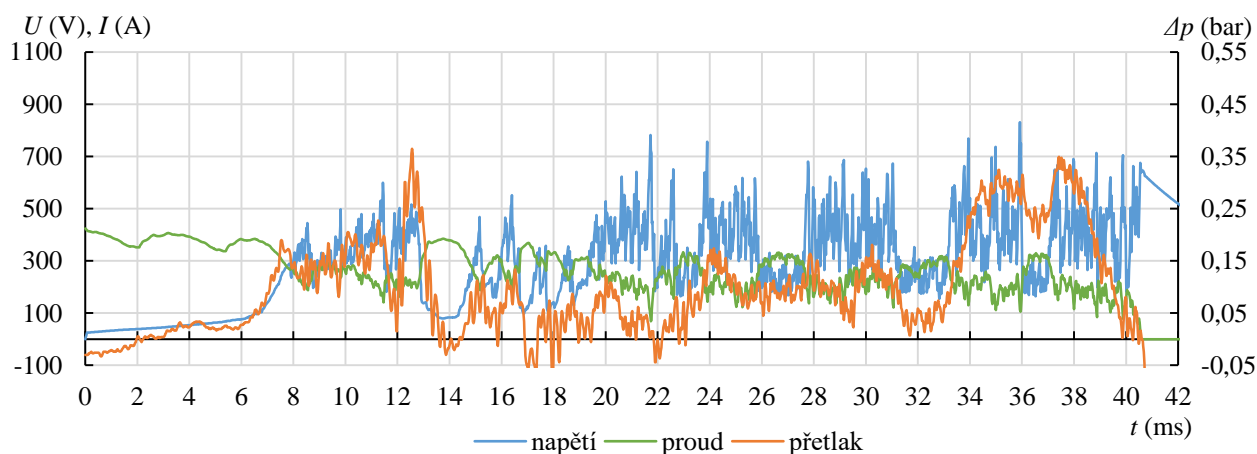
Obrázek 108 - Průběh napětí, proudu a přetlaku v experimentální zhášecí komoře vyrobené z materiálu Poly 2 během testu 6.12.



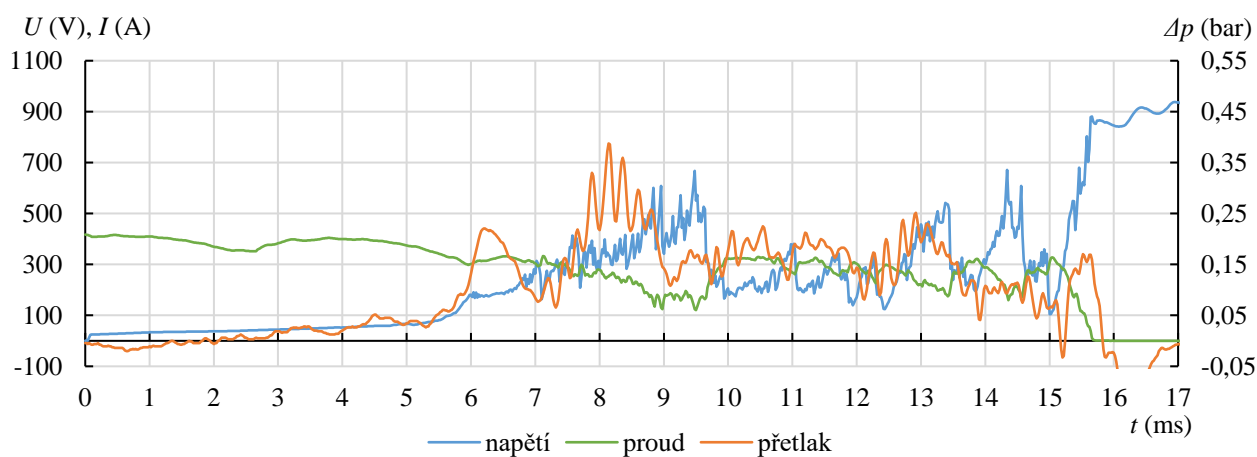
Obrázek 109 - Průběh napětí, proudu a přetlaku v experimentální zhášecí komoře vyrobené z materiálu Poly 2 během testu 6.13.



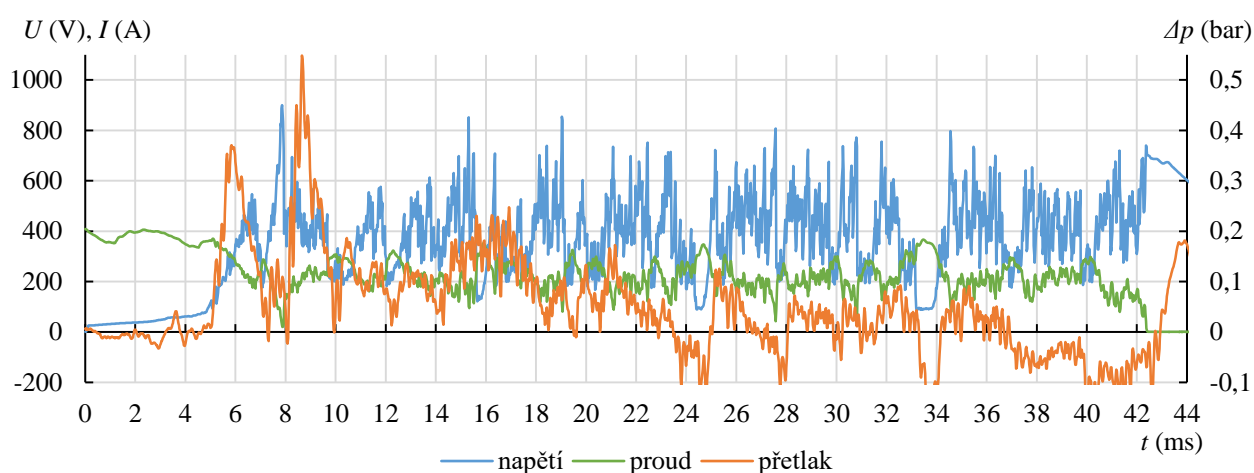
Obrázek 110 - Průběh napětí, proudu a přetlaku v experimentální zhášecí komoře vyrobené z materiálu Poly 2 během testu 6.14.



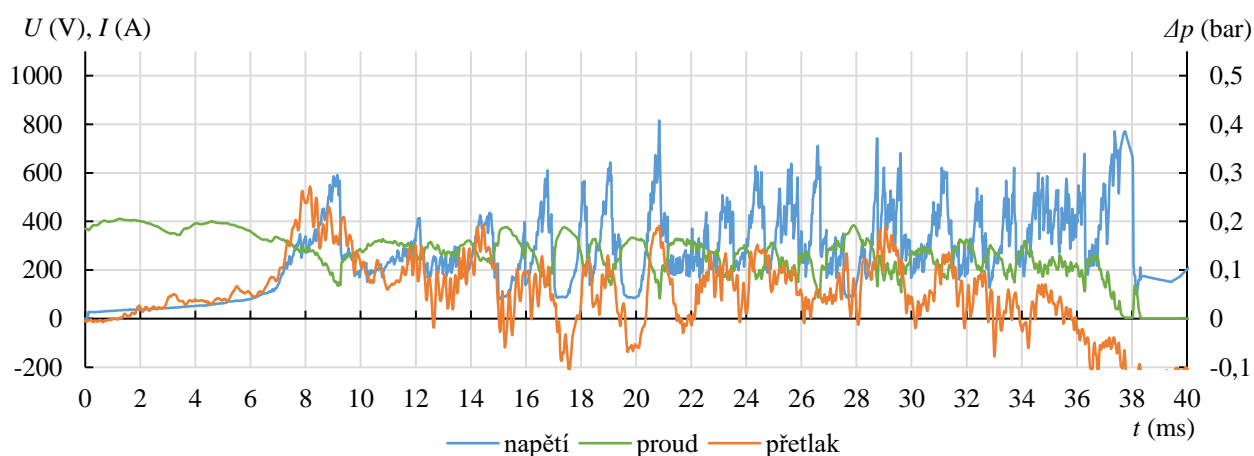
Obrázek 111 - Průběh napětí, proudu a přetlaku v experimentální zhášecí komoře vyrobené z materiálu Poly 2 během testu 6.15.



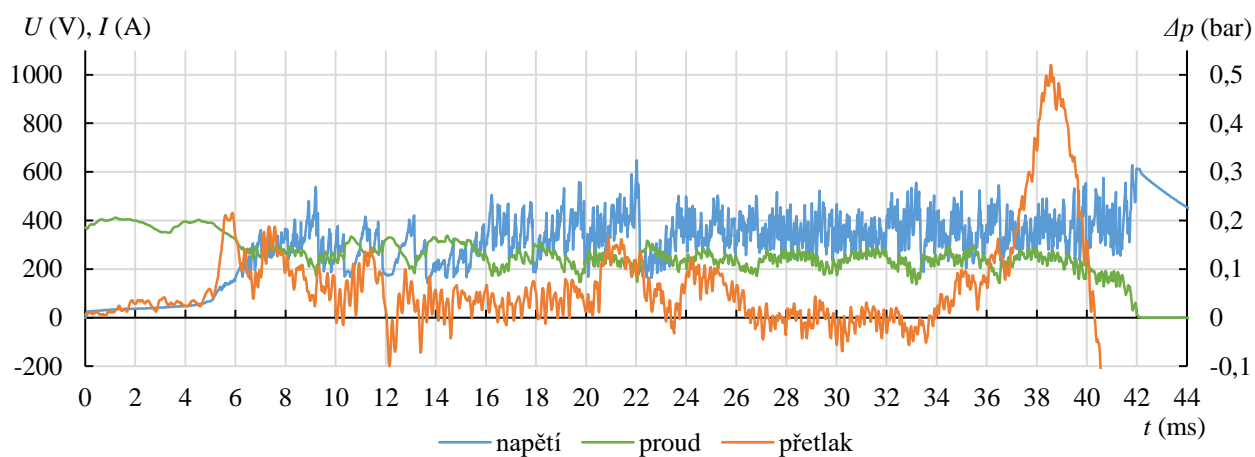
Obrázek 112 - Průběh napětí, proudu a přetlaku v experimentální zhášecí komoře vyrobené z materiálu Poly 5 během testu 6.16.



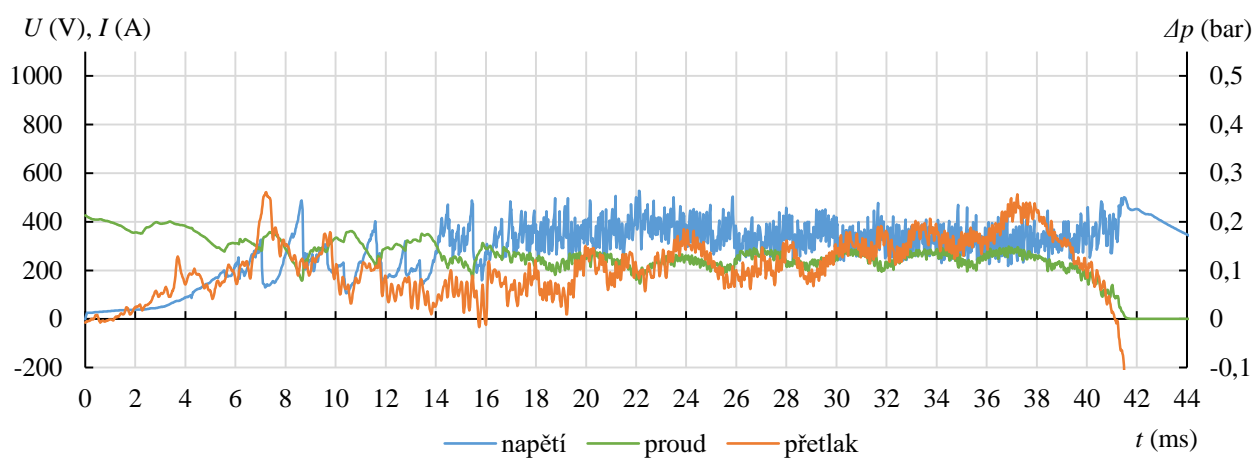
Obrázek 113 - Průběh napětí, proudu a přetlaku v experimentální zhášecí komoře vyrobené z materiálu Poly 5 během testu 6.17.



Obrázek 114 - Průběh napětí, proudu a přetlaku v experimentální zhášecí komoře vyrobené z materiálu Poly 5 během testu 6.18.

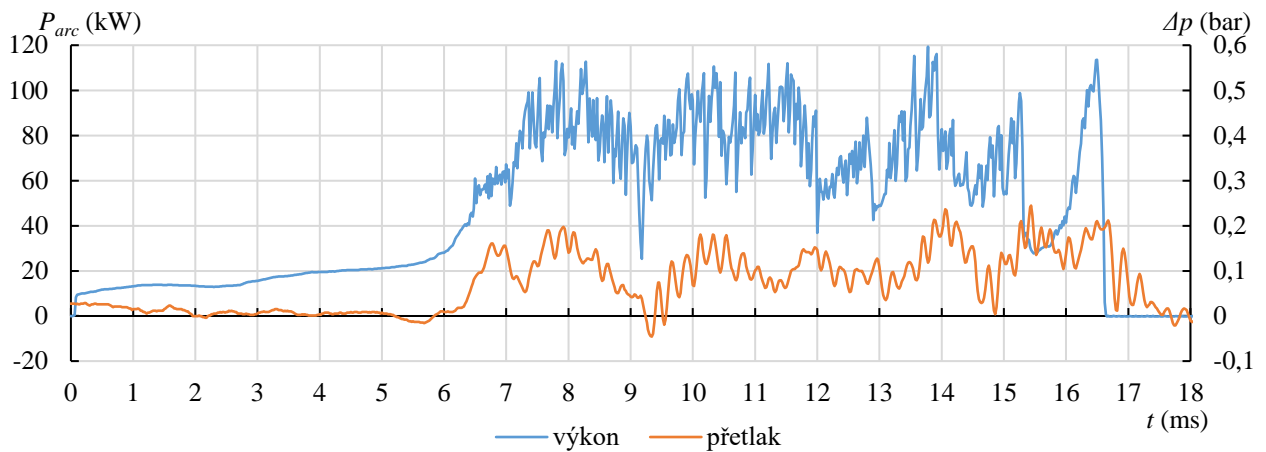


Obrázek 115 - Průběh napětí, proudu a přetlaku v experimentální zhášecí komoře vyrobené z materiálu Poly 4 během testu 6.21.

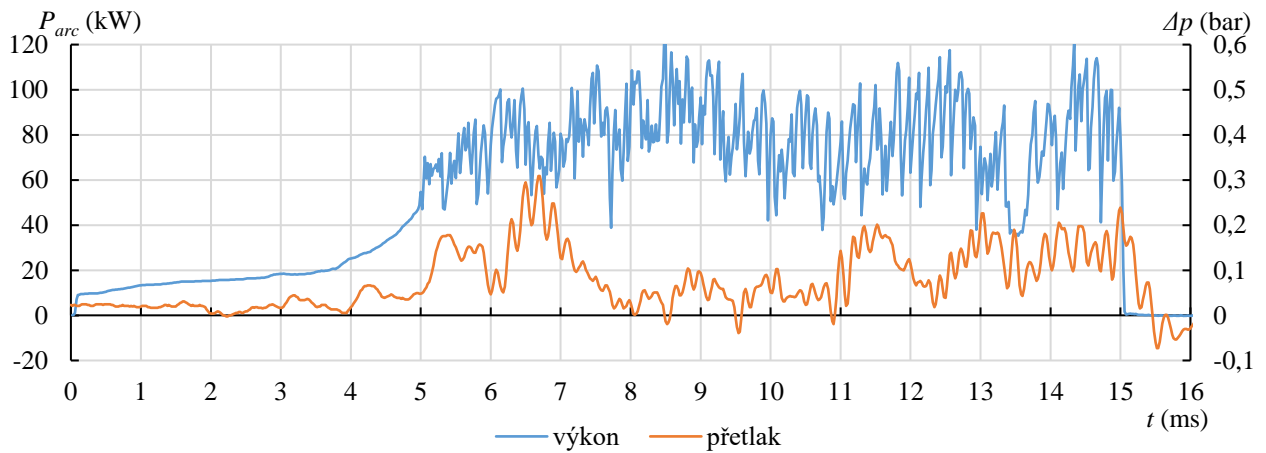


Obrázek 116 - Průběh napětí, proudu a přetlaku v experimentální zhášecí komoře vyrobené z materiálu Poly 4 během testu 6.22.

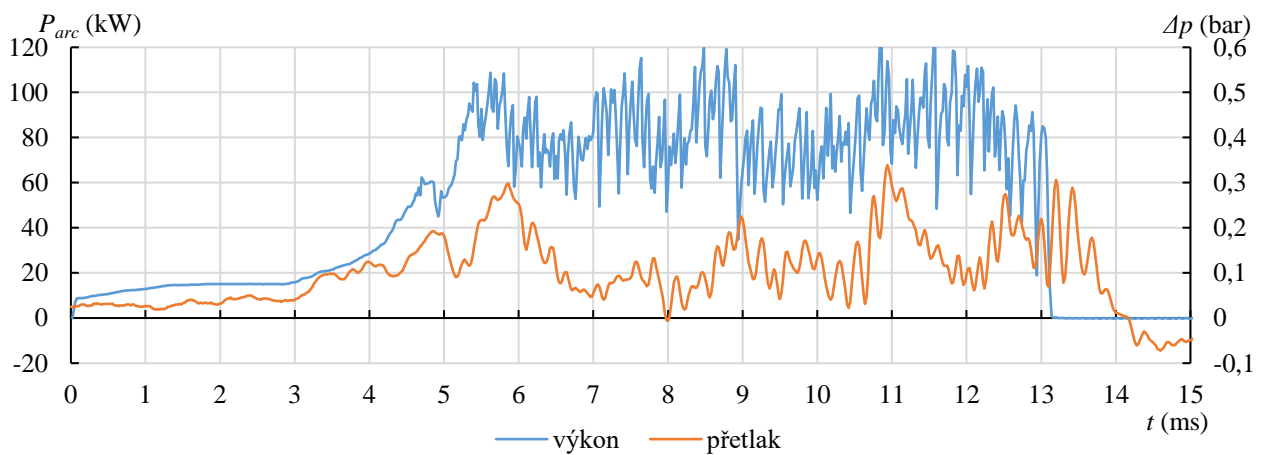
## Příloha 5 – průběhy přetlaku a výkonu oblouku v experimentální zhášecí komoře při testech kapitoly 6



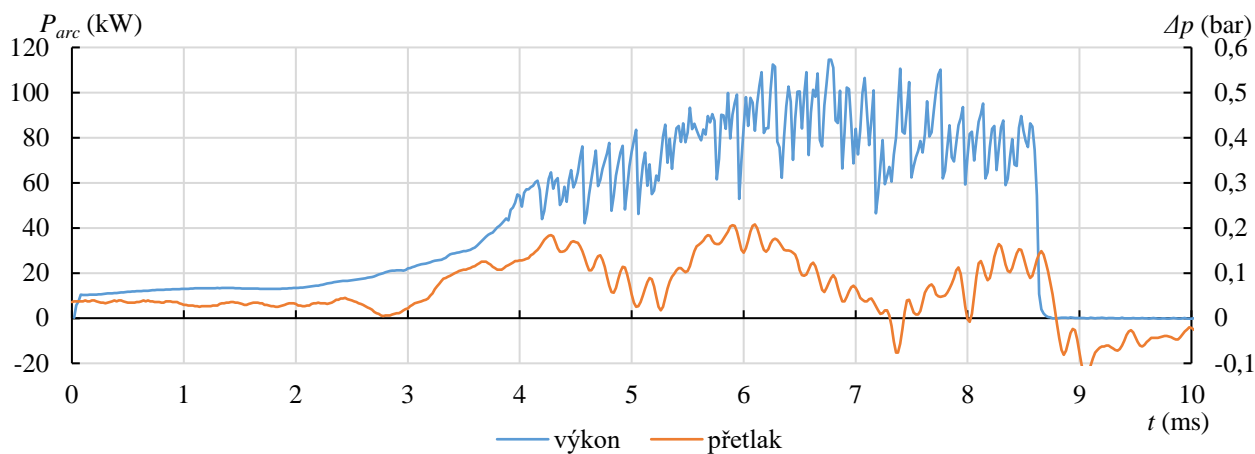
Obrázek 117 - Průběh výkonu a přetlaku v experimentální zhášecí komoře vyrobené z materiálu Poly 3 během testu 6.1.



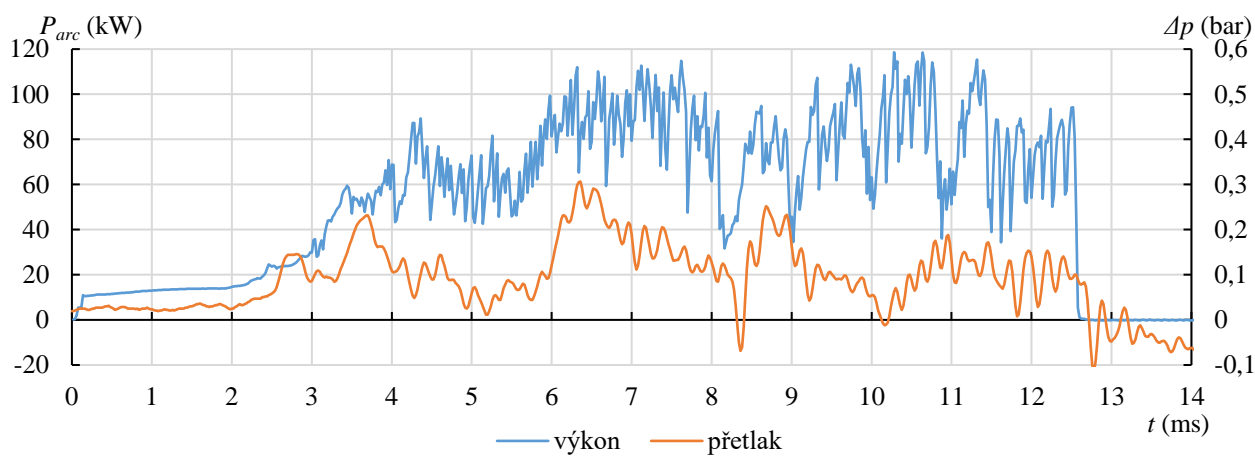
Obrázek 118 - Průběh výkonu a přetlaku v experimentální zhášecí komoře vyrobené z materiálu Poly 3 během testu 6.2.



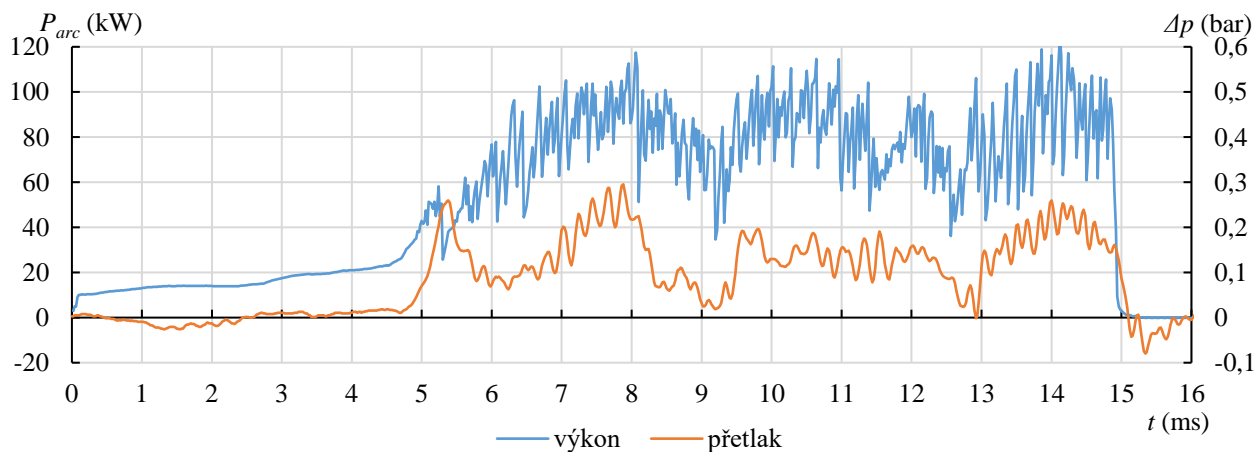
Obrázek 119 - Průběh výkonu a přetlaku v experimentální zhášecí komoře vyrobené z materiálu Poly 3 během testu 6.3.



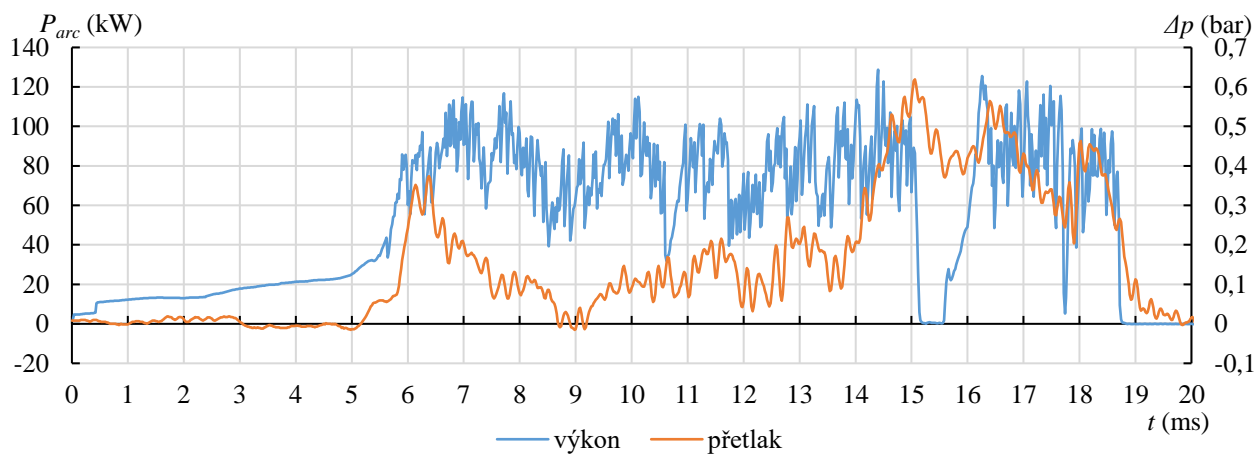
Obrázek 120 - Průběh výkonu a přetlaku v experimentální zhášecí komoře vyrobené z materiálu Poly 3 během testu 6.4.



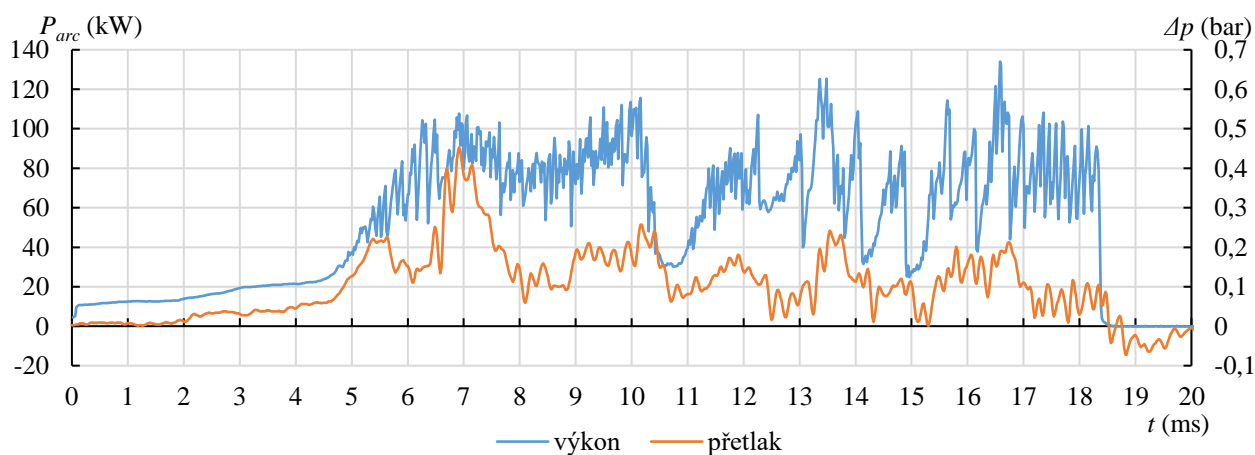
Obrázek 121 - Průběh výkonu a přetlaku v experimentální zhášecí komoře vyrobené z materiálu Poly 3 během testu 6.5.



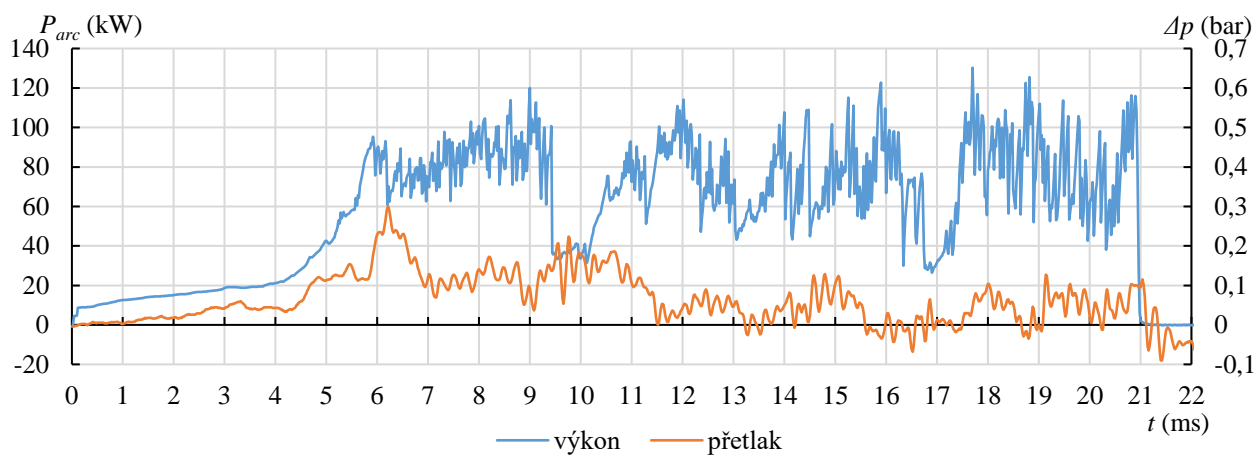
Obrázek 122 - Průběh výkonu a přetlaku v experimentální zhášecí komoře vyrobené z materiálu Poly 1 během testu 6.6.



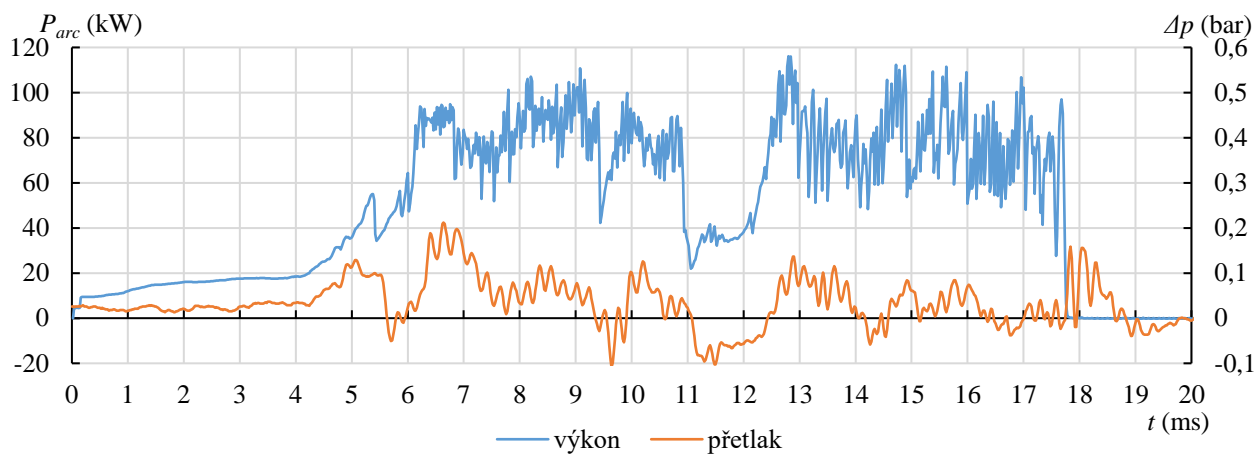
Obrázek 123 - Průběh výkonu a přetlaku v experimentální zhášecí komoře vyrobené z materiálu Poly 1 během testu 6.7.



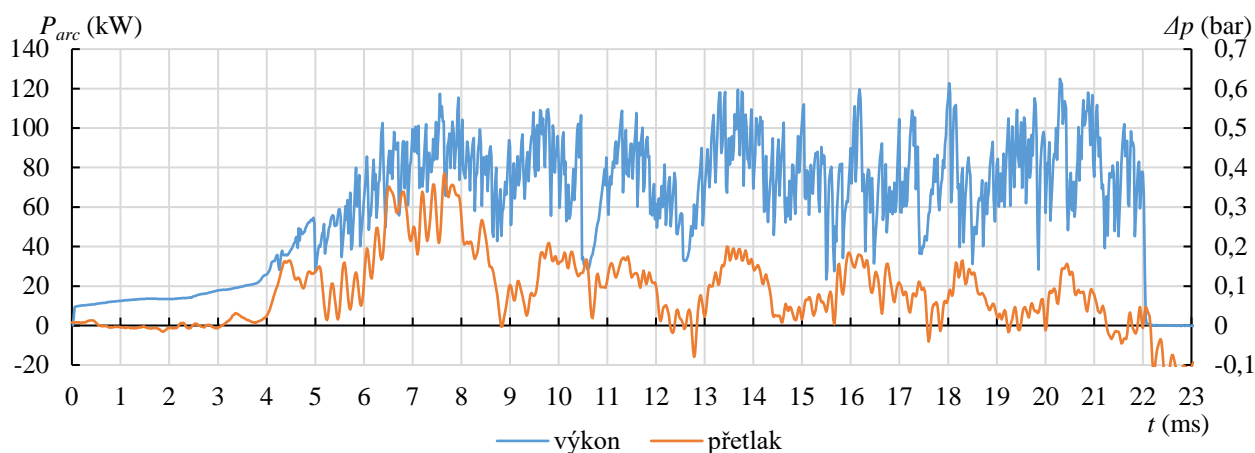
Obrázek 124 - Průběh výkonu a přetlaku v experimentální zhášecí komoře vyrobené z materiálu Poly 1 během testu 6.8.



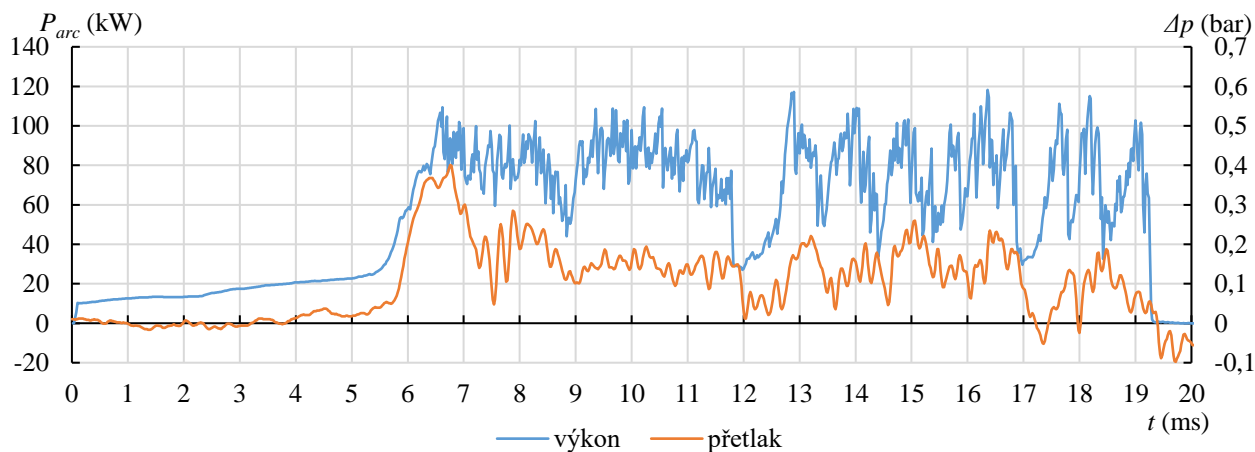
Obrázek 125 - Průběh výkonu a přetlaku v experimentální zhášecí komoře vyrobené z materiálu Poly 1 během testu 6.9.



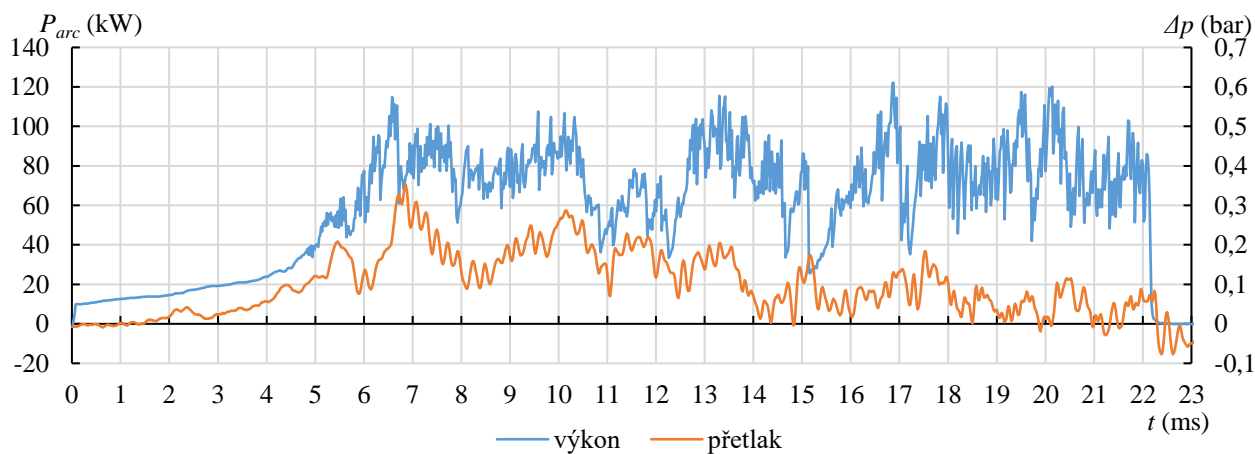
Obrázek 126 - Průběh výkonu a přetlaku v experimentální zhášecí komoře vyrobené z materiálu Poly 1 během testu 6.10.



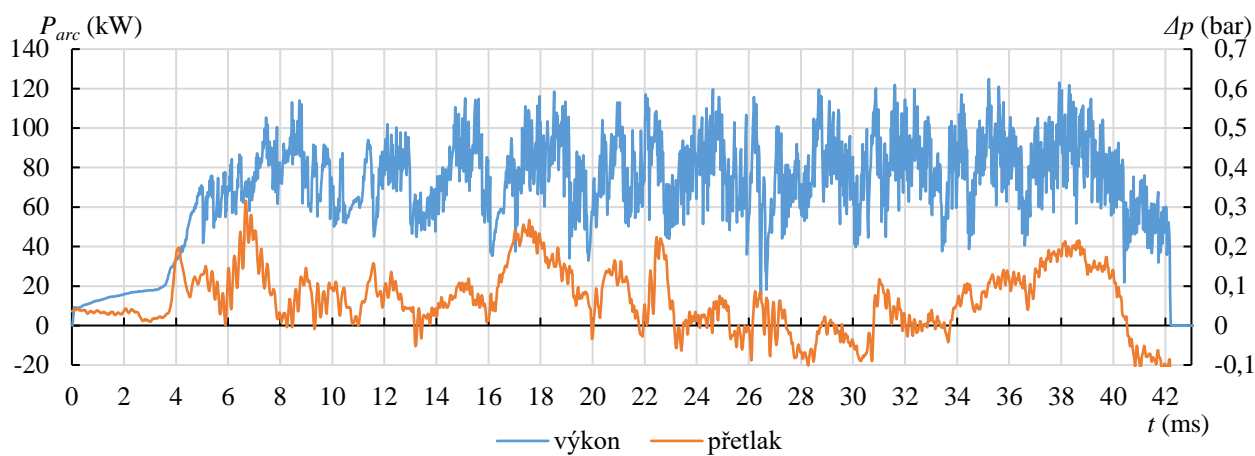
Obrázek 127 - Průběh výkonu a přetlaku v experimentální zhášecí komoře vyrobené z materiálu Poly 2 během testu 6.11.



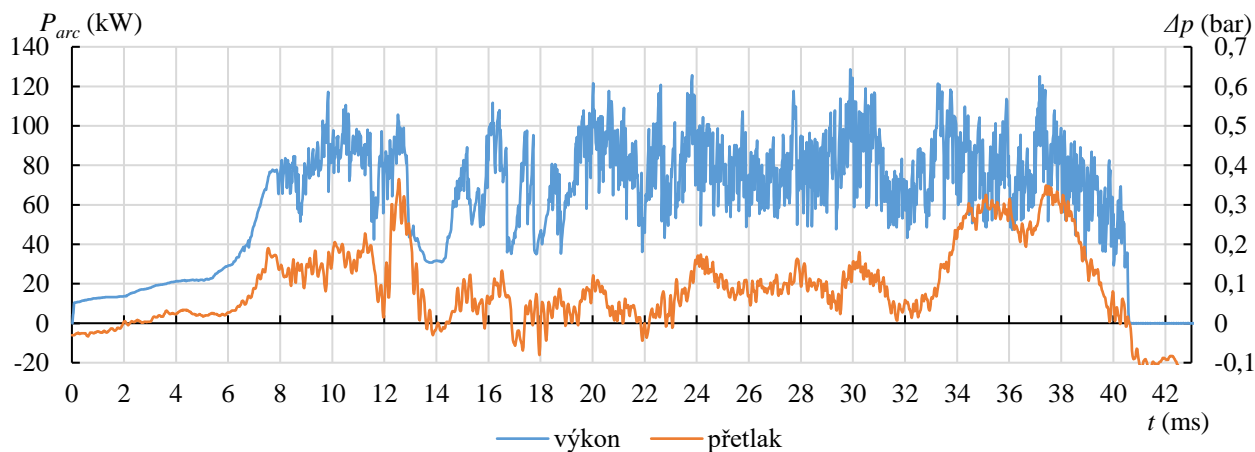
Obrázek 128 - Průběh výkonu a přetlaku v experimentální zhášecí komoře vyrobené z materiálu Poly 2 během testu 6.12.



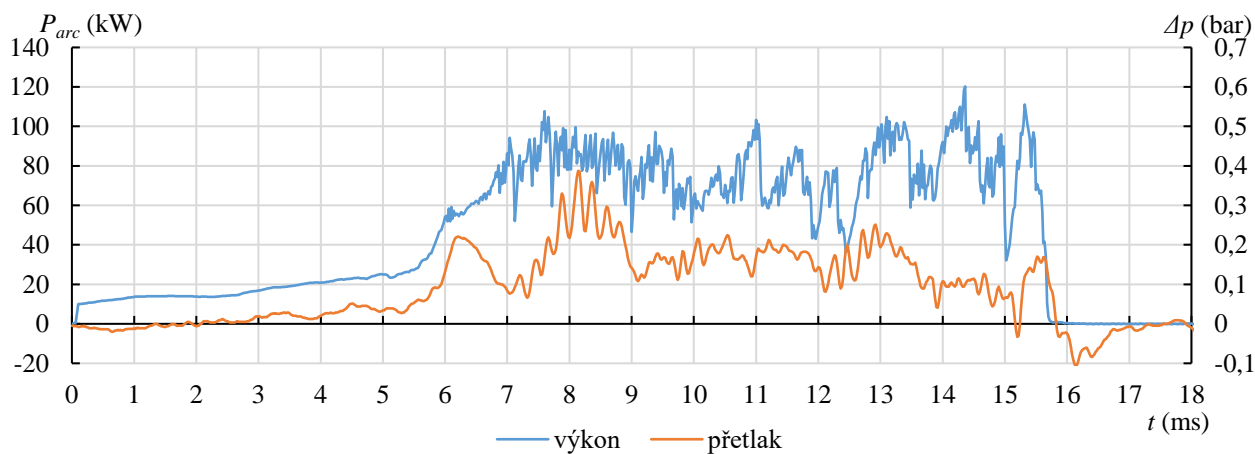
Obrázek 129 - Průběh výkonu a přetlaku v experimentální zhášecí komoře vyrobené z materiálu Poly 2 během testu 6.13.



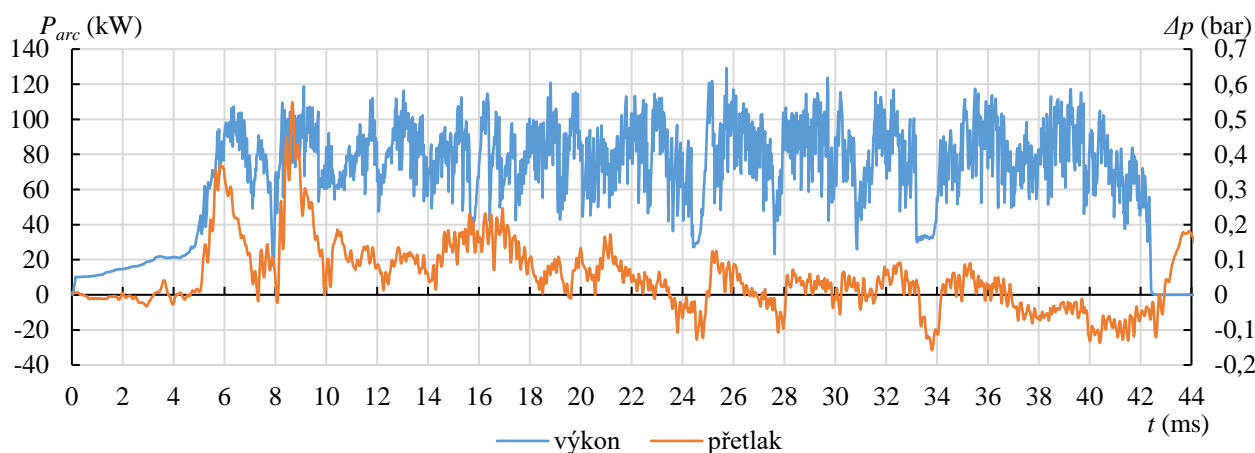
Obrázek 130 - Průběh výkonu a přetlaku v experimentální zhášecí komoře vyrobené z materiálu Poly 2 během testu 6.14.



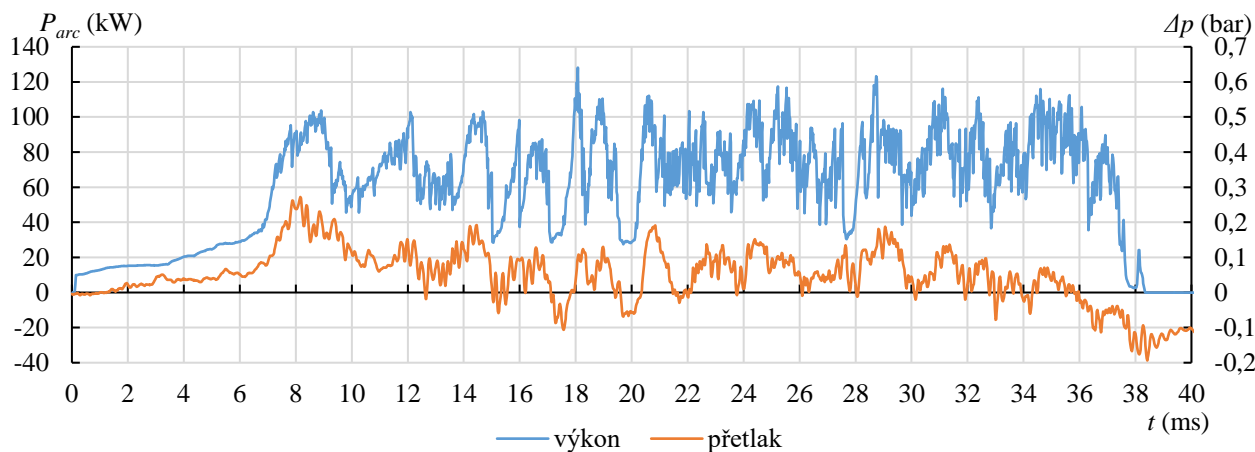
Obrázek 131 - Průběh výkonu a přetlaku v experimentální zhášecí komoře vyrobené z materiálu Poly 2 během testu 6.15.



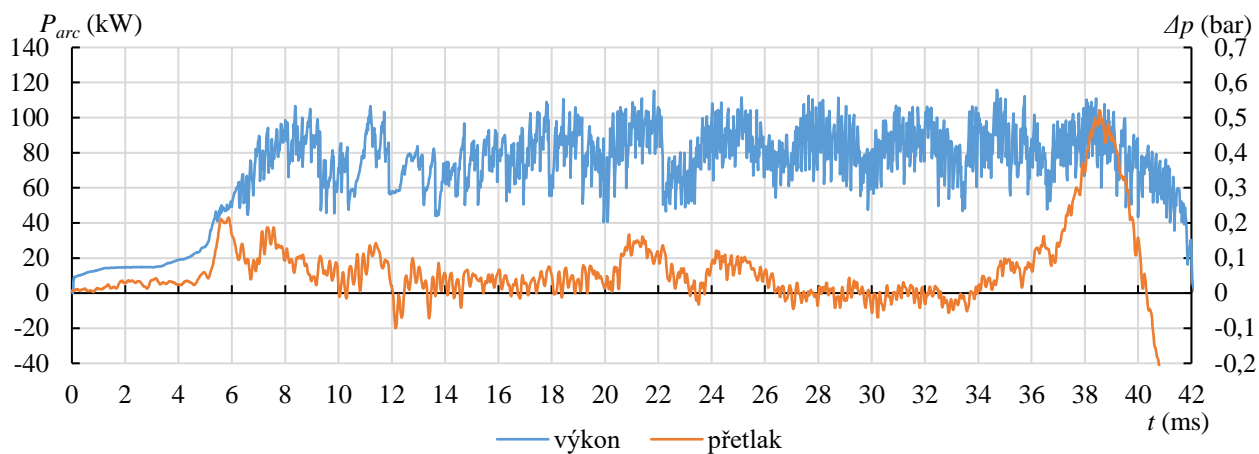
Obrázek 132 - Průběh výkonu a přetlaku v experimentální zhášecí komoře vyrobené z materiálu Poly 5 během testu 6.16.



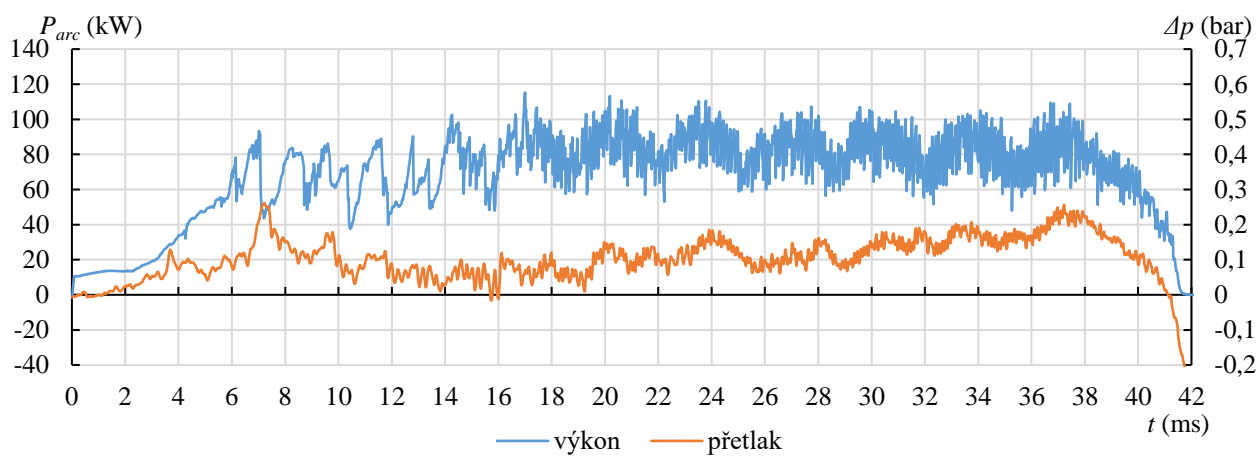
Obrázek 133 - Průběh výkonu a přetlaku v experimentální zhášecí komoře vyrobené z materiálu Poly 5 během testu 6.17.



Obrázek 134 - Průběh výkonu a přetlaku v experimentální zhášecí komoře vyrobené z materiálu Poly 5 během testu 6.18.



Obrázek 135 - Průběh výkonu a přetlaku v experimentální zhášecí komoře vyrobené z materiálu Poly 4 během testu 6.21.



Obrázek 136 - Průběh výkonu a přetlaku v experimentální zhášecí komoře vyrobené z materiálu Poly 4 během testu 6.22.