

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE**

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Analýza výbojů při stejnosměrném napětí**

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jan KOVANDA**  
Osobní číslo: **E16N0104P**  
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Elektroenergetika**  
Název tématu: **Analýza výbojů při stejnosměrném napětí**  
Zadávající katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Popište různé druhy částečných a neúplných výbojů na vysokém napětí.
2. Popište princip měření částečných výbojů.
3. Navrhněte experimenty pro měření detektorem částečných výbojů na DC napětí.
4. Realizujte experimenty a analyzujte dosažené výsledky.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah kvalifikační práce: **40 - 60 stran**

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

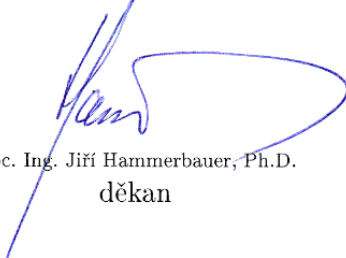
Seznam odborné literatury:

- 1. Antonín Veverka: Technika vysokých napětí**
- 2. Publikace v databázi IEEE Xplore**


Vedoucí diplomové práce: **Ing. Miroslav Hromádka, Ph.D.**  
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání diplomové práce: **10. října 2017**

Termín odevzdání diplomové práce: **24. května 2018**

  
Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.  
děkan



  
Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 10. října 2017

## **Abstrakt**

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na vznik částečných a neúplných výbojů při stejnosměrném napětí a jejich analýzu. Jelikož v dnešní době právě roste využití stejnosměrných vysokonapěťových zařízení, jsou v této práci kromě vzniku popsány jednotlivé druhy částečných a neúplných výbojů na vysokém napětí a jejich vlivy.

V této práci je také uveden princip měření částečných výbojů a jejich diagnostika. Práce se dále zabývá návrhem experimentů pro měření detektorem částečných výbojů na stejnosměrném napětí, jejich porovnáním s výboji vzniklých při střídavém napětí a celkovým vyhodnocením naměřených výsledků. Snahou těchto experimentů je vytvoření standartu pro měření a vyhodnocení při stejnosměrném namáhání daných zařízení.

Text je rozdělen do čtyř částí; první se zabývá popisem částečných a neúplných výbojů na vysokém napětí a jejich druhů, druhá principem měření částečných výbojů, třetí návrhem a realizací experimentů pro měření detektorem částečných výbojů na střídavém a stejnosměrném napětí, a čtvrtá část realizací experimentů a analyzováním dosažených výsledků.

## **Klíčová slova**

Částečný a neúplný výboj, koróna, vysoké napětí, stejnosměrné napětí, dielektrikum

## **Abstract**

Presented master thesis is focused on emergence of partial and incomplete DC voltage discharges and their analysis. Because at these times grows utilization DC high-voltage devices, apart from the emergence, individual types of partial and incomplete high voltage discharges and their influences are described in this work.

In this work is also mentioned the measuring principle of partial discharges and their diagnostics. Next this thesis also deals with designing experiments for the measurement of the partial discharge detector at the DC voltage, their comparison with discharges created at AC voltage and overall evaluation of the measured results. The aim of these experiments is to create a standard for measuring and evaluating given devices under DC stress.

Text is divided into four parts; the first part is concerned with description of partial and incomplete high-voltage discharges and their kinds, second part the principle of measuring partial discharges, third part design experiments for measurement of partial discharge detector on AC and DC voltages, and fourth part by realization of experiments and analyzing achieved results.

## **Key words**

Partial and incomplete discharge, corona, high voltage, DC voltage, dielectric

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.



.....  
podpis

V Plzni dne 22.5.2018

Jan Kovanda

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval mému vedoucímu diplomové práce Ing. Miroslavovi Hromádkovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, metodické vedení práce, za asistenci a vedení při provádění experimentů v laboratoři a pomoci s vyhodnocením naměřených výsledků. Také bych rád poděkoval oponentce mé diplomové práce Doc. Ing. Evě Müllerové, Ph.D za vyhodnocení posudku.

Rád bych také poděkoval mým rodičům a prarodičům za veškerou podporu během mého studia. Především bych chtěl poděkovat své babičce Albíně Tomáškové za poskytnutí klidného zázemí, péče, pochopení a povzbuzování v celém průběhu mého studia.

V neposlední řadě patří také poděkování mým dlouholetým kamarádům ze střední školy, se kterými jsem procházel studentským životem i na vysoké škole. Bez Vás, mí drazí kamarádi, by studium nikdy nebylo tak pestré, plné vtipných chvil a společného obohacování získanými znalostmi. Ať žije Legendární KKD!

# Obsah

ÚVOD .....	9
<b>1 ČÁSTEČNÉ VÝBOJE .....</b>	<b>12</b>
1.1 POPIS ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ A JEJICH DŮSLEDKY .....	12
1.2 DRUHY ČÁSTEČNÝCH A NEÚPLNÝCH VÝBOJŮ NA VYSOKÉM NAPĚTÍ .....	13
1.2.1 Korónové výboje .....	14
1.2.1.1 Kladné korónové výboje .....	14
1.2.1.2 Záporné korónové výboje .....	15
1.2.2 Povrchové a klouzavé výboje .....	16
1.2.3 Výboje v dutinách a výboje na tenkém hrotu v dielektriku .....	17
1.2.4 Výboje ve vrstvené izolaci .....	17
1.2.5 Treeing .....	17
<b>2 MĚŘENÍ ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ .....</b>	<b>18</b>
2.1 VELIČINY SLEDOVANÉ PŘI MĚŘENÍ ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ .....	18
2.1.1 Počáteční napětí částečných výbojů .....	18
2.1.2 Zhášecí napětí částečných výbojů .....	18
2.1.3 Zdánlivý náboj .....	19
2.1.4 Četnost impulzů .....	19
2.1.5 Opakovací frekvence impulzů .....	19
2.1.6 Fázový úhel a čas výskytu impulzu částečného výboje .....	19
2.1.7 Výkon částečných výbojů .....	19
2.1.8 Střední proud částečných výbojů .....	20
2.1.9 Střední kvadratický součet .....	20
2.1.10 Střední kmitočet pásma a šířka pásma .....	20
2.1.11 Přenosová impedance .....	20
2.1.12 Dolní a horní mezní frekvence .....	21
2.2 ZPŮSOBY DETEKCE ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ .....	21
2.2.1 Elektrická detekce částečných výbojů .....	21
2.2.1.1 Galvanická metoda .....	22
2.2.1.2 Kapacitní a induktivní snímače .....	25
2.2.1.3 Induktivně vázané sondy .....	25
2.2.1.4 Diferenciální elektromagnetické sondy .....	26
2.2.1.5 Kapacitní drážkové sondy .....	26
2.2.2 Akustická detekce částečných výbojů .....	27
2.2.3 Optická detekce částečných výbojů .....	28
2.2.4 Chemická detekce částečných výbojů .....	28
<b>3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST .....</b>	<b>30</b>
3.1 ICMSYSTEM – DETEKTOR ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ .....	30
3.1.1 ICMSystem – Hardware .....	30
3.1.2 ICMSystem – Software .....	35
3.2 NÁVRH EXPERIMENTŮ PRO MĚŘENÍ DETEKTOREM ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ .....	39
3.2.1 Zkoušené objekty a použité zdroje vysokého napětí (AC a DC) .....	40
3.2.2 Navržený postup pro měření částečných výbojů detektorem .....	42
<b>4 REALIZACE EXPERIMENTŮ A ANALÝZA DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ .....</b>	<b>47</b>
4.1.1 Měření částečných výbojů na střídavém napětí (AC) .....	48
4.1.2 AC výboje na kalibračním jiskřišti s výskytem pouze v záporné polaritě napětí – Zdroj: Transformátor ČKD .....	49
4.1.3 AC výboje na kalibračním jiskřišti s výskytem v obou polaritách napětí – Zdroj: Transformátor ČKD .....	53



4.1.4	AC výboje na kalibračním jiskřišti s výskytem pouze v záporné polaritě napětí – Zdroj: Transformátor Tettex .....	57
4.1.5	AC výboje na kalibračním jiskřišti s výskytem v obou polaritách napětí – Zdroj: Transformátor Tettex .....	61
4.2	MĚŘENÍ ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ NA STEJNOSMĚRNÉM NAPĚTÍ (DC) .....	63
4.2.1	DC výboje na kalibračním jiskřišti negativní polaritě napětí – Zdroj: Modulární systém GBS 13/270 .....	64
4.2.2	DC výboje na kalibračním jiskřišti pozitivní polaritě napětí – Zdroj: Modulární systém GBS 13/270 .....	68
4.2.3	DC výboje na kalibračním jiskřišti negativní polaritě napětí – Zdroj vysokého napětí Tesla BS 222a .....	75
4.2.4	DC výboje na kalibračním jiskřišti pozitivní polaritě napětí – Zdroj vysokého napětí Tesla BS 222a .....	79
4.2.5	DC výboje na modelu VN vedení negativní polaritě napětí – Zdroj: Modulární systém GBS 13/270 .....	82
4.2.6	DC výboje na modelu VN vedení pozitivní polaritě napětí – Zdroj: Modulární systém GBS 13/270 .....	85
4.3	POROVNÁNÍ AC VÝBOJŮ NA KALIBRAČNÍM JISKŘIŠTI .....	89
4.4	POROVNÁNÍ DC VÝBOJŮ NEGATIVNÍ POLARITY NAPĚTÍ NA KALIBRAČNÍM JISKŘIŠTI .....	91
4.5	POROVNÁNÍ DC VÝBOJŮ POZITIVNÍ POLARITY NAPĚTÍ NA KALIBRAČNÍM JISKŘIŠTI .....	94
4.6	POROVNÁNÍ CHARAKTERU STEJNOSMĚRNÝCH ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ NA KALIBRAČNÍM JISKŘIŠTI A MODELU VN VEDENÍ .....	96
4.6.1	Porovnání DC výbojů na kalibračním jiskřišti a modelu VN vedení negativní polaritě napětí ... ..	96
4.6.2	Porovnání DC výbojů na kalibračním jiskřišti a modelu VN vedení pozitivní polaritě napětí ..	98
<b>ZÁVĚR .....</b>		<b>100</b>
<b>PŘÍLOHY .....</b>		<b>1</b>
PŘÍLOHA A – TECHNICKÉ PARAMETRY MĚŘICÍHO PŘÍSTROJE ICMSYSTEM .....		
PŘÍLOHA B – ŠTÍTKOVÉ HODNOTY TRANSFORMÁTORU ČKD STALINGRAD .....		
PŘÍLOHA C – TRANSFORMÁTOR TETTEX, ŠTÍTKOVÉ HODNOTY .....		
PŘÍLOHA D – USPOŘÁDÁNÍ MODULÁRNÍHO SYSTÉMU GBS 13/270, KATALOGOVÉ ÚDAJE .....		
PŘÍLOHA E – ORIENTACE VYSOKONAPĚŤOVÝCH USMĚRŇOVAČŮ G 270 .....		
PŘÍLOHA F – SPECIFIKACE ZDROJE VYSOKÉHO NAPĚTÍ TESLA BS 222A .....		
PŘÍLOHA G – REALIZACE EXPERIMENTŮ V PROSTORU VYSOKONAPĚŤOVÉ LABORATOŘE KEE ZÁPADOČESKÉ UNIVERZITY V PLZNI .....		
PŘÍLOHA H – AC/DC PEAK VOLTMETER MU17, KATALOGOVÉ ÚDAJE .....		
PŘÍLOHA I – DIGITÁLNÍ VOLTMETR METRA HIT 18S, SPECIFIKACE .....		
PŘÍLOHA J – VEŠKERÉ ZÁZNAMY VELIKOSTI NÁBOJE NA FÁZI PRO 4,3 kV AC VÝBOJE NA KALIBRAČNÍM JISKŘIŠTI S VÝSKYTEM POUZE V ZÁPORNÉ POLARITĚ NAPĚTÍ – ZDROJ: TRANSFORMÁTOR ČKD .....		
PŘÍLOHA K – VEŠKERÉ ZÁZNAMY VELIKOSTI NÁBOJE NA FÁZI PRO 7,5 kV AC VÝBOJE NA KALIBRAČNÍM JISKŘIŠTI S VÝSKYTEM POUZE V ZÁPORNÉ POLARITĚ NAPĚTÍ – ZDROJ: TRANSFORMÁTOR ČKD .....		
PŘÍLOHA L – VEŠKERÉ ZÁZNAMY VELIKOSTI NÁBOJE NA FÁZI PRO 8,5 kV AC VÝBOJE NA KALIBRAČNÍM JISKŘIŠTI S VÝSKYTEM V OBOU POLARITÁCH NAPĚTÍ – ZDROJ: TRANSFORMÁTOR ČKD .....		
PŘÍLOHA M – VEŠKERÉ ZÁZNAMY VELIKOSTI NÁBOJE NA FÁZI PRO 11,1 kV AC VÝBOJE NA KALIBRAČNÍM JISKŘIŠTI S VÝSKYTEM V OBOU POLARITÁCH NAPĚTÍ – ZDROJ: TRANSFORMÁTOR ČKD .....		
PŘÍLOHA N – VEŠKERÉ ZÁZNAMY VELIKOSTI NÁBOJE NA FÁZI PRO 4,3 kV AC VÝBOJE NA KALIBRAČNÍM JISKŘIŠTI S VÝSKYTEM POUZE V ZÁPORNÉ POLARITĚ NAPĚTÍ – ZDROJ: TRANSFORMÁTOR TETTEX .....		
PŘÍLOHA O – VEŠKERÉ ZÁZNAMY VELIKOSTI NÁBOJE NA FÁZI PRO 7,5 kV AC VÝBOJE NA KALIBRAČNÍM JISKŘIŠTI S VÝSKYTEM POUZE V ZÁPORNÉ POLARITĚ NAPĚTÍ – ZDROJ: TRANSFORMÁTOR TETTEX .....		
PŘÍLOHA P – VEŠKERÉ ZÁZNAMY VELIKOSTI NÁBOJE NA FÁZI PRO 11,1 kV AC VÝBOJE NA KALIBRAČNÍM JISKŘIŠTI S VÝSKYTEM V OBOU POLARITÁCH NAPĚTÍ – ZDROJ: TRANSFORMÁTOR TETTEX ....		
PŘÍLOHA Q – ODPOROVÝ DĚLIČ POUŽITÝ PRO DIGITÁLNÍ VOLTMETR METRA HIT 18S .....		
PŘÍLOHA R – VEŠKERÉ ZÁZNAMY VELIKOSTI NÁBOJE V ZÁVISLOSTI NA DOBĚ SBĚRU DAT PRO 6,6 kV DC		

NEGATIVNÍCH VÝBOJŮ NA KALIBRAČNÍM JISKŘIŠTI – ZDROJ: MODULÁRNÍ SYSTÉM GBS 13/270 .....	24
PŘÍLOHA S – VEŠKERÉ ZÁZNAMY VELIKOSTI NÁBOJE V ZÁVISLOSTI NA DOBĚ SBĚRU DAT PRO 9,5 kV DC NEGATIVNÍCH VÝBOJŮ NA KALIBRAČNÍM JISKŘIŠTI – ZDROJ: MODULÁRNÍ SYSTÉM GBS 13/270 .....	25
PŘÍLOHA T – VEŠKERÉ ZÁZNAMY VELIKOSTI NÁBOJE V ZÁVISLOSTI NA DOBĚ SBĚRU DAT PRO 7,2 kV DC POZITIVNÍCH VÝBOJŮ NA KALIBRAČNÍM JISKŘIŠTI – ZDROJ: MODULÁRNÍ SYSTÉM GBS 13/270 .....	27
PŘÍLOHA U – VEŠKERÉ ZÁZNAMY VELIKOSTI NÁBOJE V ZÁVISLOSTI NA DOBĚ SBĚRU DAT PRO 12,5 kV DC POZITIVNÍCH VÝBOJŮ NA KALIBRAČNÍM JISKŘIŠTI – ZDROJ: MODULÁRNÍ SYSTÉM GBS 13/270 .....	28
PŘÍLOHA V – VEŠKERÉ ZÁZNAMY VELIKOSTI NÁBOJE V ZÁVISLOSTI NA DOBĚ SBĚRU DAT PRO 13,9 kV DC POZITIVNÍCH VÝBOJŮ NA KALIBRAČNÍM JISKŘIŠTI ZA POUŽITÍ VNĚJŠÍHO OFUKOVÁNÍ VENTILÁTOREM – ZDROJ: MODULÁRNÍ SYSTÉM GBS 13/270 .....	29
PŘÍLOHA W – VEŠKERÉ ZÁZNAMY VELIKOSTI NÁBOJE V ZÁVISLOSTI NA DOBĚ SBĚRU DAT PRO 7,5 kV DC NEGATIVNÍCH VÝBOJŮ NA KALIBRAČNÍM JISKŘIŠTI – ZDROJ VYSOKÉHO NAPĚTÍ TESLA BS 222A .....	31
PŘÍLOHA X – VEŠKERÉ ZÁZNAMY VELIKOSTI NÁBOJE V ZÁVISLOSTI NA DOBĚ SBĚRU DAT PRO 10,3 kV DC NEGATIVNÍCH VÝBOJŮ NA KALIBRAČNÍM JISKŘIŠTI – ZDROJ VYSOKÉHO NAPĚTÍ TESLA BS 222A .....	33
PŘÍLOHA Y – VEŠKERÉ ZÁZNAMY VELIKOSTI NÁBOJE V ZÁVISLOSTI NA DOBĚ SBĚRU DAT PRO 9 kV DC POZITIVNÍCH VÝBOJŮ NA KALIBRAČNÍM JISKŘIŠTI – ZDROJ VYSOKÉHO NAPĚTÍ TESLA BS 222A .....	35
PŘÍLOHA Z – VEŠKERÉ ZÁZNAMY VELIKOSTI NÁBOJE V ZÁVISLOSTI NA DOBĚ SBĚRU DAT PRO 12,2 kV DC POZITIVNÍCH VÝBOJŮ NA KALIBRAČNÍM JISKŘIŠTI – ZDROJ VYSOKÉHO NAPĚTÍ TESLA BS 222A .....	36
PŘÍLOHA ZA – VEŠKERÉ ZÁZNAMY VELIKOSTI NÁBOJE V ZÁVISLOSTI NA DOBĚ SBĚRU DAT PRO 13,9 kV DC NEGATIVNÍCH VÝBOJŮ NA MODELU VN VEDENÍ – ZDROJ: MODULÁRNÍ SYSTÉM GBS 13/270....	37
PŘÍLOHA ZB – VEŠKERÉ ZÁZNAMY VELIKOSTI NÁBOJE V ZÁVISLOSTI NA DOBĚ SBĚRU DAT PRO 19,1 kV DC NEGATIVNÍCH VÝBOJŮ NA MODELU VN VEDENÍ – ZDROJ: MODULÁRNÍ SYSTÉM GBS 13/270....	38
PŘÍLOHA ZC – VEŠKERÉ ZÁZNAMY VELIKOSTI NÁBOJE V ZÁVISLOSTI NA DOBĚ SBĚRU DAT PRO 14,5 kV DC POZITIVNÍCH VÝBOJŮ NA MODELU VN VEDENÍ – ZDROJ: MODULÁRNÍ SYSTÉM GBS 13/270..	39
PŘÍLOHA ZD – VEŠKERÉ ZÁZNAMY VELIKOSTI NÁBOJE V ZÁVISLOSTI NA DOBĚ SBĚRU DAT PRO 19,7 kV DC POZITIVNÍCH VÝBOJŮ NA MODELU VN VEDENÍ – ZDROJ: MODULÁRNÍ SYSTÉM GBS 13/270..	40

## Úvod

Předkládaná práce je zaměřena na vznik, působení a detekci částečných výbojů při střídavém, pozitivním stejnosměrném a negativním stejnosměrném napětí. V práci jsou popsány druhy a vliv působení částečných výbojů na izolační systém elektrických zařízení a strojů. Zvláštní zaměření je věnováno detektoru částečných výbojů, jeho částem, kalibraci a principu měření s praktickou realizací několika navržených experimentů. Tyto experimenty byly navrženy za účelem vytvoření určitého standartu pro měření a vyhodnocení při stejnosměrném namáhání daných zařízení, jelikož v dnešní době ještě stále neexistuje žádný předpis nebo norma pro tento druh měření.

Provedená měření by mohla přinést nejen informace o aktuálním stavu izolačních systémů, ale také o průbězích jejich stárnutí, které jsou v provozu velmi důležité nejen z hlediska údržby, ale také z hlediska celkové životnosti izolace. Na základě navrženého postupu a provedené analýzy částečných výbojů v této práci, by mohlo do budoucna dojít k modifikaci nebo vylepšení některých moderních technologií, které se používají pro výrobu izolačních systémů elektrotechnických zařízení.

Izolační systém by měl splňovat jeden ze základních požadavků, kterým je nulová nebo nízká hladina elektrických výbojů. V důsledku použité konstrukce, velikosti a typu elektrického namáhání se však v zařízení mohou tyto výboje objevovat. Vznik částečných výbojů nemusí nutně způsobit průraz izolačního systému, avšak mohou často opakovaně zapalovat v určitých kritických lokalitách, které jsou obvykle dány geometrií uspořádání nebo určitou vadou materiálu z výroby. S rostoucí intenzitou výbojů stoupá riziko poškození izolačního systému, které může postupně vést až k průrazu, a tím zničení celého zařízení v závislosti na jeho konstrukci. Diagnostika částečných výbojů se tak stala nedílnou součástí kontrolních operací, prováděných zvláště na elektrických zařízeních pracujících na hladině vysokého a velmi vysokého napětí. Cílem této diplomové práce je analyzovat a vyhodnotit detektorem získané záznamy částečných výbojů a vtypovat, které měřicí postupy a jaké zaznamenané veličiny, dávají dobrý obraz o stavu výbojové činnosti v zařízení při stejnosměrném namáhání.

## Seznam symbolů a zkratek

% .....	Procento
$\Delta f$ .....	Šířka pásma (Hz)
$^{\circ}\text{C}$ .....	Stupeň celsia
$\mu\text{C}$ .....	Mikrocoulomb
$\mu\text{s}$ .....	Mikrosekunda
A/D .....	Analog / Digital
AC.....	Alternating current – Střídavý
cm .....	Centimetr
CSC.....	Capacitive Slot Coupler
D .....	Střední kvadratický součet
DC.....	Direct Current – Stejnosměrný
DC- .....	Stejnosměrný negativní
DC+ .....	Stejnosměrný pozitivní
deg .....	Degree – stupeň ( $^{\circ}$ )
$f_m$ .....	Střední kmitočet pásma (Hz)
Hz .....	Hertz
I.....	Střední proud částečných výbojů (A)
$I_{PD}$ .....	Střední proud částečných výbojů (nA)
KEE .....	Katedra elektroenergetiky a ekologie
kHz .....	Kilohertz
kPa .....	Kilopascal
kV .....	Kilovolt
KVA .....	Kilovoltampér
LLD .....	Low Level Discriminator – Potlačení nízkých úrovní
mA .....	Miliampér
MHz.....	Megahertz
min .....	Minuta
mm.....	Milimetr
ms .....	Milisekunda
n .....	Četnost impulzů
N .....	Opakovací frekvence impulzů
nA .....	Nanoampér

nC .....	Nanocoulomb
nF .....	Nanofarad
Obr .....	Obrázek
P .....	Výkon částečných výbojů (W)
pC .....	Pikocoulomb
PD .....	Partial Discharge – Částečný výboj
ppm .....	Part per million – Miliontina celku
q .....	Zdánlivý náboj v pikocoulombech (pC)
$Q_{cumulative}$ .....	Celkový náboj výbojů (nC)
$q_i$ .....	Zdánlivý výkon za dobu zvoleného referenčního časového intervalu (nC)
$Q_{IEC}$ .....	Velikost aktuální obálky náboje (pC)
s .....	Sekunda
T .....	Perioda (s)
Tab .....	Tabulka
$t_i$ .....	Čas (s)
$T_{ref}$ .....	Referenční časový interval – Doba sběru dat (s)
$U_e$ .....	Zhášecí napětí částečných výbojů
$U_i$ .....	Počáteční napětí částečných výbojů
$U_{ief}$ .....	Efektivní hodnota napětí (kV)
$U_{ipeak}$ .....	Vrcholová hodnota napětí (kV)
UV .....	Ultrafialové záření
V .....	Volt
vn .....	Vysoké napětí
vvn .....	Velmi vysoké napětí
W .....	Watt
$Z(f)$ .....	Přenosová impedance jako funkce frekvence při sinusovém průběhu
$\phi_i$ .....	Fázový úhel (°)

# 1 Částečné výboje

## 1.1 Popis částečných výbojů a jejich důsledky

Částečným výbojem se rozumí lokální výboj, který je důsledkem lokálního elektrického namáhání na povrchu nebo uvnitř izolantu a projevuje se běžně jako pulz s dobou trvání kratší než 1  $\mu$ s. Při tomto výboji, dle normy ČSN EN 60270, dochází k částečnému přemostění prostoru mezi vodiči, přičemž může a nemusí působit v jejich okolí. [1]

U slabých míst, která se vyskytují uvnitř dielektrika a nacházející se v místě ležícím mezi nabitými elektrodami, může dojít k překročení meze elektrické pevnosti v dané oblasti, čímž dojde ke vzniku výboje. Takovéto výboje mají lavinový nebo jiskrový charakter a jsou typickým případem částečných výbojů. Částečný výboj obecně představuje tzv. neúplný elektrický výboj, který se nachází v oblasti nehomogenit uvnitř dutiny nebo bubliny dielektrika, kdy dochází k přemostění pouze určité části vzdálenosti mezi elektrodami, přičemž zbytek neporušeného dielektrika může nadále odolávat namáhání provozního či zkušebního napětí. [2] [3]

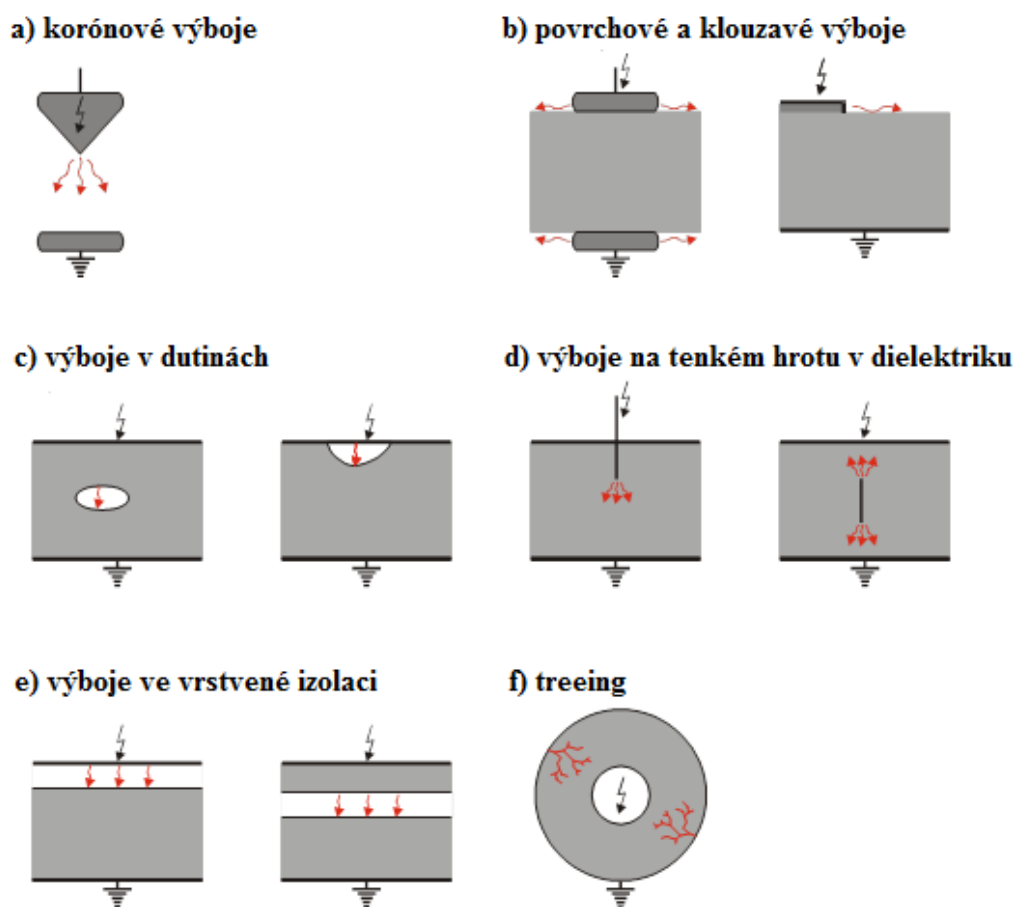
Částečné výboje svými tepelnými, chemickými a elektrickými účinky často vedou k degradaci a erozi materiálu, což může zapříčinit urychlení stárnutí izolačního systému či naprosté selhání objektu. V místech jejich působení dochází ke vzniku agresivních sloučenin (např. ozónu), přičemž povrch izolantu je narušován dopadem elektrických částic, jako jsou například elektrony a ionty, čímž vzniká extrémní tepelné namáhání materiálu. Tato postupná destruktivní činnost může po nějaké době zapříčinit absolutní poruchu izolačního systému a tím i havárii celého zařízení. Uvnitř materiálu může také vlivem částečných výbojů vznikat tzv. elektrický stromeček, který se postupně rozrůstá, až dojde k úplnému narušení izolace. [4]

Ačkoliv jsou dnešní moderní technologie na výrobu izolačních systémů a zařízení pracujících na hladině VN a VVN vyspělé, stále nelze ještě zcela zamezit vzniku nehomogenních míst, která se nacházejí na povrchu či uvnitř izolačního dielektrika. Pro odhalení těchto kritických míst je používána velká škála diagnostických metod. Měření těchto výbojů metodou místního elektrického namáhání bývá často používáno jako ukazatel kvality izolace a jejich výskyt umožňuje získat informace o kritické hodnotě

elektrické pevnosti izolačního materiálu ještě předtím, než dojde k samotnému plnému výboji. Díky tomu může být materiál testován vysokým napětím, aniž by byl poškozen nebo jinak oslaben. Každé elektrické namáhání materiálu ovšem může ovlivnit životnost izolace, a i přes tuto skutečnost jsou tato měření přijatelným důvodem pro získání věrohodných výsledků na odhalení nežádoucí degradace izolačních systémů zařízení a jejich možnou včasnou opravu. [2] [3] [4]

## 1.2 Druhy částečných a neúplných výbojů na vysokém napětí

Částečné výboje vznikají na elektrodě nebo na povrchu dutiny v dielektriku a projevují se jako koróna na hranách nebo na povrchu dielektrika ve formě povrchových či klouzavých výbojů. Jejich výskyt tedy může být přímo v izolaci vodičů, na rozhraní mezi izolací a vodičem, mezi izolací a železem stroje, nebo na povrchu izolace. Nejběžnější typy uspořádání elektrod, které způsobují vznik částečných výbojů, jsou vyznačeny na obrázku (Obr. 1.1). [4]



Obr. 1.1 Nejběžnější typy uspořádání elektrod se vznikem částečných výbojů: a) vnější, b) povrchové a klouzavé, c), d), e), f) vnitřní [4]

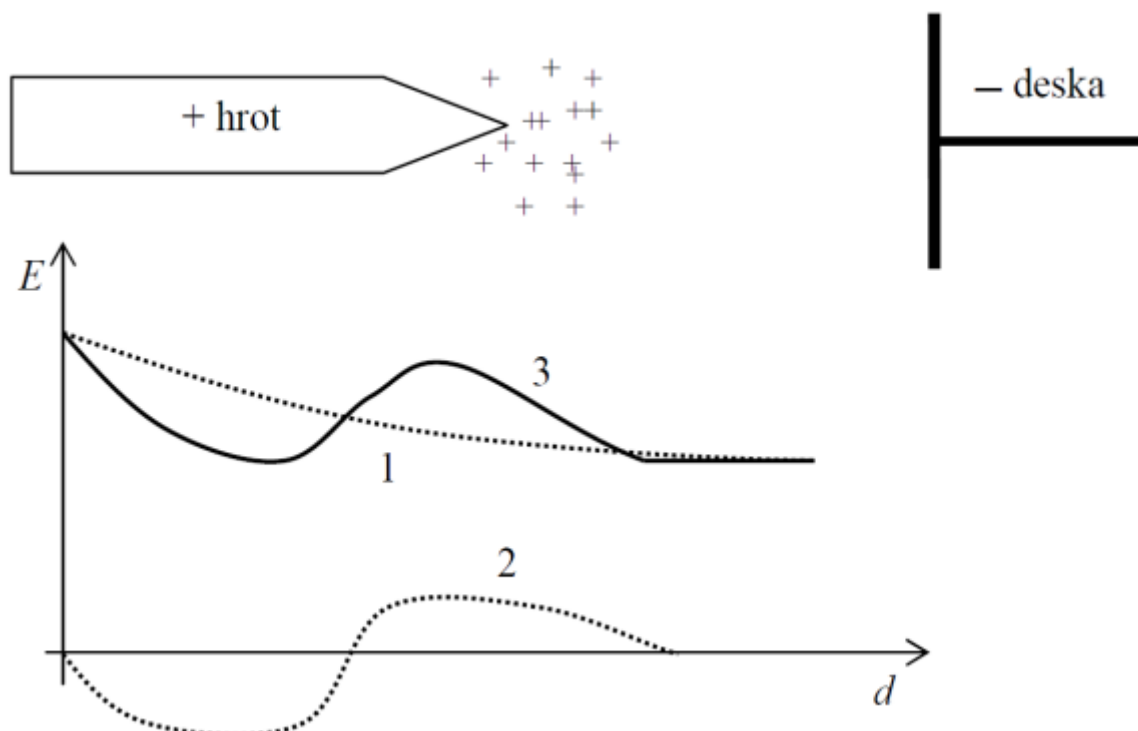
### 1.2.1 Korónové výboje

Jsou vnější výboje, které vznikají jako hoření na ostrých hranách elektrod při uspořádání typu hrot-deska nebo také na tenkých vodičích ve vzduchu, tekutině či plynu. Tyto výboje jsou způsobeny generováním silného elektrického pole díky malému poloměru křivosti těchto hran, a elektrický náboj je dále přenášen do prostoru jen za pomoci volných nosičů náboje bez další ionizace a emise záření. Častým výskytem jsou například stožáry vysokého napětí, kde jsou výboje doprovázeny zvukovým efektem, tzv. sršením. [4] [5]

#### 1.2.1.1 Kladné korónové výboje

Uvažujme, že k elektrodám kladný hrot a záporná deska připojíme napětí, jehož amplitudu zvyšujeme tak, aby intenzita pole v okolí hrotu byla dostatečně velká pro vznik nárazové ionizace. V případě vzniku nárazové ionizace dojde k nekontrolovatelnému lavinovému šíření volných elektronů směrem k hrotu, které jsou vlivem své malé hmoty velmi pohyblivé. Naopak kladné ionty jsou vlivem své vyšší hmoty pomalu přitahovány směrem k desce. V blízkosti hrotu je tak vytvořen kladný objemový náboj, což způsobí zmenšení intenzity pole v jeho okolí a zastavení lavinového šíření elektronů. Pokud se kladné ionty vzdálí od hrotu, dojde k obnovení výboje, díky čemuž má korónový výboj a proud koróny pulsní charakter. Toto uspořádání s průběhem intenzity elektrického pole je zobrazeno na obrázku (Obr. 1.2). [6] [7]

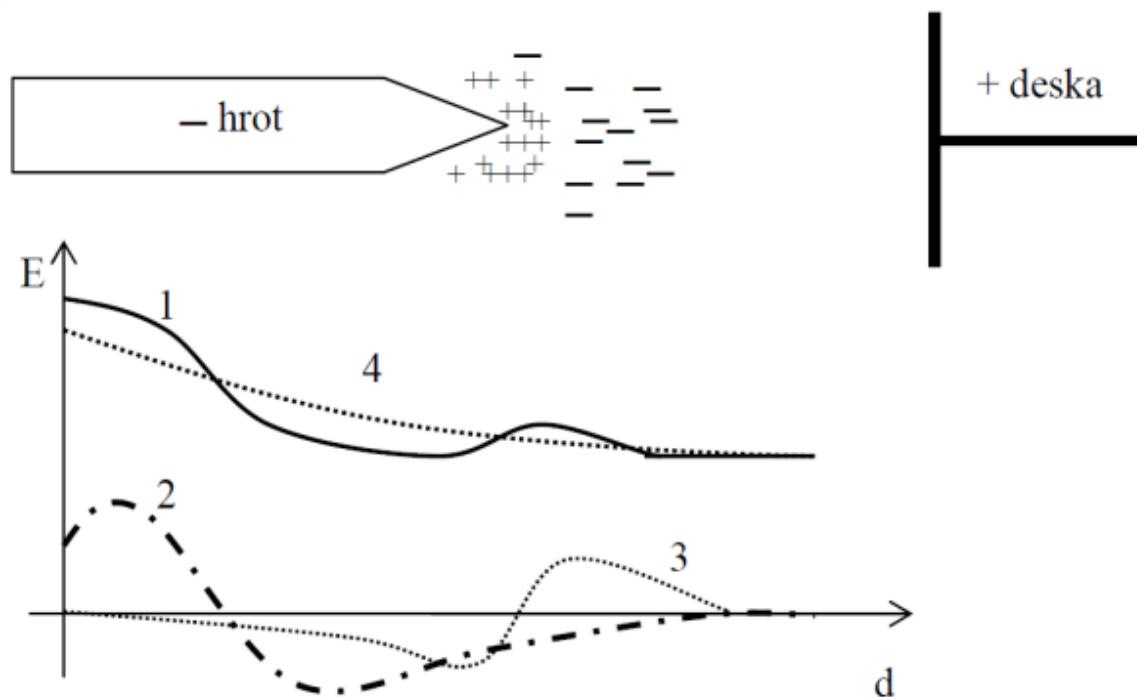




Obr. 1.2 Graf závislosti rozložení intenzity elektrického pole na vzdálenosti doskoku pro uspořádání kladný hrot a záporná deska. 1 – Průběh intenzity elektrického pole způsobené vnějším zdrojem, 2 – Průběh intenzity elektrického pole způsobené kladným prostorovým nábojem, 3 – Celkový průběh intenzity pole [7]

### 1.2.1.2 Záporné korónové výboje

Uvažováním záporné polaroty na hrotu a kladné na desce nastává až do vzniku ionizace stejné rozložení intenzity elektrického pole jako v případě kladných korónových výbojů. Rychle se pohybující elektrony k desce zanechávají za sebou kladný prostorový náboj z iontů, které se relativně pomalu pohybují k hrotu. Po opuštění oblasti velké intenzity pole však elektrony postupně ztrácejí svojí rychlost a velká část z nich je tak zachycena neutrálními molekulami, čímž vznikají těžké záporné ionty, z nichž se vytváří mezi hrotem a deskou záporný prostorový náboj. Tento náboj způsobuje pokles intenzity elektrického pole v blízkosti hrotu, což vede k přerušení korónového výboje. Pokud se záporný prostorový náboj dostatečně vzdálí od hrotu, dojde k opětovnému vzniku výboje, díky čemuž je korónový výboj rovněž pulsního charakteru. Toto uspořádání s průběhem intenzity elektrického pole je zobrazeno na obrázku (Obr. 1.3). [6] [7]



Obr. 1.3 Graf závislosti rozložení intenzity elektrického pole na vzdálenosti doskoku pro uspořádání záporný hrot a kladná deska. 1 – Průběh intenzity elektrického pole způsobené vnějším zdrojem, 2 – Průběh intenzity elektrického pole způsobené kladným prostorovým nábojem, 3 – Průběh intenzity elektrického pole způsobené záporným prostorovým nábojem, 4 – Celkový průběh intenzity pole [7]

### 1.2.2 Povrchové a klouzavé výboje

Jsou vnější výboje, které vznikají při příčném a podélném namáhání složených izolací na rozhraní různých prostředí. U povrchových výbojů dochází k uvolňování elektronů z povrchu elektrod, vlivem ohřívání elektrody, působením silného elektrického pole, ozařováním povrchu kovu zářením nebo například bombardováním povrchu kovu částicemi s dostatečnou energií. Nejčastějším výskytem jsou výboje klouzavé, které se vyskytují na povrchu izolantů mezi dvěma kovovými plochami a jsou podmíněny kapacitou izolační plochy mezi kovovým jádrem a povrchem obalu. Napomáhají jim nečistoty a vlhkost na vnějším povrchu izolačního obalu, díky čemuž mohou klouzavé výboje překlenout vzdálenost až několik metrů a přenést tak v podstatě celou energii bleskového proudu. Rozhodujícím kritériem přeskoku je tedy v tomto případě dostatečná vzdálenost od dalších kovových konstrukcí. [4] [8] [5]

### 1.2.3 Výboje v dutinách a výboje na tenkém hrotu v dielektriku

Jsou vnitřní výboje, které vznikají v pevném izolantu nebo v tekutině. Vlivem elektrických účinků výboje může v dutině vzniknout oblouk, který vytvoří vodivou dráhu. Na stěnách dutiny je také možnost vzniku eroze, jejímž důsledkem bývá mechanický nebo čistě elektrický průraz, díky čemuž se vodivá dráha bude šířit celým dielektrikem. Výboje v dutinách mají též chemické účinky, které vznikají při déle trvajícím elektrickém namáhání. Především u organických materiálů se vlivem chemických účinků výboje vytváří například ozón, vodík nebo oxid uhlíku, a tyto prvky rozkládají určité množství dielektrika. Jejich difundací dochází ke vzniku elektricky vodivějších oblastí. Tyto výboje bývají v neposlední řadě doprovázeny tepelnými účinky, které mohou mít za následek tepelnou nestabilitu, jelikož je ohříváno samotné dielektrikum, čímž klesá napětí tepelného průrazu. [4] [5]

### 1.2.4 Výboje ve vrstvené izolaci

Jsou vnitřní výboje, které vznikají při příčném a podélném namáhání složených izolací na rozhraní různých prostředí. Ve vzniklé štěrbině mezi elektrodou a pevným izolantem nebo přímo v mezeře uvnitř izolantu dojde kvůli nehomogenitě materiálu k částečným výbojům. Tyto výboje oproti výbojům v dutinách vzhledem k charakteru nehomogenity vykazují větší zdánlivý náboj  $q$  a větší četnost impulzů  $n$  (tyto parametry jsou vysvětleny v kapitolách 2.1.3 a 2.1.4). Pokud je zvyšováno napětí, dojde v dielektriku ke zvyšování výbojové činnosti, při které v určitém okamžiku již nelze od sebe vzájemně odlišit jednotlivé výboje. [4] [9]

### 1.2.5 Treeing

Jsou trvalé vnitřní výboje stromovitěho nebo keřovitěho tvaru v pevném dielektriku, které jsou způsobené nehomogenitou izolace, a jejichž častým následkem bývá porucha funkce elektroizolačního materiálu. Jelikož způsobují degradaci, jejich účinky mohou vést až k samotnému průrazu elektrické izolace, a to i při jmenovitých hodnotách intenzity elektrického pole. Tyto výboje se často vyskytují například u vysokonapěťových kabelů, kde působením elektrického pole s dostatečnou intenzitou vznikají vodivé cesty, tzv. kanálky směrem k místu s jiným elektrickým potenciálem. Nečistoty v materiálu mohou v dielektriku způsobit místa s ostrými hranami, které při působení dostatečné intenzity elektrického pole vytváří elektrický stromeček. Vzniklé stromečkovité kanálky mohou být

duť, vyplněné plynem, kapalinou nebo elektricky vodivými degradačními zplodinami, které vznikly rozkladem materiálu elektrické izolace při degradaci. [4] [10] [9] [11]

## 2 Měření částečných výbojů

Částečné výboje zcela nutně nemusí být hlavní příčinou závady, ale velice často jí předchází. Jejich účinky mohou vést k přehřátí vlivem bombardování elektrony a ionty, které ničí izolační materiál, čímž je snižována celková životnost izolantu. V proudových obvodech přístrojů mají impulzy vyvolané částečnými výboji velice strmé čelo, a jelikož se opakují s vysokým kmitočtem, dochází k rušení signálů elektrických spojů a řízení. Právě z těchto důvodů se v současné době klade velký důraz na zkoušky elektrických zařízení, jejichž úkolem je objevit vznik částečných výbojů, určit jejich velikost a v ideálním případě také místo zdroje. [4]

### 2.1 Veličiny sledované při měření částečných výbojů

Před samotným měřením je potřeba napřed porozumět několika veličinám, které umožňují vyhodnocení výbojové činnosti a na jejichž základě může být dále prováděna hlubší analýza nebo též porovnávány konkrétní naměřené výsledky.

#### 2.1.1 Počáteční napětí částečných výbojů

Počáteční napětí částečných výbojů je značeno jako  $U_i$  a jedná se o přiložené napětí, které je plynule zvyšováno z nižší hodnoty do vyšší až do chvíle, kdy se začnou ve zkoušeném objektu poprvé objevovat opakující se částečné výboje.

Počáteční napětí  $U_i$  tak představuje nejnižší přiložené napětí, při kterém je úroveň veličiny impulzu částečného výboje vyšší nebo rovna předepsané nízké hodnotě. [1]

#### 2.1.2 Zhášecí napětí částečných výbojů

Zhášecí napětí částečných výbojů je značeno jako  $U_e$  a představuje přiložené napětí, během kterého se přestávají objevovat opakující se částečné výboje. Toto napětí je ve zkoušeném objektu postupně snižováno z vyšší hodnoty, při kterém jsou částečné výboje ještě pozorovány.

Zhásecí napětí  $U_e$  tak představuje nejnižší přiložené napětí, při kterém je úroveň veličiny impulzu částečného výboje menší nebo rovna předepsané nízké hodnotě. [1]

### 2.1.3 Zdánlivý náboj

Zdánlivý náboj je značen jako  $q$  a bývá obvykle vyjádřen v pikocoulombech (pC). Tento náboj by měl na měřicím přístroji vyvolat stejně velkou výchylku jako vlastní proudový impulz částečného výboje, pokud je v předepsaném zkušebním obvodu mezi svorky zkoušeného objektu injektován ve velmi krátkém čase.

Zdánlivý náboj  $q$  není roven množství náboje, které lokálně působí v místě výboje a nelze jej měřit přímo. [1]

### 2.1.4 Četnost impulzů

Četnost impulzů je značena jako  $n$  a vyjadřuje poměr celkového počtu impulzů částečných výbojů, které jsou zaznamenány v konkrétním časovém intervalu a jeho dobou trvání. [1]

### 2.1.5 Opakovací frekvence impulzů

Opakovací frekvence impulzů je značena jako  $N$  a jedná se o počet stejně vzdálených impulzů částečných výbojů za sekundu. [1]

### 2.1.6 Fázový úhel a čas výskytu impulzu částečného výboje

Fázový úhel je značen jako  $\Phi_i$  a čas výskytu impulzu částečného výboje jako  $t_i$ . Fázový úhel je vyjádřen ve stupních a vypočte se podle vzorce:  $\Phi_i = 360 * \frac{t_i}{T}$ , kde  $T$  je perioda zkušebního napětí a  $t_i$  znázorňuje čas, který je měřený mezi předchozím zkušebním napětím kladného charakteru procházejícího nulou a impulzem částečného výboje. [1]

### 2.1.7 Výkon částečných výbojů

Výkon částečných výbojů je značen jako  $P$  a představuje odvozenou veličinu, tedy střední výkon impulzu dodávaného na svorky zkoušeného objektu, který je způsoben hodnotami zdánlivého výkonu  $q_i$  za dobu zvoleného referenčního časového intervalu  $T_{ref}$ . Je vyjádřen ve wattech (W) a vypočte se podle vzorce:  $P = \frac{1}{T_{ref}} * (q_1 u_1 + q_2 u_2 + \dots + q_i u_i)$ .

kde  $u_1, u_2, \dots, u_i$  představují zkušební napětí v okamžitých hodnotách a v okamžiku výskytu  $t_i$  jednotlivých úrovní zdánlivého náboje  $q_i$ . Musí však být neustále sledováno znaménko jednotlivých hodnot. [1]

### 2.1.8 Střední proud částečných výbojů

Střední proud částečných výbojů je značen jako **I** a jedná se o odvozenou veličinu, která představuje součet absolutních hodnot jednotlivých úrovní  $q_i$ , tedy zdánlivého náboje za dobu zvoleného referenčního časového intervalu  $T_{ref}$ .

Obecně bývá vyjádřen v coulombech za sekundu (C/s) nebo také v ampérech (A) a vypočte se podle vzorce:  $P = \frac{1}{T_{ref}} * (|q_1| + |q_2| + \dots + |q_i|)$ . [1]

### 2.1.9 Střední kvadratický součet

Střední kvadratický součet je značen jako **D** a představuje odvozenou veličinu, která je dána součtem ploch jednotlivých úrovní  $q_i$ , tedy zdánlivého náboje za dobu referenčního časového intervalu  $T_{ref}$ .

Obecně bývá vyjádřen v coulombech na kvadrát za sekundu ( $C^2/s$ ) a vypočte se podle vzorce:  $D = \frac{1}{T_{ref}} * (q_1^2 + q_2^2 + \dots + q_i^2)$ . [1]

### 2.1.10 Střední kmitočet pásma a šířka pásma

Střední kmitočet pásma je značen jako  $f_m$  a pro všechny druhy měřících systému jej lze vypočítat podle vzorce:  $f_m = \frac{f_1+f_2}{2}$ .

Šířka pásma je značena jako  $\Delta f$  a vypočte se podle vzorce:  $\Delta f = f_2 - f_1$ . [1]

### 2.1.11 Přenosová impedance

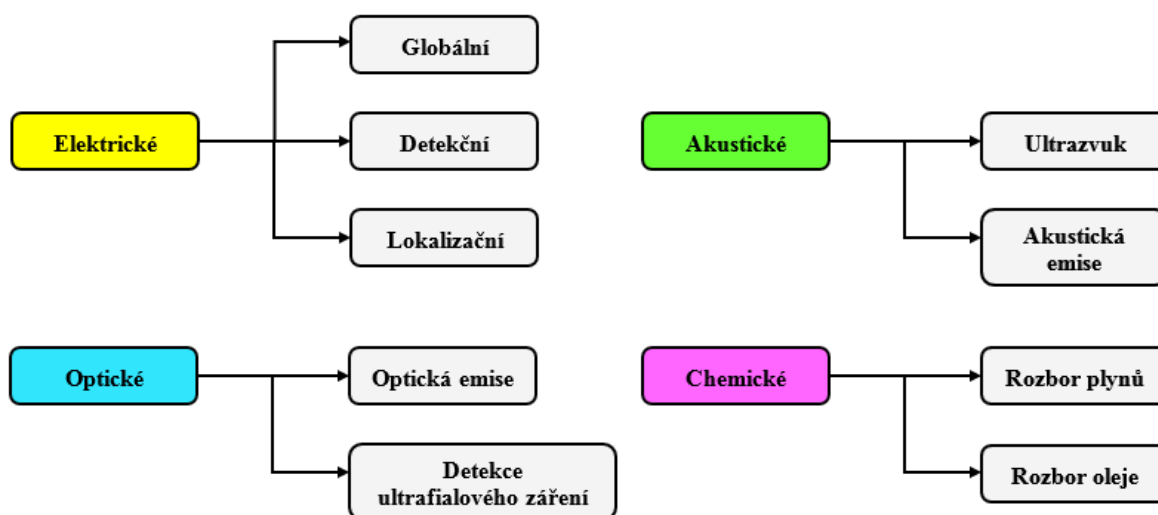
Přenosová impedance je značena jako  $Z(f)$ , tedy jako funkce frekvence při sinusovém průběhu přivedeném na vstupu, a jedná se o poměr amplitudy výstupního napětí a amplitudy vstupního proudu, který je konstantní. [1]

### 2.1.12 Dolní a horní mezní frekvence

Dolní a horní mezní frekvence jsou značeny jako  $f_1$  a  $f_2$ , a při těchto frekvencích dochází v propustném pásmu k poklesu  $Z(f)$ , tedy přenosové impedance o 6 dB od nejvyšší hodnoty. [1]

## 2.2 Způsoby detekce částečných výbojů

Částečné výboje mohou být detekovány několika odlišnými měřicími technikami – elektrickými, akustickými, optickými nebo chemickými. Tyto techniky se dále dělí na další způsoby, kterými jsou detekovány a jejich přehled je zobrazen na obrázku (Obr. 2.1). [12] [13]



Obr. 2.1 Způsoby detekce částečných výbojů

### 2.2.1 Elektrická detekce částečných výbojů

Elektrická detekce využívá proudových impulzů nebo působení elektromagnetického pole částečných výbojů, jejichž velikost je zaznamenávána vhodně zapojeným měřicím obvodem. Pomocí měřicí impedance je dosaženo transformace proudových impulzů z částečných výbojů na napěťové pulzy, které jsou přenášeny do měřicího zařízení. Měřicí zařízení tvoří RLC člen s vhodně nastavenou frekvenční citlivostí, aby nedocházelo k ovlivňování výsledků frekvencí napětí zdroje. Charakter této impedance může být ohmický, induktivní nebo tvořen rezonančním obvodem, jehož **výhodou** by byla možnost naladit se na frekvenci měřicího přístroje. [9] [14]

Pro získání všech potřebných informací o částečných výbojích elektrickou detekcí obvykle nestačí jediná metoda měření a může být využito například tzv. galvanické metody, kapacitních a induktivních snímačů, induktivně vázané sondy, diferenciální elektromagnetické sondy nebo kapacitní drážkové sondy. Působení částečných výbojů může být také snímáno v celém měřeném objektu (globální metoda) nebo v určitém konkrétním místě (lokalizační metoda). [9] [14]

### 2.2.1.1 Galvanická metoda

Galvanická metoda patří mezi nejrozšířenější přímou globální metodu, která je založena na principu zaznamenávání proudových impulzů částečných výbojů pomocí měřicí impedance. Touto impedancí bývá zpravidla RLC člen, jenž odděluje impulzy způsobené výboji superponované na napájecím napětí od napájecí frekvence. Paralelně k tomuto členu jsou navíc připojeny ochranné prvky proti přepětí. Norma ČSN EN 60270 specifikuje tři základní zapojení určené pro přímé měření částečných výbojů, díky nimž je zajištěna reprodukovatelnost a porovnatelnost získaných hodnot. Schémata těchto zapojení jsou zobrazena níže na obrázcích 2.2 – 2.4.

Tyto měřicí obvody tvoří:

**U** – Napájecí obvod

**Z** – Filtr proti rušení

**C<sub>a</sub>** – Objekt měření

**C<sub>v</sub>** – Vysokonapěťový vazební kapacitor

**Z<sub>m</sub>** – Měřicí impedance

**MCV** – Měřič částečných výbojů

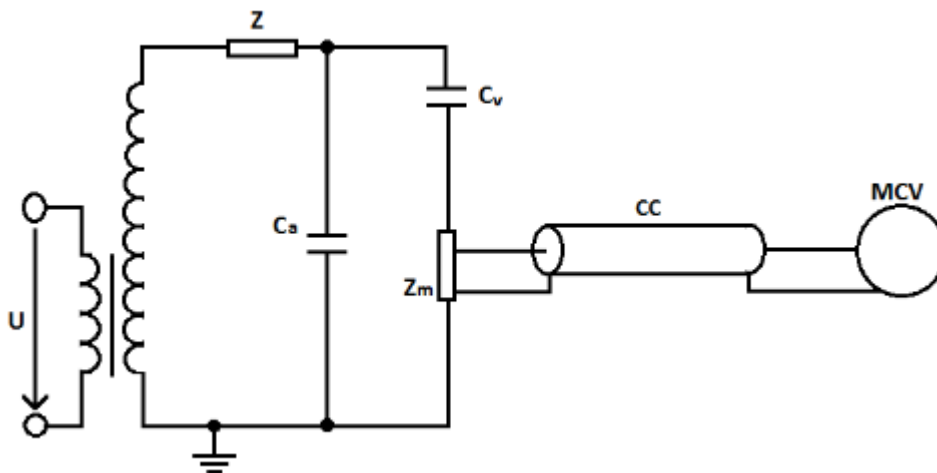
Pomocí impedance  $Z$  je v měřicích obvodech zamezeno rušení, ale také nežádoucímu vybití částečných výbojů přes vlastní impedanci zdroje. Vazební kapacitor  $C_v$  musí mít malou impedanci, musí být schopen podléhat testovacímu napětí a nesmějí v něm vznikat vlastní částečné výboje. Jednotlivá schémata obvodů se liší zapojením měřicí impedance  $Z_m$ . [1] [9] [14]

**Výhodou** této metody je vysoká citlivost, kterou lze regulovat změnou velikosti vazebního kapacitoru a možností použití této metody na daném zařízení za provozu. Měření za provozu tak vzniká velmi malé ohrožení izolačního systému, jelikož každá



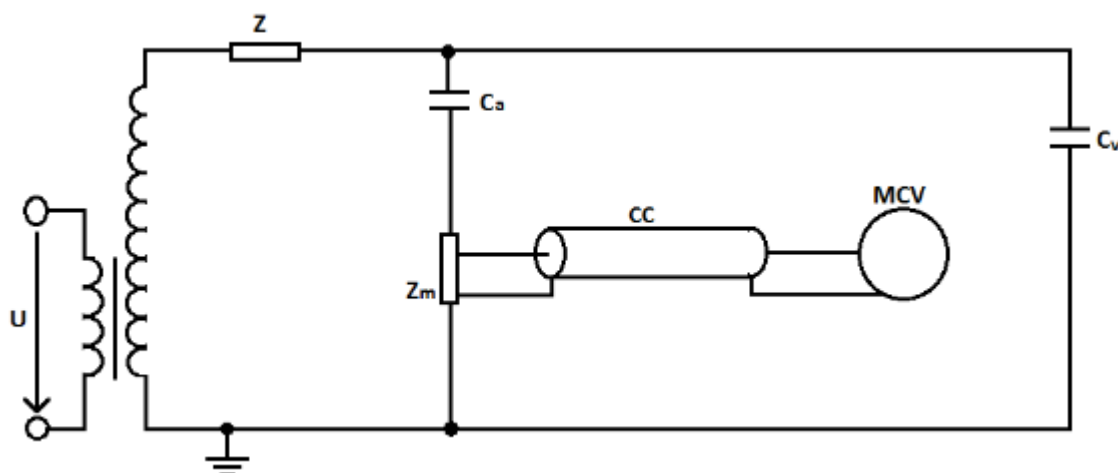
část zůstává na svém pracovním potenciálu a není tak přetěžována. Jedinou **nevýhodou** této metody může být určitá citlivost na rušení a to ať už vnitřní nebo vnější. [9] [14]

V prvním zapojení na obrázku (Obr. 2.2) je měřicí impedance připojena ve větvi vazebního kapacitoru a jedná se o nejpoužívanější zapojení, pomocí kterého je možné měřit uzemněné objekty nebo objekty o velkých kapacitách. Pomocí takto zapojené impedance lze snímat pulzy částečných výbojů, aniž by hrozil průraz měřeného zařízení a zničení měřicího přístroje. [9] [14]



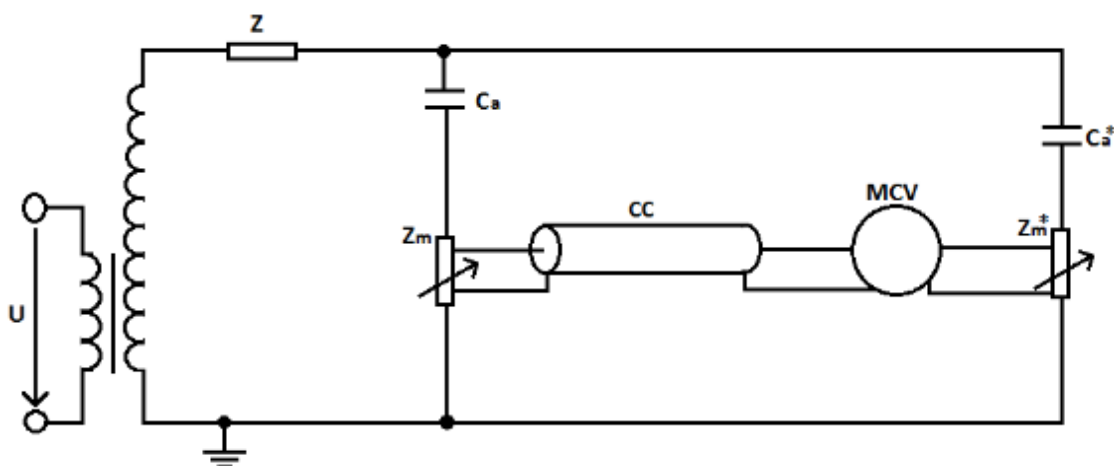
Obr. 2.2 Měřicí obvod s paralelní snímací impedancí [14]

Ve druhém zapojení na obrázku (Obr. 2.3) se měřicí impedance nachází na větvi měřeného zařízení, což u něj umožňuje odpojit uzemnění. Citlivost zapojení lze zvýšit pomocí rozptylových kapacit, které jsou připojené paralelně k vazebnímu kapacitoru. Tato kapacita může být zcela vynechána, pokud bude rozptylová kapacita obvodu proti zemi větší než kapacita měřeného zařízení. [9] [14]



Obr. 2.3 Měřicí obvod se sériovou snímací impedancí [14]

Třetí zapojení na obrázku (Obr. 2.4) se nazývá můstkové a vychází z potřeby měřit zařízení přímo na místě jeho instalace za provozu. Toto zapojení se používá na místech, kde je žádoucí potlačení vlivu vnějšího rušení. Impedance  $Z_m$  a  $Z_m^*$  je možné volně nastavit a snímají rozdílové proudové impulzy. Vazební kapacitor, který má blízkou kapacitu měřenému zařízení, lze nahradit měřeným zařízením, jehož hladina částečných výbojů je známa. [9] [14]



Obr. 2.4 Měřicí obvod v můstkovém zapojení [14]

Měřicí impedance je rozdělena na úzkopásmovou, širokopásmovou a ultra širokopásmovou, přičemž norma ČSN EN 60270 doporučuje pro úzkopásmové měřicí systémy rozsah frekvencí  $9 \text{ kHz} \leq \Delta f \leq 30 \text{ kHz}$  a  $50 \text{ kHz} \leq f_m \leq 1 \text{ MHz}$ , pro širokopásmové měřicí systémy rozsah frekvencí  $100 \text{ kHz} \leq \Delta f \leq 400 \text{ kHz}$ ,  $30 \text{ kHz} \leq f_1 \leq 100 \text{ kHz}$  a  $f_2 \leq 500 \text{ kHz}$ . Tato norma však nespécifikuje rozsah frekvencí pro ultra širokopásmové měřicí systémy. [1]

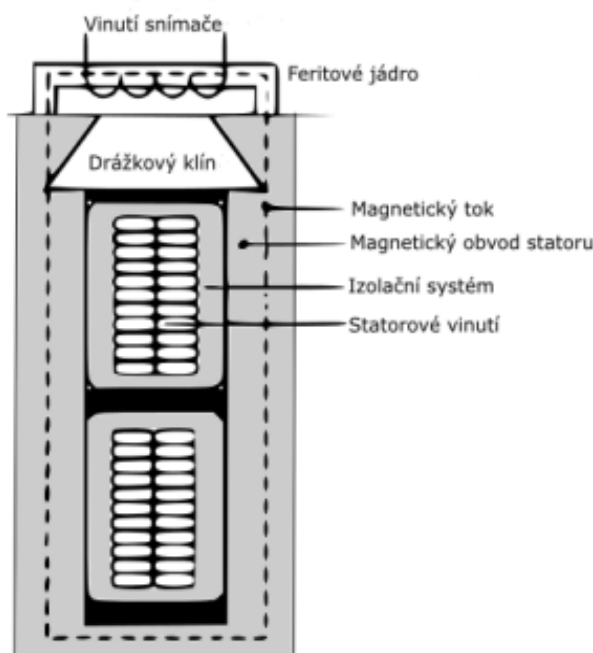
### 2.2.1.2 Kapacitní a induktivní snímače

Výbojová činnost je doprovázena vyzařováním vysokofrekvenční energie do okolí, jejíž elektrickou složku lze zachytit kapacitními snímači a magnetickou složku induktivními snímači. Jedná se tedy o nepřímou metodu a měření tímto způsobem je vhodné pro orientační zjištění výbojové činnosti a to během provozu zkoušeného zařízení.

**Výhodou** kapacitních a induktivních snímačů je jejich bezpečnost pro měřicí systém, který je proti přepětí hrozcímu při průrazu dielektrika chráněn, a nebezpečné napětí se tak na jeho vstup vůbec nedostane. **Nevýhodou** však může být složitá filtrace rušivých elektromagnetických signálů a problémy s kvantifikací hodnot způsobených nelineárními průběhy kalibračních křivek snímačů. [9] [14] [15]

### 2.2.1.3 Induktivně vázané sondy

Induktivně vázané sondy používané pro měření a lokalizaci částečných výbojů za účelem diagnostiky izolačního systému jsou vhodné zejména u elektrických točivých strojů, na kterých je měření prováděno při demontovaném rotoru. Sonda je složena z feritového jádra, které je ve tvaru C a navinuté cívky. Přiložením sondy na drážku statoru dle obrázku (Obr. 2.5) se do jejího jádra vlivem částečných výbojů začnou indukovat pulzy, jelikož tak vzniknul proudový transformátor.

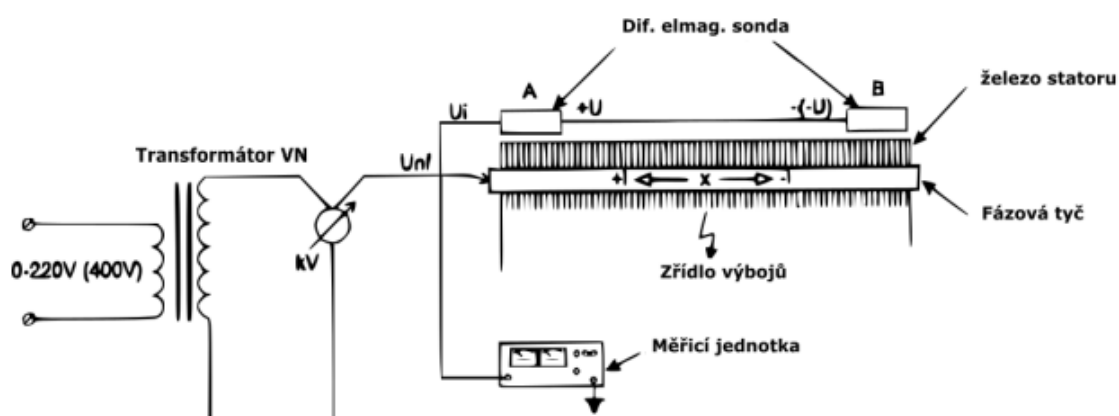


Obr. 2.5 Přiložení sondy na drážku – vznik proudového transformátoru [9]

Záznam ze sondy je pořizován v grafické podobě pomocí souřadnic  $X$  a  $Y$ , kde  $X$  značí pořadové číslo drážky statoru.  $Y$  znázorňuje kvazivrcholovou hodnotu zdánlivého náboje nebo střední hodnotu zdánlivého proudu, pomocí jejichž rozdílu je v jednotlivých drážkách vyhodnocována výbojová činnost. Pokud nastane situace, že některé drážky detekují výbojovou činnost a tento rozdíl je vyšší než 20 dB, musí být tyto drážky zaměřeny. **Výhodou** induktivně vázaných sond je bezpochyby poměrně přesné určení místa vzniku částečných výbojů. [9] [14]

#### 2.2.1.4 Diferenciální elektromagnetické sondy

Diferenciální elektromagnetické sondy jsou z hlediska lokalizace místa vzniku částečných výbojů vhodné zejména pro vyšetřování jednotlivých drážek fáze vinutí statoru elektrických točivých strojů. Sonda obsahuje dva sériově spojené induktivní snímače zapojené proti sobě. Tyto snímače jsou dle obrázku (Obr. 2.6) přiloženy na konce drážky vinutí a je zahájeno měření. Jestliže je mezi snímači přítomno zřídlo částečných výbojů, prochází jimi proudový impulz v opačných směrech a dochází tak na výstupu k jejich součtu. Pokud je však snímáno pouze rušení, proudový impulz se šíří stejným směrem, a signály obou snímačů jsou na výstupu navzájem vyrušeny. **Výhodou** použití diferenciální elektromagnetické sondy je zamezení vlivu okolní výbojové činnosti a okolního rušení. [9] [14]

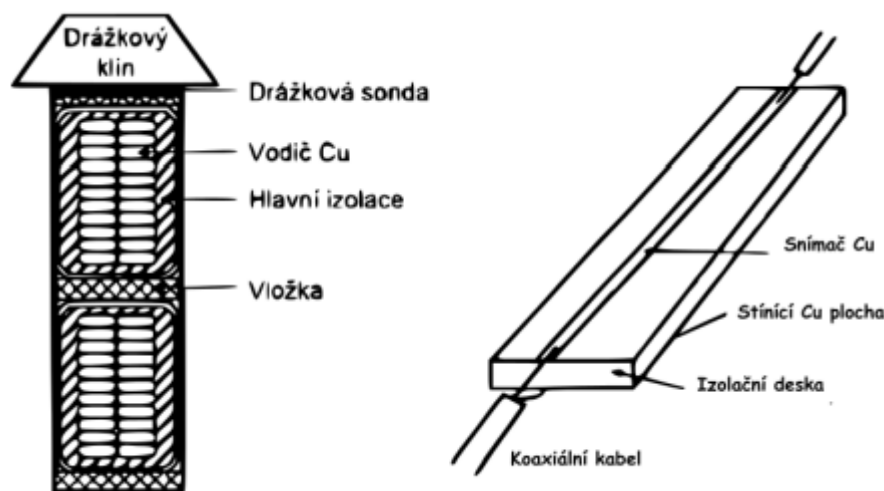


Obr. 2.6 Principiální schéma měření pomocí diferenciální elektromagnetické sondy [14]

#### 2.2.1.5 Kapacitní drážkové sondy

Kapacitní drážkové sondy na obrázku (Obr. 2.7) jsou již při výrobě vkládány do statorových drážek elektrických točivých strojů a obsahují izolační destičku, jejíž jedna strana je pokrytá stínící měděnou vrstvou, druhá strana tvoří měděný pásek sloužící jako

snímač. Pomocí koaxiálního kabelu je sonda spojena s vyhodnocovacím zařízením. Velkou **výhodou** je možnost měření výbojové činnosti během provozu a odolnost sondy vůči vnějšímu rušení. [9] [14]



Obr. 2.7 Kapacitní drážková sonda a její izolační destička [9] [14]

Jelikož se v praxi instalace těchto sond do malých točivých strojů nevyplatila z hlediska vysokých instalačních nákladů, byl vyvinut tzv. senzor PDLC (Partial Discharge Locating Coupler), který je montován na povrch statorového vinutí nebo klínu. Tento senzor je z hlediska výroby nejen ekonomičtější, ale přestože není schopný zachycovat částečné výboje při nízkých kmitočtech, v porovnání s konvenčním senzorem umožňuje detekovat výboje na vyšších kmitočtech až do několika desítek MHz. Rovněž byl vyvinut tzv. senzor CSC (Capacitive Slot Coupler), který při měření ve vzdálenosti několika metrů od zdroje částečných výbojů získává lepší charakteristiky než senzor konvenční. [16] [17]

## 2.2.2 Akustická detekce částečných výbojů

Akustická detekce částečných výbojů je založena na principu snímání akustických signálů, které vznikají jako důsledek přeměny proudového impulsu způsobeného výbojem v izolačním materiálu na mechanickou energii. Tyto signály bývají kvůli své krátké době trvání daleko za mezí slyšitelnosti a k jejich záznamu se používají směrové mikrofony (akustické měniče), které snímají ultrazvukové i slyšitelné pásmo na principu piezoelektrického jevu. Signál je pak pomocí vhodného zesilovače zpracován a dále zobrazen na osciloskopu. Běžně je také využíváno tzv. vlnkové a diskrétní vlnkové transformace. [18] [19] [20]

Velkou **výhodou** akustické detekce je možnost použití této techniky za provozu měřeného zařízení a lokalizaci místa, kde k působení částečných výbojů dochází, přičemž elektrické rušení má na měření velmi malý vliv. [9] [14]

### 2.2.3 Optická detekce částečných výbojů

Jedním ze způsobů optické detekce částečných výbojů je přímé sledování emise světelného záření na přístupných částech zařízení, které je umístěno v zatemněné místnosti nebo za pomoci ultrafialového světla. Tato vizuální detekce je založena na principu optického projevu ve viditelném, infračerveném a ultrafialovém spektru. Dalším způsobem optické detekce částečných výbojů je snímání UV (ultrafialového záření) pomocí UV kamery, která snímá dvojité spektrum s kombinací ultrafialového senzoru a běžnou kamerou, díky čemuž lze okolo zařízení měřit i malé UV vyzařování. V místech výbojové činnosti dochází ke značnému oteplení, které je na povrchu zkoumaného zařízení snímáno termokamerou s vysokou rozlišovací schopností senzoru. Další způsob je založený na snímání světelného paprsku pomocí optických vláken, které snímají akustickou veličinu způsobenou výbojovou činností. Tento princip je založen na závislosti optických změn a mechanických vlastností optických vláken na změně tlaku prostředí, ve kterém jsou umístěny. Výbojová činnost je vyhodnocena na základě vzniklé akustické vlny, která naráží na vlákno a mechanicky namáhá jeho jádro, což má vliv na změnu jeho délky a index odrazu, čímž se mění jeho vlastnosti. [21]

### 2.2.4 Chemická detekce částečných výbojů

Princip chemické detekce spočívá v měření vedlejších produktů, které vznikají při výbojové činnosti. Působení výbojů způsobuje například v izolačním oleji rozklad na plyny, které se v něm dále rozpouštějí a podle jejich složení lze pomocí plynové chromatografie určit druh výbojové činnosti. Některé typické druhy plynů, které bývají rozpuštěné v oleji vlivem působení částečných výbojů, jsou uvedeny v Tab. 2.2.1. Při výbojích v papírové izolaci transformátorových vinutí je především sledován obsah CO a CO<sub>2</sub>. Druh poruchy a její závažnost způsobené částečnými výboji se určuje podle vzájemného poměru vzniklých plynů, jejich kombinace a množství. Několik příkladů vyhodnocení poruch na základě poměrů hodnot plynů v souladu s normou ČSN EN 60599 ed.2, která uvádí metodiku hodnocení výsledků měření plynové chromatografie, jsou uvedeny v Tab. 2.2.2. [21] [22] [23]

Tab. 2.2.1 Typické případy plynů rozpuštěných v oleji vlivem částečných výbojů [21]

Název plynu	Chemická značka
Vodík	H <sub>2</sub>
Methan	CH <sub>4</sub>
Acetylen	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>
Ethylen	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>
Ethan	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>

Tab. 2.2.2 Poruchy vyhodnocené na základě poměrů hodnot plynů [21]

Poměry chemických prvků			Diagnostika
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> / C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	CH <sub>4</sub> / H <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> / C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	
0	0	0	Bez poruchy (běžné stárnutí)
0	1	0	Částečné výboje (nízká hustota energie)
1	1	0	Částečné výboje (vysoká hustota energie)
1 → 2	0	1 → 2	Nízkoenergetické výboje
1	0	2	Vysokoenergetické výboje
0	0	1	Místní přehřátí o teplotě do 150 °C
0	2	0	Místní přehřátí o teplotě mezi 150 - 300 °C
0	2	1	Místní přehřátí o teplotě mezi 300 - 700 °C
0	2	2	Místní přehřátí o teplotě do 700 °C

U elektrických točivých strojů je možnost zjištění částečných výbojů například pomocí detekce ozónu v chladicím vzduchu. Ke zjištění koncentrace ozónu se používá metoda kolorimetrická nebo fotometrická a jejich největší **výhodou** je nejen jednoduchost, ale také možnost měření zkoušeného zařízení za provozu. Zatímco fotometrická metoda funguje na principu absorpce UV záření ozónu, kolorimetrická metoda k detekci využívá tzv. modrý roztok, což je indikační roztok založený na bázi indiga, který se při reakci s ozónem začne odbarvovat. Tímto způsobem je možné určit celkové množství ozónu v chladicím vzduchu v jednotkách ppm (part per million, neboli miliontina celku), přičemž hodnoty do 0,1 ppm odpovídají normálnímu provozu, a hodnoty nad 0,5 ppm odpovídají silné výbojové činnosti. [24]

### 3 Experimentální část

Detekci a záznam částečných výbojů lze v dnešní době realizovat pomocí digitálního měřicího systému ICMsystem vyrobeného firmou Power Diagnostix. Veškeré experimentální měření týkající se vysokonapětových výbojů by mělo probíhat v laboratorních podmínkách, aby byla dodržena bezpečnost a zároveň linearita prostředí, která by jinak mohla ovlivnit výsledky jednotlivých měření.

#### 3.1 ICMsystem – detektor částečných výbojů

ICMsystem je komplexní zařízení umožňující měření, záznam a zobrazení částečných výbojů na počítači. K tomuto zařízení je výrobcem dodáván uživatelský manuál, který obsahuje kompletní hardwarovou a softwarovou dokumentaci, z níž je v následujících dvou kapitolách vycházeno. Aktuální uživatelský manuál lze získat pouze na základě žádosti přímo od výrobce. [25]

##### 3.1.1 ICMsystem – Hardware

Celý systém je složen z několika hardwarových částí, konkrétně modulů, díky nimž je uskutečněno zesílení měřených veličin, jejich záznam a zpracování. Výběr a jejich celkový počet je zcela závislý na potřebě uživatele, který na základě typu měření, zkoušených objektů a prostředí, ve kterém bude měření probíhat, zvolí příslušné moduly. Měřicí přístroj používaný v prostoru vysokonapětové laboratoře KEE Západočeské Univerzity v Plzni je jednokanálový a obsahuje celkem šest modulů, které jsou vidět na obrázku (Obr. 3.1). Bližší technické parametry k tomuto přístroji lze nalézt v příloze (Příloha A).





Obr. 3.1 Měřicí přístroj ICMsystem používaný v prostoru vysokonapěťové laboratoře KEE

**Modul AC2** nacházející se v pravé části tohoto zařízení slouží k napájení celého přístroje, jehož vstupní napětí je střídavé v rozsahu od 95 do 260 V a po zapnutí indikováno zelenou LED diodou.

**Modul CTRL4** slouží jako systémové a komunikační rozhraní, které obsahuje výstupy GPIB a USB. Tento modul mimo jiné umožňuje také připojení k internetu pomocí optického komunikačního rozhraní. Uvnitř tohoto modulu je umístěn reproduktor, který může měřené výboje interpretovat také akusticky. Pomocí LED diody s označením COM je signalizována komunikace s připojeným počítačem, dioda ACQ znázorňuje probíhající sběr dat a dioda AL je aktivní při aktuálním výskytu částečných výbojů.

**Modul DPR3B** obsahuje fázovou a časovou referenční logiku, vícekanálovou paměť a obvody pro měření napětí. Akviziční jednotka sloužící pro sběr dat je pro vzorkování vstupního napětí uzpůsobena tak, aby program mohl měřený signál zobrazit ve skutečném tvaru. Tuto jednotku lze na zadní straně trigovat a to jak zkušebním napětím nebo ze sítě, tak například z externího zdroje. Příslušná LED dioda u tohoto modulu signalizuje funkčnost synchronizace.

**Modul ADC3** zpracovává jednotlivé impulzy, u kterých určuje jejich velikost spolu s polaritou a obsahuje A/D převodník, sloužící k převodu analogového signálu na digitální. Správné nastavení tohoto převodníku je velice důležité, jelikož na něm závisí velikost

zaznamenaného šumu a riziko opakovaného záznamu oscilujících signálů, což má obrovský vliv na výsledky měření. Během měření se lze setkat s různými tvary signálu, proto obsahuje nastavitelné parametry Dead Time a LLD, které jsou popsány v následující kapitole 3.1.2. Tento modul umožňuje také volbu mezi několika metodami kódování, které jsou více popsány v uživatelském manuálu. Zelená LED dioda znázorňuje úspěšnou kontrolu hlavních funkcí, červená LED dioda s označením GT signalizuje zablokování ADC impulzem z brány.

**Modul AMP4** obsahuje hlavní systémový zesilovač, který počítačově ovládá pásmové filtry a napájí předzesilovač RPA1. Skládá se také z analogového spínače, jehož funkcí je otevírání cesty signálu, a z tzv. pC-metru s A/D převodníkem, umožňujících měření zdánlivého náboje v souladu s normou ČSN EN 60270.

Dle uživatelského manuálu by signály částečných výbojů měly být nejlépe připojeny přes předzesilovač RPA do AMP IN vstupu, jelikož je tento předzesilovač schopen zajistit impedanční přizpůsobení měřicí cesty a eliminovat tak zatížení snímací impedance způsobené kapacitou koaxiálního kabelu.

**Modul GATE4** jehož primárním úkolem je eliminovat záznam rušivých signálů z okolí, obsahuje stejné obvody jako modul AMP4 s filtry, předzesilovačem a vnitřními zesilovači. Tento modul zaznamenává velikost rušivého signálu, která když je překročena nad nastavenou mez, vysláním signálu je přerušeno záznam na AMP4 nebo (současně) na ADC3 modulu.

**Předzesilovač RPA1** (Obr. 3.2) je vytvořen dle normy ČSN EN 60270 pro měření na nižších frekvencích, přičemž jeho propustné frekvenční pásmo je ve srovnání s nejširším propustným pásmem filtrů v modulech AMP4 a GATE4 o trochu širší. Šířka pásma je tímto způsobem řízena pouze filtry měřicí jednotky. Vstupní citlivost, která je závislá na úrovni šumu a na efektivitě vazebního obvodu se pohybuje v řádu pC, ale za určitých podmínek lze dosáhnout i citlivosti nižší než 0,1 pC.



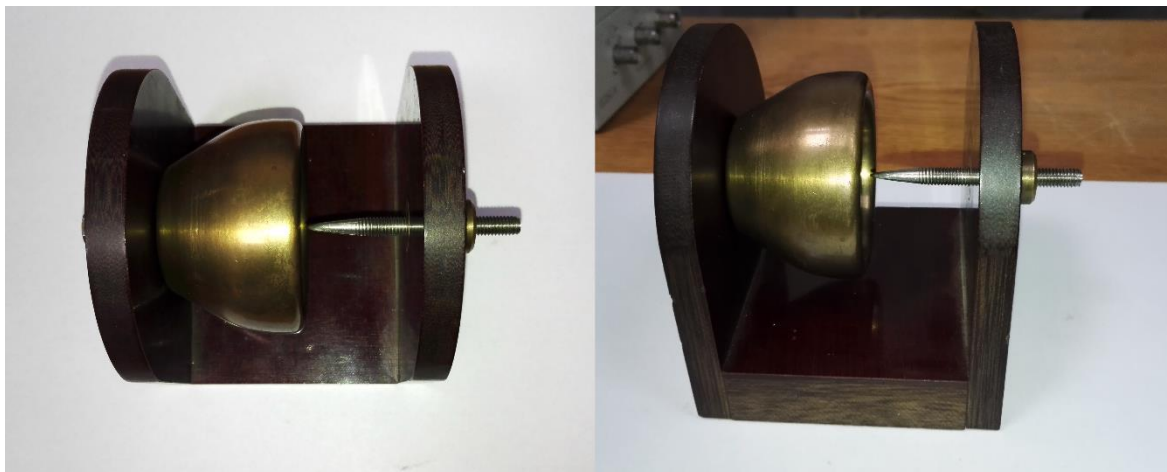
Obr. 3.2 Předzesilovač RPA1

**Kalibrátor CAL1A** (Obr. 3.3) je dodáván k ICMsystem s doporučením pro měření v laboratoři. Kalibrátor splňuje podmínky uvedené v normě ČSN EN 60270 a lze jej nastavit na velikosti pulzů 1, 2, 5, 10, 50, 100 pC. Tento typ kalibrátoru byl rovněž použit v mých experimentech vždy před samotným měřením a jeho hodnotu jsem nastavoval na 100 pC.



Obr. 3.3 Kalibrátor CAL1A

**Kalibrační jiskřiště** (Obr. 3.4) je zhotoveno dle již dnes neplatné normy ČSN 34 5608: Zkoušení elektrotechnických výrobků [26], která je od dubna 2006 neplatná, a byla nahrazena normou ČSN EN 60270: Technika zkoušek vysokým napětím – Měření částečných výbojů. Slouží primárně ke kalibraci částečných výbojů, ovšem v dnešní době je spíše používán kalibrátor vyrobený přímo firmou Power Diagnostix, jako výše uvedený model CAL1A. Jiskřiště je složeno z otevřeného páru elektrod, kde jedna z elektrod je tvořena ostrým hrotem pod úhlem  $13^\circ$  a druhou elektrodou je miska s vnitřním poloměrem 25 mm a vnějším poloměrem 31 mm. Samotný hrot je uspořádán tak, aby jeho špička byla přesně ve středu sféry misky, a od jejího dna je vzdálen 29 mm, tedy přesně na rozhraní okraje misky. Toto jiskřiště jsem v mém měření používal jako zkoušený objekt na tvorbu částečných výbojů.



Obr. 3.4 Kalibrační jiskřiště

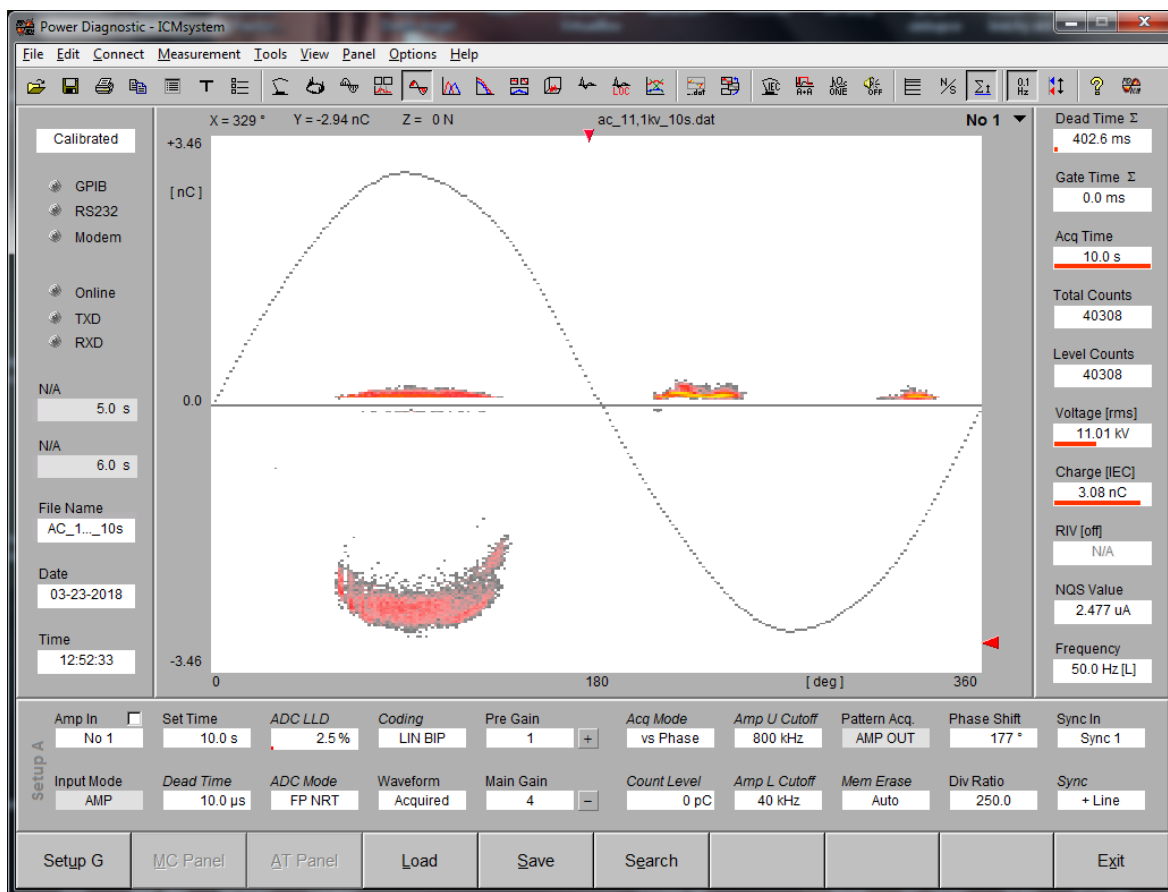
**Vazební kapacita** (Obr. 3.5) s parametry  $C = 1 \text{ nF}$ ,  $U_{\text{max}} = 25 \text{ kV}$ , která byla použita v mém měření, slouží k hrazení úbytku náboje na kapacitě zkoušeného objektu, který je způsobený částečným vybitím této kapacity v důsledku výskytu částečných výbojů. Přesun tohoto náboje způsobí v obvodu proudový impulz, který je měřen a poskytuje představu o velikosti zdánlivého náboje a tím zároveň i částečných výbojů. Podle uživatelského manuálu je potřeba BNC kabel zapojit do zdířky PD Quadropole.



Obr. 3.5 Vazební kapacita

### 3.1.2 ICMsystem – Software

Součástí ICMsystem je software, který obsahuje všechny potřebné funkce k ovládní měřicího přístroje, úpravu parametrů, zobrazení a uložení naměřených dat. Tato data z již uložených měření mohou být znovu načtena nebo dále exportována. Ve vybraném uživatelském rozhraní **Map** (Obr. 3.6) z nástrojové lišty je zobrazena celková velikost a počet výbojů, který je v grafu reprezentován konkrétní barvou. Přímou v programu lze nalézt tabulku těchto barev s číselným označením odpovídající počtu výbojů (Obr. 3.7).



Obr. 3.6 ICMsystem – Uživatelské rozhraní Map

The 'Color Table' dialog box shows a mapping between 'Norm' and 'Log' values. The table is as follows:

Norm	Log
0	0
1 - 141	1 - 2
142 - 282	3 - 4
283 - 423	5 - 8
424 - 564	9 - 16
565 - 705	17 - 32
706 - 846	33 - 64
847 - 987	65 - 128
988 - 1128	129 - 256
1129 - 1270	257 - 512
1271 - 1411	513 - 1024
1412 - 1552	1025 - 2048
1553 - 1693	2049 - 4096
1694 - 1834	4097 - 8192
1835 - 1975	8193 - 16384
1976 - 2116	16385 - 32768
2117 - 2257	32769 - 65536

At the bottom of the dialog, there are three buttons: 'Copy Norm', 'Copy Log', and 'Close'.

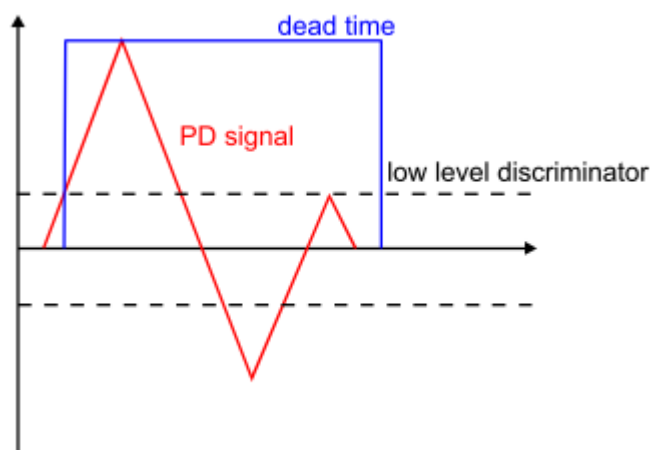
Obr. 3.7 Barevná tabulka znázorňující četnost výbojů

V tomto uživatelském rozhraní lze nalézt řadu ovládacích nástrojů, z nichž pro měření částečných výbojů jsou z hlediska správného nastavení pro konkrétní druhy napětí nejvíce využity:

**Set Time** – Nastavení celkové doby měření, která může být minimálně 10 ms a je závislá na hardwarovém vybavení daného systému.

**ADC LLD** – Nastavení hladiny *LLD* (*Low Level Discriminator - potlačení nízkých úrovní*), která umožňuje potlačit nízkonapěťové výboje pod touto hladinou. Správně nastavené *LLD* může zabránit záznamu nežádoucího šumu, a pokud je *LLD* nastaveno příliš nízké, může vlivem zahlcení měřicí jednotky dojít k velké ztrátě dat. Spolu s *Dead time* potlačují několikanásobné zaznamenávání oscilujících výbojů, jak je vidět na obrázku (Obr. 3.8).

**Dead Time** – Nastavení volitelného časového úseku (mrtvý čas), po jehož dobu nebude přístroj měřit. Tímto způsobem lze zabránit vícenásobnému záznamu oscilujícího signálu, jestliže již došlo vlivem překročení *LLD* k naměření vrcholové hodnoty impulzu výboje, jak je vidět na obrázku (Obr. 3.8). *Dead Time* lze nastavit nejméně na 5  $\mu$ s a pokud je jeho hodnota velmi malá, může dojít k vícenásobnému záznamu jednoho výboje nebo v opačném případě k nezaznamenání výboje následujícího. Nastavení *Dead Time* a *LLD* jsou navzájem závislé a to jak po stránce hardwarových možností, tak na charakteru výbojové činnosti.



Obr. 3.8 Znárodnění funkce LLD a Dead Time

**Coding** – Umožňuje výběr osy *lineární unipolární* (kladné/záporné) používané pro měření výbojů na střídavém napětí nebo *lineární bipolární* pro měření výbojů na stejnosměrném napětí. Výběr unipolárního uspořádání s sebou přináší výhodu v podobě dvojnásobné kvantovací přesnosti.

**Waveform** – Umožňuje zobrazení pomocné křivky napětí, která je superponována přímo do záznamu měřených částečných výbojů. Tato křivka spolu s měřenými výboji může být na obrazovce fázově posouvána nastavením hodnoty *Phase Shift* a dokáže také zohlednit případnou deformaci sinusového signálu. Nástroj *Waveform* jsem využíval při měření částečných výbojů na střídavém napětí, kde jsem zvolením *Acquired* a úpravou *Phase Shift* zobrazil jednu periodu napětí zdroje. Při měření výbojů na stejnosměrném napětí byl tento nástroj vypnut zvolením *Off*.

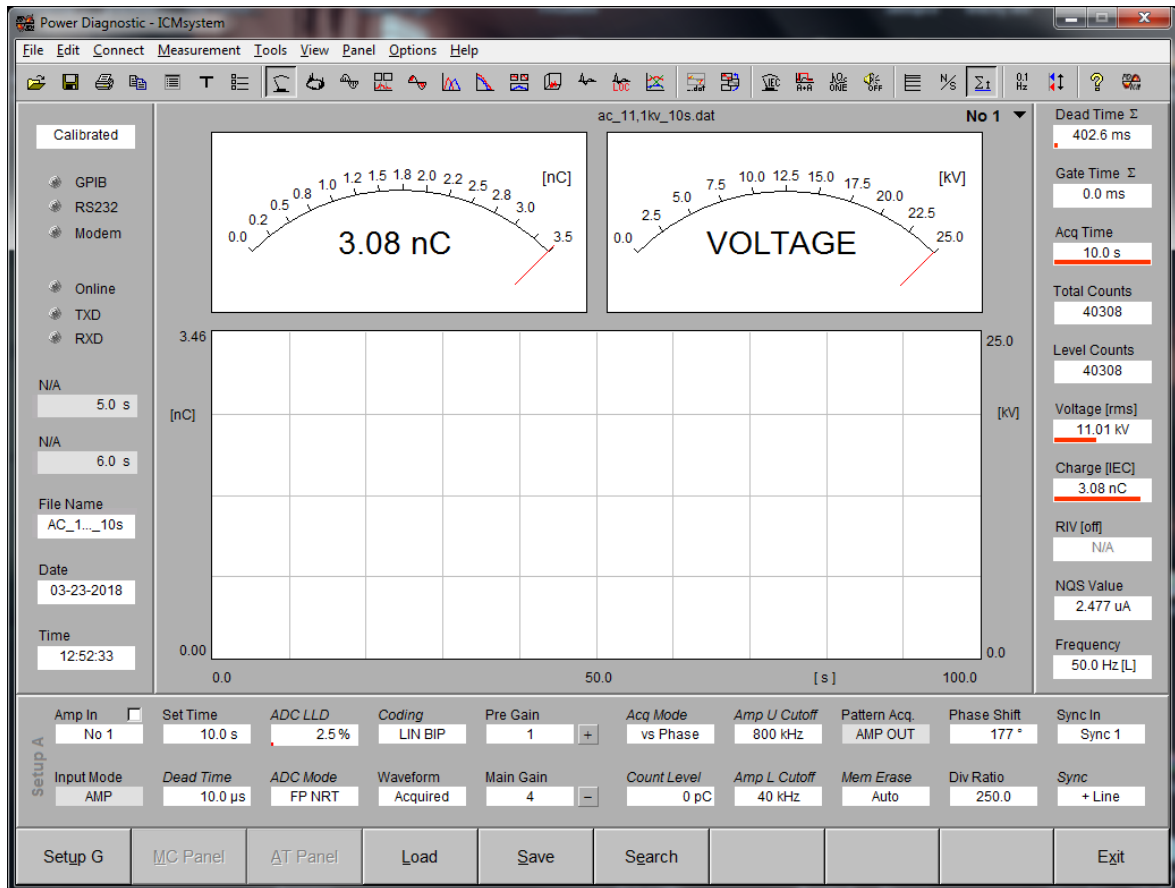
**Pre Gain a Main Gain** – Nastavení zesílení v kombinaci předzesilovače a hlavního zesilovače, jejichž ovládání je dáno tlačítkem + a -. Slouží k optimalizaci zobrazení měřeného signálu na obrazovce. Volbu tohoto zesílení lze kontrolovat v pravém panelu, kde je zobrazena úroveň výbojů pomocí červené lišty, která jestliže je červeně vyplněna celá, zobrazení výbojů tak odpovídá celému rozsahu svislé osy v grafu. Zvolené zesílení je určitým způsobem limitováno parametry zesilovačů a může mít vliv na měření. Jeho doporučené nastavení pro konkrétní aplikace lze naléznout v manuálu.

**Acq Mode** – Nastavení osy X vyjádřené v režimu fáze (*vs Phase*), který je určený pro testy na střídavém napětí nebo v režimu času (*vs Time*) určeného ke sledování zkoušek a vyhodnocování odchylek výbojové aktivity na stejnosměrném napětí.

**Sync** – Volba synchronizačního zdroje, kde zvolení *DC-Mode* je určeno pro stejnosměrné měření výbojů, výběrem *Line* (kladné/záporné) dochází k akceptování frekvence síťového napětí přístroje a volbou *Extern* lze frekvenci napětí zadávat manuálně.

Dále je také vhodné z nástrojové lišty používat položku **Meter** (Obr. 3.9), která přepíná obrazovku do aktuálního měřicího režimu. Tato obrazovka obsahuje nahoře dvě okna, z nichž levé okno zobrazuje aktuální výbojovou činnost v jednotkách nC případně pC, pravé okno uvádí aktuální velikost napětí. V níže umístěném velkém okně probíhá záznam aktuální výbojové činnosti a napětí v závislosti na čase (od 0 – 100 s).

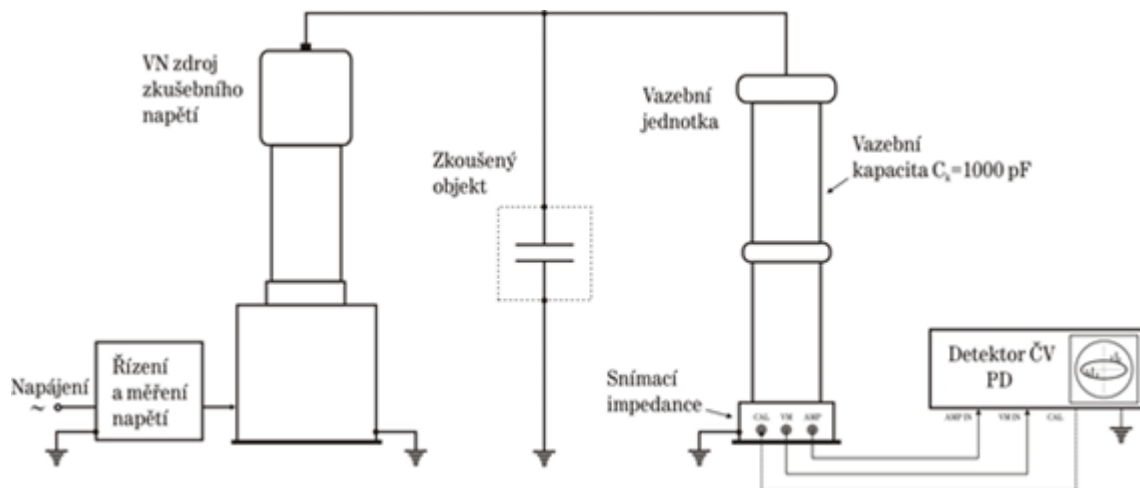




Obr. 3.9 ICMsystem – Uživatelské rozhraní Meter

### 3.2 Návrh experimentů pro měření detektorem částečných výbojů

Vzhledem k pokročilému vývoji a neustálému zlepšování výše zmíněného detektoru ICMsystem firmou Power Diagnostix jsem se rozhodl tento typ detektoru použít i v mém měření. Zapojení, které jsem sestavil k realizaci měření částečných výbojů, odpovídá měřicímu obvodu s paralelní snímací impedancí uvedeného v kapitole 2.2.1.1 Galvanická metoda. Jeho schéma s jednotlivými prvky použitými pro tato měření je názorně zobrazeno na následujícím obrázku (Obr. 3.10).



Obr. 3.10 Schéma zapojení měřicího obvodu pro detekci částečných výbojů [4]

### 3.2.1 Zkoušené objekty a použité zdroje vysokého napětí (AC a DC)

Zkoušeným objektem pro vznik částečných výbojů na střídavém a stejnosměrném napětí jsem zvolil **kalibrační jiskřiště**, které bylo popsáno v kapitole 3.1.1. Dále jsem nad rámec své práce za účelem lepšího vyhodnocení chování částečných výbojů na stejnosměrném napětí také jako zkoušený objekt použil **model VN vedení** (Obr. 3.11). Ten se skládá z tenkého napnutého měděného drátu s průměrem 0,4 mm o celkové délce 125 cm a vzdálenosti 17 cm od země, kterou tvoří dřevěná deska, pokrytá měděným plechem. Mezi drátem a izolátory jsou umístěny kapacitní kruhy, které slouží k eliminaci jinak vznikajících klouzavých výbojů. Tento model byl sestaven pracovníky v prostoru vysokonapěťové laboratoře KEE Západočeské Univerzity v Plzni.



Obr. 3.11 Model VN vedení – fotografie z měření částečných výbojů na negativním DC napětí

Jako zdroj střídavého napětí (AC) byl k dispozici **olejem chlazený transformátor ČKD Stalingrad** o zdánlivém výkonu 10 kVA při zatěžovacím proudu 83 mA (Příloha B) a švýcarský **transformátor Tettex** o zdánlivém výkonu 10 kVA při zatěžovacím proudu 66 mA, který byl mimo jiné umístěn v laboratoři specializované přímo pro měření částečných výbojů (Příloha C).

Jako zdroj stejnosměrného napětí (DC) byl k dispozici **Modulární systém GBS 13/270** vyrobený firmou HIGHVOLT (Obr. 3.12), schopný vytvořit pozitivní nebo negativní napětí o velikosti až 270 kV při zatěžovacím proudu 13 mA. Tento systém je složený z několika prvků, které jsou spolu s jejich parametry a fotografiemi uvedeny v příloze (Příloha D). Na tomto systému je potřeba, v závislosti na zvolené polaritě stejnosměrného napětí, správně orientovat vysokonapěťové usměrňovače G 270 (Příloha E). Parametry a další údaje tohoto systému jsou také volně ke stažení z internetových stránek výrobce [27] a [28].



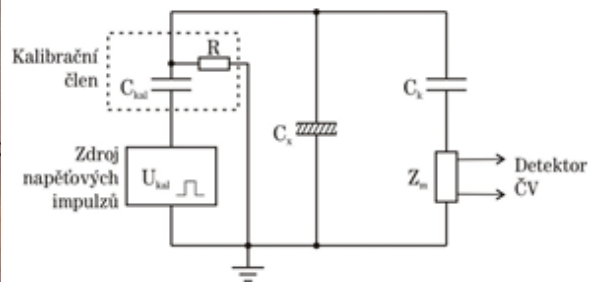
Obr. 3.12 Modulární systém GBS 13/270 – zapojený pro měření na negativním DC napětí

Jako další zdroj vysokého stejnosměrného napětí (DC) byl k dispozici **Tesla BS 222a**, který umožňuje zkoušení elektrické pevnosti od 115 V do 50 kV při trvalém zatěžovacím proudu 2 mA. Tento zdroj se skládá ze dvou samostatných přístrojů, které jsou spojeny kabelem v pancéřové hadici – ovládací jednotky a vlastního zdroje vysokého napětí. Další specifikace tohoto zdroje jsou uvedeny v příloze (Příloha F).

### 3.2.2 Navržený postup pro měření částečných výbojů detektorem

Pro detekci výbojů na kalibračním jiskřišti jsem před samotným měřením ze zcela sestaveného obvodu dle Obr. 3.10 nejprve odpojil detektor a otestoval maximální možnou velikost přivedeného napětí jeho postupným zvyšováním, dokud nedošlo mezi hrotem a miskou k vytvoření vodivé cesty až do přeskočení. Velikost tohoto napětí činila přibližně 18 kV, tudíž tato hodnota při samotném měření detektorem nesměla být překročena, jinak by hrozilo jeho zničení. V případě modelu VN vedení nebyla velikost přeskokového napětí měřena.

Dále jsem do obvodu opět připojil detektor a před každým měřením jsem nejprve provedl kalibraci měřicího obvodu pomocí kalibrátoru, který jsem zapojil na vstupní svorku zkoušeného objektu a společnou zem (Obr. 3.13). Hodnotu kalibračního náboje na kalibračním přístroji CAL1A jsem volil 100 pC.



Obr. 3.13 Připojený kalibrátor na kalibračním jiskřišti [4]

$C_x$  – Objekt měření,  $C_k$  – Vysokonapěťový vazební kapacitor,  $Z_m$  – Měřicí impedance

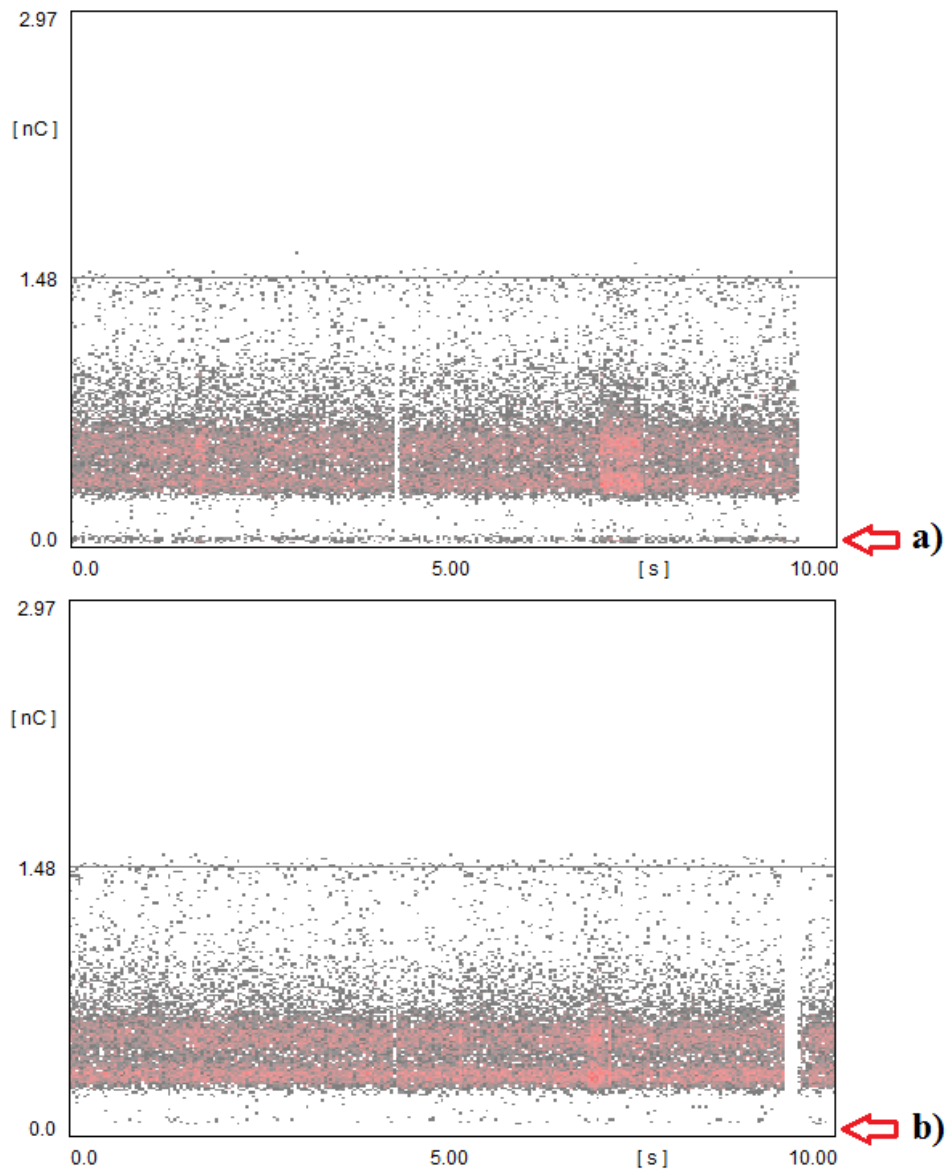
V programu ICMsystem – Map jsem poté zapnul měření a provedl kalibraci dvojitým kliknutím na naměřený náboj, kterému jsem přiřadil hodnotu 100 pC. Poté jsem kalibrátor z obvodu odpojil. V programu jsem také před samotným spuštěním zdroje nastavil čas měření na 10 vteřin, Dead Time 10  $\mu$ s, LLD 2,5%. Toto nastavení jsem si připravil k dosažení předběžného průzkumu, jak bude naměřený průběh částečných výbojů vypadat, a to za účelem správného přednastavení LLD v závislosti na velikosti zaznamenaného šumu. Hodnotu Dead Time jsem trvale pro všechna prováděná měření zvolil 10  $\mu$ s.

Záznam částečných výbojů po zapojení zkušební obvodu, kalibraci a přednastavení programu jsem prováděl následujícím postupem:

- 1) Ujistil jsem se, že uzemňovací tyč, která slouží k dotyku se zkušebním obvodem pro vybití přebytečného náboje před manipulací s připojenými zařízeními, je na svém místě, a ochranná dvířka do prostoru se zkušebním obvodem jsou uzavřena tak, aby ochranný systém laboratoře umožnil bezpečné spuštění transformátoru.
- 2) Na napájecím zdroji jsem postupně zvyšoval napětí až do zapalovacího napětí, což se projevilo tím, že se v programu ICMsystem v záložce *Meter* začaly objevovat částečné výboje. Jejich detekce byla lehce zjiřitelná pomocí prostředního okénka

zobrazujícího velikost náboje v čase, jenž při výskytu výbojů vzrostl z řádu několika pC, které odpovídalo okolnímu rušení, na desítky pC (nebo jednotky nC) a na této hodnotě byl udržován. Velikost zesílení jsem během měření upravoval tak, aby v pravém panelu *Charge [IEC]*, kde je zobrazena aktuální úroveň obálky výbojů pomocí červené lišty, byla tato lišta vyplněna ze 3/4 svého celkového rozsahu. Tímto způsobem bylo docíleno toho, že zaznamenané výboje v záložce *Map* zaplnily celý prostor hlavního okna zobrazující závislost velikosti celkového náboje na fázi (v případě AC napětí) nebo na čase (v případě DC napětí).

- 3) V záložce *Map* jsem spustil záznam výbojů pro konkrétní hladinu napětí v časovém intervalu 10 vteřin, a poté jsem podle tvaru naměřeného průběhu upravil velikost LLD tak, aby záznam neobsahoval šum v podobě malých kapacitních nábojů, které by zkreslovaly celkové měření částečných výbojů. Pokud se velikost LLD prokázala na konkrétní velikosti a polaritě napětí jako příliš malá nebo naopak vysoká, upravoval jsem ji v programu podle potřeby (Obr. 3.14)



Obr. 3.14 Průběh závislosti velikosti náboje v čase – záznam částečných výbojů s:  
 a) Špatně nastaveným LLD (obsah šumu)  
 b) Správně nastaveným LLD (bez obsahu šumu)

- 4) Po správném nastavení LLD, jsem pro danou hladinu napětí začal v programu zaznamenávat průběhy částečných výbojů s nastavenou dobou sběru dat 10 sekund, která byla pro další záznamy postupně zvyšována o 10 vteřin a to celkově od 10 – 60 sekund.
- 5) Pokud po naměření průběhu v posledním časovém intervalu 60 vteřin nedošlo k uhašení výbojů, vyčkal jsem 3 minuty, během kterých bylo na testovaný objekt stále přiložené napětí. Po uplynutí této doby jsem provedl opakovaný 60 vteřinový sběr dat, za účelem ověření změny stavu velikosti celkového náboje a počtu

vzniklých výbojů při delším časovém namáhání. Tento krok jsem v případě potřeby při zvláštních pozorování několikrát opakoval.

- 6) Veškerá naměřená data jsem ukládal do souboru s koncovkou *.dat* pod názvem o jaký typ napětí, jeho velikost a čas měření se jednalo. Tento typ souboru obsahuje všechny informace zaznamenané v programu ICMsystem, a který v něm lze kdykoliv opět otevřít, aniž by musel být k počítači připojený detektor částečných výbojů.
- 7) Po naměření a uložení všech časových intervalů na příslušné hladině napětí, jsem na zdroji snížil napětí na nulu, aby došlo k úplnému vybití vzniklých výbojů před dalším měřením na jiné hladině napětí. Dbal jsem však stále na to, aby hodnota napětí nepřesáhla velikost napětí přeskokového.

Mezi každým typem měření jsem rovněž snížil hodnotu napětí zdroje na nulu a po vstupu do zkušebního prostoru jsem před samotnou manipulací s připojeným obvodem napřed provedl jeho dotyk uzemňovací tyčí, aby došlo k odvedení nahromaděného náboje, který se v něm mohl stále ještě udržet. V případě připojeného Modulárního systému GBS 13/270 bylo také potřeba touto tyčí provést kontakt po celé délce všech vysokonapěťových kondenzátorů modulárního systému, jelikož by v případě poškození některého z článků uvnitř kondenzátoru mohlo dojít při jeho manipulaci osobou k nebezpečnému přeskoku uloženého náboje.



## 4 Realizace experimentů a analýza dosažených výsledků

Detekci a záznam částečných výbojů jsem realizoval pomocí digitálního měřicího systému ICMsystem s použitím aktuální softwarové verze 4.79. Zapojení, které jsem použil k realizaci měření částečných výbojů, odpovídá měřicímu obvodu s paralelní snímací impedancí uvedeného v kapitole 2.2.1.1 Galvanická metoda. Veškeré měření probíhalo v laboratorních podmínkách v prostoru vysokonapěťové laboratoře KEE Západočeské Univerzity v Plzni (Příloha G) při těchto atmosférických podmínkách:

**Teplota:** 22,1 °C

**Vlhkost:** 36 %

**Tlak vzduchu:** 97,35 kPa

Záznamy z provedených měření jsem ukládal do tzv. PD Patternů, což jsou obrazce, znázorňující velikost vrcholových hodnot obálky náboje a četnost částečných výbojů v závislosti na fázi (pro AC napětí) nebo na čase (pro DC napětí). V některých případech měření, ve kterých se vyskytovalo převážně velké množství výbojů, docházelo k zahlcení detektoru velkým množstvím dat, což se projevilo na zaznamenaném průběhu chybou v podobě náhlého přerušování zápisu dat po dobu až několika vteřin. Tato přerušování tak mohla ve výsledku způsobit zobrazení nižšího celkového počtu zaznamenaných výbojů. V případě výskytu této chyby v některém z naměřených záznamů jsem tento důsledek bral na zřetel během konečných vyhodnocení.

Sledovanými veličinami při záznamu částečných výbojů pomocí detektoru v mém měření byly:

**Doba sběru dat  $T_{ref}$**  – Manuálně nastavená celková doba záznamu výbojů detektorem, vyjádřená v sekundách (s).

**Napětí napájecího zdroje  $U_{ipeak}$**  – Vrcholová hodnota DC napětí přivedeného na svorky zkoušeného objektu v kilovoltech (kV). Toto napětí bylo odečteno z externě připojeného voltmetru.

**Napětí napájecího zdroje  $U_{ief}$**  – Efektivní hodnota AC napětí přivedeného na svorky zkoušeného objektu v kilovoltech (kV). Toto napětí bylo rovněž odečteno z

externě připojeného voltmetru. Přepočítání efektivní hodnoty napětí na vrcholovou lze provést pomocí vzorce:  $U_{i\text{peak}} = U_{i\text{ef}} * \sqrt{2}$ .

**Charge [IEC]** – Velikost aktuální obálky naměřeného náboje značeného v mém měření jako **Q<sub>IEC</sub>** v pikocoulombech (pC).

**NQS Value** – Střední proud částečných výbojů značený v mém měření jako **I<sub>PD</sub>** zaokrouhlený na celé jednotky v nanoampérech (nA). Jedná se vlastně o podíl celkové sumy všech výbojových pulzů a celkového měřicího času.

**Celkový náboj výbojů Q<sub>cumulative</sub>** – Jedná se o násobek středního proudu částečných výbojů a aktuální doby sběru dat, který je v mém měření vyjádřený v nanocoulombech (nC).

**Total Counts** – Celkový počet zaznamenaných výbojů za dobu měření, který je v mém měření značen jako **ΣVýbojů**. Tento počet je na jednotlivých záznamech pořízených detektorem barevně odlišen dle tabulky uvedené na obrázku 3.10 v kapitole 3.1.2.

**LLD** – Velikost nastaveného potlačení nízkých úrovní, popsáno v kapitole 3.1.2 a postupu měření v kapitole 3.2.2.

**Dead Time** – Velikost nastaveného mrtvého času, popsáno v kapitole 3.1.2. Trvale nastaven na hodnotu 10 μs.

**Zesílení** – Velikost nastaveného zesílení *Pre Gain / Main Gain*, které byly popsány v kapitole 3.1.2.

#### 4.1.1 Měření částečných výbojů na střídavém napětí (AC)

Zkoušeným objektem částečných výbojů na střídavém napětí bylo **kalibrační jiskřiště**, které bylo popsáno v kapitole 3.1.1.

V návaznosti na již zmíněné typy nastavení v kapitole 3.1.2 pro správné měření na střídavém napětí jsem musel v programu zvolit následující parametry:

*Sync: +Line, Coding: LIN BIP, Acq Mode: vs Phase, Waveform: Acquired* a upravit hodnotu *Phase Shift* tak, aby byla zobrazena jedna perioda napájecího napětí.

V prvním měření jsem jako zdroj střídavého napětí použil **olejem chlazený transformátor ČKD Stalingrad**. Pro sledování velikosti napětí jsem na napájecí svorky v tomto měření připojil AC/DC Peak Voltmeter MU17 vyrobený firmou HIGHVOLT (Příloha H), jehož technická data jsou volně ke stažení na stránkách výrobce [29].

Ve druhém měření částečných výbojů na kalibračním jiskřišti jsem jako zdroj střídavého napětí použil švýcarský **transformátor Tettex**. Pro měření velikosti napětí jsem v tomto případě na napájecí svorky připojil digitální voltmetr METRA Hit 18S. (Příloha I)

Záznam částečných výbojů probíhal po zapojení zkušebního obvodu a přednastavení programu dle postupu uvedeného v kapitole 3.2. Tímto způsobem jsem v případě částečných výbojů na střídavém napětí pro obě měření prováděl jejich záznam na zvolených hladinách efektivního napětí **4,3 kV, 7,5 kV, 8,5 kV a 11,1 kV**. Tyto hladiny po přepočtení odpovídají vrcholovým hodnotám napětí **6,08 kV, 10,61 kV, 12,02 kV a 15,7 kV**.

#### 4.1.2 AC výboje na kalibračním jiskřišti s výskytem pouze v záporné polaritě napětí – Zdroj: Transformátor ČKD

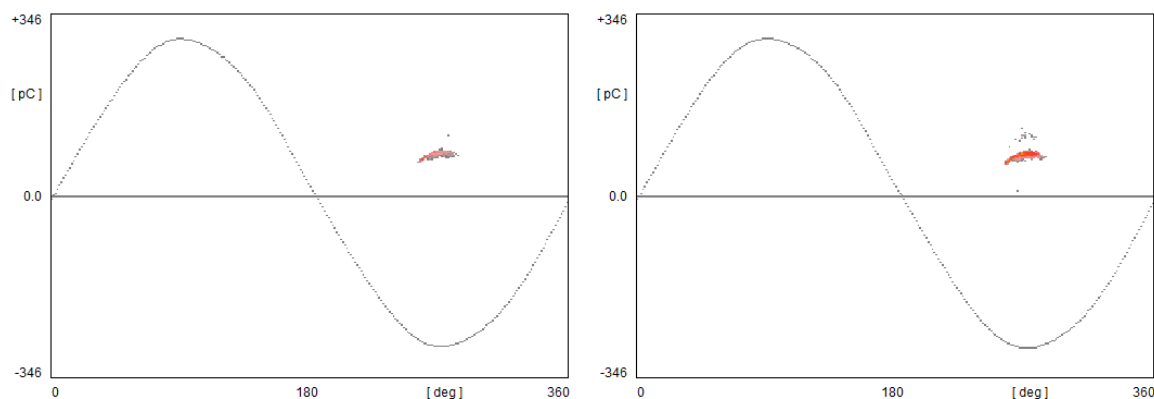
K zapálení částečných výbojů na kalibračním jiskřišti pro střídavý charakter napětí při napájení transformátorem ČKD došlo při efektivní hodnotě napětí 4,3 kV, kdy se na detektoru začala objevovat koróna pouze v záporné polaritě napětí. Na této napěťové hladině jsem prováděl první měření, jehož naměřené veličiny jsou uvedeny v tabulce (Tab. 4.1). Optimální velikostí LLD se v tomto měření prokázala hodnota 2,5 %. Velikost zesílení po celou dobu měření dostačovalo na 1/40.

Tab. 4.1 Tabulka naměřených hodnot detektorem ICMsystem s výskytem výbojů pouze v záporné polaritě střídavého napětí 4,3 kV na kalibračním jiskřišti v počátečních časových intervalech 10 – 60 vteřin záznamu s napájením transformátorem ČKD

U <sub>ief</sub> = 4,3 kV							
Doba sběru dat T <sub>ref</sub> (s)	10	20	30	40	50	60	60 (Po 3 min pod napětím)
I <sub>PD</sub> (nA)	4,52	3,282	3,483	3,651	3,423	3,51	1,77
Q <sub>cumulative</sub> (nC)	45,2	65,64	104,49	146,04	171,15	210,6	106,2
ΣVýbojů	602	858	1372	1947	2316	2839	1381

Dle naměřených hodnot (Tab. 4.1) docházelo s rostoucí dobou sběru dat i k nárůstu velikosti celkového náboje vzniklých výbojů, ovšem při delším napět'ovém namáhání po dobu 3 minut došlo k jejich poklesu v souvislosti s poklesem jejich středního proudu.

Na níže uvedeném obrázku (Obr. 4.1) je zobrazen 10 vteřinový (levý) a 60 vteřinový (pravý) záznam velikosti náboje v závislosti na fázi pořízený detektorem pro tuto napět'ovou hladinu.



Obr. 4.1 Záznam 10 vteřin (levý) a 60 vteřin (pravý) velikosti náboje na fázi pro 4,3 kV AC výboje na kalibračním jiskřišti s výskytem pouze v záporné polaritě napětí – Zdroj: Transformátor ČKD

Na těchto průbězích (Obr. 4.1) je prostřednictvím barevného označení viditelné již jednou zmíněné celkové zvýšení četnosti vzniklých výbojů v závislosti na rostoucí době sběru dat.

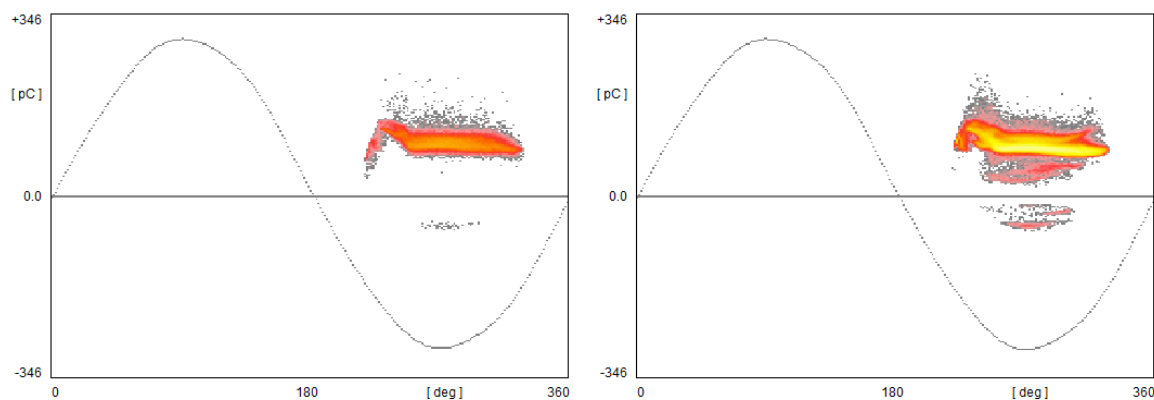
Další měřenou hodnotou napětí, kdy docházelo k výbojům pouze v záporné polaritě napětí, byla hodnota 7,5 kV. Naměřené veličiny těchto výbojů jsou uvedeny v tabulce (Tab. 4.2). Optimální velikostí LLD se v tomto měření prokázala hodnota 5,1 %, jelikož docházelo k vyzařování již většího množství šumu zkreslujícího měření. Velikost zesílení po celou dobu měření stále dostávalo na 1/40.

Tab. 4.2 Tabulka naměřených hodnot detektorem ICMsystem s výskytem výbojů pouze v záporné polaritě střídavého napětí 7,5 kV na kalibračním jiskřišti v počátečních časových intervalech 10 – 60 vteřin záznamu s napájením transformátorem ČKD

U <sub>ief</sub> = 7,5 kV							
Doba sběru dat T <sub>ref</sub> (s)	10	20	30	40	50	60	60 (Po 3 min pod napětím)
I <sub>PD</sub> (nA)	1013	1028	1019	1031	1043	1048	1043
Q <sub>cumulative</sub> (nC)	10130	20560	30570	41240	52150	62880	62580
ΣVýbojů	101920	207060	310468	437003	565926	682894	688265

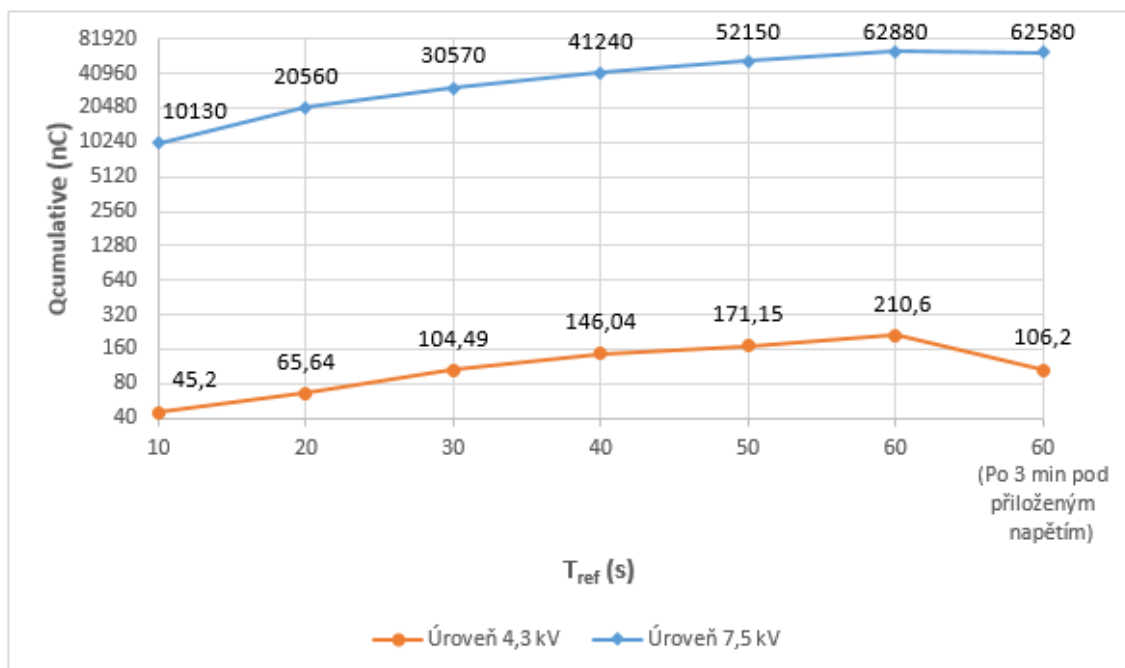
Dle naměřených hodnot (Tab. 4.2) docházelo s rostoucí dobou sběru dat i k nárůstu velikosti celkového náboje vzniklých výbojů a v tomto případě při delším napěťovém namáhání po dobu 3 minut došlo k jeho mírnému poklesu.

Na níže uvedeném obrázku (Obr. 4.2) je zobrazen 10 vteřinový (levý) a 60 vteřinový (pravý) záznam velikosti náboje v závislosti na době sběru dat pořízený detektorem pro tuto napěťovou hladinu.



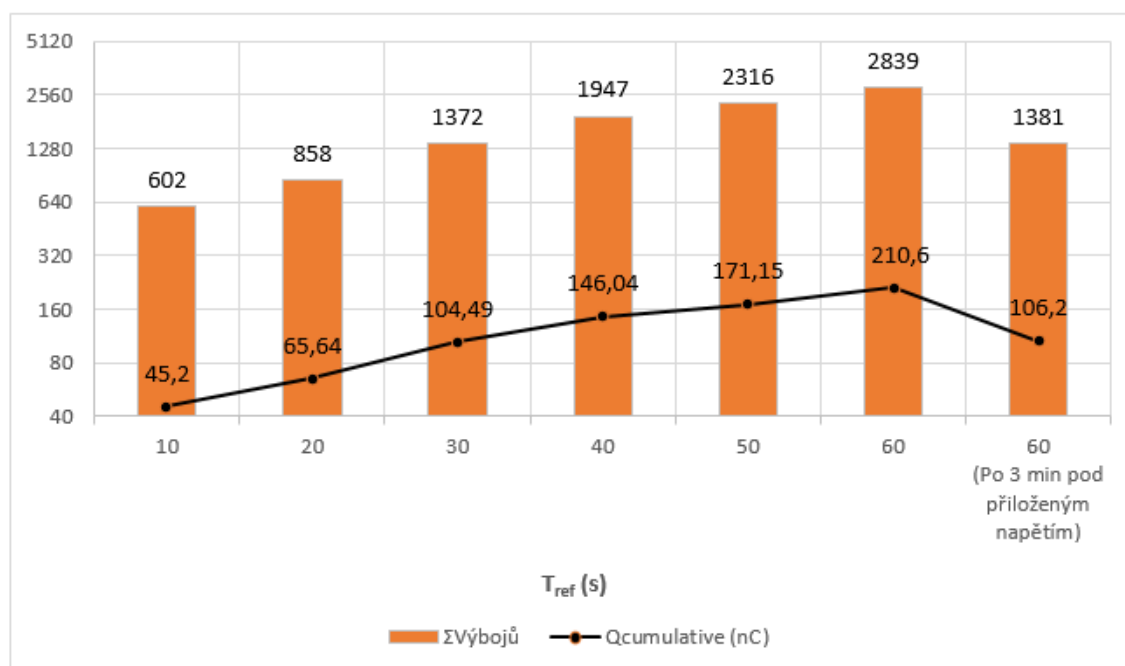
Obr. 4.2 Záznam 10 vteřin (levý) a 60 vteřin (pravý) velikosti náboje na fázi pro 7,5 kV AC výboje na kalibračním jiskřišti s výskytem pouze v záporné polaritě napětí – Zdroj: Transformátor ČKD

I v tomto případě je z výše uvedených průběhů (Obr. 4.2) patrné, že s rostoucí dobou sběru dat docházelo k nárůstu celkové četnosti výbojů, ovšem při napěťovém namáhání po dobu 3 minut (dle Tab. 4.2) došlo k jejich nízkému poklesu v souvislosti s poklesem jejich středního proudu. Tento pokles byl na napěťové hladině 7,5 kV v porovnání s napěťovou hladinou 4,3 kV dle níže uvedeného grafu (Obr. 4.3) výrazně menší, což bylo nejspíše způsobeno tím, že částečné výboje nejsou schopny při menší hodnotě napěťového namáhání udržet svoji velikost a postupně tak rychleji uhasínají.



Obr. 4.3 Porovnání naměřených průběhů velikosti celkového náboje AC výbojů v závislosti na době sběru dat na kalibračním jiskřišti pouze v záporné polaritě napětí, zdroj: Transformátor ČKD

Mezi celkovým počtem výbojů a velikostí náboje v závislosti na době sběru dat existuje u AC výbojů vzniklých na kalibračním jiskřišti dle následujícího grafu (Obr. 4.4) určitá úměrnost. S rostoucí velikostí celkového náboje, který je dán hodnotou středního proudu vynásobeného příslušnou dobou sběru dat, roste i celkový počet výbojů a naopak.



Obr. 4.4 AC výboje na kalibračním jiskřišti pouze v záporné polaritě napětí, zdroj: Transformátor ČKD (úroveň 4,3 kV)

Veškeré grafické záznamy získané detektorem ICMsystem pro jednotlivé doby sběru dat měření z této kapitoly jsou k porovnání uvedeny v příloze (Příloha J, Příloha K).

#### 4.1.3 AC výboje na kalibračním jiskřišti s výskytem v obou polaritách napětí – Zdroj: Transformátor ČKD

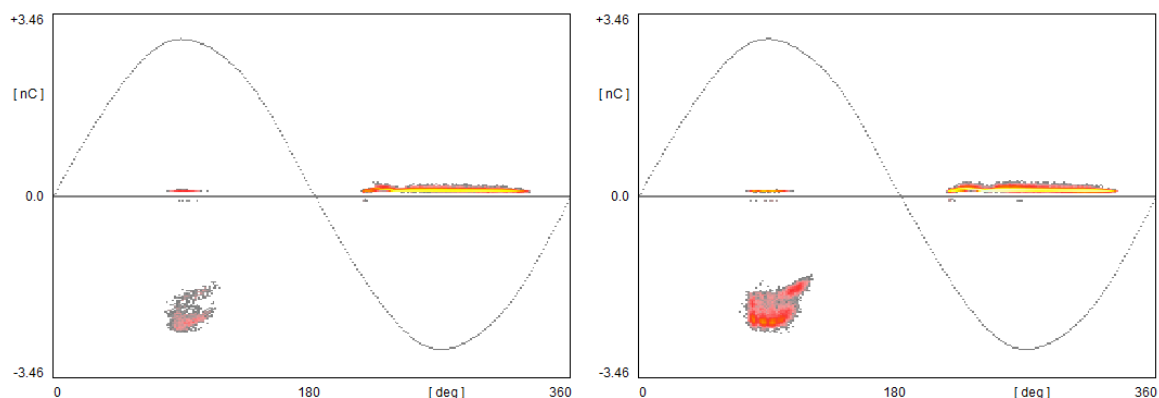
Dalším zvyšováním hladiny napětí došlo při její efektivní hodnotě 8,5 kV k výskytu částečných výbojů v obou jejích polaritách. Na této napěťové hladině jsem prováděl první měření, jehož naměřené veličiny jsou uvedeny v tabulce (Tab. 4.3). Optimální velikostí LLD se v této kapitole ve všech provedených měřeních prokázala hodnota 2,5 %. Velikost zesílení po celou dobu těchto měření dostávalo na 1/4.

Tab. 4.3 Tabulka naměřených hodnot detektorem ICMsystem s výskytem výbojů v obou polaritách střídavého napětí 8,5 kV na kalibračním jiskřišti v počátečních časových intervalech 10 – 60 vteřin záznamu s napájením transformátorem ČKD

<b><math>U_{ief} = 8,5 \text{ kV}</math></b>							
<b>Doba sběru dat <math>T_{ref}</math> (s)</b>	<b>10</b>	<b>20</b>	<b>30</b>	<b>40</b>	<b>50</b>	<b>60</b>	<b>60 (Po 3 min pod napětím)</b>
<b>IPD (nA)</b>	1339	1284	1295	805	1119	1261	1302
<b><math>Q_{cumulative}</math> (nC)</b>	13390	25680	38850	32184	55950	75660	78120
<b><math>\Sigma</math>Výbojů</b>	111104	169965	276149	178107	368313	469620	542644

Dle naměřených hodnot (Tab. 4.3) docházelo s rostoucí dobou sběru dat i k nárůstu velikosti celkového náboje vzniklých výbojů a to v tomto případě i při delším napěťovém namáhání po dobu 3 minut.

Na níže uvedeném obrázku (Obr. 4.5) je zobrazen 10 vteřinový (levý) a 60 vteřinový (pravý) záznam velikosti náboje v závislosti na fázi pořízený detektorem pro tuto napěťovou hladinu.



Obr. 4.5 Záznam 10 vteřin (levý) a 60 vteřin (pravý) velikosti náboje na fázi pro 8,5 kV AC výbojů na kalibračním jiskřišti s výskytem v obou polaritách napětí – Zdroj: Transformátor ČKD

Na těchto průbězích (Obr. 4.5) v porovnání s průběhy uvedenými v kapitole 4.1.2 (Obr. 4.2) je názorně vidět, že výboje v kladné půlčlenně byly v tomto případě méně časté, ale měly daleko větší amplitudu než výboje v záporné půlčlenně. Počet výbojů v záporné půlčlenně vzrost, ale kvůli nutnosti malého zesílení se tyto výboje vyskytovaly téměř v oblasti šumu.

Další měřenou efektivní hodnotou napětí, kdy docházelo stále k výbojům v obou polaritách, byla hodnota 11,1 kV. Naměřené veličiny těchto výbojů jsou uvedeny v tabulce (Tab. 4.4).

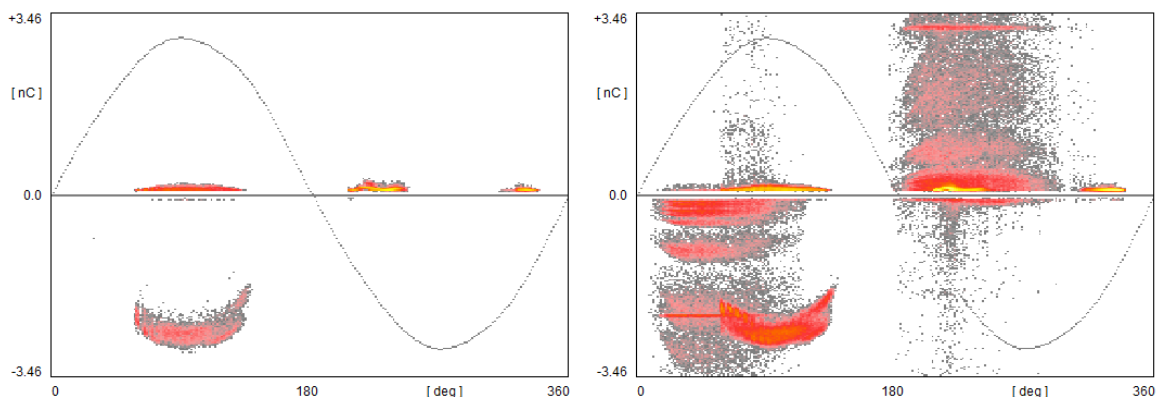
Tab. 4.4 Tabulka naměřených hodnot detektorem ICMsystem s výskytem výbojů v obou polaritách střídavého napětí 11,1 kV na kalibračním jiskřišti v počátečních časových intervalech 10 – 60 vteřin záznamu s napájením transformátorem ČKD

U <sub>ief</sub> = 11,1 kV						
Doba sběru dat T <sub>ref</sub> (s)	10	20	30	40	50	60
I <sub>PD</sub> (nA)	2477	2707	2850	2756	2809	4165
Q <sub>cumulative</sub> (nC)	24770	54140	85500	110240	140450	249900
ΣVýbojů	40308	89780	158661	190669	230495	251223

V případě měření na napětíové hladině 11,1 kV docházelo dle tabulky naměřených hodnot (Tab. 4.4) neustále k velkému nárůstu velikosti celkového náboje v závislosti na rostoucí době sběru dat.

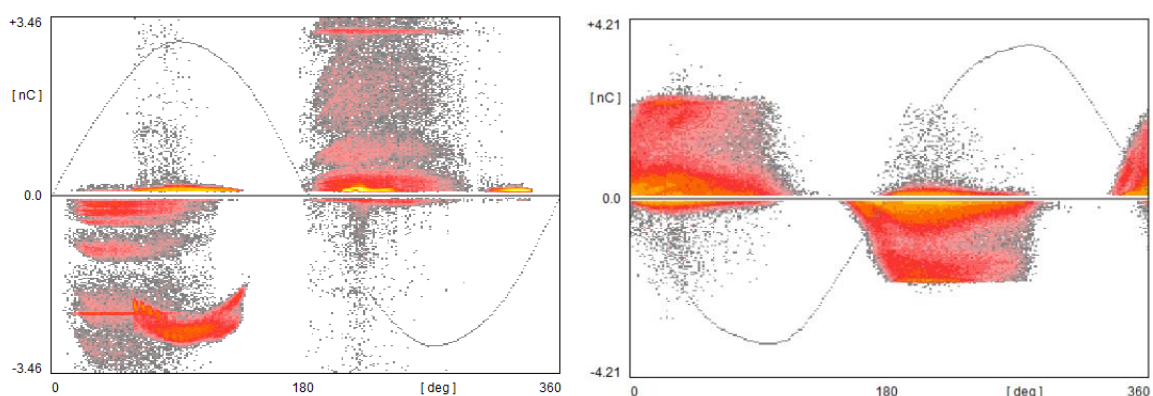
Na níže uvedeném obrázku (Obr. 4.6) je zobrazen 10 vteřinový (levý) a 60 vteřinový (pravý) záznam velikosti náboje v závislosti na době sběru dat pořízený detektorem pro tuto napětíovou hladinu.





Obr. 4.6 Záznam 10 vteřin (levý) a 60 vteřin (pravý) velikosti náboje na fázi pro 11,1 kV AC výbojů na kalibračním jiskřišti s výskytem v obou polaritách napětí – Zdroj: Transformátor ČKD

Na posledním průběhu na Obr. 4.6 (pravý) je během 60 vteřinového sběru dat viditelný neobvyklý záznam zřejmě parazitních výbojů, vyskytujících se v obou polaritách. Tento záznam se pravděpodobně skládá ze směsi korónového výboje vzniklého na kalibračním jiskřišti a klouzavých výbojů vzniklých na vývodové průchodce transformátoru ČKD. Toto tvrzení je opřeno o skutečnost, že na níže uvedeném obrázku (Obr. 4.7) je velmi patrná určitá podobnost mezi záznamem z tohoto měření a jiným experimentálním měřením výbojů, který byl proveden na modelu průchodky při velikosti přivedeného napětí 10 kV. Na těchto průbězích je vidět zejména podobnost v uspořádání jednotlivých nábojů a ostrém ohraničení výbojových mraků, které jsou typické pro klouzavé výboje.

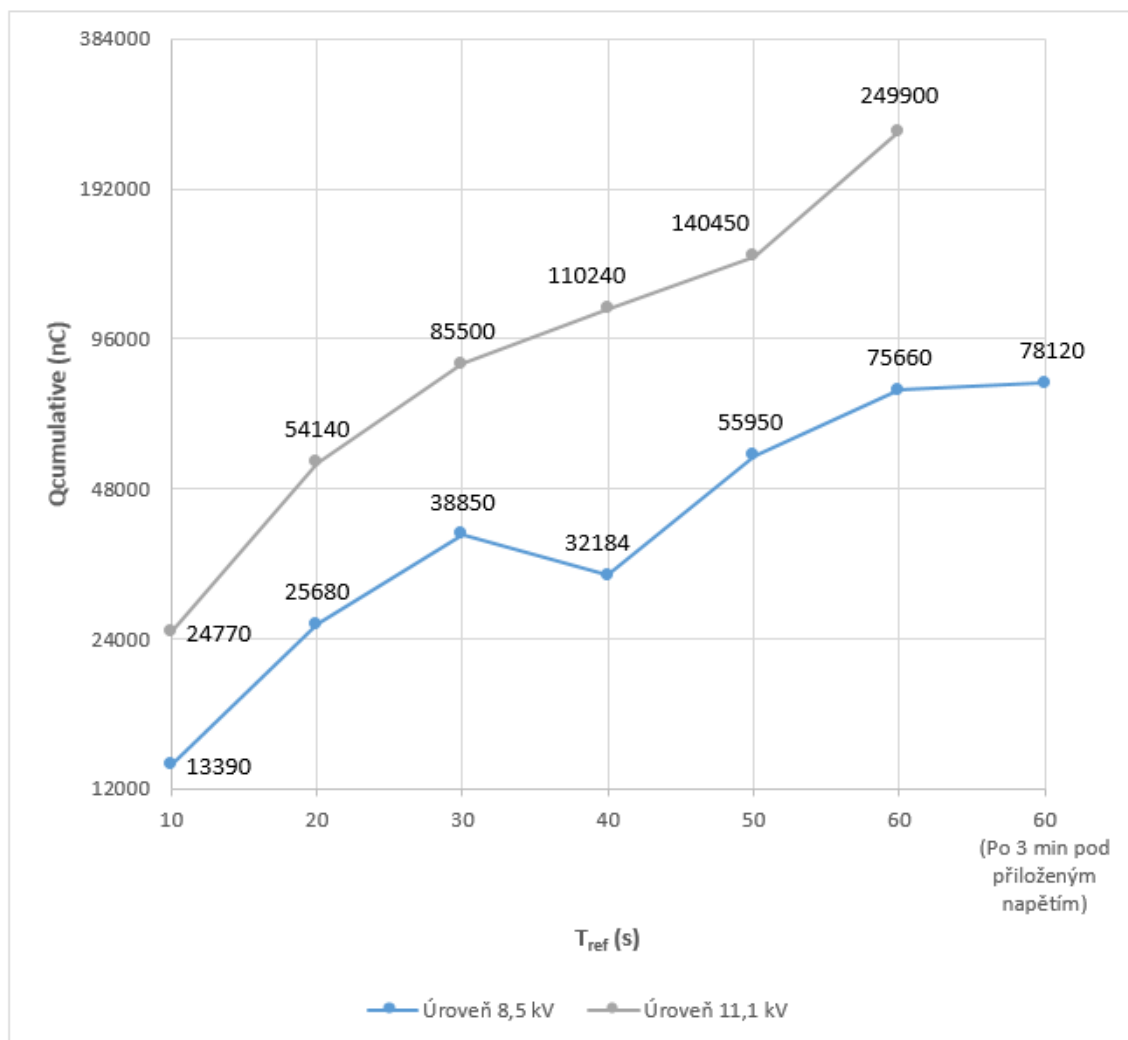


Obr. 4.7 Porovnání 60 vteřinových záznamů velikosti náboje na fázi pro úroveň napětí: 11,1 kV na kalibračním jiskřišti napájeného transformátorem ČKD (levý) a 10 kV na modelu průchodky (pravý), převzatého z [30]

Výskyt vzniklých parazitních výbojů jsem se v tomto měření pokusil eliminovat úplným vypnutím obvodu a následným dotykem uzemňovací tyči po celé délce vývodové

průchodky transformátoru a vazební kapacity. Během nového měření se však parazitní výboje začaly znovu objevovat v obou polaritách již při dosažení velikosti napětí 9 kV, a k jejich eliminaci nepomohlo ani vytvoření úplného přeskokového napětí na kalibračním jiskřišti při odpojeném detektoru. Z tohoto důvodu jsem již další měření výbojů na kalibračním jiskřišti při napájení transformátorem ČKD neprováděl, jelikož by výsledky byly příliš zkresleny parazitní výbojovou činností.

Grafické porovnání jednotlivých velikostí celkových nábojů v závislosti na době sběru dat pro napěťové hladiny 8,5 kV a 11,1 kV jsou zobrazeny na následujícím obrázku (Obr. 4.8).



Obr. 4.8 Porovnání naměřených průběhů velikosti celkového náboje AC výbojů v závislosti na době sběru dat na kalibračním jiskřišti v obou polaritách napětí, zdroj: Transformátor ČKD

Na výše uvedeném grafu (Obr. 4.8) je pro obě napěťové úrovně patrný rostoucí charakter velikosti celkového náboje v závislosti na rostoucí době sběru dat. V posledním 60 vteřinovém záznamu provedeném po 3 minutách napěťového namáhání pro napěťovou úroveň 11,1 kV byla velikost celkového náboje navýšena o výše zmíněné parazitní výboje. Během měření na napěťové hladině 8,5 kV však v případě 40 vteřinového záznamu došlo k většímu poklesu výbojů v záporné půlvlně, na úkor menšího nárůstu výbojů v kladné půlvlně, což se projevilo snížením velikosti celkového náboje.

Veškeré grafické záznamy získané detektorem ICMsystem pro jednotlivé doby sběru dat měření z této kapitoly jsou k porovnání uvedeny v příloze (Příloha L, Příloha M).

#### 4.1.4 AC výboje na kalibračním jiskřišti s výskytem pouze v záporné polaritě napětí – Zdroj: Transformátor Tettex

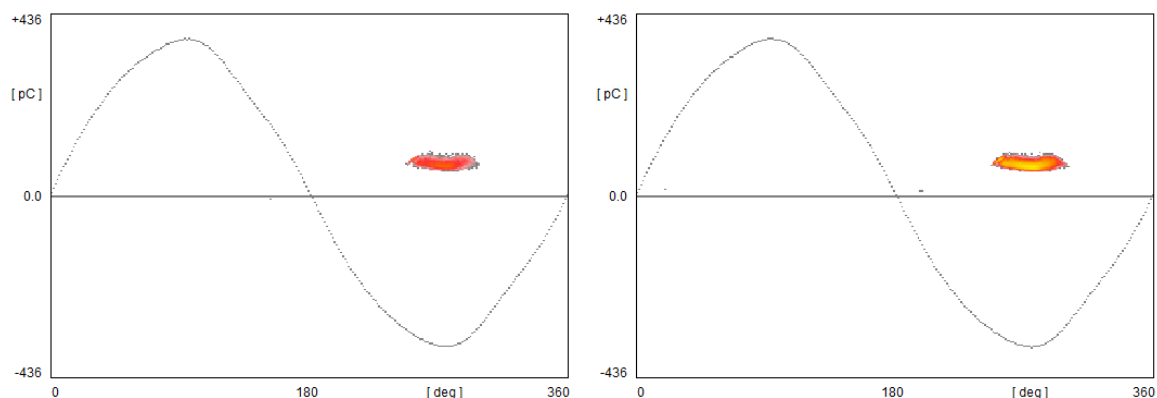
Stejně jako v předchozí kapitole 4.1.2, i v tomto případě při napájení transformátorem Tettex došlo k zapálení částečných výbojů na kalibračním jiskřišti při efektivní hodnotě napětí 4,3 kV, během které se na detektoru začala objevovat koróna pouze v záporné polaritě napětí. Na této napěťové hladině jsem prováděl první měření, jehož naměřené veličiny jsou uvedeny v tabulce (Tab. 4.5). Optimální velikostí LLD se v tomto měření prokázala hodnota 2,5 %. Velikost zesílení po celou dobu měření dostávalo na 1/40.

Tab. 4.5 Tabulka naměřených hodnot detektorem ICMsystem s výskytem výbojů pouze v záporné polaritě střídavého napětí 4,3 kV na kalibračním jiskřišti v počátečních časových intervalech 10 – 60 vteřin záznamu s napájením transformátorem Tettex

<b>U<sub>ief</sub> = 4,3 kV</b>							
<b>Doba sběru dat T<sub>ref</sub> (s)</b>	<b>10</b>	<b>20</b>	<b>30</b>	<b>40</b>	<b>50</b>	<b>60</b>	<b>60 (Po 3 min pod napětím)</b>
<b>I<sub>PD</sub> (nA)</b>	67	69	69	69	70	70	68
<b>Q<sub>cumulative</sub> (nC)</b>	667	1375	2072	2777	3496	4198	4069
<b>ΣVýbojů</b>	8838	18480	28127	37756	47474	57248	55252

Dle tabulky naměřených hodnot (Tab. 4.5) vykazovaly výboje na této napěťové úrovni stejný charakter jako v případě měření v předchozí kapitole 4.1.2 při napájení transformátorem ČKD uvedeného v Tab. 4.1.

Na níže uvedeném obrázku (Obr. 4.9) je zobrazen 10 vteřinový (levý) a 60 vteřinový (pravý) záznam velikosti náboje v závislosti na fázi pořízený detektorem pro tuto napěťovou hladinu.



Obr. 4.9 Záznam 10 vteřin (levý) a 60 vteřin (pravý) velikosti náboje na fázi pro 4,3 kV AC výboje na kalibračním jiskřišti s výskytem pouze v záporné polaritě napětí – Zdroj: Transformátor Tettex

Na těchto průbězích (Obr. 4.9) je podobně jako na průbězích uvedených v přechozí kapitole 4.1.2 na Obr. 4.1 viditelné celkové zvýšení četnosti vzniklých výbojů v závislosti na rostoucí době sběru dat.

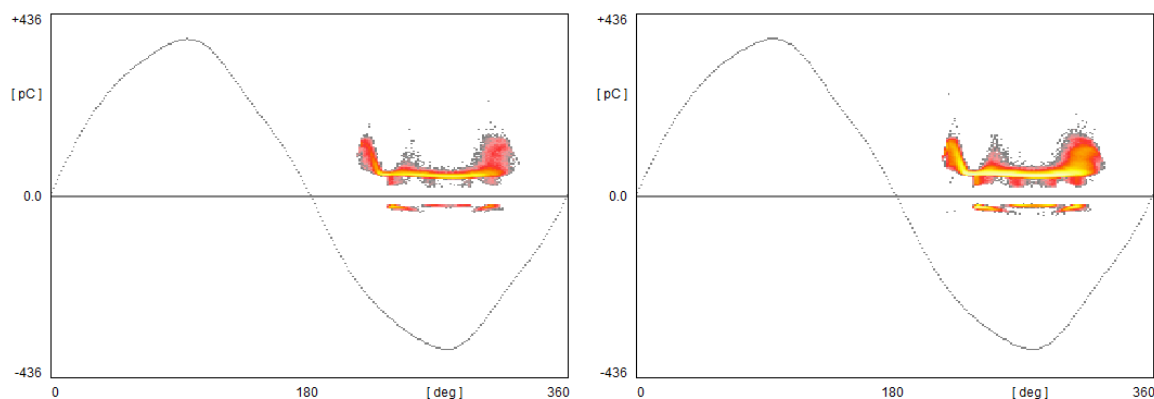
Další měřenou hodnotou, kdy docházelo k výbojům pouze v záporné polaritě napětí, byla napěťová hladina 7,5 kV. Naměřené veličiny těchto výbojů jsou uvedeny v tabulce (Tab. 4.6). Optimální velikostí LLD se v tomto měření prokázala hodnota 5,1 %, jelikož docházelo k vyzařování již většího množství šumu zkreslujícího měření. Velikost zesílení po celou dobu měření dostačovalo na 1/40.

Tab. 4.6 Tabulka naměřených hodnot detektorem ICMsystem s výskytem výbojů pouze v záporné polaritě střídavého napětí 7,5 kV na kalibračním jiskřišti v počátečních časových intervalech 10 – 60 vteřin záznamu s napájením transformátorem Tettex

U <sub>ief</sub> = 7,5 kV							
Doba sběru dat T <sub>ref</sub> (s)	10	20	30	40	50	60	60 (Po 3 min pod napětím)
I <sub>PD</sub> (nA)	903	907	910	921	918	921	933
Q <sub>cumulative</sub> (nC)	9026	18132	27297	36852	45875	55260	55962
ΣVýbojů	179309	358842	537887	720677	893246	1072508	1069060

V tomto případě dle tabulky naměřených hodnot (Tab. 4.6) docházelo s rostoucí dobou sběru dat i k nárůstu velikosti celkového náboje vzniklých výbojů, avšak při delším napěťovém namáhání po dobu 3 minut došlo k jeho mírnému poklesu.

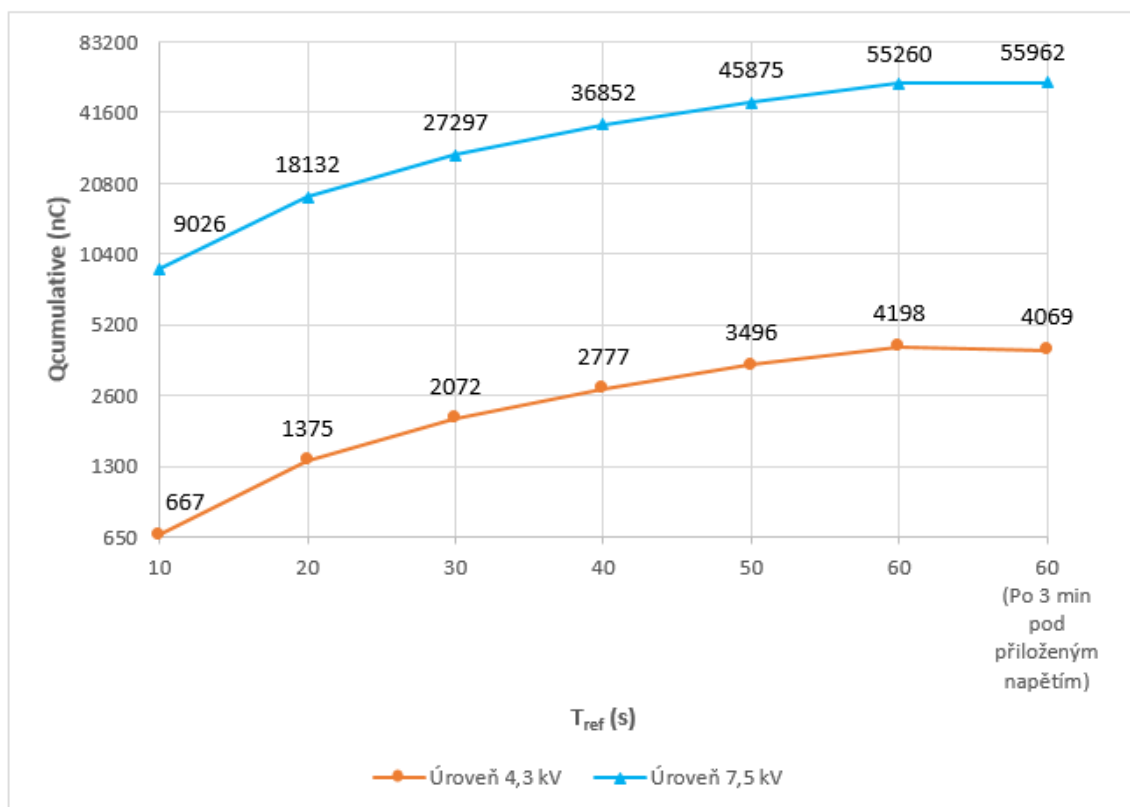
Na níže uvedeném obrázku (Obr. 4.10) je zobrazen 10 vteřinový (levý) a 60 vteřinový (pravý) záznam velikosti náboje v závislosti na fázi pořízený detektorem pro tuto napěťovou hladinu.



*Obr. 4.10 Záznam 10 vteřin (levý) a 60 vteřin (pravý) velikosti náboje na fázi pro 7,5 kV AC výboje na kalibračním jiskřišti s výskytem pouze v záporné polaritě napětí – Zdroj: Transformátor Tettex*

Z těchto průběhů (Obr. 4.10) je patrné, že s rostoucí dobou sběru dat docházelo k nárůstu celkové četnosti výbojů.

Grafické porovnání jednotlivých velikostí celkových nábojů v závislosti na době sběru dat pro napěťové hladiny 4,3 kV a 7,5 kV jsou zobrazeny na následujícím obrázku (Obr. 4.11).



Obr. 4.11 Porovnání naměřených průběhů velikosti celkového náboje AC výbojů v závislosti na době sběru dat na kalibračním jiskřišti pouze v záporné polaritě napětí, zdroj: Transformátor Tettex

Z výše uvedeného grafu (Obr. 4.11) je zřejmé, že v případě napěťové hladiny 7,5 kV se na rozdíl od předchozího případu na Obr. 4.3 v kapitole 4.1.2 celkový nárůst velikosti náboje v opakovaném 60 vteřinovém záznamu po uplynutí 3 minut pod přiloženým napětím jen nepatrně snížil, a po celou dobu tak nedošlo k jeho poklesu.

V případě napěťové úrovně 4,3 kV začíná po uplynutí delší doby napěťového namáhání docházet k úbytku celkového náboje. Tento pokles je i v tomto případě nejspíše způsoben tím, že částečné výboje nejsou schopny při menší hodnotě napěťového namáhání po delší dobu udržet svoji velikost, a postupně tak začínají uhasínat.

Veškeré grafické záznamy získané detektorem ICMsystem pro jednotlivé doby sběru dat měření z této kapitoly jsou k porovnání uvedeny v příloze (Příloha N, Příloha O).

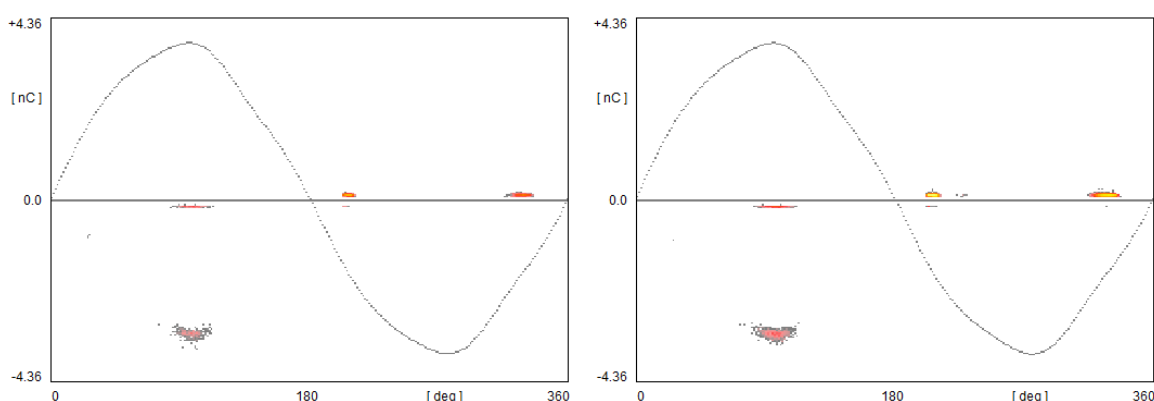
#### 4.1.5 AC výboje na kalibračním jiskřišti s výskytem v obou polaritách napětí – Zdroj: Transformátor Tettex

Zvyšováním hladiny napětí se korónové výboje v tomto případě začaly objevovat i v kladné půlplně napětí až při 10,9 kV. Z hlediska předchozích měření v kapitole 4.1.3 jsem se tedy rozhodl provést jejich záznam na napěťové úrovni 11,1 kV, aby získané záznamy mezi tímto a měřením v kapitole 4.1.3 byly správně porovnatelné. Naměřené veličiny těchto výbojů jsou uvedeny v tabulce (Tab. 4.7). Optimální velikostí LLD se v tomto měření prokázala hodnota 2,5 %. Velikost zesílení po celou dobu měření dostačovalo na 1/4.

Tab. 4.7 Tabulka naměřených hodnot detektorem ICMsystem s výskytem výbojů v obou polaritách střídavého napětí 11,1 kV na kalibračním jiskřišti v počátečních časových intervalech 10 – 60 vteřin záznamu s napájením transformátorem Tettex

$U_{\text{ief}} = 11,1 \text{ kV}$							
Doba sběru dat $T_{\text{ref}} \text{ (s)}$	10	20	30	40	50	60	60 (Po 3 min pod napětím)
$I_{\text{PD}} \text{ (nA)}$	159	129	109	95	79	83	64
$Q_{\text{cumulative}} \text{ (nC)}$	1586	2588	3273	3810	3960	5003	3851
$\Sigma \text{Výbojů}$	3499	5565	8393	12245	16242	21131	17935

Na níže uvedeném obrázku (Obr. 4.12) je zobrazen 10 vteřinový (levý) a 60 vteřinový (pravý) záznam velikosti náboje v závislosti na fázi pořízený detektorem pro tuto napěťovou hladinu.

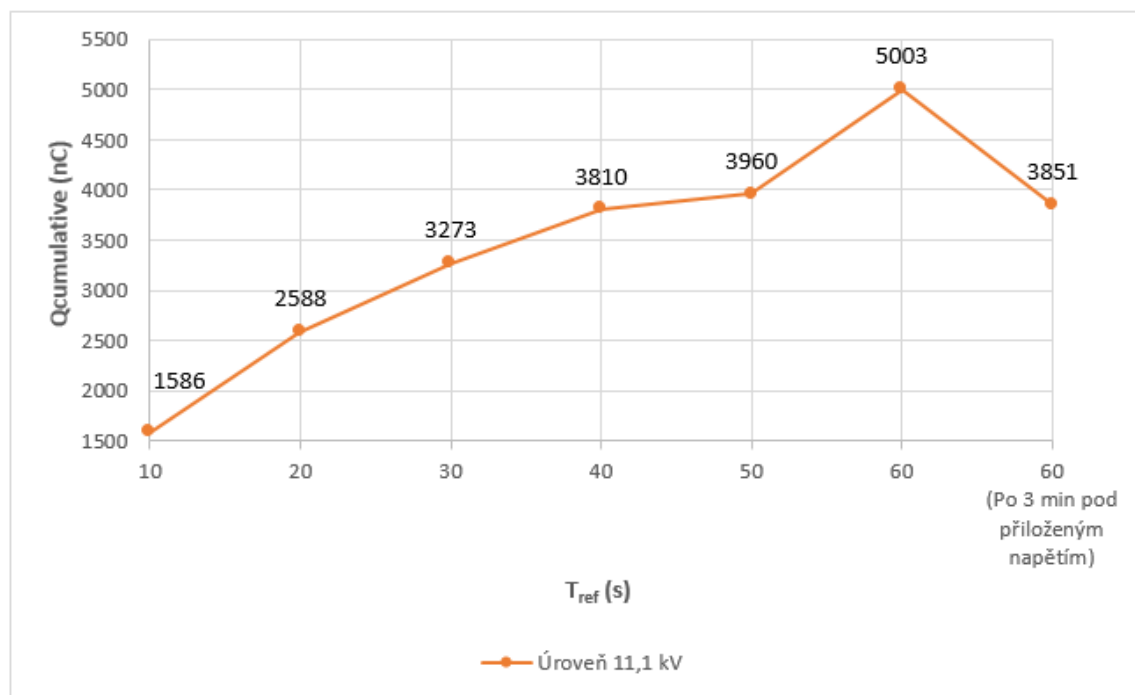


Obr. 4.12 Záznam 10 vteřin (levý) a 60 vteřin (pravý) velikosti náboje na fázi pro 11,1 kV AC výbojů na kalibračním jiskřišti s výskytem v obou polaritách napětí – Zdroj: Transformátor Tettex

Na těchto průbězích (Obr. 4.12) je stejně jako v předchozím měření na napěťové hladině 11,1 kV v kapitole 4.1.3 viditelný vznikající korónový výboj v kladné půlplně

napětí, jehož výbojová činnost byla menší než v případě výbojů v záporné půlvlně. Dosahovaly však větší amplitudy než výboje v záporné půlvlně, které se rozšířily do oblasti šumu, čímž došlo k jejich potlačení nastaveným LLD parametrem.

Následující graf (Obr. 4.13) zobrazuje průběh velikosti celkového náboje v závislosti na době sběru dat naměřeného na napěťové úrovni 11,1 kV.



Obr. 4.13 Průběh velikosti celkového náboje AC výboje v závislosti na době sběru dat na kalibračním jiskřišti v obou polaritách napětí, zdroj: Transformátor Tettex

Z výše uvedeného průběhu (Obr. 4.13) je patrný převážně rostoucí charakter velikosti celkového náboje v závislosti na době sběru dat. Po 3 minutách napěťového namáhání však koróna vykazovala nestabilní chování, jelikož došlo k utlumení výbojové činnosti a tím k výraznému snížení velikosti celkového náboje. Tento průběh v porovnání s průběhem, uvedeném v kapitole 4.1.3 pro stejnou napěťovou úroveň na Obr. 4.8, vykazuje až do 60 vteřinové doby sběru dat rovněž rostoucí charakter velikosti celkového náboje. Během měření na napěťové hladině 11,1 kV provedeného na střídavém napětí však nedošlo k výskytu parazitních výbojů, čímž lze výsledky z tohoto měření pokládat za věrohodnější.

Veškeré grafické záznamy získané detektorem ICMsystem pro jednotlivé doby sběru dat měření z této kapitoly jsou k porovnání uvedeny v příloze (Příloha P).



## 4.2 Měření částečných výbojů na stejnosměrném napětí (DC)

Zkoušenými objekty částečných výbojů na stejnosměrném napětí bylo **kalibrační jiskřiště a model VN vedení**.

V návaznosti na již zmíněné typy nastavení v kapitole 3.1.2 jsem pro správné měření na stejnosměrném napětí musel v programu zvolit následující parametry:

*Sync: DC-Mode, Coding: LIN UNI, Acq Mode: vs Time, Waveform: Off*

V prvním měření jsem prováděl záznam částečných výbojů na kalibračním jiskřišti a jako zdroj stejnosměrného napětí jsem použil **Modulární systém GBS 13/270**. Pro sledování velikosti napětí jsem na napájecí svorky v tomto případě připojil AC/DC Peak Voltmeter MU17.

Ve druhém měření částečných výbojů na kalibračním jiskřišti jsem pro napájení použil starší **zdroj vysokého napětí Tesla BS 222a** jehož velikost napětí jsem sledoval připojeným digitálním voltmetrem METRA Hit 18S zapojeným přes odporový dělič (Příloha Q), který byl vyroben pracovníky oddělení KEE Západočeské Univerzity v Plzni.

Ve třetím měření jsem prováděl záznam částečných výbojů na **modelu VN vedení** uvedeného v kapitole 3.2.1. Jako zdroj stejnosměrného napětí jsem stejně jako v prvním měření použil **Modulární systém GBS 13/270** a voltmetr MU17.

Záznam částečných výbojů probíhal po zapojení zkušebního obvodu a přednastavení programu dle postupu uvedeného v kapitole 3.2. Tímto způsobem jsem prováděl jednotlivá měření na zvolených napěťových hladinách uvedených v tabulce (Tab. 4.8).

Tab. 4.8 Velikost napěťových hladin pro jednotlivá měření částečných výbojů

	Zkoušený objekt	Použitý zdroj	Polarita napětí	Napěťové hladiny (kV)			
1. měření	Kalibrační jiskřiště	Modulární systém GBS 13/270	DC negativní	6,6		9,5	
			DC pozitivní	7,2	12,5	13,4	13,9
2. měření	Kalibrační jiskřiště	Tesla BS 222a	DC negativní	7,5		10,3	
			DC pozitivní	9		12,2	
3. měření	Model VN vedení	Modulární systém GBS 13/270	DC negativní	13,9		19,1	
			DC pozitivní	14,5		19,7	

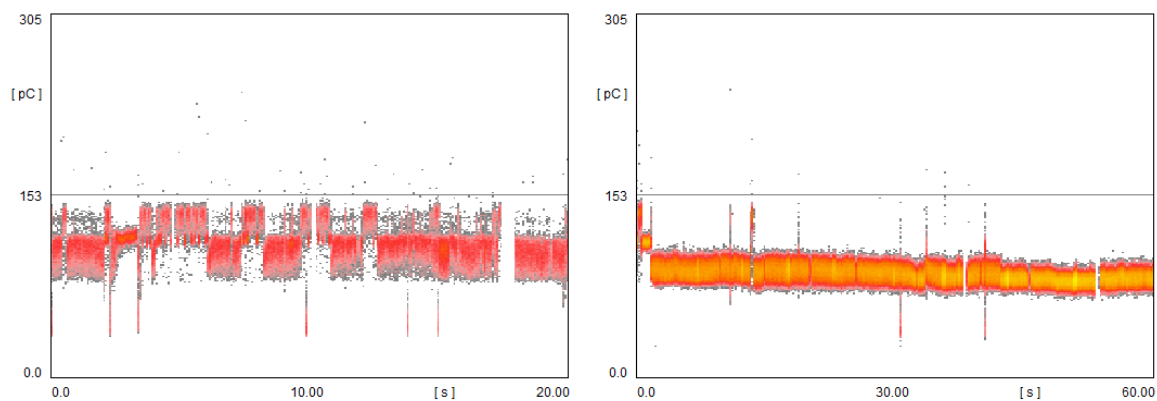
#### 4.2.1 DC výboje na kalibračním jiskřišti negativní polaritě napětí – Zdroj: Modulární systém GBS 13/270

K výskytu částečných výbojů na kalibračním jiskřišti pro stejnosměrný negativní charakter napětí při napájení modulárním systémem GBS 13/270 došlo při amplitudě zapalovacího napětí 6,6 kV. Na této napěťové hladině jsem prováděl první měření, jehož naměřené veličiny jsou uvedeny v tabulce (Tab. 4.9). Optimální velikostí LLD se v této kapitole ve všech provedených měřeních prokázala hodnota 5 % a velikost zesílení po celou dobu těchto měření dostávalo na 1/40.

Tab. 4.9 Tabulka naměřených hodnot detektorem ICMsystem s výskytem výbojů negativní polaritě stejnosměrného napětí 6,6 kV na kalibračním jiskřišti v počátečních časových intervalech 10 – 60 vteřin záznamu s napájením Modulárním systémem GBS 13/270

U <sub>ipeak</sub> = 6,6 kV							
Doba sběru dat T <sub>ref</sub> (s)	10	20	30	40	50	60	60 (Po 3 min pod napětím)
I <sub>PD</sub> (nA)	699	772	1113	1042	918	1126	1071
Q <sub>cumulative</sub> (nC)	6986	15446	33390	41680	45900	67560	64260
ΣVýbojů	61413	139553	391735	455360	450207	774781	746412

Jelikož došlo během 10 vteřinové době sběru dat chybou programu ke špatnému uložení tohoto záznamu, je na níže uvedeném obrázku (Obr. 4.14) zobrazen 20 vteřinový (levý) a 60 vteřinový (pravý) záznam velikosti náboje v závislosti na fázi pořízený detektorem pro tuto napěťovou hladinu.



Obr. 4.14 Záznam 20 vteřin (levý) a 60 vteřin (pravý) velikosti náboje v závislosti na době sběru dat pro 6,6 kV DC negativních výbojů na kalibračním jiskřišti – Zdroj: Modulární systém GBS 13/270

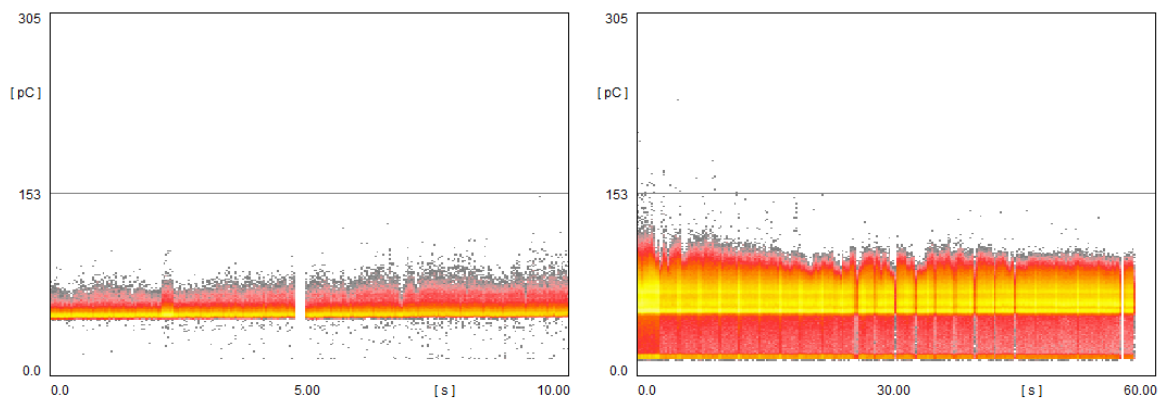
Na těchto průbězích (Obr. 4.14) je prostřednictvím barevného označení viditelný vývoj částečných výbojů v podobě celkového zvýšení četnosti vzniklých výbojů v závislosti na rostoucí době sběru dat. Na 20 vteřinovém záznamu (levý) je vidět určitá proměnlivost v četnosti výbojů jednotlivých velikostí náboje. Tento efekt je nejspíše způsoben vlivem nahromadění a uvolňování prostorového náboje mezi hrotem a miskou kalibračního jiskřiště. Na 60 vteřinovém záznamu (pravý) je patrný podobný efekt, avšak v užších časových intervalech.

Další měřenou amplitudou napětí, na které jsem prováděl záznam částečných výbojů v této kapitole, byla hodnota 9,5 kV. Naměřené veličiny těchto výbojů jsou uvedeny v tabulce (Tab. 4.10).

Tab. 4.10 Tabulka naměřených hodnot detektorem ICMsystem s výskytem výbojů negativní polarity stejnosměrného napětí 9,5 kV na kalibračním jiskřišti v počátečních časových intervalech 10 – 60 vteřin záznamu s napájením Modulárním systémem GBS 13/270

U <sub>ipeak</sub> = 9,5 kV						
Doba sběru dat T <sub>ref</sub> (s)	10	20	30	40	50	60
I <sub>PD</sub> (nA)	3720	4014	3415	4042	4233	4417
Q <sub>cumulative</sub> (nC)	37200	80280	102450	161680	211650	265020
ΣVýbojů	692398	1433024	2453484	2758398	3613324	4188122
Doba sběru dat T <sub>ref</sub> (s)	60 (Po 3 min pod napětím)	60 (Po dalších 3 min pod napětím)	60 (Po dalších 3 min pod napětím)			
I <sub>PD</sub> (nA)	3583	3628	4183			
Q <sub>cumulative</sub> (nC)	214980	217680	250980			
ΣVýbojů	4488636	4599353	4725188			

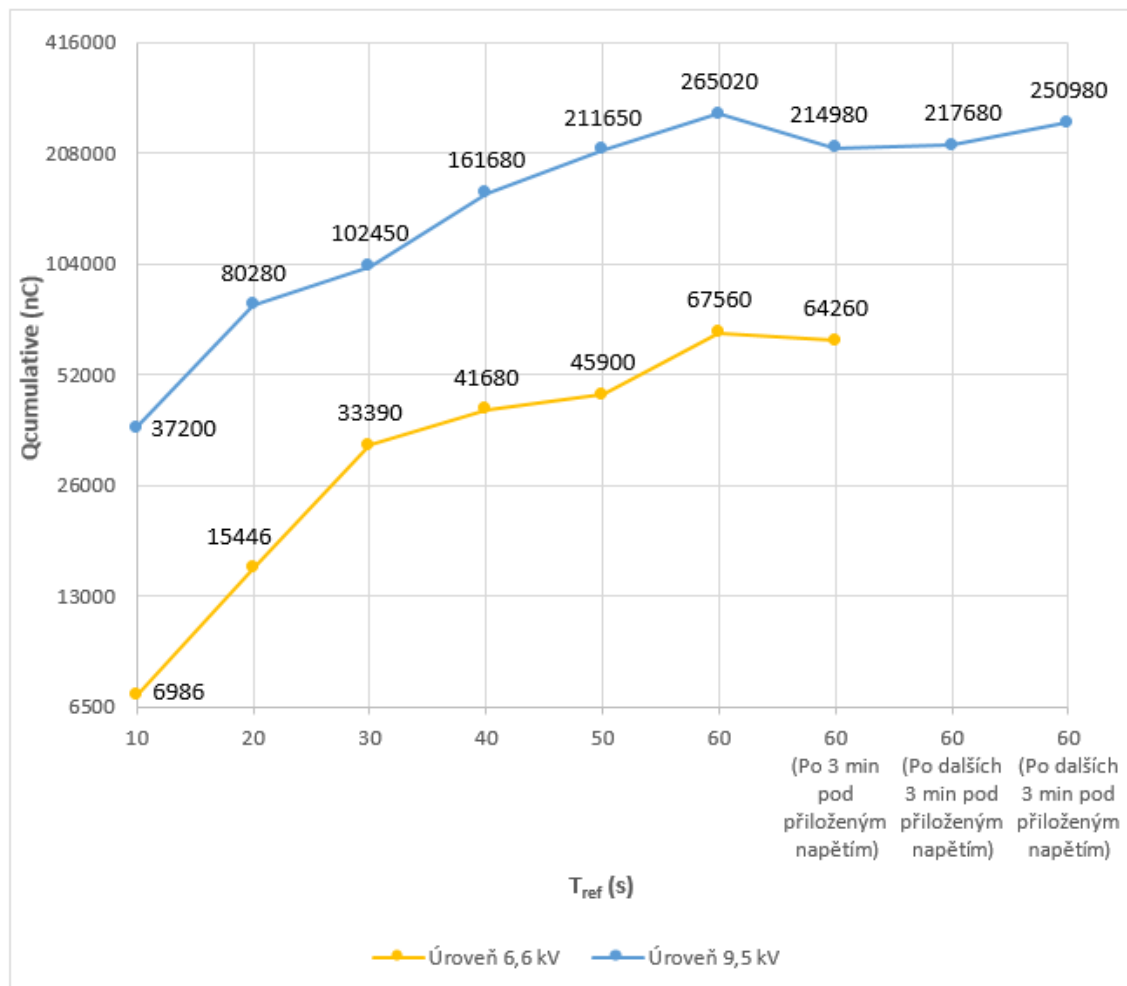
Na níže uvedeném obrázku (Obr. 4.15) je zobrazen 10 vteřinový (levý) a 60 vteřinový (pravý) záznam velikosti náboje v závislosti na době sběru dat pořízený detektorem pro tuto napěťovou hladinu.



Obr. 4.15 Záznam 10 vteřin (levý) a 60 vteřin (pravý) velikosti náboje v závislosti na době sběru dat pro 9,5 kV DC negativních výbojů na kalibračním jiskřišti – Zdroj: Modulární systém GBS 13/270

Na těchto průbězích (Obr. 4.15) je opět viditelný vývoj částečných výbojů v podobě celkového zvýšení četnosti vzniklých výbojů v závislosti na rostoucí době sběru dat. Na zobrazeném 10 vteřinovém záznamu (levý) je vidět postupné zapalování výbojů ve spodní a horní sféře velikosti náboje okolo vůdčího „žlutého“ výboje, které jsou na 60 vteřinovém záznamu již zcela zapálené.

Na níže uvedeném grafu (Obr. 4.16) je zobrazeno porovnání naměřených průběhů velikosti celkového náboje v závislosti na době sběru dat všech napět'ových hladin analyzovaných v této kapitole.



Obr. 4.16 Porovnání naměřených průběhů velikosti celkového náboje DC negativních výbojů v závislosti na době sběru dat na kalibračním jiskřišti, zdroj: Modulární systém GBS 13/270

Na Obr. 4.16 je v případě napět'ové úrovně 6,6 kV vidět v počátečních časových okamžicích velký nárůst celkové velikosti náboje, který se v průběhu měření s přibývajícím dobou sběru dat začínal postupně ustalovat. Na napět'ové úrovni 9,5 kV docházelo s přibývajícím dobou sběru dat k velice podobnému průběhu, avšak oproti předchozí úrovni napětí s daleko většími přírůstků velikosti celkového náboje. Z tohoto důvodu jsem se pro tuto napět'ovou hladinu rozhodl provést další dvě rozšiřující 60 vteřinové měření, provedené po dalších 3 minutových napět'ových namáhání. Z těchto záznamů je tak v konečném výsledku na napět'ové úrovni 9,5 kV zjevná jistá nestabilita výbojů, jejichž velikost celkového náboje s přibývajícím časem kolísala.

Veškeré grafické záznamy získané detektorem ICMsystem pro jednotlivé doby sběru dat měření z této kapitoly jsou k porovnání uvedeny v příloze (Příloha R, Příloha S).

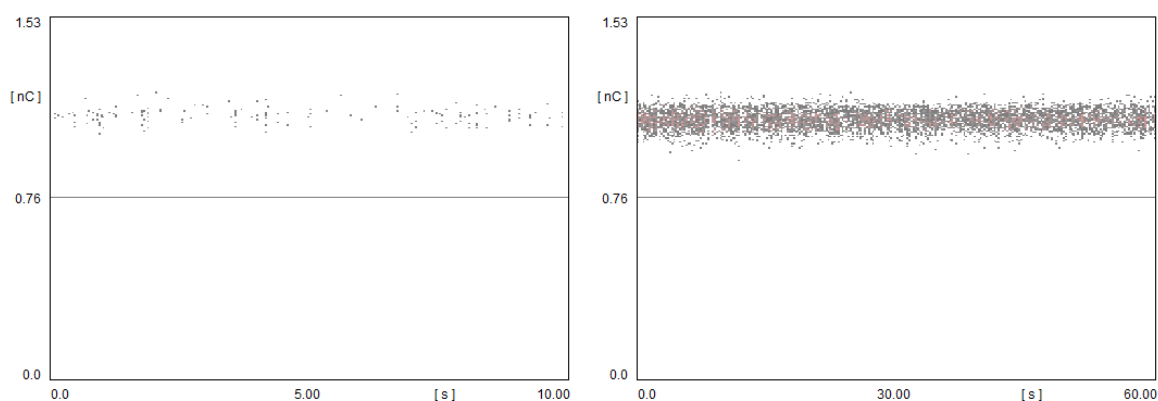
#### 4.2.2 DC výboje na kalibračním jiskřišti pozitivní polarity napětí – Zdroj: Modulární systém GBS 13/270

K výskytu částečných výbojů na kalibračním jiskřišti pro stejnosměrný pozitivní charakter napětí při napájení modulárním systémem GBS 13/270 došlo při amplitudě zapalovacího napětí 7,2 kV. Na této napěťové hladině jsem prováděl první měření, jehož naměřené veličiny jsou uvedeny v tabulce (Tab. 4.11). Optimální velikostí LLD se v tomto měření prokázala hodnota 5 % a velikost zesílení po celou dobu měření dostačovalo na 1/4.

Tab. 4.11 Tabulka naměřených hodnot detektorem ICMsystem s výskytem výbojů pozitivní polarity stejnosměrného napětí 7,2 kV na kalibračním jiskřišti v počátečních časových intervalech 10 – 60 vteřin záznamu s napájením Modulárním systémem GBS 13/270

$U_{\text{peak}} = 7,2 \text{ kV}$							
Doba sběru dat $T_{\text{ref}} \text{ (s)}$	10	20	30	40	50	60	60 (Po 3 min pod napětím)
$I_{\text{PD}} \text{ (nA)}$	17	16	20	32	54	144	163
$Q_{\text{cumulative}} \text{ (nC)}$	175	321	586	1295	2692	8640	9804
$\Sigma \text{Výbojů}$	157	289	532	1179	2461	10952	8944

Na níže uvedeném obrázku (Obr. 4.17) je zobrazen 10 vteřinový (levý) a 60 vteřinový (pravý) záznam velikosti náboje v závislosti na době sběru dat pořízený detektorem pro tuto napěťovou hladinu.



Obr. 4.17 Záznam 10 vteřin (levý) a 60 vteřin (pravý) velikosti náboje v závislosti na době sběru dat pro 7,2 kV DC pozitivních výbojů na kalibračním jiskřišti – Zdroj: Modulární systém GBS 13/270

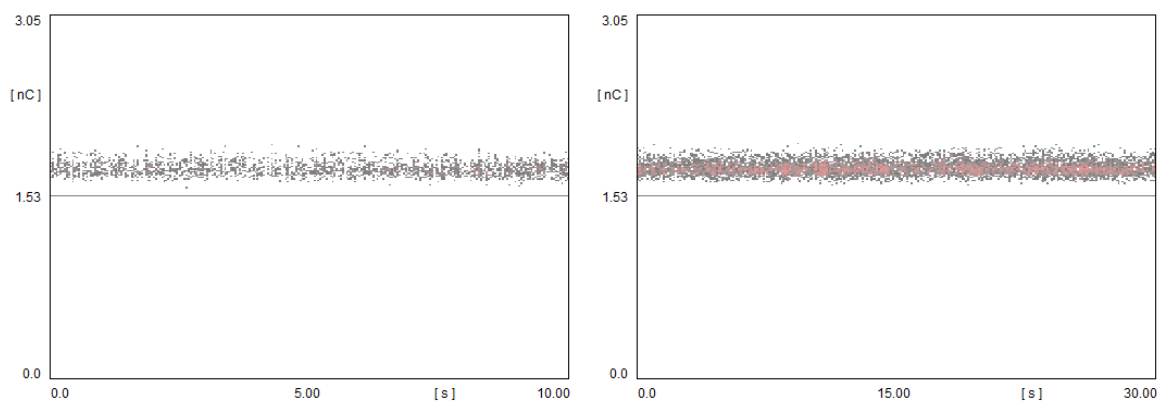
Na těchto průbězích (Obr. 4.17) je viditelný vývoj částečných výbojů v podobě celkového zvýšení četnosti vzniklých výbojů v závislosti na rostoucí době sběru dat.

Po vypnutí obvodu a následném plynulém zvyšování amplitudy napětí na zdroji nad předchozí hodnotu 7,2 kV došlo při překročení hranice 9 kV k náhlému zhasnutí výbojů, což se na detektoru projevilo prudkým poklesem aktuální obálky náboje  $Q_{IEC}$  na velmi malou úroveň (několik pC), kterou představoval pouze šum. Postupným zvyšováním amplitudy napětí však při úrovni 12,5 kV došlo k opětovnému zapálení výbojů (nárůst  $Q_{IEC}$ ), tudíž jsem právě na této napěťové hladině provedl další měření zaznamenané v tabulce (Tab. 4.12). Optimální velikostí LLD se během tohoto měření rovněž prokázala hodnota 5 % a velikost zesílení po celou dobu měření opět dostačovalo na 1/4.

Tab. 4.12 Tabulka naměřených hodnot detektorem ICMsystem s výskytem výbojů pozitivní polarity stejnosměrného napětí 12,5 kV na kalibračním jiskřišti v počátečních časových intervalech 10 – 30 vteřin záznamu s napájením Modulárním systémem GBS 13/270

$U_{\text{ipeak}} = 12,5 \text{ kV}$				
<b>Doba sběru dat <math>T_{\text{ref}}</math> (s)</b>	<b>10</b>	<b>20</b>	<b>30</b>	<b>Výboje zhasly</b>
<b><math>I_{\text{PD}}</math> (nA)</b>	498	405	597	
<b><math>Q_{\text{cumulative}}</math> (nC)</b>	4981	8106	17910	
<b><math>\Sigma</math>Výbojů</b>	2823	4570	10112	

V tomto případě během měření velikosti celkového náboje při nastavené době sběru dat na 40 vteřin došlo opět k náhlému nečekanému zhasnutí výbojů. Celková četnost výbojů však do této doby v předchozích záznamech narůstala. Na níže uvedeném obrázku (Obr. 4.18) je zobrazen 10 vteřinový (levý) a 30 vteřinový (pravý) záznam velikosti náboje v závislosti na době sběru dat pořízený detektorem pro tuto napěťovou hladinu.



Obr. 4.18 Záznam 10 vteřin (levý) a 30 vteřin (pravý) velikosti náboje v závislosti na době sběru dat pro 12,5 kV DC pozitivních výbojů na kalibračním jiskřišti – Zdroj: Modulární systém GBS 13/270

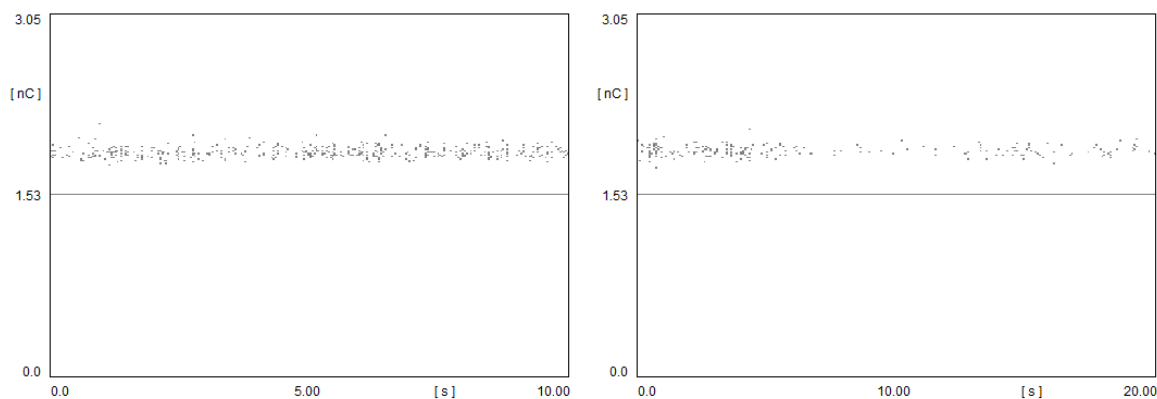
Vzhledem k předchozím výsledkům, které jsem během měření částečných výbojů na pozitivním napětí až doposud zaznamenal, rozhodl jsem se po vypnutí celého obvodu provést plynulé zvyšování napěťové hladiny nad úroveň 12,5 kV. Během dosažení hranice

napětí 13,4 kV došlo na kalibračním jiskřišti opět k zapálení výbojů, tudíž jsem na této napěťové hladině prováděl další záznam, jehož výsledky jsou uvedeny v tabulce (Tab. 4.13). Optimální velikostí LLD se během tohoto měření opět prokázala hodnota 5 % a velikost zesílení po celou dobu měření taktéž dostačovalo na 1/4.

Tab. 4.13 Tabulka naměřených hodnot detektorem ICMsystem s výskytem výbojů pozitivní polarity stejnosměrného napětí 13,4 kV na kalibračním jiskřišti v počátečních časových intervalech 10 – 20 vteřin záznamu s napájením Modulárním systémem GBS 13/270

<b><math>U_{\text{peak}} = 13,4 \text{ kV}</math></b>			
<b>Doba sběru dat <math>T_{\text{ref}}</math> (s)</b>	<b>10</b>	<b>20</b>	<b>Výboje zhasly</b>
<b><math>I_{\text{PD}}</math> (nA)</b>	84	23	
<b><math>Q_{\text{cumulative}}</math> (nC)</b>	840	459	
<b><math>\Sigma</math>Výbojů</b>	444	241	

V tomto případě během měření velikosti celkového náboje při nastavené době sběru dat na 30 vteřin došlo opět ke zhasnutí výbojů. Celková četnost výbojů však v tomto případě v průběhu měření již zřetelně klesala, což nasvědčovalo jejich postupnému uhasínání. Na níže uvedeném obrázku (Obr. 4.19) jsou zobrazeny poslední naměřené záznamy výbojů detektorem před jejich úplným vyhasnutím.



Obr. 4.19 Záznam 10 vteřin (levý) a 20 vteřin (pravý) velikosti náboje v závislosti na době sběru dat pro 13,4 kV DC pozitivních výbojů na kalibračním jiskřišti – Zdroj: Modulární systém GBS 13/270

Stejným způsobem jako v předchozím případě jsem se rozhodl provést vypnutí celého obvodu, a dále plynule zvyšovat napětí nad poslední změřenou úroveň, během které došlo k výskytu částečných výbojů. Po dosažení amplitudy napětí 13,9 kV došlo k opětovnému zapálení výbojů, tudíž jsem na této napěťové hladině prováděl další záznam, jehož výsledky jsou uvedeny v tabulce (Tab. 4.14).



Na této napěťové hladině jsem mimo jiné provedl experiment v podobě vnějšího ofukování kalibračního jiskřiště připojeným ventilátorem (Obr. 4.20).

Tab. 4.14 Tabulka naměřených hodnot detektorem ICMSystem s výskytem výbojů pozitivní polarity stejnosměrného napětí 13,9 kV na kalibračním jiskřišti v počátečních časových intervalech 10 – 60 vteřin záznamu s napájením Modulárním systémem GBS 13/270 za použití vnějšího ofukování ventilátorem

<b><math>U_{\text{ipeak}} = 13,9 \text{ kV}</math></b>						
<b>Doba sběru dat <math>T_{\text{ref}}</math> (s)</b>	<b>10<sup>1</sup></b>	<b>20</b>	<b>30</b>	<b>40</b>	<b>50</b>	<b>60</b>
<b><math>I_{\text{PD}}</math> (nA)</b>	365	214	1107	873	782	19
<b><math>Q_{\text{cumulative}}</math> (nC)</b>	3653	4280	33210	34916	39105	1167
<b><math>\Sigma</math>Výbojů</b>	1905	2315	17635	19579	20190	613
<b>Doba sběru dat <math>T_{\text{ref}}</math> (s)</b>	<b>60 (Po 3 min pod napětím)</b>	<b>60 (Po dalších 3 min pod napětím)<sup>2</sup></b>	<b>60 (Po dalších 3 min pod napětím)<sup>3</sup></b>			
<b><math>I_{\text{PD}}</math> (nA)</b>	79	4417	584			
<b><math>Q_{\text{cumulative}}</math> (nC)</b>	4756	265020	35052			
<b><math>\Sigma</math>Výbojů</b>	2635	153752	18610			



Obr. 4.20 Experimentální měření s použitím vnějšího ofukování kalibračního jiskřiště pro napěťovou hladinu 13,9 kV DC pozitivních výbojů – Zdroj: Modulární systém GBS 13/270

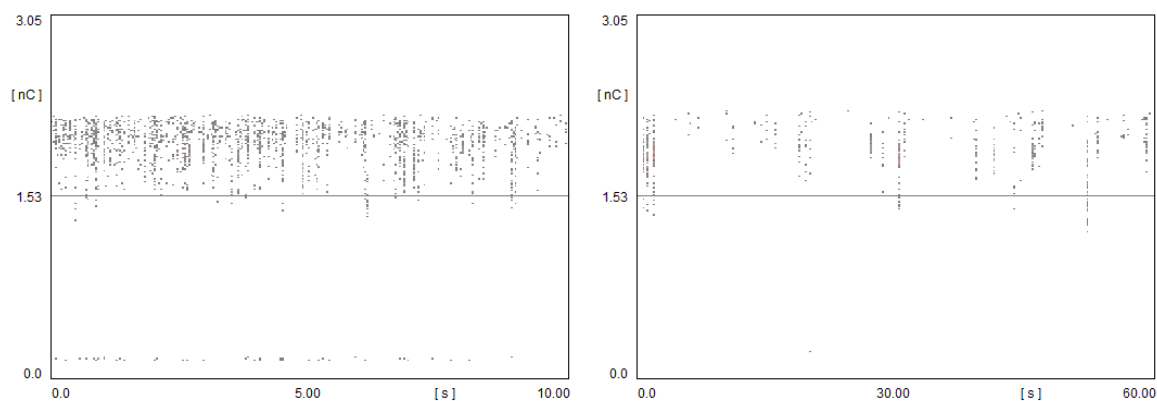
<sup>1</sup> Před uskutečněním tohoto a následujících záznamů byl ventilátor aktivní

<sup>2</sup> Před uskutečněním tohoto záznamu byl ventilátor neaktivní

<sup>3</sup> Před uskutečněním tohoto záznamu byl ventilátor opět aktivní

Optimální velikostí LLD se během tohoto měření prokázala hodnota 7,2 % a velikost zesílení po celou dobu měření taktéž dostávalo na nastavenou hodnotu 1/4.

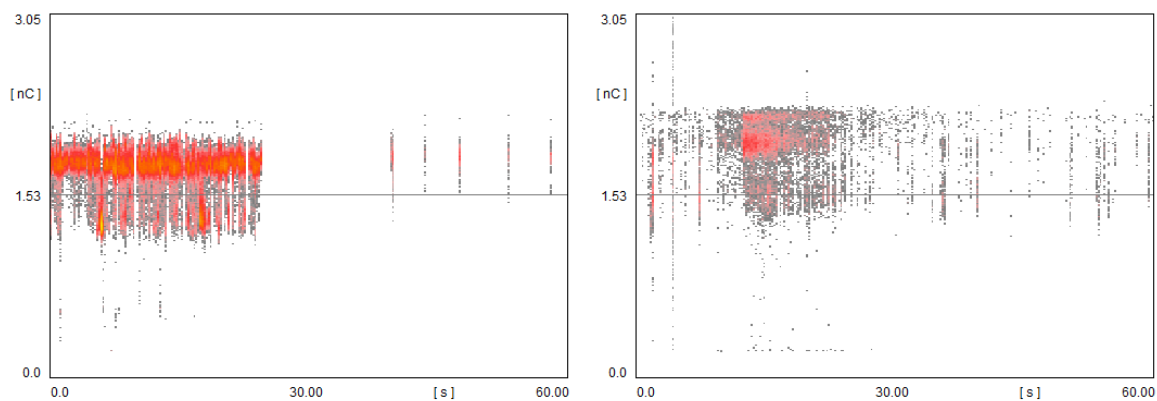
Na níže uvedeném obrázku (Obr. 4.21) je zobrazen 10 vteřinový (levý) a 60 vteřinový (pravý) záznam velikosti náboje v závislosti na době sběru dat pořízený detektorem pro tuto napěťovou hladinu.



Obr. 4.21 Záznam 10 vteřin (levý) a 60 vteřin (pravý) velikosti náboje v závislosti na době sběru dat pro 13,9 kV DC pozitivních výbojů na kalibračním jiskříšti za použití vnějšího ofukování ventilátorem – Zdroj: Modulární systém GBS 13/270

Při porovnání těchto průběhů (Obr. 4.21) je v konečném důsledku vidět celkové snížení četnosti vzniklých výbojů v závislosti na rostoucí době sběru dat. Dle tabulky naměřených hodnot (Tab. 4.14) však s přibývajícím časem až do 50 vteřinové doby sběru dat docházelo k velkému nárůstu celkového počtu výbojů. Díky nahromadění prostorového náboje z intenzivní výbojové činnosti mohlo dojít k deformaci elektrického pole a následnému potlačení výbojů do doby než byl prostorový náboj odveden z mezielektrodového prostoru. Z tabulky naměřených hodnot je také zřejmé, že s dále přibývajícím časem napěťového namáhání došlo k opětovnému navyšování celkového počtu výbojů.

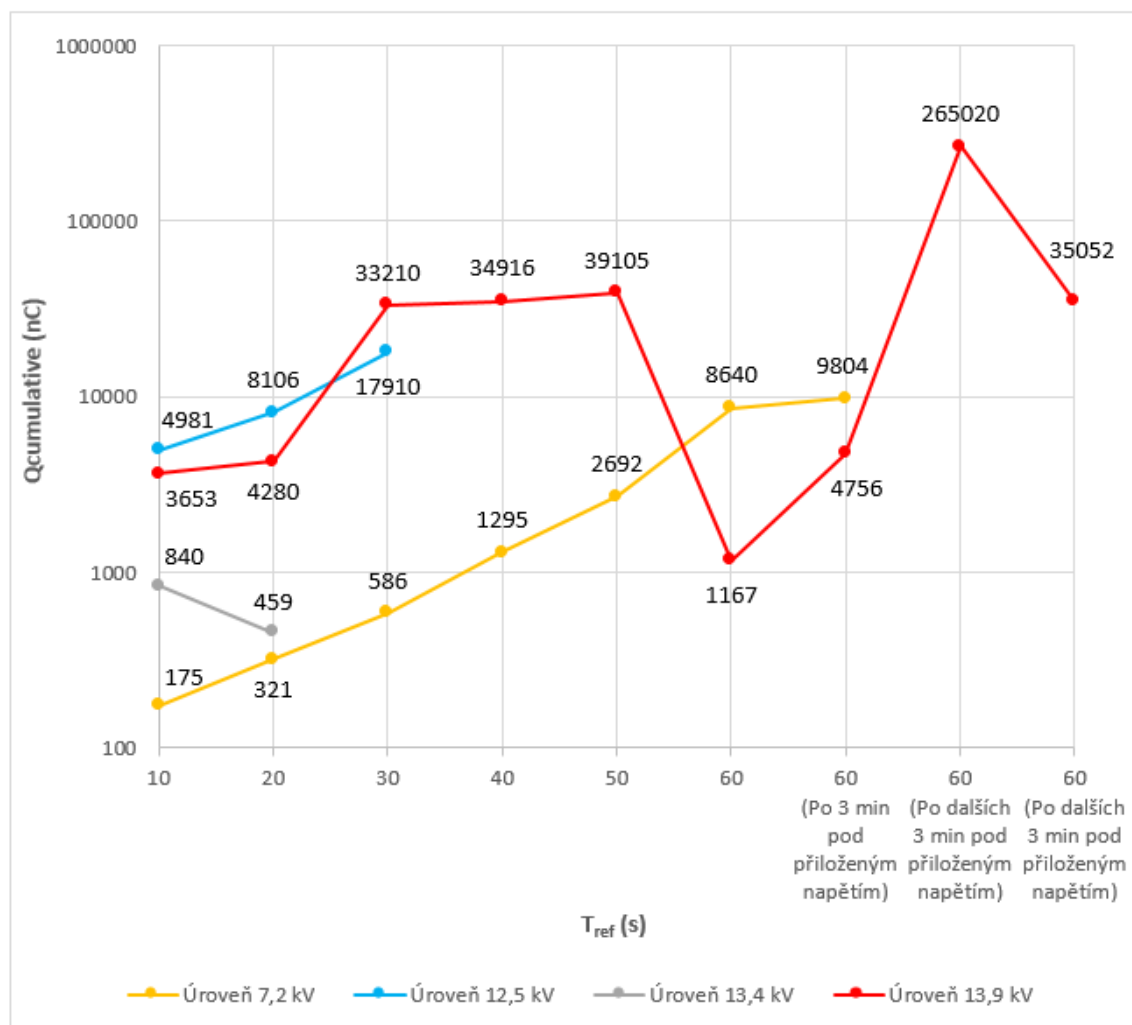
Na níže uvedeném obrázku (Obr. 4.22) je zobrazen 60 vteřinový záznam, provedený po druhém 3 minutovém namáhání pod přiloženým napětím při neaktivním ventilátoru, a 60 vteřinový záznam provedený po třetím namáhání přiloženým napětím po dobu dalších 3 minut při aktivním ventilátoru.



Obr. 4.22 Záznam 60 vteřin po druhém namáhání přiloženým napětím po dobu 3 minut při neaktivním ventilátoru (levý) a 60 vteřinový záznamu po třetím namáhání přiloženým napětím po dobu 3 minut při aktivním ventilátoru (pravý), představující průběh velikosti náboje v závislosti na době sběru dat pro 13,9 kV DC pozitivních výbojů na kalibračním jiskřišti – Zdroj: Modulární systém GBS 13/270

Na prvním průběhu (levý) je vidět značná nestabilita probíhajících výbojů, které v jednu chvíli zcela vyhasly a v následujících několika okamžicích opět zapálily, poté rychle znovu vyhasly, což je na konci tohoto průběhu zobrazeno v podobě pěti tenkých čar. Na druhém průběhu (pravý) je rovněž vidět jejich značná nestabilita, z čehož lze usuzovat, že vnější ofukování kalibračního jiskřiště na tyto výboje nemělo žádný vliv.

Na níže uvedeném grafu (Obr. 4.23) je zobrazeno porovnání naměřených průběhů velikosti celkového náboje v závislosti na době sběru dat všech napěťových hladin analyzovaných v této kapitole.



Obr. 4.23 Porovnání naměřených průběhů velikosti celkového náboje DC pozitivních výbojů v závislosti na době sběru dat na kalibračním jiskřišti, zdroj: Modulární systém GBS 13/270

V případě analýzy stejnosměrných pozitivních výbojů je již během porovnání jednotlivých naměřených napěťových úrovní patrná značná rozdílnost v chování. V případě napěťové hladiny 7,2 kV docházelo s přibývajícím dobou sběru dat ke stabilnímu nárůstu velikosti celkového náboje, který se během delšího napěťového namáhání začal ustalovat. Podobný charakter zpočátku také vykazovala napěťová úroveň 12,5 kV, jejíž výboje však během měření po dosažení určité velikosti náboje náhle zcela vyhasly. Ze záznamu částečných výbojů na napěťové hladině 13,4 kV je na naměřeném průběhu s přibývajícím dobou sběru dat patrný pokles velikosti náboje, přičemž během měření rovněž došlo k úplnému vyhasnutí výbojů. V případě napěťové úrovně 13,9 kV, ve které jsem provedl experiment v podobě vnějšího ofukování kalibračního jiskřiště připojeným ventilátorem, bylo hlavním úkolem ventilátoru odvést nahromaděný prostorový náboj a umožnit tak vzniklým výbojům stabilní hoření. Vliv ventilátoru však nebyl zcela potvrzen,

jelikož výboje na této napěťové úrovni i přesto vykazovaly značnou nestabilitu, která se projevovala velkými výkyvy velikosti celkového náboje v čase.

Veškeré grafické záznamy získané detektorem ICMsystem pro jednotlivé doby sběru dat měření z této kapitoly jsou k porovnání uvedeny v příloze (Příloha T, Příloha U, Příloha V).

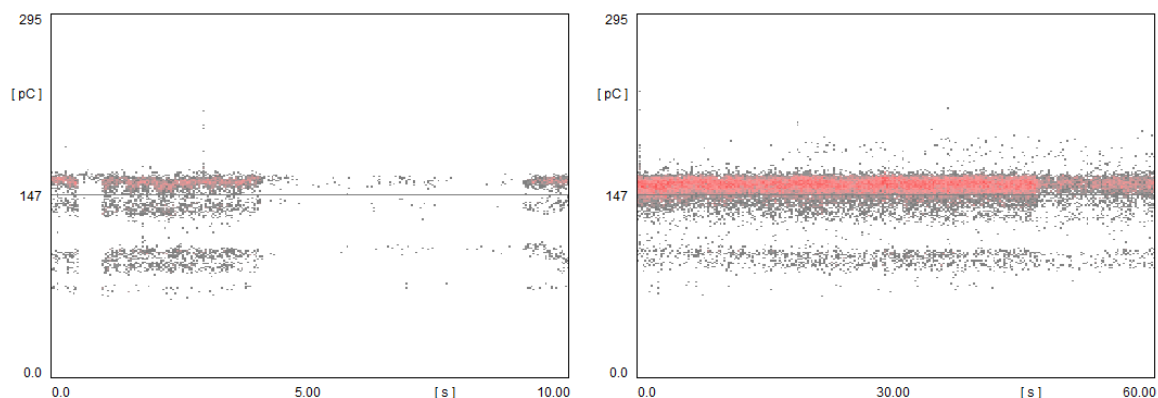
#### 4.2.3 DC výboje na kalibračním jiskřišti negativní polaritě napětí – Zdroj vysokého napětí Tesla BS 222a

K výskytu částečných výbojů na kalibračním jiskřišti pro stejnosměrný negativní charakter napětí za použití zdroje vysokého napětí Tesla BS 222a došlo při amplitudě zapalovacího napětí 7,5 kV. Na této napěťové hladině jsem prováděl první měření, jehož naměřené veličiny jsou uvedeny v tabulce (Tab. 4.15). Optimální velikostí LLD se v této kapitole ve všech provedených měřeních prokázala hodnota 5,5 % a velikost zesílení po celou dobu těchto měření dostávalo na 1/40.

Tab. 4.15 Tabulka naměřených hodnot detektorem ICMsystem s výskytem výbojů negativní polaritě stejnosměrného napětí 7,5 kV na kalibračním jiskřišti v počátečních časových intervalech 10 – 60 vteřin záznamu s napájením zdrojem vysokého napětí Tesla BS 222a

<b><math>U_{\text{peak}} = 7,5 \text{ kV}</math></b>						
<b>Doba sběru dat <math>T_{\text{ref}}</math> (s)</b>	<b>10</b>	<b>20</b>	<b>30</b>	<b>40</b>	<b>50</b>	<b>60</b>
<b><math>I_{\text{PD}}</math> (nA)</b>	85	73	277	193	300	93
<b><math>Q_{\text{cumulative}}</math> (nC)</b>	845	1456	8319	7704	15015	5553
<b><math>\Sigma V_{\text{výbojů}}</math></b>	5911	9864	58965	54363	115386	36490
<b>Doba sběru dat <math>T_{\text{ref}}</math> (s)</b>	<b>60 (Po 3 min pod napětím)</b>	<b>60 (Po dalších 3 min pod napětím)</b>	<b>60 (Po dalších 3 min pod napětím)</b>			
<b><math>I_{\text{PD}}</math> (nA)</b>	408	506	521			
<b><math>Q_{\text{cumulative}}</math> (nC)</b>	24480	30378	31230			
<b><math>\Sigma V_{\text{výbojů}}</math></b>	216335	266452	274291			

Na níže uvedeném obrázku (Obr. 4.24) je zobrazen 10 vteřinový (levý) a 60 vteřinový (pravý) záznam velikosti náboje v závislosti na době sběru dat pořízený detektorem pro tuto napěťovou hladinu.



Obr. 4.24 Záznam 10 vteřin (levý) a 60 vteřin (pravý) velikosti náboje v závislosti na době sběru dat pro 7,5 kV DC negativních výbojů na kalibračním jiskřišti – Zdroj vysokého napětí Tesla BS 222a

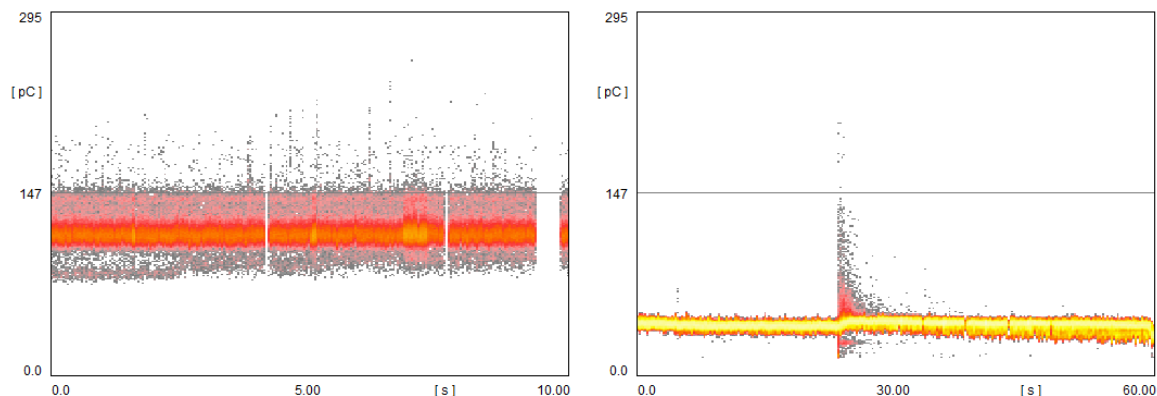
Na těchto průbězích (Obr. 4.24) je dobře viditelný vývoj částečných výbojů v podobě celkové navýšení četnosti vzniklých výbojů v závislosti na rostoucí době sběru dat. Tento vývoj byl založen na přeformulování jednotlivých velikostí aktuální obálky nábojů, kdy ve stejném čase docházelo k poklesu nábojů určité velikosti a současně s tím k nárůstu nábojů o jiné velikosti.

Další měřenou amplitudou napětí, na které jsem prováděl záznam částečných výbojů v této kapitole, byla hodnota 10,3 kV. Naměřené veličiny těchto výbojů jsou uvedeny v tabulce (Tab. 4.16).

Tab. 4.16 Tabulka naměřených hodnot detektorem ICMsystem s výskytem výbojů negativní polarity stejnosměrného napětí 10,3 kV na kalibračním jiskřišti v počátečních časových intervalech 10 – 60 vteřin záznamu s napájením zdrojem vysokého napětí Tesla BS 222a

<b><math>U_{\text{peak}} = 10,3 \text{ kV}</math></b>						
<b>Doba sběru dat <math>T_{\text{ref}}</math> (s)</b>	<b>10</b>	<b>20</b>	<b>30</b>	<b>40</b>	<b>50</b>	<b>60</b>
<b><math>I_{\text{PD}}</math> (nA)</b>	4564	4489	4506	4524	4575	3350
<b><math>Q_{\text{cumulative}}</math> (nC)</b>	45640	89780	135180	180960	228750	201000
<b><math>\Sigma</math>Výbojů</b>	392627	776757	1203535	1525021	2090162	4861344
<b>Doba sběru dat <math>T_{\text{ref}}</math> (s)</b>	<b>60 (Po 3 min pod napětím)</b>	<b>60 (Po dalších 3 min pod napětím)</b>	<b>60 (Po dalších 3 min pod napětím)</b>			
<b><math>I_{\text{PD}}</math> (nA)</b>	4695	3884	4324			
<b><math>Q_{\text{cumulative}}</math> (nC)</b>	281700	233040	259440			
<b><math>\Sigma</math>Výbojů</b>	2421652	2642062	2303997			

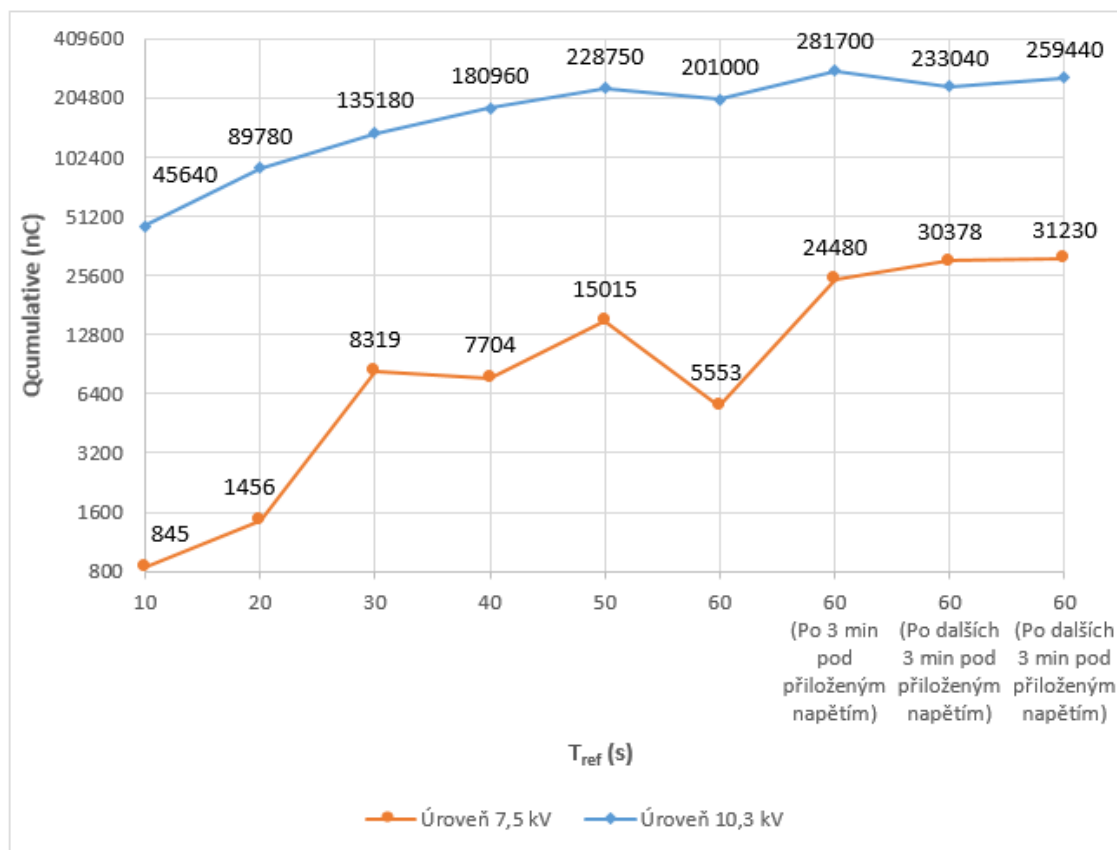
Na níže uvedeném obrázku (Obr. 4.25) je zobrazen 10 vteřinový (levý) a 60 vteřinový (pravý pravý) záznam velikosti náboje v závislosti na době sběru dat pořízený detektorem pro tuto napěťovou hladinu.



Obr. 4.25 Záznam 10 vteřin (levý) a 60 vteřin (pravý) velikosti náboje v závislosti na době sběru dat pro 10,3 kV DC negativních výbojů na kalibračním jiskřišti – Zdroj vysokého napětí Tesla BS 222a

Z těchto záznamů (Obr. 4.25) je podobně jako v předchozím případě patrné určité přeformulování náboje v závislosti na čase. Výbojová činnost s přibývajícím dobou sběru dat převážně postupně narůstala, což je na jednotlivých záznamech zřetelné změnou zobrazené červené plochy do rozšiřující se žluté plochy o jiné velikosti aktuální obálky náboje.

Na níže uvedeném grafu (Obr. 4.26) je zobrazeno porovnání naměřených průběhů velikosti celkového náboje v závislosti na době sběru dat všech napěťových hladin analyzovaných v této kapitole.



Obr. 4.26 Porovnání naměřených průběhů velikosti celkového náboje DC negativních výbojů v závislosti na době sběru dat na kalibračním jiskřišti – Zdroj vysokého napětí Tesla BS 222a

Na Obr. 4.26 je v případě napěťové úrovně 7,5 kV vidět relativní nestabilita velikosti celkového náboje v závislosti na době sběru dat. Tato nestabilita mohla být způsobena postupným formováním výbojů, kdy docházelo k rozšiřování určité velikosti aktuální obálky náboje a současně k zániku jiné z obálek nábojů. Docházelo tedy rovněž ke změně četnosti vzniklých výbojů na daných velikostech náboje. S přibývajícím časem napěťového namáhání se však postupně velikost celkového náboje začala ustalovat. Na napěťové úrovni 10,3 kV docházelo s přibývajícím dobou sběru dat k velkému nárůstu velikosti celkových výbojů, ovšem v určitých časových okamžicích rovněž jako v případě druhé napěťové hladiny docházelo k přechodu určité velikosti aktuální obálky náboje a současně k zániku jiné z obálek nábojů. Tento efekt měl za následek snížení počtu výbojů, s čímž souvisí chvilkový pokles velikosti celkového náboje. Během měření na stejnosměrném napětí docházelo v některých případech k náhodným krátkým výpadkům, popsanych v kapitole 4. Tyto výpadky tak částečně zkreslovaly zaznamenané výsledky, avšak neovlivnili natolik zřejmý charakter výbojové činnosti patrný ze zaznamenaných grafických průběhů.



Veškeré grafické záznamy získané detektorem ICMsystem pro jednotlivé doby sběru dat měření z této kapitoly jsou k porovnání uvedeny v příloze (Příloha W, Příloha X).

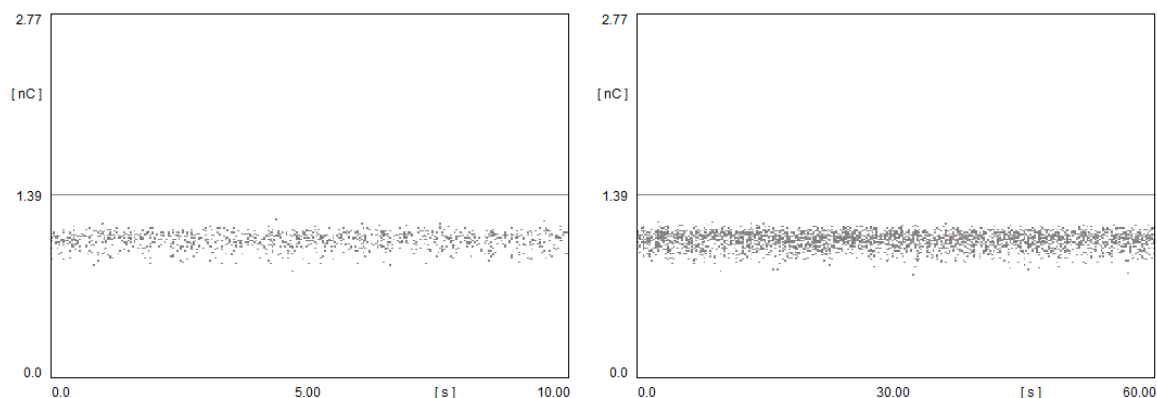
#### 4.2.4 DC výboje na kalibračním jiskřišti pozitivní polaroty napětí – Zdroj vysokého napětí Tesla BS 222a

K výskytu částečných výbojů na kalibračním jiskřišti pro stejnosměrný pozitivní charakter napětí za použití zdroje vysokého napětí Tesla BS 222a došlo při amplitudě zapalovacího napětí 9 kV. Na této napěťové hladině jsem prováděl první měření, jehož naměřené veličiny jsou uvedeny v tabulce (Tab. 4.17). Optimální velikostí LLD se v této kapitole ve všech provedených měřeních prokázala hodnota 5,5 % a velikost zesílení po celou dobu těchto měření dostačovalo na 1/4.

Tab. 4.17 Tabulka naměřených hodnot detektorem ICMsystem s výskytem výbojů pozitivní polaroty stejnosměrného napětí 9 kV na kalibračním jiskřišti v počátečních časových intervalech 10 – 60 vteřin záznamu s napájením zdrojem vysokého napětí Tesla BS 222a

U <sub>ipeak</sub> = 9 kV								
Doba sběru dat T <sub>ref</sub> (s)	10	20	30	40	50	60	60 (Po 3 min pod napětím)	60 (Po dalších 3 min pod napětím)
I <sub>PD</sub> (nA)	113	95	81	62	65	57	52	45
Q <sub>cumulative</sub> (nC)	1131	1901	2415	2476	3250	3404	3146	2700
ΣVýbojů	1079	1818	2309	2368	3118	3254	3011	2583

Na níže uvedeném obrázku (Obr. 4.27) je zobrazen 10 vteřinový (levý) a 60 vteřinový (pravý) záznam velikosti náboje v závislosti na době sběru dat pořízený detektorem pro tuto napěťovou hladinu.



Obr. 4.27 Záznam 10 vteřin (levý) a 60 vteřin (pravý) velikosti náboje v závislosti na době sběru dat pro 9 kV DC pozitivních výbojů na kalibračním jiskřišti – Zdroj vysokého napětí Tesla BS 222a

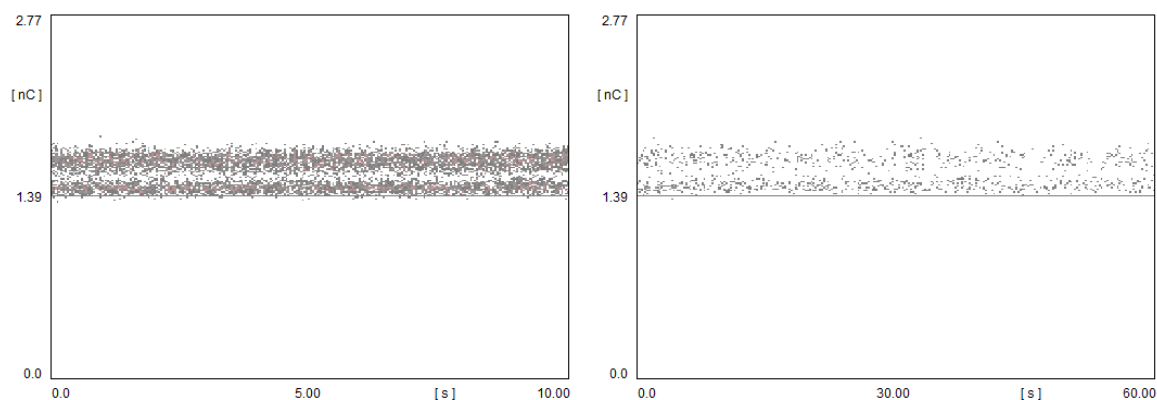
Na těchto průbězích (Obr. 4.27) je dobře viditelný vývoj částečných výbojů v podobě celkového navýšení četnosti vzniklých výbojů v závislosti na rostoucí době sběru dat.

Další měřenou amplitudou napětí, na které jsem prováděl záznam částečných výbojů v této kapitole, byla hodnota 12,2 kV. Naměřené veličiny těchto výbojů jsou uvedeny v tabulce (Tab. 4.18).

Tab. 4.18 Tabulka naměřených hodnot detektorem ICMsystem s výskytem výbojů pozitivní polarity stejnosměrného napětí 12,2 kV na kalibračním jiskřišti v počátečních časových intervalech 10 – 60 vteřin záznamu s napájením zdrojem vysokého napětí Tesla BS 222a

U <sub>ipeak</sub> = 12,2 kV								
Doba sběru dat T <sub>ref</sub> (s)	10	20	30	40	50	60	60 (Po 3 min pod napětím)	60 (Po dalších 3 min pod napětím)
IPD (nA)	1546	1182	655	292	142	28	11	3
Q <sub>cumulative</sub> (nC)	15460	23640	19653	11672	7105	1694	646	151
ΣVýbojů	9780	15009	12762	7617	4588	1081	406	96

Na níže uvedeném obrázku (Obr. 4.28) je zobrazen 10 vteřinový (levý) a 60 vteřinový (pravý) záznam velikosti náboje v závislosti na době sběru dat pořízený detektorem pro tuto napěťovou hladinu.

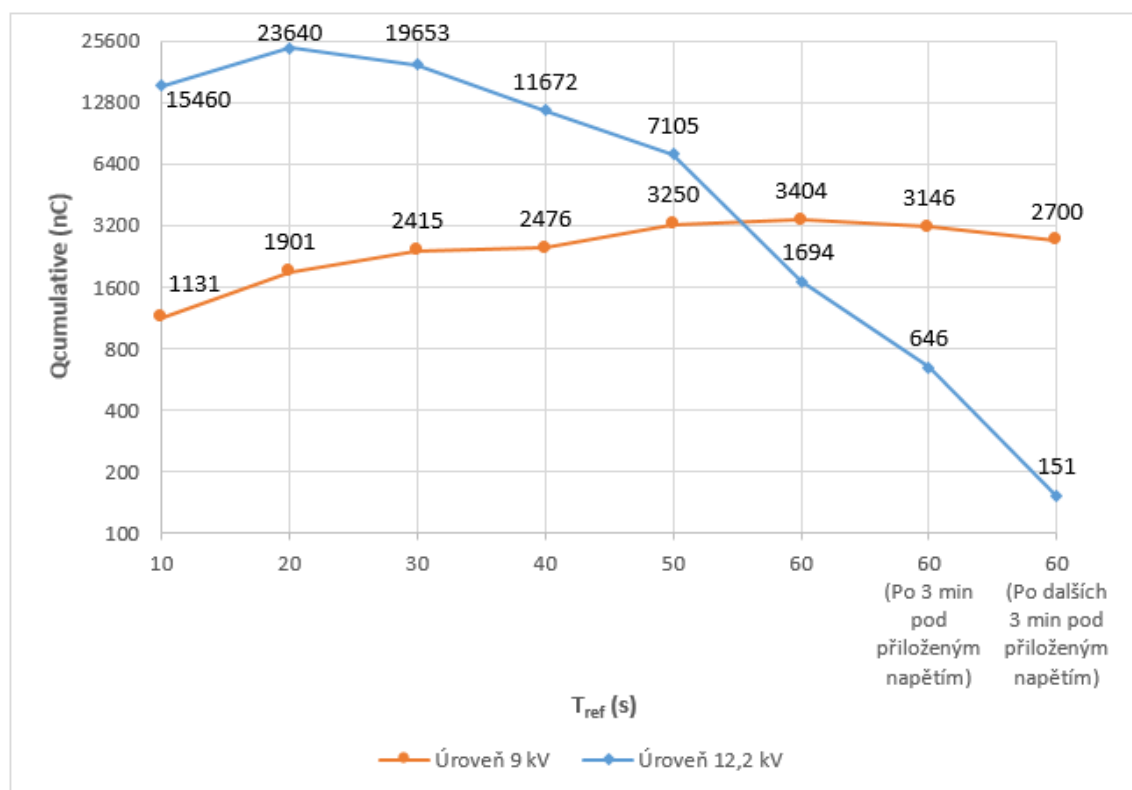


Obr. 4.28 Záznam 10 vteřin (levý) a 60 vteřin (pravý) velikosti náboje v závislosti na době sběru dat pro 12,2 kV DC pozitivních výbojů na kalibračním jiskřišti – Zdroj vysokého napětí Tesla BS 222a

Na těchto průbězích (Obr. 4.28) je dobře viditelný vývoj částečných výbojů v podobě celkového snížení četnosti vzniklých výbojů v závislosti na rostoucí době sběru dat.

Dále na stejnosměrném napětí docházelo na vyšších napěťových hladinách již jen ke krátkodobému zapálení výbojů, které byly detektorem zaznamenané po dobu maximálně 10 vteřin, jelikož při delší době sběru dat došlo k jejich vyhasnutí. Měření na těchto vyšších napěťových hladinách jsem tedy dále neprováděl.

Na níže uvedeném grafu (Obr. 4.29) je zobrazeno porovnání naměřených průběhů velikosti celkového náboje v závislosti na době sběru dat všech napěťových hladin analyzovaných v této kapitole.



Obr. 4.29 Porovnání naměřených průběhů velikosti celkového náboje DC pozitivních výbojů v závislosti na době sběru dat na kalibračním jiskřišti – Zdroj vysokého napětí Tesla BS 222a

Na Obr. 4.29 je v případě napěťové úrovně 9 kV v závislosti na rostoucím čase patrné postupné ustalování velikosti celkového náboje. Po delší době napěťového namáhání však výboje začínaly postupně uhasínat. Na napěťové úrovni 12,2 kV docházelo s rostoucí dobou napěťového namáhání k prudkému poklesu velikosti celkového náboje. S podobným charakterem jsem se již setkal v kapitole 4.2.2 při napájení modulárním systémem GBS 13/270, kde docházelo dokonce k náhlým vyhasnutím. V tomto případě však při napájení zdrojem vysokého napětí Tesla BS 222a byl pokles výbojů během měření

zcela plynulý a k jejich vyhasnutí došlo až při zvyšování napěťové hladiny. Rozdílnost mezi tímto a měřením v kapitole 4.2.2 spočívala pouze v typu použitého zdroje a pozicích v laboratoři. Rozdílné velikosti zatěžovacích proudů těchto zdrojů pravděpodobně také mohly mít vliv na velikost zapalovacího napětí a udržení výbojové činnosti.

Veškeré grafické záznamy získané detektorem ICMsystem pro jednotlivé doby sběru dat měření z této kapitoly jsou k porovnání uvedeny v příloze (Příloha Y, Příloha Z).

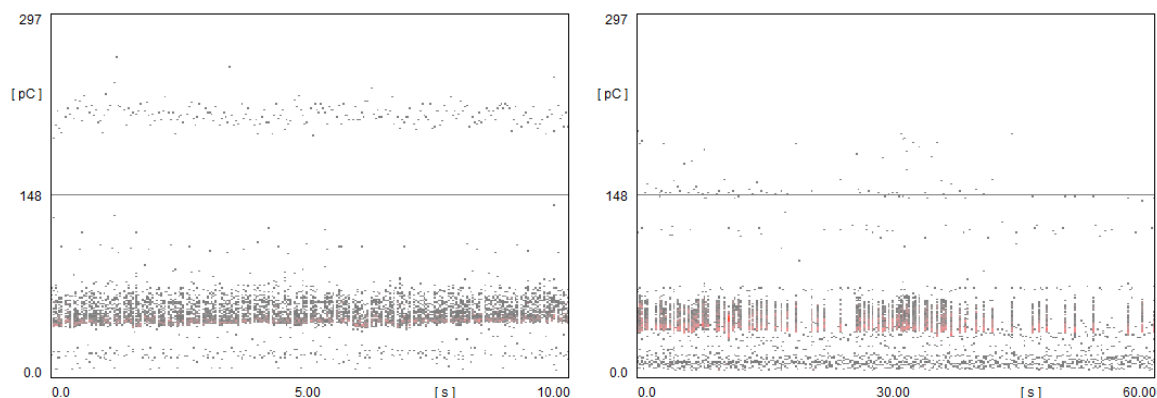
#### 4.2.5 DC výboje na modelu VN vedení negativní polarita napětí – Zdroj: Modulární systém GBS 13/270

K výskytu částečných výbojů na modelu VN vedení pro stejnosměrný negativní charakter napětí při napájení modulárním systémem GBS 13/270 došlo při amplitudě zapalovacího napětí 13,9 kV. Na této napěťové hladině jsem prováděl první měření, jehož naměřené veličiny jsou uvedeny v tabulce (Tab. 4.19). Optimální velikostí LLD se v této kapitole ve všech provedených měřeních prokázala hodnota 2,5 %. Velikost zesílení v prvním měření této kapitoly dostačovalo na 1/40 až do okamžiku před napěťovým namáháním (po dobu 3 minut), kdy jsem velikost zesílení změnil na 1/20. Zesílení 1/20 bylo použito i v dalším měření této kapitoly na vyšší napěťové úrovni.

Tab. 4.19 Tabulka naměřených hodnot detektorem ICMsystem s výskytem výbojů negativní polarita stejnosměrného napětí 13,9 kV na modelu VN vedení v počátečních časových intervalech 10 – 60 vteřin záznamu s napájením Modulárním systémem GBS 13/270

<b><math>U_{\text{peak}} = 13,9 \text{ kV}</math></b>						
<b>Doba sběru dat <math>T_{\text{ref}}</math> (s)</b>	<b>10</b>	<b>20</b>	<b>30</b>	<b>40</b>	<b>50</b>	<b>60</b>
<b><math>I_{\text{PD}}</math> (nA)</b>	36	34	33	30	16	6
<b><math>Q_{\text{cumulative}}</math> (nC)</b>	355	679	985	1202	809	338
<b><math>\Sigma</math>Výbojů</b>	6187	9847	17029	22684	16463	7796
<b>Doba sběru dat <math>T_{\text{ref}}</math> (s)</b>	<b>60</b> <b>(Po 3 min pod napětím)</b>	<b>60</b> <b>(Po dalších 3 min pod napětím)</b>				
<b><math>I_{\text{PD}}</math> (nA)</b>	1	1				
<b><math>Q_{\text{cumulative}}</math> (nC)</b>	62	55				
<b><math>\Sigma</math>Výbojů</b>	14195	4700				

Na níže uvedeném obrázku (Obr. 4.30) je zobrazen 10 vteřinový (levý) a 60 vteřinový (pravý) záznam velikosti náboje v závislosti na době sběru dat pořízený detektorem pro tuto napěťovou hladinu.



Obr. 4.30 Záznam 10 vteřin (levý) a 60 vteřin (pravý) velikosti náboje v závislosti na době sběru dat pro 13,9 kV DC negativních výbojů na modelu VN vedení – Zdroj: Modulární systém GBS 13/270

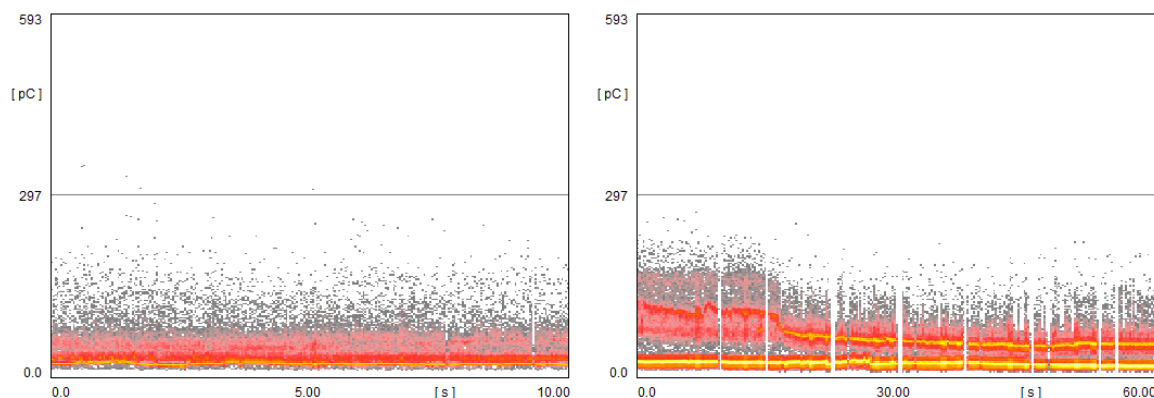
Na těchto průbězích (Obr. 4.30) je vidět značný pulsní charakter koróny. Při nahromadění prostorového náboje koróna na malou chvíli poklesla, přičemž dále během okamžiku došlo k odvedení náboje a koróna tak opět zapálila se stejnou intenzitou.

Další měřenou amplitudou napětí, na které jsem prováděl záznam částečných výbojů v této kapitole, byla hodnota 19,1 kV. Naměřené veličiny těchto výbojů jsou uvedeny v tabulce (Tab. 4.20).

Tab. 4.20 Tabulka naměřených hodnot detektorem ICMSystem s výskytem výbojů negativní polaridy stejnosměrného napětí 19,1 kV na modelu VN vedení v počátečních časových intervalech 10 – 60 vteřin záznamu s napájením Modulárním systémem GBS 13/270

<b><math>U_{\text{peak}} = 19,1 \text{ kV}</math></b>						
<b>Doba sběru dat <math>T_{\text{ref}}</math> (s)</b>	<b>10</b>	<b>20</b>	<b>30</b>	<b>40</b>	<b>50</b>	<b>60</b>
<b><math>I_{\text{PD}}</math> (nA)</b>	871	696	699	930	665	871
<b><math>Q_{\text{cumulative}}</math> (nC)</b>	8714	13916	20970	37204	33240	52272
<b><math>\Sigma</math>Výbojů</b>	279560	467099	621422	1425475	1155726	1721673
<b>Doba sběru dat <math>T_{\text{ref}}</math> (s)</b>	<b>60 (Po 3 min pod napětím)</b>	<b>60 (Po dalších 3 min pod napětím)</b>				
<b><math>I_{\text{PD}}</math> (nA)</b>	850,8	605,1				
<b><math>Q_{\text{cumulative}}</math> (nC)</b>	51048	36306				
<b><math>\Sigma</math>Výbojů</b>	1912647	519799				

Na níže uvedeném obrázku (Obr. 4.31) je zobrazen 10 vteřinový (levý) a 60 vteřinový (pravý) záznam velikosti náboje v závislosti na době sběru dat pořízený detektorem pro tuto napět'ovou hladinu.

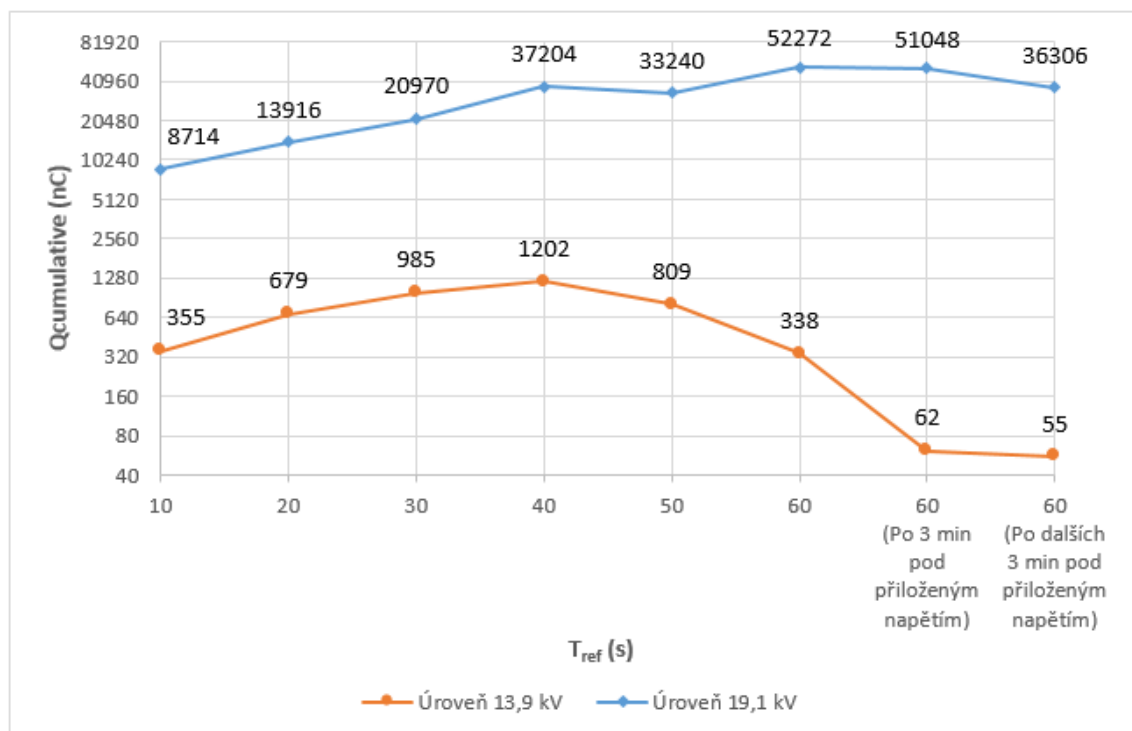


Obr. 4.31 Záznam 10 vteřin (levý) a 60 vteřin (pravý) velikosti náboje v závislosti na době sběru dat pro 19,1 kV DC negativních výbojů na modelu VN vedení – Zdroj: Modulární systém GBS 13/270

Na těchto průbězích (Obr. 4.31) je dobře viditelný vývoj částečných výbojů v podobě zvýšení četnosti vzniklých výbojů v závislosti na rostoucí době sběru dat. Dobře pozorovatelné je také nestabilní chování výbojů v podobě změn v jejich četnosti na příslušných velikostech obálek nábojů. Tyto změny jsou v těchto záznamech zobrazeny například poklesem „šedých“ výbojů o větší velikosti náboje a současně nárůstem „červených“ výbojů o menší velikosti náboje ve stejném čase. V tomto případě je tomu stejně tak u poklesu „červených“ výbojů a současně nárůstu „žlutých“ výbojů v témž čase. Význam tohoto barevného značení byl uveden na Obr. 3.10 v kapitole 3.1.2.

Další měření na zvýšené úrovni stejnosměrného napětí jsem již neprováděl, jelikož by hrozilo nežádoucím překročením velikosti napětí 25 kV zničení použité vazební kapacity.

Na níže uvedeném grafu (Obr. 4.32) je zobrazeno porovnání naměřených průběhů velikosti celkového náboje v závislosti na době sběru dat všech napět'ových hladin analyzovaných v této kapitole.



Obr. 4.32 Porovnání naměřených průběhů velikosti celkového náboje DC negativních výbojů v závislosti na době sběru dat na modelu VN vedení, zdroj: Modulární systém GBS 13/270

Při porovnání napěťových úrovní 13,9 kV a 19,1 kV je zřejmé, že při dlouhodobém napěťovém namáhání docházelo v případě 13,9 kV k rychlejšímu poklesu velikosti celkového náboje, kdežto na úrovni 19,1 kV nebyl tento pokles tak výrazný vzhledem k již tak většímu naakumulovanému celkovému náboji. Koróna v těchto případech vykazovala pulsní charakter v závislosti na aktuálním uložení prostorového náboje, který tak způsoboval její nestabilní chování.

Veškeré grafické záznamy získané detektorem ICMsystem pro jednotlivé doby sběru dat měření z této kapitoly jsou k porovnání uvedeny v příloze (Příloha ZA, Příloha ZB).

#### 4.2.6 DC výboje na modelu VN vedení pozitivní polaritě napětí – Zdroj: Modulární systém GBS 13/270

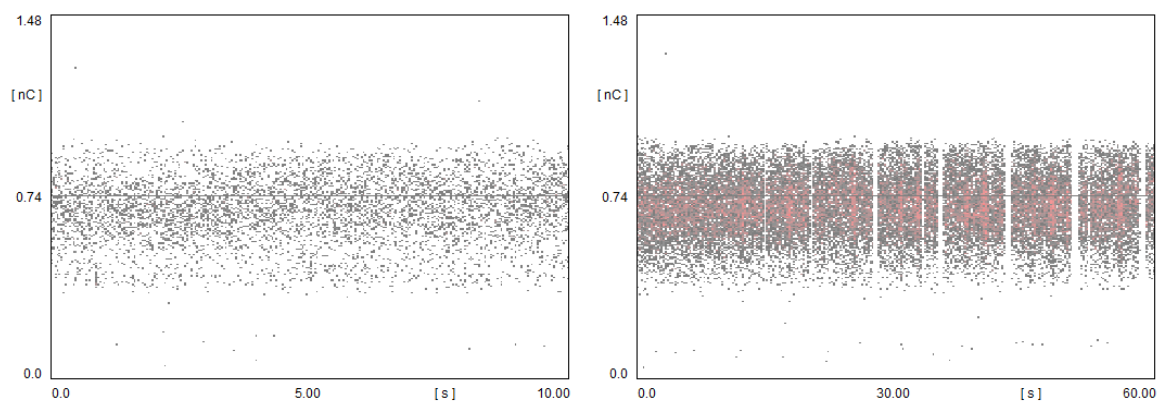
K výskytu částečných výbojů na modelu VN vedení pro stejnosměrný pozitivní charakter napětí při napájení modulárním systémem GBS 13/270 došlo při amplitudě zapalovacího napětí 14,5 kV. Na této napěťové hladině jsem prováděl první měření, jehož naměřené veličiny jsou uvedeny v tabulce (Tab. 4.21). Optimální velikostí LLD se v této

kapitole ve všech provedených měřeních prokázala hodnota 2,5 %. Velikost zesílení v prvním měření této kapitoly dostačovalo na 1/8.

Tab. 4.21 Tabulka naměřených hodnot detektorem ICMsystem s výskytem výbojů pozitivní polaridy stejnosměrného napětí 14,5 kV na modelu VN vedení v počátečních časových intervalech 10 – 60 vteřin záznamu s napájením Modulárním systémem GBS 13/270

U <sub>ipeak</sub> = 14,5 kV						
Doba sběru dat T <sub>ref</sub> (s)	10	20	30	40	50	60
I <sub>PD</sub> (nA)	442	426	436	441	438	433
Q <sub>cumulative</sub> (nC)	4416	8516	13083	17620	21905	25986
ΣVýbojů	6434	11906	18823	25357	31478	37087
Doba sběru dat T <sub>ref</sub> (s)	60 (Po 3 min pod napětím)	60 (Po dalších 3 min pod napětím)				
I <sub>PD</sub> (nA)	441	414				
Q <sub>cumulative</sub> (nC)	26466	24834				
ΣVýbojů	37502	45668				

Na níže uvedeném obrázku (Obr. 4.33) je zobrazen 10 vteřinový (levý) a 60 vteřinový (pravý) záznam velikosti náboje v závislosti na době sběru dat pořízený detektorem pro tuto napěťovou hladinu.



Obr. 4.33 Záznam 10 vteřin (levý) a 60 vteřin (pravý) velikosti náboje v závislosti na době sběru dat pro 14,5 kV DC pozitivních výbojů na modelu VN vedení – Zdroj: Modulární systém GBS 13/270

Na těchto průbězích (Obr. 4.33) je dobře viditelný vývoj částečných výbojů v podobě zvýšení četnosti vzniklých výbojů v závislosti na rostoucí době sběru dat. S tímto nárůstem také souvisí celkové tvarování koróny, které se projevuje zvýšenou nebo naopak sníženou četností určité velikosti aktuální obálky náboje. Koróna v tomto případě rovněž jako v předchozí kapitole vykazuje pulsní charakter, který je dán velikostí nahromaděného



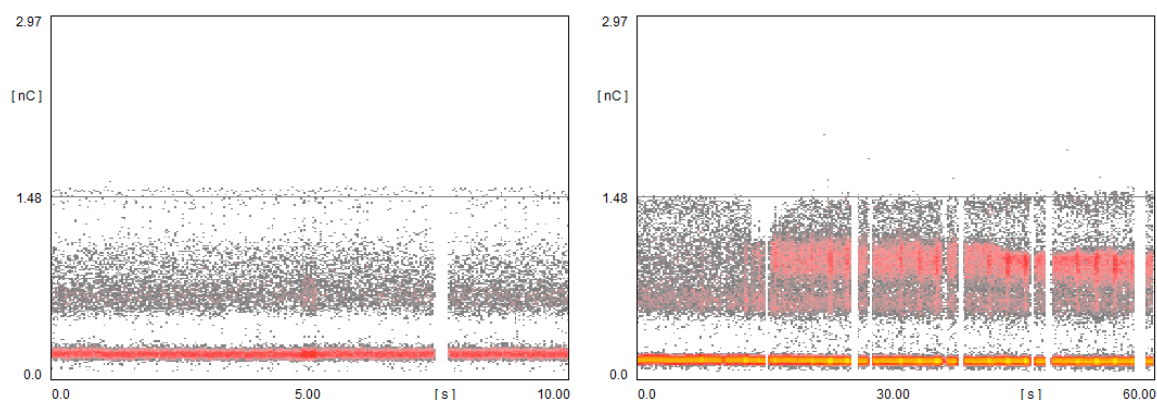
prostorového náboje, což je na uvedených záznamech vidět krátkým zvýšení červených vertikálních pruhů, znázorňujících zvýšení výbojové činnosti.

Další měřenou amplitudou napětí, na které jsem prováděl záznam částečných výbojů v této kapitole, byla hodnota 19,7 kV. Naměřené veličiny těchto výbojů jsou uvedeny v tabulce (Tab. 4.22). Velikost zesílení v tomto měření dostačovalo na 1/4.

Tab. 4.22 Tabulka naměřených hodnot detektorem ICMsystem s výskytem výbojů pozitivní polarity stejnosměrného napětí 19,7 kV na modelu VN vedení v počátečních časových intervalech 10 – 60 vteřin záznamu s napájením Modulárním systémem GBS 13/270

U <sub>ipeak</sub> = 19,7 kV						
Doba sběru dat T <sub>ref</sub> (s)	10	20	30	40	50	60
I <sub>PD</sub> (nA)	1766	1979	2024	2048	2079	1864
Q <sub>cumulative</sub> (nC)	17660	39580	60720	81920	103950	111840
ΣVýbojů	49634	110827	177833	245357	324150	367067
Doba sběru dat T <sub>ref</sub> (s)	60 (Po 3 min pod napětím)	60 (Po dalších 3 min pod napětím)				
I <sub>PD</sub> (nA)	1272	1309				
Q <sub>cumulative</sub> (nC)	76320	78540				
ΣVýbojů	86991	92314				

Na níže uvedeném obrázku (Obr. 4.34) je zobrazen 10 vteřinový (levý) a 60 vteřinový (pravý) záznam velikosti náboje v závislosti na době sběru dat pořízený detektorem pro tuto napěťovou hladinu.

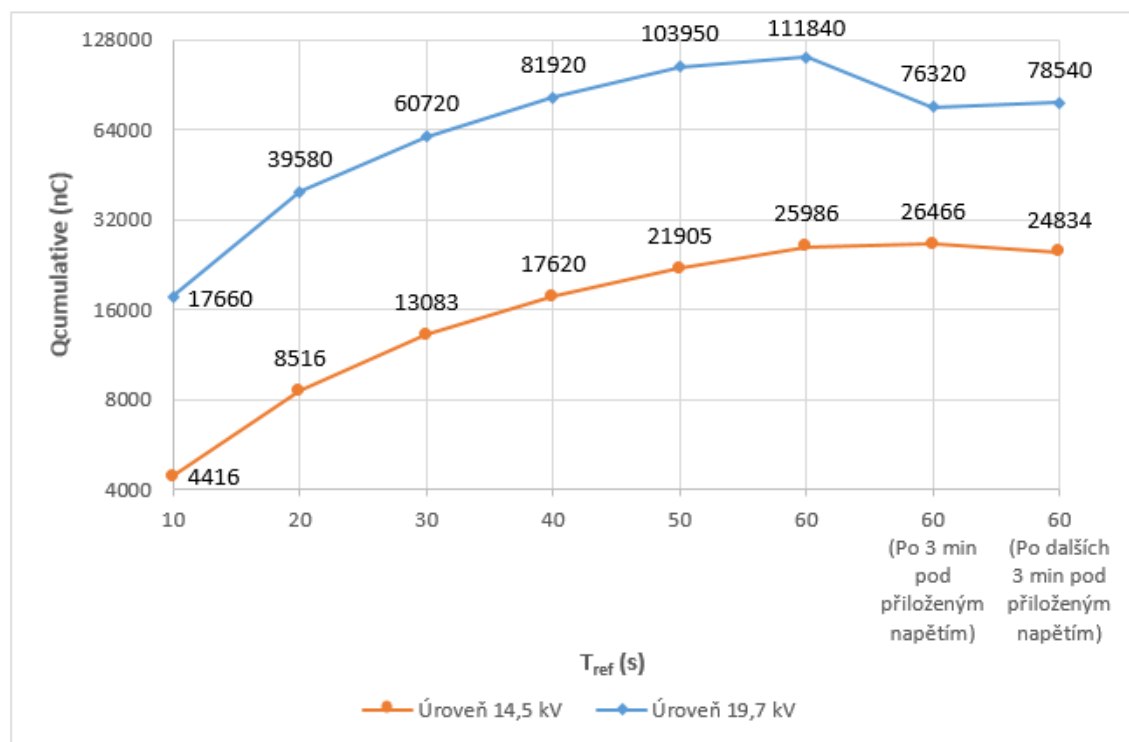


Obr. 4.34 Záznam 10 vteřin (levý) a 60 vteřin (pravý) velikosti náboje v závislosti na době sběru dat pro 19,7 kV DC pozitivních výbojů na modelu VN vedení – Zdroj: Modulární systém GBS 13/270

Na těchto průbězích (Obr. 4.34) je dobře viditelný vývoj částečných výbojů v podobě zvýšení četnosti vzniklých výbojů v závislosti na rostoucí době sběru dat. Tyto záznamy rovněž jako v předchozí kapitole vykazují změny v četnosti na příslušných velikostech obálek nábojů, které jsou navíc doprovázeny pulsním charakterem koróny.

Další měření na zvýšené úrovni stejnosměrného napětí jsem již neprováděl, jelikož by stejně jako v přechozí kapitole hrozilo nežádoucím překročením velikosti napětí 25 kV zničení použité vazební kapacity.

Na níže uvedeném grafu (Obr. 4.35) je zobrazeno porovnání naměřených průběhů velikosti celkového náboje v závislosti na době sběru dat všech napět'ových hladin analyzovaných v této kapitole.



Obr. 4.35 Porovnání naměřených průběhů velikosti celkového náboje DC pozitivních výbojů v závislosti na době sběru dat na modelu VN vedení, zdroj: Modulární systém GBS 13/270

Na těchto průbězích (Obr. 4.35) je pro obě napět'ové úrovně patrný rostoucí charakter velikosti celkového náboje v závislosti na době sběru dat, přičemž na úrovni 14,5 kV při delší době napět'ového namáhání dochází k mírnému ustalování až poklesu tohoto náboje. V případě napět'ové úrovně 19,7 kV docházelo s přibývajícím časem rovněž k nárůstu

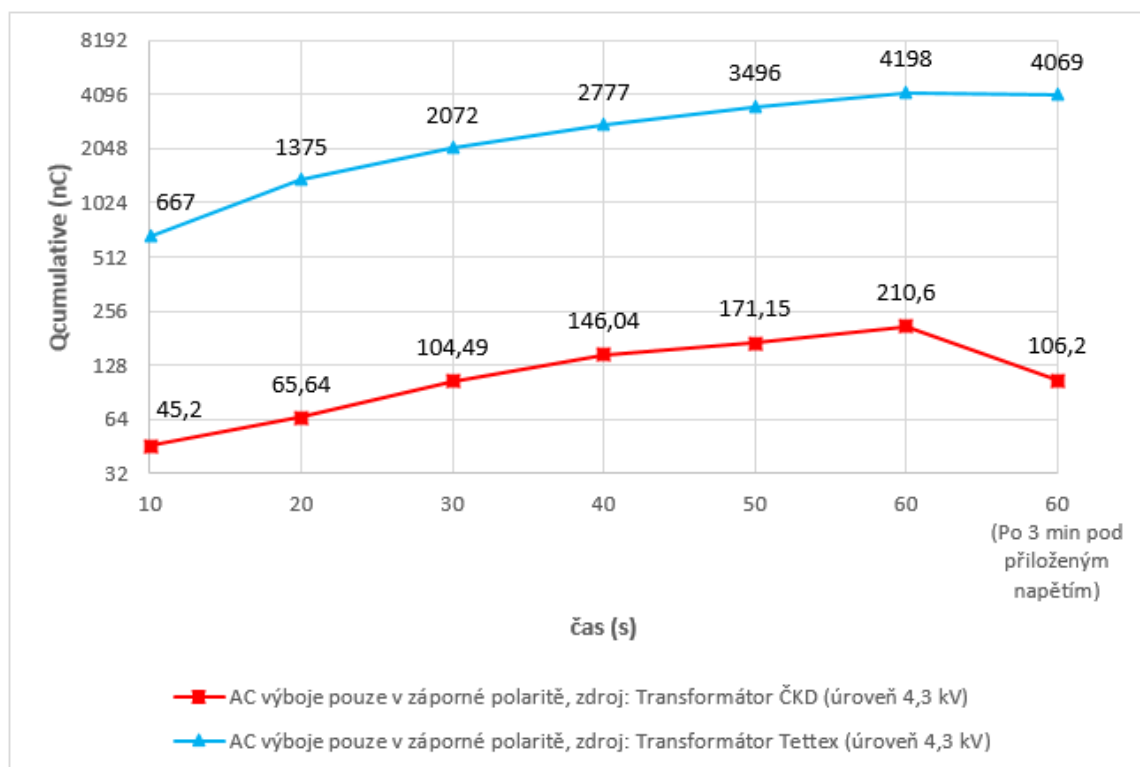
velikosti celkového náboje, který při delší době napět'ového namáhání v souvislosti s uložením prostorového náboje napřed snížil svoji velikost, ale poté se začal opět stabilizovat. Během měření na stejnosměrném napětí docházelo v některých případech k náhodným krátkým výpadkům, popsaných v kapitole 4. Tyto výpadky tak částečně zkreslovaly zaznamenané výsledky, avšak neovlivnili natolik zřejmý charakter výbojové činnosti patrný ze zaznamenaných grafických průběhů.

Veškeré grafické záznamy získané detektorem ICMsystem pro jednotlivé doby sběru dat měření z této kapitoly jsou k porovnání uvedeny v příloze (Příloha ZC, Příloha ZD).

### 4.3 Porovnání AC výbojů na kalibračním jiskřišti

Porovnání jednotlivých průběhů velikosti celkového náboje v závislosti na době sběru dat na kalibračním jiskřišti za použití odlišných zdrojů napájení, při kterých byla nastavena stejná napět'ová hladina, dává představu o závislosti vzniku výbojů na parametrech zdroje.

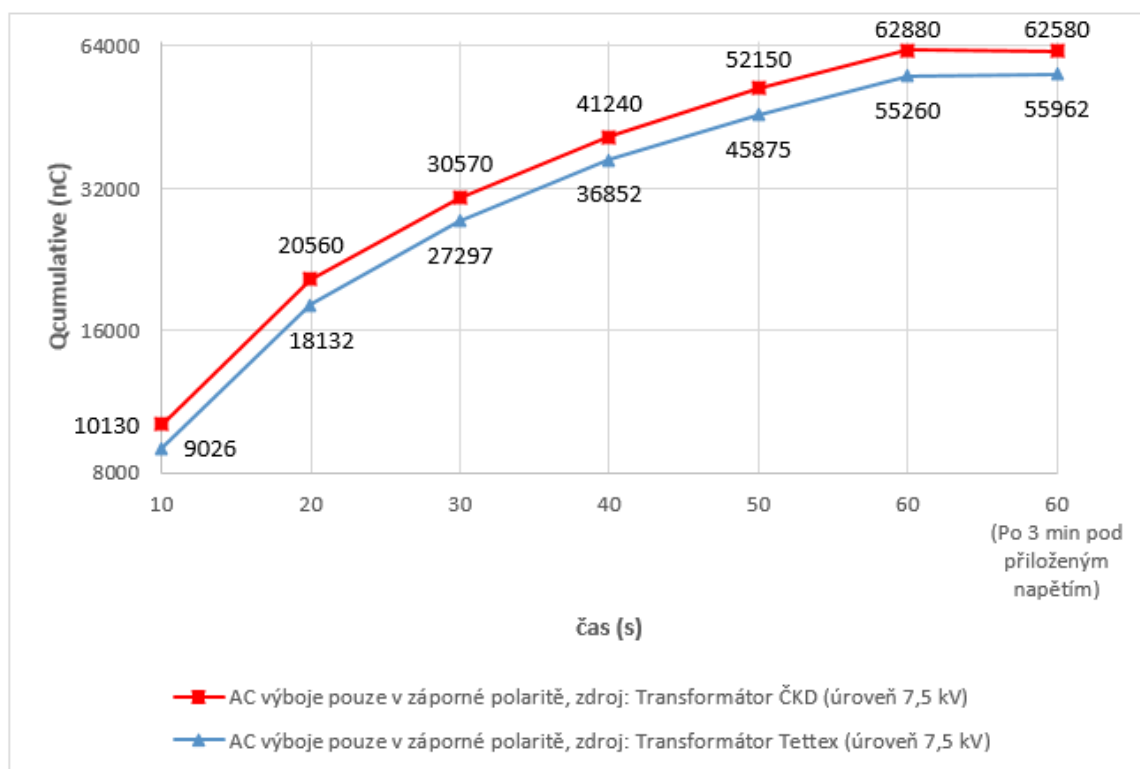
Na níže uvedeném průběhu (Obr. 4.36) je zobrazeno porovnání střídavých výbojů s výskytem pouze v záporné polaritě pro napět'ovou úroveň 4,3 kV, přičemž došlo pouze ke změně napájecího zdroje a na detektoru byla nastavena stejná hodnota LLD 2,5 %.



Obr. 4.36 Porovnání naměřených průběhů velikosti celkového náboje AC výbojů v závislosti na době sběru dat na kalibračním jiskřišti pro napět'ovou úroveň 4,3 kV

Porovnáním těchto průběhů (Obr. 4.36) lze dospět k závěru, že za výboje při napájení transformátorem Tettex vykazovaly daleko větší hodnotu celkového náboje než výboje při napájení transformátorem ČKD. Charakter velikosti celkového náboje těchto výbojů je v obou případech rostoucí, avšak v případě použití transformátoru ČKD docházelo při delší době napět'ového namáhání k jejich rychlému uhasínání, což bylo pravděpodobně způsobeno právě sníženou velikostí celkového náboje.

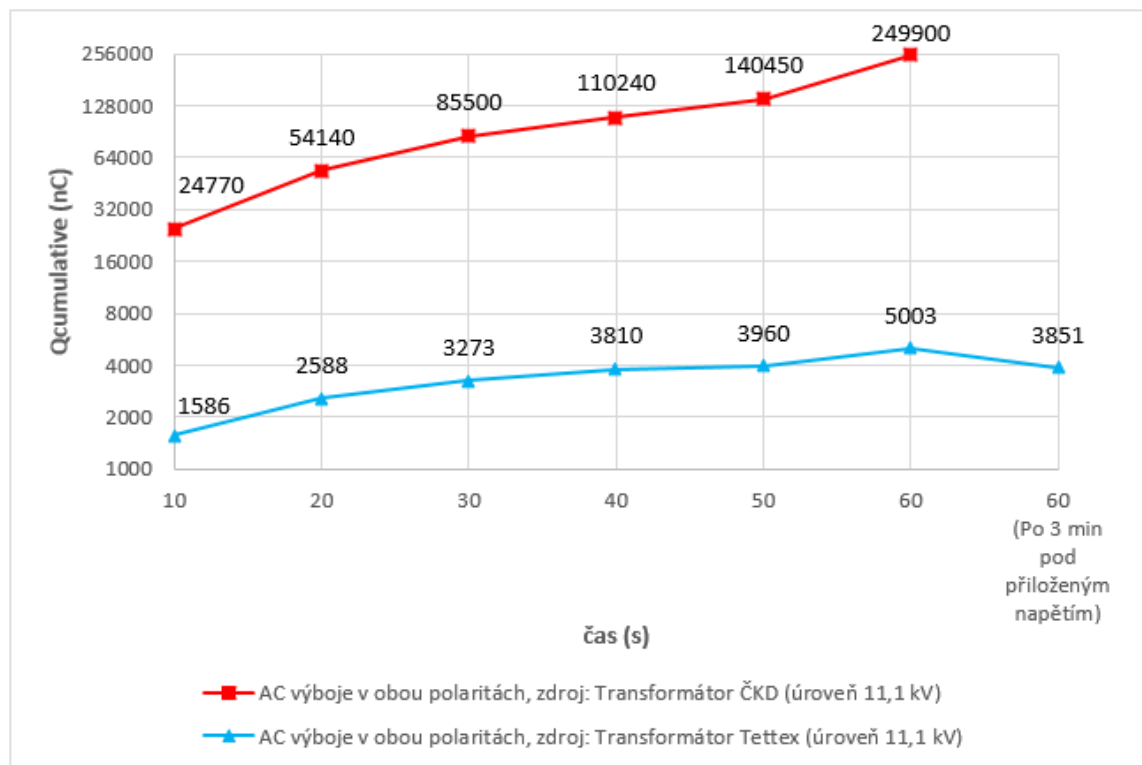
Na níže uvedeném průběhu (Obr. 4.37) je zobrazeno porovnání střídavých výbojů s výskytem pouze v záporné polaritě pro napět'ovou úroveň 7,5 kV, přičemž došlo pouze ke změně napájecího zdroje a na detektoru byla nastavena stejná hodnota LLD 5,1 %.



Obr. 4.37 Porovnání naměřených průběhů velikosti celkového náboje AC výbojů v závislosti na době sběru dat na kalibračním jiskřišti pro napět'ovou úroveň 7,5 kV

Při porovnání těchto průběhů (Obr. 4.37) si lze všimnout, že výboje v obou případech s rostoucí dobou sběru dat dosahovaly velmi podobných hodnot velikosti celkového náboje. V případě napájení transformátorem ČKD došlo při delší době napět'ového namáhání k malému poklesu tohoto náboje, kdežto při napájení transformátorem Tettex došlo naopak k malému nárůstu. Tato odlišnost mohla být pravděpodobně způsobena rozdílnou velikostí zatěžovacích proudů těchto zdrojů.

Na níže uvedeném průběhu (Obr. 4.38) je zobrazeno porovnání střídavých výbojů s výskytem pouze v záporné polaritě pro napětovou úroveň 11,1 kV, přičemž došlo pouze ke změně napájecího zdroje a na detektoru byla nastavena stejná hodnota LLD 2,5 %.



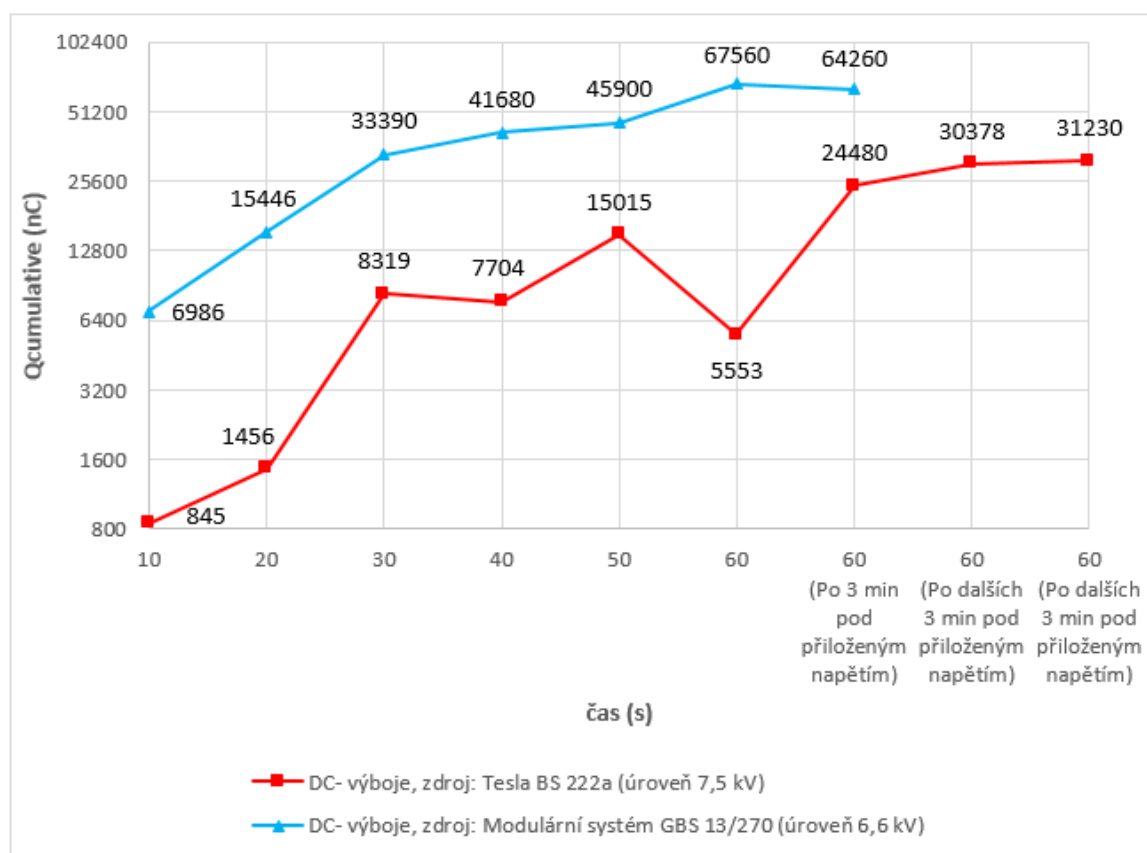
Obr. 4.38 Porovnání naměřených průběhů velikosti celkového náboje AC výbojů v závislosti na době sběru dat na kalibračním jiskřišti pro napětovou úroveň 11,1 kV

Na tomto průběhu (Obr. 4.38) si lze všimnout, že při napájení transformátorem Tettex docházelo k daleko menší výbojové činnosti než při napájení transformátorem ČKD. V případě transformátoru došlo v posledním měření k výskytu parazitních výbojů, což se projevilo vysokým nárůstem velikosti celkového náboje. Tento výsledek v 60 vteřinovém záznamu je pro správné porovnání s druhým použitým zdrojem zavádějící. Pokud by k tomuto jevu nedošlo, pravděpodobně by charakter výbojů byl s přibývajícím časem mírně rostoucí jako v případě použití zdroje Tettex.

#### 4.4 Porovnání DC výbojů negativní polarity napětí na kalibračním jiskřišti

Na níže uvedeném průběhu (Obr. 4.39) je zobrazeno porovnání stejnosměrných výbojů negativní polarity napětí pro blízké hodnoty napětových úrovní jednotlivých zdrojů napájení použitých při měření. V tomto případě byla na detektoru nastavena hodnota LLD

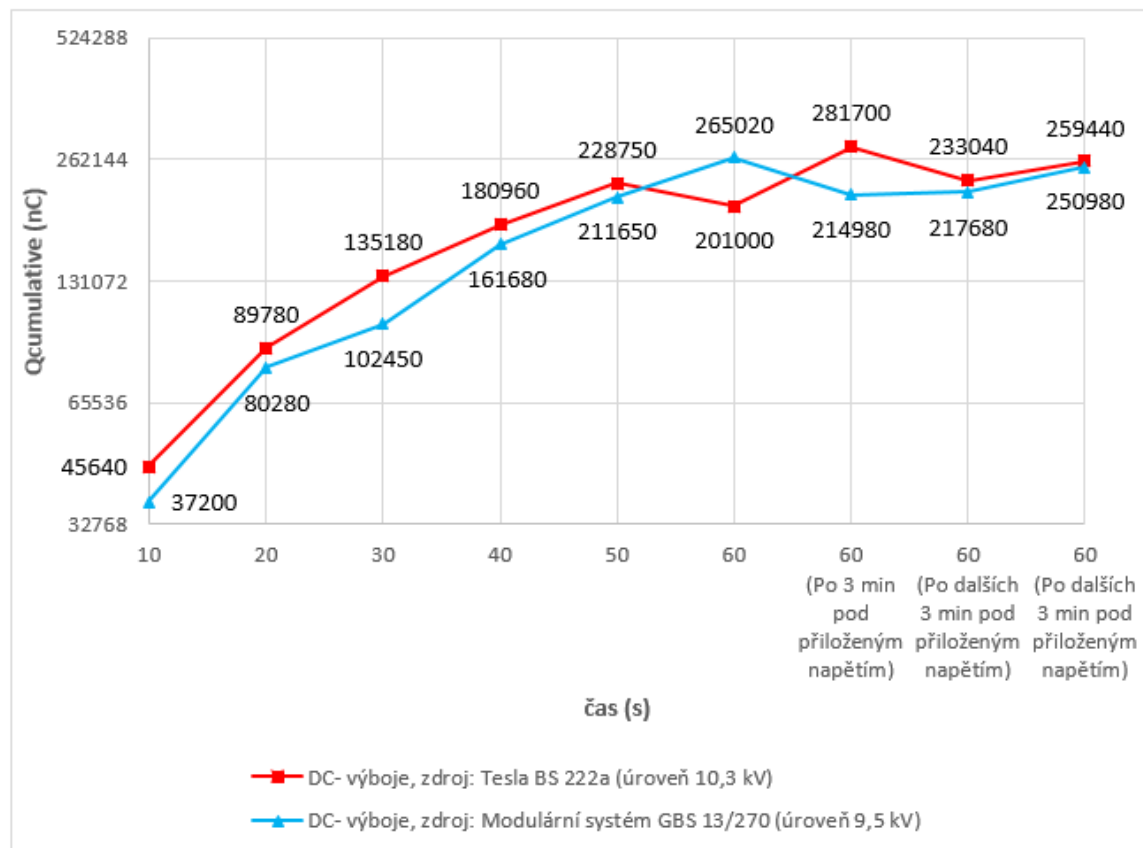
5 % při napájení modulárním systémem GBS 13/270 a 5,5 % při napájení zdrojem Tesla BS 222a.



Obr. 4.39 Porovnání naměřených průběhů velikosti celkového náboje DC negativních výbojů v závislosti na době sběru dat na kalibračním jiskřišti pro napětovou úroveň 6,6 kV a 7,5 kV

Při porovnání těchto dvou průběhů (Obr. 4.39) je potřeba brát v úvahu i relativně malou rozdílnost ve velikostech napájecího napětí u použitých zdrojů. U vyšší napětové úrovně by se z dosavadních záznamů získaných při negativní polaritě stejnosměrného napájení dal očekávat vyšší výskyt výbojů než na nižší napětové úrovni. V tomto případě však pravděpodobně vlivem parametrů použitých zdrojů došlo k tomu, že při napájení modulárním systémem GBS 13/270 na napětové hladině 6,6 kV docházelo k mnohem větší výbojové činnosti oproti použití zdroje Tesla BS 222a. Velikost celkového náboje byla s přibývajícím časem rostoucí, docházelo k pulsní činnosti korónového výboje a při delší době napětového namáhání došlo k poklesu velikosti celkového náboje. V případě napájení zdrojem Tesla BS 222a na napětové hladině 7,5 kV byla velikost celkového náboje v závislosti na čase nestabilní a při delší době napětového namáhání docházelo k neustálému zvyšování tohoto náboje.

Na níže uvedeném průběhu (Obr. 4.40) je zobrazeno porovnání stejnosměrných výbojů negativní polarity napětí pro blízké hodnoty napět'ových úrovní jednotlivých zdrojů napájení použitých při měření. V tomto případě byla na detektoru nastavena hodnota LLD 5 % při napájení modulárním systémem GBS 13/270 a 5,5 % při napájení zdrojem Tesla BS 222a.



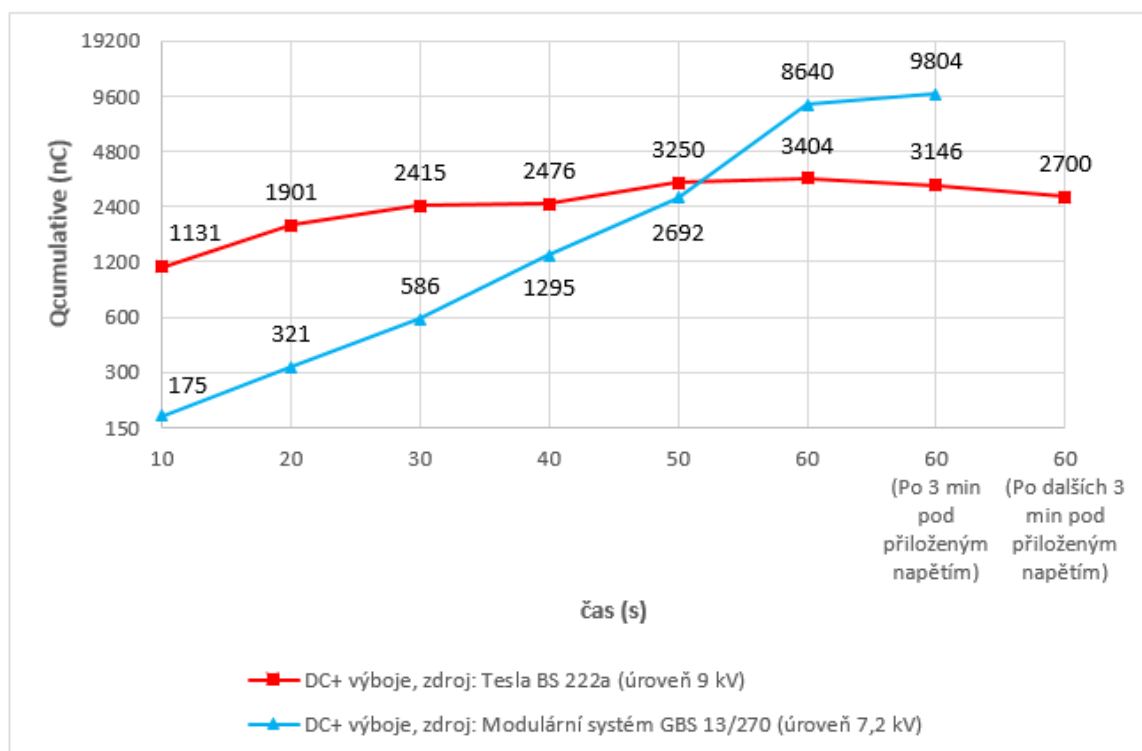
Obr. 4.40 Porovnání naměřených průběhů velikosti celkového náboje DC negativních výbojů v závislosti na době sběru dat na kalibračním jiskřišti pro napět'ovou úroveň 9,5 kV a 10,3 kV

I v tomto případě je při porovnání těchto dvou průběhů (Obr. 4.40) potřeba brát v úvahu relativně malou rozdílnost ve velikostech napájecího napětí u použitých zdrojů. Na vyšší napět'ové úrovni by podle předpokladů mělo docházet ke zvýšené výbojové činnosti, což se zde prokázalo. Během přechodu jednotlivých velikostí aktuální obálky náboje na jinou hladinu však docházelo k výkyvům, které tak ovlivnily velikost celkového náboje. V těchto případech mohlo dojít k neočekávaným výkyvům, kterým je například překřížení křivek mezi dobou sběru dat 50 a 60 sekund. Zajímavostí je, že v posledním 60 vteřinovém záznamu při delší době napět'ového namáhání vznikla v obou případech použitých zdrojů velice podobná velikost celkového náboje. Tento náboj je v případě

napětové úrovni 10,3 kV o trochu větší než pro napětovou úroveň 9,5 kV za použití jiného zdroje. Z těchto výsledků lze usuzovat, že i když koróna zpočátku vykazovala značné odchylky ve velikostech celkového náboje, po delší době napětového namáhání dochází k jejímu ustalování a koróna tak začíná vykazovat stabilnější hodnotu tohoto náboje.

#### 4.5 Porovnání DC výbojů pozitivní polarita napětí na kalibračním jiskřišti

Na níže uvedeném průběhu (Obr. 4.41) je zobrazeno porovnání stejnosměrných výbojů pozitivní polarita napětí pro blízké hodnoty napětových úrovní jednotlivých zdrojů napájení použitých při měření. V tomto případě byla na detektoru nastavena hodnota LLD 5 % při napájení modulárním systémem GBS 13/270 a 5,5 % při napájení zdrojem Tesla BS 222a.



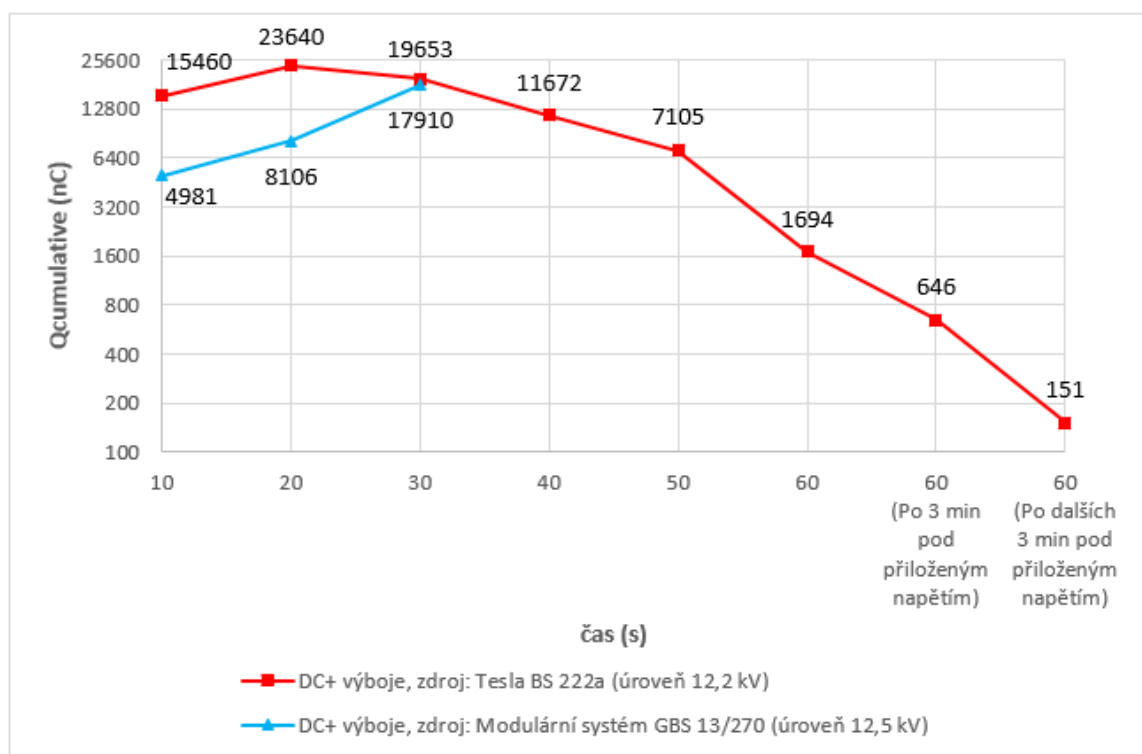
Obr. 4.41 Porovnání naměřených průběhů velikosti celkového náboje DC pozitivních výbojů v závislosti na době sběru dat na kalibračním jiskřišti pro napětovou úroveň 7,2 kV a 9 kV

I v tomto případě je při porovnání těchto dvou průběhů (Obr. 4.41) potřeba brát v úvahu malou rozdílnost ve velikostech napájecího napětí u použitých zdrojů. Na vyšší napětové úrovni by podle předpokladů mělo docházet ke zvýšené výbojové činnosti, což zde bylo splněno pouze v počátečních časových intervalech, než došlo se stále rostoucím časem k prudkému nárůstu velikosti celkového náboje. Výbojová činnost na napětové



úrovni 7,2 kV byla nakonec při delší době napět'ového namáhání vyšší než v případě napět'ové úrovně 9 kV při použití zdroje Tesla BS 222a. Zvláštní je také v konečných záznamech odlišný charakter výbojů, jenž byl v případě napět'ové úrovně 7,2 kV neustále se zvyšující, kdežto na napět'ové úrovni v posledních dvou záznamech docházelo k jejich úbytku.

Na níže uvedeném průběhu (Obr. 4.42) je zobrazeno porovnání stejnosměrných výbojů pozitivní polarit'y napětí pro blízké hodnoty napět'ových úrovní jednotlivých zdrojů napájení použitých při měření. V tomto případě byla na detektoru nastavena hodnota LLD 5 % při napájení modulárním systémem GBS 13/270 a 5,5 % při napájení zdrojem Tesla BS 222a.



Obr. 4.42 Porovnání naměřených průběhů velikosti celkového náboje DC pozitivních výbojů v závislosti na době sběru dat na kalibračním jiskřišti pro napět'ovou úroveň 12,2 kV a 12,5 kV

I v tomto případě je opět při porovnání těchto dvou průběhů (Obr. 4.42) potřeba brát v úvahu velmi malou rozdílnost ve velikostech napájecího napětí u použitých zdrojů. Na vyšší napět'ové úrovni by podle předpokladů mělo docházet ke zvýšené výbojové činnosti, což v tomto případě bylo právě naopak. Výboje na napět'ové úrovni 12,5 kV „měly snahu“ zvyšovat svůj počet a s ním související velikost celkového náboje, avšak v čase 40 sekund

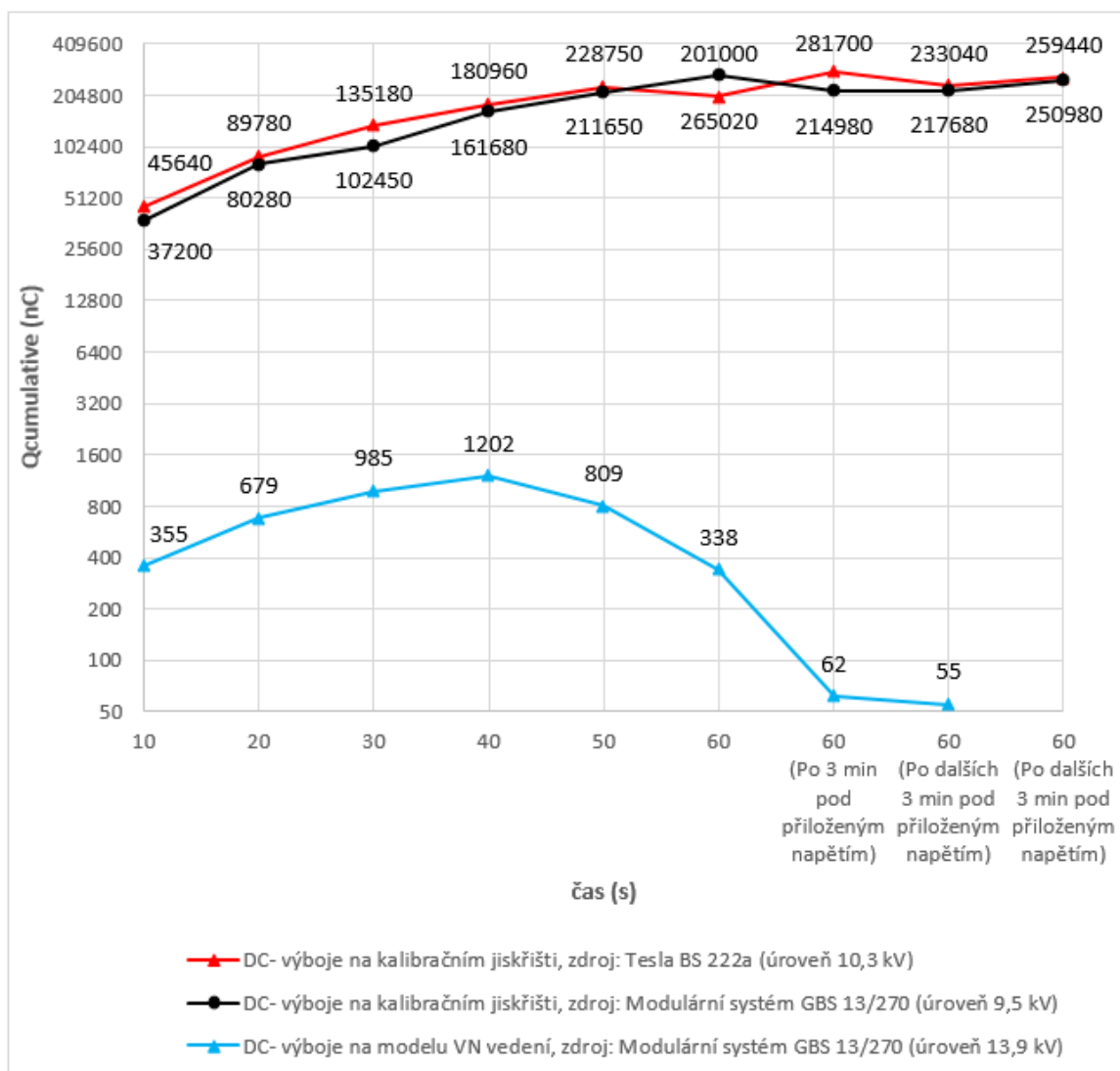
došlo k jejich úplnému vyhasnutí. Naproti tomu výboje vznikající na napěťové hladině 12,2 kV za použití zdroje Tesla BS 222a s přibývajícím časem napěťového namáhání postupně uhasínaly. Z těchto průběhů je patrné, že výboje vznikající na pozitivním stejnosměrném napětí vykazují zvláštní nestabilní chování, jejichž průběh velikosti celkového náboje v závislosti na čase pro konkrétní napěťovou hladinu nelze zcela přesně dopředu odhadnout.

#### **4.6 Porovnání charakteru stejnosměrných částečných výbojů na kalibračním jiskřišti a modelu VN vedení**

Mezi kalibračním jiskřištěm a modelem VN vedení je značný rozdíl. Velikost, plocha, tvar a vzdálenost elektrod, to vše ovlivňuje vznik a charakter částečných výbojů. Z těchto důvodů jsem se pro lepší pochopení vznikajících výbojů na různých objektech při stejnosměrném napětí rozhodl navíc provést toto dodatečné vyhodnocení.

##### **4.6.1 Porovnání DC výbojů na kalibračním jiskřišti a modelu VN vedení negativní polaritě napětí**

V případě stejnosměrných výbojů negativní polaritě napětí jsem provedl porovnání nejbližších napěťových úrovní pro všechny použité zdroje během měření (Obr. 4.43).

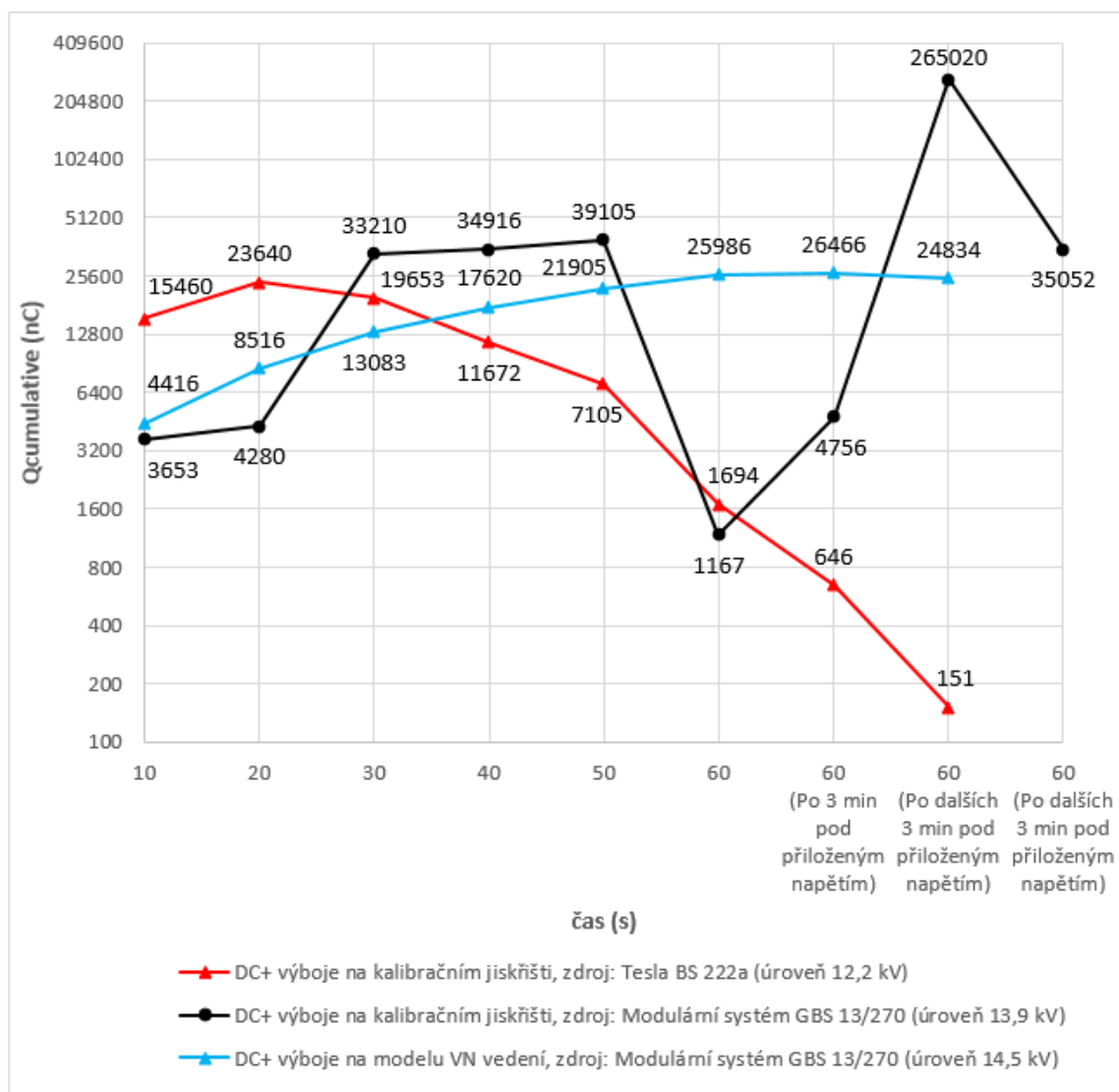


Obr. 4.43 Porovnání naměřených průběhů velikosti celkového náboje DC negativních výbojů v závislosti na době sběru dat na kalibračním jiskřišti a modelu VN vedení

Na těchto průbězích (Obr. 4.43) je na první pohled patrný obrovský rozdíl mezi celkovým počtem výbojů vznikajících na kalibračním jiskřišti a modelem VN vedení. Ačkoliv měřená úroveň napětí na modelu VN vedení byla vyšší než velikost napětí na kalibračním jiskřišti, objevovala se na modelu VN vedení mnohem menší velikost celkového náboje. Výboje v takovém případě s rostoucí dobou napěťového namáhání nakonec postupně vyhasínaly. Tento rozdíl je způsoben odlišnou vzdáleností a tvarem elektrod, přičemž na modelu VN vedení se prostorový náboj mohl v okolí korónující elektrody více hromadit, čímž zapříčinil její nestabilní hoření.

#### 4.6.2 Porovnání DC výbojů na kalibračním jiskřišti a modelu VN vedení pozitivní polarity napětí

V případě stejnosměrných výbojů pozitivní polarita napětí jsem opět provedl porovnání nejbližších napět'ových úrovní pro všechny použité zdroje během měření (Obr. 4.44)



Obr. 4.44 Porovnání naměřených průběhů velikosti celkového náboje DC pozitivních výbojů v závislosti na době sběru dat na kalibračním jiskřišti a modelu VN vedení

Na těchto průbězích (Obr. 4.44) je vidět, že v každém z uvedených průběhů docházelo s přibývajícím časem k odlišným vlastnostem korónového výboje. Koróna na modelu VN vedení v případě napájení modulárním systémem GBS 13/270 na úrovni napětí 14,5 kV vykazovala v počátečním čase měření velmi podobnou velikost celkového náboje jako koróna na kalibračním jiskřišti na napět'ové úrovni 13,9 kV při napájení stejným typem

zdroje. Její velikost celkového náboje byla s přibývajícím časem rostoucí a docházelo k její postupné stabilizaci až poklesu. Oproti tomu koróna vznikající na kalibračním jiskřišti na napětíové úrovni 14,5 kV po celou dobu měření vykazovala velice nestabilní chování, které se projevovalo změnami ve velikosti celkového náboje v závislosti na čase sběru dat. V případě použití zdroje Tesla BS 222a pro kalibrační jiskřiště na napětíové úrovni 12,2 kV docházelo s přibývajícím časem k prudkému poklesu velikosti celkového náboje, tedy k vyhasínání koróny. Z těchto porovnání vyplývá, že korónový výboj na stejnosměrném napětí pozitivní polaritě vykazuje nepředvídatelné chování, které je pravděpodobně nejvíce ovlivněno prostorovým nábojem v okolí elektrody, jenž brání výbojům stabilně hořet. Na tento náboj může mít vliv aktuální teplota, atmosférický tlak a vlhkost, ve které se vyskytuje objekt vykazující výbojovou činnost.

## Závěr

V této práci jsem se zabýval detekcí a záznamem částečných výbojů na stejnosměrném napětí. Před samotným měřením jsem se musel v první řadě seznámit s detektorem částečných výbojů ICMsystem od firmy Power Diagnostix, jeho částmi, obsluhou a kalibrací. Při návrhu experimentů pro detekci a záznam částečných výbojů jsem vycházel z možností a vybavení vysokonapěťové laboratoře KEE Západočeské Univerzity v Plzni.

Za účelem lepšího porozumění vývoji částečných výbojů, jsem v první řadě provedl jejich měření na střídavém napájení, kde jsem jako objekt vzniku částečných výbojů použil kalibrační jiskřiště. Dále jsem se zabýval měřením těchto výbojů na stejnosměrném napětí, přičemž jako testovaný objekt pro vznik částečných výbojů jsem použil opět kalibrační jiskřiště a dodatečně také nad rámec své práce ještě model VN vedení, abych dosáhl objektivnějšího porovnání naměřených výsledků. Veškeré měření jsem prováděl totožným postupem s ohledem na správné nastavení pro AC a DC napětí, abych vytvořil co nejpodobnější podmínky pro vznik a průběh hoření těchto výbojů.

Během jednotlivých měření jsem použil několik typů zdrojů s odlišnými parametry, abych prozkoumal jejich vliv na samotnou výbojovou činnost. V případě částečných výbojů vznikajících na střídavém napětí jsem provedl porovnání záznamů o stejných napěťových úrovních ze dvou odlišných zdrojů. Z těchto výsledků jsem dospěl k závěru, že velikost výbojové činnosti je závislá nejen na atmosférických podmínkách, ale také pravděpodobně na velikosti zatěžovacího proudu použitého zdroje.

Na získaných záznamech z detektoru částečných výbojů jsem pozoroval veličiny, které dávaly dobrý obraz o stavu výbojové činnosti. Těmito veličinami byly především napájecí napětí zdroje, střední proud částečných výbojů, aktuální obálka náboje, celkový počet vzniklých výbojů a délka doby sběru dat. Na základě těchto veličin jsem poté sestavil grafy, udávající charakter částečných výbojů v podobě velikosti celkového náboje v závislosti na čase. Tyto grafy jsem dále pro daný typ a velikost napěťového namáhání mezi sebou porovnával a prováděl jejich vyhodnocení. Při těchto vyhodnoceních jsem musel také brát na zřetel chybovost měřicího detektoru, který v určitých případech při zahlcení velkým množstvím výbojů vykazoval náhlá přerušení zápisu dat po dobu až několika vteřin. Tato přerušení tak mohla ve výsledku způsobit zobrazení nižšího

celkového počtu zaznamenaných výbojů, čímž došlo k určitým odchylkám v průběhu velikosti celkového náboje v závislosti na čase od skutečnosti.

Při měření částečných výbojů na střídavém napětí docházelo podle velikosti napět'ové úrovně k výskytu částečných výbojů v záporné půlčlenné napájecího napětí nebo současně v záporné i kladné půlčlenné napájecího napětí. Během této výbojové činnosti docházelo při zvýšené úrovni napájecího napětí pouze k přechodům mezi kladnou a zápornou půlčlennou napětí, což mělo vliv na změnu počtu výbojů a velikost celkového náboje. Při měření částečných výbojů při napájení transformátorem ČKD došlo na napět'ové hladině 11,1 kV k výskytu parazitních výbojů zkreslujících měření, tudíž jsem tento jev musel brát v úvahu při vyhodnocení.

U částečných výbojů vznikajících na stejnosměrném napětí docházelo velmi často k mnohem větším výkyvům velikosti celkového náboje v závislosti na čase. Tyto výkyvy byly dobře pozorovatelné z již naměřených průběhů aktuální velikosti náboje v závislosti na době sběru dat získaných detektorem v podobě barevných přechodů, znázorňujících celkovou četnost výbojů. Četnost těchto výbojů se s přibývajícím časem napět'ového namáhání měnila, čímž docházelo také ke změnám velikosti aktuální obálky náboje. Vývoj částečných výbojů na stejnosměrném napětí se však lišil především podle polarity přivedeného napětí.

Četnost výbojů na stejnosměrném negativním napětí na kalibračním jiskřišti se při určitých napět'ových hladinách řádově podobala četnosti výbojů vznikajících na střídavém napětí, avšak u stejnosměrného negativního napětí docházelo k častějším výkyvům velikosti celkového náboje v závislosti na čase než u výbojů na střídavém napětí.

V případě výbojů vznikajících na stejnosměrném negativním napětí na kalibračním jiskřišti docházelo obecně k mnohem větší výbojové činnosti a k jejich stabilnějšímu vývoji než v případě výbojů vznikajících na stejnosměrném pozitivním napětí. Stabilnější chování jsem také zaznamenal na rozšiřujících experimentech provedených na modelu VN vedení pro pozitivní i negativní napětí, který měl oproti kalibračnímu jiskřišti odlišný tvar elektrod a větší vzdálenost od země.

Během měření částečných výbojů na stejnosměrném pozitivním napětí na kalibračním jiskřišti jsem navíc při napěťové úrovni 13,9 kV provedl experiment v podobě vnějšího ofukování jiskřiště ventilátorem, za účelem odvedení nahromaděného prostorového náboje a umožnit tak vzniklým výbojům stabilní hoření. Z naměřených výsledků se však nakonec ukázalo, že ke značné nestabilitě a impulznímu chování těchto výbojů docházelo i při tomto ofukování jiskřiště ventilátorem, tudíž na vznikající výboje neměl vliv.

V této práci jsem splnil všechny body zadání a navíc provedl několik rozšíření, na jejichž základě lze v budoucnu provádět další měření, zaměřená například na detekci částečných výbojů na venkovním vedení při simulaci okolních podmínek. Tato práce může být také užitečná pro nastavení detektoru při volbě mezi stejnosměrným nebo střídavým napětím, jelikož popisuje také jednotlivé parametry a moduly měřicího detektoru.



## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] ČSN EN 60270 (345641): *Technika zkoušek vysokým napětím - Měření částečných výbojů*.
- [2] JERONENSE, M. *Charges and discharges in HVDC cables: in particular in mass-impregnated*. Delft, The Netherlands: Delft University Press, 1997, ISBN: 904071438x.
- [3] RYAN, H. *High-Voltage Engineering and Testing, Chapter 17: Partial discharges measuring*. London: Institution of Engineering and Technology: Ernst Gockenbach, 3rd edition, 2013, ISBN: 9781849192637.
- [4] MARTÍNEK, P. *Teoretická a experimentální analýza částečných výbojů v dielektriku elektrických strojů*. Plzeň, 2005, 144 s.
- [5] VEVERKA, A. *Technika vysokých napětí. 2.*, přeprac. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1978.
- [6] PIHERA, J. a TRNKA P. *Pulse Sequence Analysis of Corona Discharge at DC*. University of West Bohemia, Pilsen: Diagnostic of Electrical Machines and Insulating Systems in Electrical Engineering (DEMISEE), 2016.
- [7] LAURENC, J. Home.zcu.cz. *Předmět TVN*. Dostupné také z: <http://home.zcu.cz/~laurenc/tvn.php>
- [8] ROUS, Z. Řešení důležitého problému ochrany před bleskem. *AMPER 2004*. Dostupné také z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/reseni-duleziteho-problemu-ochrany-pred-bleskem--14106>
- [9] MENTLÍK, V. *Diagnostika elektrických zařízení*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2008, ISBN: 978-80-7300-232-9, 439 s.
- [10] TRNKA, P.; PIHERA J. a ŠIRŮČEK M. *Elektrické stromečky – fenomén v elektroizolačních materiálech*. Fakulta elektrotechnická ZČU v Plzni, Dostupné také z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/elektricke-stromecky-fenomen-v-elektroizolacnich-materialech--10217>
- [11] FROMM, U. *Partial discharge and Breakdown Testing at High DC Voltage*. Delft University Press, 1995, ISBN: 90-407-1155-0.
- [12] PRSKAVEC, L. *Měření částečných výbojů, Semestrální projekt*. ČVUT Praha, 2000.
- [13] SCHWARZ, R. a MUHR H. M. *Partial Discharge Impulse Characteristics of Different Detection*. Graz University of Technology, Austria: Institute of High Voltage Engineering and System Management, 2007.
- [14] ZÁLIŠ, K. *Částečné výboje v izolačních systémech elektrických strojů*. 2005: Vyd 1. Praha: Česká matice technická (Academia), ISBN: 802001358X.
- [15] MENTLIK, V.; PIHERA J.; TRNKA P. a MARTINEK P. *Partial Discharge Potential Free Test Methods*. IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2006, Dostupné z doi: 10.1109/CEIDP.2006.312000.
- [16] DONG-SIK, Kang. *Novel sensor for locating partial discharges in high-voltage rotating machines*. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007, roč. 22, č. 3.
- [17] KIM, Yong; KIM Geun; KIM Jung; KIM Hee a KONG Tae. *Capacitive Slot Coupler for on-line partial discharge monitoring of stator winding insulation*. Philadelphia: IEEE Electrical Insulation Conference (EIC), 2014.
- [18] PARK, Dae-won.; CHA Sang-wook a KIL Gyung-suk. *Acoustic detection of partial discharges in insulation oil*. 2011: Proceedings of the 10th WSEAS international conference on Instrumentation, measurement, circuits and systems.
- [19] AL-MASRI, Wasim; ABDEL-HAFEZ Mamoun a EL-HAG Ayman. *A Multi-hypothesis sequential probability test for partial discharges localization in power transformers*. Mechatronics and its Applications (ISMA), 2015 10th International Symposium, 2015.
- [20] LI, Yancheng; DU Jinyang; GAO Junguo; ZHANG Xiaohong; LIU Tong; WANG Guoli; LI Ruihai, LIU Zhihong a WANG Jianying. *Classification of partial discharge under different voltages using acoustic emission techniques*. Bologna: IEEE International Conference on Solid Dielectrics (ICSD), 2013, 121-124 s.

- [21] HADDAD, A. a WARNE D.F. *Advances in High Voltage Engineering*. London: The Institution of Engineering and Technology, 2004, ISBN-13: 978-1849190381, 668 s. Dostupné také z: [http://www.nge.com.pk/courses/hve\\_2010/Advances%20in%20High%20Voltage%20Engineering%20\(IET\).pdf](http://www.nge.com.pk/courses/hve_2010/Advances%20in%20High%20Voltage%20Engineering%20(IET).pdf)
- [22] HAEMA, J. *A prediction technique of power transformer condition assessment via DGA parameters*. IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2013, 3-6 s.
- [23] ČSN EN 60599 ed.2. *Elektrická zařízení v provozu plněná minerálním olejem - Návod pro interpretaci výsledků analýz rozpuštěných a volných plynů*.
- [24] PASLAVSKÝ, B. *Měřicí metody částečných výbojů*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2008, ISBN: 978-80-7043-703-2, 59-62 s.
- [25] Power Diagnostix - Manual. *Power Diagnostix Systems*. Dostupné také z: <https://www.pdix.com/downloads/manuals.html>
- [26] ČSN 34 5608 (345608) N: *Zkoušení elektrotechnických výrobků*, Praha: Vydavatelství norem, 1991. Dostupné také z: <http://csnonline.agentura-cas.cz/>
- [27] HIGHVOLT, Dostupné také z: [https://www.highvolt.de/en/desktopdefault.aspx/tabid-1300/1501\\_read-3802/](https://www.highvolt.de/en/desktopdefault.aspx/tabid-1300/1501_read-3802/)
- [28] HIGHVOLT, Dostupné také z: <https://www.highvolt.de/portaldata/1/Resources/HV/Downloads/4-0-4.pdf>
- [29] HIGHVOLT, Dostupné také z: <https://www.highvolt.de/portaldata/1/Resources/HV/Downloads/5-56-6.pdf>
- [30] ČERNÁ, K. Diplomová práce. *Charakteristiky koróny na vysokonapěťových zařízeních*. 2015. Dostupné také z: [https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/11025/18790/1/DP\\_Cerna\\_2015.pdf](https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/11025/18790/1/DP_Cerna_2015.pdf)

## Přílohy

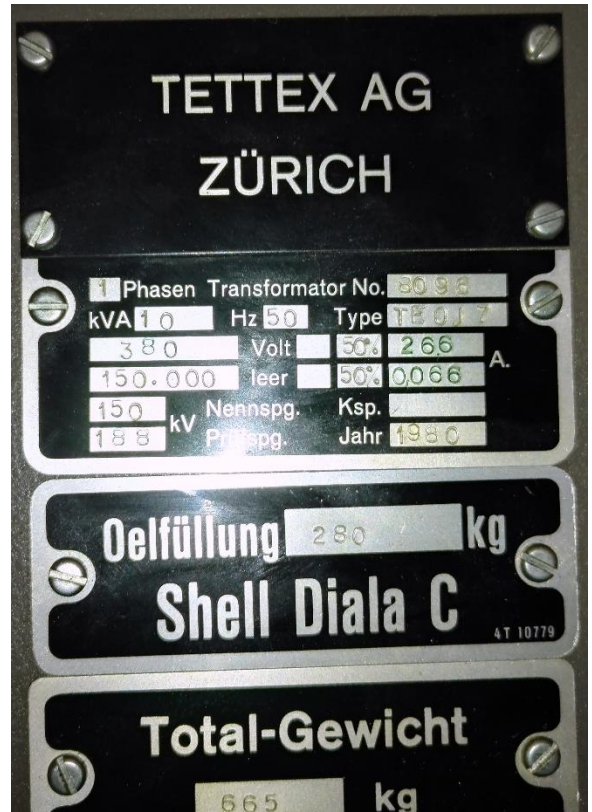
### Příloha A – Technické parametry měřicího přístroje ICMsystem

Mains supply:	85–265 V <sub>AC</sub> , 47–63 Hz	(automatic)
Line fuse:	1.6 A	(time-lag)
Power requirements:	Approx. 75 VA	
Input impedance (PD):	50 Ω	(AMP IN)
Input sensitivity:	< 200 μV	(RPA1-Input)
< 2 mV	(AMP IN)	
Lower cut-off (-6 dB):	40, 80 or 100 kHz	(software controlled)
Upper cut-off (-6 dB):	250, 600 or 800 kHz	(software controlled)
External synchronization:	Line, 8 channels external (multiplexed), TTL	
Frequency range (sync.):	15 Hz–500 Hz	(external sync. MUX)
0.1–500 Hz	(TTL)	
Voltage range:	Max. 100 V <sub>rms</sub> or ±200 V <sub>peak</sub> into 1 MΩ // 200 pF	
Operation temperature:	10–40°C	(non-condensing)
Size:	236 x 133 x 300 mm <sup>3</sup>	(ICMsystem)
(W x H x D, excl. BNC-conn.)	450 x 133 x 300 mm <sup>3</sup>	(ICMsys4/ICMsys8)
Weight:	Approx. 6.9 kg	(ICMsystem)
	Approx. 9 kg	(ICMsys4/ICMsys8)

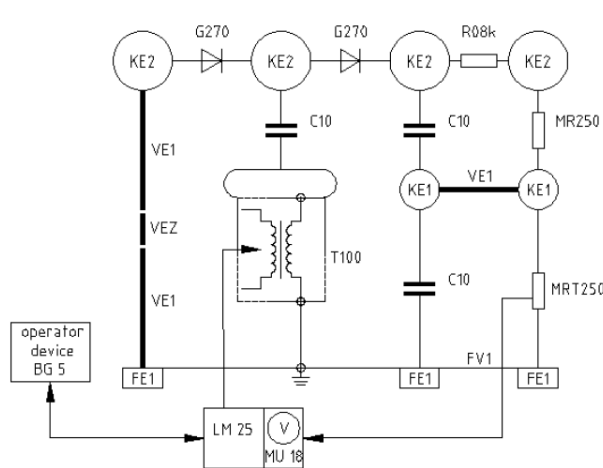
**Příloha B – Štítkové hodnoty transformátoru ČKD Stalingrad**



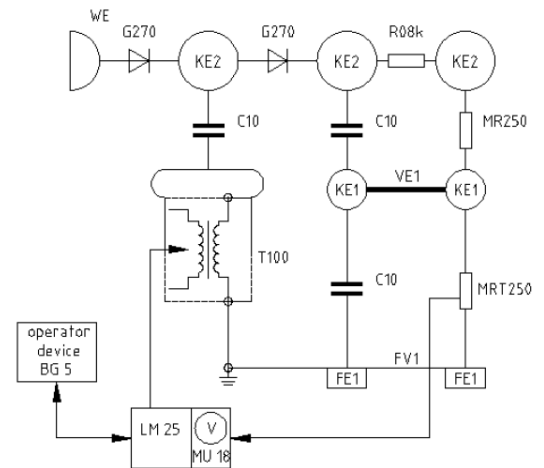
### Příloha C – Transformátor Tettex, štitkové hodnoty



**Příloha D – Uspořádání modulárního systému GBS 13/270, katalogové údaje**



**GBS 13/270 V1**



**GBS 13/270 V2**

**Technical Data:**

Type code	Rated voltage neg./pos. kV	Rated current (continuous) mA	PD-Intensity
			pC
GBS 26/135	135/135	26	≤ 2
GBS 26/135 TE <sup>1)</sup>	135/135	26	≤ 2
<b>GBS 13/270 V1</b>	270/270	13	
GBS 13/270 V2	270/270	13	
GBS 10/350	350/300	10	

General climatic conditions: temperature 5 to 40°C, relative humidity ≤ 90 % at altitude ≤ 1000 m, indoor operation

## Number of Modules for Standard Type:

Module		Data sheet	GBS				
			26/135	26/135TE	13/270 V1	13/270 V2	10/350
Basic Control including Operator device (BG 5M)	BC 5M	1.52 4.23	1	1	1	1	1
Power module including Peak voltmeter (MU18)	LM 25	4.26	1	1	1	1	1
Test transformer	T 100	4.5	1	1	1	1	1
Capacitor	C 10	4.6	1	2	3	3	5
Rectifier	G 270	4.7	1	1	2	2	2
	G 270 K	4.7					1
Resistor	R 08	4.8					
	R 08 K	4.8			1	1	2
	R 106	4.8	1	1			
Measuring resistor	MR 250	4.8			1	1	2
Resistive divider	MRT 250	4.8	1	1	1	1	1
Connecting element	VE 1	4.9	1	1	3	1	3
	VEZ	4.9			1		
Insulating element	IE 1	4.9					8
	IE 1K	4.9					1
Junction element	KE 1	4.10	2	3	2	2	8
	KE 2	4.10			4	3	4
Base element	FE 1	4.10	2	3	3	2	4
Base connecting element	FV 1	4.10	1	2	1	1	4
Wall element	WE	4.10				1	
Measuring connection	M 1	4.27		1			
Discharging rod	ES 1	4.11	1	1	1	1	1
	ERS 1	4.11	1	1			
	ERS 2	4.11			1	1	1

## Options:

Breakdown detection unit	BDC 1	1.57	
Secondary current measurement	MI 11 G	2.58	
Manual control and power module	SG 25	4.24	alternative to basic control (BC 5M) and power module (LM 25)
Peak voltmeter	MU 17	5.56	in version with SG 25 or at separate order
Computer control	CMS 22M	1.52	IPC and BG 6
	CMS 23M	1.52	Advanced computer control (IPC and BG 5M)
Operator Rack	OR 130 OR 170	7.31	for housing of operator device, IPC and measuring devices delivered as plug in unit
Discharging device	ERE 150	4.11	at separate order
Storage trolley	LW	4.10	

1) The PD-measuring device must be ordered separately.

For further information please contact:

or our local representative:

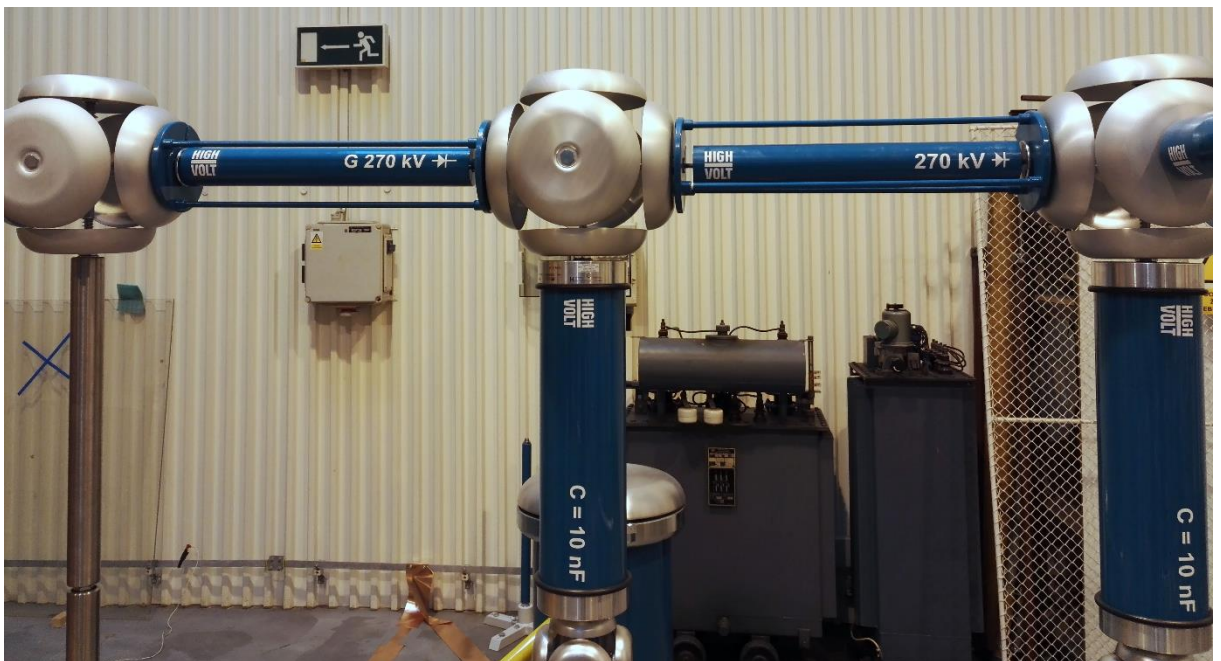
**HIGHVOLT Prüftechnik Dresden GmbH**  
Marie-Curie-Strasse 10  
D-01139 Dresden / Germany

Tel. +49 351 8425 648  
Fax +49 351 8425 679  
e-mail [dresden@highvolt.de](mailto:dresden@highvolt.de)  
webseite <http://www.highvolt.de>

## Příloha E – Orientace vysokonapěťových usměrňovačů G 270



Obr. P. 1.1 Orientace vysokonapěťových usměrňovačů G 270 – Negativní DC napětí



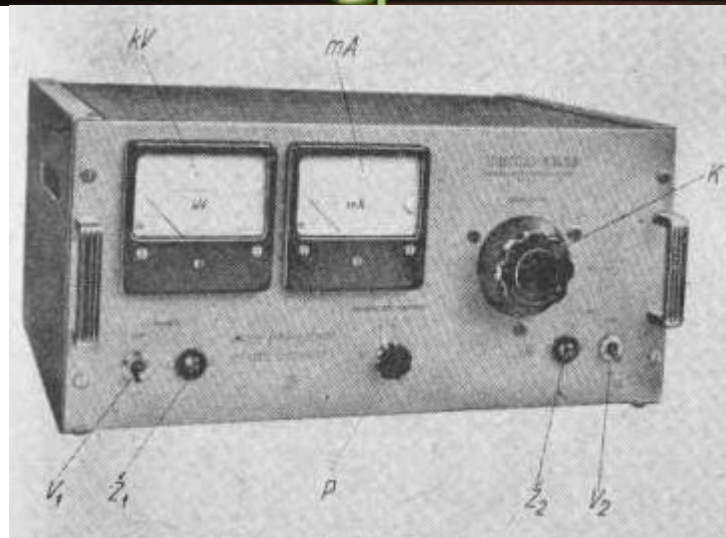
Obr. P. 1.2 Orientace vysokonapěťových usměrňovačů G 270 – Pozitivní DC napětí



**Příloha F – Specifikace zdroje vysokého napětí Tesla BS 222a**

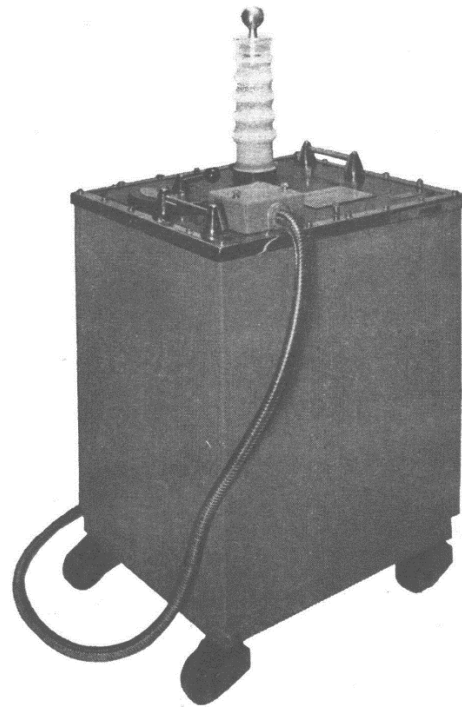
<b>Stejnoseměrné napětí:</b>	Plynule nastavitelné od 115 V do 50 kV
<b>Zatěžovací proud:</b>	Přibližně 2 mA trvale
<b>Zvlnění:</b>	< 1 %
<b>Přesnost měření napětí a proudu:</b>	Přibližně $\pm 3$ %
<b>Napájení:</b>	Ze sítě 220 V, 50 Hz, příkon 320 W
<b>Váha:</b>	Zdroj přibližně 140 kg Ovládací jednotka přibližně 20 kg
<b>Rozměry:</b>	Zdroj – 910x460x440 mm Ovládací jednotka – 230x490x410 mm

Tento zdroj se skládá ze dvou samostatných přístrojů, které jsou spojeny kabelem v pancéřové hadici – z ovládací jednotky (Obr. P. 1.3) a vlastního zdroje vysokého napětí (Obr. P. 1.4). Ovládací jednotka umožňuje dálkové ovládání zdroje VN, jelikož z bezpečnostních důvodů není dovoleno, aby se obsluhující personál pohyboval blízko obvodu pracujícím na vysokém napětí. Na předním panelu této jednotky jsou umístěna ručková měřidla – voltmetr se stupnicí, která je cejchována v kilovoltech (jeden dílek odpovídá 2 kV) a miliampérmetr se stupnicí do 5 mA. Osahuje také knoflík K od regulačního transformátoru, sloužícího k plynulému řízení vysokého napětí, dále přepínač polarity měřidel P, vypínače  $V_1$ ,  $V_2$  a kontrolní žárovky  $\check{Z}_1$  a  $\check{Z}_2$ .



Obr. P. 1.3 Ovládací jednotka zdroje vysokého napětí Tesla BS 222a

Vlastní zdroj je tvořen jednocestným usměřovačem s vakuovou usměřovací diodou pro vysoké napětí, obsahuje také dva síťové transformátory. První je transformátor VN a druhý transformátor slouží ke žhavení usměřovací diody, jenž se zapíná přímo na síť prostřednictvím vypínače  $V_1$ , což je indikováno oranžovou žárovkou  $Z_1$ . Transformátor VN je připojený přes regulační autotransformátor umístěný v ovládací jednotce, což umožňuje řídit napětí na primární straně transformátoru VN a lze tak plynule regulovat vysoké stejnosměrné napětí. Ve zdroji je použit svitkový kondenzátor s kapacitou 18000 pF, sloužící k vyhlazení usměrněného proudu.



Obr. P. 1.4 Vlastní zdroj vysokého napětí Tesla BS 222a

Vlastní zdroj je zamontovaný v tlustostěnné ocelové pojízdné nádobě, která je naplněná transformátorovým olejem s velkou elektrickou pevností. Víko této nádoby je tvořeno tlustou deskou vyrobenou z tvrzeného papíru, jelikož nese celou vnitřní konstrukci. Na vnější straně víka jsou namontovány: vývod vysokého napětí A, přepínač polarity M, kabelová přípojka Ka, přetlakový ventil Ve, svorka připojená ke kostře G a dvě rukojeti.

Jelikož je zdroj určen pro zkoušky elektrické pevnosti, kde nutně dochází ke zkratům, je tento přístroj konstruován tak, aby jej často opakované zkraty nezničily. Do stejnosměrného obvodu je zařazený relátkový systém, který při překročení zatěžovacího proudu o velikosti 2,5 mA vypne síť. K novému zapnutí je pak potřeba vypnout síťový vypínač  $V_2$  do polohy „vypnuto“ a knoflík regulačního transformátoru K otočit do nuly (poloha zcela doleva), poté opět zapnout vypínač  $V_2$ , teprve pak se transformátor vysokého napětí znovu připojí k síti. Stejným způsobem má být postupováno, pokud z nějakého jiného důvodu vypne zdroj z provozu (např. protože byla na chvíli přerušena dodávka proudu do sítě). Pomocí přepínače polarity M je možné přepínat polaritu výstupního napětí tak, že je na kostru zapojen kladný nebo záporný pól, přičemž přepínání je dovoleno pouze ve vypnutém stavu.

Pro uvedení zdroje do provozu je potřeba spojit ovládací jednotku kabelem v pancéřové hadici s vlastním zdrojem a důkladně na zadní stěně pomocí uzemňovací svorky uzemnit.

Zkoušený objekt se připojuje mezi kuličku vývodu vysokého napětí A a svorku umístěnou na víku G. Poté je potřeba se přesvědčit, zda je knoflík regulačního transformátoru K vytočen na doraz doleva a zda jsou vypínače  $V_1$  a  $V_2$  umístěny v poloze „vypnuto“. Pokud je vše v pořádku, lze nyní připojit ovládací jednotku k síti prostřednictvím šňůry FLEXO. Pomocí vypínače  $V_1$  se poté zapne žhavení usměrňovací diody ve zdroji a po přibližně 3 – 5 vteřinách se prostřednictvím vypínače  $V_2$  zapne transformátor VN. Pomalým otáčením knoflíku K doprava se pozvolna zvyšuje vysoké napětí na požadovanou hodnotu. Velikost výstupního napětí udává měřidlo kV a stejnosměrný proud v miliampérech měřidlo mA.

Jelikož je ve zdroji obsažen kondenzátor, je nutné po každém dílčím použití zdroje tento kondenzátor vybit umělým zkratkem, a to prostřednictvím vybíjecí tyče z izolačního materiálu (tvrzený papír, novodur), která je nejméně 1 m dlouhá a na svém konci opatřená hrotem nebo kovovou kuličkou. Tento konec je potřeba spojit měkkým vodičem se svorkou G a dotknout se jí kovové kuličky A, umístěné na vývodu vysokého napětí.

**Příloha G – Realizace experimentů v prostoru vysokonapěťové laboratoře KEE  
Západočeské Univerzity v Plzni**



*Obr. P. 1.5 Prostor vysokonapěťové laboratoře KEE ZČU v Plzni*



*Obr. P. 1.6 Fotografie zapojení pro měření částečných výbojů na AC napětí, zdroj: Transformátor ČKD*

## Příloha H – AC/DC Peak Voltmeter MU17, katalogové údaje



2.3 1 AC/DC peak voltmeter MU 17G

HG 32

The peak voltmeter MU 17G is designed as stand-alone device. It is used for all measurements of AC and DC voltages especially in HVAC and HVDC test systems in connection with HV dividers.

The measured values are directly displayed. Furthermore, the waveform is shown on this graphic display for one period and normalized on the maximum peak value.

Advantageous for practical measurements is the immediate storage of the latest value in case of a disruptive discharge at the test object.

The AC/DC peak voltmeter is in accordance with the related international standard IEC 60060-2.

It measures:

- peak value; in both polarities
- peak value /  $\sqrt{2}$ ; in both polarities
- peak average
- arithmetic mean value
- RMS
- peak factor /  $\sqrt{2}$
- ripple amplitude
- frequency

Technical Specification: DC extension - GZ 13/270  
 Order No.: 525854-02  
 Customer: FEL Events, z. s.  
 Page: 9 / 16

**HIGH  
VOLT**

The peak voltmeter is calibrated according to IEC 60060-2 by the HIGHVOLT Calibration Laboratory D-K-19153-01-00, accredited by the German Accreditation Service DAkkS. A respective DAkkS calibration certificate is issued. The certificate documents the traceability to national standards, which realize the units of measurements according to the International System of Units (SI).

**Main parameters:**

Input voltage	V	0 ... ±1000
Input impedance	MΩ  pF	10  50
Frequency range	Hz	10 ... 500 and DC
Measuring uncertainty	%	≤ 0.5
Temperature range	°C	5 ... 40
Relative humidity	%	10 ... 80
Input connector		coaxial, type N
Scale factor		typical 1...20000; possible 1...9.999E09
Interface		Profibus-DP, V.24
Power supply		230 V, 50/60 Hz, approx. 20 VA
Plug		
connection cable		type CEE 7
Dimensions (approx.)		
Width	mm	186
Height	mm	205
Length	mm	330
Weight (approx.)	kg	5.5

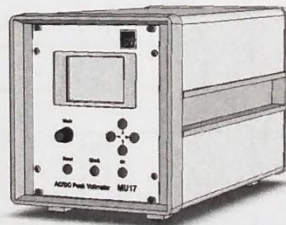


Fig. 10 Schematic sketch of MU 17G



## Příloha I – Digitální voltmetr METRA Hit 18S, specifikace



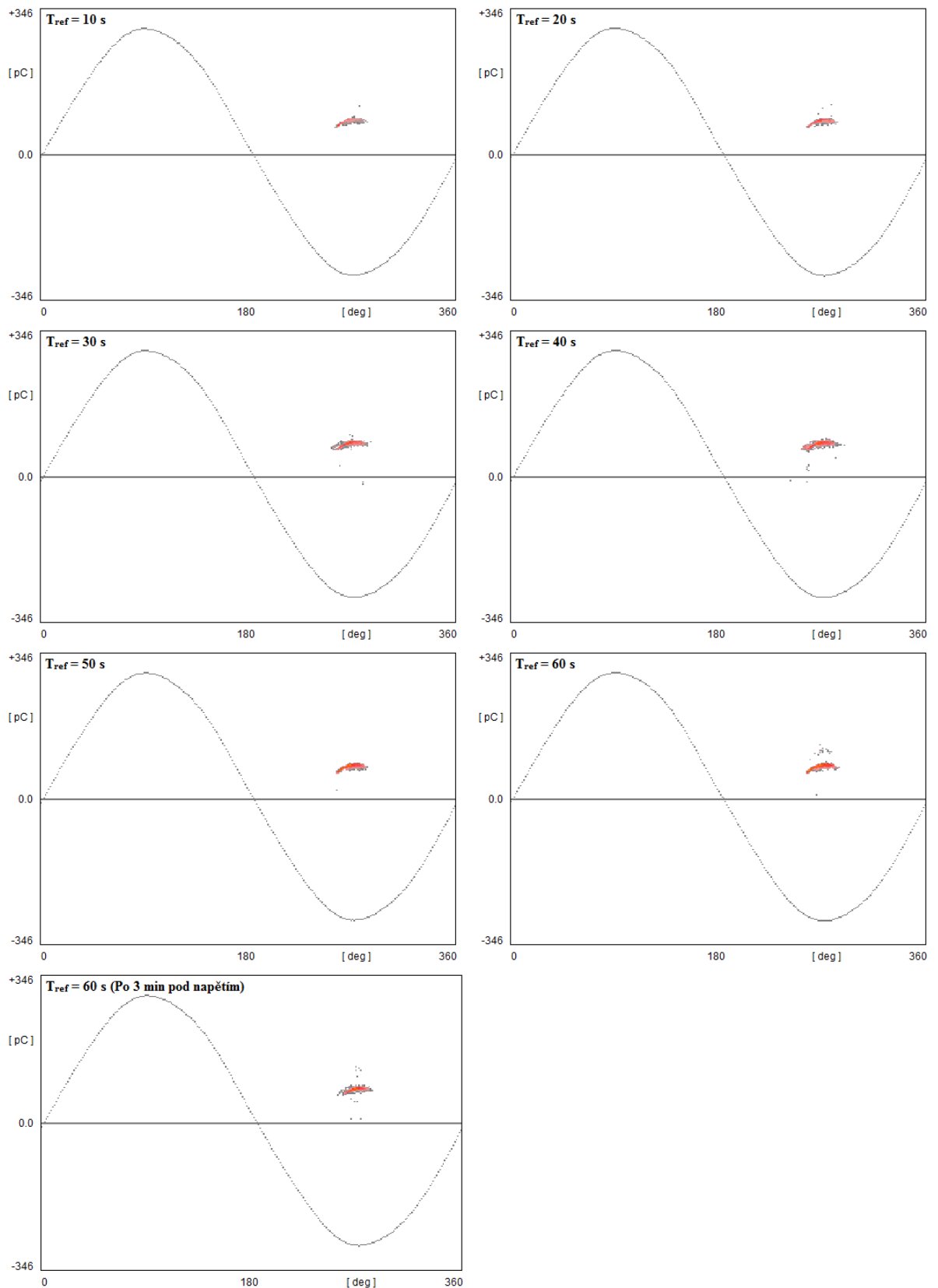
<b>Základní přesnost:</b>	0.05%
<b>DC napětí:</b>	300.00mV až 1000.0V
<b>AC napětí:</b>	300mV až 1000V
<b>DC proud:</b>	300mA až 10A
<b>AC proud:</b>	300mA až 10A
<b>Odpor:</b>	300Ω až 30MΩ
<b>Kapacita:</b>	3nF až 10000mF
<b>Frekvence:</b>	300Hz až 100kHz
<b>Teplota:</b>	s Pt 100 / Pt 1000

Obsahuje také:

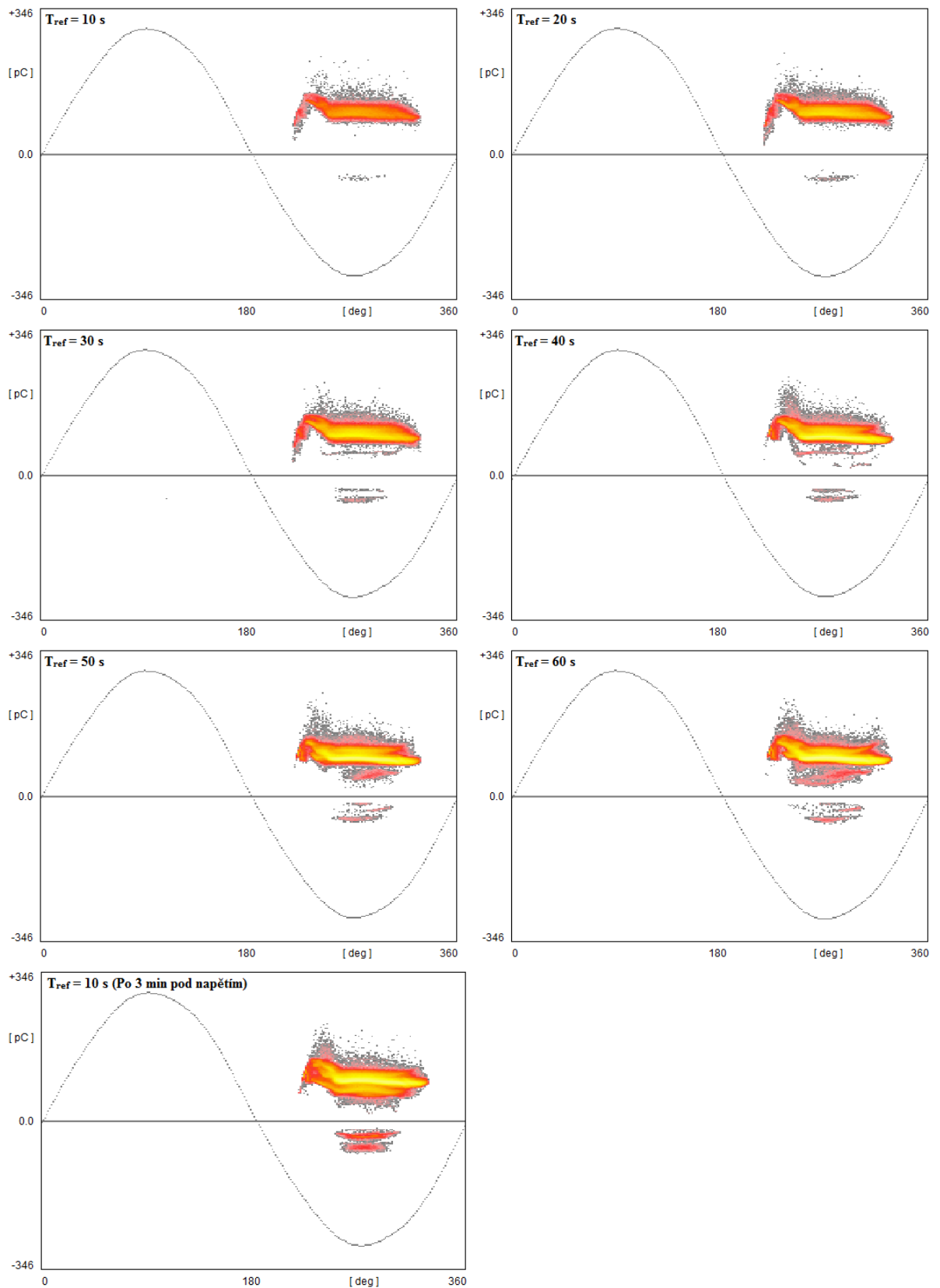
Čítač, stopky, měření dB  
 Automatické blokování svorek (ABS)  
 Ochranný kryt  
 Bar Graph  
 Auto Ranging / Manuální režim

Je volitelně připojitelný k PC přes přídatný modul  
 a RISHCOM 100 software

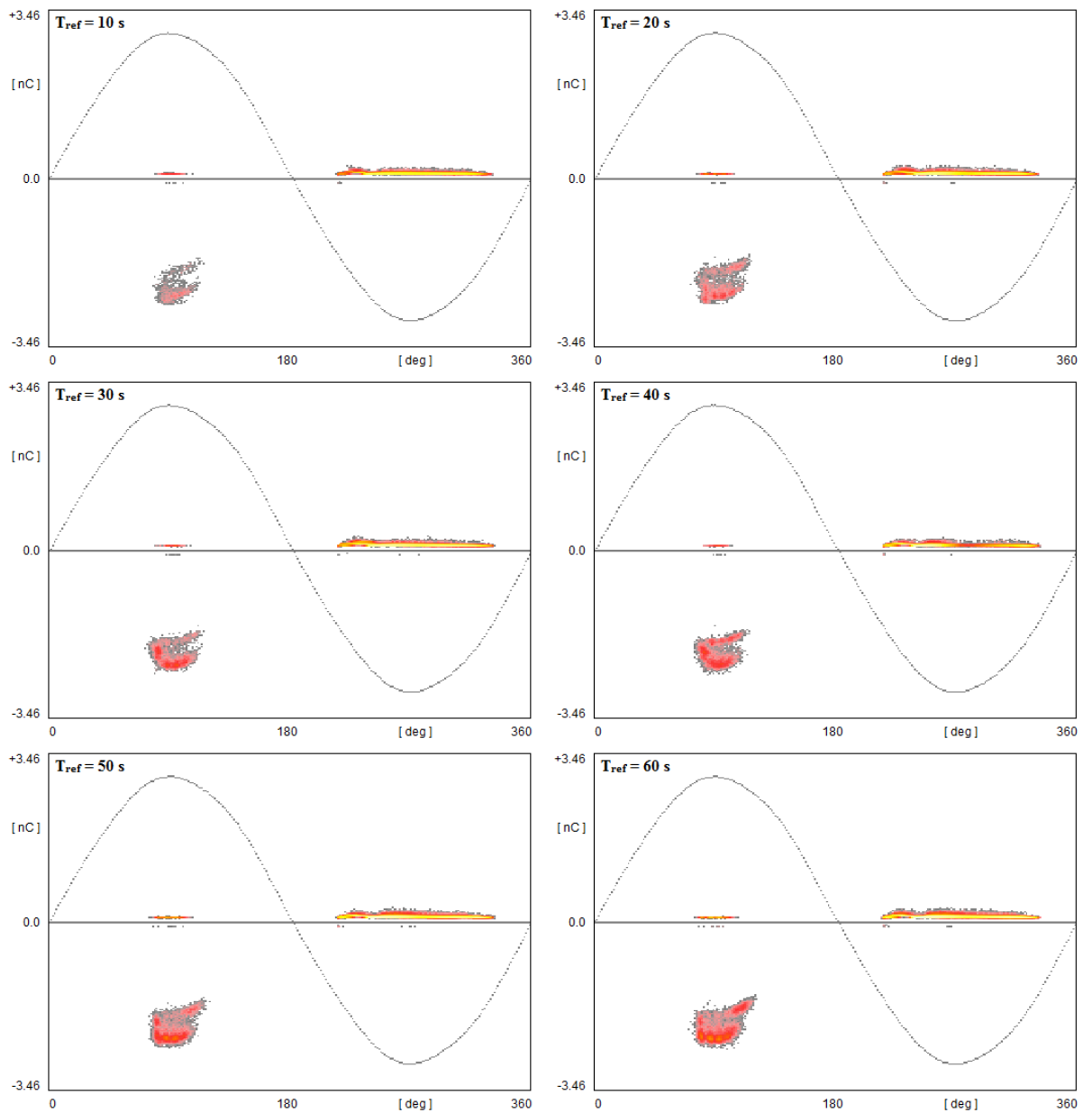
**Příloha J – Veškeré záznamy velikosti náboje na fázi pro 4,3 kV AC výboje na kalibračním jiskřišti s výskytem pouze v záporné polaritě napětí – Zdroj: Transformátor ČKD**



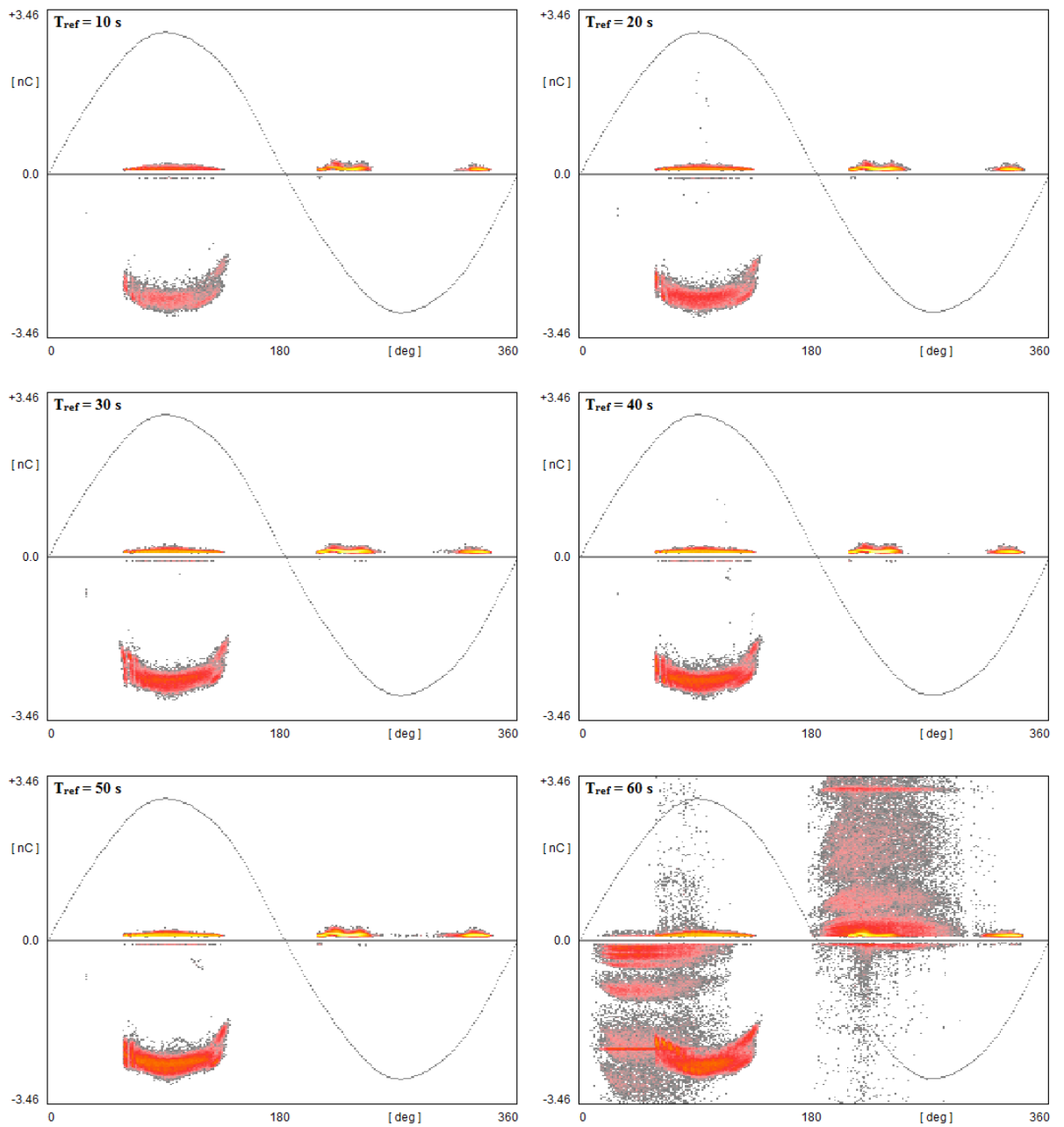
**Příloha K – Veškeré záznamy velikosti náboje na fázi pro 7,5 kV AC výboje na kalibračním jiskřišti s výskytem pouze v záporné polaritě napětí – Zdroj: Transformátor ČKD**



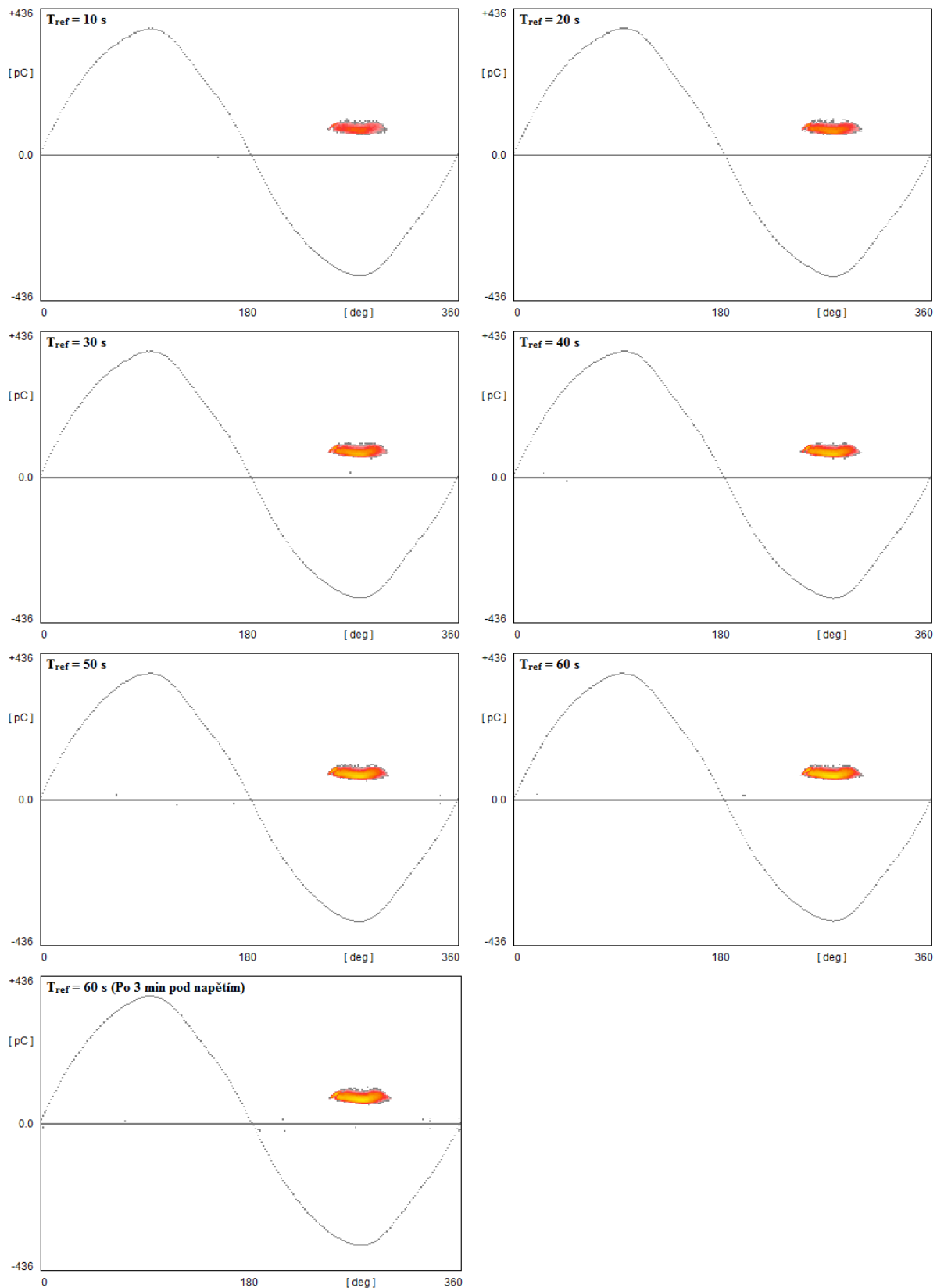
**Příloha L – Veškeré záznamy velikosti náboje na fázi pro 8,5 kV AC výboje na kalibračním jiskřišti s výskytem v obou polaritách napětí – Zdroj: Transformátor ČKD**



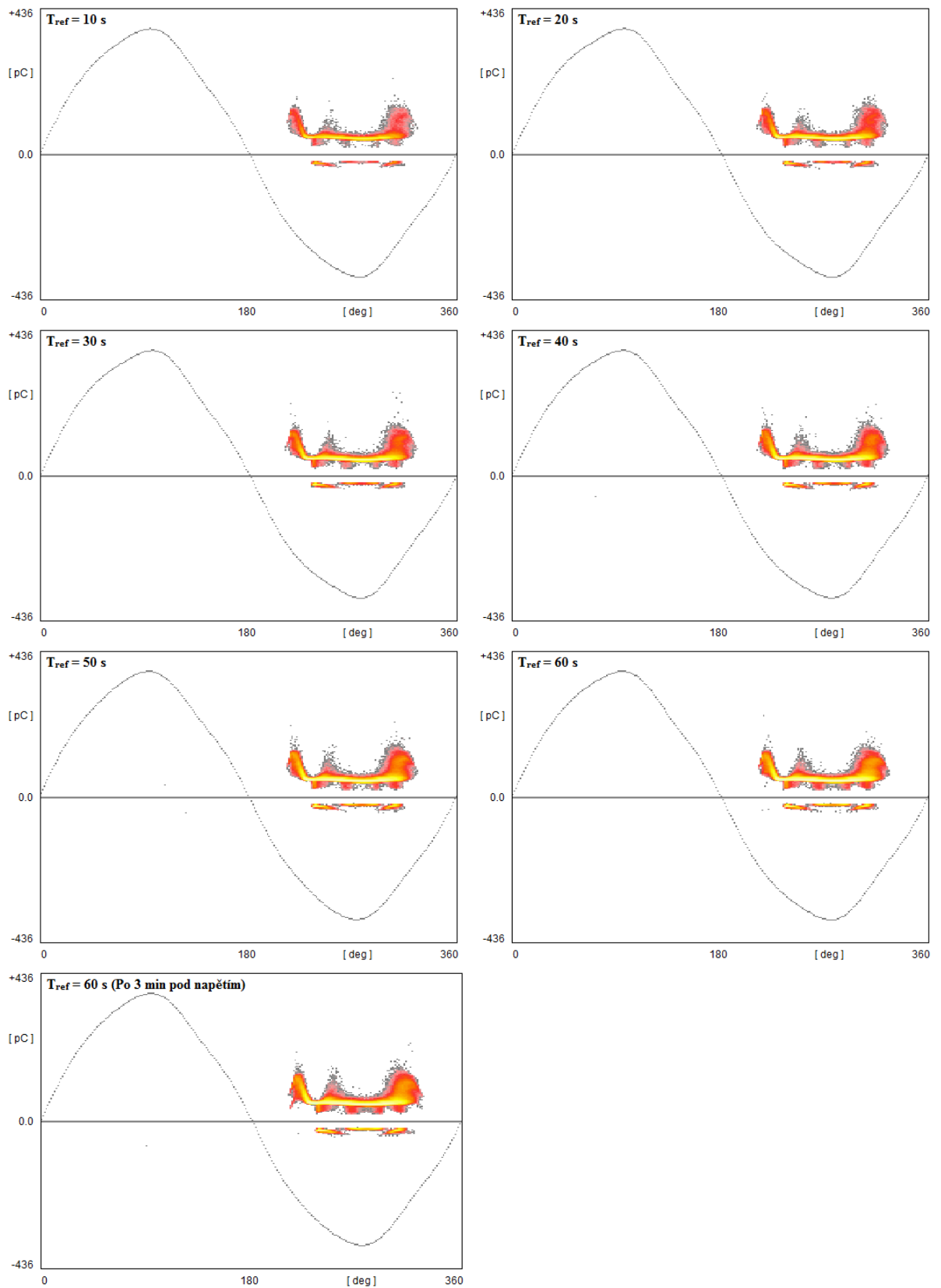
**Příloha M – Veškeré záznamy velikosti náboje na fázi pro 11,1 kV AC výboje na kalibračním jiskřišti s výskytem v obou polaritách napětí – Zdroj: Transformátor ČKD**



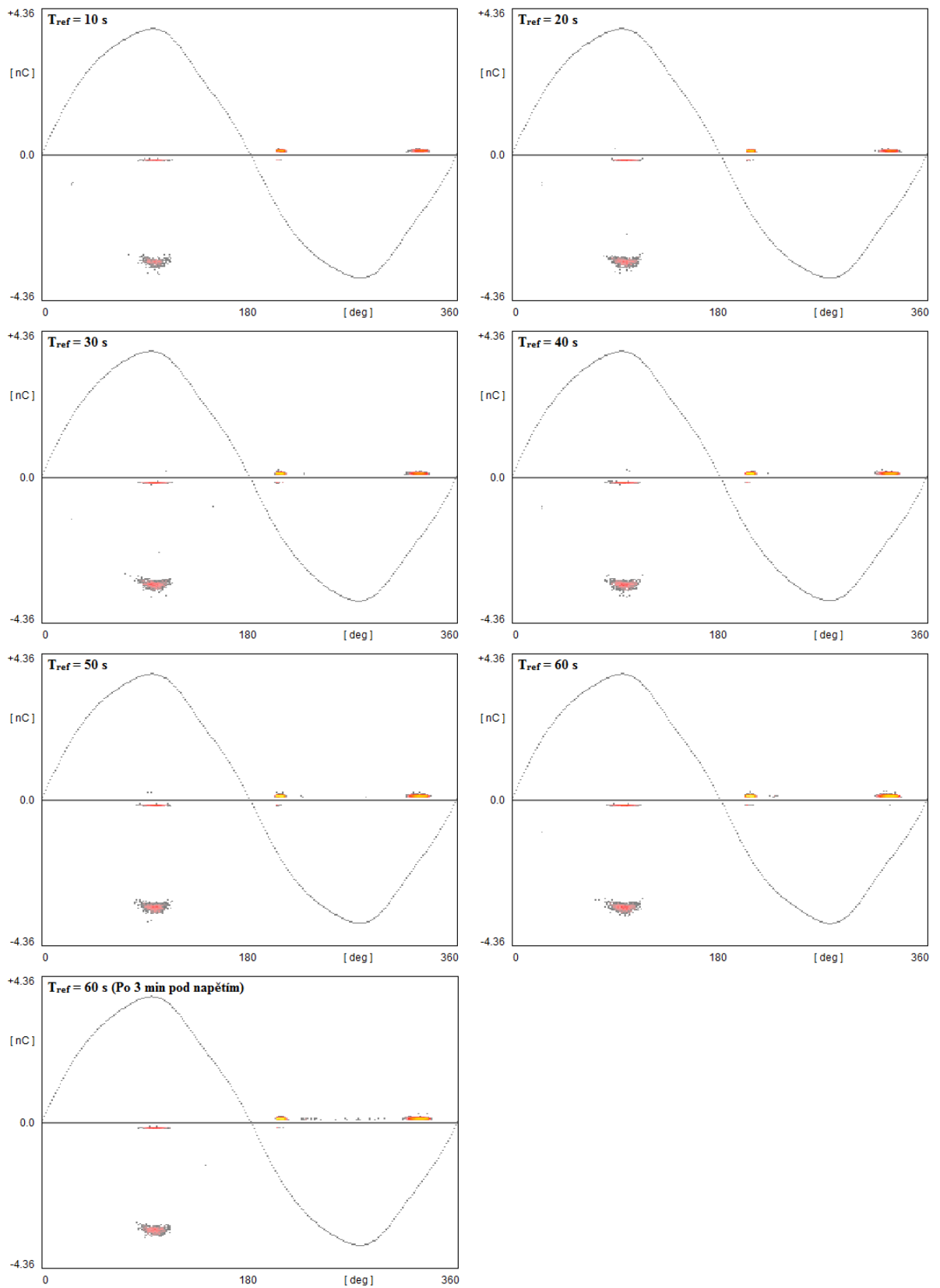
**Příloha N – Veškeré záznamy velikosti náboje na fázi pro 4,3 kV AC výboje na kalibračním jiskřišti s výskytem pouze v záporné polaritě napětí – Zdroj: Transformátor Tettex**



**Příloha O – Veškeré záznamy velikosti náboje na fázi pro 7,5 kV AC výboje na kalibračním jiskřišti s výskytem pouze v záporné polaritě napětí – Zdroj: Transformátor Tettex**



**Příloha P – Veškeré záznamy velikosti náboje na fázi pro 11,1 kV AC výboje na kalibračním jiskřišti s výskytem v obou polaritách napětí – Zdroj: Transformátor Tettex**

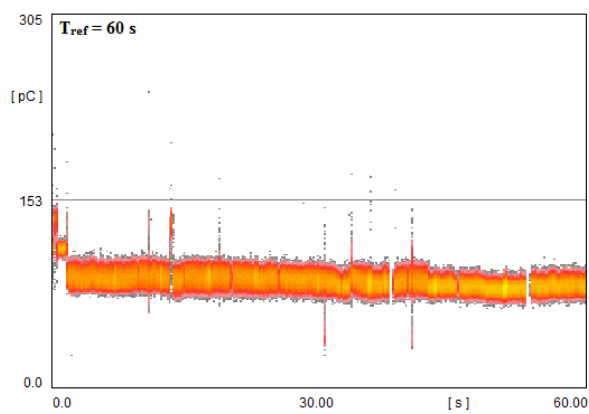
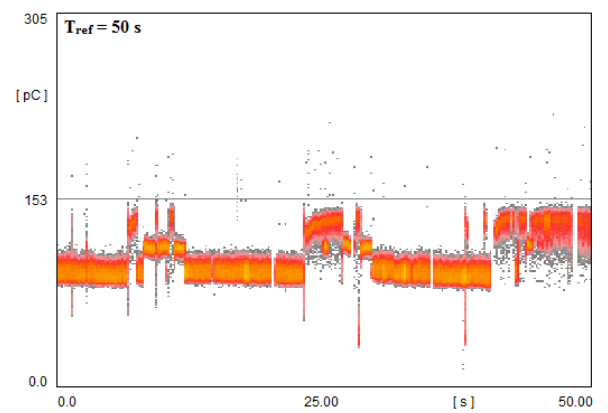
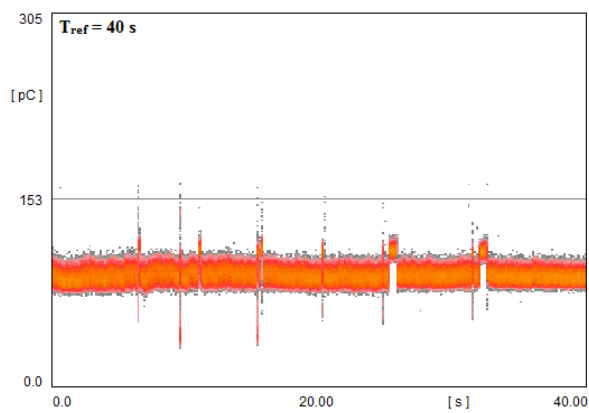
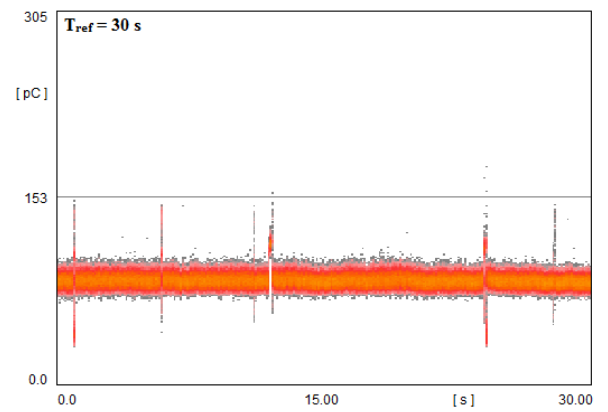
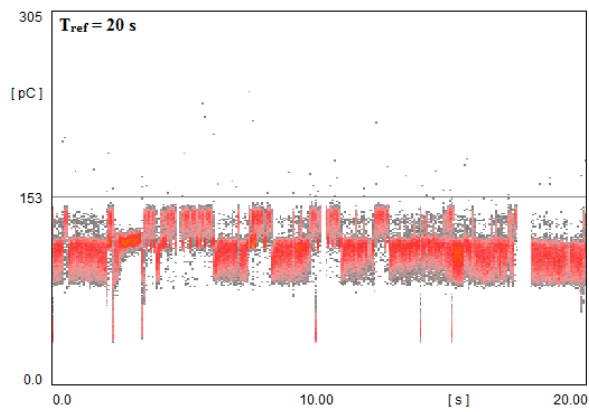




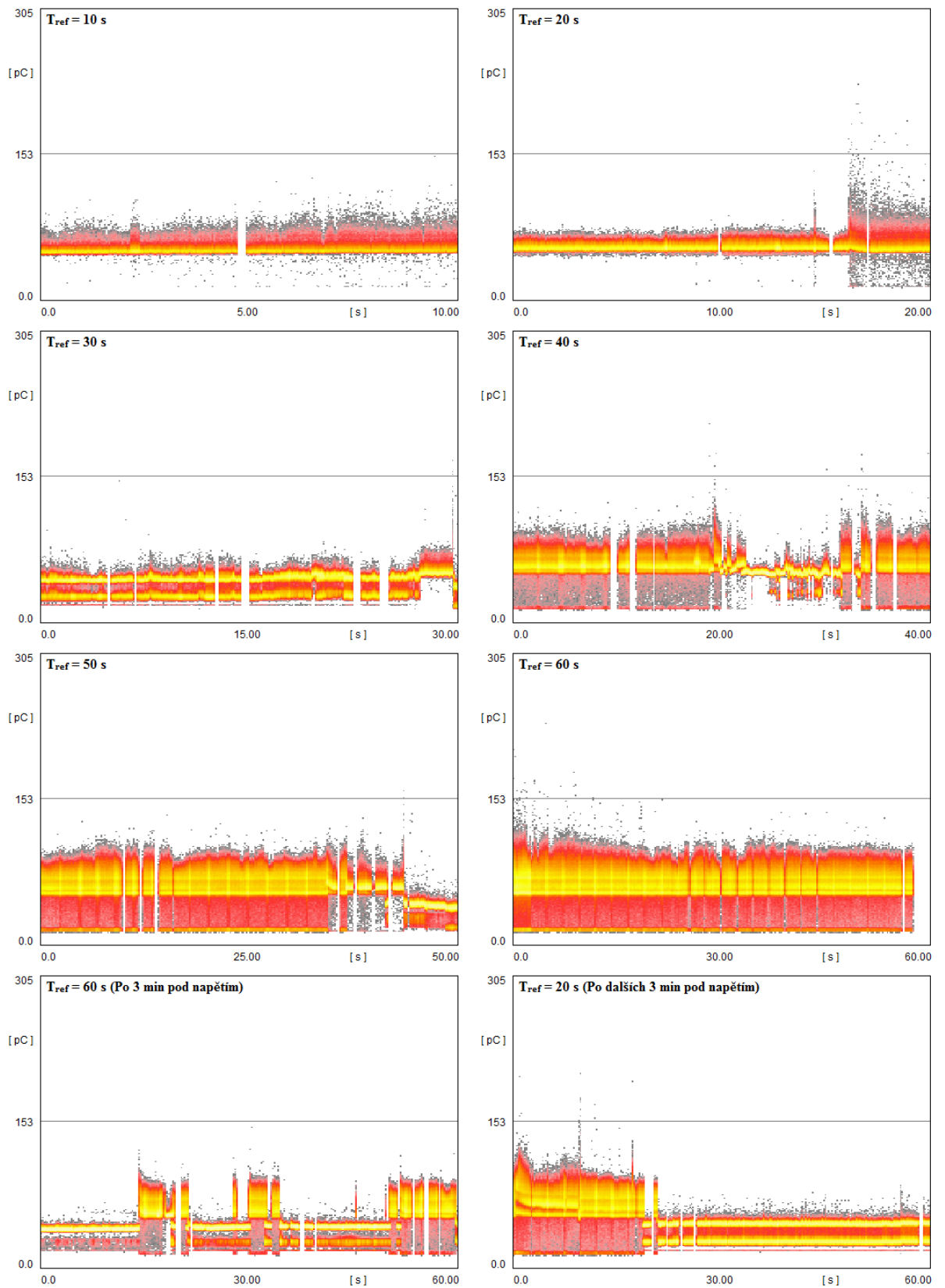
**Příloha Q – Odporový dělič použitý pro digitální voltmetr METRA Hit 18S**

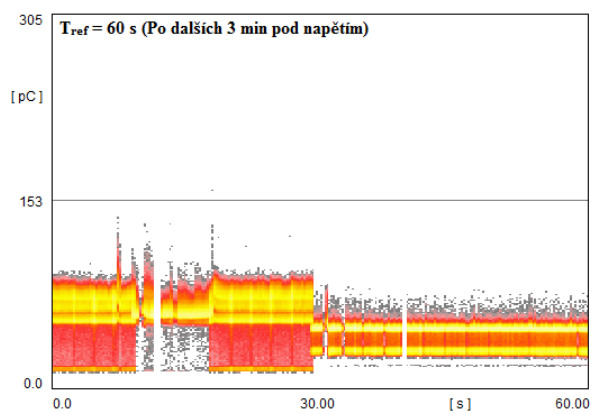


**Příloha R – Veškeré záznamy velikosti náboje v závislosti na době sběru dat pro 6,6 kV DC negativních výbojů na kalibračním jiskřišti – Zdroj: Modulární systém GBS 13/270**

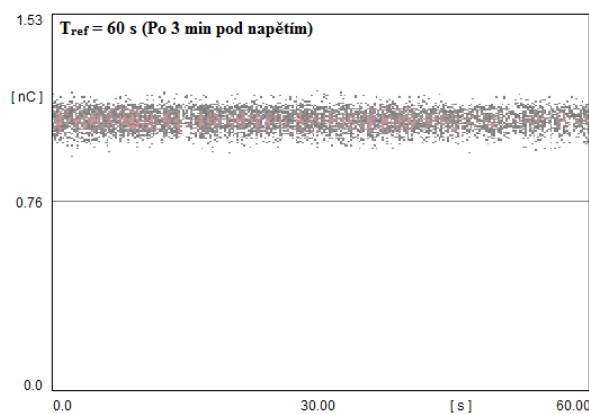
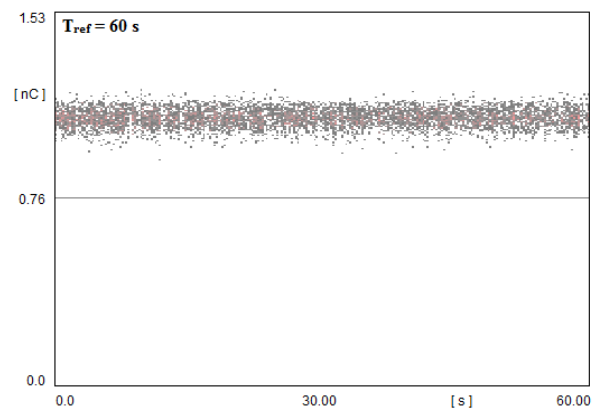
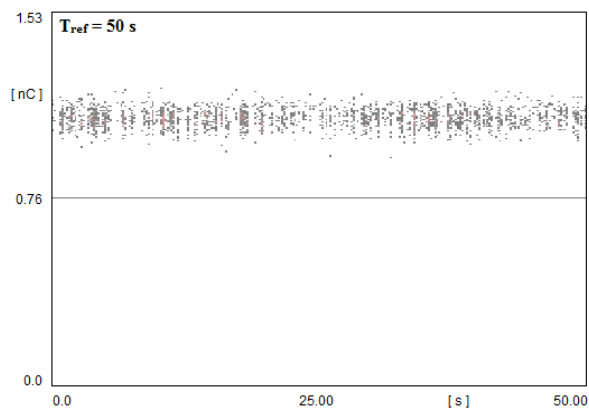
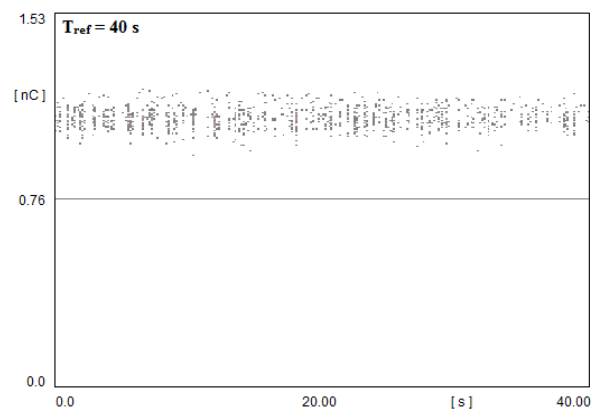
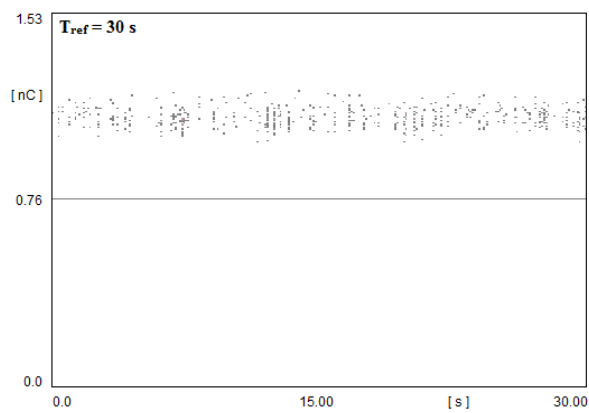
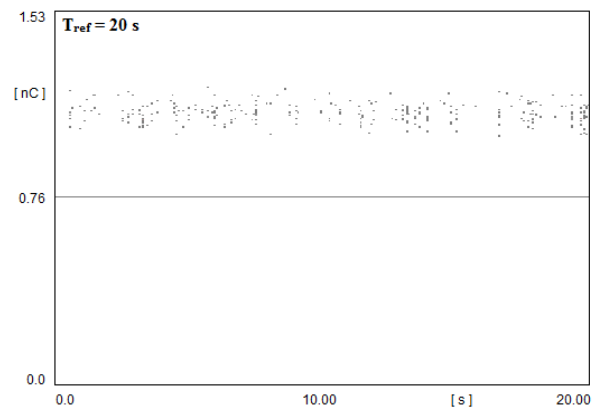
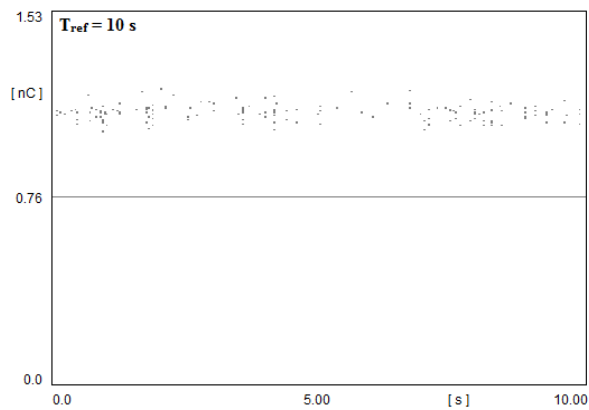


**Příloha S – Veškeré záznamy velikosti náboje v závislosti na době sběru dat pro 9,5 kV DC negativních výbojů na kalibračním jiskřišti – Zdroj: Modulární systém GBS 13/270**

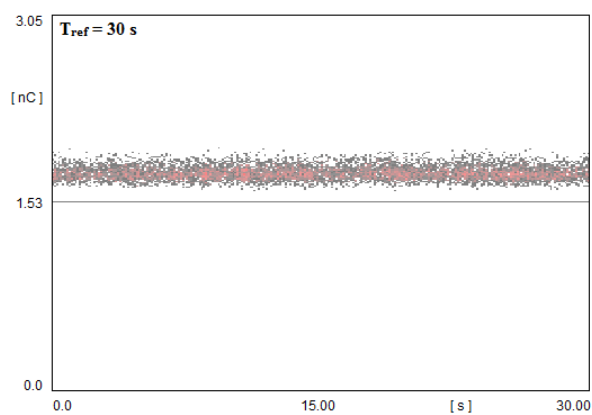
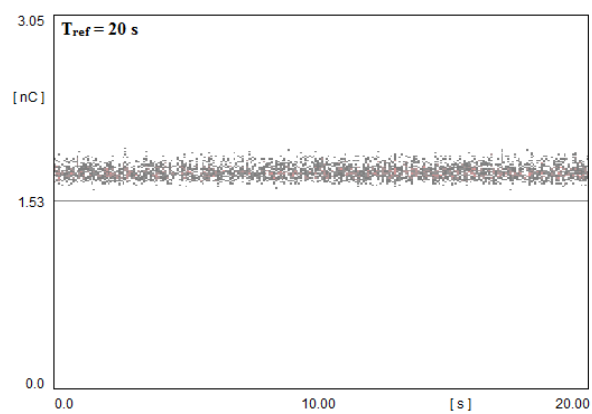
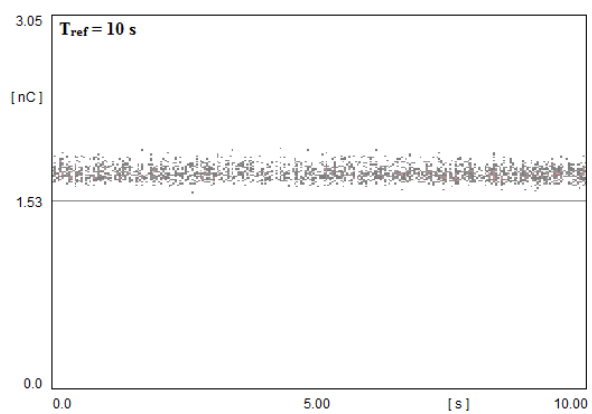




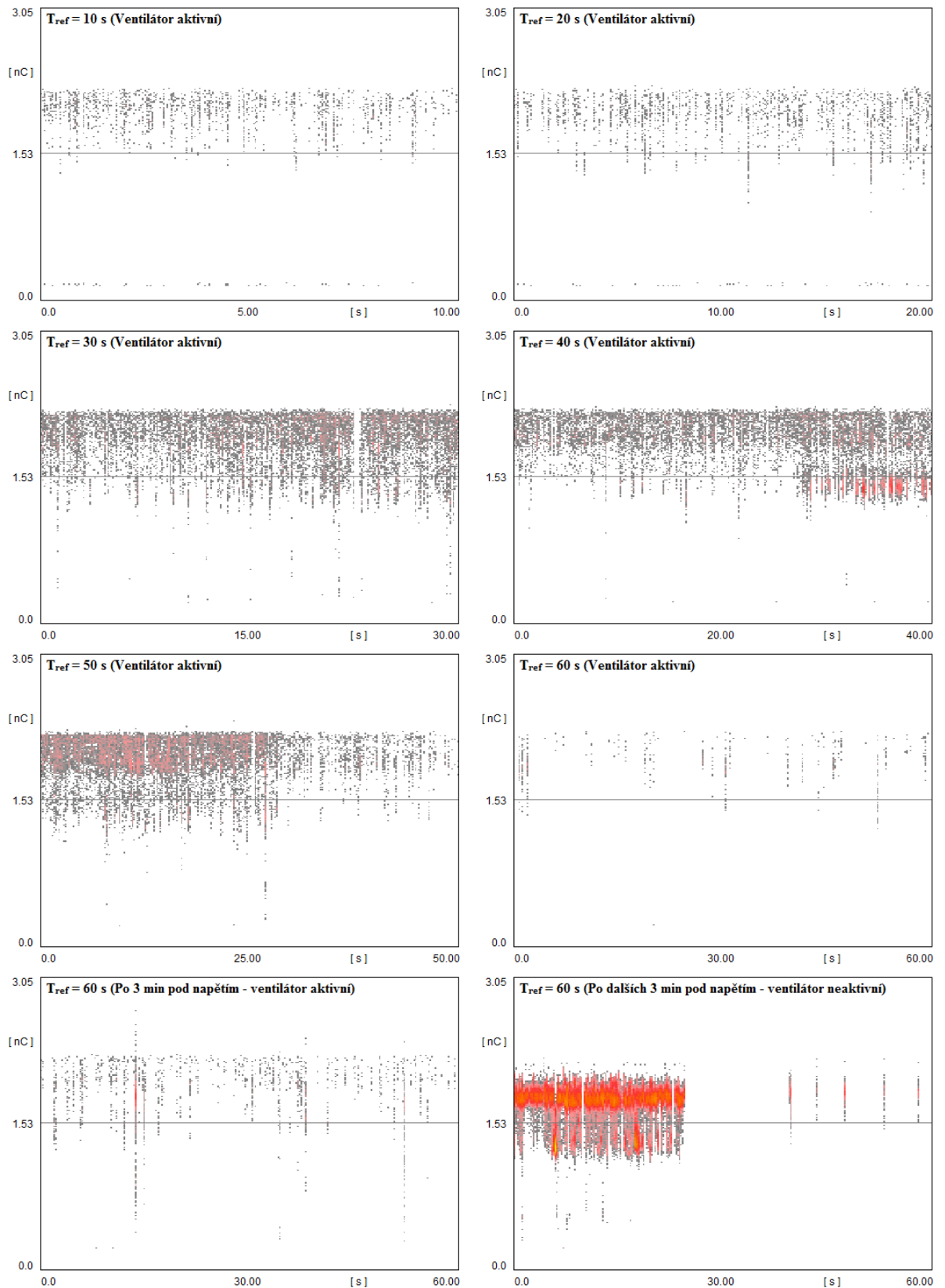
**Příloha T – Veškeré záznamy velikosti náboje v závislosti na době sběru dat pro 7,2 kV DC pozitivních výbojů na kalibračním jiskřišti – Zdroj: Modulární systém GBS 13/270**

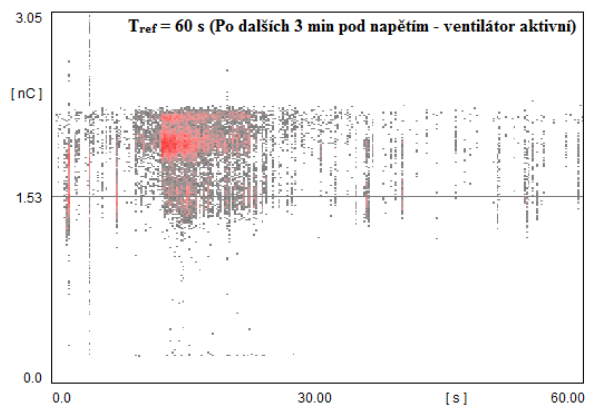


**Příloha U – Veškeré záznamy velikosti náboje v závislosti na době sběru dat pro 12,5 kV DC pozitivních výbojů na kalibračním jiskřišti – Zdroj: Modulární systém GBS 13/270**



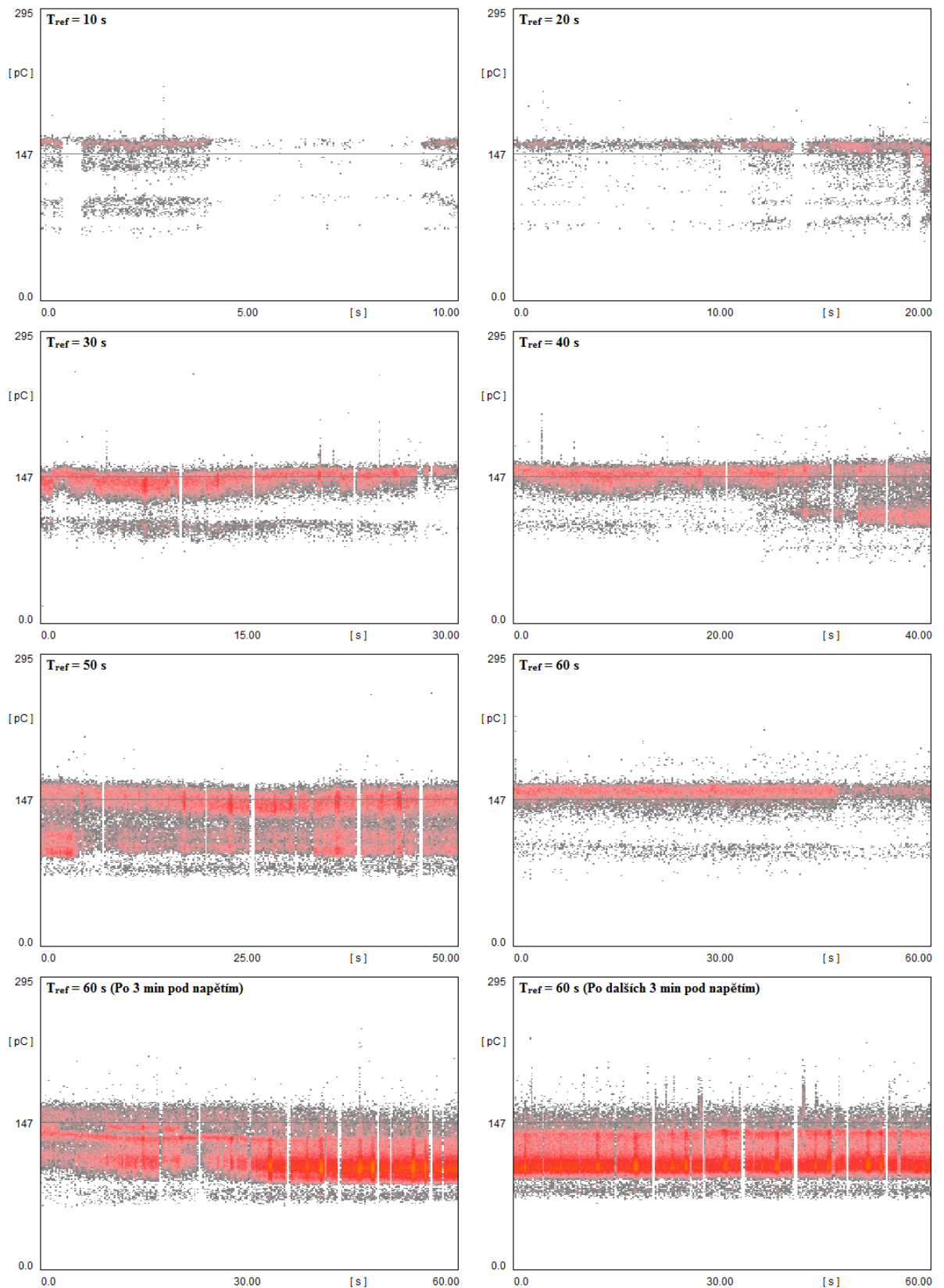
**Příloha V – Veškeré záznamy velikosti náboje v závislosti na době sběru dat pro 13,9 kV DC pozitivních výbojů na kalibračním jiskřišti za použití vnějšího ofukování ventilátorem – Zdroj: Modulární systém GBS 13/270**

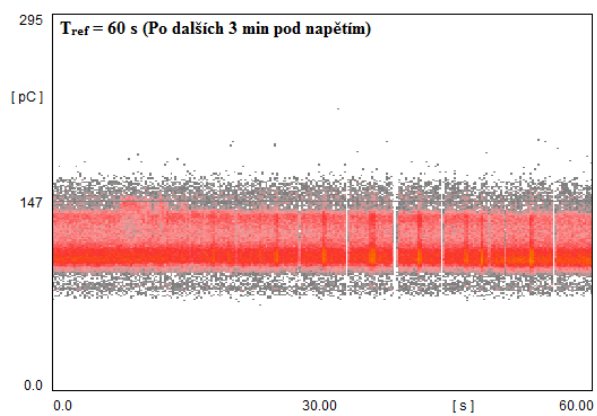




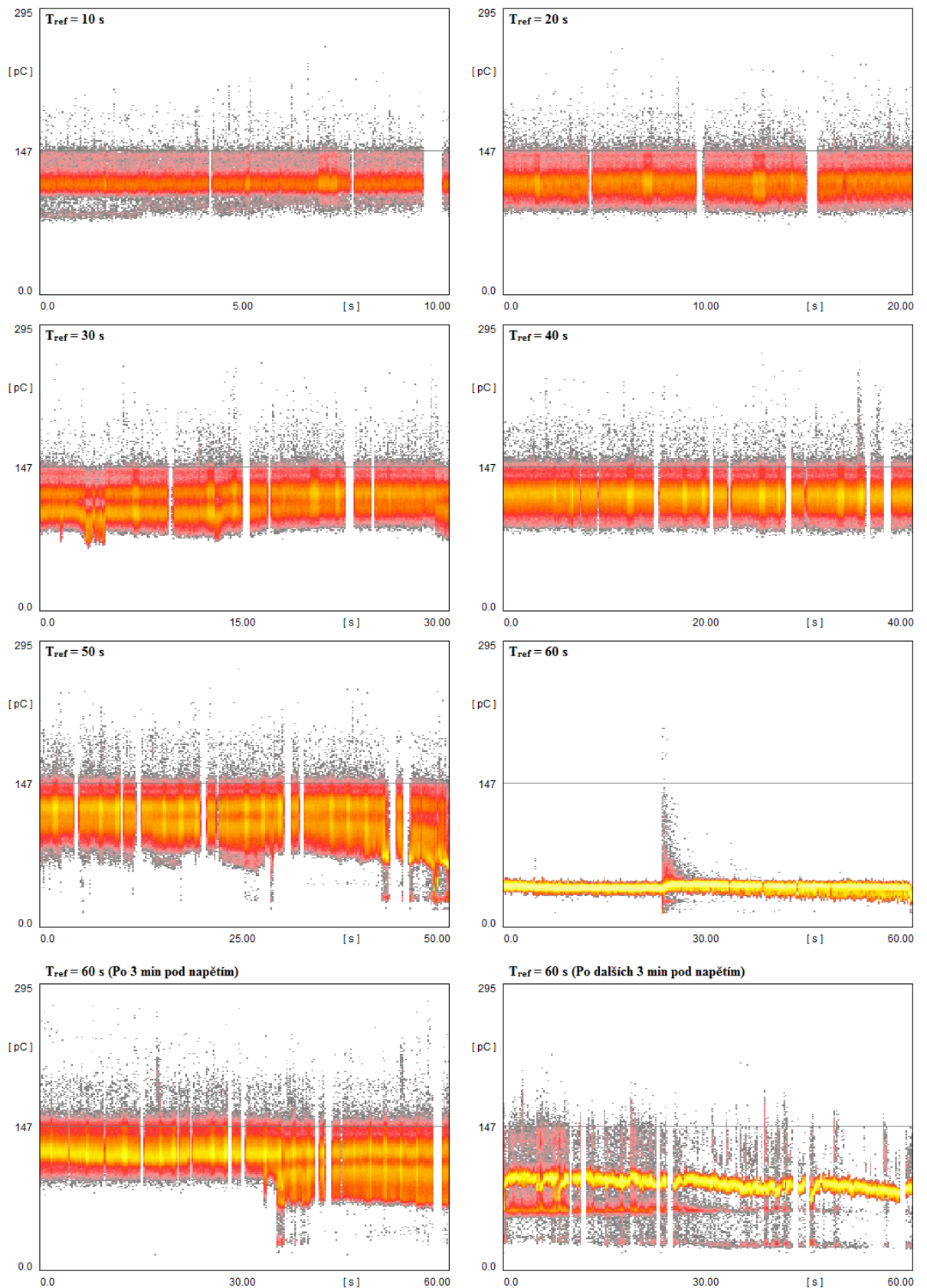


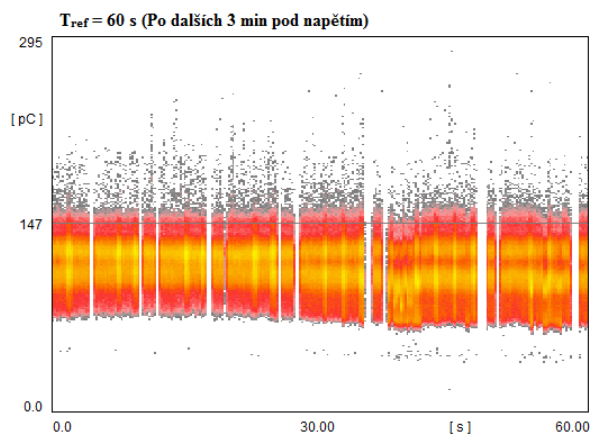
**Příloha W – Veškeré záznamy velikosti náboje v závislosti na době sběru dat pro 7,5 kV DC negativních výbojů na kalibračním jiskřišti – Zdroj vysokého napětí Tesla BS 222a**



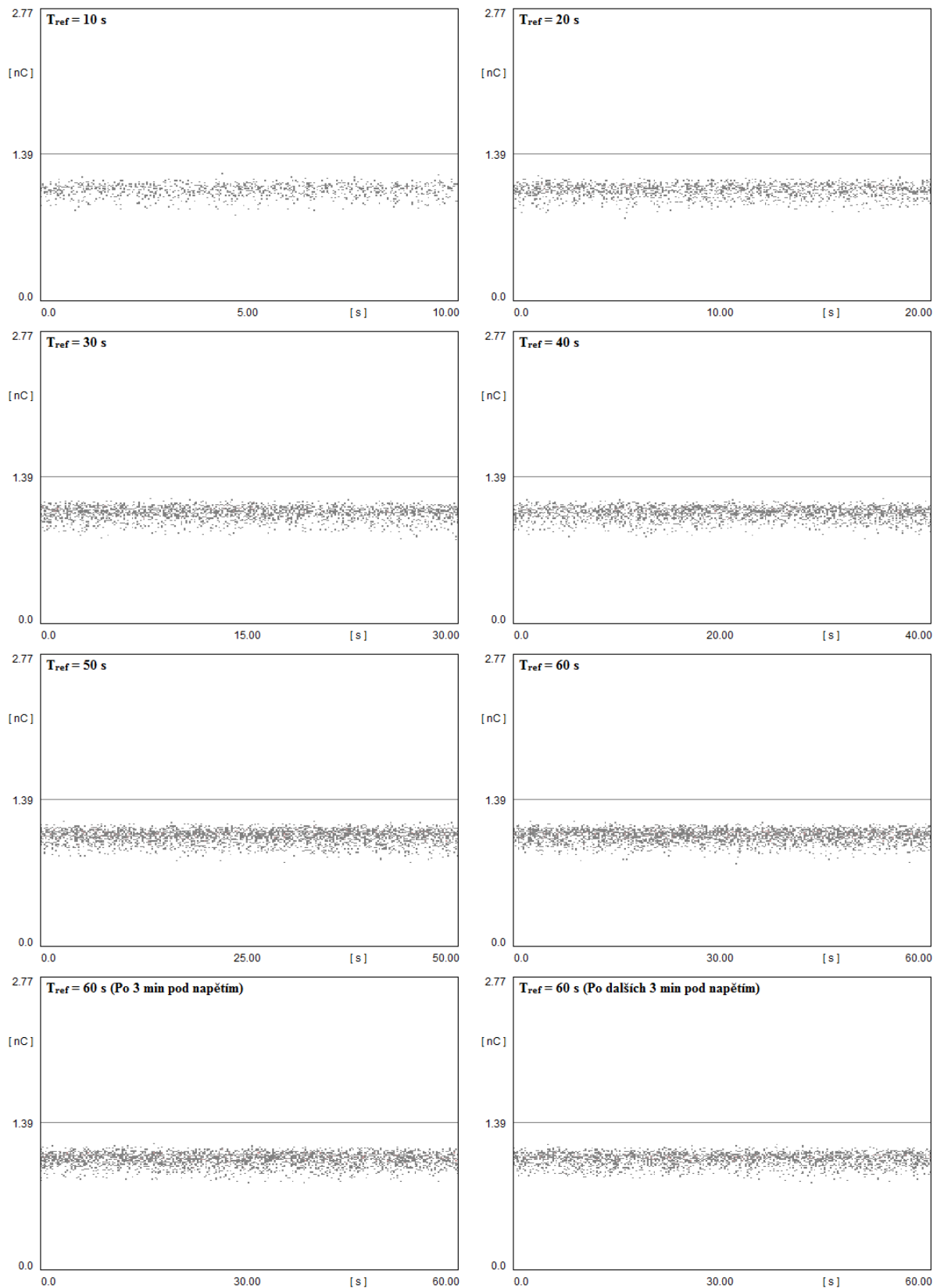


**Příloha X – Veškeré záznamy velikosti náboje v závislosti na době sběru dat pro 10,3 kV DC negativních výbojů na kalibračním jiskřišti – Zdroj vysokého napětí Tesla BS 222a**

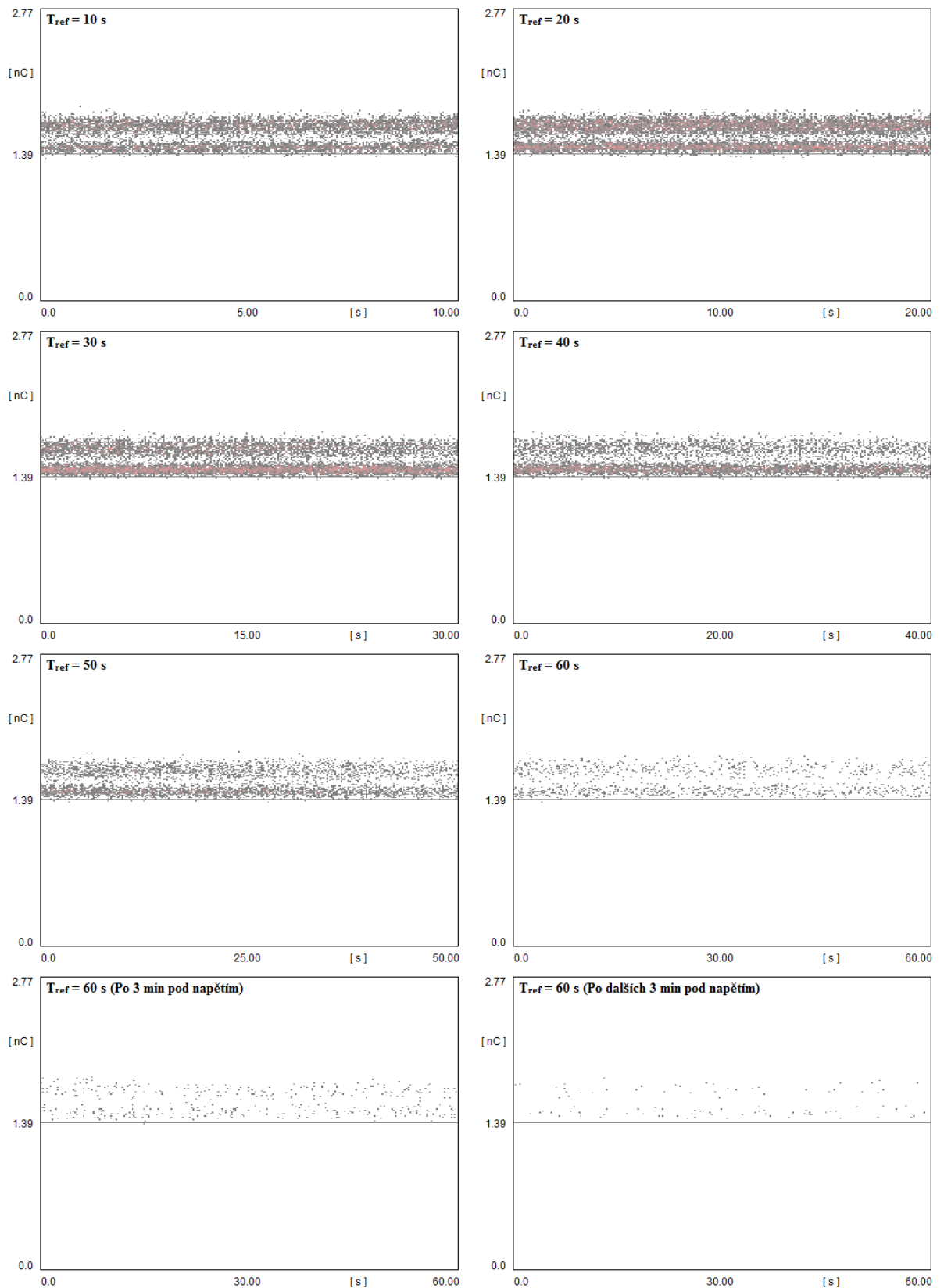




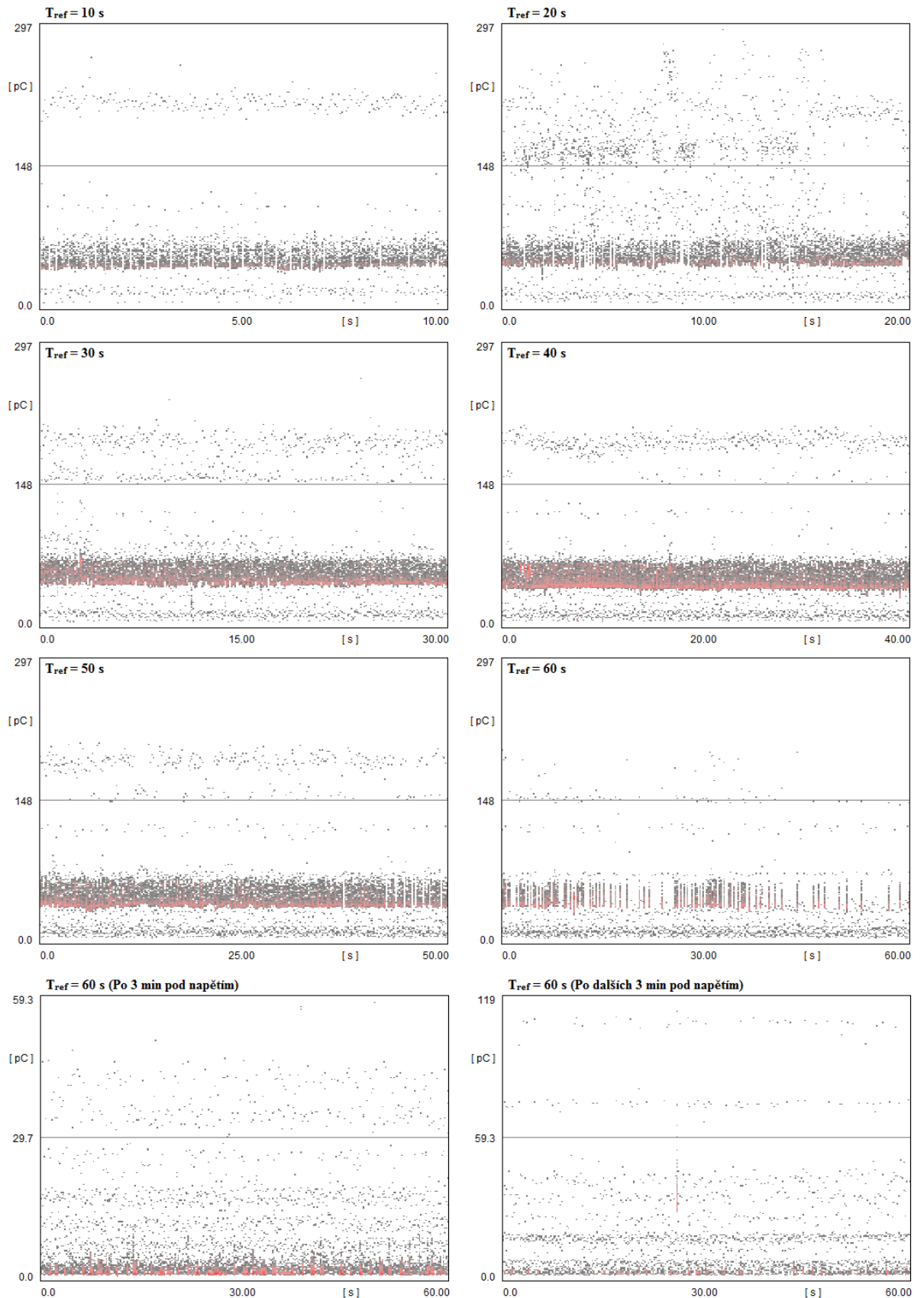
**Příloha Y – Veškeré záznamy velikosti náboje v závislosti na době sběru dat pro 9 kV DC pozitivních výbojů na kalibračním jiskřišti – Zdroj vysokého napětí Tesla BS 222a**



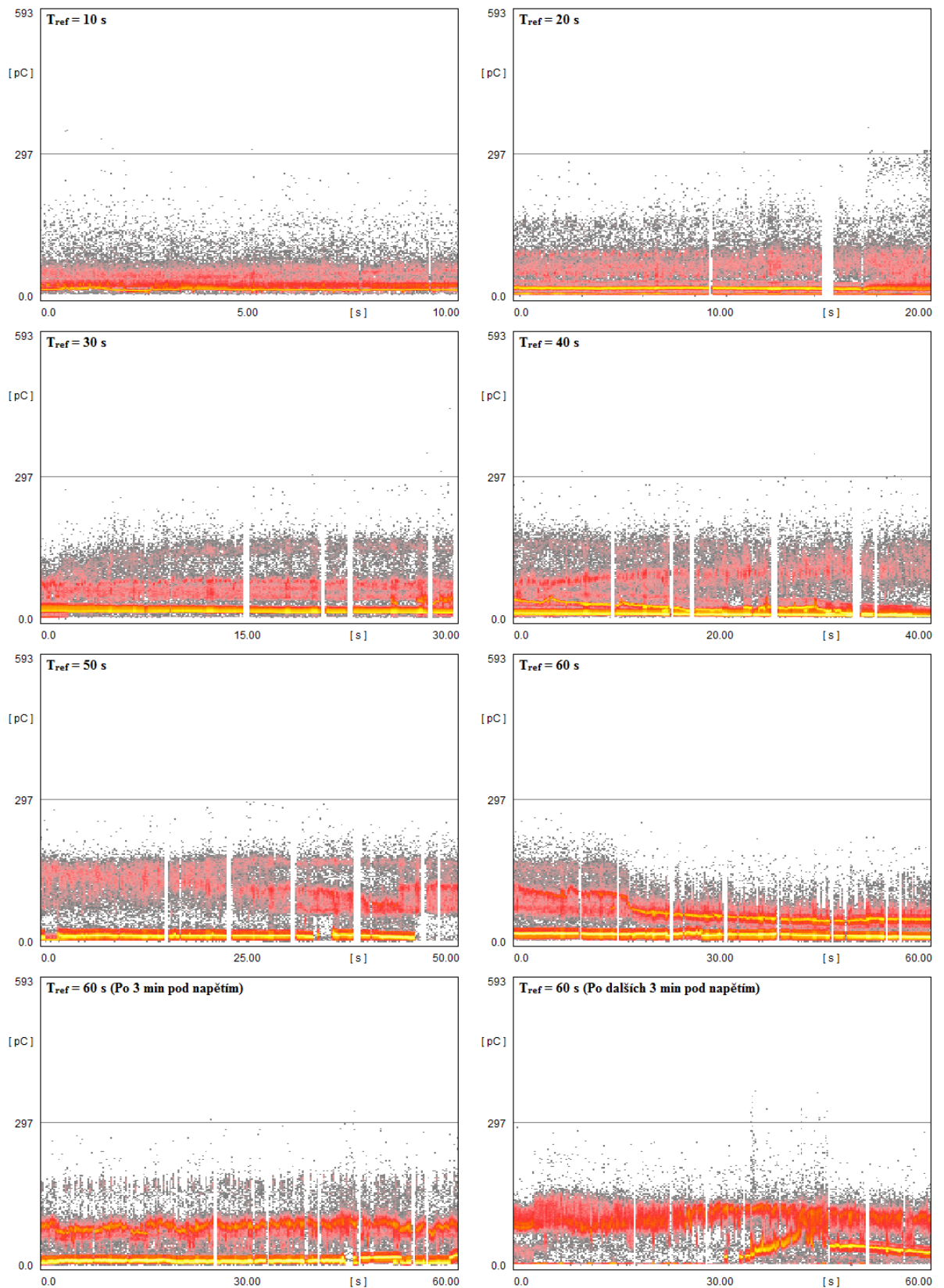
## Příloha Z – Veškeré záznamy velikosti náboje v závislosti na době sběru dat pro 12,2 kV DC pozitivních výbojů na kalibračním jiskřišti – Zdroj vysokého napětí Tesla BS 222a



**Příloha ZA – Veškeré záznamy velikosti náboje v závislosti na době sběru dat pro 13,9 kV DC negativních výbojů na modelu VN vedení – Zdroj: Modulární systém GBS 13/270**

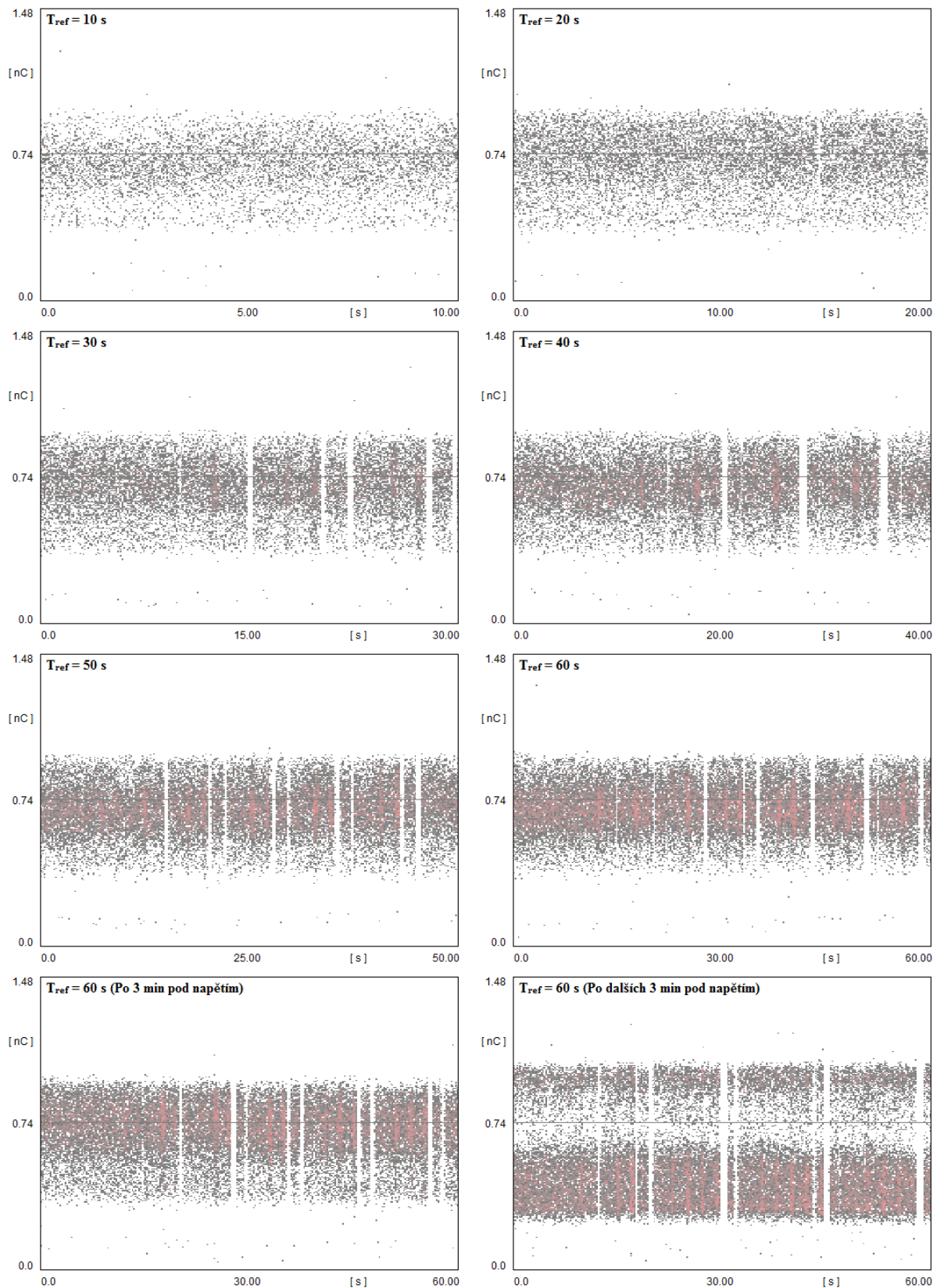


**Příloha ZB – Veškeré záznamy velikosti náboje v závislosti na době sběru dat pro 19,1 kV DC negativních výbojů na modelu VN vedení – Zdroj: Modulární systém GBS 13/270**





**Příloha ZC – Veškeré záznamy velikosti náboje v závislosti na době sběru dat pro 14,5 kV DC pozitivních výbojů na modelu VN vedení – Zdroj: Modulární systém GBS 13/270**



**Příloha ZD – Veškeré záznamy velikosti náboje v závislosti na době sběru dat pro 19,7 kV DC pozitivních výbojů na modelu VN vedení – Zdroj: Modulární systém GBS 13/270**

