

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ  
KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE**

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Analýza částečných výbojů**

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Filip ČELOVSKÝ**  
Osobní číslo: **E16N0094P**  
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Elektroenergetika**  
Název tématu: **Analýza částečných výbojů**  
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 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 ieeexplore

Vedoucí diplomové práce:

**Ing. Miroslav Hromádka, Ph.D.**

Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání diplomové práce:

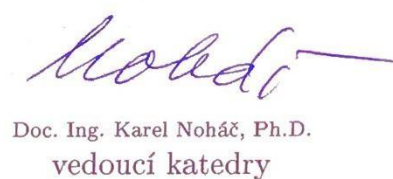
**5. října 2018**

Termín odevzdání diplomové práce:

**30. května 2019**



Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.  
děkan



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

V Plzni dne 5. října 2018

## **Abstrakt**

Předkládaná diplomová práce je zaměřena především na analýzu částečných výbojů a výbojů neúplných při napájení stejnosměrným zdrojem napětí. Popsán je princip vzniku těchto výbojů jak při stejnosměrném napětí, tak při napětí střídavém a jejich důsledky v oblasti vysokého napětí, principy měření a trendy jež se používají pro zjišťování těchto poruch.

Měření částečných výbojů při napájení stejnosměrným zdrojem napětí je inovace, která vzniká se stále rostoucím využitím elektrotechniky v běžném životě, a tedy i analyzování potencionálních problému a jeho následné omezení či úplnému zamezení. Dále je práce zaměřena na metodiku analýzy, experimenty a následnou normalizaci měření.

Text je rozdělen do čtyř částí; první jež se zaměřuje na obecný popis částečných výbojů a jejich druhu. Část druhá objasňuje trendy měření těchto výbojů a třetí návrhem experimentu pro měření částečných výbojů při napájení stejnosměrným zdrojem. Poslední část je věnována samotné realizaci experimentů a porovnání získaných výsledků.

## **Klíčová slova**

Částečný výboj, koróna, klouzavý výboj, povrchový výboj, vysoké napětí, porucha, stejnosměrné napětí, dielektrikum, izolátor, vodič

**Abstract**

The master theses is focused on analysis of partial and incomplete discharges and incomplete by the DC source voltage. The principle of origin of these discharges is described under both direct and alternating voltage and their consequences in high voltage areas, measurement principles and trends used to detect these failures.

Partial discharge measurement at direct voltage source is the innovation and growth in the use of electronics in everyday life and potential problem analysis and its subsequent reduction or complete elimination. Work is focused on methodology, analysis and standardisation.

Text is divided into four parts, the first one which focuses on a general description of the partial discharges and their kind. The second part explains the measurement of these trends and the third proposal of experiment for measuring partial discharges by the DC source. The last section is devoted to experimental and comparison of the obtained experimental results.

**Key words**

Partial discharge, corona discharge, surface discharge, high voltage, DC voltage, dielectric, insulator, conductor

## **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 15.5.2019

Filip Čelovský

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Miroslavu Hromádkovi Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce, za jeho přátelský a stále velmi profesionální přístup a za jeho lidskost. Dále jeho kolegům z katedry, kteří byli ochotni poskytnout cenné rady a připomínky. Jmenovitě doc. Ing. Petru Martínkovi Ph.D. a doc. Ing. Jiřímu Laurencovi Ph.D. CSc.

Mé poděkování míří také na katedry FEL vyučujícím jež nejen mne zdárně provázeli studiem a bez nichž by mé znalosti týkající se elektrotechniky nebyly nikdy dosaženy. Celé katedře energetiky a mnoha dalším.

# Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>8</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>10</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>11</b>
<b>1 ČÁSTEČNÉ VÝBOJE</b> .....	<b>12</b>
1.1 ČÁSTEČNÝ VÝBOJ OBECNĚ.....	12
1.2 DRUHY ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ.....	13
1.2.1 Výboje v dutinách.....	15
1.2.2 Výboje korónové.....	15
<b>2 MĚŘENÍ ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ</b> .....	<b>21</b>
2.1 OBECNÝ MODEL PRO MĚŘENÍ ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ.....	22
2.2 DIAGNOSTIKA ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ – PARAMETRY PŘI MĚŘENÍ.....	23
2.2.1 Zdánlivý náboj.....	23
2.2.2 Součtový náboj.....	24
2.2.3 Četnost částečných výbojů.....	24
2.2.4 Střední proud částečných výbojů.....	24
2.2.5 Střední kvadratický součet zdánlivých výbojů.....	24
2.2.6 Dolní a horní mez frekvence.....	25
2.2.7 Střední kmitočet pásma a šířka pásma.....	25
2.2.8 Výkon částečných výbojů.....	25
2.2.9 Zhášecí napětí částečných výbojů.....	25
2.2.10 Fázový úhel a čas výskytu impulzů částečného výboje.....	26
2.2.11 Přenosová impedance.....	26
2.3 MĚŘENÍ ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ – OBECNĚ.....	26
2.3.1 Neelektrické metody.....	27
2.3.2 Elektrické metody.....	27
2.3.3 Akustická detekce částečných výbojů.....	34
2.3.4 Chemická detekce částečných výbojů.....	35
2.3.5 Optická detekce částečných výbojů.....	35
<b>3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST</b> .....	<b>38</b>
3.1 ICMSYSTEM HARDWARE.....	39
3.1.1 Hlavní jednotka.....	39
3.1.2 Signální před-zesilovač RPAIL ICM systému.....	41
3.1.3 Vazební kapacita ICM systému.....	42
3.1.4 Kalibrátor CALIA pro ICM systém.....	43
3.2 ICMSYSTEM SOFTWARE.....	43
3.2.1 Nastavení parametrů měřícího nástroje ICMsystem.....	46
3.3 REALIZACE EXPERIMENTŮ.....	48
3.3.1 Experimentální vzorky.....	52
3.3.2 Koncepce postupu při měření částečných výbojů.....	54
<b>4 ANALÝZA A POROVNÁNÍ DOSAŽENÝCH EXPERIMENTŮ</b> .....	<b>56</b>
4.1 MĚŘENÍ PŘI STŘÍDAVÉM NAPĚTÍ.....	58
4.2 MĚŘENÍ PŘI STEJNOSMĚRNÉM NAPĚTÍ MODEL VENKOVNÍHO VEDENÍ S VODIČEM PRŮMĚRU 0,5 MM. 60	
4.3 MĚŘENÍ PŘI STEJNOSMĚRNÉM NAPĚTÍ MODEL VENKOVNÍHO VEDENÍ S VODIČEM PRŮMĚRU 1,5 MM. 68	
4.4 MĚŘENÍ PŘI STEJNOSMĚRNÉM NAPĚTÍ MODEL PRŮCHODKY.....	75
<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>81</b>
<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ</b> .....	<b>82</b>



---

**PŘÍLOHY** ..... **1**

## Úvod

Předkládaná práce objasňuje trendy a vývoj částečných a neúplných výbojů v technice vysokého napětí ať už mluvíme o vzniku či jejich detekci a zamezení a to zejména při stejnosměrném napájecím napětí kladné i záporné polarity. V práci je věnována celá kapitola měřicímu systému, který je používán pro experimentální měření částečných výbojů při střídavém či stejnosměrném napětí. Stejně tak je i popsán princip vzniku výbojové činnosti v různých izolačních materiálech a jejich druhy.

Jelikož měření částečných výbojů se stejnosměrným zdrojem napětí zatím není v technických normách detailně zpracované, mohly by experimenty z diplomové práce sloužit jako podklad pro budoucí standardizované měřicí postupy. Na základě získaných poznatků z těchto měření by poté mohl probíhat postup při používání detektoru částečných výbojů pro vylepšení záznamu měření izolačních materiálů a technologie jejich výroby.

Izolační systém má jako hlavní předpoklad vysokou elektrickou pevnost, která zamezuje vzniku jakékoli výbojové činnosti. Tato pevnost se u různých materiálů liší dle druhu materiálu, typu konstrukce nebo použití v daném prostředí. Jako důsledek zhoršení elektrické pevnosti může docházet k postupnému objevování výbojové činnosti, což vede v krajních případech i ke zničení a zhroucení celého izolačního systému. Cílem této diplomové práce je nastínit postupy a analyzovat data z experimentů, které by mohly vést ke zlepšení standardizovaného měření izolačních materiálů při stejnosměrném napětí.

## Seznam symbolů a zkratk

S	.....	Sekunda
$\mu$ S	.....	Mikrosekunda
nS	.....	Nanosekunda
C	.....	Stupeň celsia
AC	.....	střídavý proud, zařízení na střídavý proud (alternating current)
DC	.....	stejnsměrný proud, zařízení na stejnosměrný proud (direct current)
VVN	.....	Velmi vysoké napětí
VN	.....	Vysoké napětí
NN	.....	Nízké napětí
q	.....	Zdánlivý náboj
pC	.....	Picocoulumb ( $10^{-12}$ C)
nC	.....	Nanococoulumb ( $10^{-9}$ C)
MPa	.....	Megapascal ( $10^3$ Pa)
kPa	.....	Kilopascal ( $10^6$ Pa)
PD	.....	Partial Discharge (Částečný výboj)
ppm	.....	Part per million – Miliontina celku
q	.....	Zdánlivý náboj v pikocoulombech (pC)
qi	.....	Zdánlivý výkon za dobu zvoleného referenčního časového intervalu (nC)
T	.....	Perioda (s)
ti	.....	Čas (s)
T <sub>ref</sub>	.....	Referenční časový interval – Doba sběru dat (s)
ppm	.....	part per million (miliontina celku)

# 1 Částečné výboje

Obecně je spolehlivost a bezpečnost at' už na hladinách vysokého či nízkého napětí velmi důležitá pro fungování soustavy a proto se snažíme o predikování a následné lokalizování možných poruch dříve než k nim dojde. Částečné výboje at' chceme či ne představují nedílnou součást poruch v elektrických systémech.

## 1.1 Částečný výboj obecně

Při elektrickém namáhání povrchu či vnitřní části izolačního systému s následným překročením jeho elektrické pevnosti dochází k částečnému výboji at' už se jedná o pevný či kapalný izolační systém. Ovšem nedochází zde k úplnému přemostění v prostoru vzniku mezi vodivými částmi, což je detailněji popsáno ČSN EN 60270. Hlavní normou pro zajištění správného a opakovatelného měření částečných výbojů je v současnosti v naprosté většině případů použití na IEC 60270. Částečné výboje nejsou viditelné naopak například od výboje korónového a typicky mají dobu trvání kratší než  $1\mu\text{s}$ . [1] [2] [13]

Jedna z otázek je: je-li možné ustanovit vyjádření o zbytkové životnosti komponentu na VN či NN založené na měření částečných výbojů? Materiál není degradován pouze vlivem částečných a neúplných výbojů, další roli hrají například stárnutí nebo tzv. „treeing“ – tree initiation (Popsáno podrobněji v následujícím odstavci). Pro uvažování všech vlivů je tedy lepší zahrnovat stupeň stárnutí daného komponentu s ohledem na kvalitativní hodnocení výbojového procesu. [3]

Částečný výboj nastává v dutinách, prasklinách nebo započíná v pevných izolačních materiálech s pevným dielektrikem, v prostoru povrchu vodiče, nebo v kapalných dielektrikách nebo v bublinách kapalných dielektrik. Pro start částečného výboje musí být splněny dvě podmínky. První, rozsah a rozložení elektrického pole musí být v dutině dostatečné pro vývoj výboje. Druhá, volný elektron musí být ve vhodné pozici v dutině pro započítí ionizačního procesu. Volný „počáteční“ elektron může být dodán od vnějších zdrojů (radiace). [2] [4] Jestliže jednou částečný výboj nastává následná kondice materiálu je vždy horší. Dle statistiky je až 80% elektrických požárů nebo selhání v systémech způsobeno průrazem či selháním izolace a částečný výboj je první indikací, že k selhávání dochází. Částečné výboje degradují izolační materiály elektrickými,

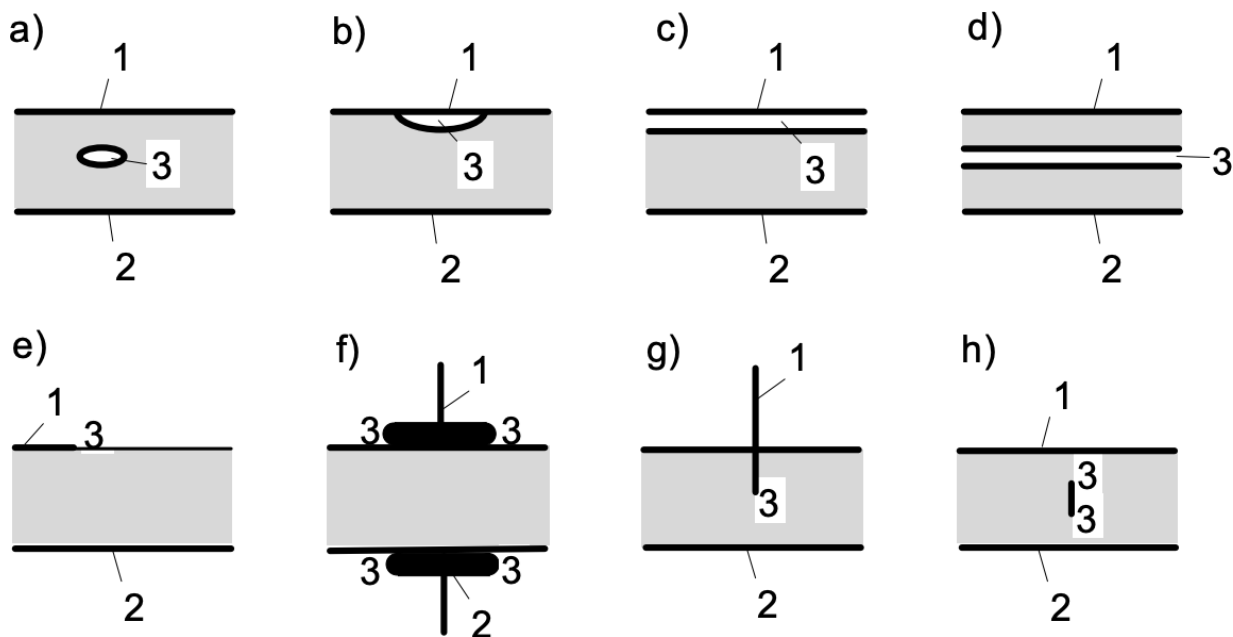
tepelnými a následnými chemickými účinky, například uvolňováním ozónu typické pro korónový výboj, což nepříznivě snižuje životnost izolačního materiálu a celkově odolnost systému. Tepelné namáhání zapříčiňují dopadající částice jako jsou ionty nebo elektrony, v místech dopadu poté působí stres na materiál, jež podléhá degradaci. Lze se také setkat s jevem zvaným anglicky „treeing“, česky tzv. elektrický stromeček kdy v dutinách izolantu vzniká výboj který postupuje drobnými dutinkami a pomyslně se větví do stromovité kostry z čehož patrně vzniklo i pojmenování. Tento jev je nebezpečný zejména z hlediska rozšiřování skrze izolant s následným spojením vodivých cest a selhání elektrické odolnosti izolantu. [5] [7]

Přestože se trendy v elektronice více méně nemění a metody zůstávají stejné, technologie postupuje u použitých materiálů a jejich aplikace do systémů vpřed. Proto nikdo nepochybuje o důležitosti diagnostiky a profylaktiky elektrických zařízení jež problémy pouze neřeší ale snaží se jím zabránit. Obecnému předcházení poruch izolace lze teoreticky předejít omezením nehomogenního elektrického pole jež způsobuje vznik částečných výbojů. Ovšem i přes vyspělé technologie a pokročilou modernizaci výrobních procesů nehomogenní pole v izolačních systémech zcela eliminovat nelze, a proto na scénu vstupuje právě diagnostika zařízení i přestože diagnostika a měření může svým elektrickým namáháním nepříznivě působit a degradovat izolační materiál je cena za predikování a potencionální zamezení problémů větších rozměrů přijatelná. [5] [6]

## 1.2 Druhy částečných výbojů

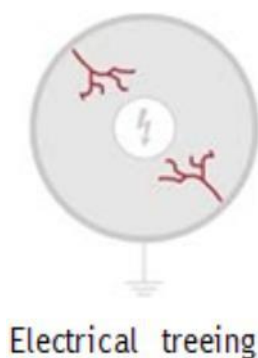
Vznik mnoha druhů částečných výbojů lze rozdělit podle místa, tj. vznik na elektrodách či povrchu dielektrika v dutině. Jejich následkem bývá koróna, jež je typická právě pro vnitřní výboje v dutinách dielektrik. Klouzávý nebo povrchový výboj nastává na povrchu. Výboje nalezneme tedy ve velké škále variací uspořádání prostředí od izolace přes povrchy a rozhraní (vodič – izolace) až k vinutí elektrických točivých strojů čili motorů nebo netočivých elektrických strojů nebo-li transformátorů. Každý druh přitom na stroje a specifické zařízení působí jinak a lze tedy z měření odhadovat o jaký druh částečného, neúplného nebo jiného výboje jedná a jaká část zařízení bude tedy postižena nejvíce. [5] [8]

Uspořádání elektrod pro bližší interpretaci částečných výbojů nalezneme na obrázku (Obr. 1.1).



Obr. 1.1 Jednotlivé typy výbojů dle uspořádání elektrod [9]

Elektrody jsou vždy značeny čísly 1 a 2 ve smyslu kladné a záporné. Výboj, respektive jeho lokace je označena číslem 3. Na obrázku varianta a) a b) reprezentují vnitřní výboj v dutinách. Následující příklad c) a d) reprezentují výboje ve vrstvené izolaci což mohou být například právě zmiňované elektrické stroje, pozorovatelné u tohoto typu výboje je mezera mezi elektrodou a pevným izolantem či uvnitř izolantu zapříčiněna vznikem tzv. delaminace izolace. Varianta e) značí výboj klouzavý a f) pak výboj povrchový. Poslední dvě varianty g) a h) jsou výboje na tenkém hrotu v dielektriku. [9] Při zmínění různých druhů je potřeba neopominout také zvláštní druh částečných výbojů nazýván „treeing“. Jeho zjednodušené schéma v dielektriku ukazuje obrázek 1.2.



Obr. 1.2 Částečný výboj jež přechází v tzv. treeing [9]

### 1.2.1 Výboje v dutinách

Výboje v dutinách jsou typickým zástupcem částečných výbojů ke kterým dochází v plynech vyplněných dutinách pevného izolantu při elektrickém namáhání. Se zvyšujícím se napětí střídavé hodnoty přiložené na objekt se objeví v okolí taktéž napětí v těchto dutinách výboje. Výboje v dutinách mají charakter drobných jiskrových nebo lavinových výbojů. Počáteční napětí částečných výbojů je pak jeden z hlavních ukazatelů tohoto specifického typu výbojů. Jedná se o hodnotu, kdy výboje vznikají. [14]

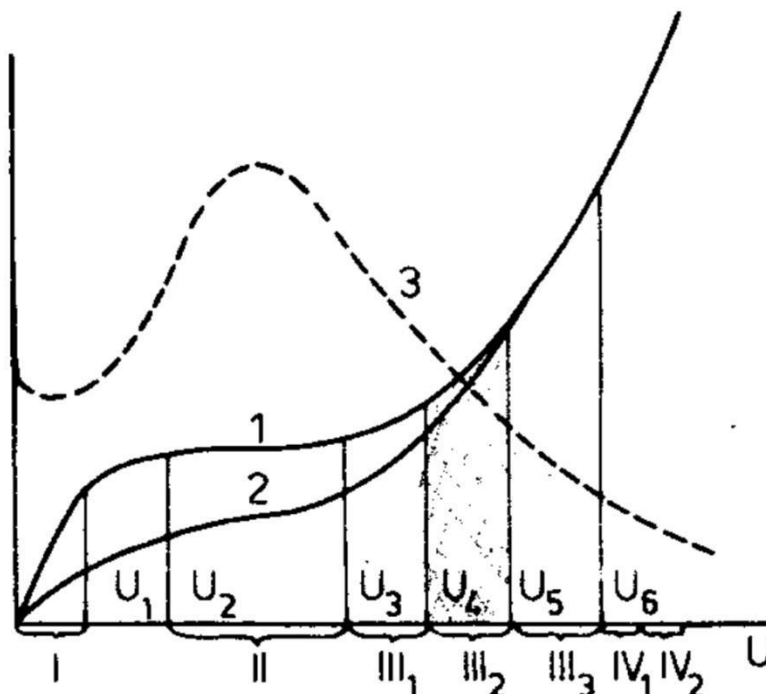
Problém, který u výboje v dutinách nastává je spjat s obsahem kyslíku v dutinách dielektrika. Kyslík společně s výbojem vytvářejí ozon, jež má velmi nežádoucí oxidační účinky na už tak namáhané stěny izolantu a zapříčiňuje chemickou destrukci a degradaci materiálu. Další agresivním činitelem v tomto ohledu jsou také plyny, které vznikají při rozkladu dielektrika během výboje samotného. Doprovázeny jsou také tepelným namáháním vedoucím k tepelné nestabilitě, jelikož ohříváno je samotné dielektrikum a proto klesá hodnota napětí tepelného průrazu. Tato série události vede až k samotnému průrazu dielektrika. [5] [15] [16]

### 1.2.2 Výboje korónové

Jedná se o druh elektrického výboje v plynech. Vzniká na ostrých hranách elektrod, kde je díky malému poloměru křivosti generováno silné elektrické pole. Takto silně nehomogenní pole je podmínkou pro vznik korónového výboje. Zajímavostí je, že korónový výboj může také vznikat při bouřce na ostrých hranách střech nebo hromosvodů jako tzv. Eliášův oheň. V některých případech je i viditelné jemná záření, velmi typické je pak známe sršení projevující se na sloupech VN. [10]

Na počáteční stádia koróny má vliv stav povrchu elektrod. Ohnisky malých předběžných nestabilních výbojů jsou drobné nečistoty a nerovnosti elektrod. Koróna může vznikat jak na kladné, tak i na záporné elektrodě dle hodnot intenzity elektrického pole. Vliv na korónu, respektive na počáteční napětí koróny, krom povrchu elektrod mají taky vlhkost, hustota média čili plynu nebo tvar elektrod. Při měřeních se na hladkých a čistých elektrodách sleduje protékající proud směrem k elektrodám v závislosti na zvyšujícím se napětí. [15]

Jelikož jde o výboj v plynech jeho průběh je dán ionizací plynu. Graf ionizace ukazuje závislost napětí mezi elektrodami  $U$  na ionizačním proudu  $I$ , jinak řečeno zobrazení procesů v plynu, tj. vytváření a zánik iontů v elektrickém poli mezi elektrodami. [11]



Obr. 1.3 Ionizační charakteristika plynu [11]

V grafu jsou patrné 4 základní oblasti:

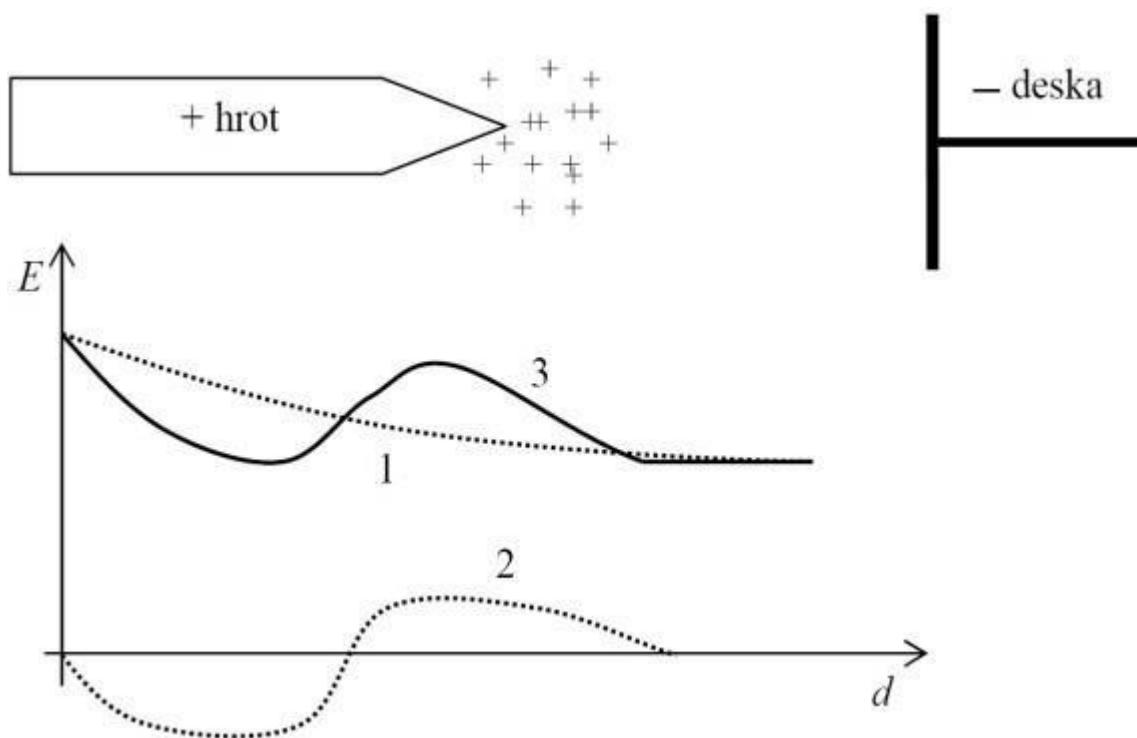
- I. úsek Ohmova zákona – zde vzniká ionizace,
- II. úsek nasyceného proudu – vzniká ionizace vyvolaná vnějším zdrojem záření,
- III. v tomto úseku přibývá ionizace způsobená nárazem iontů na atomy a molekuly v elektrické poli,
- IV. oblast samotného výboje v plynech.

V grafu popisuje křivka č.1 změnu proudu při ionizaci zářičem  $\alpha$ , křivka 2 pak zářičem  $\beta$  a poslední křivka číslo 3 vyjadřuje podíl  $dU/dI$ , tj. změnu napětí ku změně proudu nebo také směrnici ke křivce 1 v závislosti na napětí  $U$ . [11]



### 1.2.2.1 Kladné korónové výboje

Tento jev uvažujeme na konfiguraci kladný hrot a záporná deska. Napětí mezi hrotem a deskou zvyšujeme do chvíle kdy je intenzita elektrického pole v okolí hrotu dostatečná energie pro vznik nárazové ionizace. Poté vzniká nekontrolované lavinové šíření volných elektronů směrem k hrotu. Naopak kladné ionty, které jsou vzhledem k volným elektronům těžší, jsou pomalu přitahovány směrem k desce. Kladný objemový náboj, jež zmenšuje intenzitu elektrického pole v okolí místa vzniku a zastavuje lavinové šíření elektronů, se vytváří v blízkosti hrotu. V případě vzdálení kladných iontů od hrotu dochází k obnovení výboje. Pulsní charakter korónového proudu, jež je na obrázku je způsoben právě tímto jevem kdy dochází k oddálení kladných iontů. [12]



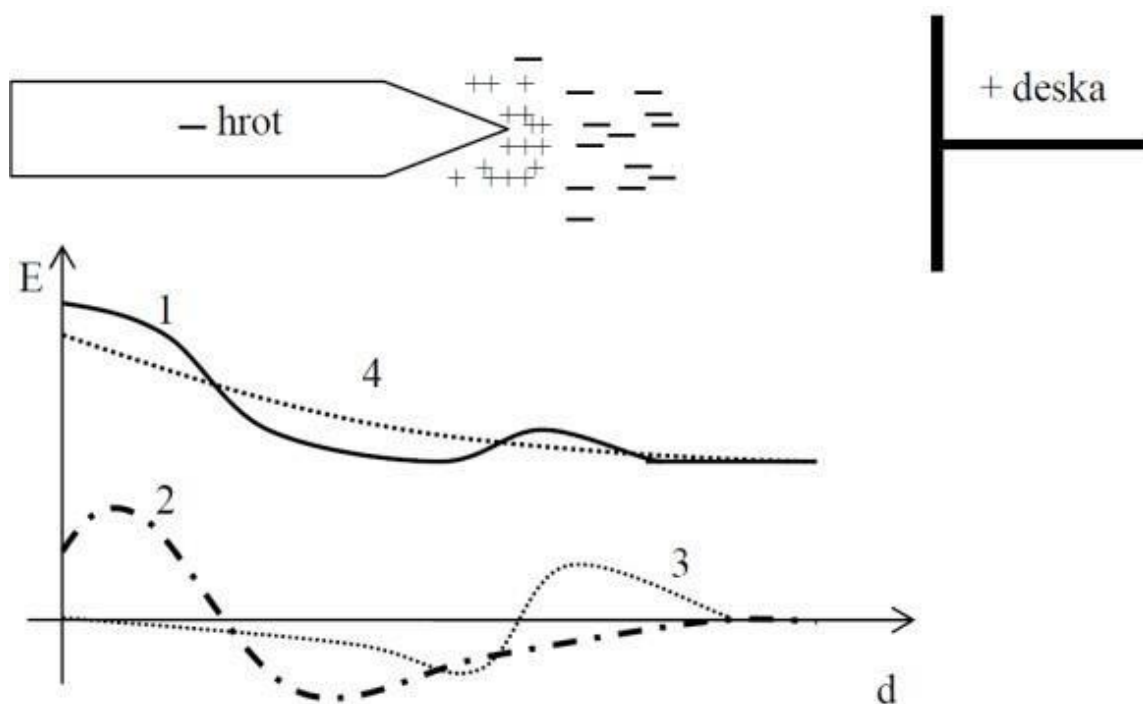
Obr. 1.4 Graf závislosti rozložení intenzity elektrického pole na vzdálenosti doskoku pro uspořádání kladný hrot a záporná deska. 1 – Průběh intenzity elektrického pole způsobené vnějším zdrojem, 2 – Průběh intenzity elektrického pole způsobené kladným prostorovým nábojem, 3 – Celkový průběh intenzity pole [12]

Oblasti v grafu intenzity elektrického pole  $E$  v závislosti na vzdálenosti  $d$ :

- 1 – Průběh intenzity elektrického pole způsobené vnějším zdrojem,
- 2 – průběh intenzity elektrického pole způsobené kladným prostorovým nábojem,
- 3 – celkový průběh intenzity pole.

### 1.2.2.2 Záporné korónové výboje

Stejně jako u předchozího případu při této konfiguraci kladný hrot a záporná polarita napětí na desce je zde intenzita elektrického pole identická do vzniku ionizace. Rychle se pohybující elektrony k desce za sebou zanechávají kladný prostorový náboj z iontů, které se relativně pomalu pohybují k hrotu. Až po opuštění oblasti největší intenzity elektrického pole dochází ke ztrátě rychlosti elektronů, která je postupná. Většina z těchto elektronů je zachycena neutrálními molekulami za vzniku těžkých záporných iontů. Tyto ionty mezi deskou a hrotem v konečném důsledku vytváří záporný prostorový náboj způsobující pokles intenzity elektrického pole v blízkosti hrotu. Pokud je pokles dostatečný dojde k přerušení korónového výboje. Naopak při dostatečném oddálení prostorového náboje od hrotu dojde k opětovnému vzniku výboje a právě proto má korónový výboj pulsní charakter. Toto uspořádání s průběhem intenzity elektrického pole je zobrazeno na obrázku (Obr. 1.5). [12] [17]

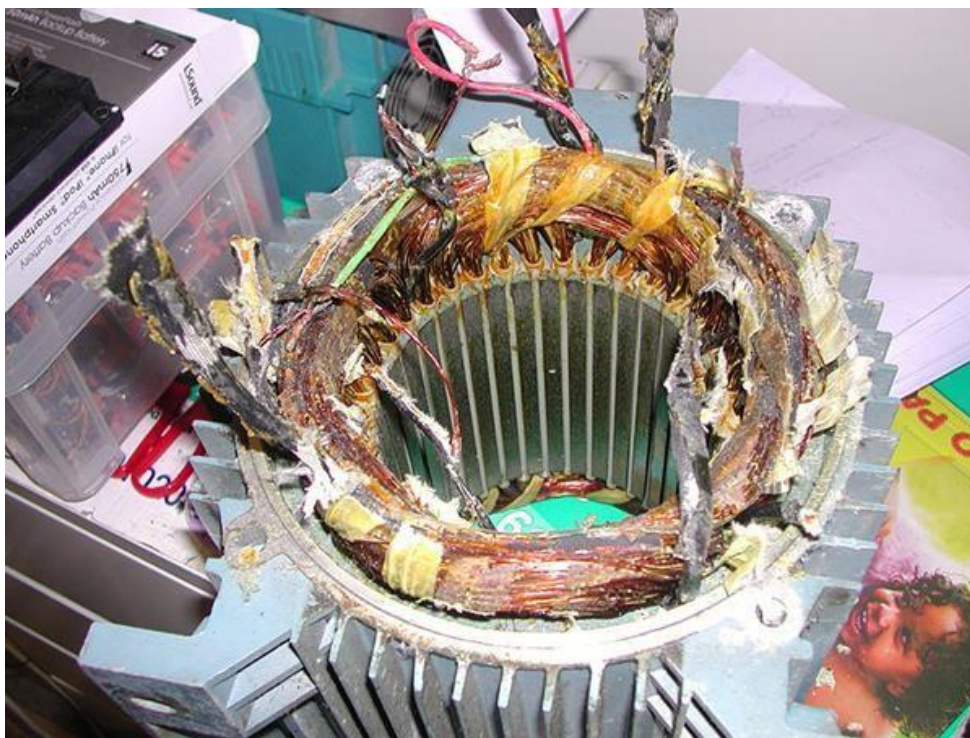


Obr. 1.5 Graf závislosti rozložení intenzity elektrického pole na vzdálenosti doskoku pro uspořádání záporný hrot a kladná deska. 1 – Průběh intenzity elektrického pole způsobené vnějším zdrojem, 2 – Průběh intenzity elektrického pole způsobené kladným prostorovým nábojem, 3 – Průběh intenzity elektrického pole způsobené záporným prostorovým nábojem, 4 – Celkový průběh intenzity pole [12]

### 1.2.2.3 Výboje ve vrstvené izolaci

Trpící skupinou na tento druh výboje je rozsáhlá škála elektrických točivých i netočivých strojů kde částečné výboje nastávají v několika místech čel vinutí s velkou intenzitou elektrického pole. Poruchový mechanismus má pomalou konstantu trvání ačkoli v důsledku vzniku výboje na povrchu izolace se může jednat o relativně rychlý jev. Pokud je řeč o výbojích v elektrických strojích je potřeba také zmínit, že výboje mohou nastat mezi fázemi, např. při nepřiměřené vůli na rozhraní, u částí systému podpěry čel nebo jako výboje mezi zemí a jednou fází povrchového vinutí čela. Taktéž se můžeme setkat s výboji které se vyskytují v drážkách strojů, a to zejména v případě je-li porušen vodivý povlak drážkové části v důsledku pohybu cívky/tyče. Je třeba sledování už v prvopočátku vzniku což je velice obtížné vzhledem ke skutečnosti, že ze začátku jde spíše o vibrační jiskření, které ve výboje přechází až postupem času. V porovnání s výboji v dutinách, vzhledem k charakteru nehomogenity elektrického pole, produkují větší zdánlivý náboj  $q$  a větší četnost impulzů  $n$ . [8] [18]

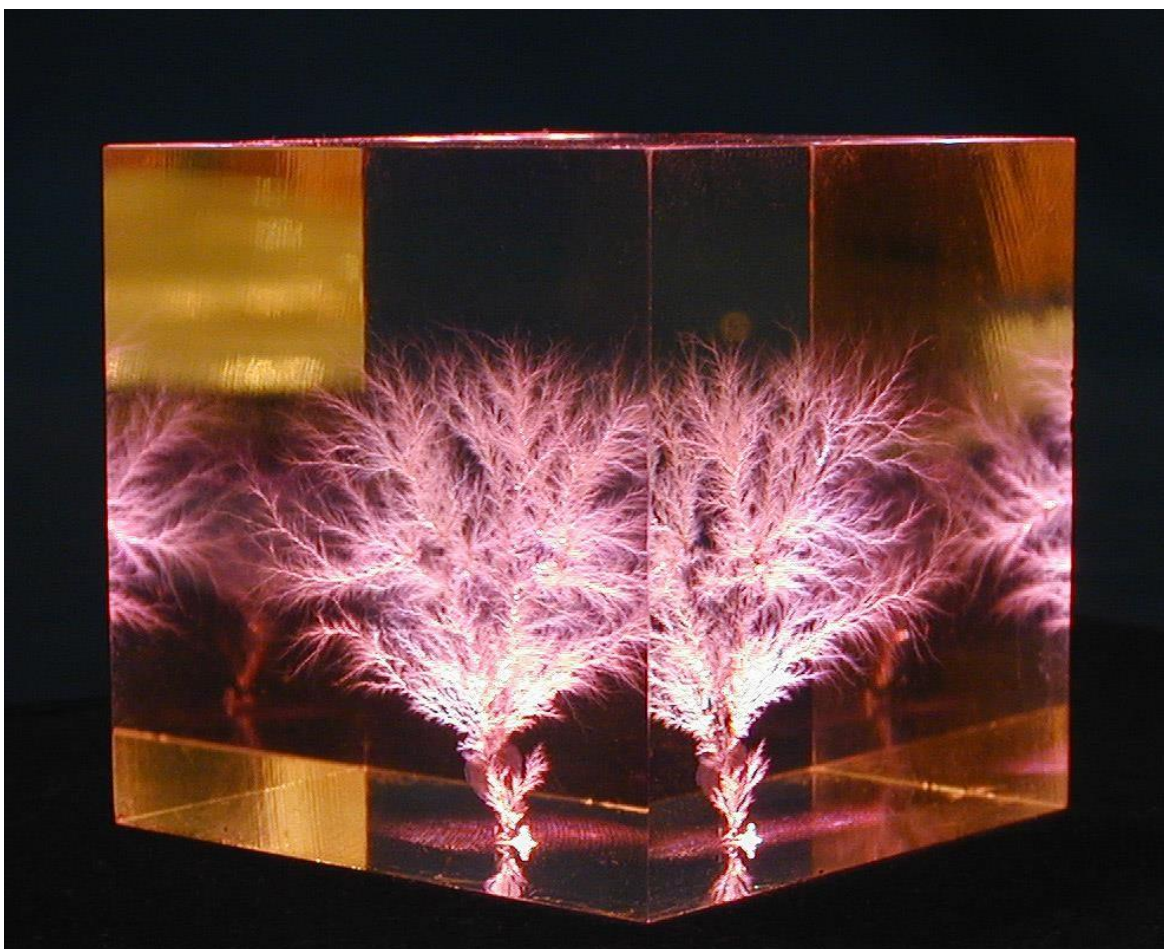
Ovšem ignorace vždy vede k nevyhnutelnému, což je celá destrukce vrstvené izolace, drážek či vinutí, a tedy k selhání samotného stroje.



Obr. 1.6 Ukázka zničení statorového vinutí elektrického motoru vlivem částečných výbojů v izolaci [8]

### 1.2.2.4 Treeing

Jedním ze speciálních druhů částečných výbojů uvnitř dielektrického materiálu je výboj, jež na první pohled připomíná rozvětvený stromček z čehož pochází anglické označení „treeing“. Wikipedia popisuje tento jev doslova jako „před-průrazový“ čili nastává před samotným zhroucením izolace pevného materiálu dielektrika. Nejtypičtějším zástupcem v řadě materiálů, které jsou použity v aplikaci a trpí na tento jev je například kabelové vedení. [19] [20]



Obr. 1.7 Ukázka výbojového stromčku – treeing v pevném materiálu 3D modelu [20]

### 1.2.2.5 Klouzavé výboje

Elektrický klouzavý obloukový výboj z angličtiny převzatý tzv. Glid-Arc (Gliding Arc – klouzavý oblouk), je v podstatě neizotermické plazma tvořené slabě izolovaným

plynem. [24]. Dochází k němu mezi elektrodami různých materiálů v rozmezí tlaků od nízkých až řádově do jednotek MPa. Výboj prochází mezi elektrodami v místě, kde jsou si vzhledem ke geometrii nejbližší a tvořený plazmový kanál je unášen ve směru proudícího plynu. K přerušení dochází pokud vzdálenost přesáhne mez, jež je kritická pro udržení dostatečné energie kanálu výboje zdrojem napětí. Dle materiálu a vlastností těchto výbojů je opět dán hlavně konstrukčním uspořádáním a také materiálem elektrod, prouděním vzduchu (druh plynu, rychlost průtoku) a napájecím zdrojem. Zajímavostí je, že tento výboj slouží také pozitivně, a to například na dielektriku v zapalovacích svíčkách v automobilech kde speciální klouzavý výboj prodlužuje životnost a zlepšuje účinnost motorů. Jedná se ale o speciální druh klouzavého výboje jež je kontrolovaný. [25]

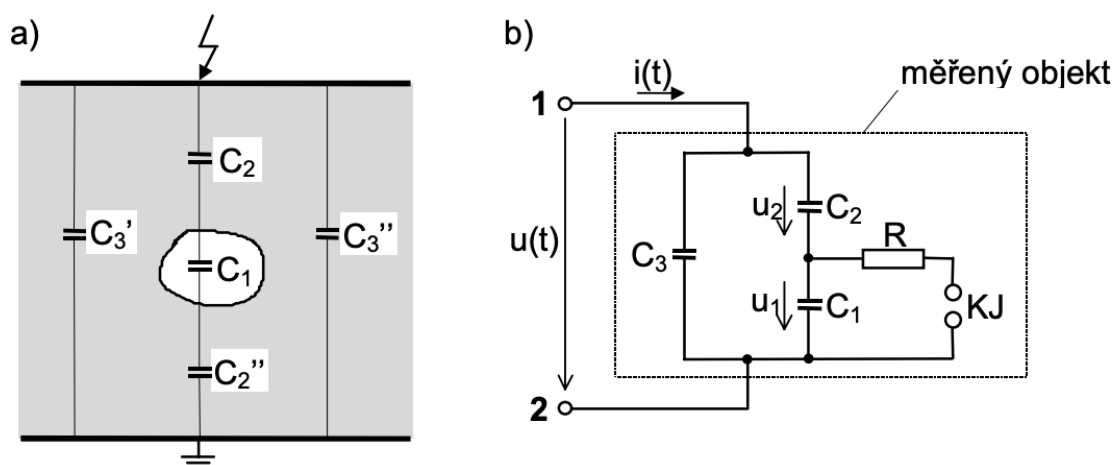
## 2 Měření částečných výbojů

Částečné výboje a jejich činnost v dielektriku má velice negativní vliv na funkci přístrojů a je spjata s velkou škálou fyzikálních jevů. Generování vysokofrekvenčního elektromagnetického záření, světelné záření viditelné i ultrafialového spektra, velké proudové pulzy, popřípadě zvukové vlny ve slyšitelném či ultrazvukovém pásmu vlnění. Ačkoli výboje nejsou vždy hlavní příčinou samotného selhání přístroje mohou mu nepřímo předcházet a zapříčiňovat jej, zejména strmý náběh čela, který se střídavou frekvencí namáhá zařízení, které není na tuto skutečnost dimenzováno. Obecným principem je detekce výbojů, jejich lokalizace a příčina čili zdroj. Metody, jež se na měření výbojů podílejí mohou být fyzikálního charakteru elektrického měření (kapacitní či induktivní sondy, měření ztrátového činitele dielektrika, metoda snímací impedance apod.) nebo neelektrického charakteru, kam spadají právě akustické, optické či chemické jevy. V současné době se klade největší důraz na on-line měření částečných výbojů, jež lze aplikovat přímo za provozu zařízení a tak není nijak narušován chod a nepřetržitý provoz, který by mohl vést ke ztrátám. [5] [18] [21]



## 2.1 Obecný model pro měření částečných výbojů

Pokud se chceme detailněji zaměřit na metodiku měření částečných výbojů je třeba poukázat na jednoduchý model a náhradní schéma pro vnitřní výboje. Náhradní schéma, jež je vyznačeno na obrázku 1.8 varianta a) představuje izolaci, kde dochází v dielektriku k selhání izolace vlivem částečných výbojů. Izolant je reprezentován kapacitou díky jeho charakteristice. Dutinka, kde dochází k selhání je v místě kapacity  $C_1$ . Zde je díky vzniku výboje porušena izolace a prostor je vyplněn plynem – prostor nazýváme dutinkou. V sérii s dutinkou je zapojena zbytková zdravá izolace, jež představuje kapacita  $C_2$  (respektive sériová kombinace  $C_2$  a  $C_2''$  zdravá izolace před a za dutinkou). Zbytková kapacita dielektrika je paralelní kombinací kapacit  $C_3'$  a  $C_3''$ . [22]



Obr. 1.8. Kapacitní model a náhradní schéma sloužící při měření částečných výbojů [22]

Náhradní schéma na též obrázku ve variantě b) ukazuje poměry proudů a napětí v zapojení měřeného objektu. Zkratka KJ a specifický symbol neukrývá nic víc než paralelně připojené kulové jiskřiště právě ke kapacitě  $C_1$  (kapacita reprezentující dutinku v dielektriku). Toto jiskřiště pak při měření simuluje přeskok ve vzduchové dutince k čemuž dochází, pokud napětí překročí elektrickou pevnost plynu v tomto prostředí. Sériově je ke kulovému jiskřišti také připojen odpor, který je tzv. odporem výbojové cesty na kulovém jiskřišti. Řádově tento děj probíhá ve skutečných dutinkách izolačních materiálů v prostorových poměrech za jednotky nS. [12] [22]

Z předchozích obrázků lze sledovat napěťové poměry kde platí: při přiložení střídavého napětí  $u(t)$  na svorky tj. 1. a 2. (obr.1.8 b) bude vypadat průběh napětí v dutince ( $C_1$ )  $u_{10}(t) = \frac{C_2}{C_1 + C_2} u(t)$  v případě kdy neuvažujeme překročení pevnosti. [22]

## 2.2 Diagnostika částečných výbojů – parametry při měření

Celá kapitola je citována dle ČSN 60270 - zdroje [1].

Při měření částečných výbojů je nutno znát jaké parametry měříme, z čehož můžeme sledovat a vynášet dané charakteristiky v jejich vzájemné závislosti. Tyto parametry lze obecně rozdělit do tří základních skupin:

- Parametry jednotlivého pulzu částečného výboje, např. zdánlivý náboj nebo tvar pulzu.
- Parametry sady pulzů částečných výbojů, např. proud částečných výbojů, součtový náboj, frekvence částečných výbojů.
- Parametry sady pulzů částečných výbojů a přiloženého napětí, např. energie částečných výbojů, výkon částečných výbojů.

Každému z hlavních uvedených příkladů výše se budeme podrobněji věnovat v následujících kapitolách.

### 2.2.1 Zdánlivý náboj

Definice dle ČSN 602 70 lze chápat jako absolutní hodnotu náboje, při jehož mžikovém zavedení mezi elektrody zkoušence se v krátkém časovém intervalu změni napětí mezi elektrodami zkoušeného zařízení na hodnotou takovou, která by odpovídala částečnému výboji z čehož vyplývá, že zdánlivý náboj simuluje náboj, jež snižuje napětí na zkoušeném zařízení při částečném výboji. Značení zdánlivého náboje je  $q$  udáváno v jednotkách náboji typickým C (coulumb), přesněji v pC u točivých strojů až nC. Jakožto hlavní měřicí parametr lze považovat zdánlivý náboj za mezinárodní rozšíření v oblasti měření částečných výbojů. V běžných měřeních se můžeme také setkat s hodnotou měření maximálního zdánlivého náboje  $q_{max}$ , za daný časový interval. Tím bývá například půlperioda napájecího napětí. [6] [23]

### 2.2.2 Součtový náboj

Součtový náboj nebo-li  $Q$  vyjadřuje součet zdánlivých nábojů  $q$  za časový interval. Časovým intervalem z pravidla bývá půlperioda napájecího napětí. Jakožto náboj je jeho hodnota opět měřena v jednotkách pC (coulumb). Oproti měření zdánlivého náboje, jež se stal jedním z hlavních mezinárodních parametrů, kterým se částečné výboje měří je od součtového náboje s postupem času upouštěno nebo je nahrazován parametrem středním proudem částečných výbojů, značeno  $I$ . [6]

### 2.2.3 Četnost částečných výbojů

Značení četnosti částečných výbojů nalezneme pod značkou  $n$  a veličiny v nichž se tento parametr udává jsou  $s^{-1}$ . Lze tedy říci, že jde o střední počet měřených částečných výbojů za sekundu. Při reálných měření bereme v potaz pouze impulzy, jež jsou stanoveny v intervalu velikost zdánlivého náboje. [6]

### 2.2.4 Střední proud částečných výbojů

Jde o součet absolutních hodnot zdánlivých nábojů značen  $q_i$  v časovém intervalu referenční hodnoty  $T_{ref}$  zvoleného měření. Logicky je označován jako  $I$ , značkou proudu. V literatuře se můžeme setkat s jednotkami A resp.  $\mu A$  či ze vztahu níže plynoucí C/s.

Vzorec pro výpočet středního proudu částečných výbojů:

$$P = \frac{1}{T_{ref}} * (|q_1| + |q_2| + \dots + |q_i|).$$

### 2.2.5 Střední kvadratický součet zdánlivých výbojů

Kvadratický součet interpretuje odvozenou veličinu, jež vychází ze součtu ploch jednotlivých úrovní  $q_i$ . Opět je tedy vztažena k určitému časovému intervalu, jímž je  $T_{ref}$ . Značení je písmenem  $D$ .

Dle vzorce níže je výpočet vyjadřován v coulombech za sekundu ( $C^2/s$ ).

$$D = \frac{1}{T_{ref}} * (q_1^2 + q_2^2 + \dots + q_i^2).$$



### 2.2.6 Dolní a horní mez frekvence

Mezní hodnoty frekvence jsou značeny jako  $f_1$  a  $f_2$ , lze se ovšem také setkat s rozdílným druhem značení jako například  $f_{max}$  a  $f_{min}$  apod. dle literatury. Co je důležité je pokles v dB ke kterému dochází u přenosové impedance  $Z(f)$  v propustném pásmu a to o hodnotu 6 dB od nejvyšší hodnoty.

### 2.2.7 Střední kmitočet pásma a šířka pásma

Značení je  $f_m$  a pro veškeré měřící systémy jej lze vypočítat podle vzorce:  $f_m = \frac{f_1+f_2}{2}$ . Naopak šířka pásma je značena jako  $\Delta f$  a vzorec pro výpočet:  $\Delta f = f_2 - f_1$ .

### 2.2.8 Výkon částečných výbojů

Jakožto výkon obecně ve všech elektrických systémech označován  $P$  (z anglického Performance) je i zde značení zachováno. Jde o odvozenou veličinu, což je střední výkon impulzu dodávaného na svorky zkoušenice způsobený zdánlivým výkonem  $q_i$  za dobu referenčního časového intervalu  $T_{ref}$ . Obdobně je také vyjádřen ve wattech (W) a počítá se jako:  $P = \frac{1}{T_{ref}} * (q_1 u_1 + q_2 u_2 + \dots + q_i u_i)$ , kde:  $u_1, u_2, u_i$  jsou okamžité hodnoty zkušebních napětí v okamžiku výskytu  $t_i$  jednotlivých úrovní zdánlivého náboje  $q_i$ . Zohledněno však musí být, zda jde o zápornou či kladnou hodnotu.

### 2.2.9 Zhášecí napětí částečných výbojů

Jedná se o přiložení napětí na zkoušené zařízení, během kterého se výskyt částečných výbojů snižuje. Zhášecí napětí se v praxi na zkoušených objektech snižuje z vyšší hodnoty, ve které lze pozorovat četnost a reprodukovatelnost částečných výbojů.

V ČSN 602 70 ho nalezneme pod označením  $U_e$  a jeho interpretace lze chápat jako nejnižší přiložené napětí, při kterém je úroveň veličiny impulzu částečného výboje menší nebo rovna předepsané nízké hodnotě.

### 2.2.10 Fázový úhel a čas výskytu impulzů částečného výboje

Fázový úhel je značen, opět obdobně jako v tématice elektrických obvodů, jako  $\phi_i$  oproti času výskytu impulzů jež jsme mohli sledovat například v souvislosti s výkonem částečných výbojů  $t_i$ . Fázový úhel se vyjadřuje ve stupních, jeho výpočet je tedy čas  $t_i$  za periodu  $T$  v násobku 360 stupňů. Výpočet tedy  $\phi_i = 360 * \frac{t_i}{T}$ , kde  $t_i$  reprezentuje čas, který je naměřen mezi zkušebním napětím kladného charakteru procházejícího nulou a impulzem částečného výboje a  $T$  je perioda napájecího (zkušebního napětí) zdroje.

### 2.2.11 Přenosová impedance

Ani u přenosové impedance nevymyslíme nic nového než notoricky známý vztah z teorie elektrických obvodů – jedná se tedy o poměr amplitudy výstupního napětí vzhledem k amplitudě vstupního proudu, jež je uvažován konstantní. Tedy  $Z(f) = U_{out}/I_{in}$ .

## 2.3 Měření částečných výbojů – obecně

Veškerá měření, jež se pro zaznamenávání částečných výbojů používají jsou závislé na několika základních jevech, jež průběh a vznik ČV provází a jsou od nich odvozeny veškeré detekční metody. Tyto metody mohou být aplikovány i na sobě nezávisle či kombinovaně. [26]

- Pohyb náboje čili vznik elektrického proudu
- Emise světla
- Vznik chemických reakcí
- Vznik mechanického vlnění, tedy zvuku
- Vznik elektromagnetického vlnění
- Dielektrické ztráty

V různých literaturách či odborných pracích jež pojednávají o měření částečných výbojů se lze setkat se dvěma základními rozděleními do měřících skupin. Zatímco řada těchto děl uvádí spíše elektrické a neelektrické metody, které, jak už název napovídá, zakládají na fyzikálním principu měření (viz výše). Lze se také setkat s metodami globálními a lokalizačními. Globální metoda zjišťuje stav objektu jakožto celku. Dozvídáme se tedy globální stav zkoušeného zařízení oproti tomu metoda lokalizační se zaměřuje u zkoušeného zařízení přímo na místo, kde částečný výboj nastává a poskytuje nám tedy lokalizaci místa poruchy. Na poslední rozdělení lze také nahlížet z pohledu zda-li zkoušený objekt při testech odpojujeme nebo jej měříme za provozu. Pokud zkoušený objekt měříme přímo za provozu – nepřetržitě, používaná metoda je on-line. Analogicky zařízení vyřazené z provozu během zkoušení se měří metodou off-line měření. V následujících řádcích si tedy projdeme jednotlivé zástupce dvou hlavních měřících skupin. [21]

### 2.3.1 Neelektrické metody

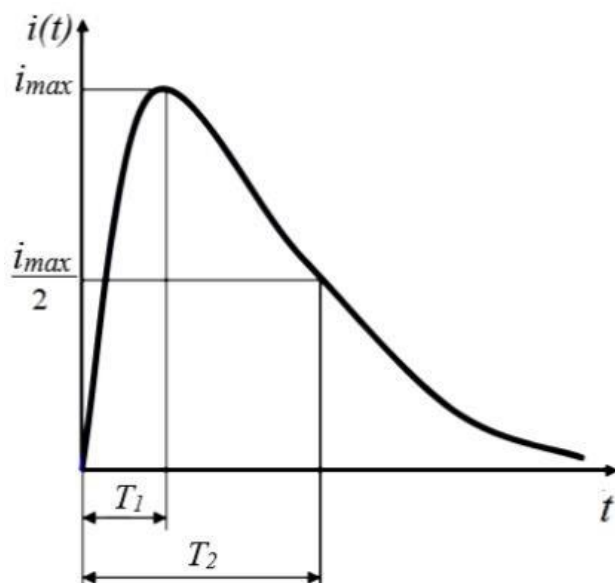
U těchto měřících metod jsou použity aspekty částečných výbojů s ohlednutím na fakt, že částečné výboje vyzařují spektrum světla, a to jak viditelné, tak i ultrafialové. Dále také zvukové vlny či chemické přeměny, které vedou k uvolnění zplodin. Veškeré z těchto poznatků lze aplikovat do měřících metod neelektrických. Vyskytující se metody: chemické, termoelektrické, akustické a v neposlední řadě optické.

### 2.3.2 Elektrické metody

Principiálně jde o měření proudových impulsů, které jsou zapalovány částečnými výboji. Impulsy jsou přímo úměrné velikosti částečných výbojů jakožto zdroje zapálení a mají charakteristickou velikost, dobu čela  $T_1$  a dobu půltýlu  $T_2$  dle druhu izolantu, ve kterém působí. Například u pevných izolantů je doba čela impulsu několik ns a doba půltýlu desítky ns. Kapalné izolanty mají doby typicky delší zhruba o 1  $\mu$ s pro čelo impulsu a několik  $\mu$ s pro dobu půltýlu. Veškerá měřící technika pracující tímto principem využívá tento jev. Velikost náboje impulsu je dán plochou pod křivkou  $i(t)$  dle vztahu:

$$q = \int_0^{\infty} i(t) dt$$

Zidealizovaný tvar proudového impulsu je naznačen na obrázku číslo 2. [21]



Obr. 2 Ideální průběh impulsu částečného výboje [21]

Příklady elektrických metod jsou tři základní [27]:

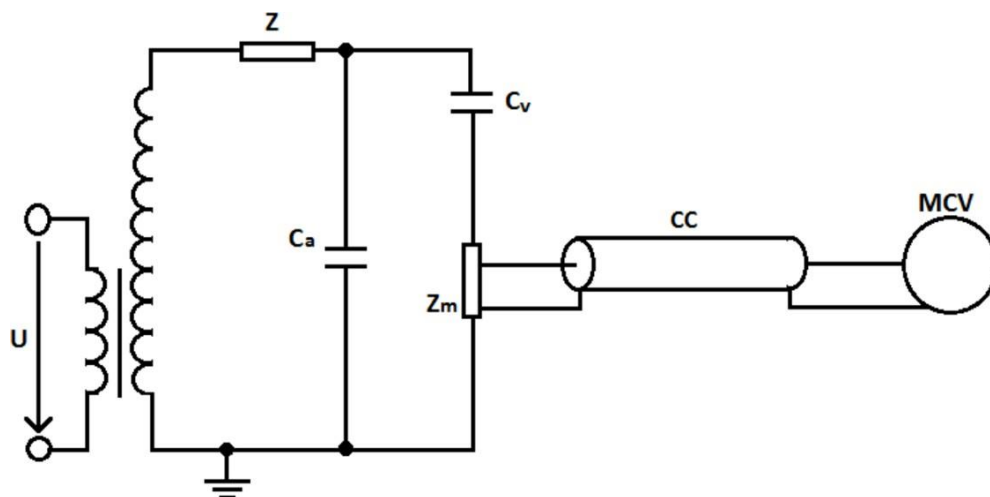
- akustická metoda,
- amplitudová analýza,
- galvanická metoda.

Jediná samostatná metoda měření nestačí k tomu, abychom obdrželi všechny informace potřebné k posouzení stavu izolačního systému. To je důvodem, proč musíme používat více měřících metod [18] [21].

### 2.3.2.1 Galvanická metoda

Jakožto elektrická metoda měří proudové impulzy způsobené částečnými výboji na snímací indukčnosti. Jedná se o globální měření čili zkoumá zkoušené zařízení vcelku. Metoda vyhodnocuje zdánlivý náboj popsán výše v kapitole 2.1.1. Častým příkladem měření je obvod s měřicí impedancí RLC členem s ochrannými prvky proti přetížení jako

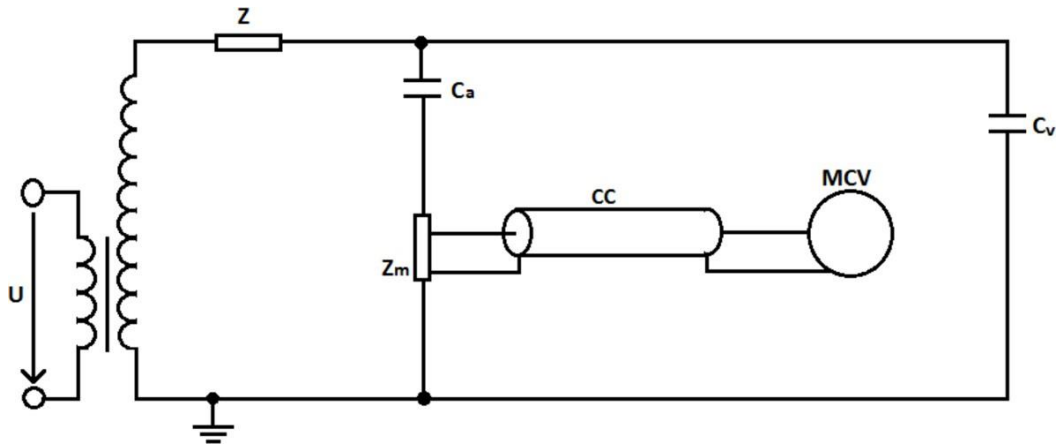
je například bleskojistka. Ta slouží k oddělení výbojů superponovaných na nosné napětí, tj. napájecí napětí zdroje, od napájecí frekvence. První ze tří základních zapojení je na obrázku 2.1 a je definován ČSN 602 70 stejně jakožto zbylé dva. První zapojení je jedno z nejčastějších pro měření částečných výbojů. Tímto způsobem lze měřit uzemněné objekty. Jednou z výhod je fakt, že při měření impulzů částečných výbojů zde nehrozí nebezpečí průrazu zkoušeného zařízení. [18] [27]



Obr. 2.1 Zapojení zkušebního obvodu, kdy je snímací impedance zapojena paralelně (převzato z [18])

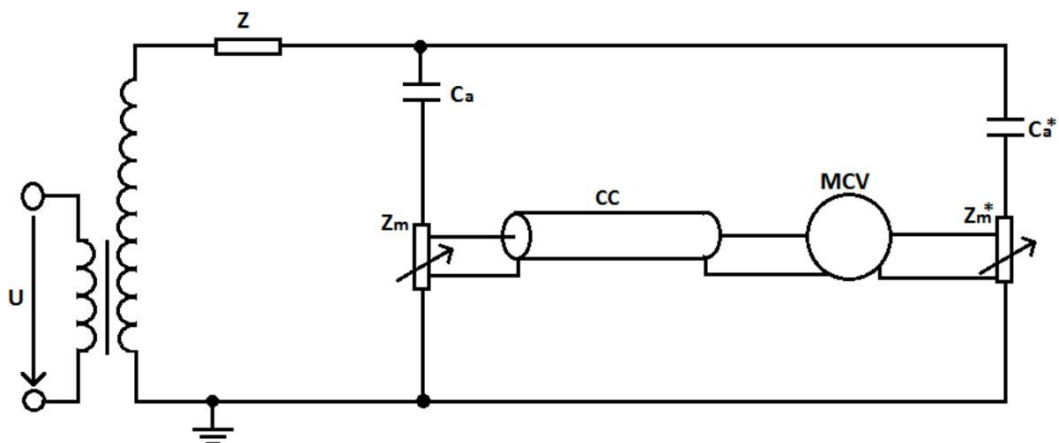
Písmeno  $U$  značí napájecí obvod, měřený objekt je reprezentován jako  $C_a$ ,  $C_v$  je vazební kapacita (v našem případě VN kondenzátor). Dále  $Z_m$  pro měřicí impedanci a MCV měřič částečných výbojů. Impedance  $Z$  je v měřicím obvodu z důvodu zamezení vlivu zdroje a k omezení průchodů impulzů jež může napěťový zdroj produkovat. Co je důležité vyzdvihnout je vazební kondenzátor  $C_v$ , který musí být správně nadimenzován pro daný měřicí obvod dle napájecího zdroje napětí. Také by v tomto kondenzátoru neměly probíhat žádné vedlejší částečné výboje které by do značné míry ovlivnily samotné měření. Oproti rozptylové kapacitě zkoušeného měřicího obvodu by pak jeho vlastní kapacita měla být co největší. [18] [27]

Následující typ zapojení je měřicí obvod se sériově připojenou impedancí. Díky sériovému zapojení se jedná o citlivější obvod, jež je použit zejména při měření zařízení, která nejsou pevně uzemněna. Citlivost zapojení zvyšují i rozptylové kapacity připojené k vazebnímu kondenzátoru  $C_v$ . [18] [21]



Obr. 2.2 Zapojení zkušebního obvodu, kdy je snímací impedance zapojena sériově (převzato z [18])

Třetí a poslední uvedené zapojení slouží zejména k odstranění vnějšího rušení obvodu. Typicky je tak toto zapojení používáno tam, kde je možné čekat EMC pole od ostatních zařízení či prostředí. Zapojení vychází z můstku se dvěma laditelnými impedancemi. Obě impedance měří rozdílné proudové impulzy částečných výbojů. [18] [21]



Obr. 2.3 Zapojení zkušebního obvodu v tzv. můstkovém zapojení s dvěma laditelnými impedancemi (převzato z [18])

Měřicí impedance je rozdělena na úzkopásmovou, širokopásmovou a ultra širokopásmovou, přičemž norma ČSN EN 602 70 doporučuje pro úzkopásmové měřicí systémy rozsah frekvencí  $9 \text{ kHz} \leq \Delta f \leq 30 \text{ kHz}$  a  $50 \text{ kHz} \leq f \leq 1 \text{ MHz}$ , 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]

V souhrnu výhod galvanické metody je třeba zmínit vysokou citlivost, velká izolační bezpečnost systému a v neposlední řadě také možnost on-line měření. Při pohledu na stinnou stránku mezi nevýhody patří jednak citlivost na rušení (a to i na rušení, které generují samotné prvky vlastního obvodu), potřeba cejchování přístrojů (při dlouhodobém používání mohou součástky pro analogové zpracování měnit parametry) a asi hlavní negativní aspekt pro mnohé instituce je pořizovací cena. [27]

### 2.3.2.2 Induktivní a kapacitní snímače

Kapacitní snímače zachycují elektrickou složku, jež je vyzářena energií elektrického výboje. Pomocí snímače induktivního poté zachycujeme složku magnetickou. Jedná se o měřící metodu nepřímou, která je vhodná zejména pro orientační zjištění výbojové činnosti. Používá se hlavně v režimu on-line měření. Použití této metody s sebou nese i problém s kvantifikací hodnot. Jelikož jde o metodu nepřímou průběhy hodnoty jsou nelineární což je problémové při kalibraci snímačů. Další z nevýhod je složitá filtrace rušivých elektromagnetických signálů. Naopak výhodou je větší bezpečnost celého měřícího systému proti přepětí.

Principiálně indikuje vznik částečného výboje vysokofrekvenční energie, jež výboje vyzařují do jejich okolí. Výkon, jež je těmito výboji do okolí uvolněn obsahuje dvě složky, tj. magnetickou a elektrickou. Velikost výkonu lze poté spočítat ze vztahu níže uvedeného.

$$w = -E \cdot \varepsilon \cdot \frac{\delta E}{\delta t} - H \cdot \mu \cdot \frac{\delta H}{\delta t}$$

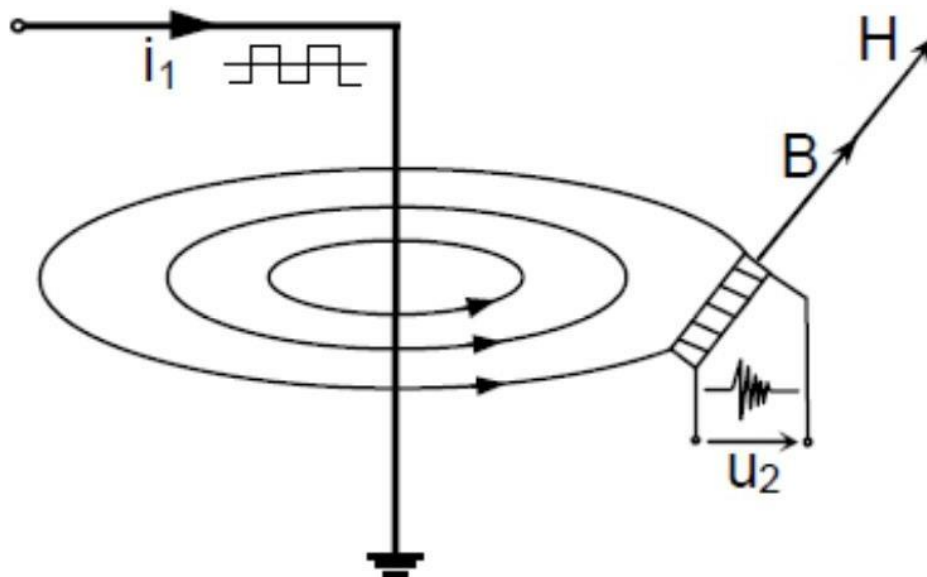
Intenzita elektrického pole je značena  $E$ , permitivita prostředí  $\varepsilon$ , intenzita magnetického pole  $H$  a permeabilita  $\mu$ . [21]

#### 2.3.2.2.1 Induktivní sondy

Dělí se na toroidní a lineární a jejich funkčnost je snímání magnetického pole vyzařovaného zdrojem částečných výbojů (viz výše).

### 2.3.2.2.1.1 Lineární induktivní sonda

Uspořádání lineární induktivní sondy lze sledovat na obrázku 2.4. Vektory magnetického indukce  $B$  a zároveň intenzity magnetického pole  $H$  jsou souběžné s podélnou osou sondy.



Obr. 2.4 Lineární induktivní sonda [18]

Nevýhodou je, že indukce může vyvolat i vnější rušení což měření dělá neprokatelné. Ovšem tomuto jevu lze oponovat použitím toroidních sond s menším počtem závitů. Výhodou je pak ochrana před přepětím, kdy není za potřebí použití měřicí impedance. [18] [21]

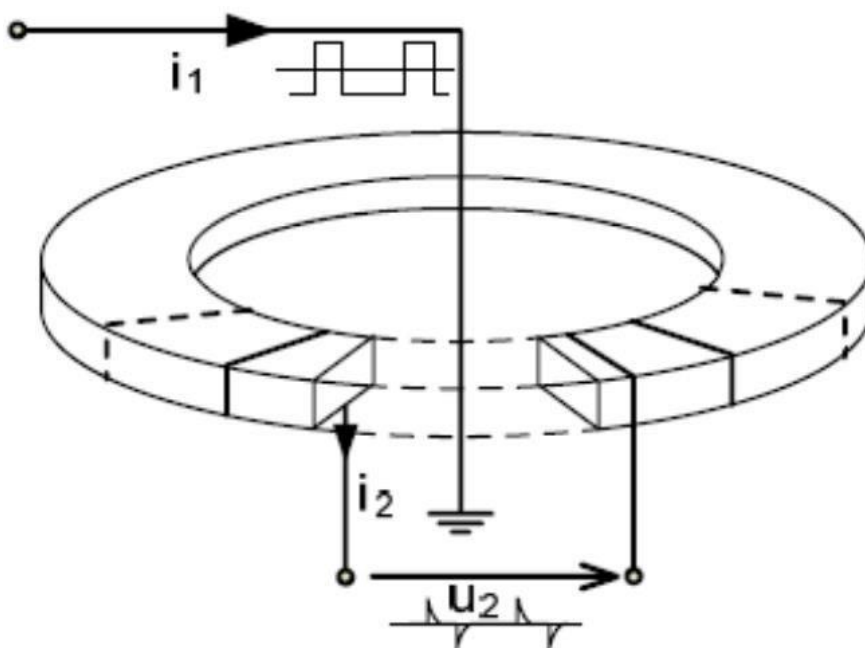
### 2.3.2.2.1.2 Toroidní induktivní sonda

Pracovní vodič uzemnění prochází středem toroidu a tvoří primární vinutí. Sekundární (vlastní) vinutí sondy, nebo-li vlastní, je poté navinuto přímo na toroid jehož jádro je vyrobeno z magneticky měkkého materiálu. Magneticky měkký materiál je ideální při použití slabších magnetických polí díky jeho snadnému zmagnetování [21]. Proudové obvody sondy jsou magneticky svázány a toroid má úzkou hysterezní smyčku což vede



k snadnému přemagnetizování. Obrázek 2.5. naznačuje uspořádání. Napětí na sekundární straně lze vypočítat vztahem:  $u_2 = -i_1 \cdot R_2 - L_2 \cdot \frac{di_2}{dt} + M_{21} \cdot \frac{di_1}{dt}$ , kde  $u_2$  je napětí výstupní,  $R_2$  činný odpor,  $i_1$  proud primárního vinutí,  $i_2$  proud sekundárního vinutí,  $M_{21}$  vzájemná indukčnost mezi oběma vinutími a  $L_2$  vlastní indukčnost cívky. Metoda s toroidním induktivním spínačem se nepoužívá zejména pro měření kondenzátorů, neboť u nich postrádáme zemní spojení. Další nevýhodou je nutnost přerušení elektrického obvodu v porovnání se sondami lineárními kde k přerušení elektrického obvodu nedochází. Tento fakt je u lineárních induktivních sond považovaný za jednu z výhod.

[21]



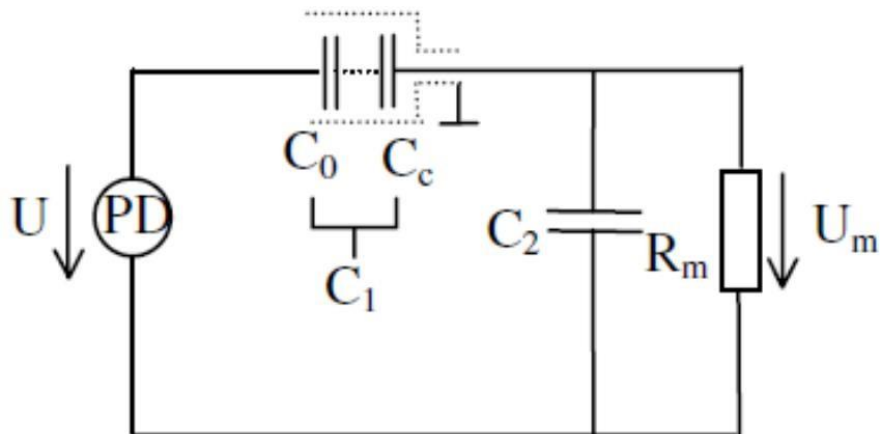
Obr. 2.5 Toroidní induktivní sonda [18]

### 2.3.2.2 Kapacitní sondy

Kapitola převzata z [18] [21]

Fungují na principu měření významně krátkých přechodových jevů a to v řádech ns. Takto krátké časové konstanty určují požadavky na obvody, které se starají o zpracování signálů a také na parametry sond samotných. Na vstup sondy je připojen rychlý diferenciální zesilovač. Zesilovač kromě samotného zesílení potlačuje vnější rušivé pole. Kapacitní snímač, se kterým se setkáme nejčastěji, je typ s koaxiálním kabelem. Důležitým parametrem je frekvenční odezva kapacitního senzoru. Konstrukční uspořádání je z úzkého kovového pásku, jež je ovinut na měřeném místě.

Prostor poruchy generuje také elektrické pole  $E$  společně s magnetickým  $H$  a jejich velikost lze zjistit pomocí amplitudy proudového impulsu, který není opět ovlivněn ničím jiným než velikostí částečného výboje. Měřicí obvod je schématicky naznačen na obrázku 2.6.



Obr. 2.6 Schématický obvod kapacitní sondy [37]

Toto náhradní schéma je tvořeno jednak ze signálu částečného výboje, tj.  $U_{pd}$ , kapacitního snímače  $C_1$  a vstupní RC části samotného zesilovače.  $C_C$  značí kapacitu snímače, zatímco  $C_0$  je kapacita mezi snímačem a zkoušeným zařízením.  $R_m$  reprezentuje vstupní odpor zesilovače a  $C_2$  jeho vstupní kapacitu. [37]

Mezi nevýhodami nalezneme fakt, že zdroj částečných výbojů musí být odstíněný a tudíž nedostáváme informaci o přesném místě kde k poruchám částečnými výboji dochází. Dalším trnem v patě této metody je také nevhodnost pro měření kondenzátorů, neboť Faradova klec blokuje elektromagnetické záření.

### 2.3.3 Akustická detekce částečných výbojů

Při této metodě lze považovat za jednu z výhod možnost měření za provozu zkoušeného zařízení, kdy současně dochází i k lokalizaci místa poruchy částečných výbojů. Také elektrické rušení okolních přístrojů a vliv prostředí (obecně EMC) má při tomto měření minimální vliv. Principem je snímání akustických signálů, jež vznikají v důsledku přeměny proudového impulsu, který je zapříčiněn částečným výbojem v izolačním materiálu, na mechanickou energii. Ačkoli se jedná o akustickou metodu tyto signály jsou daleko mimo práh slyšitelnosti a k jejich zachycení se používá směrových mikrofonů. Mikrofony zaznamenávají zvukové spektrum těchto impulsů na principu

piezoelektrického jevu. Pro vykreslení signálu na osciloskop je signál dále zesílen pomocí vhodného zesilovače za využití tzv. vlnkové a diskrétní vlnkové transformace. [18] [21] [28] [29] [30]

### 2.3.4 Chemická detekce částečných výbojů

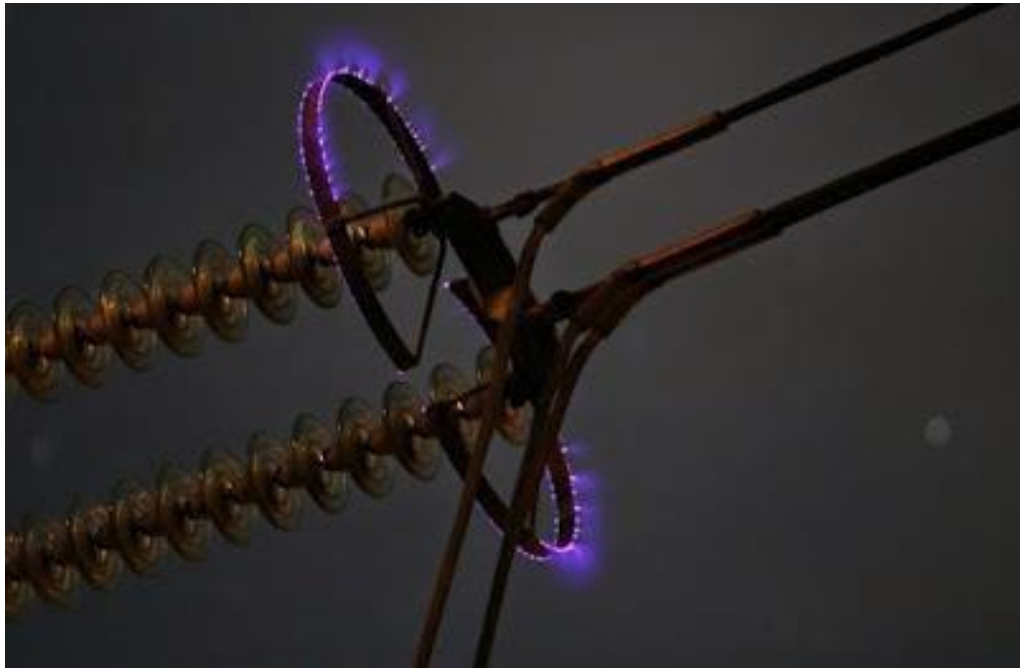
Oproti akustické metodě je zde poměrná výhoda jednoduchosti metody. Stejně jako u předchozí této metoda probíhá při provozu zkoušeného objektu. Například u elektrických točivých strojů funguje tato metoda principem zjišťování uvolňování ozónu v chladícím vzduchu. Koncentrace ozónu lze zjistit metodou kolorimetrickou či metodou fotometrickou. Zatímco kolorimetrická metoda funguje na principu detekce pomocí tzv. modrého roztoku (modrý roztok je indikační látka založena na bázi indiga – při reakci s ozónem se začne odbarvovat), při měření fotometrickou metodou je využito absorpce UV záření ozónu. Měření ozónu se udává v jednotkách ppm (part per million, nebo-li miliontiny celku). [31]

Z odstavce výše vyplývá i princip samotné metody, jež klade důraz na měření vedlejších produktů, které vznikají při výbojové činnosti v zařízení. Dle rozdílných izolačních materiálů či transformátorového oleje při takovéto reakci vznikají typické plyny. Příkladem je například vznik CO či CO<sub>2</sub> při reakci v papírové izolaci transformátoru. [32] [33] [34]

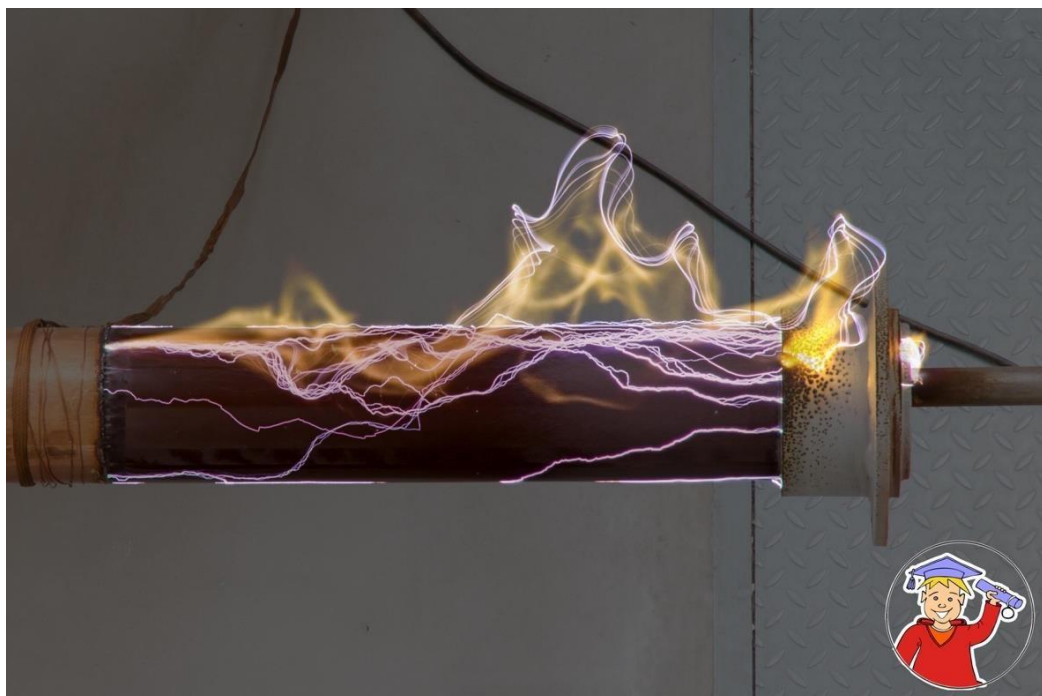
### 2.3.5 Optická detekce částečných výbojů

Asi nejjednodušším způsobem se kterým se lze setkat je přímé sledování zkoušeného zařízení, jež vyzařuje světelné záření. Toto sledování lze ovšem provádět pouze na místech zkoušeného zařízení, které jsou viditelné pouhým okem ačkoli lze napomoc detekci například zkoušením v zatmaveném prostoru nebo v naprosté tmě ve zkušební komoře. Jiným způsobem je měření UV záření pomocí speciální kamery. Upravená kamera dokáže zachytit spektrum záření s kombinací ultrafialového senzoru a běžné kamery což vede k možnosti měřit a slabší UV záření. Při optické detekci nelze opomenout také optická vlákna, která zachycují světelný paprsek. Princip funguje na závislosti optických změn a mechanických vlastností optických vláken na změně tlaku prostředí ve kterém se nacházejí. Jiná možnost je také měření termokamerou. Podle platných fyzikálních zákonů jakákoli výbojová činnost a s ní spojené emise světla

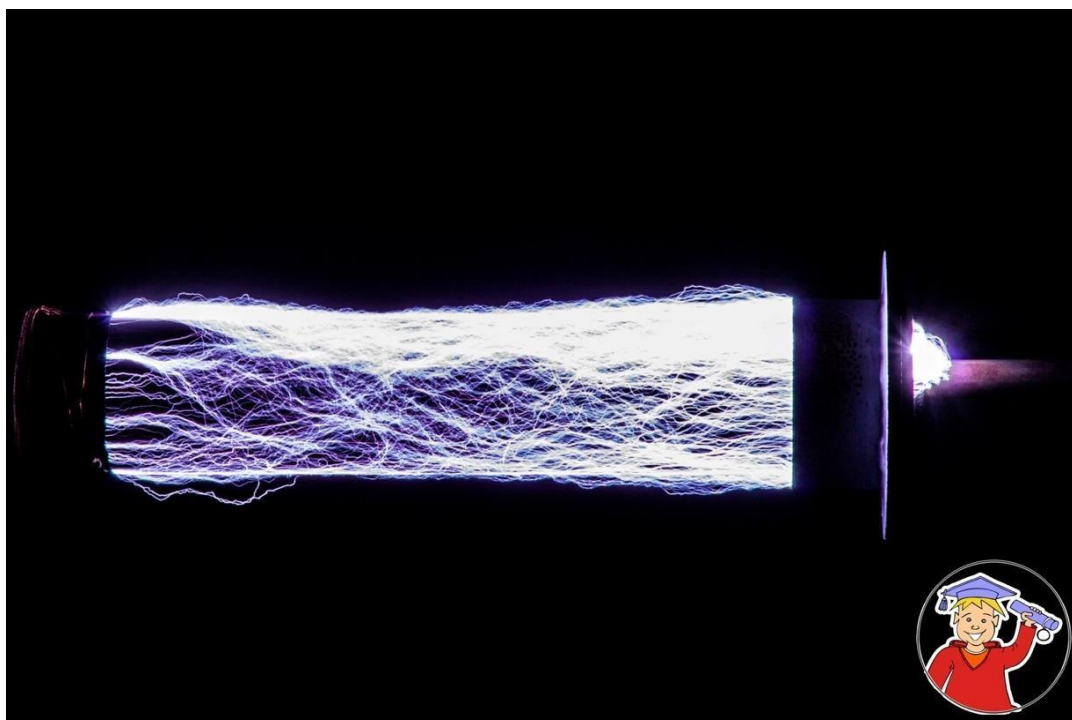
produkují energii. Tato energie je ve formě tepla – zde tedy vstupuje do hry termokamera jež drobné tepelné emise zachytí. [32] Asi nejběžněji pozorovatelným částečným výbojem je koróna a klouzavé výboje. Oba představitelé jsou vyobrazeny níže.



Obr. 2.7 Korónové záření na izolátoru vedení VN [35]



Obr. 2.8 Zapálení klouzavých výbojů na povrchu izolátoru VVN, měření v laboratoři VVN, ZČU v Plzni [36]

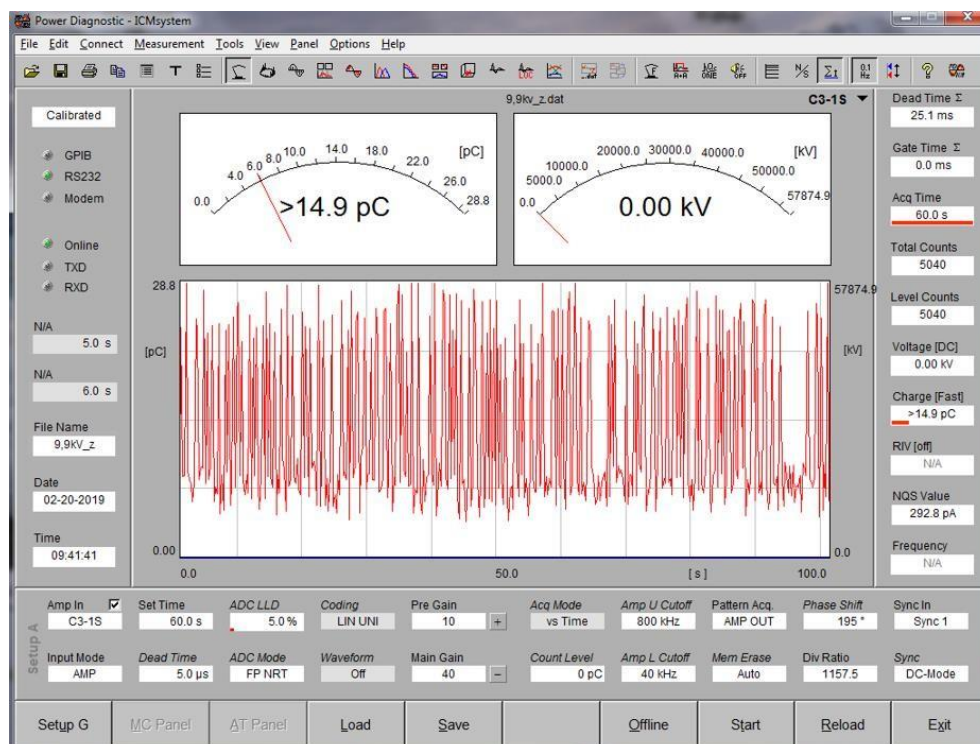


*Obr. 2.9 Klouzavé výboje na povrchu izolátoru VVN při pohledu ve tmě, měření v laboratoři VVN, ZČU v Plzni [36]*

### 3 Experimentální část

V této kapitole budu vycházet z uživatelského manuálu jež je poskytován k zařízení popisující jak software, tak i hardware. Lze ho získat pouze na žádost přímo od výrobce zařízení Power Diagnostix. [38]

Pro měření částečných výbojů je používán systém zvaný ICM. Jedná se o detektor plně ovládaný skrze počítač. Ovládání a zobrazení všech kontrol je přístupné skrze grafické rozhraní programu, někdy nazýváno také virtuální rozhraní. Princip systému je měření pulzů částečných výbojů při respektování rozsahu těchto pulzů, jejich pozice fáze a jejich následné zobrazení na tří-dimenzionálním modelu či dalším režimu dle programu. Další z vlastností je funkce on-line měření s časovým zobrazením hodnoty částečných výbojů v coloumbech (osa y) v závislosti na čase (osa x). Toto uživatelské rozhraní je zobrazeno na obrázku níže.



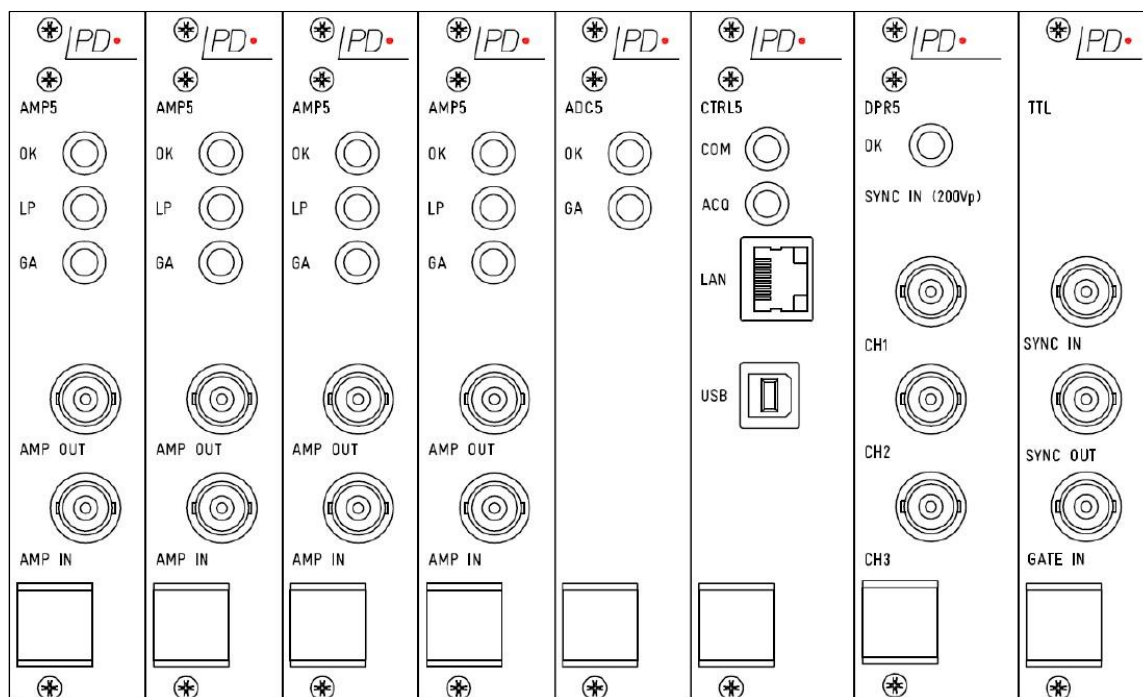
Obr. 3 Zobrazení uživatelského rozhraní programu ICMsystem Power Diagnostic

V následujících dvou kapitolách se podrobněji zaměříme na ICM system detektor a popíšeme si podrobněji jeho hardware jakožto i jeho software, neboť tento systém je klíčem k celému měření a dosažení experimentů měřených objektů.

### 3.1 ICMsystem Hardware

#### 3.1.1 Hlavní jednotka

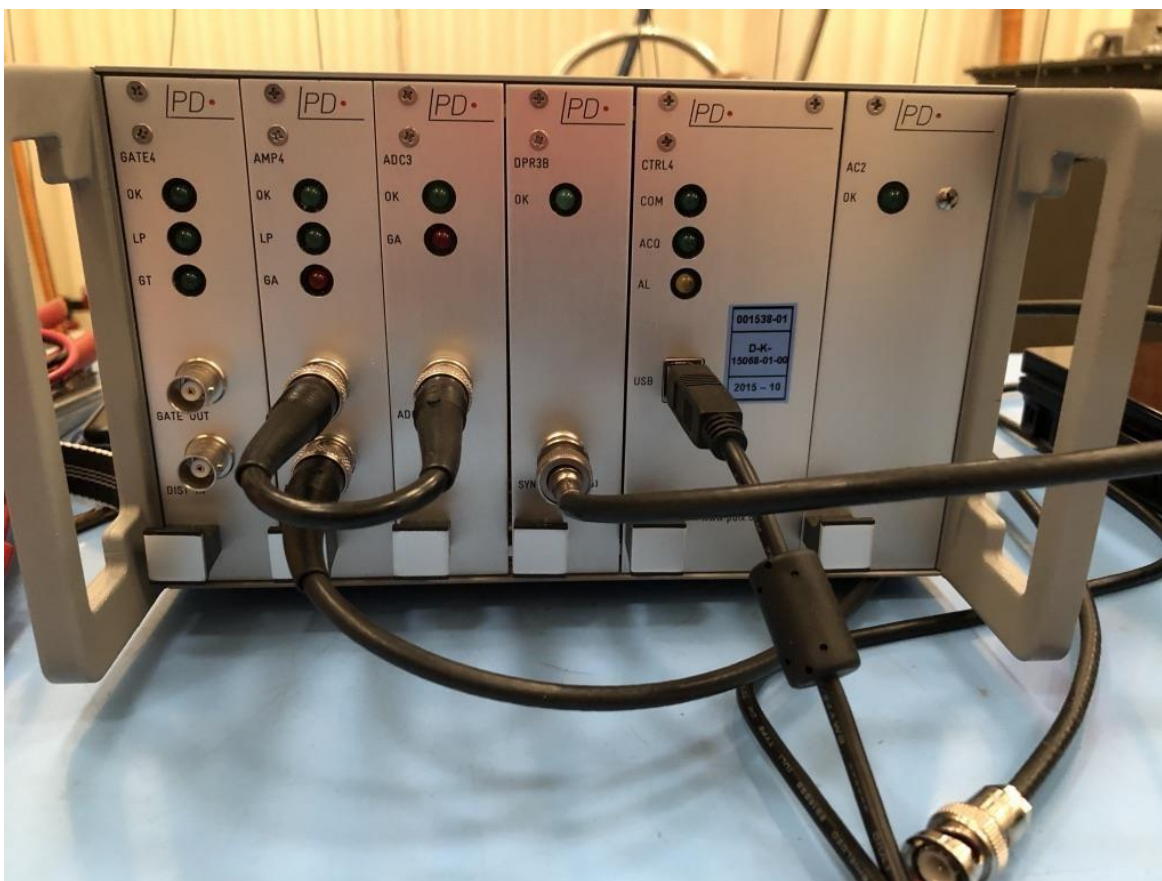
System je založen na modulárním konceptu. Několik modulů zesilovacích (*acquisition*) jednotek dohromady je spojeno jako jedna centrální jednotka jež pracuje v závislosti na použití. Jednotlivé karty vany obsahují porty pro vstupy a výstupy. Konstrukčně je zhotovena vana z malého metalového rámu, který obsahuje všechny dílčí subsystémy (tj. moduly, zesilovače, A/D převodníky, mikro-počítače, elektrické obvody). Přední panel přístroje je na obrázku 3.1 a 3.2 a slouží pro zpracování rozdílných vstupních a výstupních signálů, zapojení konektorů, synchronizaci a v neposlední řadě také LED indikaci dle kontrollek.



Obr. 3.1 Schématický náčrt čelního panelu detektoru částečných výbojů

Přístroj, jež je používán pro měření přímo v laboratoři ZČU, KEE v Plzni má celkem šest modulů a je jednocanálový. Fyzický pohled na měřicí detektor pak vypadá následovně:





Obr. 3.2 Reálná fotka detektoru částečných výbojů v laboratoři TVN, ZČU Plzeň

Modul AC2 ležící v pravé části přístroje slouží k napájení celého přístroje, jehož vstupní napětí je v rozsahu od 95 do 260 V střídavých, po zapnutí se rozsvítí indikátor - zelená LED dioda.

Modul CTRL4 slouží jako systémové a komunikační rozhraní pro výstupy GPIB a USB. Funkce reprodukovatelnosti měření koření právě v tomto modulu kde je zakomponován i reproduktor, který reprodukovatelnosti napomáhá. LED dioda s označením COM signalizuje komunikace s připojeným počítačem. Naopak dioda ACQ znázorňuje probíhající sběr dat a dioda AL bliká při výskytu částečných výbojů.

Modul DPR3B má časovou referenční a fázovou logiku, obvody pro měření napětí a vícekanálovou paměť. Pro vzorkování a sběr dat se zde nachází akviziční jednotka vstupního napětí uzpůsobena tak, aby program mohl měřený signál zobrazit ve skutečném tvaru. Jednotku lze také používat v závislosti na externím zdroji napájení či napájením přímo ze sítě při připojení přímo do její zadní části. Svítící LED dioda hlásí funkčnost synchronizace.



Modul ADC3 zpracovává impulzy, určuje jejich velikost spolu s polaritou a součástí je A/D převodník. Ten slouží k převodu analogového signálu na digitální. Tento modul je z našeho pohledu velice důležitý, neboť detailní nastavení převodníku ovlivňuje celé měření skrze šum či opakované oscilující signály. Nastavitelnost hlavních parametrů *Dead Time*, *ADC Mode* a *LLD* je podrobněji probráno v kapitole 3.2.1. Zelená LED dioda indikuje úspěšnou kontrolu hlavních funkcí naopak 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. Dále také obsahuje analogový spínač, 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.

Modul GATE4 má funkci eliminace rušivých signálů, jež by mohly být zaznamenány z okolí. Tedy porovnává velikost rušivého signálu z okolí, která když je překročena nad nastavenou mez, vysláním signálu přeruší záznam na AMP4 nebo (současně) na ADC3 modulu. Fyzicky má stejné obvody jako modul AMP4 s filtry, předzesilovačem a vnitřními zesilovači.

### 3.1.2 Signální před-zesilovač RPA1L ICM systému

Další dílek do měřicího obvodu, který souvisí s měřícím systémem ICM je také před-zesilovač. Tento prvek je důležitý pro specifické zesílení signálu, které závisí na



Obr. 3.4 Fotka signálního před-zesilovače RPA1L

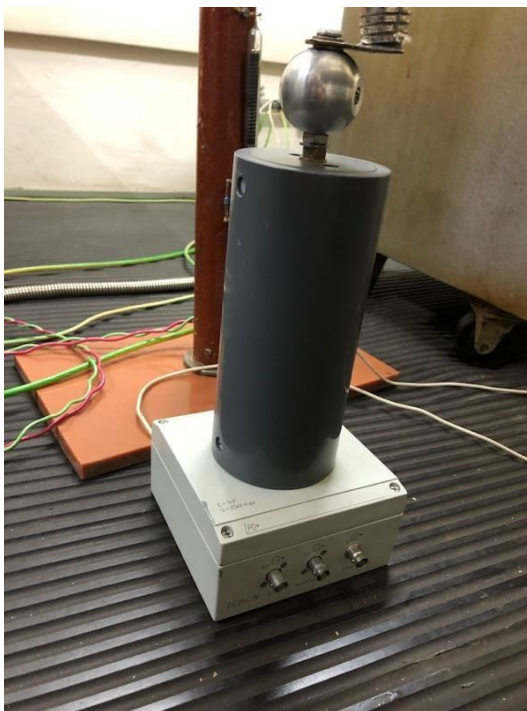
dané aplikaci, volbě personálu, dalších použitých přístrojů a daném měření. Tento před-zesilovací modul pracuje ve spojení přes koaxiální kabel s označením RG58 díky čemuž lze umístit modul poměrně blízko senzoru či zdroji signálu. Navíc, chování tohoto modulu je zcela impedančního

charakteru (impedanční konvertor) což vede k výhodě, že kapacita či impedance kabelu neovlivňuje signály slabších zdrojů napětí (např. napěťový dělič či spojovací impedance). Navíc, disponuje zvýrazněnou ochranou proti přepětí díky této technice. Používá se zejména pro měření na nižších frekvencích.

### 3.1.3 Vazební kapacita ICM systému

Pro běžně používané měření s tímto systémem je použita velká škála kapacitních vazebních jednotek, které slouží jak pro on-line tak off-line měření. Jelikož i repertoár možných kandidátů na měření je rozsáhlý ruku v ruce s ním jde také řada kapacitních vazebních zařízení. To může být v případě potřeby děláno přímo na míru specifickému měření a je tak ke každému jedinci dodáván jeho vlastní list parametrů.

V našem experimentu používáme zařízení s označením CC25C/V. Jedná se o kapacitní celek zaměřující se především na měření dočasných instalací na rotačních strojích nebo transformátorech.



Obr. 3.5 Vazební kapacita CC25C/V

Specifikačně udává data sheet parametry jako měření při teplotě od  $-20^{\circ}\text{C}$  do  $+75^{\circ}\text{C}$ , jmenovité napětí  $U_{\max} = 25\text{kV}$  a velikost kapacity prvku  $C = 1\text{ nF}$ . Zejména velikost nominálního napětí byla v našem měření klíčová, neboť jsme vždy experimentálně postupovali do právě zmíněných 25kV nikoli výše.

Hlavní funkcí vazební kapacity je hrazení úbytku náboje, který je na zkoušeném objektu způsoben částečným vybitím této kapacity v důsledku výskytu částečných výbojů. Proudový impulz, který je měřen, je způsoben přesunem tohoto náboje – měření tak poskytuje představu o velikosti zdánlivého náboje a z toho také částečných výbojů.

### 3.1.4 Kalibrátor CAL1A pro ICM systém

Nedílnou součástí měření je také prvotní kalibrace měřicího systému. Kalibrace probíhala v našem případě připojením kalibrátoru, v beznapětovém stavu, na měřící vzorek. Principem je vytváření impulsů o známe hodnotě, jež jsou změřeny a posouzeny obsluhou. Tyto známé a přesné impulzy slouží jako referenční hladina při měření náboje ČV. Nastavení impulsů činilo 100 pC na což byl celý software kalibrován. Samotný kalibrátor je dodáván se stejnojmenným systémem ICMsystem a nese certifikaci jedné z předních Německých institucí, kde prošel důkladnými testy než mohl být zařazen mezi výzbroj měřicího celku.



Obr. 3.6 Kalibrátor s typovým označením CAL1A, ICMsystem při kalibrování na použitých 100 pC pro experimentální měřící obvod

## 3.2 ICMsystem Software

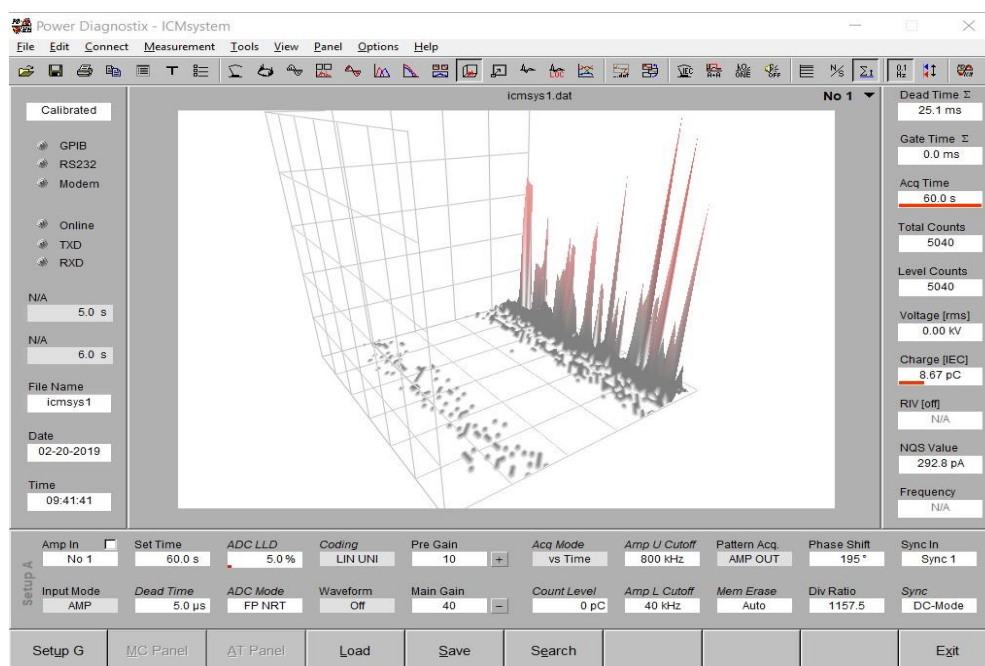
Rozhraní ICMsystem poskytuje komunikaci mezi zařízením a zobrazovací jednotkou (v našem případě počítač). Systém obsahuje všechny potřebné funkce, které

zajišťují kontrolu prvku, zobrazení a úpravu nastavovaných parametrů jak měření, tak i vyobrazení. Měření lze také ukládat, opětovně načíst či přenést do jiného zařízení.

Uživatelské rozhraní systému je vyobrazeno na obrázku č.3 v počátku experimentální kapitoly, tj. 3., kde je zachycen režim on-line měření, software při měření vzorku tenkého vodiče s napětím 9.9kV.

Horní část obrazovky zobrazuje reálné hodnoty náboje v coulombech, které v měřeném vzorku působí částečné výboje. V pravé části je pak možno také sledovat aktuální hodnotu napětí (to bylo v našem případě měřeno zvlášť multimetrem). Centrální displej poté vykresluje aktuální měření náboje v závislosti na čase a může být přepnut do celé škály různých režimů.

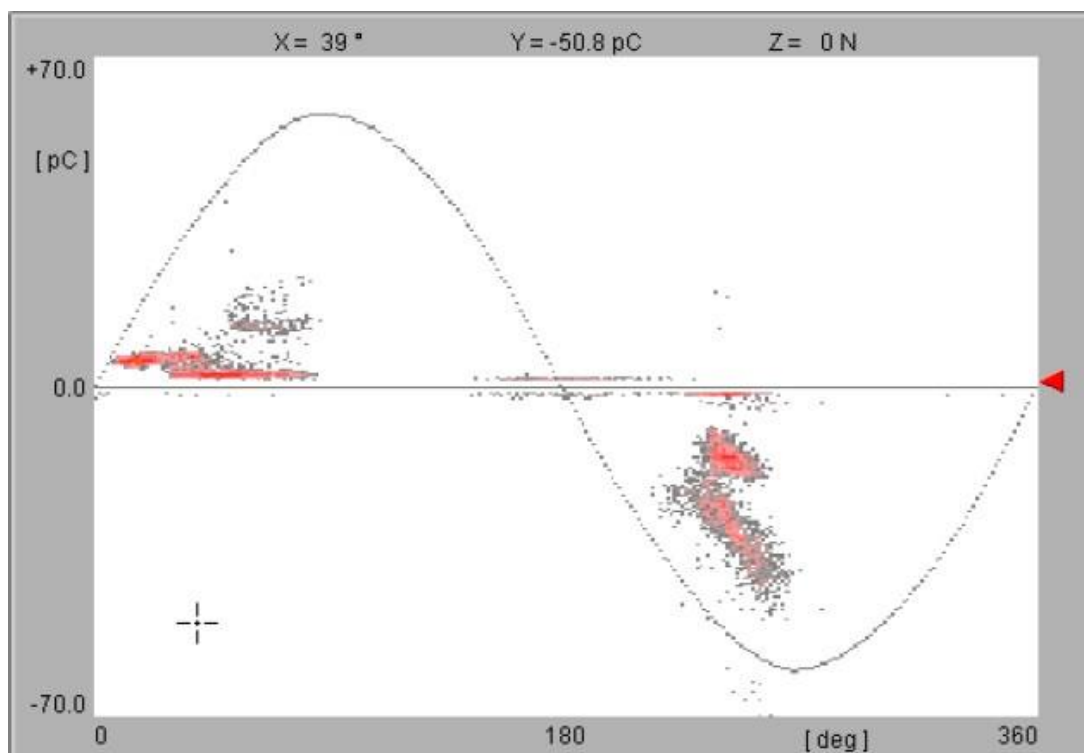
Celkem i s hlavním režimem jich program nabízí 11 jako osciloskopický, eliptické vykreslení fáze v rovině  $0^\circ$  až  $360^\circ$  rozděleno do půlvln, spektrální vykreslení, vykreslení částečných výbojů v porovnání s fází či v porovnání s nábojem a další. Z hlediska uživatele je pak celkem zajímavý 3D-animační mód, který v prostoru vykresluje četnost (intenzita vyobrazena červeně) a velikost výbojů v jejich čase. Obrázek 3D-animačního režimu je na obrázku 3.7, kdy byl měřen se stejnými hodnotami. Pro nás stěžejní režim je ten s označením „map“, nebo-li pomyslené mapování částečných výbojů, resp. jejich četnosti a velikosti v čase.



Obr. 3.7 Zobrazení měření v režimu 3D-animačním, vykreslení náboje částečných výbojů v závislosti na čase, intenzitě a četnosti.

V programu lze nastavit velké množství možných parametrů a funkcí, které přímo i nepřímou ovlivňují průběh a vyobrazení měření. Hlavní z parametrů si detailněji probereme v následující kapitole. Nicméně, některé z těchto parametrů lze sledovat na téže obrázku v pozicích podbloku s označením „Setup A“. Tři hlavní parametry pro naše experimenty jsou *Dead Time*, *ADC Mode*, *ADC LLD*. Proč a jak ovlivňují měření si vysvětlíme dále.

Předtím se ale podíváme na zmiňovaný režim „map“ použitý v našem experimentu. Režim zobrazuje amplitudu fáze napětí a jednotlivé tečky zastávají specifické pulzy v dané fázi pozice (X-osa) s respektováním synchronizace zdroje ve stejné specifické pozici, zatímco vertikální osa zobrazuje velikost náboje (Y-osa). V případě, že nastává více než jeden pulz ve stejných souřadnicích tečky mění barvu což vizualizuje vyšší četnost. Tento režim je vyobrazen vedle. Pro naše měření byl identický s jediným rozdílem, že veškerá měření probíhala při DC napětí. Tudíž napětí nebylo střídavé s fází jako na obrázku ale pouze přímka.



Obr. 3.8 Režim „map“ pro měření částečných výbojů

### 3.2.1 Nastavení parametrů měřicího nástroje ICMsystem

Parametrů, kterými lze měření částečných výbojů ovlivňovat je velká škála i samotný přístroj jich nabízí poměrně dost. Nalezneme je v podbloku „Setup A“ což bylo popsáno výše a jejich nastavení lze provádět, jak přímo hodnotami, jež jsou předefinovány v programu, tak i libovolnou hodnotou dle uživatelské potřeby. Jednotlivé možné nastavení jsou:

- Dead Time
- ADC Mode
- ADC LLD
- Coding
- Set Time
- Waveform
- Pre Gain a Main Gain

Nyní se na každý z těchto parametrů zaměříme v detailu, přičemž pro nás tři stěžejní jsou první tři *Dead Time*, *ADC Mode* a *ADC LLD*, resp. i čtvrtý *Pre Gain a Main Gain*, který jsme taktéž hojně používali.

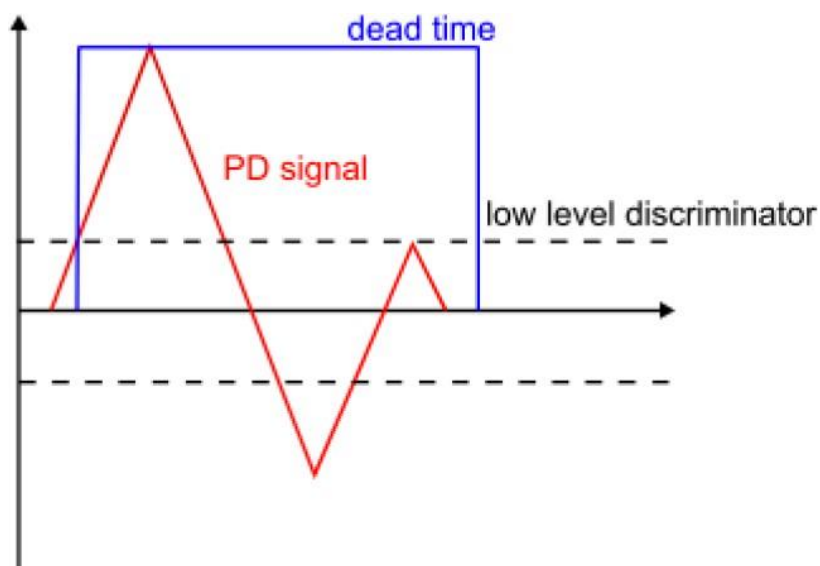
#### 3.2.1.1 ADC LLD

Hladina *LLD*, nebo-li *Low Level Discriminator* – *potlačení nízkých úrovní*, potlačuje nízkonapěťové výboje pod právě zvolenou hodnotu hladiny. Typickým použitím, které jsme provedli i v našem případě experimentů, je potlačení šumu z pozadí. Důležitý je nastavovat hladinu obezřetně neboť při vyšší necitlivosti nepotřebných hodnot může lehce dojít i k ztrátě měřicích dat, které nebudou zaznamenána. Naopak při velkém měřicím objemu dat s nízkým nastavením hladiny *LLD* může při zahlcení měřicí jednotky dojít opět ke ztrátě dat. Je tedy třeba najít určitý kompromis mezi dolní a horní úrovní. Nastavení lze provádět přímo kurzorem na měřicí mapě což je uživatelsky příjemné.



### 3.2.1.2 Dead Time

Volně přeloženo by se dalo definovat jako tzv. mrtvý čas. Z logiky věci tedy plyne, že po tento čas nebude přístroj měřit. Výhodou této skutečnosti je, že se lze setkat s měřeními kde díky oscilujícímu signálu přístroj zaznamená vícenásobné impulzy které měření znehodnocují, a to při překročení *LLD* hodnoty přístroje. Znázornění je na obrázku níže. Pokud postoupíme k nastavení je patrné, že jde ruku v ruce i s nastavením *LLD*, a to v souvislosti s výbojovou činností ale také po stránce hardwarové. Defaultní hodnota nastavení *Dead Time* je 5  $\mu$ s čím musí být operováno s rozmyslem. Pokud je hodnota příliš velká nemusí být zaznamenán následující výboj, a pokud naopak malá detektor výboje zaznamená vícenásobně.



Obr. 3.9 Graf funkce *Dead Time* a *LLD*

### 3.2.1.3 ADC Mode

Tento režim je pouze pro nastavení měření při střídavém či stejnosměrném napětí. Při změně na střídavé napětí je měřený výboj vztažen v závislosti na fázi (*vs Phase*) a naopak při měření stejnosměrných zařízení potom v závislosti na čase (*vs Time*).

### 3.2.1.4 Pre Gain a Main Gain

Parametr, jež poskytuje v kombinaci předzesilovače a hlavního zesilovače zesílení měřeného signálu. Slouží pro optimální zobrazení dané měřené veličiny. Ovládání lze provádět tlačítky + a – jakožto také číselně přímo na danou hodnotu.

### 3.2.1.5 Coding

V případě kódování lineárního unipolárního slouží *coding* pro měření částečných výbojů při stejnosměrném napětí, opakem je nastavení lineární bipolární pro měření částečných výbojů při střídavém napětí, a to kladné i záporné. Při měření s použitím bipolárního nastavení nalezneme výhodu dvojnásobné kvantovací frekvence při němž měření probíhá.

### 3.2.1.6 Set Time

Set Time neudává nic víc než nastavení doby měření, kdy minimální doba, po kterou můžeme měření provádět je stanovena na hodnotě 10 ms.

### 3.2.1.7 Waveform

Pomocí nastavení waveform lze ovlivňovat křivku napětí. Ta je posléze superponována do záznamu měření částečných výbojů. Křivka zohledňuje deformaci sinusového signálu, pokud k ní dochází a také jí lze na obrazovce fázově posouvat nastavením hodnoty *Phase Shift*.

## 3.3 Realizace experimentů

Tato kapitola bude věnována samotné realizaci experimentů, tedy počínaje přípravami k samotnému provedení.

Měření probíhalo pomocí galvanické metody, která byla popsána výše v kapitole 2.3.2.1. Samotná příprava byla založena hlavně na studiu manuálu ICMsystem pro práci s detektorem částečných výbojů, neboť toto zařízení bylo, již mnohokrát zmíněno, stěžejní. Neméně důležité však byly také ostatní zařízení v rámci experimentálního obvodu.



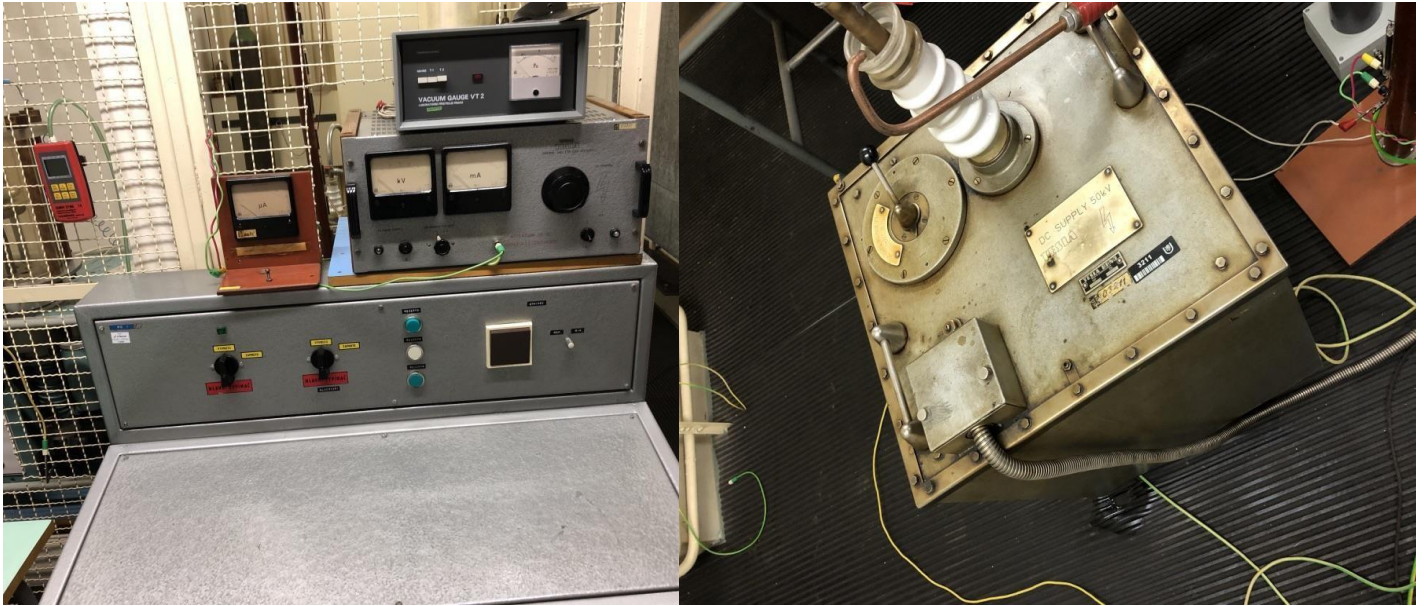
Jak reálně měření vypadalo je na fotce níže (obr.4) jež záměrně není zmenšen. Při postupu zleva doprava si popíšeme jednotlivé zařízení a přístroje.



Obr. 4 Reálné zapojení měřícího obvodu s modelem vedení (vodič s průměrem 0,5 mm) a níže s modelem průchodky

První, na co oko narazí je velký odporový dělič vyrobený přímo na katedře KEE/ZČU. Ten slouží k převodu napětí 1:1000 pro snadné odečítání napětí z paralelně připojeného multimetru METRA Hit 14s. Multimetr se nacházel na ovládacím pultu a jednalo se o typ od společnosti (Metra Hit s označením 14s). Následuje napěťový zdroj pro napájení celého obvodu s regulací pomocí potenciometru. Ten je zapojen přes vazební kapacitor (typ CC25C/V) právě k měřenému vzorku což je v tomto specifickém obrázku model vedení s tenkým vodičem. K samotným vzorkům se ovšem ještě dostaneme dále. Před napěťovým zdrojem lze přímo na izolační podlaze vidět právě vazební kapacitor měřicího systému ICMsystem CC25C/V a před ním také před-zesilovač RPA1 propojené přes koaxiální kabel přímo do modulu měřicího detektoru jež se nachází mimo měřicí oblast v beznapěťové zóně z důvodu bezpečnosti obsluhy. Samotný měřicí vzorek což je dřevěná deska s izolátory pokryta vodivou izolační vrstvou nad níž je svírán vodič vezmeme do drobnohledu v samotné kapitole. Ovšem oko zkušenějšího si povšimne posledního přístroje, který sloužil pro experimentální měření nepřímo. Jedná se totiž právě o kalibrátor CAL1A popsán v kapitole 3.1.4. Tento kalibrátor byl zapojen pouze před samotným měřením v beznapěťovém stavu a sloužil ke kalibraci detektoru, nicméně i toto si detailněji rozebereme níže v postupu měření. Druhý obrázek ukazuje naopak vzorek průchodky v pozici stojící, ostatní přístroje jsou identické. Nyní tedy k tomu, o čem by bylo dobré se aspoň slovem zmínit, tj. napěťový zdroj typu BS 222a, DC 50kV od společnosti TESLA Brno laboratoře vysokého napětí Západočeské Univerzity v Plzni.

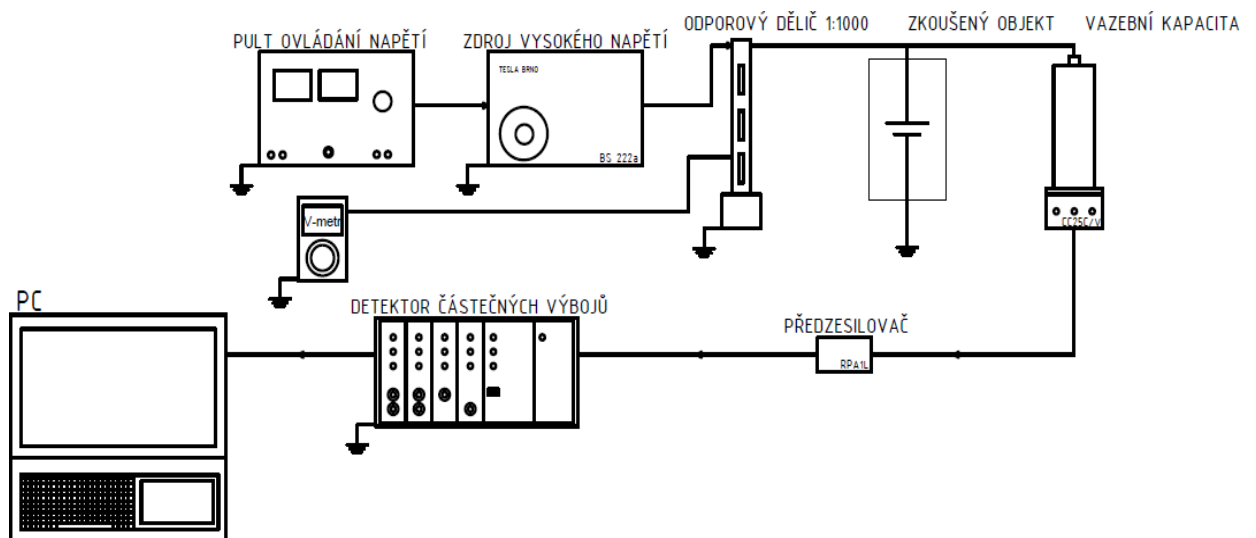
Zdroj se skládá ze dvou samostatných dílů spojených kabelem v pancéřové krabici. Těmito díly jsou za prvé ovládací jednotka a za druhé vlastní napěťový zdroj. Díky ovládací jednotce je zajištěna bezpečnost obsluhy, která se nesmí pohybovat v okolí zdroje VN v případě provozu. Měřicí jednotka, tj. pult je vyobrazen spolu s napěťovou jednotkou níže. Na obrázku vlevo je vidět měřicí pult kde jsou měřicí přístroje, tj. voltmetr a miliampérmetr ovšem tyto měřicí přístroje u nás nesloužili k hlavnímu měření, neboť nám sloužil ještě paralelně připojený multimetr pro měření hodnoty napětí v kV. Dále lze na měřicím pultu vidět regulačního tlačítka transformátoru pro regulaci napětí a zhruba uprostřed přepínač polarity napětí na kladnou či zápornou hodnotu. Vlastní jednotka z obrázku vpravo má také zabudovaný přepínač polarity napětí, který je páka s černým madlem na konci. Vlastní napěťový zdroj je tvořen jednocestným usměřňovačem s vakuovou usměřňovací diodou. Zajímavostí jsou dva síťové transformátory, kterými je zdroj opatřen. Jeden slouží pro žhavení usměřňovací diody a druhý sloužící pro VN. [39]



Obr. 4.1 Ovládací pult (vlevo) a vlastní napěťový zdroj (vpravo)

Parametry napěťového zdroje BS 222a, TESLA jsou plynulé nastavení napětí od 115 V do hodnoty 50 kV. Trvalý zatěžovací proud 2 mA se zvlněním menším než 1%. Napájení ze sítě 220 V, 50 Hz, příkon 320 W. Jen pro zajímavost vlastní zdroj je zhruba krychle o straně 0,5 m a o váze 140 kg. [39]

Schématický náčrt experimentálního obvodu použitého pro měření všech tří vzorků je na obrázku 4.2. Zkoušeným objektem byly modely vedení VN a poté průchodka s AlFe lanem.



Obr. 4.2 Schématický náčrt experimentálního měřicího obvodu navrženého pro naše měření

Do úplné rekapitulace nám pak zbývá ještě představit také měřicí vzorky.



### 3.3.1 Experimentální vzorky

Celkem se jedná o dva, respektive tři měřicí vzorky což si hned objasníme.

#### 3.3.1.1 Model venkovního vedení s tenkým a tlustým vodičem

Naše měření jsme započali na modelu venkovního vedení (obr. 4.3). Vedení je konstruováno z dřevěné desky, ta je na koncích opatřena dvěma prkny s uchycením keramických izolátorů a je pokryta měděným plechem. Izolátory jsou vyzbrojeny kapacitními kruhy, které slouží pro eliminaci klouzavých výbojů. Jak je z fotky patrné model vedení lze obměňovat vodiči různého průřezu. Ty se nacházejí přesně 17 cm nad povrchem a při napnutí jejich délka činí přesně 125 cm. Vodiče jsou uchycovány pomocí šroubového uchycení přímo do izolátorů.



Obr. 4.3 Model venkovního vedení pro měření koróny ZČU, KEE

Tenký vodič byl první představitelem, na kterém měření odstartovalo. Jeho průměr je 0,5 mm, zatímco tlustý vodič, který následoval, disponuje průměrem 1,5 mm.

### 3.3.1.2 Model Průchodky s AlFe lanem

Model průchodky jsem sestavil za pomoci mého vedoucího v laboratoři KEE/ZČU z keramického těla. To nebylo nijak spojeno a oba protikusy u sebe drží pouze silou vlastní váhy (gravitace – obr. 4.4). Tělo průchodky bylo následně opatřeno měděnou fólií, která reprezentuje vodivou stěnu. Ta byla aplikována po důkladném výběru z řady plechů jako nejvhodnější kandidát. Díky její pružnosti a lepicí vrstvě šla lehce uchytit kolem keramického těla. Vodičem je AlFe lano. Jedná se o skutečné lano, které shodou okolností poskytla společnost ČEZ laboratoři KEE/ZČU. Vyhotovený model disponuje tedy autentickým AlFe lanem z reálného vedení distribuční či přenosové soustavy v České republice.



Obr. 4.4 AlFe lano společně s keramickým tělem průchodky před vyhotovením

Hotový model (obr. 4.5) byl uzemněn přes měděnou fólii, která reprezentuje stěnu či jiný materiál. AlFe lano jej protíná uvnitř a celý prostor je pak pojištěn průchodkou.



Obr. 4.5 Zhotovený model – rozebraný (vlevo) a poloha stojící, která byla použita i pro měření (vpravo)

### 3.3.2 Koncepce postupu při měření částečných výbojů

Před samotným měřením na schématickém obvodu, jež je na obrázku 4.2 jsem nejprve vyzkoušel hodnotu přeskokového napětí. Tato hodnota se lišila dle zkoušeného zařízení. V prvním případě pro model vedení VN byla mezní hodnotou hranice 25kV, pro průchodku s AlFe lanem začínal klouzavý výboj na hodnotě 5kV záporné polaroty napětí a měření jsem zakončil na hodnotě 17 kV. Při měření vedení VN jsem také najel napět'ovým zdrojem na hodnotu 25kV až k zapalovacímu napětí, kterým jsem docílil „vyčištění“ vodičů od prachu jež by mohl ovlivňovat průběh měření či snížit hodnotu právě zapalovacího napětí. Před samotným počátkem měření následovala kalibrace systému. V programu ICMsystem jsem přepnul software na režim *map* a sledoval správnou funkci zaznamenání částečných výbojů pomocí kalibračního zařízení. Proběhla kalibrace systému pomocí kalibrátoru a zkouška měřícího zdroje spolu s detektorem částečných výbojů. Tímto jsem docílil vyfiltrování šumu, který zdroj do měření vnášel nastavením hodnoty *LLD*, kterou jsem určil ručně pomocí kurzoru. Hodnota kalibrovaného náboje činila vždy 100 pC pro všechny zkoušené zařízení a kalibrační zařízení bylo připojeno paralelně ke zkoušenému zařízení, jak je vidět na obrázku 3.9. Po odpojení kalibrátoru následovalo samotné měření, tedy zvyšoval jsem hodnoty napětí pro zkušební modely dle hodnoty na voltmetru a průběh zkoušky zapisoval společně se záznamem z měřícího detektoru ICMsystem. Veškeré experimentální hodnoty z software ICM uložil a přenesl do souborů pro další zpracování. Při měření vzorku vedení VN byla také použita metoda s dešťovými kapkami, které jsem nanosl rozprašovačem a poté měřil při stejných napět'ových hodnotách četnost a velikost částečných výbojů v závislosti na ovlivnění vodou.

Postup měření částečných výbojů za předpokladu zapojeného, kalibrovaného obvodu byl následovný:

- 1) Vizualní kontrola zemní tyče v prostorech napět'ové zóny laboratoře, která slouží k vybití přebytečného náboje ze zkušební obvodu – ta musela být zavěšena na místě jež jí přísluší. Dále také kontrola zcela zavřených dveří laboratoře, jež jsou opatřeny pojistkou pro vypnutí zdroje pro zajištění maximální bezpečnosti obsluhy při měření.
- 2) Nastavení detektoru částečných výbojů do režimu ADC mode.

Zkouška on-line režimu měření s najetím na hodnotu zapalovacího napětí čímž bylo docíleno zbavení vzorku prachu a nečistot a také zajištěna kontrola měřícího softwaru. Zvyšování napětí probíhalo na ovládacím pultu zkušebny a hodnoty sledovány na multimetru.

- 3) Poté jsem přepnul měřící detektor do režimu *map*, jež zobrazuje velikost náboje na jejich závislosti v čase. Ten při najíždění napětí rostl v řádech pC, ovšem dolní mez měřící mapy mohla být a mým předpokladem je, že také byla ovlivňována šumem z okolí a z napěťového zdroje. Proto jsem nastavil hodnotu LLD, tak abych odstranil nežádoucí šum, který by měření znehodnotil. Hodnotu LLD jsem nastavil ručně na 5% použitých při většině experimentů. Ovšem při pozdějším měření, a to zejména při experimentech s vodou jsem hodnotu ještě upravoval, neboť změna prostředí vyžadovalo také zásah do nastavení systému, a to zejména na hodnotu 2,5%. Parametr Dead Time byl konstantně udržován na hladině 5  $\mu$ s. Zesílení, tedy Pre Gain a Main Gain bylo upravováno v průběhu měření dle velikosti impulzů částečných výbojů.
- 4) Poté začalo probíhat hlavní měření. Najetí zdrojem na vybrané hodnoty napětí a měření v časovém intervalu, který vždy činil přesně 60 vteřin, pouze v případě vodiče s průměrem 1,5 mm byla doba stanovena na 30 vteřin. Interval jsem v případě selhání měřícího software opakoval s přenastavením klíčových parametrů pro zajištění správné funkce detektoru.
- 5) Všechny záznamy byly uloženy do příslušných souborů, které poskytují možnost otevření i po ukončení měření se zobrazením jak parametrů, tak i měřících dat z experimentu. Tyto soubory lze studovat i bez připojení detektoru částečných výbojů, uživatel musí mít k dispozici jen software ICMsystem.

V případě manipulace v prostorách čímž bylo ostříkávání vody na model vedení VN jsem vždy postupoval dle zásad bezpečnosti. Tedy nejprve sjel s napětím zdrojem na nulu, po vstupu do napěťových prostor laboratoře zajistil obvod zemnicí tyčí. Ta zůstala

po celou dobu manipulace ve styku s kontaktem napěťového zdroje. Aplikace dešťových kapek probíhala rozprašovačem a musela být i několikrát opakována pro stejný měřicí vzorek, neboť kombinace suchého prostředí spolu s vysokým napětím vodu rychle odpařovaly.

## 4 Analýza a porovnání dosažených experimentů

Zmínkou o měření, které je podrobněji probráno v předchozí kapitole. Všechny experimentální měření byla provedena v laboratoři KEE, ZČU v Plzni pod vedením vedoucího diplomové práce. Při měření byla neustále dodržována bezpečnost dle platné vyhlášky a veškeré měření probíhala pouze na normovaných přístrojích uvedených v seznamu použitých přístrojů (tab. 4).

Přístroj	Typ	Parametry
Detektor částečných výbojů	ICM SYSTEM	-
Předzesilovač	RPA1L	-
Vazební kapacita	CC25C/V	$C = 1nF; U_{MAX} = 25 kV$
Odporový dělič	-	1:1000
Napěťový zdroj	TESLA Brno, BS 222a	50 kVDC
Multimetr	METRA Hit 14S	-
Notebook	HP ProBook 4710s	-

Tab.1 Seznam použitých přístrojů

Měření bylo provedeno na obvodu ukázaném v kapitole 3.3, na vzorcích výše uvedených nikoli jiných, taktéž s přístroji a měřicím softwarem pouze zmiňovaným.



Zaznamenané hodnoty atmosférických podmínek při experimentech byly:

*Teplota: 25,5°C*

*Tlak: 96,77 kPa*

*Vlhkost: 33%*

Veškeré záznamy prošly přes počítač v laboratoři KEE, ZČU, přes měřící detektor ICMsystem se softwarovou verzí 4.87 a následně byly uloženy. Tyto data jsem poté analyzoval zpětně. Během přenosu a uložení na počítači nemohla být data nikterak ovlivněna či nahrazena.

Sledované veličiny experimentu na měřícím detektoru systému ICM:

Charge [IEC] – Velikost naměřeného náboje za měřící dobu. Značení bylo zvoleno jako *Charge [IEC]* v pikocoulombech (pC, resp. v násobcích coulombů C).

Měřící Doba  $T_M$  – Doba, po kterou byl vždy experiment prováděn. Tato doba byla stanovena na 60 sekund (s) a po celou dobu nebyla změněna.

NQS Value – Střední proud částečných výbojů, nebo-li suma všech výbojových impulzů ku měřící době. Značen je stejným jménem *NQS Value* a jednotkou jsou mikroampéry ( $\mu\text{A}$ , resp. násobky ampér A).

Total Counts – Celkový počet zaznamenaných výbojů za měřící dobu. Značení je stejnojmenné, tj. *Total Counts* a udáván je v počtu výbojů za měřící dobu (Q/s).

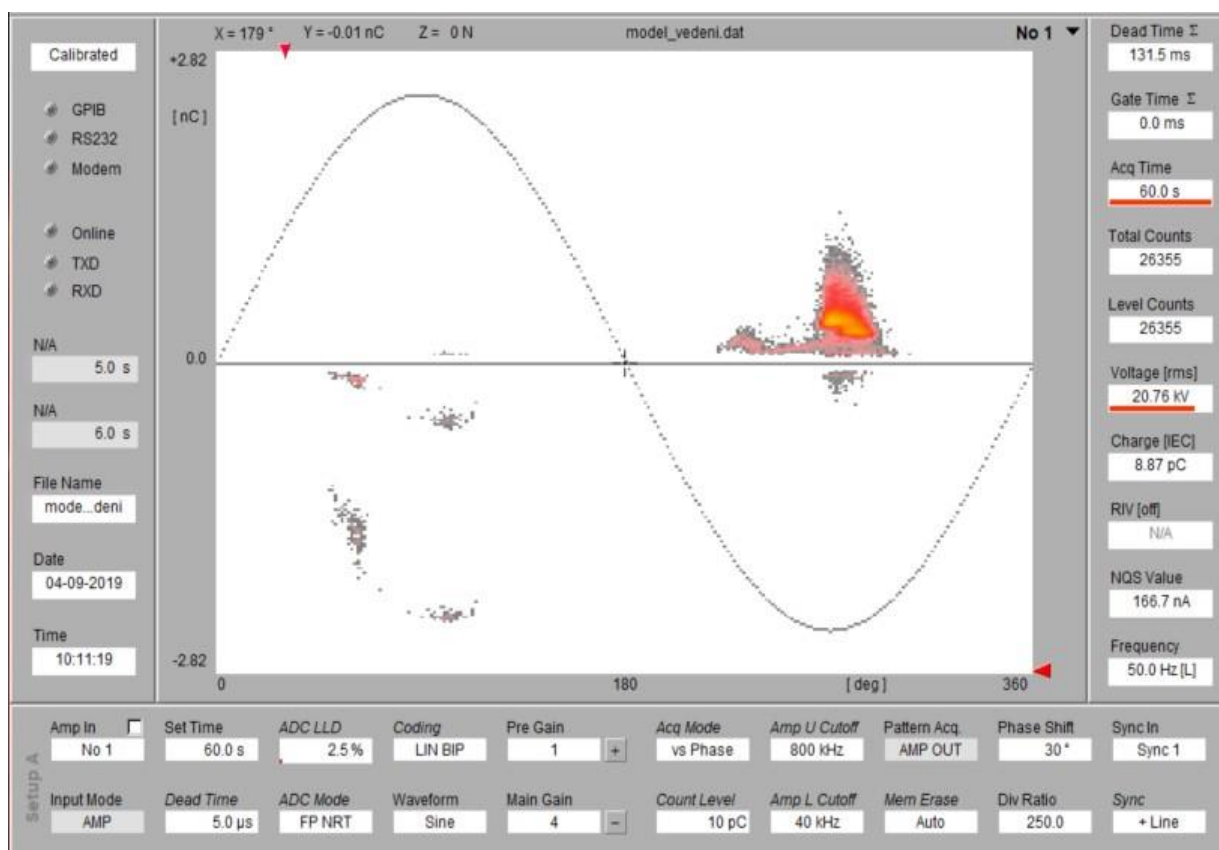
LLD – Velikost nastaveného potlačení nízkých úrovní. Podrobněji nalezneme v kapitole 3.2.1.2 a při popisu postupu měření v kapitole 3.3.2.

Dead Time – Velikost nastaveného mrtvého času, podrobněji probráno v kapitole 3.2.1.1 a při postupu měření v kapitole 3.3.2.

Zesílení – Velikost nastaveného zesílení Pre Gain / Main Gain, podrobněji popsáno v kapitole 3.2.1.4. a nastavení v kapitole o postupu měření 3.3.2.

## 4.1 Měření při střídavém napětí

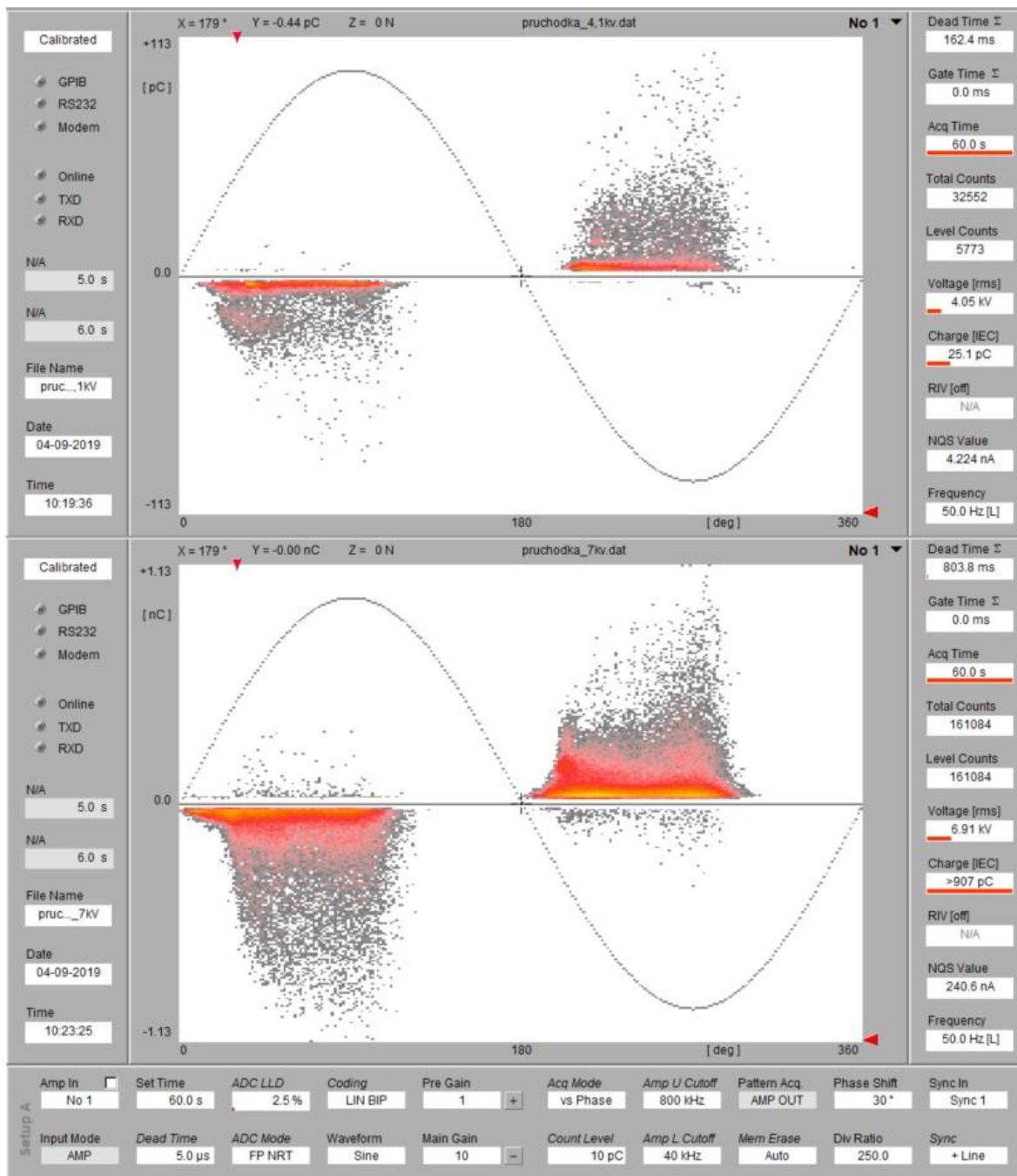
Pro experimentální účely jsem provedl také měření obou modelů na střídavém napětí v napěťové laboratoři KEE/ZČU v Plzni. Měření detektorem částečných výbojů ICMsystem při střídavém napětí je léty osvědčená metoda a v mém případě byla stanovena pouze pro získání náhledu na metodu při stejnosměrném napětí. Nejprve přejdu tedy k modelu vedení, které vykázalo zjevnou korónu při napětí 20,76 kV (střídavých – AC). Na mapě četnosti výbojů jde vidět koróna výraznější v oblasti záporné půlvlny což je pro ni velmi typické. Lze také sledovat typický charakter kdy k projevení dochází až po překročení hranice zapalovacího napětí, tedy koróna nenarůstá plynule od počátku půlvlny sinusovky do maxima vrcholu a zpět.



Obr. 4.6 Model vedení, tlustý vodič 1,5 mm při střídavém napětí s korónovým výbojem

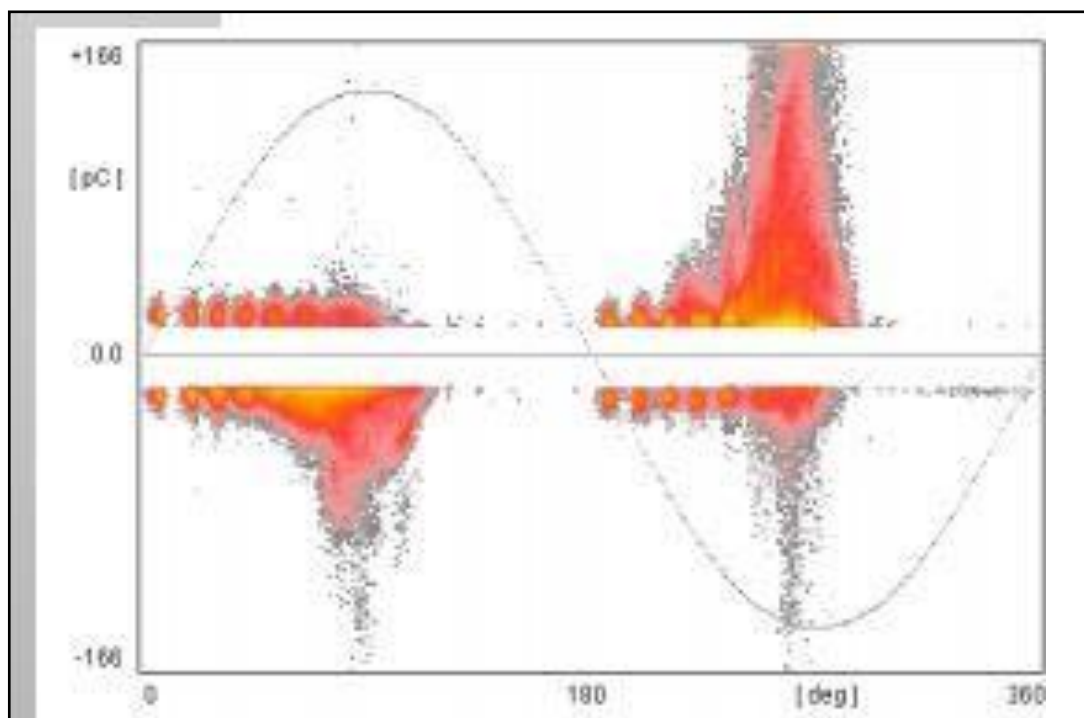
Povšimnout si také lze, že u obou měření při střídavém napětí nedocházelo k žádnému vlivu šumu ať už zdrojem či okolím což predikuje dobře odstíněnou laboratoř. Hodnota LLD tedy byla nastavena na 2,5 %.

Druhým exemplářem byla sestavená průchodka. Měření bylo na stejném pracovišti, se stejnými přístroji. I u průchodky došlo k výbojové činnosti, která je výrazná už na hodnotě 4,1 kV (střídavých – AC). Poté byl zaznamenán vzorek také pro hodnotu 7 kV (střídavých – AC). V prvním případě klouzavý výboj vykazoval skoro 6krát nižší výbojovou činnost než-li tomu bylo v případě napětí zvýšeného o 2,9 kV.



Obr. 4.7 Model průchodka při střídavém napětí s klouzavým výbojem. Horní obrázek pro 4,1 kV a dolní pro 7 kV.

Při této příležitosti jsem také nahlédl do instrumentů diagnostiky přímo od výrobce detektoru částečných výbojů ICMsystem. Ten některé typické obrazce měření částečných výbojů na daných zařízení ukazuje v manuálu. Obrázek z manuálu lze porovnat právě s průchodkou kde je vidět značná podobnost v obou obrazcích, zejména u hodnoty 7 kV. Za prvé výbojová činnost nastává již od počátku půlvlny a zesiluje s růstem napětí přímo. V případě koróny jde spíše o pulzní charakter. Za druhé, záporná půlvlna je výraznější ovšem ne tak zřetelně jako u korónového výboje.

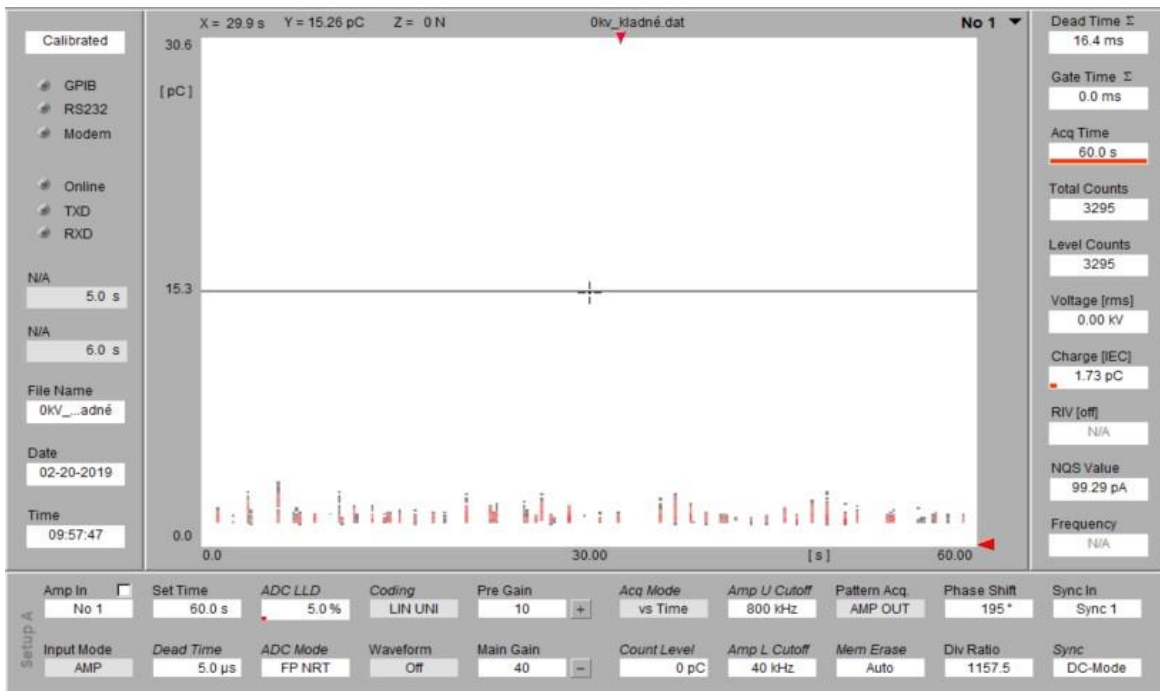


Obr. 4.8 Klouzavý výboj v průchodce transformátoru jako ukázkový obrazec společnosti Power Diagnostix, detektoru částečných výbojů ICMsystem [40]

## 4.2 Měření při stejnosměrném napětí model venkovního vedení s vodičem průměru 0,5 mm

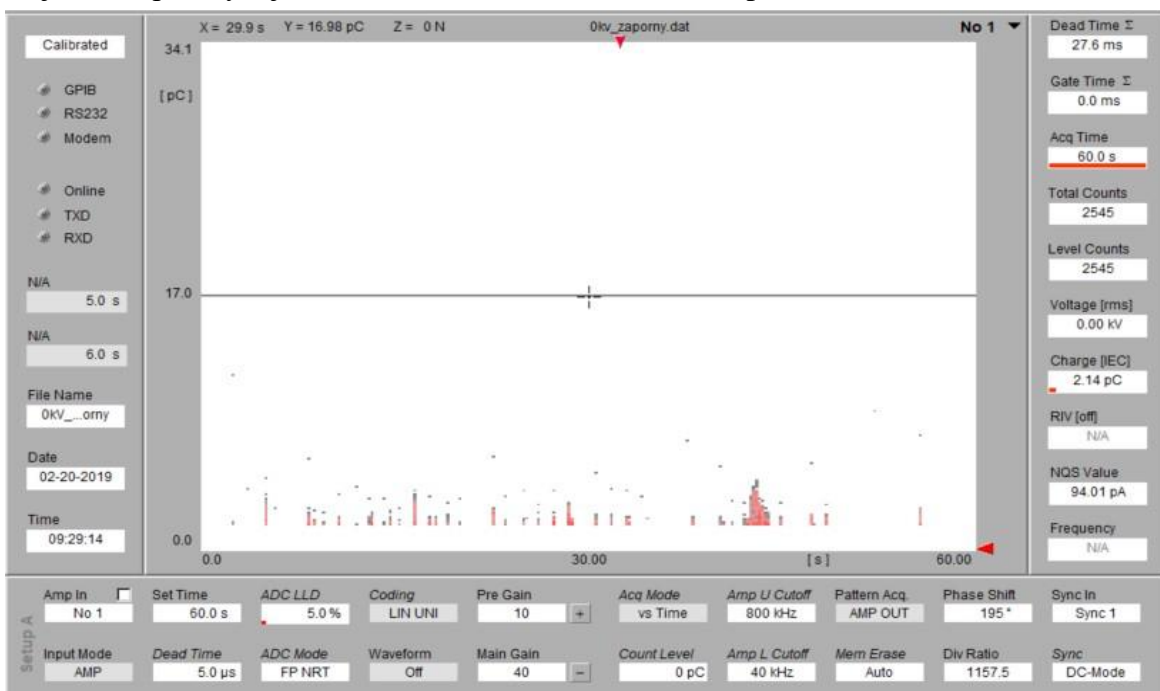
Měření při stejnosměrném napětí probíhalo u všech tří vzorků ve stejné měřicí laboratoři (viz 3. kapitola). Jako první ze tří experimentálních vzorků navržených přímo pro tato měření se zaměříme na model venkovního vedení s tenkým vodičem o průměru 0,5 mm. První z celé škály měření je při hodnotě 0 kV. Nejedná se o absolutní nula volt ale napětí kdy je v pozadí zejména šum z pozadí. Při tomto popisu bych se zaměřil na nastavení hodnoty LLD. Tu jsem zvolil z důvodu šumu zdroje na hodnotu 5 %, a po sléze ji při hodnotě 20 kV napájecího napětí posouval, ovšem k tomu až později. Následující vyobrazené naměřené hodnoty se liší pouze v napájecím napětí.

V první řadě je zde ukázka zmíněného 0 kV při kladné polaritě zdroje. Výbojová činnost v porovnání se zápornou napájecí polaritou zdroje je zajímavá.



Obr. 4.9 Vzorky naměřené při kladné polaritě zdroje, model venkovního vedení s vodičem průměru 0,5 mm při hodnotě napájecího napětí 0 kV, LLD 5 %, Dead Time 5 μs

Zajímavá je z toho pohledu, že ačkoli při kladném napájecím napětí (obr. 4.9) je znatelně vyšší výskyt částečných výbojů – koróny, u záporné polarity napájecího zdroje stejného napětí výbojová činnost – hodnota Total Counts poklesne (obr. 5).



Obr. 5 Vzorky naměřené při záporné polaritě, model venkovního vedení s vodičem průměru 0,5 mm při hodnotě napájecího napětí 0 kV, LLD 5 %, Dead Time 5 μs

Číselné hodnoty jsou v tab. 2. Lze vidět, že při takto nízkém napětí se moc neliší NQS value což ukazuje střední proud částečných výbojů za dobu (60 s) a s tím ani Charge [IEC] velikost náboje za tuto dobu.

Vzorek vedení, tenký vodič 0,5mm				
U <sub>ref</sub>	0kV			
	LLD	5,0%	Dead Time	5 μs
Polarita zdroje	kladný		záporný	
NQS Value	99,29 pA		94,01 pA	
Charge [IEC]	1,73 pC		2,14 pC	
Total Counts	3 295		2 545	

Tab. 2 Naměřené hodnoty kladné a záporné polarity zdroje napětí při 0 kV, model venkovního vedení s vodičem o průměru 0,5 mm

Změnu nalezneme na posledním řádku Total Counts, jež udává počet výbojů. Během napájení zápornou polaritou zdroje také došlo zhruba ve 45 vteřině měření ke zhluku výbojové činnosti, dále zde byly výboje vyšších hodnot.

Tento poznatek lze aplikovat obecně na měření modelu venkovního vedení s vodičem o průměru 0,5 mm (příloha C – napájecí napětí 10 kV a 15 kV). U záporné polarity napětí se přes nižší hodnotu celkového náboje za měřicí dobu a střední proud částečných výbojů vyskytovaly vyšší výbojové hodnoty. Výbojová činnost, tedy Total Counts se postupně překláněla na stranu záporné polarity zdroje – pouze při měření napájecím napětí 0 kV byla vyšší hodnota u kladné polarity zdroje. Všechna ostatní měření už potvrdila, že větší činnost je u záporného napájecího napětí. Vše potvrzuje měření při 20 kV napájecího napětí, kde se nejvýrazněji projevil onen fakt. Četnost výbojů zde byla u záporné polarity zdroje takřka 7krát větší než u kladné (tab. 3 – Total Counts).

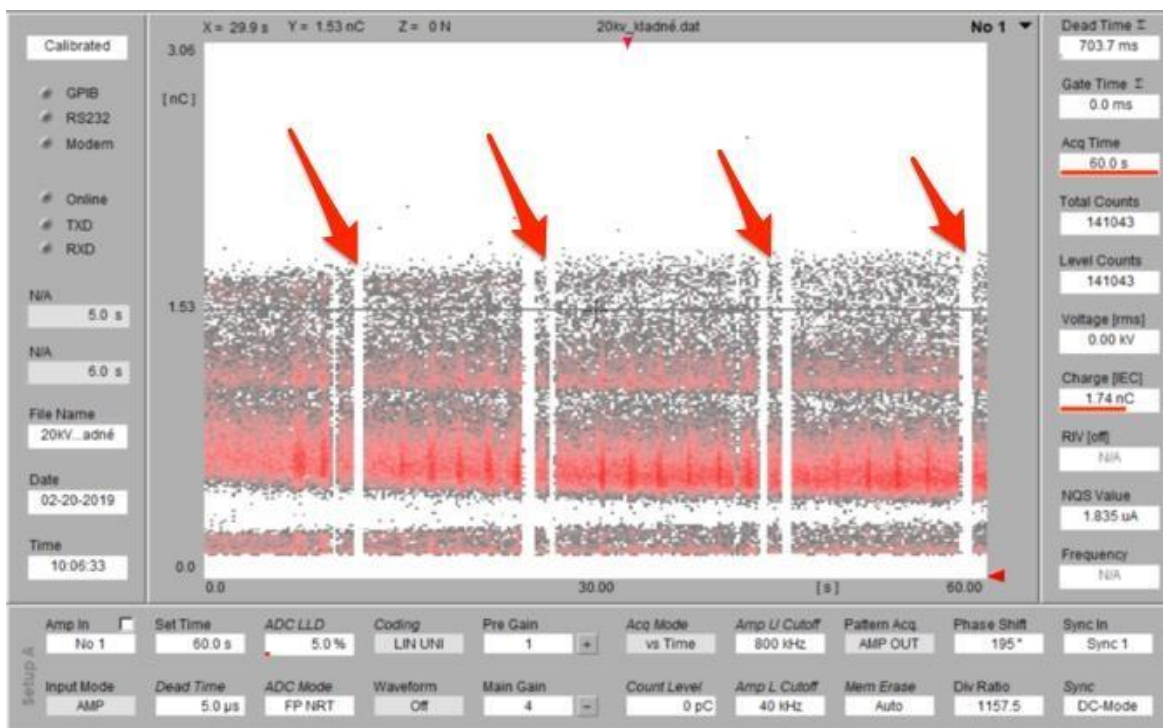
Vzorek vedení, tenký vodič 0,5mm				
U <sub>ref</sub>	20kV			
	LLD	5,0%	Dead Time	5 μs
Polarita zdroje	kladný		záporný	
NQS Value	1,835 μA		696,0 nA	
Charge [IEC]	1,74 nC		216 pC	
Total Counts	141 043		1 070 348	

Tab. 3 Naměřené hodnoty kladné a záporné polarity zdroje napětí při 20 kV, model venkovního vedení s vodičem o průměru 0,5 mm

Při pohledu na oba obrazce map je rozdíl ještě zřetelnější. Důležité je uvědomit si, že druhý obrazec je při trojnásobně větším zesílení což opět potvrdilo, že ačkoli je četnost



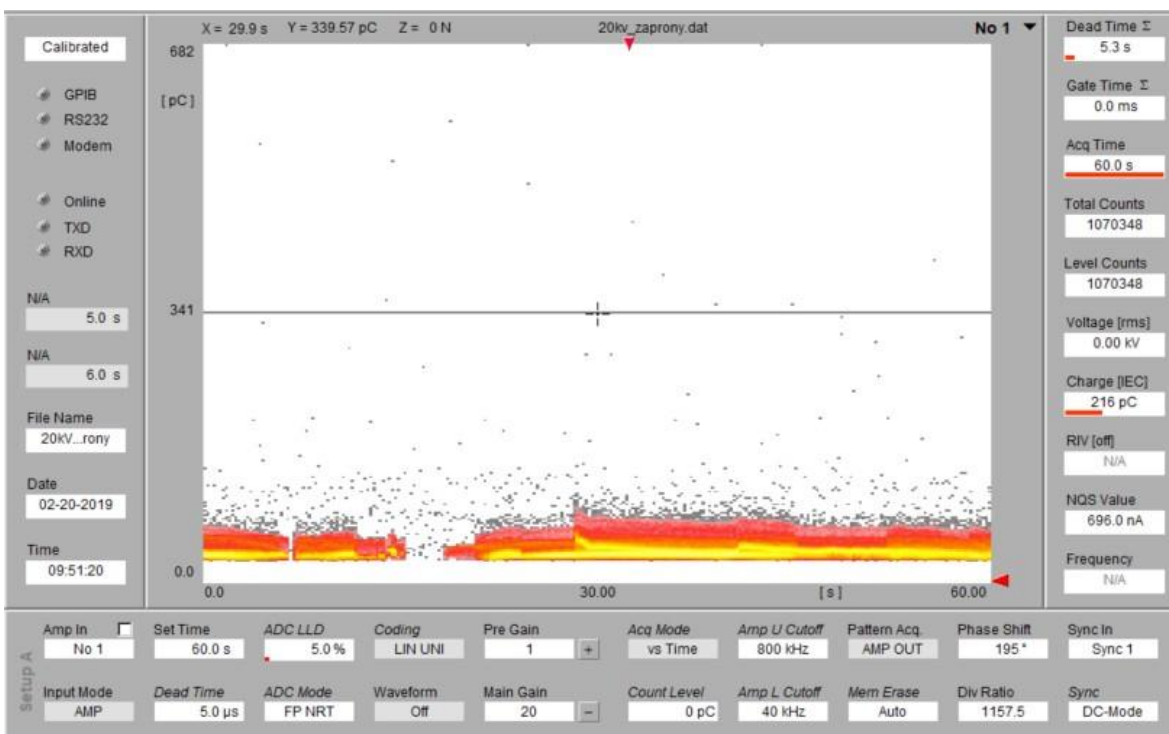
vyšší velikost náboje převládá u kladné polarity zdroje. Na obrázku 5.1 (kladná polarita napájecího napětí zdroje při 20 kV) jsou šipkami označeny slepá místa – bílé sloupce. Zde s největší pravděpodobností došlo k chybě měřicího systému a ten tak nezaznamenal měření v plném rozsahu.



Obr. 5.1 Vzorčky naměřené při kladné polaritě zdroje s měřicí chybou, model venkovního vedení s vodičem o průměru 0,5 mm při hodnotě napájecího napětí 20 kV, LLD 5 %, Dead Time 5  $\mu$ s, zesílení Pre Gain 1 a Main Gain 4

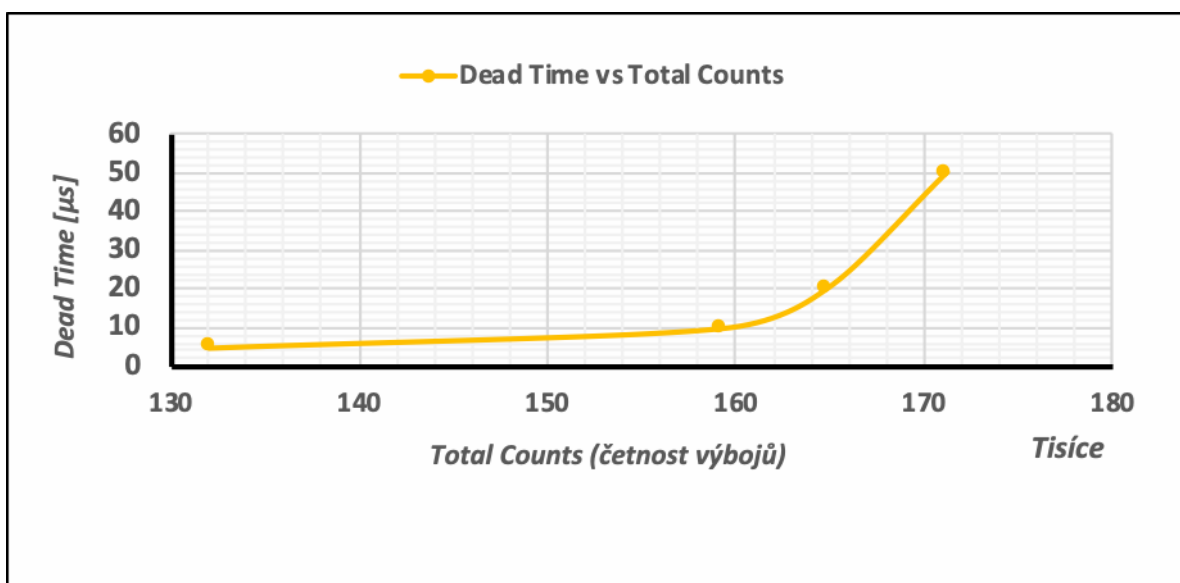
V dolním sektoru červeného spektra téže obrázku (obr. 5.1) je vidět projev pulzního chování koróny v pravidelném opakování.

U záporné polarity zdroje napájecího napětí 20 kV k této chybě paradoxně nedošlo, ačkoli četnost je zde vyšší (obr. 5.2). Skutečností je dle mého názoru právě nižší celková hodnota náboje. Upozorňuji, že ačkoli je zesílení nižší, celkový náboj je pouhých 216 pC oproti předchozím 1,74 nC což je skoro o řád nižší hodnota. V případě proudu je tato propast stupňována ještě více, a to ve dvou řádech, tj. 1,835  $\mu$ A pro kladnou polaritu a 216 pC pro zápornou.



Obr. 5.2 Vzorky naměřené při záporné polaritě zdroje, model venkovního vedení s vodičem o průměru 0,5 mm při hodnotě napájecího napětí 20 kV, LLD 5 %, Dead Time 5  $\mu$ s, zesílení Pre Gain 1 a Main Gain 20

Jelikož u kladné hodnoty došlo k měřicí chybě rozhodl jsem se pro změnu parametrů LLD a Dead Time a dospěl k výsledkům, které jsou připojeny v příloze D. Při zvyšování hodnoty Dead Time jsem začal o 5  $\mu$ s a postupoval tedy přes hodnoty 10  $\mu$ s, 20  $\mu$ s až k poslední hodnotě 50  $\mu$ s. Zvýšení hodnoty Dead Time mělo za následek pozitivní dopad na sledovanou veličinu Total Counts – tedy hodnotu četnosti výbojové činnosti (Graf. 1).



Graf. 1 Závislost četnosti výbojů Total Counts na nastavení parametru Dead Time při měření vzorku venkovního vedení hodnoty 20 kV, kladné polarity napětí



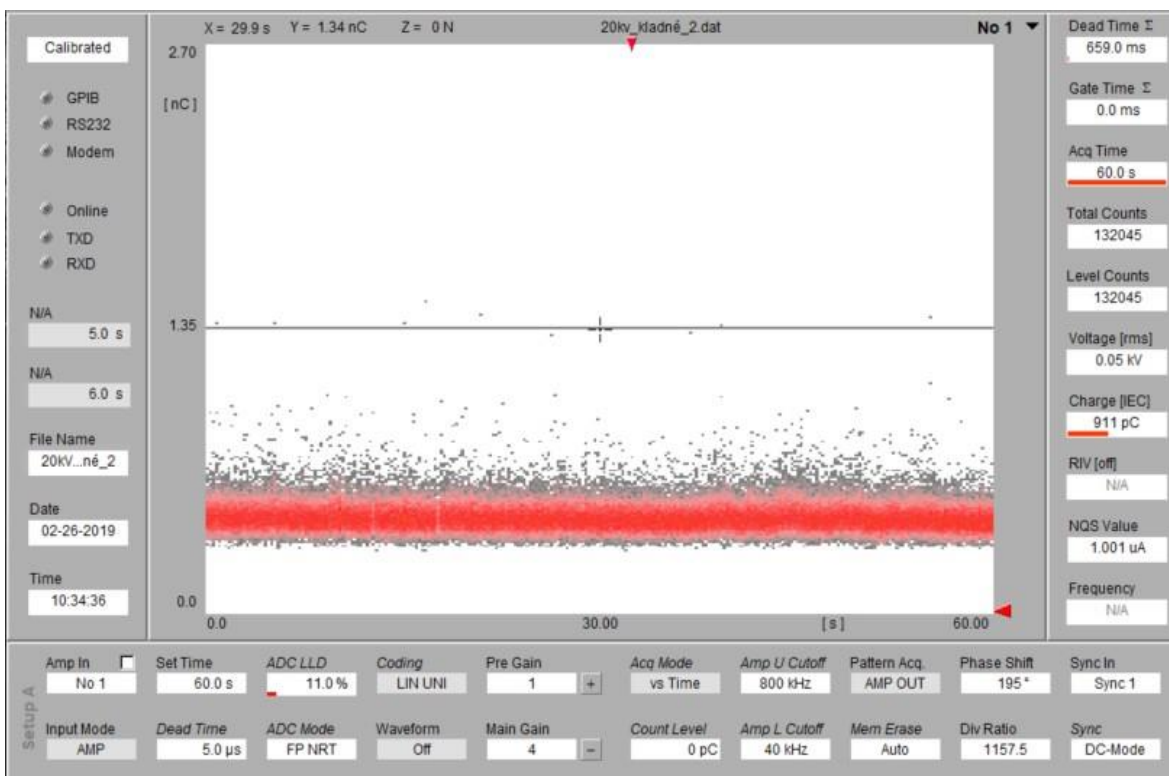
Pro podrobnější ukazatel parametrů jsem sestavil také tabulku této závislosti (tab.

4). Nejvyšší poukazovaná změna nastává na posledním řádku v rámci Total Counts.

Vzorek vedení, tenký vodič 0,5mm, LLD 5,0 %								
Uref	20kV							
	Dead Time	5 $\mu$ s	Dead Time	10 $\mu$ s	Dead Time	20 $\mu$ s	Dead Time	50 $\mu$ s
Polarita zdroje	kladné							
NQS Value	1,835 $\mu$ A		1,038 $\mu$ A		1,026 $\mu$ A		1,025 $\mu$ A	
Charge [IEC]	1,74 nC		568 pC		476 pC		433 pC	
Total Counts	141 043		159 223		164 758		171 196	

Tab. 4 Závislost četnosti výbojů Total Counts na nastavení parametru Dead Time při měření vzorku venkovního vedení hodnoty 20 kV, kladné polarity napětí

Další změnou prošel parametr LLD, a to z hodnoty 5 % na 11 % při zachování stejné hodnoty Dead Time 5  $\mu$ s (obr. 5.3).



Obr. 5.3 Vzorky naměřené při kladné polaritě zdroje, model venkovního vedení s vodičem o průměru 0,5 mm při hodnotě napájecího napětí 20 kV, LLD 11 %, Dead Time 5  $\mu$ s

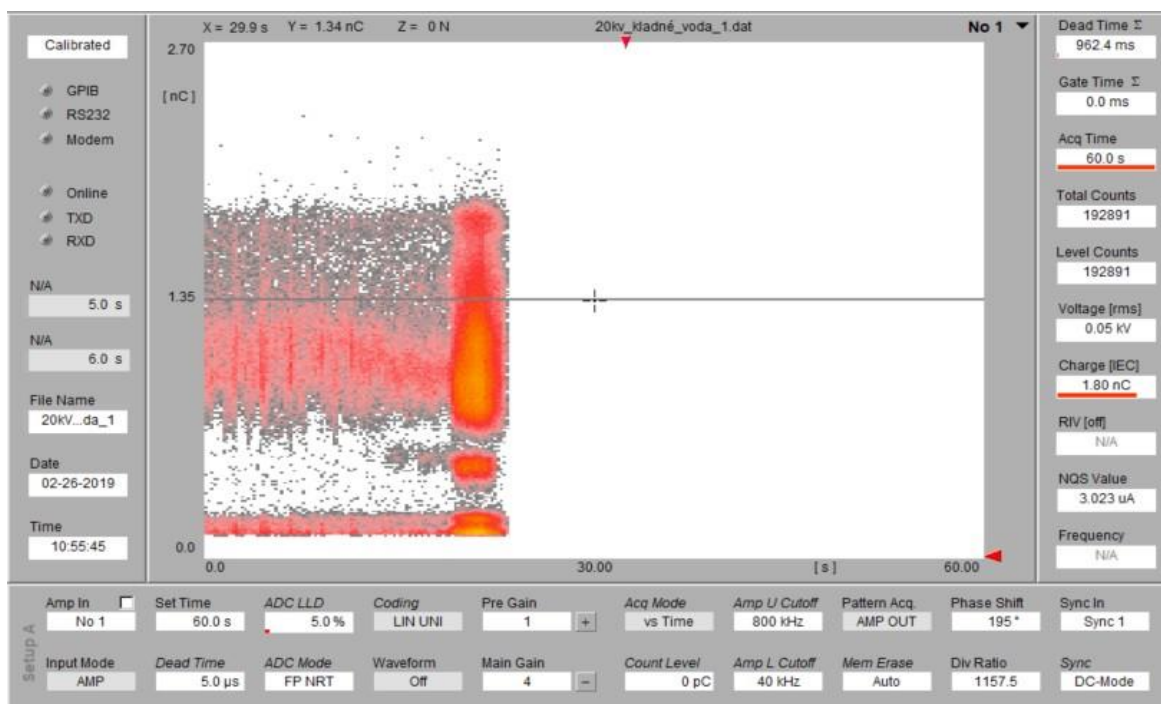
Zesílení je stejné jako na obrázku 5.1 kdy docházelo k chybám při zaznamenání měření. Zvednutím hodnoty LLD došlo k predikovatelnému snížení středního proudu částečných výbojů a také celkového náboje. To je způsobeno odfiltrováním značné části pozadí. Skutečnost změny parametru LLD vedla k hladšímu záznamu bez jakéhokoli pochybení ze strany měřící techniky. Pro prozkoumání vzorků se změněným parametrem

Dead Time jsem dospěl k výsledku, že i tímto parametrem lze poměrně účinně odstranit chybu měření ovšem je potřeba brát zřetel na zkreslení v rámci parametrů NQS Value a Charge [IEC]. Tyto parametry se s narůstající dobou Dead Time snižovaly až na čtvrtěční hodnotu oproti původním. Otázkou tedy zůstává, kde najít optimální hranici.

U tohoto typu měření bych jako možný postup měření volil nastavení parametrů Dead Time 5  $\mu$ s a LLD 5 %, resp. v závislosti na šumu z okolního prostředí, pro nižší hodnoty napětí, tj. výrazně menší než zapalovací napětí koróny. Naopak při hodnotě blížící se k zapálení koróny dává smysl zvýšit parametr Dead Time na únosnou mez což by v reálné aplikaci mohla být hranice 10  $\mu$ s jakožto dvojnásobek původní hodnoty. Při této hodnotě totiž celý měřicí systém již nevykazoval žádné pochybení a data se velice podobala v porovnání s hodnotami při nastaveném parametru LLD 11 % a druhém parametru Dead Time 5  $\mu$ s.

Další otázkou zde zůstává, jak moc ovlivnil celé naše měření počítač, který mohl měřicí chybu vnášet nedostatečným výpočetním výkonem. Bohužel nad tímto fakt lze nyní pouze polemizovat, reálné experimenty s výkonnějším počítačem v nynějších dnech zatím nejsou proveditelné.

Při měření na tomto vzorku jsem také vyzkoušel závislost na vodě. Voda v mém experimentu simulovala povětrnostní podmínky – déšť. Aplikována byla před samotným měřením, které v tomto případě probíhalo pouze na hodnotě 20 kV při kladné polaritě napájecího zdroje. První měření bylo neúspěšné, kdy došlo ke stejné skutečnosti jako výše zmíněné, a to selhání měřicího systému, který přestal po 20 vteřinách správně zaznamenávat výbojovou činnost (obr. 5.4).

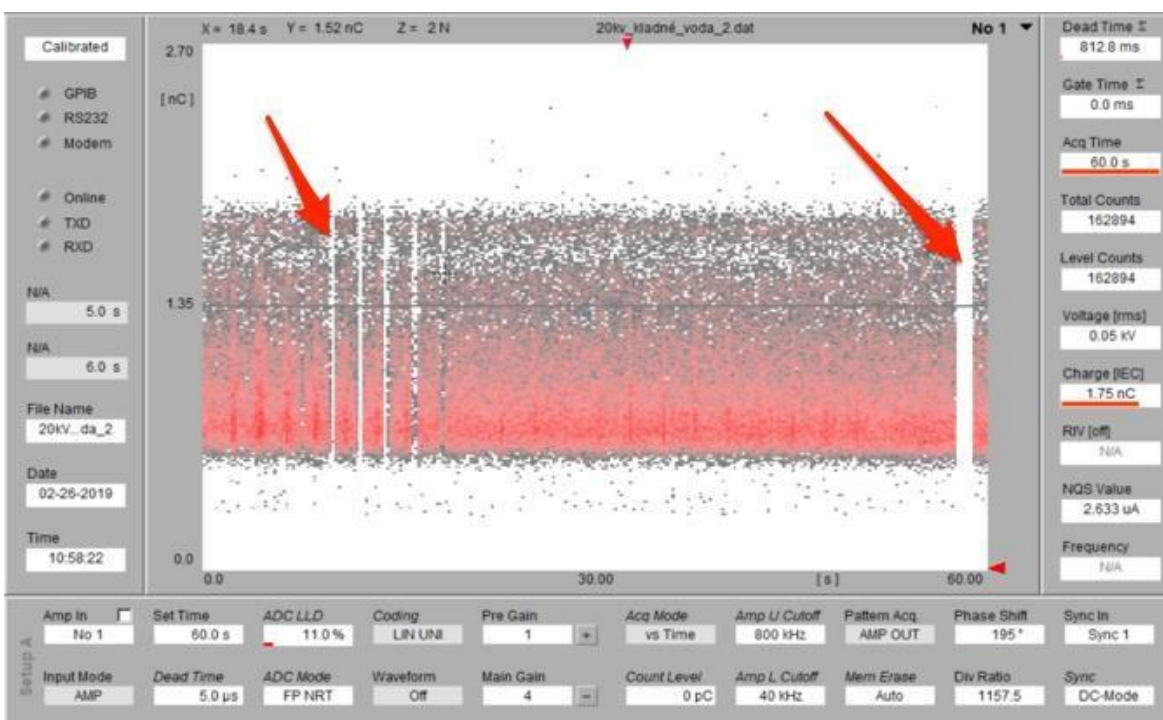


Obr. 5.4 Vzorky naměření při aplikaci vody kladné polaritě zdroje, model venkovního vedení s vodičem o průměru 0,5 mm při hodnotě napájecího napětí 20 kV, LLD 5 %, Dead Time 5  $\mu$ s

Po selhání jsem měření opakovat s nastavením parametru LLD pro potlačení šumu s pozitivním výsledkem, ačkoli neustále docházelo k výpadkům, a tedy i ztrátě dat (obr. 5.5). Nejen, že měřicí systém při měření některá data zcela vynechal ale docházelo také k jevu, kdy data byla od určité vteřiny měření přepisována přes sebe. Tento jev byl stejný jako na obr. 5.4. Při porovnání hodnot (tab. 5) se zvýšila výbojová činnost při aplikaci vody. Proud NQS Value vzrostl též nejméně dvojnásobně a s ním i celkový náboj.

Vzorek vedení, tenký vodič 0,5mm, LLD 11 % a Dead Time 5 $\mu$ s		
U <sub>ref</sub>	20kV	
	s vodou	bez vody
Polarita zdroje	kladné	
NQS Value	2,633 $\mu$ A	1,001 $\mu$ A
Charge [IEC]	1,75 nC	911 pC
Total Counts	162 894	132 045

Tab. 5 Porovnání naměřených hodnot při aplikaci vody a bez, hodnoty napětí 20 kV kladné polaritě zdroje, LLD 11 % a Dead Time 5  $\mu$ s



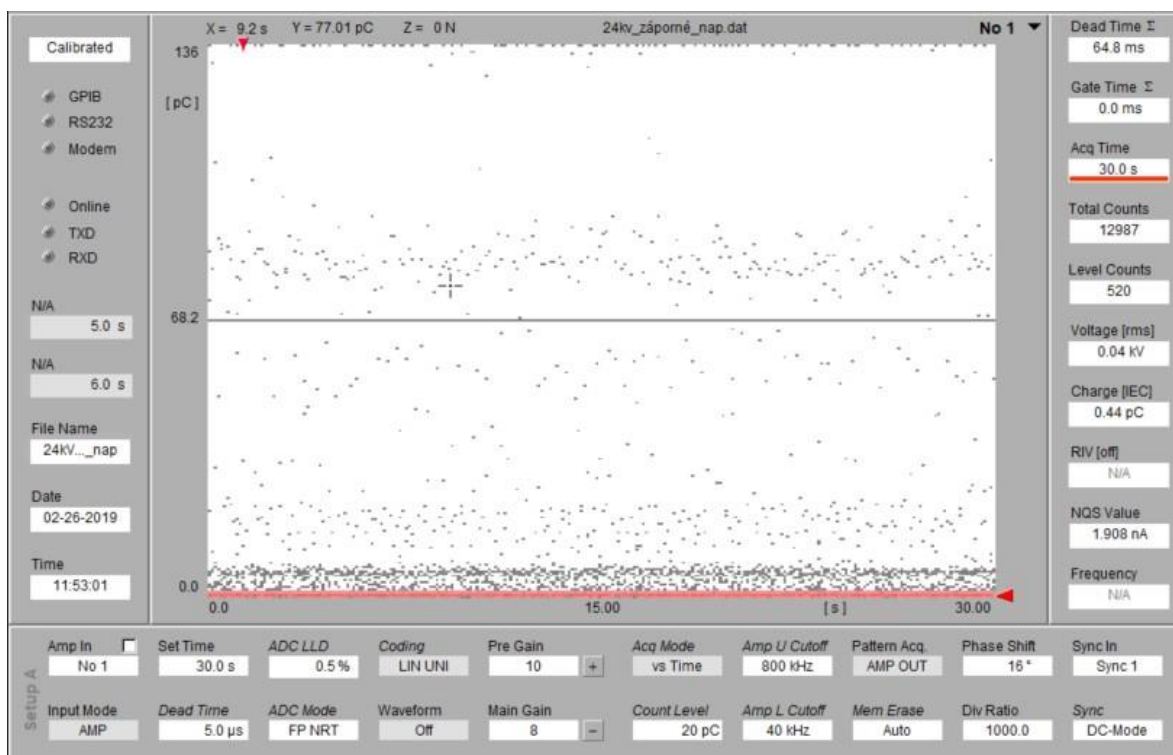
Obr. 5.5 Částečné selhání měřicího systému - vzorky naměření při aplikaci vody kladné polarity zdroje, model venkovního vedení s vodičem o průměru 0,5 mm při hodnotě napájecího napětí 20 kV, LLD 11 %, Dead Time 5  $\mu$ s

Po této skutečnosti jsem dále měnil parametr Dead Time s předpokladem „odlehčení“ měřicího systému, který tak měl začít měřit správně. Ovšem došlo k pravému opaku a při postupném zvyšování hodnot Dead Time na 10  $\mu$ s, 20  $\mu$ s a 50  $\mu$ s se zachováním LLD 11 % docházelo k stále vyšší chybě. Jako nejspolehlivější se tedy ukázala hodnota LLD 11 % v kombinaci s Dead Time 5  $\mu$ s na obr. 5.5. Zde byla chyba nejmenší. Pokud jsem předtím polemizoval o výpočetním výkonu pro celou měřicí soustavu, zde platí totéž.

#### 4.3 Měření při stejnosměrném napětí model venkovního vedení s vodičem průměru 1,5 mm

Následovalo měření modelu venkovního vedení s tlustým vodičem o průměru 1,5 mm. Před samotným začátkem jsem předpokládal, že výbojová činnost by měla být nižší při stejných hodnotách napájecího napětí, a dokonce jsem si ani nebyl jednoznačně jist zda-li, se mi zapalovací napětí koróny podaří dosáhnout vzhledem k limitu jež udává napájecí zdroj ve spojení s vazební kapacitou v napěťové laboratoři KEE/ZČU v Plzni, kde měření proběhlo. Při přihlédnutí k těmto skutečnostem jsem se rozhodl koncipovat měření poněkud odlišně, a to proměřit vzorek rovnou při vyšších napětích. Jako v předchozím případě jsem také aplikoval vodu pro docílení jevu deště, či chcete-li, oroseného vedení.

První vzorek je z měření napájecího napětí 9 kV s kapkami vody na vodiči modelu venkovního vedení. Jedná se o nejnižší změřenou hodnotu napětí při, které byla výbojová činnost alespoň na tolik aktivní, že dávalo smysl měření zaznamenat. Nastavení parametrů se lišilo oproti předchozímu měření v hodnotě LLD. S hodnotou LLD jsem laboroval během celého tohoto měření v mezích od 0,5 % do 5 % s respektováním šumu z okolí ovšem s přihlédnutím na výbojovou činnost. Ta se v několika případech ukázala jako klíčová zejména v dolní hranici spektra - měření 24 kV s vodou (obr. 5.5) kde byla hodnota LLD právě 0,5 %.



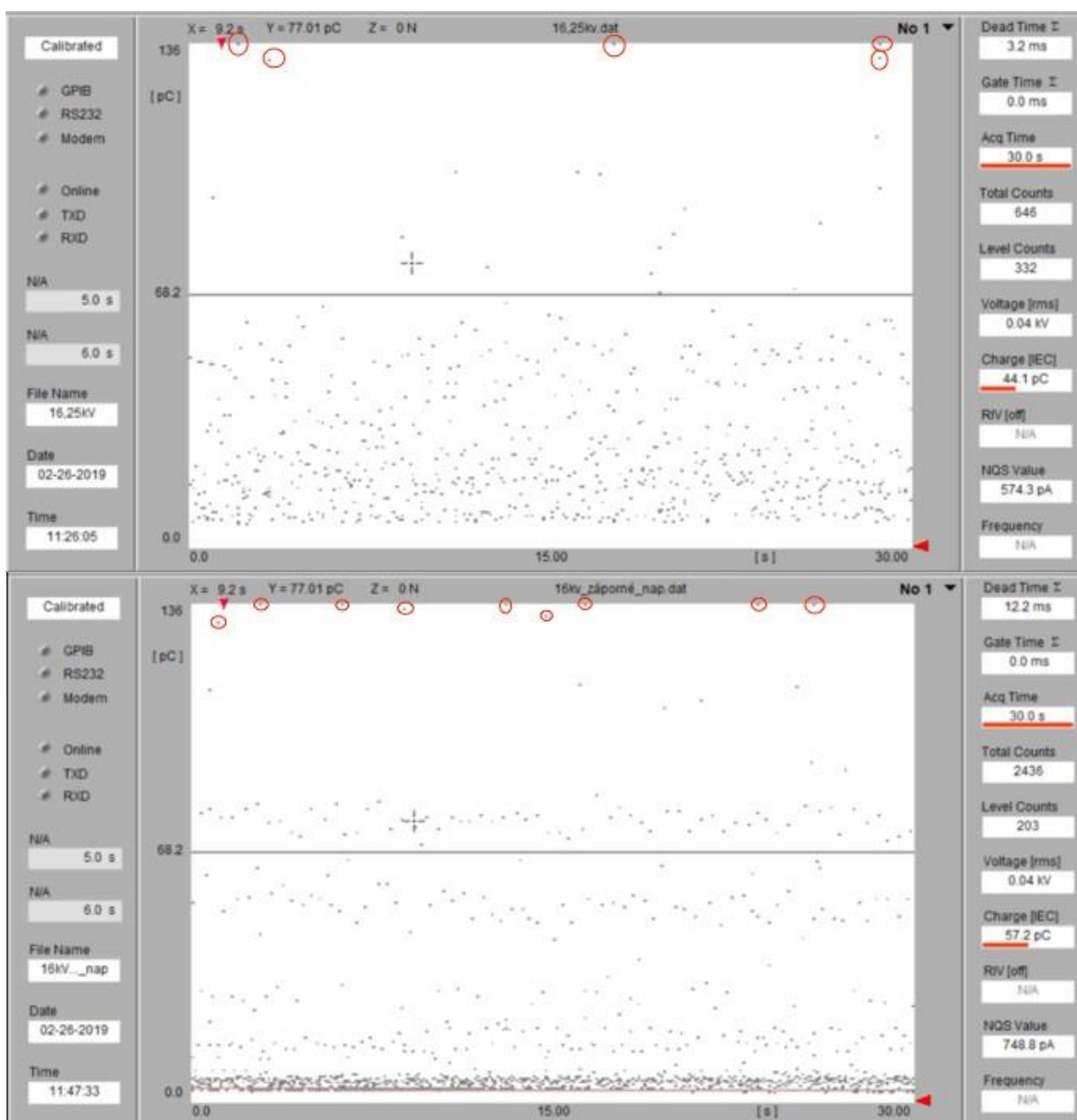
Obr. 5.5 Ukázka projevu výbojové činnosti v dolním sektoru spektra, model venkovního vedení s vodičem o průměru 1,5 mm při hodnotě napájecího napětí 24 kV, LLD 0,5 %, Dead Time 5  $\mu$ s

Abych nezačal od konce podíváme se na experimenty postupně od počátku. Nejprve tedy představím hodnoty naměřené při 9 kV s aplikovanou vodou (tab. 6).

Vzorek vedení, tlustý vodič 1,5mm s kapkami vody			
Uref	9kV		
	LLD	2,5%	Dead Time
			5 $\mu$ s
Polarita zdroje	kladný		záporný
NQS Value	178,2 pA		104,0 pA
Charge [IEC]	14,6 pC		26,5 pC
Total Counts	479		320

Tab. 6 Naměřené hodnoty při napětí 9 kV kladné i záporné polaritě zdroje, LLD 2,5 % a Dead Time 5  $\mu$ s

Zde bych chtěl poukázat právě na to co bylo zmíněno již při popisu předchozího experimentu. Opět se potvrdilo, že přes vyšší výbojovou činnost při kladném napájecím napětí je u záporné polarity vyšší celkový náboj. Stručně řečeno, kladná polarita způsobuje bohatší zapalování výbojů kdežto záporná polarita napětí vyvolá silnější výbojovou činnost. Výbojů je méně, ovšem díky jejich velikosti vedou k celkové akumulaci náboje, jež je větší. Při pohledu do měření při 16 kV bez aplikace vody je vidět popisovaný rozdíl velikosti výbojů. Na dolním obrázku je zřetelně vyšší výskyt výbojů označených červenými kroužky. Dolní obrázek ukazuje měření při záporném napětí.



Obr. 5.6 Porovnání kladné a záporné polarity napájecího napětí 16 kV, model venkovního vedení s vodičem o průměru 1,5 mm, červenými kroužky označeny nejvyšší výboje (kladná polarita – 5, záporná – 9)

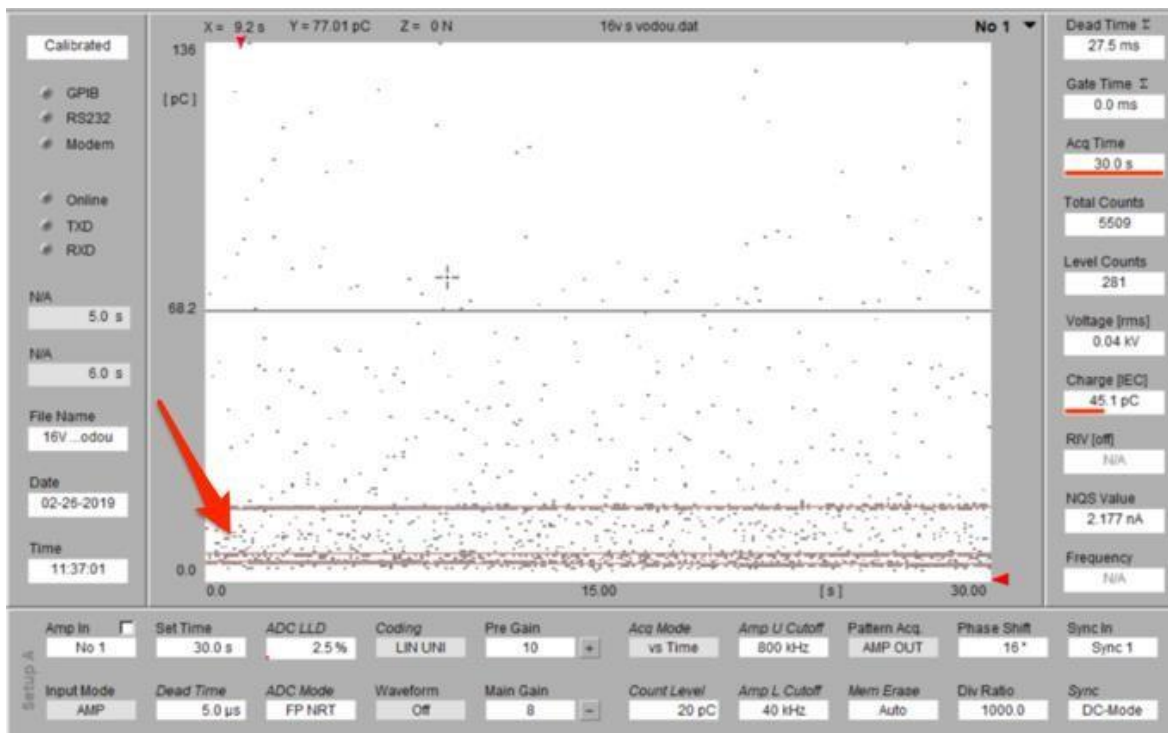


Ukazatelé Total Counts, Charge [IEC] a NQS Value zde nemá význam porovnávat, a tak nebyly ani zobrazeny, neboť měření probíhalo s dvěma odlišnými hodnotami LLD (2,5 % a 5 %). V dolním spektru je také vidět zmínění úkaz projevení výbojů což mi vedlo k nastavení hodnoty LLD na nižší hodnotu při dalších měřeních. Po aplikaci vody na této napěťové hladině se tento jev ještě zesílil. Parametry jsem tentokrát nastavil stejné, a tak je možné porovnání (tab. 7).

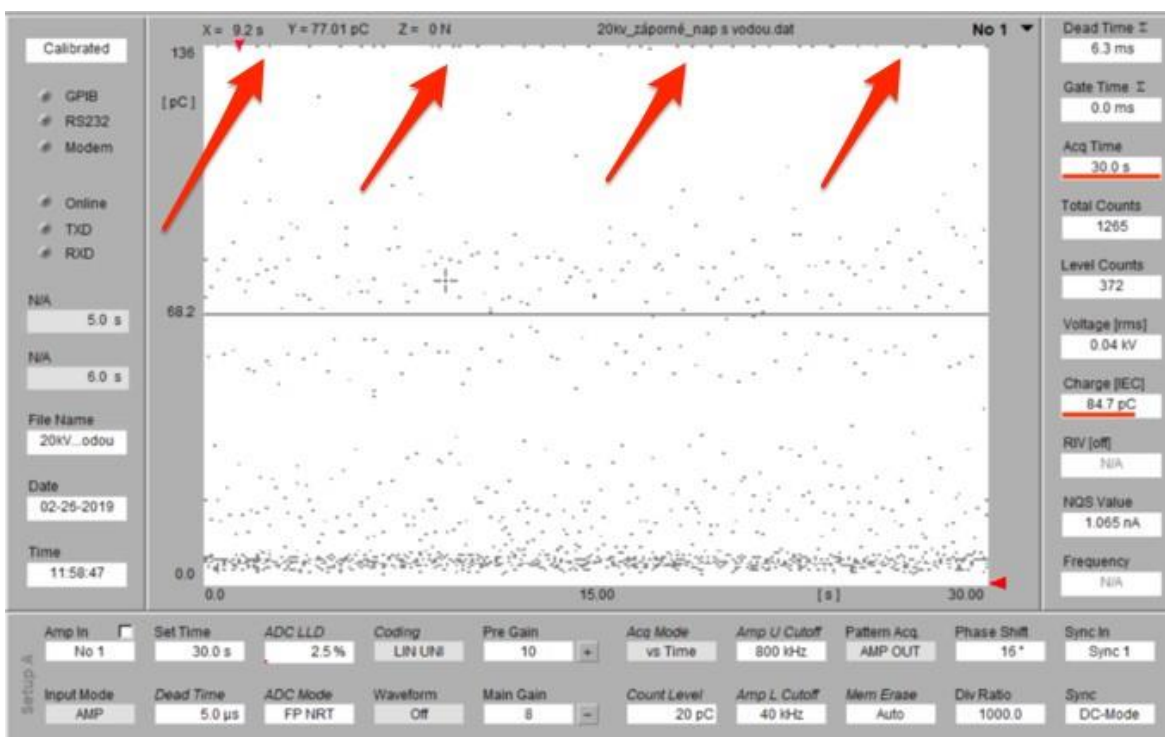
Vzorek vedení, tlustý vodič 1,5mm s kapkami vody			
U <sub>ref</sub>	16kV		
	LLD	2,5%	Dead Time
			5 $\mu$ s
Polarita zdroje	kladný		záporný
NQS Value	2,177 pA		1,065 nA
Charge [IEC]	45,1 pC		84,7 pC
Total Counts	5 509		1 265

Tab. 7 Naměřené hodnoty při napětí 16 kV kladné i záporné polarity zdroje s aplikací vody, LLD 2,5 % a Dead Time 5  $\mu$ s

Výskyt výbojů byl zejména u kladné polarity zdroje v dolním sektoru (obr. 5.7) zatímco u záporné polarity náboje byl takřka dvojnásobný celkový náboj. Ten lze naopak vyčíst z větších a mnohem více vyskytujících se výbojů u záporné polarity (obr. 5.8). Zesílení je totožné u obou obrázků.



Obr. 5.7 Výbojová aktivita v dolním sektoru, napájecí napětí 16 kV kladná polarita s kapkami vody, model venkovního vedení s vodičem o průměru 1,5 mm, Dead Time 5  $\mu$ s a LLD 2,5 %



Obr. 5.8 Znatelně vyšší výboje při záporné polaritě napětí 16 kV s kapkami vody, model venkovního vedení s vodičem o průměru 1,5 mm, Dead Time 5  $\mu$ s a LLD 2,5 %

V další úrovni napájecího napětí a to 20 kV jsem změnou parametru LLD na 5 % dospěl k takřka totožným hodnotám náboje Charge [IEC], NQS Value střední hodnoty proudu částečných výbojů i přes lišící se počet výbojů Total Counts. Potvrdilo se tedy výše uvedené – výskyt výbojů byl četnější u kladné polarity napájecího napětí ovšem u záporné polarity byly výboje četnější vyšší stejně jako při měření 16 kV (obr. 5.8).

Vzorek vedení, tlustý vodič 1,5mm				
U <sub>ref</sub>	20kV			
	LLD	5,0%	Dead Time	5 $\mu$ s
Polaritazdroje	kladný		záporný	
NQS Value	1,604 nA		1,096 nA	
Charge [IEC]	76,1 pC		76,3 pC	
Total Counts	2 346		1 375	

Tab. 8 Naměřené hodnoty napětí 20 kV kladné i záporné polarity, LLD 5 % a Dead Time 5  $\mu$ s

Poslední úroveň měření je 24 kV s aplikovanou vodou. Dosud vždy měření na vzorku venkovního vedení vykazovalo větší výbojovou činnost se stoupajícím napájecím napětím, která se s vyššími hodnotami ještě stupňovala. Ovšem zde je tomu přesně naopak. Očekávaný počet výbojů – Total Counts, který byl předpokládán vyšší u záporné polarity byl naopak více než čtyřikrát menší oproti polaritě kladné. Také celkový náboj Charge [IEC] byl nižší u záporné polarity napájecího napětí což nebylo až tak překvapující, neboť podobný úkaz vykazovalo již měření tenkého vodiče 0,5 mm

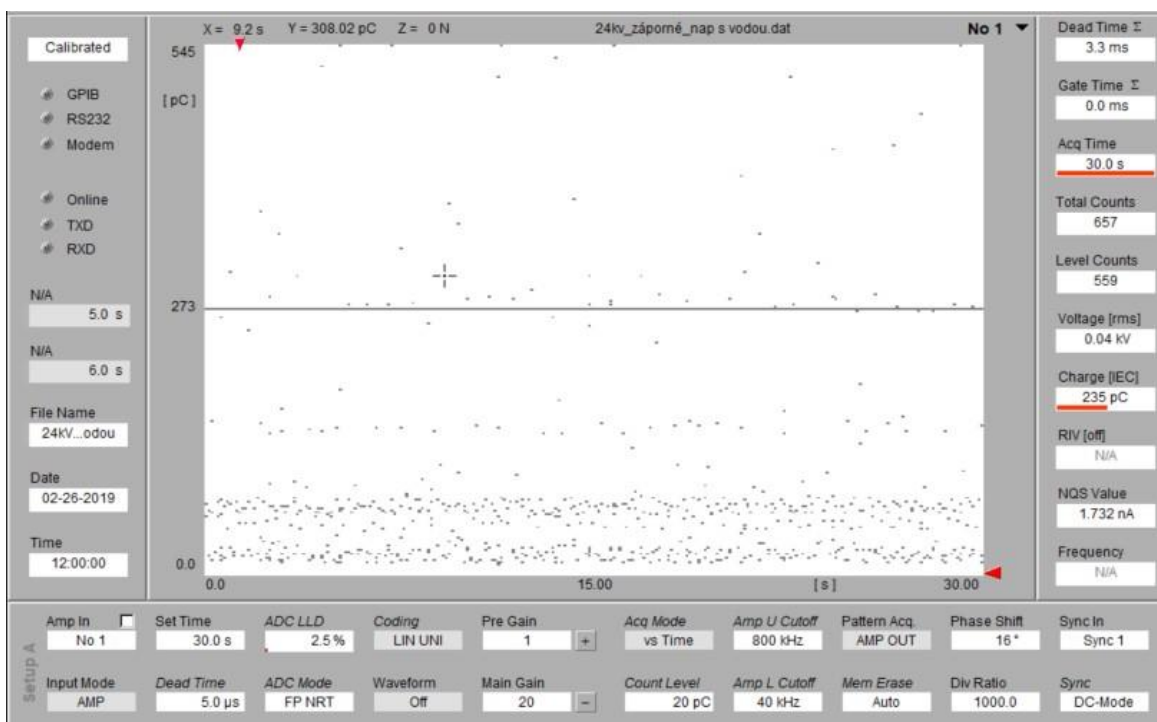


venkovního vedení při 15 kV. Poslední parametry ukazující střední proud částečných výbojů NQS Charge byl srovnatelný (tab. 9).

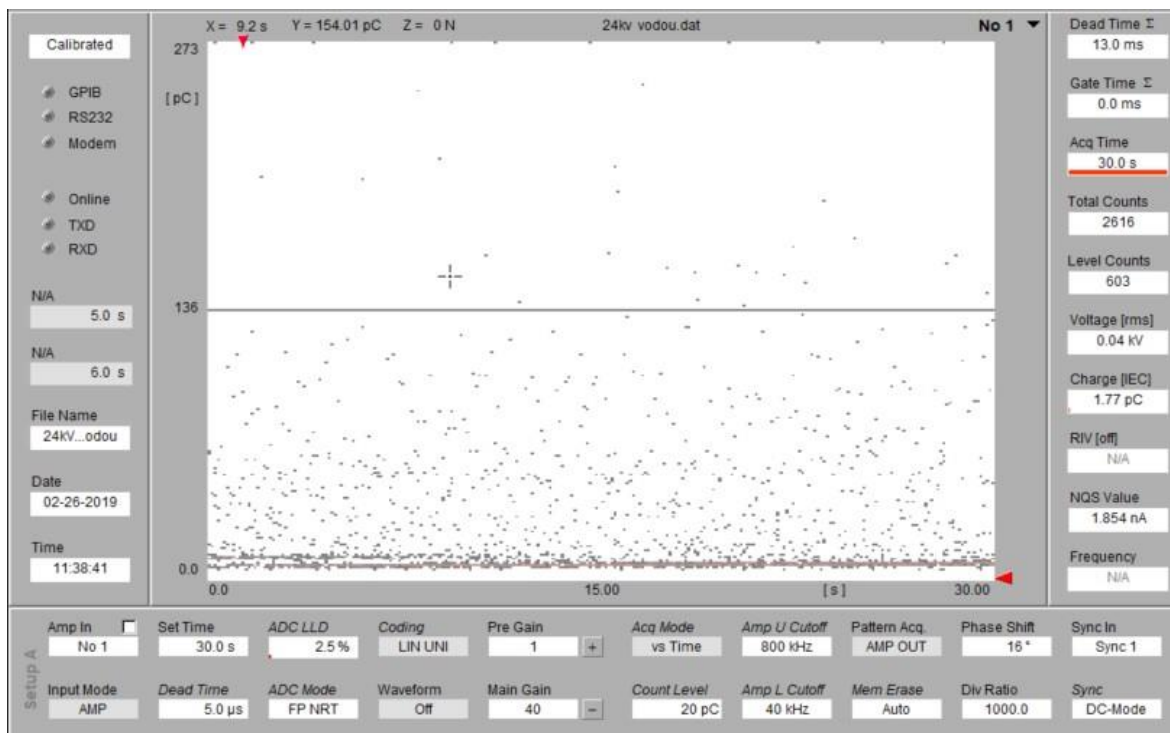
Vzorek vedení, tlustý vodič 1,5mm s kapkami vody			
U <sub>ref</sub>	24kV		
	LLD	2,5%	Dead Time
			5 $\mu$ s
Polaritazdroje	kladný		záporný
NQS Value	1,354 nA		1,732 nA
Charge [IEC]	1,77 pC		235 pC
Total Counts	2 616		657

Tab. 9 Naměřené hodnoty při napětí 24 kV kladné i záporné polarity zdroje s aplikací vody, LLD 2,5 % a Dead Time 5  $\mu$ s

Znatelně vyšší počet výbojů je vidět opět v dolním sektoru při napájecím napětí kladné polarity zdroje, zatímco vysoká hodnota proudu výbojů u záporné polarity napájecího napětí je jasně způsobena výboji s vyšší hodnotou, a to po celou dobu měření. Tyto výboje lze vidět na nižším spektru v horní polovině. Podobně veliké výboje jsou zapalovány u kladné polarity až skoro v půlce měřícího intervalu, tj. 15 vteřin ale neopakují se a jejich výskyt je zcela nahodilý. Naopak záporná polarita má výboje pravidelně se opakující po celou měřící dobu.



Obr. 5.9 Větší výboje při záporné polaritě napětí 24 kV s kapkami vody po celém měřícím intervalu, model venkovního vedení s vodičem o průměru 1,5 mm, Dead Time 5  $\mu$ s a LLD 2,5 %, vyšší zesílení



Obr. 6 Výboje v dolní části spektra při kladné polaritě napětí 24 kV s kapkami vody, model venkovního vedení s vodičem o průměru 1,5 mm, Dead Time 5  $\mu$ s a LLD 2,5 %, nižší zesílení

Na první pohled vypadá, že větší výbojová aktivita je při kladné napájecí polaritě napětí (obr. 6) čemuž tak opravdu je. Tímto bych chtěl poukázat na porovnání velikosti vyskytujících se výbojů. Jelikož mají oba porovnávané experimenty rozdílná zesílení, tj. Pre Gain 1 a Main Gain 20 pro zápornou polaritu napájecího napětí (obr. 5.9) a Pre Gain 1 a Main Gain 40 pro kladnou polaritu napájecího napětí (obr. 6) rozhodl jsem se zmiňovaný jev prozkoumat přímo v softwaru ICMsystem. Za prvé jsem si zvolil referenční hladinu, na které bych chtěl demonstrovat rozdíl ve velikosti a četnosti výbojů. Tato hladina je 273 pC což je střední hranice u záporného napětí (obr. 5.9) a horní hrana u kladné (obr. 6). Následovně jsem počítal výboje nacházející se pouze na této hranici či výše.

Vzorek vedení, tlustý vodič 1,5mm s kapkami vody				
U <sub>ref</sub>	24kV			
	LLD	2,5%	Dead Time	5 $\mu$ s
Polarita zdroje	kladný		záporný	
Počet výbojů	10		47	

Tab. 10 Četnost výbojů vyšších a rovných 273 pC při napětí 24 kV kladné i záporné polarity zdroje s aplikací vody, LLD 2,5 % a Dead Time 5  $\mu$ s

Chtěl bych také podotknout, že pouhá polovina z těchto 47 výbojů jež nastaly při záporné polaritě napájecího napětí 24 kV je lehce nad hranicí 273 pC. Druhá polovina

vykazují znatelně vyšší hodnoty mezi 400 až 500 pC a pět výbojů bylo zaznamenáno s hodnotou vyšší než 545 pC.

Posledním měřením na tomto modelu jsem zkoušel obnovit vodu, která se dle mého předpokladu mohla při delším měření vypařovat. Postupoval jsem tedy tak, že jsem po aplikaci vody najel ihned na hladinu napájecího napětí 24 kV a bezprostředně měřil (tab. 11).

Vzorek vedení, tlustý vodič 1,5mm s kapkami vody				
U <sub>ref</sub>	24kV			
	LLD	2,5%	Dead Time	5 μs
	voda		obnovená voda	
<b>NQS Value</b>	1,854 nA		992,8 pA	
<b>Charge [IEC]</b>	1,77 pC		1,77 pC	
<b>Total Counts</b>	2 616		2 060	

Tab. 11 Porovnání hodnoty při obnově vody, kladná polarita zdroje napětí 24 kV s aplikací vody, LLD 2,5 % a Dead Time 5 μs

Důvodem, proč jsou hodnoty po obnově vody nižší než prvotní by mohly být větší zhluky kapek na vodiči. Ty zabraňovaly zapalovacímu napětí koróny v četné aktivitě jako v předchozím měření, kde byla část vody už vypařena. Dále se domnívám, že roli může hrát i rozložení vody po samotném vodiči a vedení pod ním. Jelikož voda byla aplikována a měření bylo provedeno rychle v řádech sekund, voda se nemohla rozložit po celém experimentálním vzorku vedení jako tomu bylo v předchozích experimentech kdy byla voda na modelu až několik minut.

#### 4.4 Měření při stejnosměrném napětí model průchodky

Poslední z trojice experimentů jsem provedl se zhotovenou průchodkou. Při tomto měření byl charakter výbojů jiný. Jedná se o výboj klouzavý, který nastává na hranici rozhraní prostředí mezi vodivým AlFe lanem a izolačním keramickým tělem odstíněným měděným plechem.

První úroveň napětí je 5 kV. Po předchozích experimentech jsem se rozhodl zvolit nastavení parametrů LLD 2,5 % a Dead Time 5 μs. Tato konfigurace z mého pohledu vykazovala nejlepší parametry zobrazení z hlediska výpočetního výkonu dostatečného pro hladký záznam bez přerušení a také odstínění šumu z pozadí v laboratoři KEE/ZČU.

Hned první změřená úroveň vykazovala významné rozdíly v polaritě napájecího napětí. Při kladné polaritě byla výbojová činnost zřetelně větší, tj. o 580 výbojů více. S tímto počtem výbojových impulzů se také lišily parametry NQS Value i Charge [IEC] (tab. 12).

Vzorek průchodka				
U <sub>ref</sub>	5kV			
	LLD	2,5%	Dead Time	5 μs
Polarita zdroje	kladný		záporný	
NQS Value	250,6 pA		90,17 pA	
Charge [IEC]	26,3 pC		16,6 pC	
Total Counts	894		314	

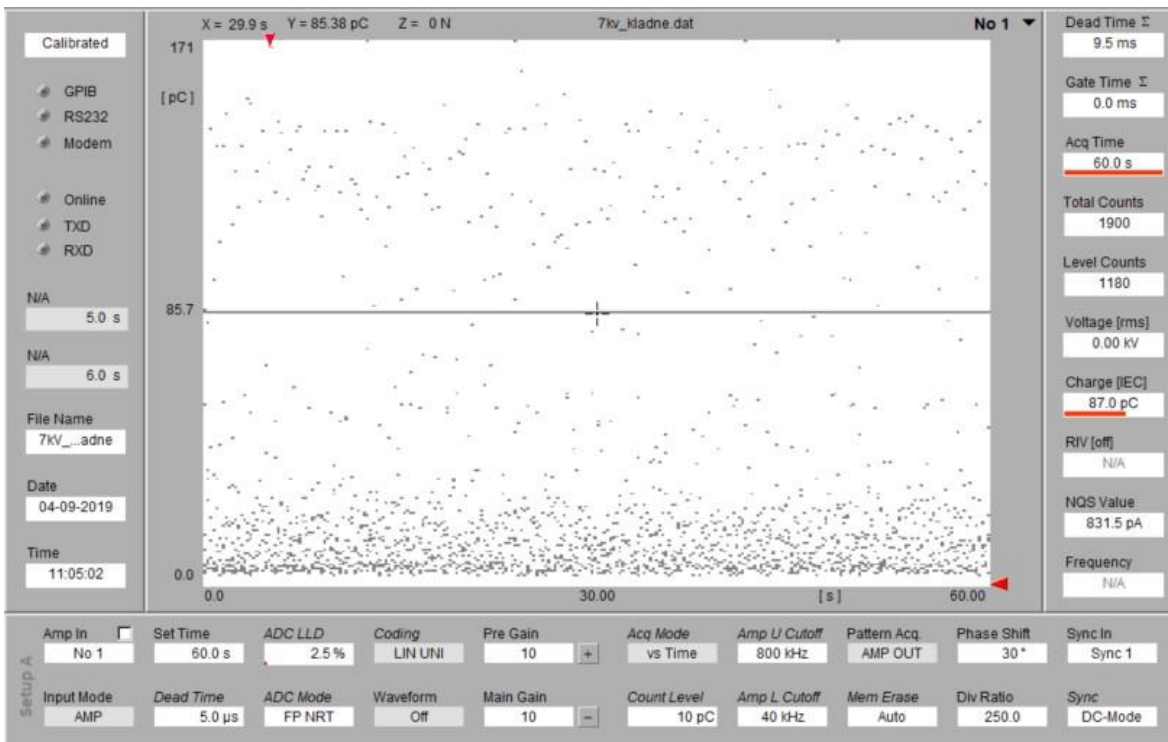
Tab. 12 Měření modelu průchodka, napájecí napětí 5 kV, LLD 2,5 % a Dead Time 5 μs

Další úroveň 7 kV prezentuje rozdílné výsledky, které se ovšem potvrdily se zbytkem provedených experimentů u tohoto vzorku. Jedinou změnu tak ukazuje pouze měření při 5 kV což se dá označit za dolní mez napětí. To stejně jako při měření předchozích vzorků nejprve vykazovalo celkově větší výbojový děj na straně napětí kladné polaritě, ten se poté přehoupl vždy spíše k záporné polaritě napájecího napětí.

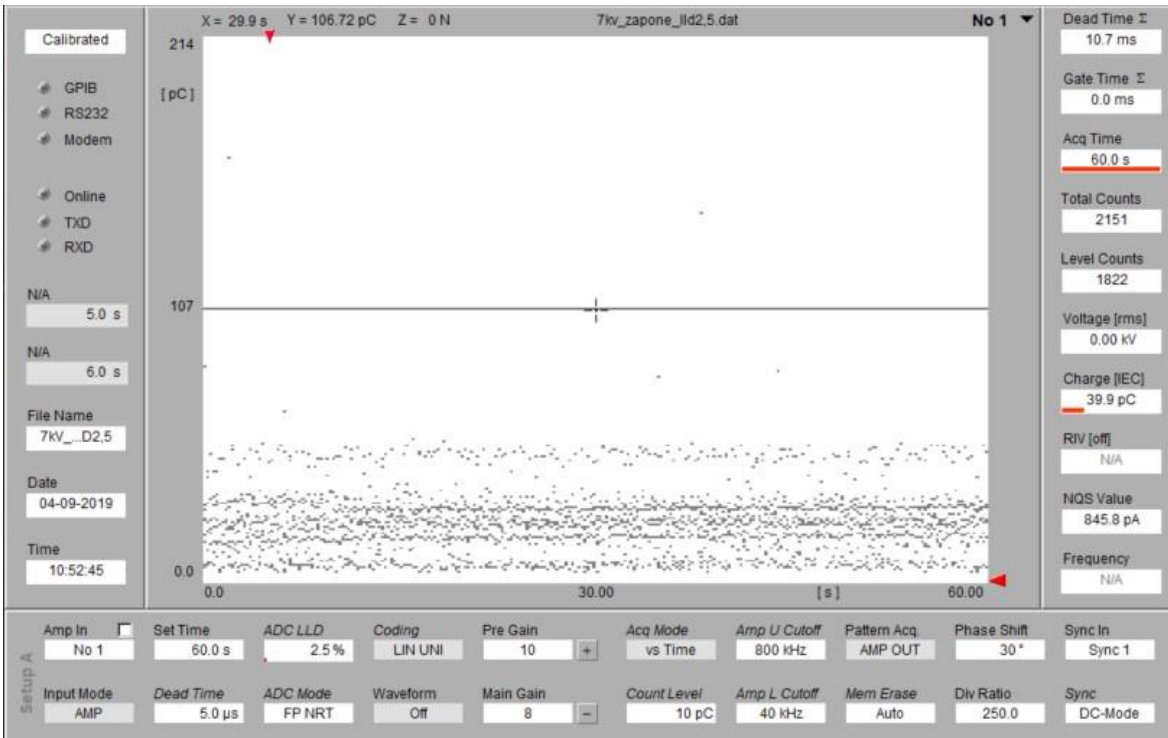
Počet výbojových impulzů, jež během měření nastaly je vyšší při záporné polaritě napájecího napětí. V porovnání velikosti náboje NQS Value už ovšem nenastává tak zřetelný rozdíl. Ačkoli je rozdíl ve spektrech na první pohled veliký, sledujeme zde počáteční projevení výskytu vyšších výbojů i u záporné polaritě napětí (obr. 6.2). Dolní záznam záporné polaritě je v rozdílném měřítku. Výboje je třeba tedy interpretovat jako vyšší, neboť zde bylo použito jemné zeslabení, které je vidět na svislé ose (velikost náboje). Zaznamenané hodnoty se lišily hlavně v parametru Charge [IEC]. Charge [IEC] ukazuje po ukončení měření pomyslnou obálku vyskytlých se výbojů, to po prohlednutí obr. 6.1 a v porovnání s obr. 6.2 potvrzuje, že NQS Charge byl výrazně vyšší.

Vzorek průchodka				
U <sub>ref</sub>	7kV			
	LLD	2,5%	Dead Time	5 μs
Polarita zdroje	kladný		záporný	
NQS Value	831,5 pA		845,8 pA	
Charge [IEC]	87,0 pC		39,9 pC	
Total Counts	1 900		2 151	

Tab. 13 Měření modelu průchodka, napájecí napětí 7 kV, LLD 2,5 % a Dead Time 5 μs

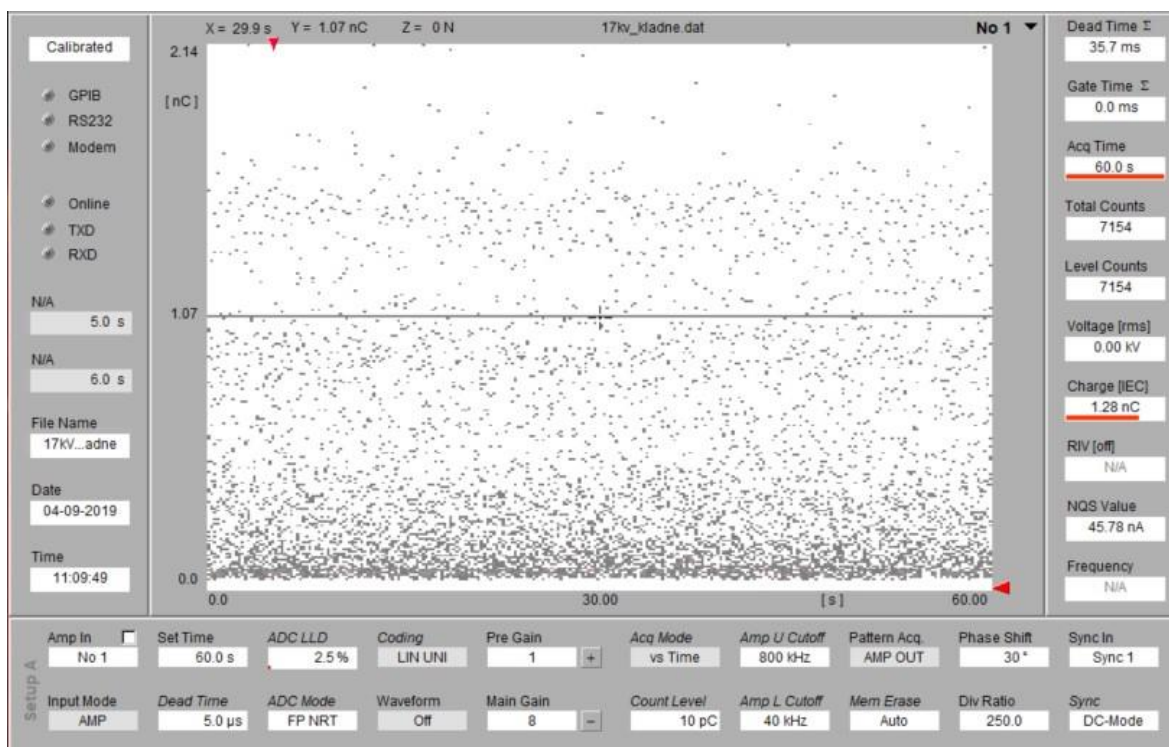


Obr. 6.1 Měření modelu průchodky při 7 kV, kladná polarita napětí, Dead Time 5 μs, LLD 2,5 % vyšší zesílení – Pre Gain 10 a Main Gain 10



Obr. 6.2 Měření modelu průchodky při 7 kV, záporná polarita napětí, Dead Time 5 μs, LLD 2,5 % nižší zesílení – Pre Gain 10 a Main Gain 8

Se zmínkou náboje Charge [IEC] z předchozí úrovně pokračuje posloupnost, jež ukazuje, že náboj byl vždy vyšší pro kladné napětí. I při nejvýraznějším rozdílu ve výbojové činnosti u úrovně 17 kV, tj. rozdíl mezi 7 154 impulzy pro kladné proti 24 690 pro záporné napětí byl stále větší náboj u kladné polarity, a to o řád (tab. 14). Také výbojové spektrum na této napěťové úrovni 17 kV bylo dost rozdílné.



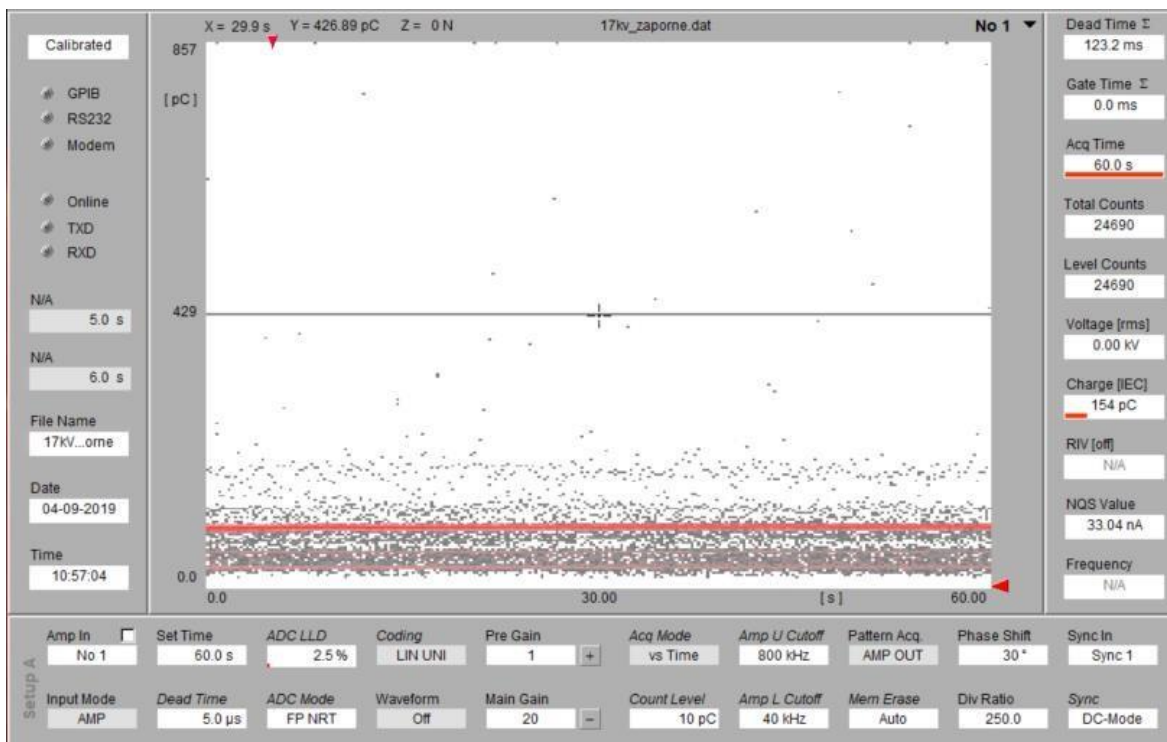
Obr. 6.3 Měření modelu průchodka při 17 kV, kladná polarita napětí, Dead Time 5  $\mu$ s, LLD 2,5 % nižší zesílení – Pre Gain 1 a Main Gain 8

Zde pozorujeme rozložení výbojů po celém spektru, kdy je zhuštění v dolní hranici. Pokud si na níže uvedeném obrázku (obr 6.4) porovnáme zhuštění výbojů při napětí záporné polarity docházíme ovšem k výsledku znatelně nižší četnosti u kladné polarity.

Vzorek průchodka				
U <sub>ref</sub>	17kV			
	LLD	2,5%	Dead Time	5 $\mu$ s
Polarita zdroje	kladný		záporný	
NQS Value	45,78 nA		33,04 nA	
Charge [IEC]	1,28 nC		154 pC	
Total Counts	7 154		24 690	

Tab. 14 Měření modelu průchodka, napájecí napětí 17 kV, LLD 2,5 % a Dead Time 5  $\mu$ s





Obr. 6.4 Měření modelu průchodky při 17 kV, záporná polarita napětí, Dead Time 5  $\mu$ s, LLD 2,5 % vyšší zesílení – Pre Gain 1 a Main Gain 20

Při těchto experimentech jsem také vyzoroval, že střední proud výbojů NQS Value výrazněji nemění hodnotu ať už se jedná o měření při kladné nebo záporné polaritě napětí, a to i v případě rozdílů v ostatních měřených parametrech. Hodnota bývá velmi často srovnatelná, neliší se v řádech. Jinak je tomu pouze v případě výrazně větších změn ve výbojové činnosti jako např. pětkrát či vícenásobná výbojová četnost, kde proud nalezneme rozdílný o řád i více. Při měření na úrovni 12 kV je vidět rozdíl jak v proudu NQS Value, tak i v náboji Charge [IEC] a počtu vyskytujících se výbojových impulzů. Výbojová činnost je dvojnásobně vyšší u záporné polaritě ačkoli proud je trojnásobně nižší (tab. 15).

Vzorek průchodka				
Uref	12kV			
	LLD	2,5%	Dead Time	5 $\mu$ s
<b>Polarita zdroje</b>	kladný		záporný	
<b>NQS Value</b>	12,83 nA		4,6 nA	
<b>Charge [IEC]</b>	702 pC		133 pC	
<b>Total Counts</b>	3 663		7 833	

Tab. 15 Měření modelu průchodky, napájecí napětí 12 kV, LLD 2,5 % a Dead Time 5  $\mu$ s



Spekuloval jsem zda-li nemůže být tato anomálie nižšího proudu za cenu vyšší výbojové aktivity aplikována do mých experimentů obecně. Po zkoumání jsem ale došel k závěru, který tento jev vyvrátil a anomálie tak zůstala pouhou anomálií v měření. Není jasným pravidlem, že proud je nižší pro vyšší výbojovou činnost záporné či kladné polarity napětí. Spíše naopak a z logiky věci plynoucí závěr je, že proud je úměrný četnosti výbojů což potvrzují všechna tři měření až na pár výjimek. To nelze říci o celkovém náboji. Ten se u některých měření liší i v řádech i přes zjevné indýcije. Na náboj musíme pohlížet s respektováním velikosti výbojů vykreslených ve spektru protože ty jsou klíčem k jeho stanovení.

## Závěr

U měření vodičů na vedení se prokázalo, že u menšího průměru 0,5 mm má cenu sledovat spíše zápornou polaritu napětí s rostoucí napěťovou hladinou, kde rostou parametry počtu výbojů, střední proud částečných výbojů i jejich náboj oproti kladné polaritě napětí. U měření na vodiči s větším průměrem 1,5 mm bylo chování koróny lehce odlišné. Výbojová aktivita nerostla dle předpokladu pro zápornou hodnotu, ale naopak větší výskyt výbojů byl zapalován u kladné hodnoty napětí, a to i při vyšších hladinách. Ovšem u záporné hodnoty napětí, a to zejména opět pro zvyšující se úroveň napájecího napětí, docházelo k zapálení výbojů větších hodnot než u kladné polarity napětí. Tento fakt byl potvrzen i při experimentech s vodičem o průměru 0,5 mm.

Pokud už došlo k zapálení výraznější koróny na těchto modelech poklesla s ní hodnota celkového náboje, to je dobře vidět při měření tenkého vodiče 0,5 mm, hodnoty 20 kV napájecího napětí. Při měření vzorků s vodou má pak na měření velký vliv parametr LLD, který bych volil jako první v rámci nastavení detektoru částečných výbojů v případě selhání záznamu. Zejména při zkouškách s vodou má tento parametr zjevná opodstatnění pro odlehčení výpočetního výkonu pro měřený systém. Při zmínce o měření s vodou také z mého měření plyne, že opodstatněny jsou spíše zkoušky aplikace vody bez jejího obnovení. To vedlo ke zkreslení parametrů.

Důležitou kapitolou je také měřicí výkon celého sestaveného obvodu. U mého experimentálního obvodu jsem několikrát zmiňoval slabší výpočetní výkon staršího počítače. Ten mohl způsobit výpadky v záznamu detektorem částečných výbojů čímž chci poukázat na fakt, že i samotná volba zařízení je pro experimenty stěžejně důležitá.

Experiment s průchodkou potvrdil také, že nižší počet zaznamenaných impulzů detektorem vede také k vyššímu náboji na dané polaritě napájecího napětí, a to i v případě výboje klouzavého. Dalším zjištěním bylo, že parametry nastaveny v tomto měření LLD 2,5 % a Dead Time 5  $\mu$ s jsou opodstatněny. Nenastal zde problém se záznamem a nedošlo k chybě měřicího systému vlivem slabšího výkonu. Nicméně, je nutno poznamenat, že při těchto experimentech se nejednalo o tak vysoké hodnoty výbojové činnosti jako v předchozím případě.

Postup pro měření výbojové činnosti při střídavém napětí je celkem odzkoušený řadou let a škálou experimentů. Naopak měření při stejnosměrném napětí je celkem nová metoda, u které lze stále bádát a rozšiřovat její obzory do neprozkoumaných hladin. U obou těchto metod jsem pozoroval parametry, které nejvíce vypovídaly o chování měřeného systému – velikost naměřeného náboje, celkový počet zaznamenaných výbojů, střední proud částečných výbojů a napětí zdroje s měřicí dobou po kterou měření probíhalo. U střídavého napětí je postup jasný, po správném nastavení měřícího detektoru systém naměří výbojovou činnost pro dané parametry zdroje. Zobrazení pak ukazuje průběh zapalování výbojů pro danou napěťovou hladinu při napěťové frekvenci – vidíme obě polarity napětí. Ovšem v porovnání s metodou stejnosměrného měření nemusíme brát také v potaz samotné nastavení zdroje, tj. jeho volba napájecí polarity napětí, kdy právě volba polarity celé měření značně mění vzhledem k parametrům měřícího detektoru. Kromě toho u střídavého napětí existuje řada obrazců díky nimž lze stanovit předpoklady, a tedy i nastavení přístrojů v experimentu použitých.

Z mých dosažených výsledků měření bych při postupu měření doporučil velký důraz při stanovení parametrů LLD a Dead Time. V postupu oproti střídavému je potřeba obezřetněji přistupovat k nalezení správné hladiny LLD pro odfiltrování rušení. Tento faktor se v mých experimentech ukázal jako jeden z klíčových faktorů celého měření, jakožto i správná volba Dead Time. Při porovnání polarit napájecího napětí zdroje bych taktéž rád zmínil nastavení hodnot zesílení, které se na první pohled nezdá jako klíčové. Ovšem při pozdějším porovnání zde může docházet k důležitému sběru dat z měření, neboť při správném nastavení se projeví u obou polarit veškeré výboje v plné velikosti a nebudou tedy zkresleny.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] ČSN EN 60270 (345641): *Technika zkoušek vysokým napětím - Měření částečných výbojů.*
- [2] En.Wikipedia.org: 2018: [online] *Partial Discharge* [cit. 9.11.2018]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Partial\\_discharge](https://en.wikipedia.org/wiki/Partial_discharge)
- [3] P. H. F. Morshuis, *Partial discharge mechanisms in voids related to dielectric degradation*, in IEE Proceedings - Science, Measurement and Technology, vol. 142, no. 1, pp. 62-68, Jan. 1995.
- [4] P. H. F. Morshuis and J. J. Smit, *Partial discharges at DC voltage: their mechanism, detection and analysis*, in IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 12, no. 2, pp. 328-340, April 2005.
- [5] MARTÍNEK, P. *Teoretická a experimentální analýza částečných výbojů v dielektriku elektrických strojů.* Plzeň, 2005, 144 s.
- [6] Prskavec, L. *Měření částečných výbojů.* ČVUT, Praha, 1999.
- [7] Powermdt.com: 2015: [online] *Partial Discharge* [cit. 16.11.2018]. Dostupné z: <http://www.powermdt.com/partial-discharge->
- [8] ElektroPrůmysl.cz: © 2011 - 2019: [online] *Energetika – mereni – a – charakter – castecnych – vyboju – cv – v – točivých - strojich* [cit. 19.1.2019]. Dostupné z: <http://www.elektroprumysl.cz/energetika/mereni-a-charakter-castecnych-vyboju-cv-v-tocivych-strojich><http://www.elektroprumysl.cz/energetika/mereni-a-charakter-castecnych-vyboju-cv-v-tocivych-strojich>
- [9] VLÁŠEK, V. *Bakalářská práce. Měření částečných výbojů v průmyslové výrobě.* 2015. Dostupné také z: [https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/11025/18667/1/BP\\_Mereni\\_castecnych\\_vyboju\\_Va clav\\_Vlasek\\_E12B0120K.pdf](https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/11025/18667/1/BP_Mereni_castecnych_vyboju_Va clav_Vlasek_E12B0120K.pdf)
- [10] Aldebaran.cz: 2019: [online] *Korónový výboj* [cit. 19.1.2019]. Dostupné z: <https://www.aldebaran.cz/glossary/print.php?id=718>
- [11] DocPlayer.cz: 2019: [online] *Korónové a jiskrové detektory* [cit. 20.1.2019]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/15243325-Koronove-a-jiskrove-detektory.html>
- [12] LAURENC, J. Home.zcu.cz. *Předmět TVN.* Dostupné také z: <http://home.zcu.cz/~laurenc/tvn.php>

- [13] ČSN EN 60270 technika zkoušek vysokým napětím - Měření částečných výbojů. 2001.
- [14] VEVERKA, A. *Technika vysokých napětí*. Praha: SNTL, 1978.
- [15] BEHRÍK, V. Diplomová práce. Průrazné napětí izolačního média v závislosti na tlaku. 2014. Dostupné také z: [https://otik.zcu.cz/bitstream/11025/14892/1/DP\\_behrik\\_E12N0136P.pdf](https://otik.zcu.cz/bitstream/11025/14892/1/DP_behrik_E12N0136P.pdf)
- [16] VEVERKA, A. *Technika vysokých napětí*. 2., přeprac. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1978.
- [17] 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.
- [18] MENTLÍK, V. *Diagnostika elektrických zařízení*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2008, ISBN: 978-80-7300-232-9, 439 s.
- [19] MITTAL, Lakshya, R. SARATHI a K. SETHUPATHI. *Electrical treeing in XLPE cable insulation at cryogenic temperature under harmonic AC voltages*. *Cryogenics* [online]. 2015, roč. 71, s. 62–67. ISSN 00112275. Dostupné z: doi:10.1016/j.cryogenics.2015.05.010.
- [20] En.Wikipedia .org: 2018: [online] *Electrical treeing* [cit. 7.2.2019]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Electrical\\_treeing](https://en.wikipedia.org/wiki/Electrical_treeing)
- [21] ZÁLIŠ, K.: *Částečné výboje v izolačních systémech elektrických strojů*. 1. vyd. Praha 2005. 139 s. ISBN 80-200-1358-X
- [22] GERMANT A., PHILLIPPOF W.v.: *Die Funkenstrecke mit Vorkondensator*. *Z. für tech. Phys.*, č. 13 (1932), s. 425-430.
- [23] *Whatis.techtarget.com*: 2019: [online] *Coulomb* [cit. 13.2.2019]. Dostupné z: <https://whatis.techtarget.com/definition/coulomb>
- [24] SKÁCELOVÁ, D. Spektrální diagnostika klouzavých výbojů typu Glid-Arc. Brno, 2007, 40 s. Bakalářská práce.
- [25] JEŘÁBEK, M. Elektrické charakteristiky klouzavého výboje. Brno, 2010, 21 s. Bakalářská práce. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=29240](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=29240)

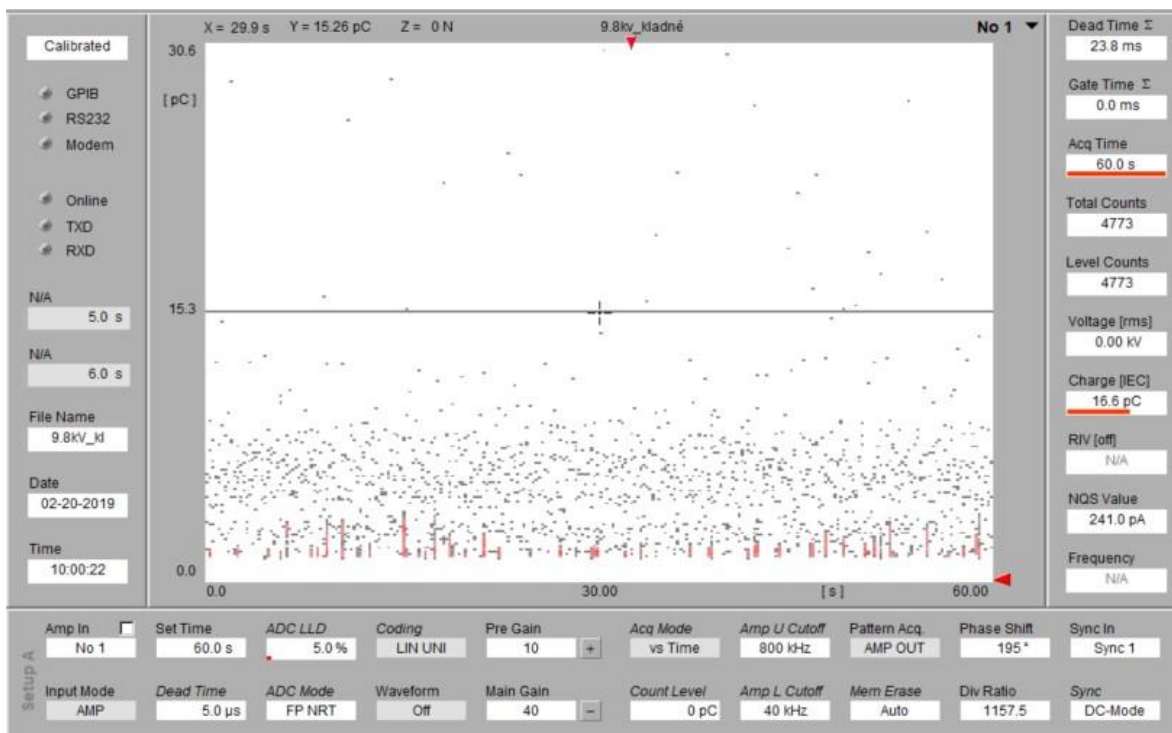
- [26] MACHALA, P. *Metody lokalizace polohy zdroje impulsního širokospektrého signálu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 99 s.
- [27] HAVLÍČEK, T. *Částečné výboje v elektronických zařízeních pracujících na vyšších kmitočtech*. Bakalářská práce, Brno, 2009. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, ústav mikroelektroniky.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] PASLAVSKÝ, B. *Měřicí metody částečných výbojů*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2008, ISBN: 978-80-7043-703-2, 59-62 s.
- [32] 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)
- [33] 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.
- [34] ČSN EN 60599 ed.2. *Elektrická zařízení v provozu plněná minerálním olejem - Návod pro interpretaci výsledků analýz rozpuštěných a volných plynů*.
- [35] *Electricalbalba.com*: 2019 [online] *Corona* [cit. 28.2.2019]. Dostupné z: <https://electricalbaba.com/corona-discharge-factors-affecting-corona-2/>
- [36] Fotogalerie FELJunior, ZČU FEL, 2015.

- [37] MENTLIK, V., J. PIHERA, P. TRNKA a P. MARTINEK. Partial Discharge Potential Free Test Methods. *2006 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena* [online]. říjen 2006 [vid. 2016-11-26]. Dostupné z: doi:10.1109/CEIDP.2006.312000.
- [38] Power Diagnostix - Manual. Power Diagnostix Systems. Dostupné také z: <https://www.pdix.com/downloads/manuals.html>
- [39] TESLA - Manuál. Napěťový zdroj TESLA Brno, typ BS 222a.
- [40] Power Diagnostix – Diagnosis, Monitoring, Quality Control, Research and Development. Power Diagnostix Systems. Dostupné také z: [https://www.pdix.com/index.php?eID=tx\\_securedownloads&p=135&u=0&g=0&t=1554967776&hash=4d579c7033d37cba943cb20184c7b4806fd59867&file=fileadmin/user\\_upload/pdix/downloads/documents/Brochure\\_Pages/Brochure\\_9.28](https://www.pdix.com/index.php?eID=tx_securedownloads&p=135&u=0&g=0&t=1554967776&hash=4d579c7033d37cba943cb20184c7b4806fd59867&file=fileadmin/user_upload/pdix/downloads/documents/Brochure_Pages/Brochure_9.28)

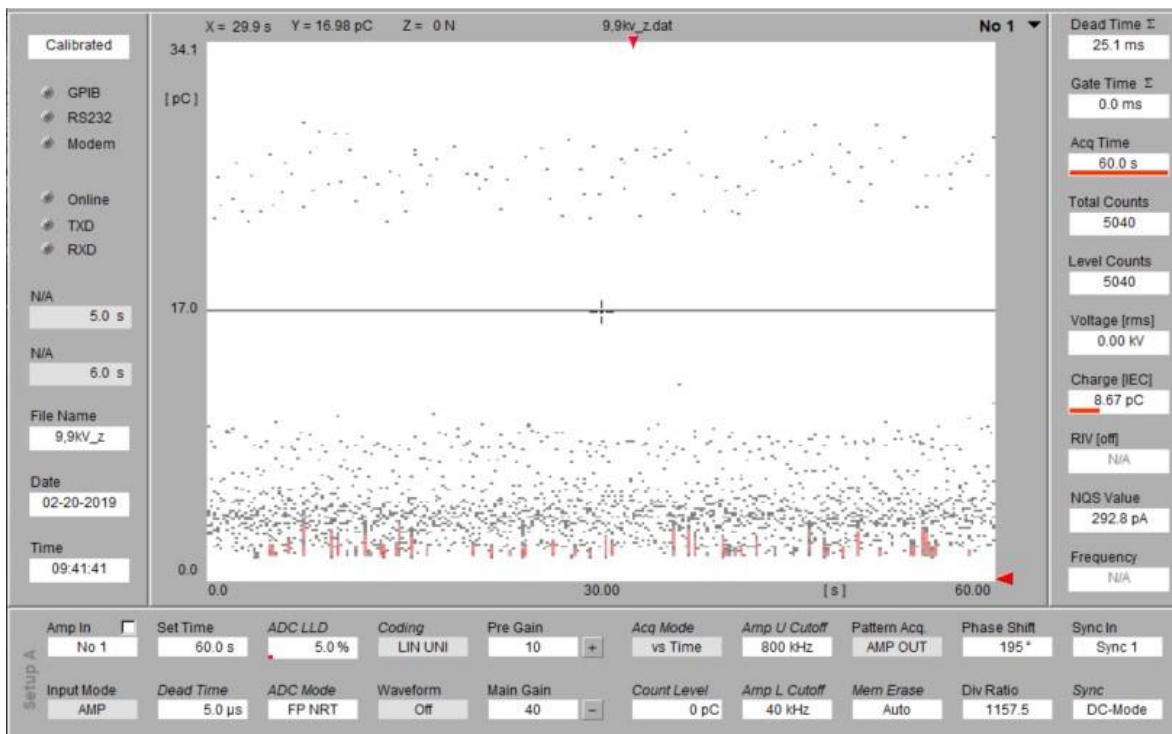


## Přílohy

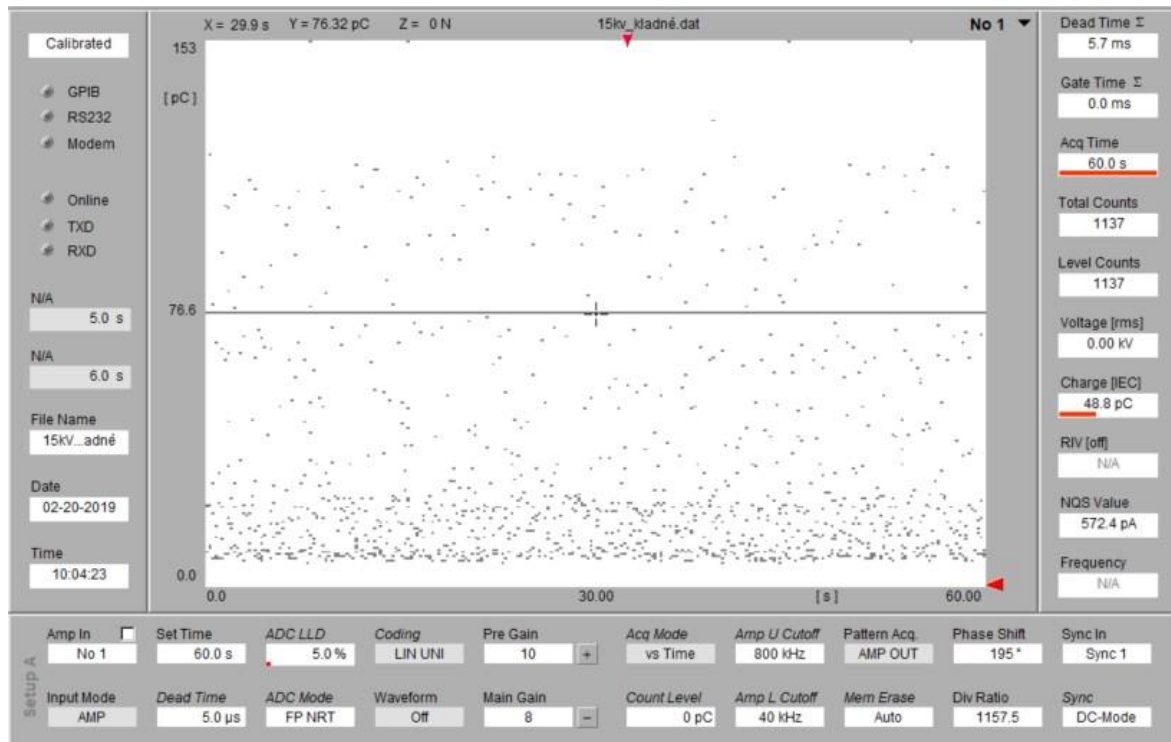
### Příloha A – Zaznamenané vzorky měření modelu venkovního vedení s vodičem o průměru 0,5 mm při kladné a záporné polaritě napětí 10 kV a 15 kV



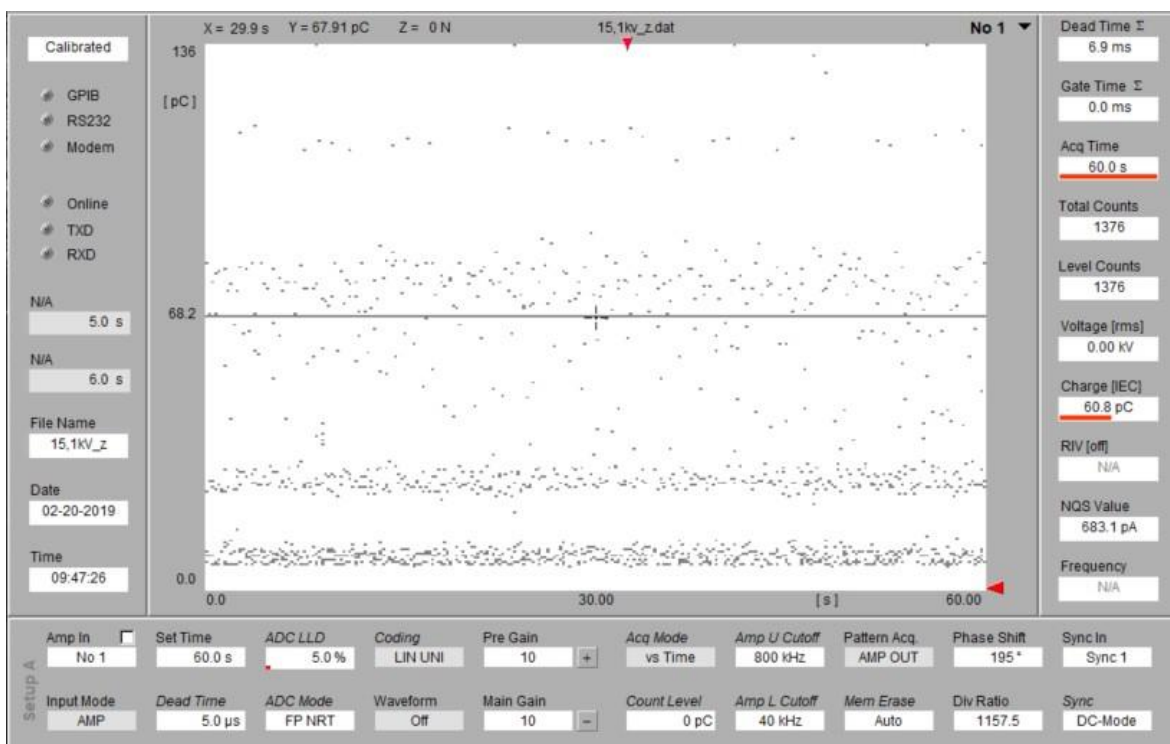
Napájecí napětí 10 kV, kladná polarita zdroje, Dead Time: 5 μs; LLD 5,0%



Napájecí napětí 10 kV, záporná polarita zdroje, Dead Time: 5 μs; LLD 5,0%

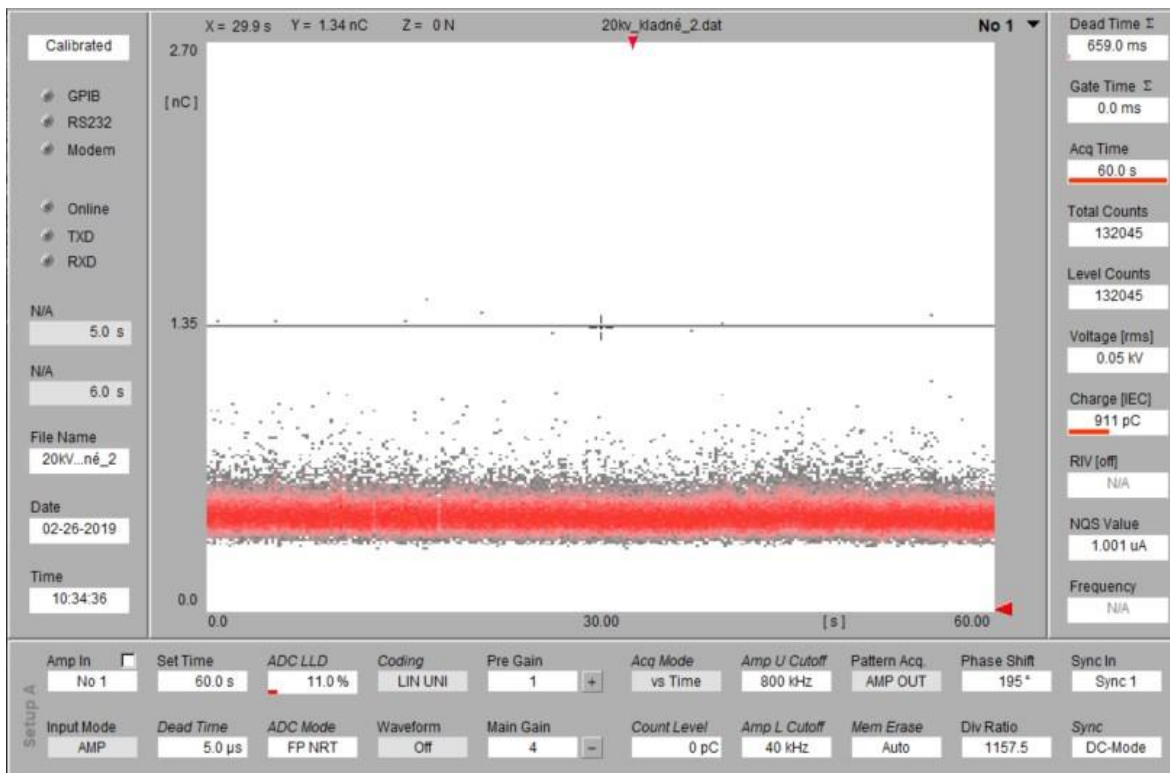


Napájecí napětí 15 kV, kladná polarita zdroje, Dead Time: 5 μs; LLD 5,0%

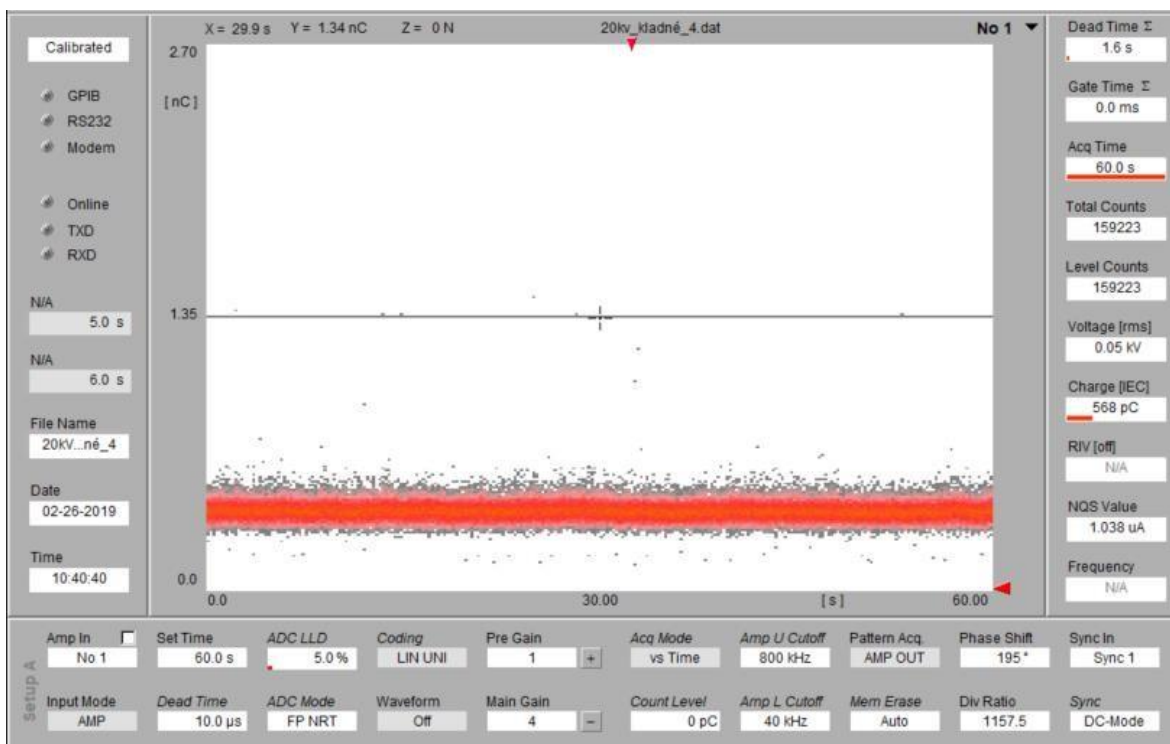


Napájecí napětí 15 kV, záporná polarita zdroje, Dead Time: 5 μs; LLD 5,0%

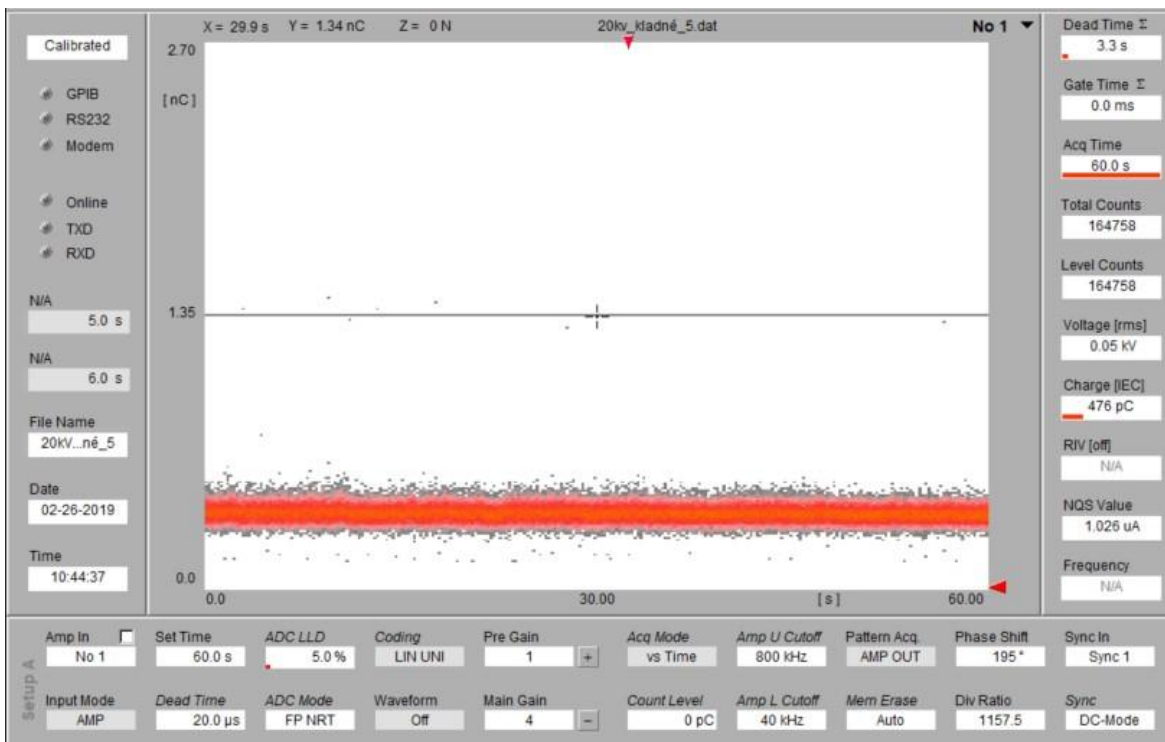
**Příloha B – Zaznamenané vzorky měření modelu venkovního vedení s vodičem o průměru 0,5 mm při kladné polaritě napětí 20 kV se změnami parametru Dead Time a LLD**



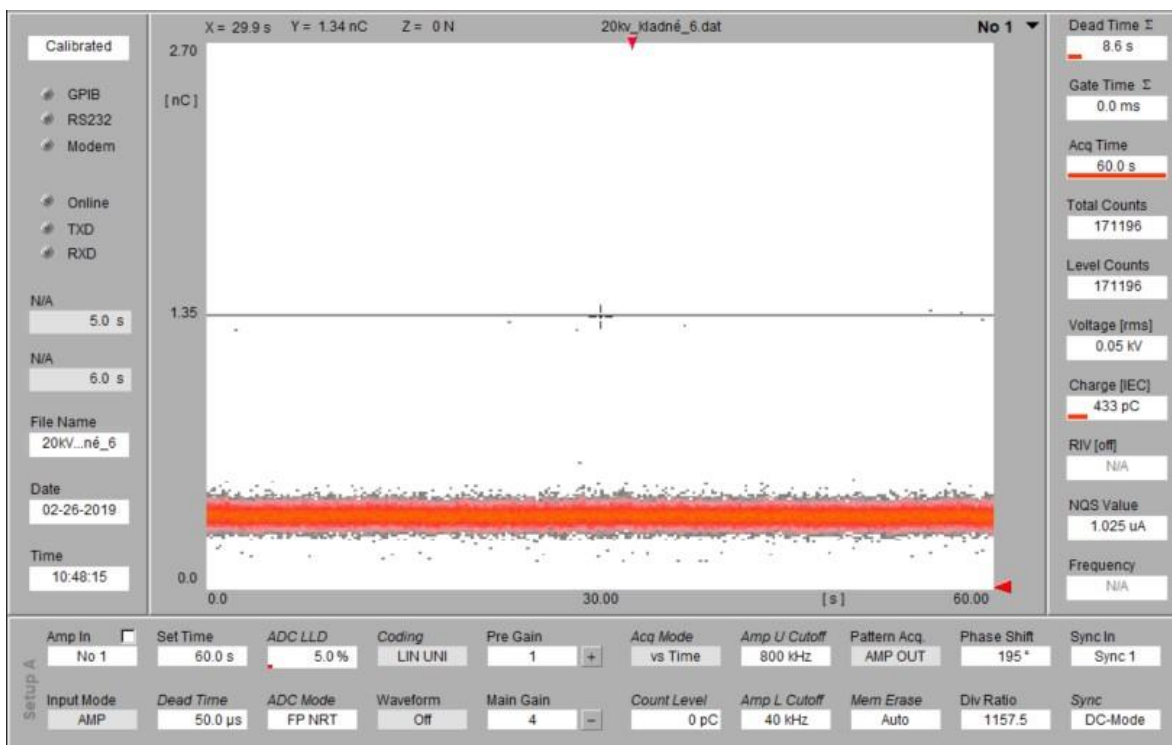
*Napájecí napětí 20 kV, kladná polarita zdroje, Dead Time: 5 μs; LLD 11,0%*



*Napájecí napětí 20 kV, kladná polarita zdroje, Dead Time: 10 μs; LLD 5,0%*



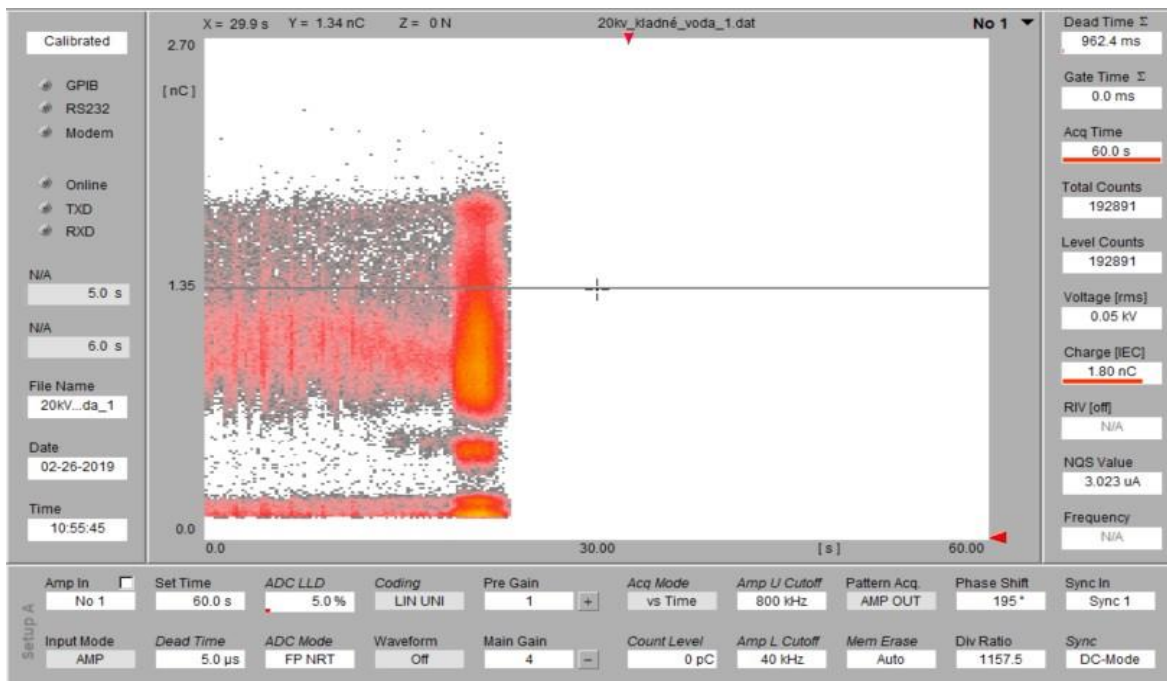
Napájecí napětí 20 kV, kladná polarita zdroje, Dead Time: 20 μs; LLD 5,0%



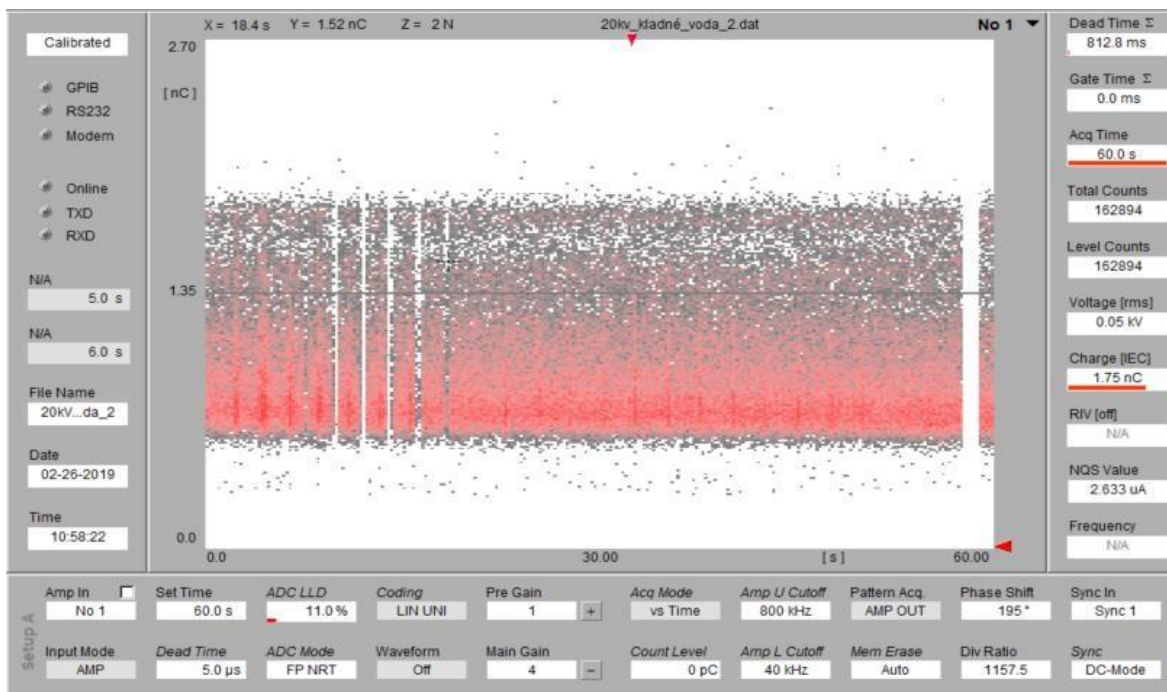
Napájecí napětí 20 kV, kladná polarita zdroje, Dead Time: 50 μs; LLD 5,0%



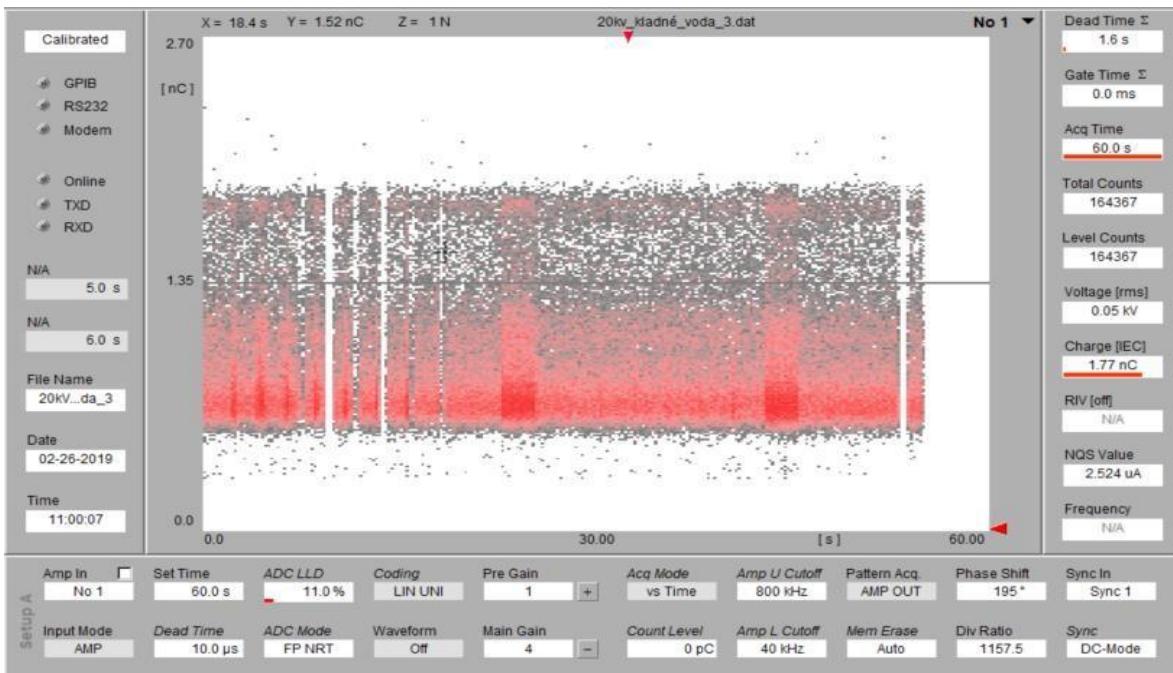
**Příloha C – Selhání měřicího systému při měření modelu venkovního vedení s vodičem o průměru 0,5 mm, kladné polaritě napětí 20 kV se změnami parametru Dead Time a LLD a aplikaci vody**



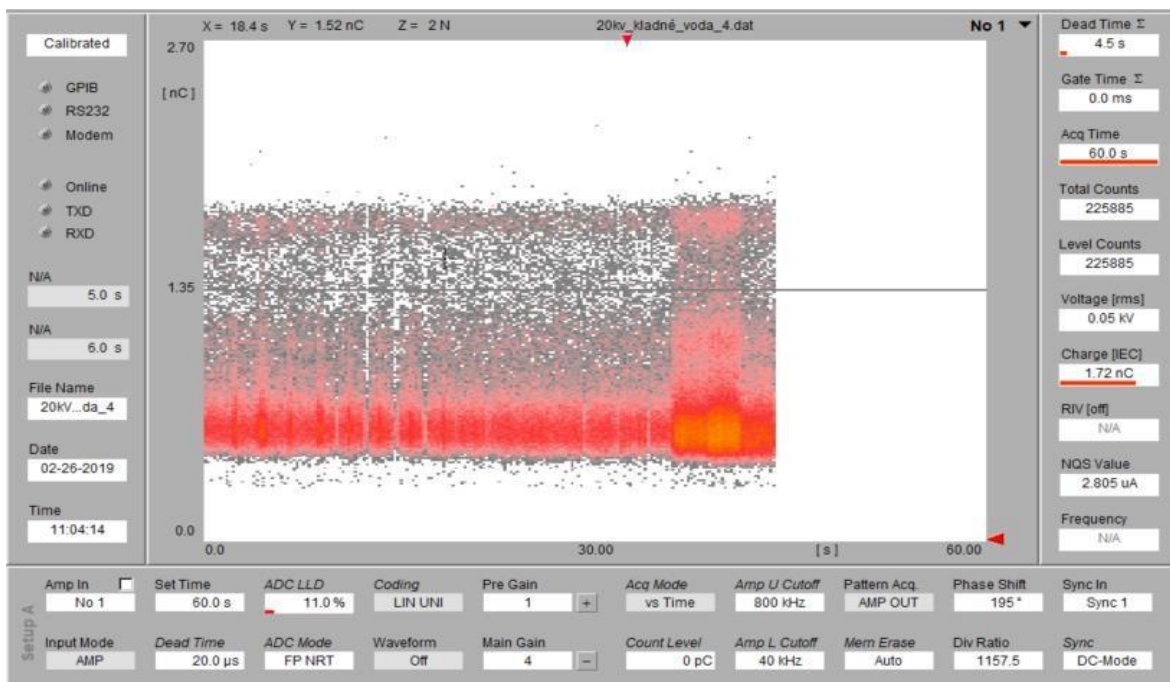
Největší chyba měření, Dead Time 5 μs; LLD 5,0%



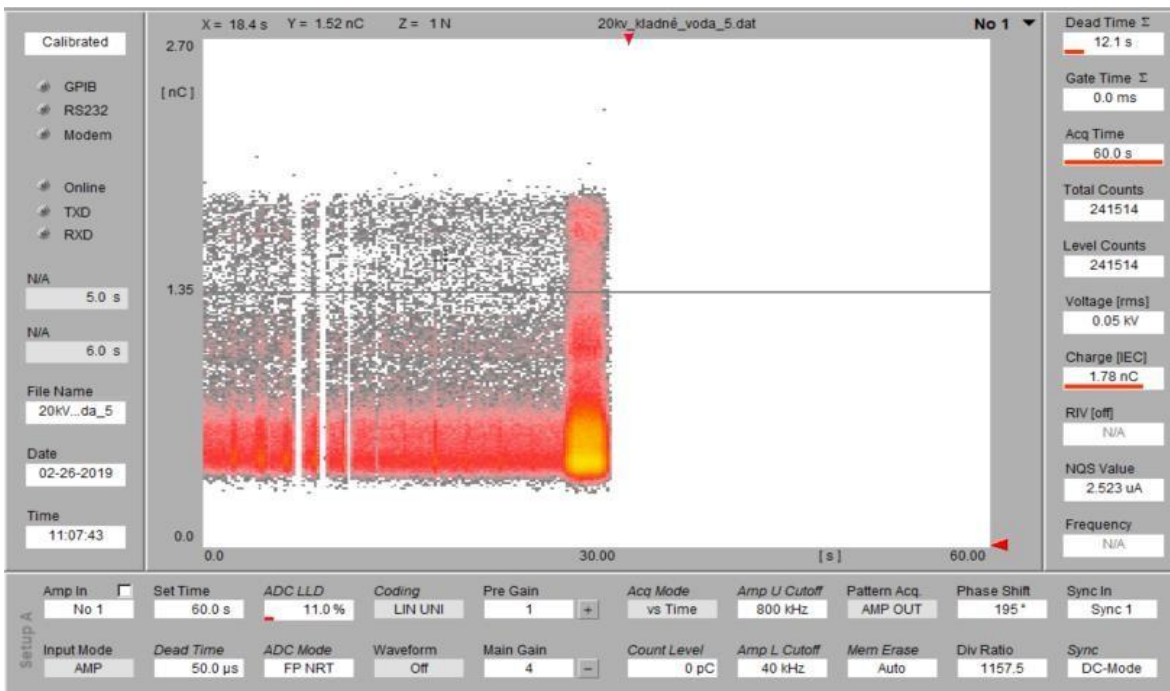
Nejnižší chyba měření, Dead Time 5 μs; LLD 11,0 %



Chyba měření při parametrech Dead Time 10 μs; LLD 11,0 %

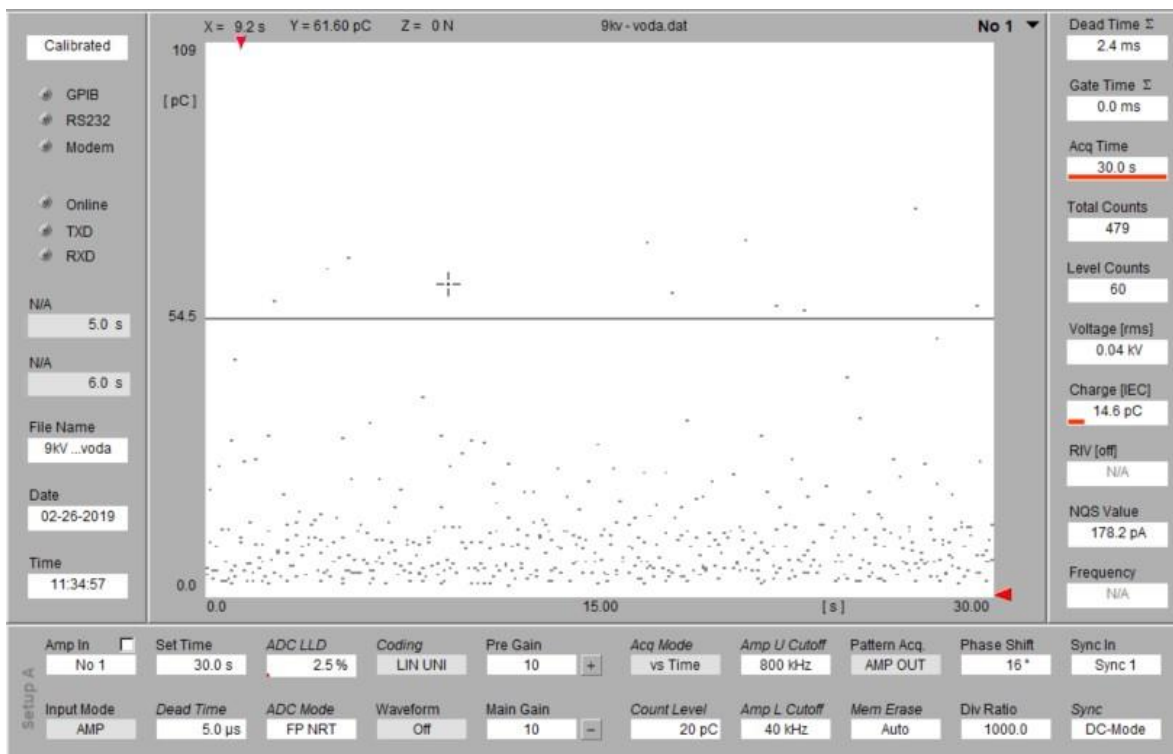


Chyba měření při parametrech Dead Time 20 μs; LLD 11,0 %



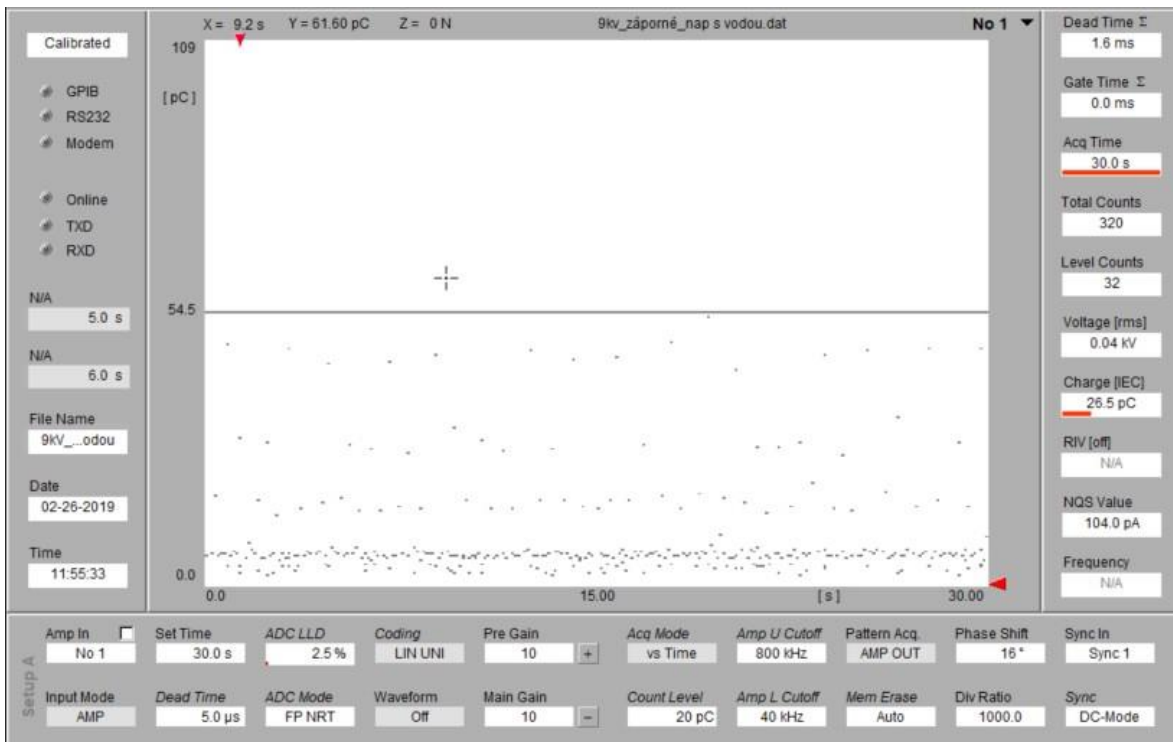
Chyba měření při parametrech Dead Time 50 μs; LLD 11,0 %

**Příloha D – Naměřené hodnoty při měření modelu venkovního vedení s vodičem o průměru 1,5 mm s kapkami vody, kladné a záporné polarity napětí 9 kV, Dead Time 5 μs a LLD 2,5 %**



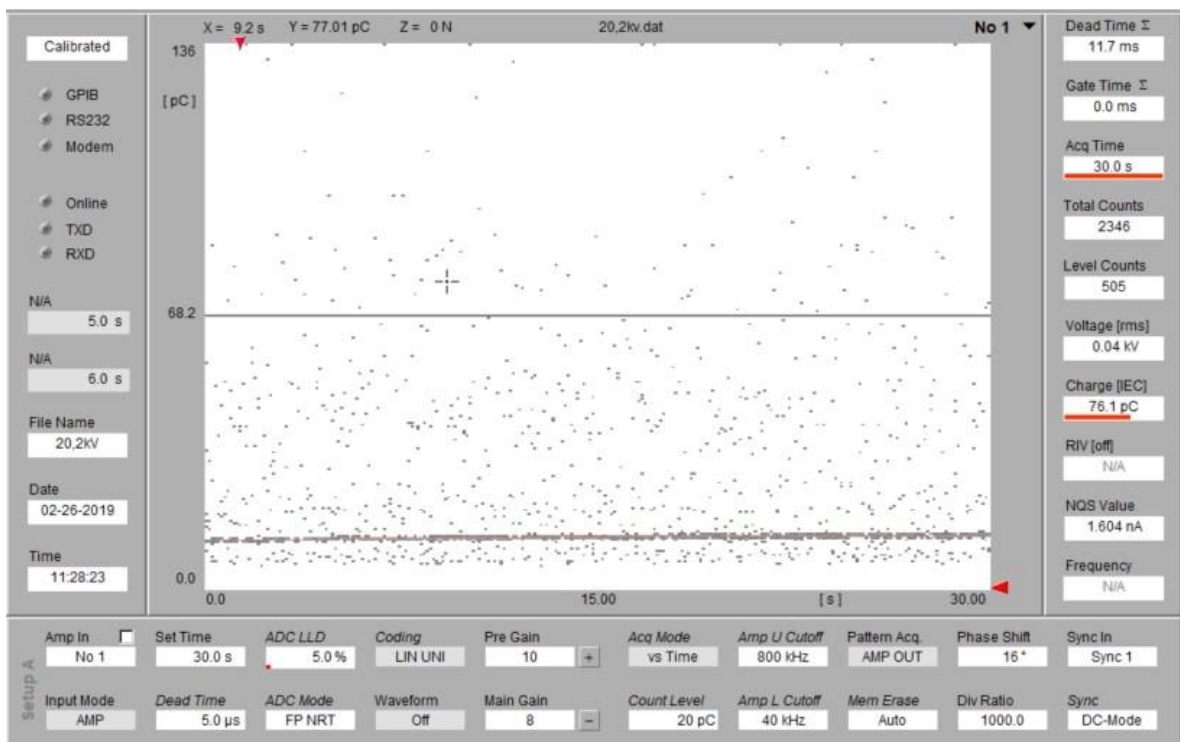
Kladná polarita napájecího napětí 9kV, Dead Time 5 μs; LLD 2,5 %



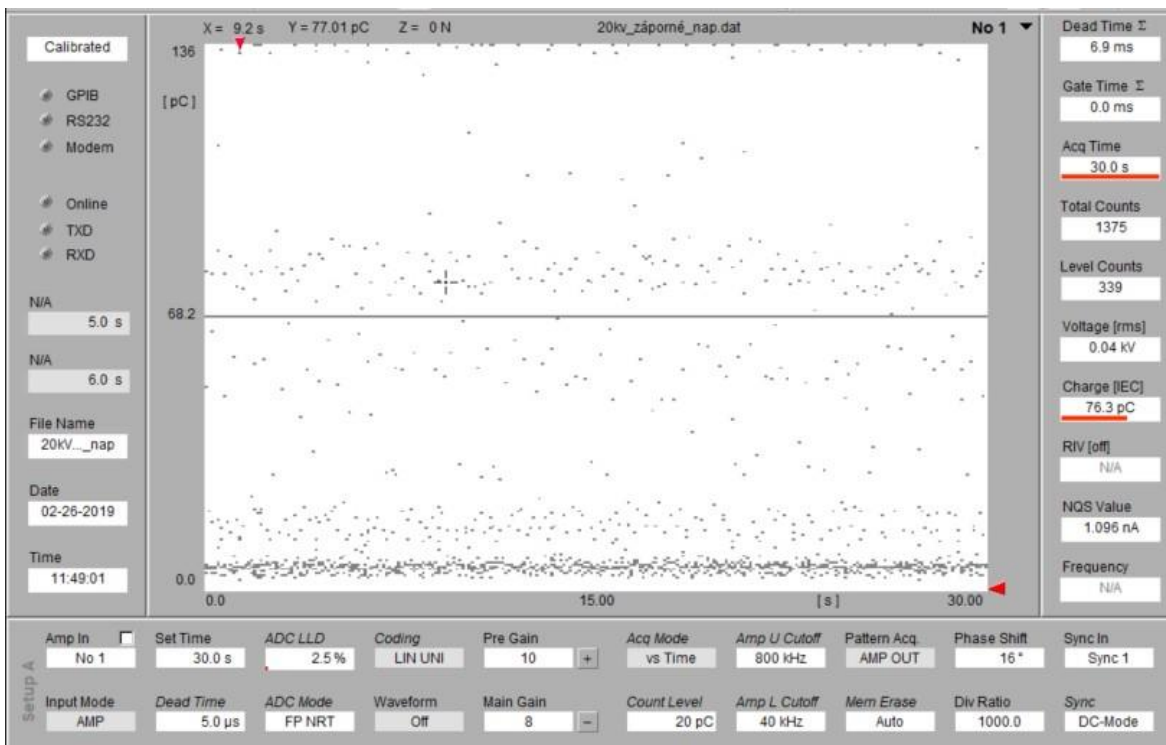


Záporná polarita napájecího napětí 9 kV, Dead Time 5 μs; LLD 2,5 %

**Příloha E – Výbojová činnost při měření modelu venkovního vedení s vodičem o průměru 1,5 mm, kladné a záporné polarity napětí 20 kV kde lze vidět výbojovou činnost v dolním sektoru a znatelně větší výskyt velkých výbojů u záporné polarity napájecího napětí**

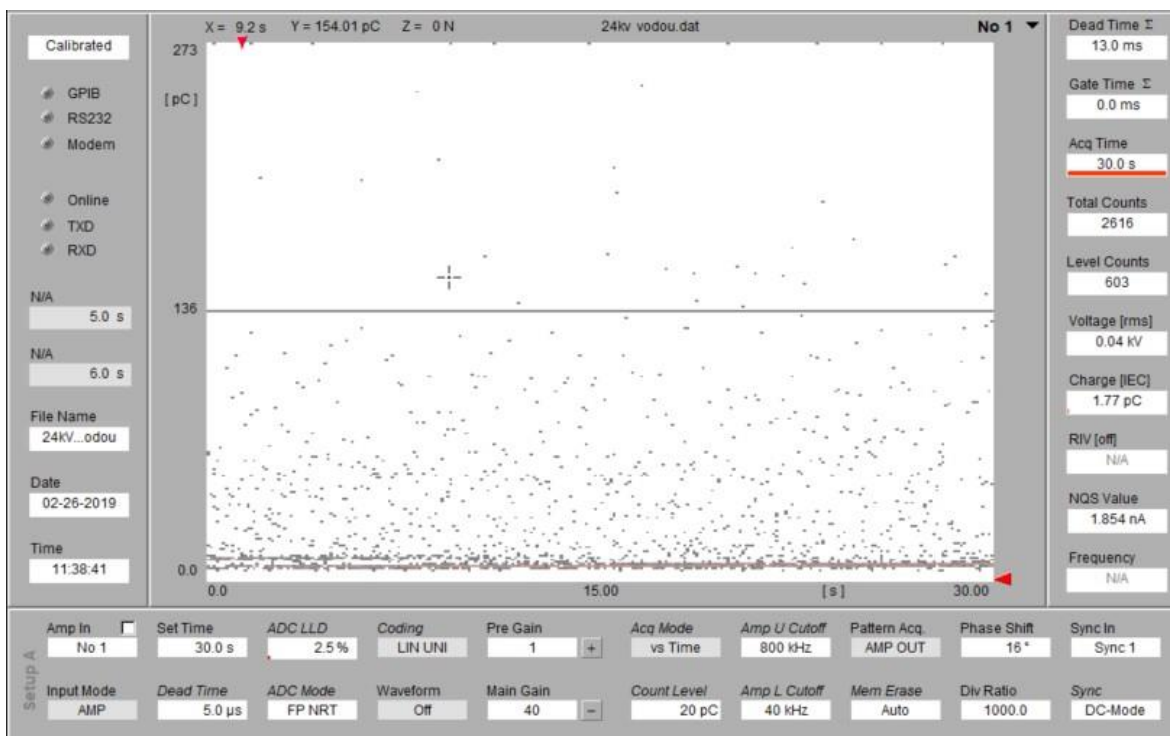


Kladná polarita napájecího napětí 20 kV, Dead Time 5 μs; LLD 5,0 %

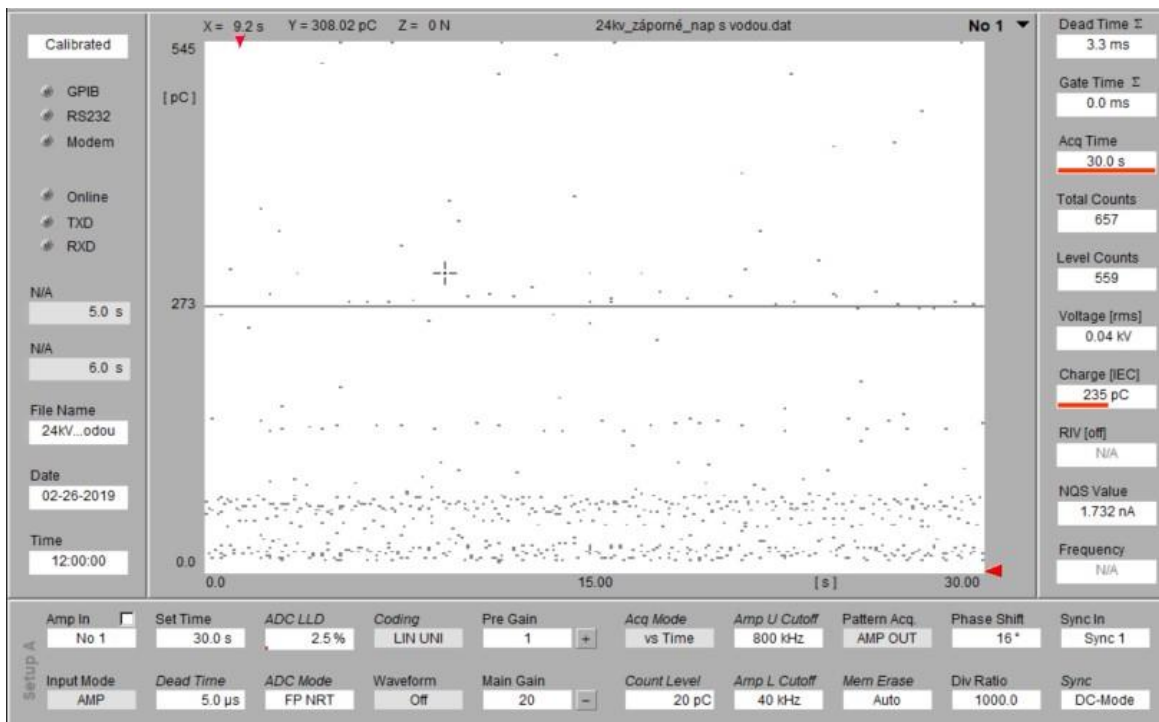


Záporná polarita napájecího napětí 20 kV, Dead Time 5 μs; LLD 5,0 %, vyšší výbojová četnost na horní hranici spektra

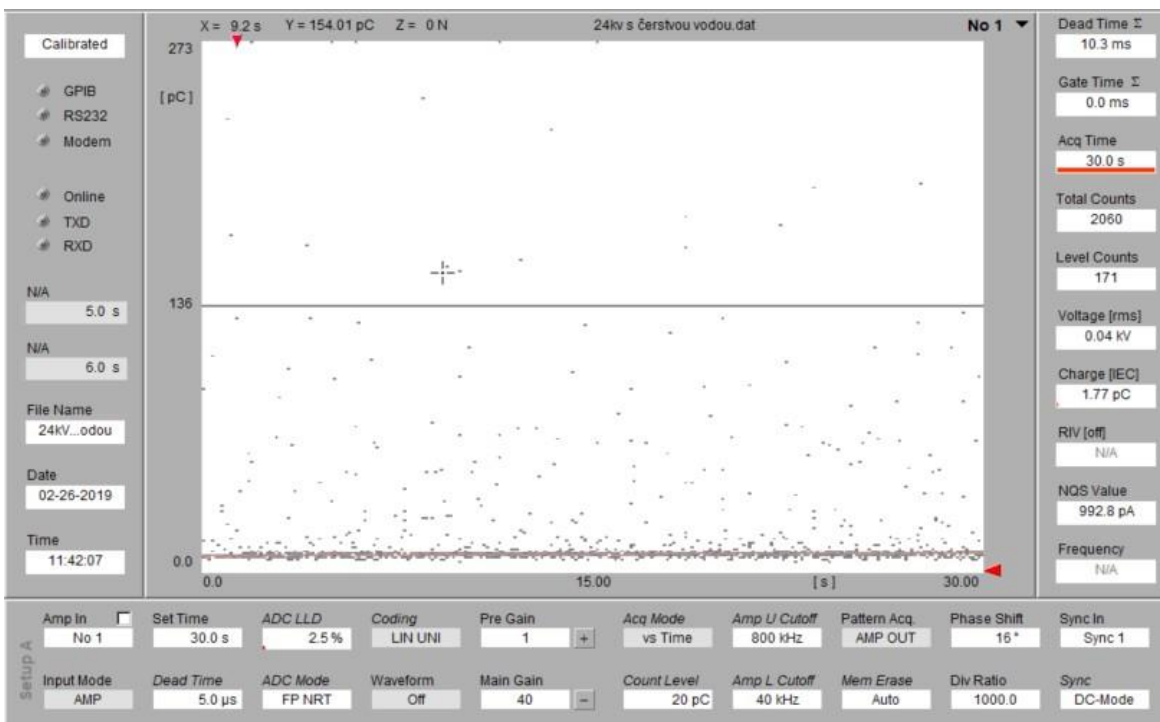
**Příloha F – Výbojová činnost při měření modelu venkovního vedení s vodičem o průměru 1,5 mm, kladné a záporné polarity napětí 24 kV před a po obnovení vody**



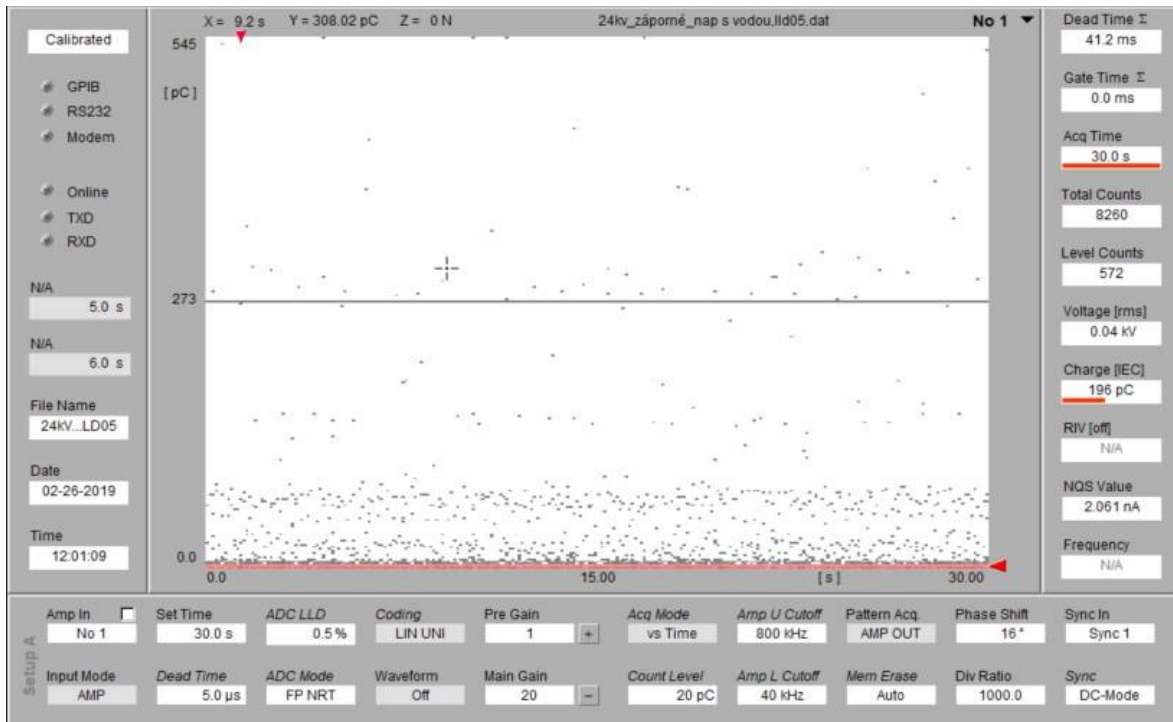
Kladná polarita napájecího napětí 24 kV s aplikovanou vodou, Dead Time 5 μs; LLD 2,5 %



Záporná polarita napájecího napětí 24 kV s aplikovanou vodou, Dead Time 5 μs; LLD 2,5 %

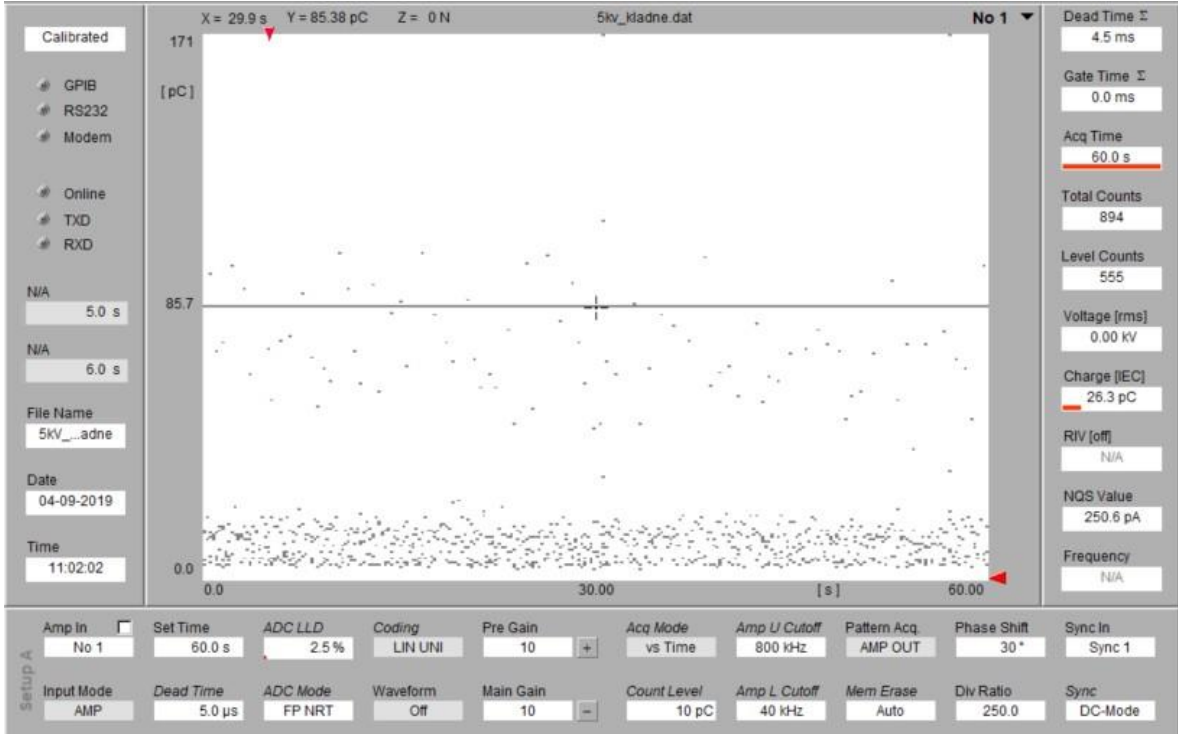


Kladná polarita napájecího napětí 24 kV s aplikovanou vodou po jejím obnovení, Dead Time 5 μs; LLD 2,5 %

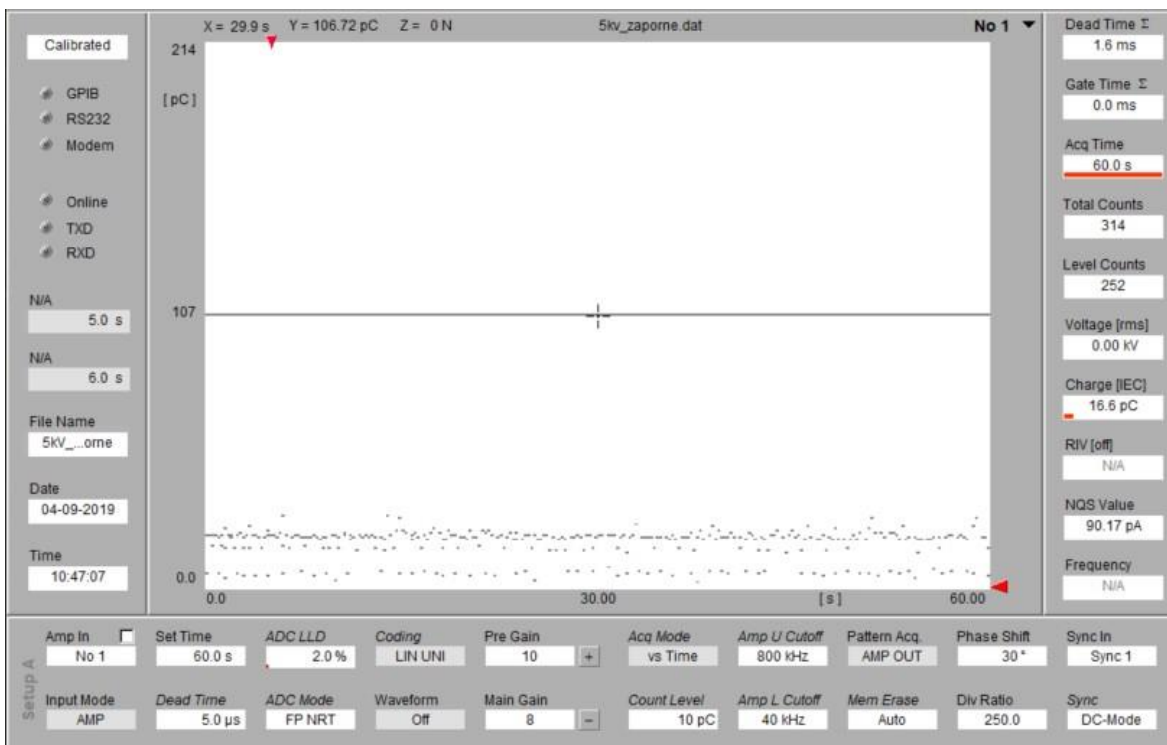


Záporná polarita napájecího napětí 24 kV s aplikovanou vodou při změně parametru LLD, Dead Time 5 μs; LLD 0,5 %

### Příloha G – Výbojová činnost při měření modelu průchodky, kladné a záporné polarity napětí 5 kV

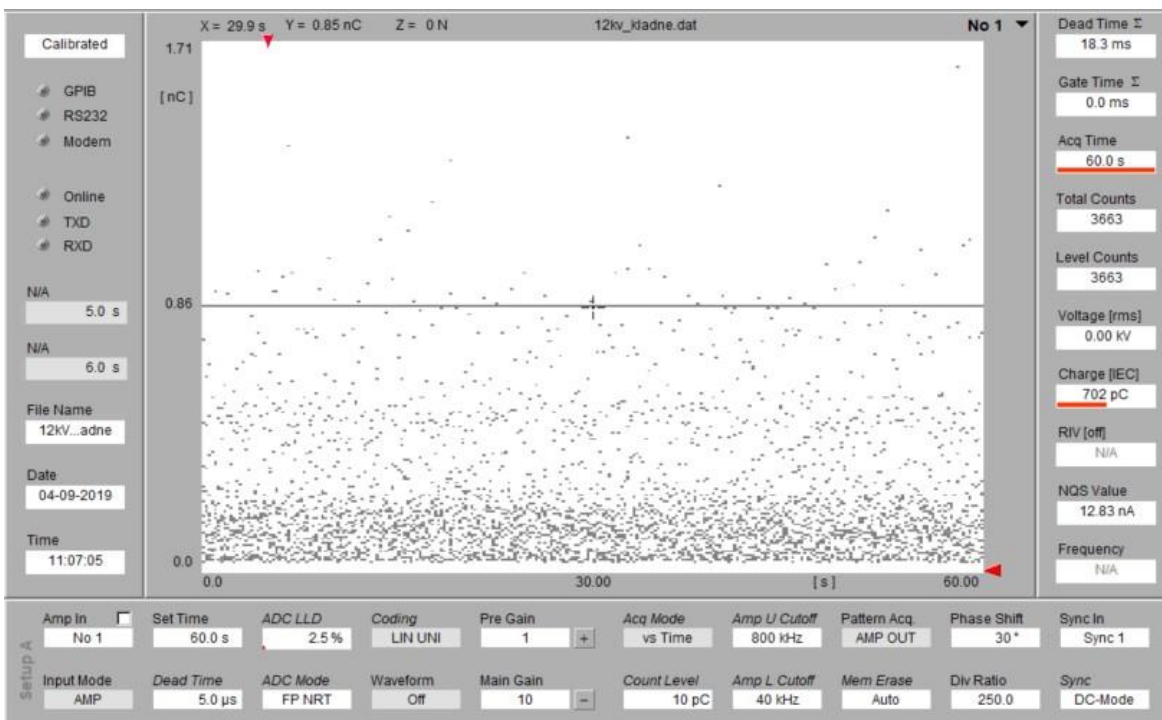


Kladná polarita napájecího napětí 5 kV, Dead Time 5 μs; LLD 2,5 %, vyšší výbojová činnost



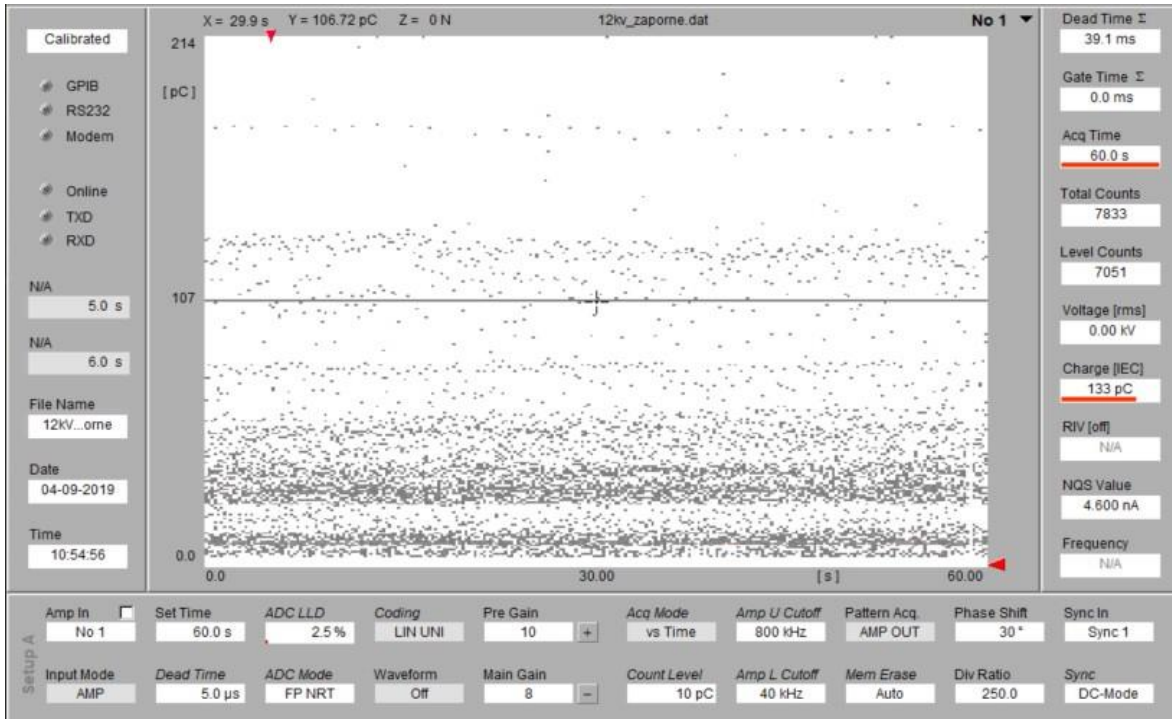
Záporná polarita napájecího napětí 5 kV, Dead Time 5 μs; LLD 2,5 %

**Příloha G – Výbojová činnost při měření modelu průchodky, kladné a záporné polaritě napětí 12 kV**



Kladná polarita napájecího napětí 12 kV, Dead Time 5 μs; LLD 2,5 %





Záporná polarita napájecího napětí 12 kV, Dead Time 5  $\mu$ s; LLD 2,5 %