ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Zpracování signálů při měření částečných výbojů

Tomáš Vrbka **2017**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: **2016/2017**

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení:	**Bc. Tomáš VRBKA**
Osobní číslo:	**E15N0046P**
Studijní program:	**N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor:	**Komerční elektrotechnika**
Název tématu:	**Zpracování signálů při měření částečných výbojů**
Zadávající katedra:	**Katedra technologií a měření**

Zásady pro vypracování:

1. Zpracujte přehled způsobů snímání a analýzy projevů výbojové činnosti v elektrických zařízeních.
2. Diskutujte vypovídací hodnotu jednotlivých metod ve vztahu ke stavu zařízení a možnostem predikce degradace izolačního systému.
3. Realizujte měření na modelech a využijte získané poznatky k detailní analýze změřených signálů.

Rozsah grafických prací:	**podle doporučení vedoucího**
Rozsah kvalifikační práce:	**40 - 60 stran**
Forma zpracování diplomové práce:	**tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí diplomové práce:	**Doc. Ing. Eva Müllerová, Ph.D.** Katedra elektroenergetiky a ekologie
Datum zadání diplomové práce:	**14. října 2016**
Termín odevzdání diplomové práce:	**19. května 2017**

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

L.S.

Doc. Ing. Aleš Hamáček, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2016

Abstrakt

Tato práce obsahuje základy teorie vzniku, detekční metody a zpracování signálu částečného výboje elektrickou metodou. Dále je v práci uveden popis hardwaru a softwaru zařízení pro měření částečných výbojů ICMsystem. V poslední části se zabývám zpracování výstupu ICMsystem a jejich zkonvertování do Excel souboru.

Klíčová slova

Částečný výboj, měřicí systém, typ záznamu, parametry záznamu, měřicí software

Abstract

This work contains the basics of the theory of generation, the detection method and the processing of the partial discharge signal by the electric method. The following is a description of ICMsystem Partial Discharge Measurement Hardware and Software. The last part deals with the processing of the output of the ICM system and its conversion into an Excel file.

Key words

Partial discharge, measuring system, record type, record parameters, measuring software

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 12.5.2017 Tomáš Vrbka

Obsah

OBSAH **7**

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK **9**

ÚVOD **12**

1 ČÁSTEČNÝ VÝBOJ **14**

2 DIAGNOSTICKÉ METODY DETEKCE ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ **16**

2.1 ELEKTRICKÁ METODA MĚŘENÍ ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ 16
2.1.1 Princip měření částečných výbojů *17*
2.1.2 Zdánlivý náboj *19*
2.1.3 Měřitelný náboj *20*
2.1.4 Citlivost měřicího obvodu *21*
2.1.5 Princip integrace měřicích systémů *22*
2.1.6 A/D převodník *25*
2.1.7 Kalibrátory *26*
2.1.8 Zobrazení částečných výbojů dle ČSN EN 60270 ..... *26*
2.1.9 Typy měřicích systémů *27*
2.2 AKUSTICKÉ METODY DETEKCE ČV 30
2.2.1 Princip akustické metody *31*
2.2.2 Příklad používaného zařízení *33*
2.3 ELEKTROMAGNETICKÉ METODY 33
2.3.1 UHF technologie *33*
2.3.2 Příklad používaného zařízení *36*
2.4 CHEMICKÉ METODY 37
2.4.1 Metoda detekce plynných složek *37*
2.5 OPTICKÉ METODY 39
2.5.1 Korónová kamera *39*

3 ICMSYSTEM **41**

3.1 HARDWAROVÁ ČÁST ICMSYSTEM 42
3.1.1 Moduly ICMsystem *42*
3.1.2 Předzesilovač ICMsystem *44*
3.1.3 Kalibrátor *45*
3.2 SOFTWAROVÁ ČÁST 45
3.2.1 Hlavní ovládací prvky *46*
3.2.2 Nástrojová lišta *48*
3.2.3 Informační panely *52*
3.2.4 Grafické zobrazení měření, kalibrace měření a výstupy měření *55*

4 MĚŘENÍ ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ **59**

4.1 ZPRACOVÁNÍ MĚŘENÍ ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ PROGRAMEM ICMSYSTEM 59
4.1.1 Možnosti nastavení ICMsystem při měření částečných výbojů *60*
4.1.2 Měření s osciloskopem *63*
4.1.3 Odlišnosti v zobrazování výsledků měření při módech IEC, Normal a Fast *67*
4.1.4 Odlišnosti při měření s různým nastavením Dead Time *71*
4.1.5 Změna hodnoty LLD *76*
4.1.6 Změna Memory Erase *78*
4.1.7 Problémy při měření částečných výbojů systémem ICMsystem *81*
4.2 ZPRACOVÁNÍ VÝSTUPNÍCH DAT Z PROGRAMU ICMSYSTEM 84
4.2.1 Možnosti datových výstupů z ICMsystem a požadované vlastnosti těchto výstupů *85*
4.2.2 ICMprint *86*

4.2.3 Tvorba programu pro úpravu dat do ICMprint....86
4.2.4 Tvorba tabulky k vyhodnocení výsledků zkoušky v aplikaci Excel....87
5 ZÁVĚR....91
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ....94
SEZNAM PŘÍLOH....1
PŘÍLOHY....2

Seznam symbolů a zkratek

A.....Šířka pásma měřicího systému

AC.....Střídavý proud

B.....Amplitudové kmitočtové spektrum impulzu částečných výbojů

c.....Rychlost šíření vlny [m/s]

C.....Amplitudové kmitočtové spektrum kalibračního impulzu

C_1 .....Kapacita dutiny [F]

C_2'.....Kapacita části dielektrika nad a pod dutinou [F]

C_3.....Kapacita zdravé části dielektrika [F]

C_a.....Zkoušený objekt

CC.....Spojovací kabel

CD.....Vazební zařízení

C_k.....Vazební kapacita

ČV.....Částečný výboj

D_1.....Vzdálenost senzoru S1 od počátku souřadného systému [m]

D_2.....Vzdálenost senzoru S2 od počátku souřadného systému [m]

DC.....Stejnosměrný proud

DGA.....Dissolved gas analysis

DT.....Dead time

EMI.....Electromagnetic interference

EZ.....Emisní zdroj

f_1.....Dolní mezní kmitočet [Hz]

f_2.....Horní mezní kmitočet [Hz]

FID.....Flame ionization detector

FP NRT.....Firts peak non-retriggerable

FP RT.....Firts peak retriggerable

i(t).....Časový průběh proudu [A]

I_0.....Amplituda impulzu [A]

i_a.....Proud protékající C_a [A]

i_k.....Proud protékající C_k [A]

k.....Konstanta převodu

LLD.....Low level discriminator

ME.....Memory erase

MI.....Měřicí přístroj

N.....Četnost/výskyt [1/s]

NQS.....Střední proud částečných výbojů

PC.....Personal Computer

PD.....Partial discharge

q.....Náboj [C]

q_0.....Náboj [C]

q_m.....Měřitelný náboj [C]

q_z.....Zdánlivý náboj [C]

R.....Výstup záznamového zařízení

r_1.....Vzdálenost EZ od senzoru S1

r_2.....Vzdálenost EZ od senzoru S2

R.....Vzdálenost EZ od počátku souřadného systému [m]

RFI.....Radio-frequency interference

RMS.....Root mean square

S_1.....Senzor 1

S_2.....Senzor 2

S_3.....Senzor 3

T.....Časová konstanta integračního členu

t.....Čas [s]

$t_{1,0}$.....Čas do odezvy prvního senzoru [s]

$t_{2,0}$.....Čas do odezvy druhého senzoru [s]

TCD.....Thermal conductivity detector

t_r.....Doba čela impulzu [s]

TW NRT.....Time window non-retriggerable

U.....Napětí [V]

U~ .....Střídavý zdroj

U_a.....Napětí na zkoušeném objektu [V]

U_a'.....Napětí po přerozdělení náboje [V]

UHF.....Ultra High Frequency

UV.....Ultrafialové záření

U_z.....Zapalovací napětí ČV [V]

VN.....Vysoké napětí

VVN.....Velmi vysoké napětí

W_d.....Energie dodaná zdrojem [J]

Z.....Filtr

$Z_{(f)}$.....Přenosová impedance [Ω]

Z_{mi}.....Vstupní impedance měřicího systému

ZVN.....Zvlášť vysoké napětí

α.....Úhel určující polohu emisního zdroje v pravoúhlých souřadnicích [°]

α_1.....Úhel určující polohu senzoru S1 v pravoúhlých souřadnicích [°]

α_2.....Úhel určující polohu senzoru S2 v pravoúhlých souřadnicích [°]

λ.....Vlnová délka [m]

Σ.....Sumace

τ.....Časová konstanta exponenciálního poklesu [t]

ϕ.....Fázový úhel [°]

Úvod

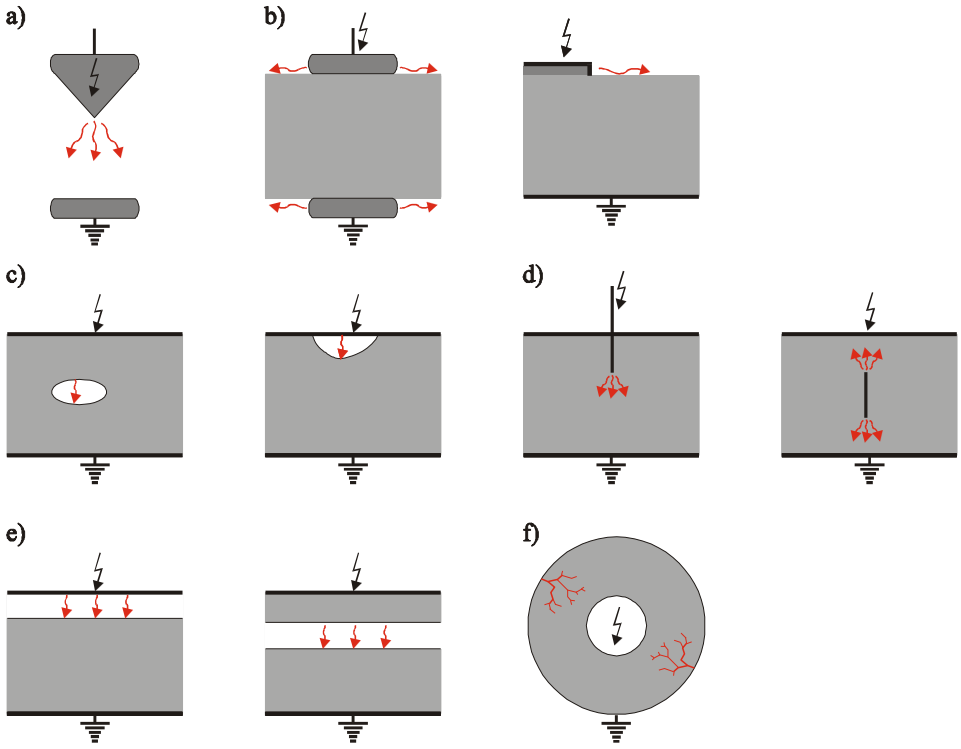
Klíčovým prvkem celé řady elektrotechnických zařízení je jejich izolační systém, který se významně podílí na zajištění bezporuchového provozu s očekávanou životností, a jeho stav je často také faktorem, který životnost zařízení přímo určuje. Využití moderních technologií a nových materiálů se uplatňuje v současné době i při návrhu a výrobě izolačních systémů elektrotechnických zařízení, ale přesto je nezbytné ověřit výrobní technologii i použitý materiál souborem profylaktických zkoušek. Výsledky zkoušek pak představují komplexní informaci o stavu izolačního systému na počátku jeho životního cyklu a umožňují především sledovat trendy ve změnách klíčových kvalitativních parametrů, které mohou signalizovat blížící se poruchu zařízení. Požadavky na vysokou spolehlivost a životnost zařízení a zároveň snaha využívat materiály šetrné k životnímu prostředí vyvolává potřebu zdokonalovat a rozvíjet také diagnostické metody nutné pro ověření stavu izolačního systému jak bezprostředně po výrobě, tak během pracovního cyklu. Informace získané z provozní diagnostiky pak umožňují do určité míry definovat stupeň rizika provozu sledovaného zařízení.

Jedním ze základních požadavků, který by měl izolační systém splňovat, je nulová nebo nízká hladina elektrických výbojů, které se v důsledku použité konstrukce a velikosti a typu elektrického namáhání mohou v zařízení objevit. Protože se takové jevy zpravidla vyskytují jen v kritických lokalitách daných obvykle geometrií uspořádání nebo materiálovou vadou, používá technická praxe označení částečné výboje. Název přímo souvisí s faktem, že tyto výboje nezpůsobí, alespoň po určitou dobu, průraz nebo přeskok v izolačním systému, ale opakovaně zapalují jen v určité ohraničené lokalitě. Riziko poškození izolačního systému a následná porucha celého zařízení stoupá s rostoucí intenzitou výbojů a o jejich nebezpečnosti také do značné míry rozhoduje lokalita vzniku výbojové činnosti a typ výboje. Z uvedeného je patrné, že diagnostika částečných výbojů je nezbytnou součástí kontrolních mechanismů pro řadu elektrických zařízení, která pracují na hladině vn a vvn. Základní standardizovaná elektrická metoda měření částečných výbojů je v poslední době doplňována celou řadou dalších metodik, které umožňují rozšířit diagnostické informace o nové úhly pohledu. Jejich účinné nasazení často závisí na konkrétním typu zařízení a použité technologii, ale při správné aplikaci jsou dalším plnohodnotným diagnostickým nástrojem.

Stejně tak je v současné době s výhodou využívána možnost zpracování změřených signálů částečných výbojů moderní záznamovou technikou. Pokud ale má být tento diagnostický nástroj přínosný, musíme vždy umět posoudit, jak software ovlivní zdrojová data a jakou přidanou informaci poskytuje. Cílem diplomové práce je analyzovat a zhodnotit funkce konkrétního typu nového měřicího softwaru.

1 Částečný výboj

Pokud už ke vzniku částečných výbojů v izolačním systému zařízení dojde, je jejich charakter závislý na lokalitě vzniku a to se může projevit na podobě změřeného signálu. Výsledkem jsou potom záznamy typických projevů částečných výbojů pro jednotlivá zařízení a lokality výskytu. Základní členění mechanismu vzniku výboje je patrné z *Obr. 1.1*. V místě vzniku výboje se pak uplatňuje celá řada degradačních procesů (tepelné, chemické, ostřelování materiálu nabitými částicemi, …). O rizikovosti výbojů pro provoz zařízení rozhoduje tedy nejen jejich velikost kvantifikovaná zdánlivým nábojem, viz ČSN EN 60270, ale také lokalita vzniku. Její určení může být někdy obtížné a pro tyto účely jsou vyvíjeny některé diagnostické metody (akustické snímače, UHF senzory, optické metody) [1].



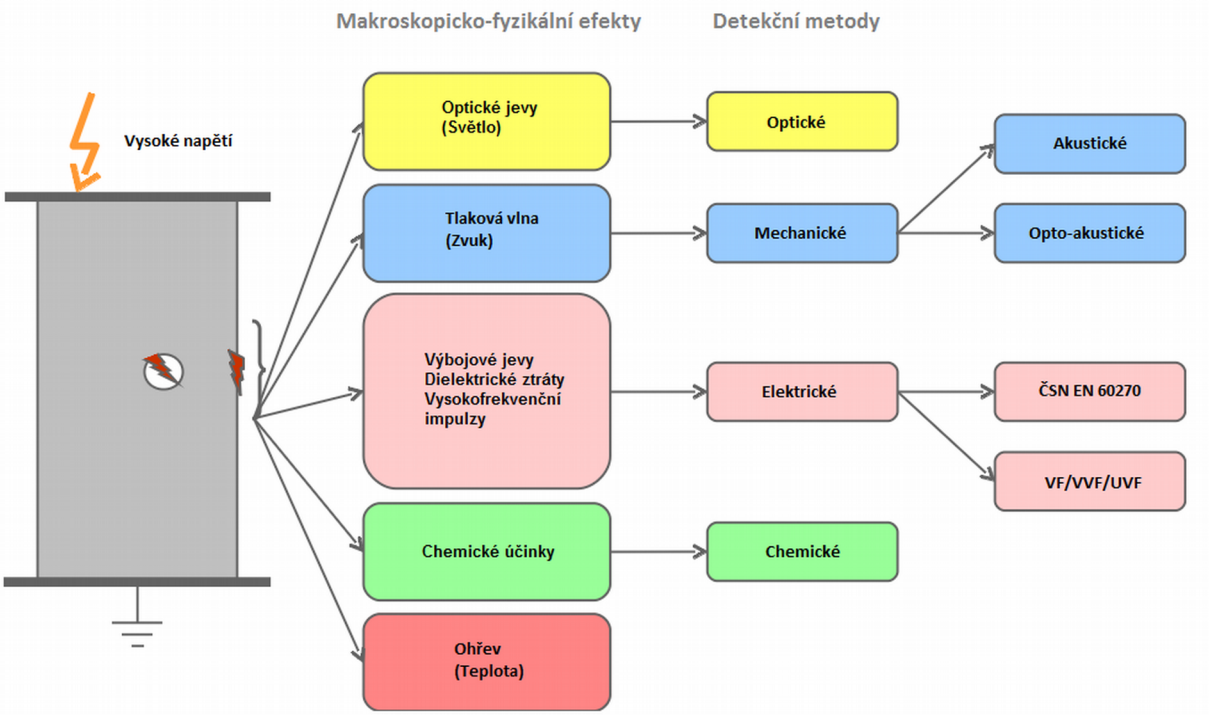
Obr. 1.1 Charakteristické lokality vzniku částečných výbojů [1]

a) *korónové výboje*, koróna vzniká v nehomogenním poli u zakřivených elektrod, nejsilnější je tento efekt u uspořádání hrot – deska.
b) *povrchový a klouzavý výboj*, vzniká na rozhraní prostředí u složených izolací.
c) *výboj v dutinách*, vzniká v místě výskytu nehomogenity v materiálu – dutinky, bublinky, praskliny v jinak souvislém dielektriku.

d) *výboje na tenkém hrotu v dielektriku*, vnitřní výboje vznikající v tekutém nebo pevném dielektriku.
e) *výboje ve vrstvené izolaci*, vnitřní výboje vznikající u složených izolací na rozhraní různých prostředí.
f) *treeing*, trvalé stromečkové vnitřní výboje, vznikají v pevném izolantu v důsledku nehomogenity materiálu [1].

2 Diagnostické metody detekce částečných výbojů

Standardizovaná metoda měření částečných výbojů v souladu s ČSN EN 60270 je základní diagnostická metoda pro kvantifikaci a do určité míry i kvalifikaci částečných výbojů. Její provedení předepisuje řada norem jako součást povýrobních zkoušek elektrických zařízení. Zjištěná hladina částečných výbojů musí vyhovět požadavkům normy pro dané zařízení. Současně jsou některá zařízení, u nichž jsou hladiny výbojů sledovány po celou dobu jejich provozu (při odstávkách a pravidelných revizích nebo pomocí on-line diagnostiky) a výchozí úroveň výbojové činnosti je nutným předpokladem pro sledování trendu vývoje výbojů v zařízení.



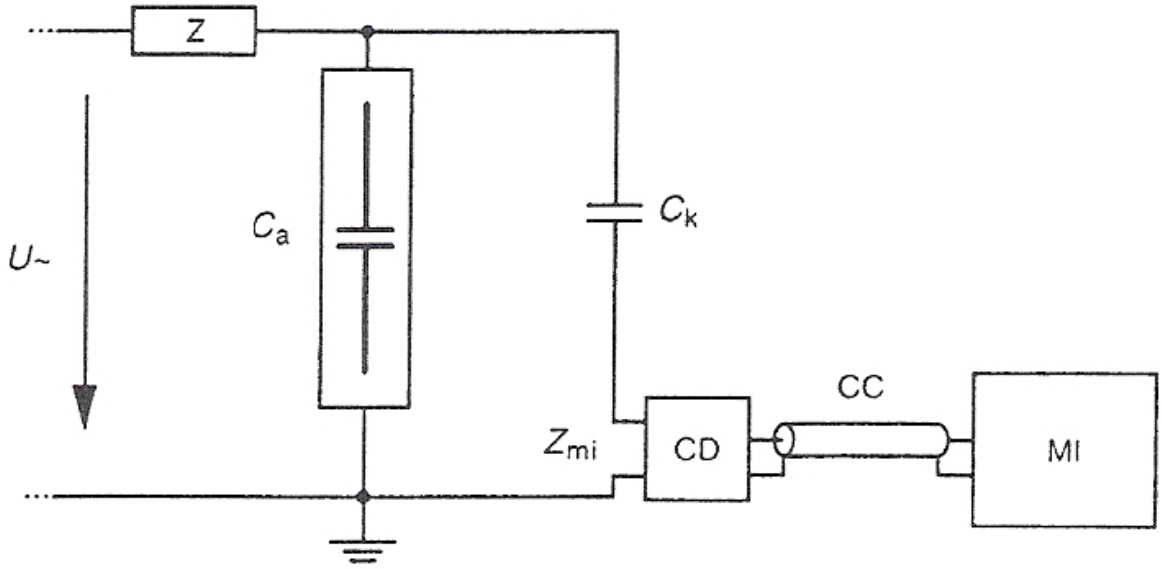
Obr. 2.1 Rozdělení projevů částečného výboje a jejich detekční metody [2]

2.1 Elektrická metoda měření částečných výbojů

Základní zkušební obvody pro měření částečných výbojů jsou uvedeny v normě ČSN EN 60270 a z nich je odvozena většina v praxi používaných zkušebních obvodů. Každý z těchto obvodů je primárně tvořený zkoušeným objektem, vazebním kondenzátorem, vysokonapěťovým zdrojem a měřicím systémem. Obvod mohou doplňovat zařízení určená pro potlačení hladiny šumu pozadí.

2.1.1 Princip měření částečných výbojů

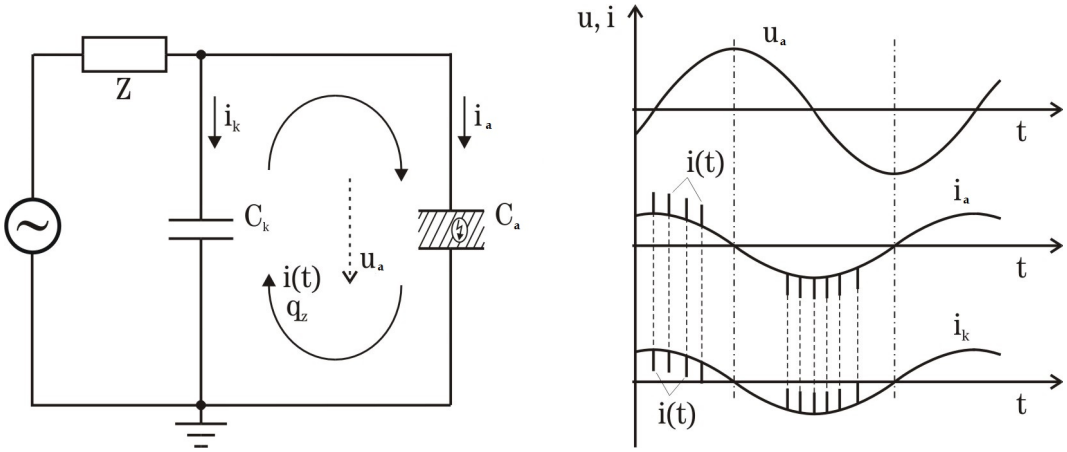
Princip měření částečných výbojů je patrný z obvodu na *Obr. 2.2*, který je jedním z normou definovaných zapojení. Pokud ve slabém místě zkoušeného zařízení (dutina, prasklina, bublinka, …) dojde v důsledku přiloženého namáhání k výboji, projeví se tento jev přerozdělením náboje v celém obvodu tvořeném zkušebním zdrojem, zkoušeným objektem a vazební kapacitou. Důsledkem jsou měřitelné proudové impulzy zaznamenané v případě tohoto obvodu měřicím členem umístěným do série s vazební kapacitou [1]. Vzájemné propojení přívodů mezi vazebním zařízením a zkušebním obvodem by mělo být co nejkratší, z důvodu minimalizace vlivu na detekční šířku pásma [3].



Obr. 2.2 Zkušební obvod pro měření částečných výbojů, vazební zařízení CD v sérii s vazební kapacitou [3]

Kde:
- U~ vysokonapěťový zdroj,
- Z_{mi} vstupní impedance měřicího systému,
- CC spojovací kabel,
- C_a zkoušený objekt,
- C_k vazební kapacita,
- CD vazební zařízení,
- MI měřicí přístroj,
- Z filtr [3].

Konkrétní realizace zkušebního obvodu pro měření částečných výbojů vychází z náhradního obvodu izolantu s poruchovou lokalitou, viz *Obr. 2.3*, a je detailně analyzovaná například v disertační práci Ing. Petra Martínka, Ph.D.: *„Zkoušený objekt obsahující dutinu v izolačním systému a charakterizovaný kapacitou C_a je v měřicím obvodu připojen paralelně k vazební kapacitě C_k. Na tuto paralelní kombinaci dvou kapacit je ze zdroje přes impedanci Z přivedeno vysokonapěťové zkušební napětí. Obě kapacity jsou ze zdroje nabíjeny kapacitními proudy i_k a i_a. V okamžiku zapálení výboje v dutině dojde k poklesu napětí na svorkách zkoušeného zařízení. Vysoká indukčnost zdroje nedovolí aby se zdroj energeticky podílel na tomto rychlém přechodném ději a proto při respektování zákona zachování náboje musí v obvodu dojít k přerozdělení náboje na kapacitách C_k a C_a. Z vazební kapacity C_k je tedy okamžitě hrazen úbytek náboje na kapacitě C_a způsobený částečným vybytím této kapacity v důsledku částečných výbojů. Přesun náboje se v obvodu projeví jako proudový impulz i(t), který je měřitelný a dává představu o velikosti zdánlivého náboje a tím i částečných výbojů.*



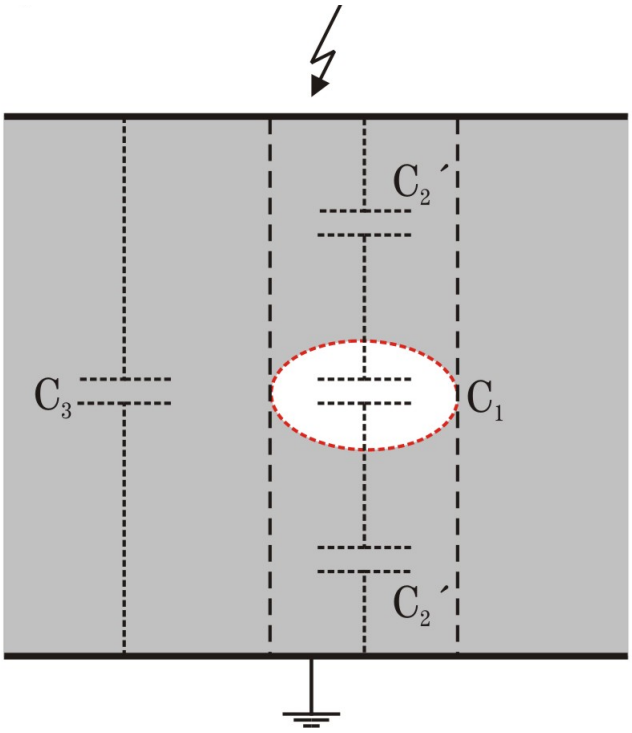
Obr. 2.3 Obvod pro měření částečných výbojů a průběhy nabíjecích proudů i_k, i_a [1]

Na uvedeném obrázku (Obr. 2.3) jsou rovněž znázorněny průběhy nabíjecích kapacitních proudů i_k a i_a protékající vazební kapacitou a zkoušeným objektem. Tyto kapacitní proudy jsou vůči napětí zdroje fázově posunuty přibližně o 90˚. Proudové impulzy od částečných výbojů se superponují na průběhy kapacitních proudů i_k, i_a a mají v obou větvích (C_k a C_a) měřicího obvodu opačný směr, přičemž jejich amplituda je stejná. Největší četnost výbojů odpovídá oblastem s nejstrmější změnou zkušebního napětí dU/dt. Polarita jednotlivých impulzů je dána znaménkem derivace dU/dt. Výjimku tvoří korónové částečné výboje, které

mají největší četnost výskytu v amplitudě zkušebního napětí a polarita jednotlivých impulzů je v tomto případě shodná s polaritou napětí [1].“

2.1.2 Zdánlivý náboj

Kvantifikace částečných výbojů při jejich měření vychází z definice zdánlivého náboje s použitím ekvivalentního obvodu pro dielektrikum s poruchovou výbojovou lokalitou.



Obr. 2.4 Schematické zobrazení dielektrika s vnitřní dutinou [1]

Kde: C_1 kapacita dutiny [F],
C_2' kapacita části dielektrika nad a pod dutinou [F],
C_3 kapacita zdravé části dielektrika [F] [1].

Na náhradním schématu (*Obr. 2.4*) je zobrazena kapacita C_1, která reprezentuje kapacitu vzduchové dutiny v pevném nebo tekutém dielektriku. Kapacita C_2 je sériová kombinace kapacit C_2', jež představuje kapacitu nepoškozeného dielektrika v sérii s C_1. Kapacita C_3 je zbylá část dielektrika paralelně řazená k sériové kombinaci C_1 a C_2. Pro malou dutinu v dielektriku platí podmínka $C_3 >> C_1 >> C_2$. C_a je rovno sériové kombinaci C_1 a C_2 a paralelně s C_3.

Zdroj dodá po každém výboji do náhradního obvodu náboj, který svou velikostí vyrovná úbytek napětí způsobený výbojem. Tento náboj se nazývá zdánlivý a je nejdůležitější charakteristickou veličinou částečných výbojů. Pro velikost zdánlivého náboje na svorkách ekvivalentního obvodu částečných výbojů a s respektováním podmínky $C_3 >> C_1 >> C_2$, platí vztah

$$q_z = \Delta q = \left(C_3 + \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}\right) \cdot \Delta U \simeq C_3 \cdot \Delta U . \tag{2.1}$$

Pro úbytek napětí na svorkách zdroje platí vztah

$$\Delta U \simeq \frac{C_2}{C_3} \cdot U_Z . \tag{2.2}$$

Dosazením za ΔU z rovnice (2.2) do výchozího vztahu (2.1) získáme výsledný vztah pro velikost zdánlivého náboje

$$q_z \simeq C_2 \cdot U_Z . \tag{2.3}$$

Energie dodaná ze zdroje je dána vztahem

$$W_d = q_z \cdot U , \tag{2.4}$$

kde U [V] je napětí v okamžiku výboje [1].

2.1.3 Měřitelný náboj

Z výše uvedeného principu měření vyplývá, že potřebný náboj na kompenzaci ztráty napětí, způsobené výbojem ve zkoušeném objektu, je v obvodu (*Obr. 2.3*) odebírán z vazební kapacity C_k. Velikost měřitelných proudových impulzů způsobených částečnými výboji je závislá na vzájemném poměru velikostí kapacit – C_k/C_a.

Dále platí, že pokles napětí ΔU_a vyvolaný na svorkách zkoušeného objektu (C_a) výbojem v dutině, je přímo úměrný velikosti zdánlivého náboje q_z (viz kapitola 2.1.2) na svorkách zkoušeného objektu, přičemž velikost tohoto zdánlivého náboje se neshoduje se skutečnou velikostí náboje vybitého v dutině částečným výbojem [1].

S použitím kapacitního modelu dutiny v izolantu je vztah mezi velikostí zdánlivého výboje q_z a odpovídající změnou napětí na svorkách objektu ΔU_a, možné určit pomocí již jednou uvedeného vztahu (rovnice 2.1)

$$q_z = \left(C_3 + \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}\right) \cdot \Delta U_a . \tag{2.5}$$

A při respektování podmínky $C_a \simeq C_3$, pokud $C_3 >> C_1 >> C_2$, je možné celý tento vztah zjednodušit

$$q_z = \left(C_3 + C_2\right) \cdot \Delta U_a = C_a \cdot \Delta U_a . \tag{2.6}$$

Při splnění podmínky $C_k >> C_a$ je náboj přenášený měřitelnými proudovými impulzy $i(t)$ téměř shodný s velikostí q_z a lze jej vypočítat pomocí integrace proudových impulzů

$$q_z \simeq \int i(t)\,dt \simeq C_a \cdot \Delta U_a . \tag{2.7}$$

Z důvodu vysoké ceny výroby vysokonapěťového vazebního kondenzátoru s velmi velkou kapacitou C_k a také z důvodu zatížení zkušebního zdroje není v praxi obvykle splněna podmínka $C_k >> C_a$. V případě, že je kapacita C_k jen o málo větší než C_a, dochází ke ztrátě citlivosti měřicího obvodu z důvodu snížení $i(t)$. Protože v měřicím obvodu dochází mezi kapacitami C_a a C_k k přenosu náboje, lze na základě rovností náboje před a krátce po přerozdělení náboje napsat následující vztah

$$q_z = C_a \cdot \Delta U_a = \left(C_a + C_k\right) \cdot \Delta U_a' , \tag{2.8}$$

kde $\Delta Ua'$ [V] je výsledná změna napětí po přerozdělení náboje [1].

Náboj dodaný vazební kapacitou C_k, je veličina, kterou je možno v obvodu přímo měřit, a proto se nazývá *měřitelný náboj*. Velikost měřitelného náboje q_m má hodnotu

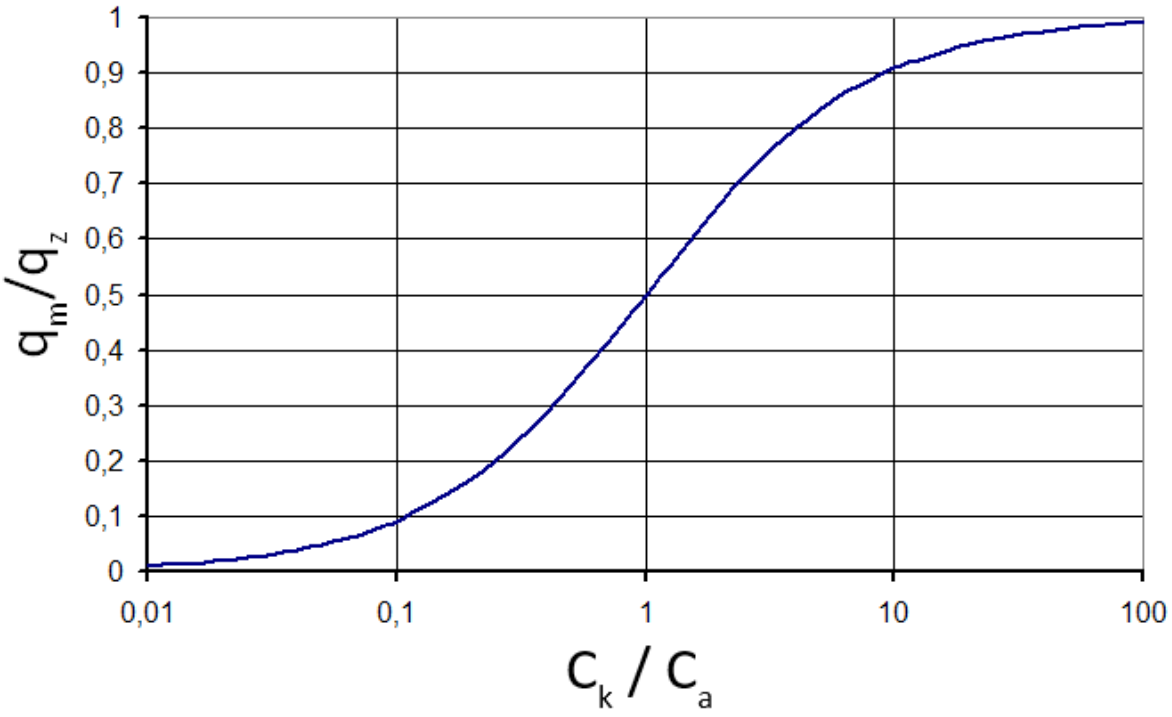
$$q_m = C_k \cdot \Delta U_a' . \tag{2.9}$$

2.1.4 Citlivost měřicího obvodu

Po vyjádření $\Delta U_a'$ z rovnice (2.9) lze dosazením do rovnice (2.8) získat vztah mezi *měřitelným* a *zdánlivým nábojem*.

$$\frac{q_m}{q_z}=\frac{C_k}{C_a+C_k}, \tag{2.10}$$

kde q_m/q_z je míra citlivosti měřicího obvodu [1].



Obr. 2.5 Citlivost měřicího obvodu v závislosti na poměru kapacit C_k/C_a [1]

Pro dosažení vysoké citlivosti měření v obvodu je potřeba zvolit velikost vazebního kondenzátoru C_k úměrně k velikosti kapacity C_a, jak patrné z grafu (Obr. 2.5). Poměr q_m/q_z určíme vhodnou kalibrací konkrétního měřicího obvodu. Z toho vyplývá význam kalibrace pro vyhodnocování úrovní částečných výbojů v dielektrickém systému zkoušeného objektu [1].

Z tohoto důvodu, je vždy důležité kalibrovat pro správné vyhodnocování úrovní částečných výbojů v dielektrickém systému zkoušeného objektu [1].

2.1.5 Princip integrace měřicích systémů

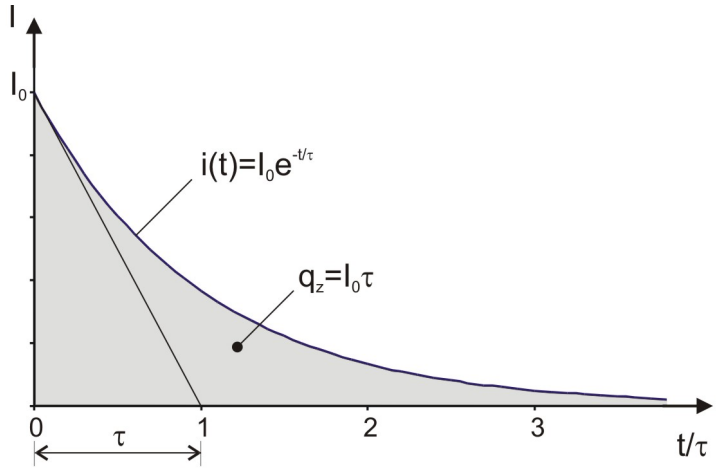
Z předchozího textu plyne, že proudové impulzy v měřicím obvodu jsou jediným, pomocí měření, zaznamenatelným projevem výbojových dějů, odehrávajících se uvnitř zkoušeného zařízení. Z důvodu zkreslení vysokofrekvenčních proudových impulzů cestou k měřicímu

zařízení samotným měřicím obvodem, je při vyhodnocování úrovně částečných výbojů vhodnější měřit zdánlivý náboj obsažený v jednotlivých zaznamenaných impulzech, neboť jeho velikost je nezávislá na vlastnostech měřicího obvodu a zůstává nezměněna. Případné ztráty zdánlivého výboje v měřicím obvodu jsou navíc prostřednictvím vhodné kalibrace respektovány v průběhu měření.

Velikost zdánlivého náboje obsaženého v proudovém impulzu je dána integrálem jeho průběhu

$$q_z = \int_0^{\infty} i(t) \cdot dt \,. \tag{2.11}$$

Pro zjednodušení můžeme tvar proudového impulzu aproximovat exponenciálně klesajícím impulzem zobrazeným na *Obr. 2.6*.



Obr. 2.6 Časový průběh exponenciálně klesajícího ideálního proudového impulzu [1]

Průběh exponenciálně klesajícího proudového impulzu je vyjádřen vztahem

$$i(t) = I_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}. \tag{2.12}$$

Kde I_0 amplituda impulzu [A],

τ časová konstanta exponenciálního poklesu [t],

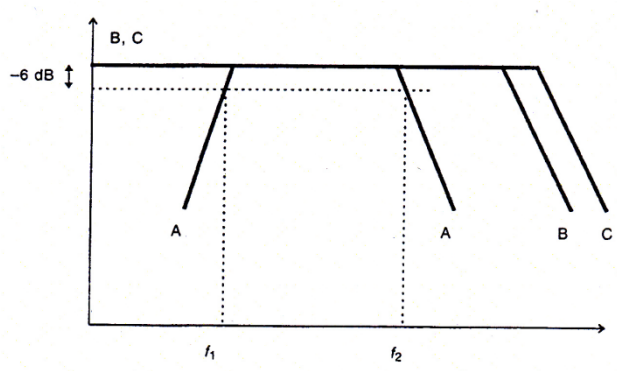
t čas [t],

i(t) časový průběh proudového impulzu [A].

Velikost zdánlivého náboje přenášeného takovýmto idealizovaným impulzem lze s použitím rovnice (2.12) vyjádřit integrálem

$$q_z = \int_0^{\infty} i(t) \cdot dt = I_0 \cdot \tau \quad [1]. \tag{2.13}$$

Pro dosažení integračního efektu je důležitý vztah časové konstanty integračního členu T a časové konstanty integrovaného impulzu τ. K integraci proudového impulzu dochází na aktivní nebo pasivní čtyř-svorkové síti (čtyřpól), která přeměňuje vstupní proudy na výstupní napěťové signály. Tyto signály jsou pak přeneseny přímo do měřicího systému přístroje. Kmitočtová odezva vazebního zařízení, která je definována poměrem výstupního napětí a vstupního proudu, je zvolena tak, aby efektivně zabránila kmitočtu zkušebního napětí a jeho harmonickým ve vstupu do měřicího přístroje (*Obr. 2.7*). Chyba integrace může nastat při měření zdánlivého náboje, kdy horní kmitočtová mez amplitudového spektra proudového impulzu částečného výboje je nižší než střední kmitočet pásma úzkopásmového měřicího systému nebo pokud je nižší než horní mezní kmitočet širokopásmového měřicího systému (*Obr. 2.7*) [3].



Obr. 2.7 Správný vztah mezi amplitudou a kmitočtem pro minimalizování integračních chyb pro širokopásmové systémy [3]

Kde: A šířka pásma měřicího systému,

B amplitudové kmitočtové spektrum impulzu částečných výbojů,

C amplitudové kmitočtové spektrum kalibračního impulzu,

f_1 dolní mezní kmitočet [Hz],

f_2 horní mezní kmitočet [Hz].

Širokopásmové měřicí přístroje se skládají z vazebního členu a širokopásmového měřicího systému částečných výbojů, který je charakterizován přenosovou impedancí *Z(f)* a má pevné hodnoty dolního a horního mezního kmitočtu f_1 a f_2 s dostatečným zeslabením pod f_1 a nad f_2. Doporučené hodnoty pro významné frekvenční parametry jsou dle normy ČSN EN 60270/A1:

$$30\ \text{kHz} \leq f_1 \leq 100\ \text{kHz},$$

$$f_2 \leq 1\ \text{MHz},$$

$$100\ \text{kHz} \leq \delta f \leq 900\ \text{kHz}\ \ [3].$$

2.1.6 A/D převodník

Většina v současnosti používaných měřicích systému využívá digitální zpracování veličin částečných výbojů. Hlavním znakem digitálních přístrojů pro měření částečných výbojů je schopnost zpracovávat jednotlivé signály z analogových přístrojů pro měření zdánlivého náboje. Oproti analogovým přístrojům, kde dochází k zobrazení pomocí osciloskopů či vrcholových voltmetrů, musí digitální přístroj jednotlivé vrcholové hodnoty náboje q_z kvantovat a zaznamenat s dostatečnou přesností společně s časem t nebo s fázovým úhlem ϕ jejich výskytu. Zároveň zařízení musí respektovat tvar průběhu signálu tak, aby bylo možné rozpoznat vrcholovou hodnotu (pozitivní či negativní), kterou je možné považovat za úměrnou individuálnímu náboji q_z při výskytu částečného výboje [3].

Pokud budeme chtít identifikovat tvar zkušebního napětí průmyslového kmitočtu *u(t)*, tak podle normy ČSN EN 60270 by měl digitální přístroj vzorkovat zkušební napětí alespoň v časových periodách, kde je zaznamenána hodnota q_z. Nicméně se doporučuje provádět spojité vzorkování zkušebního napětí po dobu každé periody. Odchylka okamžité hodnoty může být maximálně 5 % od hodnoty naměřené referenčním zařízením, aby bylo možné měřicí zařízení považovat za schopné zaznamenávat fázi zkušebního napětí. Zároveň by mělo být nezávislým měřením prokázáno, že referenční měřicí systém má chybu fáze menší než 5° [3].

Pro kvantování zkušebního napětí je doporučeno nejmenší rozlišení 8 bitů. Vzorkovací rychlost musí být minimálně 100 vzorků za periodu zkušebního napětí nebo 4 000 vzorků/s pro stejnosměrná napětí [3].

2.1.7 Kalibrátory

Kalibrace je vždy prováděna na kompletním zapojení zkušebního obvodu, protože kapacita C_a zkoušeného objektu ovlivňuje charakteristiky (viz kapitola 2.1.4) obvodu. Ze stejného důvodu musí být kalibrace provedena vždy pro každý nový zkoušený objekt. Výjimkou jsou zkoušky provedené na sérii podobných objektů s hodnotami kapacit v rozmezí ±10 % z průměrných hodnot. Kalibrace stanoví konstantu převodu k pro měření zdánlivého náboje.

Kalibrace měřicího systému by měla být prováděna prostřednictvím kalibrátoru injektováním proudových impulzů do svorek zkušebního objektu. Jako přesné měření úrovně částečných výbojů lze označit zkoušku, při které, po kalibrování obvodu určitou hodnotou náboje, nedochází k výskytu částečného výboje mimo rozsah od 50 % do 200 % použité úrovně kalibrace. Z toho vyplývá, že je vhodné zvolit kalibrátor s podobnou úrovní, s jakou je predikována úroveň částečných výbojů v zkoušeném objektu. Proudové impulzy jsou získávány z kalibrátoru, který obsahuje generátor produkující impulzy skokového napětí v sérii s kondenzátorem. Tyto napěťové impulzy musí mít dobu nárůstu t_r menší než 60 ns [3].

2.1.8 Zobrazení částečných výbojů dle ČSN EN 60270

Impulzy by měli být u zkoušek střídavým napětím zobrazeny buď se sinusovou časovou základnou synchronizovanou s kmitočtem zkušebního napětí nebo s lineární časovou základnou, která je spouštěna od zkušebního napětí. Dále je doporučeno, aby byl použit indikační přístroj nebo zapisovač pro kvantitativní určení největší opakovaně se vyskytující úrovně.

U zařízení podle normy ČSN EN 60270 jsou uplatňovány následující požadavky. Odezva systému na sled impulzů složeného ze stejně vzdálených impulzů q_0 se známým opakovacím kmitočtem impulzů N musí být taková, aby výstup záznamového zařízení R indikoval úrovně, které jsou uvedeny v tabulce (*Tab. 2.I*). Základním předpokladem je, aby bylo zobrazení na plném rozsahu nebo na 100 % pro $N = 100$ [3].

Tabulka 2.I Odezva na sled impulzů přístrojů pro měření ČV [3]

N (1/s)	1	2	5	10	50	>100
R_{min} (%)	35	55	76	85	94	95
R_{max} (%)	45	65	86	95	104	105

Tento požadavek není vhodný pro zkoušky se stejnosměrným napětím [3].

2.1.9 Typy měřicích systémů

Experimentální měření a následná analýza softwaru pro zpracování dat realizovaná v této diplomové práci byla prováděna měřicím zařízením ICMsystem od výrobce Power Diagnostix. Podrobnější popis měřicího systému je uveden v kapitole 3. V této části práce jsou pro ilustraci představeny některé další používané měřicí systémy včetně jejich základních specifikací a vlastností.

- ***Doble LDS-6***

Digitální měřicí systém pro měření a analýzu částečných výbojů. Jedná se o zařízení pro měření částečných výbojů v provozních podmínkách i při laboratorních testech, včetně měření a testů motorů, generátorů, transformátorů kabelových vedení VN a rozvaděčů VN. LDS-6 splňuje normu ČSN EN 60270 a ICEA T-24-380 [4].

Základní specifikace:

- ***Rozsah citlivosti 1 pC…100 000 pC***
- ***Horní mezní kmitočet 30 MHz***
- ***Časové rozlišení impulzu 10 ms***
- ***Šířka pásma pro měření ČV 300 kHz***
- ***Výpočet náboje dle IEC 60270***
- ***Frekvenční rozsah UHF jednotky 110 MHz až 1700 MHz [5]***

Obr. 2.8 Měřicí systém Doble LDS-6 s řídícím počítačem [6]

- ***Omicron MPD 600***

MPD systém se skládá z jednotky pro sběr dat, optických kabelů, USB řídící jednotky a softwaru, který je ve shodě s mezinárodními standardy pro měření ČV. Zpracování signálu s vysokým rozlišením přináší vysokou přesnost měření. Systém může být rozšířen tak, aby zahrnoval až 960 kanálů a vykonával paralelní a synchronní vícekanálové měření ČV. Použití optické sítě garantuje kompletní galvanickou izolaci mezi jednotkami pro sběr dat a řídícím PC.

Systém je vybaven výkonnou gating metodologií a pokročilými nástroji na potlačení šumu. Fázově/amplitudové zádrže dovolují potlačení signálů s jistou amplitudou a pevnou fázovou pozicí (např. pulzní měniče, pohony, nepodstatné ČV). Pro eliminaci rušení může být použita volitelná externí jednotka [7].

Základní specifikace:

- ***Trvalá detekce událostí částečných výbojů***
- ***Digitální, číslicová integrace reálného času proudů částečných výbojů***
- ***Podpora integrace frekvenčního a časového rozsahu***
- ***Volitelný rozsah integrace***
- ***Časový rozsah: 100 ns … 8 µs***

- ***Frekvenční rozsah: střední frekvence: 0 Hz…32 MHz; šířka pásma: 9 kHz, 30 kHz, 100 kHz, 300 kHz, 1 MHz nebo 3 MHz***
- ***Výpočet náboje dle IEC 60270***
- ***Maximální rozlišení dvojitého impulsu: < 200 ns***
- ***Maximální frekvence impulsů: 1,5 MHz u optické sítě***
- ***Časové rozlišení události částečných výbojů: < 2 ns [8]***

Obr. 2.9 Omicron MPD 600 [7]

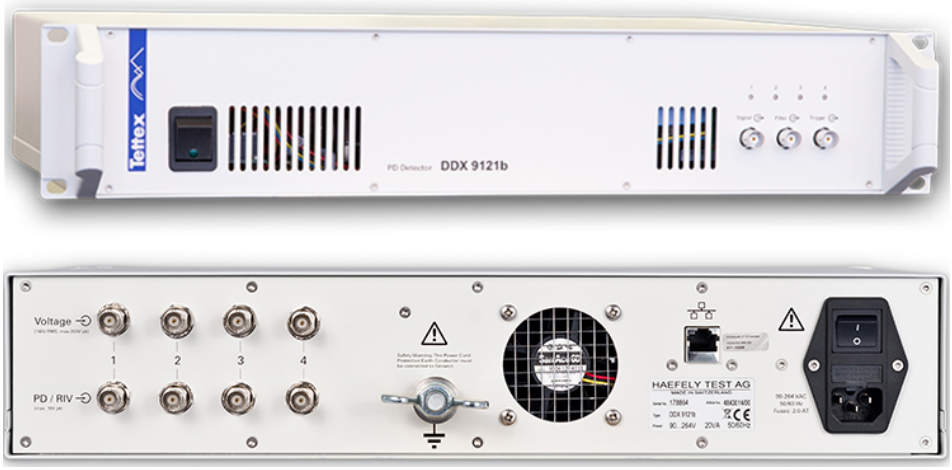
- ***Haefely Hipotronics DDX 9121B***

DDX 9121B (*Obr. 2.10*) je nejnovější zařízení značky Haefely pro měření částečných výbojů a vysokofrekvenčního rušivého napětí. Jedná se o modulární systém (1 – 9 jednotek) s vestavěným spektrálním analyzátorem s vysokým rozlišením. Lze pracovat v střídavém nebo stejnosměrném režimu měření. Využití je ve standardním rozsahu pro výkonové a distribuční transformátory, točivé stroje, výkonové kondenzátory, kabely, rozvaděče, bleskojistky a ve výzkumu a vývoji. Samozřejmostí je měření dle normy ČSN EN 60270 [9].

Základní specifikace:

- ***Frekvence PD systému 30 kHz…1,5 MHz***
- ***Volitelná střední frekvence: 32 kHz ... 1,498 MHz***

- ***Šířka pásma: 4 kHz, 4,5 kHz, 9 kHz***
- ***Výpočet náboje dle IEC 60270 [10]***

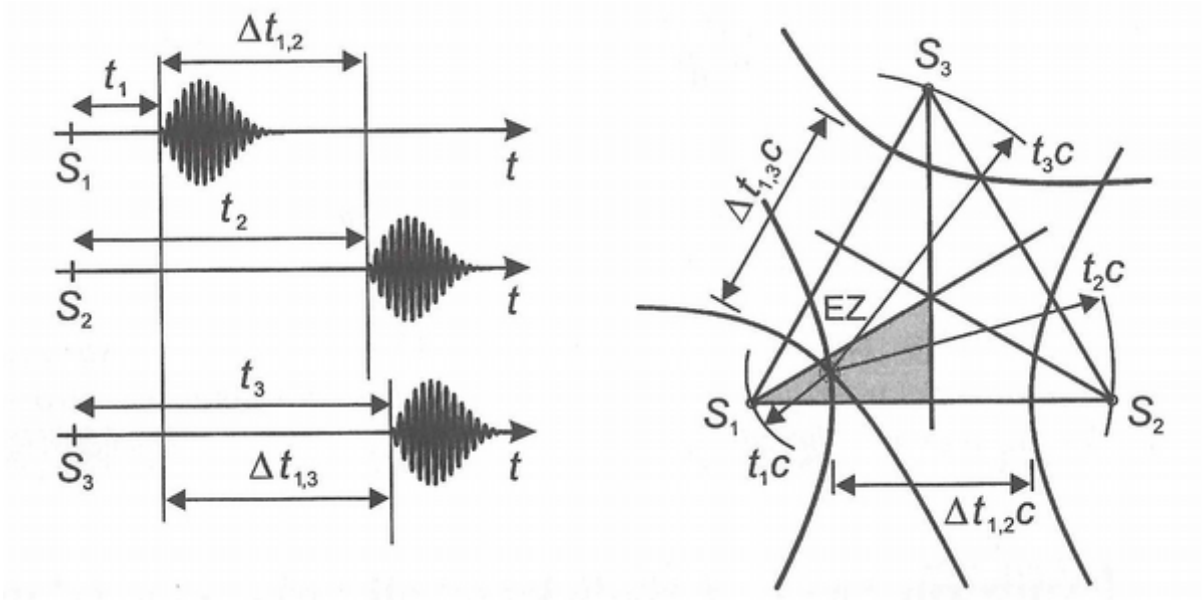


Obr. 2.10 DDX 9121B zepředu a zezadu [9]

2.2 Akustické metody detekce ČV

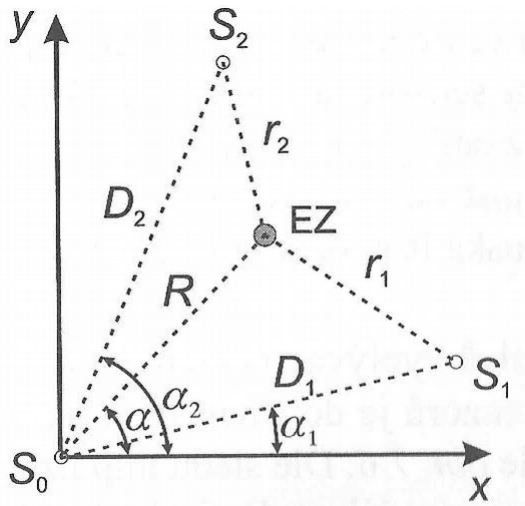
Další diagnostické metody, které jsou pro sledování částečných výbojů používány, jsou limitovány při svém použití konkrétním typem zařízení a konstrukcí izolačního systému. Ve výše uvedeném textu je několikrát zmiňovaný význam místa výskytu výbojů pro míru rizika, které výboje pro izolační systém představují. Lokalizace výbojů je po určení jejich velikosti další prioritou. Za tím účelem jsou rozvíjeny některé metody, mezi které patří akustická lokalizace. Povrch zařízení je osazen piezoelektrickými snímači, které umožňují zachytit signál výboje. Časové rozdíly v příchodu signálů do jednotlivých senzorů v kombinaci se známou rychlostí šíření akustického signálu v použitém izolačním materiálu umožňují výpočet lokality výskytu výboje [11]. Touto problematikou se zabývá norma IEC/TS 62478 (2016).

2.2.1 Princip akustické metody



Obr. 2.11 Hyperbolická triangulace [11]

Princip lokalizace vychází z hyperbolické triangulace s použitím tří piezoelektrických snímačů (*Obr. 2.11*). Ze sledu impulzů lze ihned stanovit, ve které z šesti částí trojúhelníku je defekt. Mimo trojúhelník nemusí být určení jednoznačné. Pro určení polohy emisního zdroje mimo trojúhelník se používá rozšíření dalším piezoelektrickým senzorem a vytvoření dalšího trojúhelníku, případně vytvoření sítě z těchto trojúhelníků. Další možností je vložení čtvrtého senzoru do těžiště trojúhelníku.



Obr. 2.12 Umístění senzorů pro 2D lokalizaci v polárních souřadnicích [11]

Pro vyhodnocení lokality defektu (emisní zdroj) lze použít řešení podle *Obr. 2.12*. Pro získání polárních souřadnic (R, α) je třeba dosadit geometrické údaje z *Obr. 2.12* a řešit následující rovnice

$$R=\frac{1}{2}\frac{D_1^2-\Delta t_{1,0}\cdot c^2}{\Delta t_{1,0}\cdot c+D_1\cos(\alpha-\alpha_1)} \tag{2.14}$$

$$R=\frac{1}{2}\frac{D_2^2-\Delta t_{2,0}\cdot c^2}{\Delta t_{2,0}\cdot c+D_2\cos(\alpha-\alpha_2)} \tag{2.15}$$

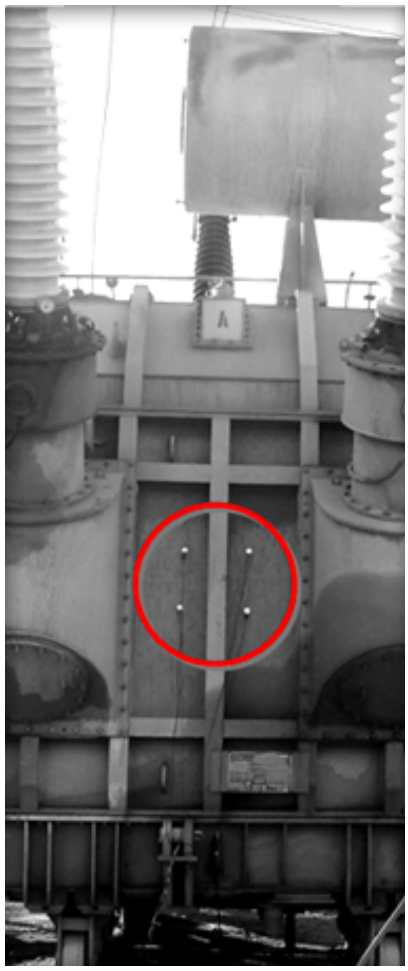
Kde: R vzdálenost EZ od počátku [m],
α úhel EZ od počátku [°],
$t_{1,0}$ čas do odezvy prvního signálu (Obr 2.11)[s],
$t_{2,0}$ čas do odezvy druhého signálu (Obr 2.11)[s],
c rychlost šíření vlny [m/s],
D_1 vzdálenost S_1 od počátku [m],
α_1 úhel S_1 od počátku [°],
D_2 vzdálenost S_2 od počátku [m],
α_2 úhel S_2 od počátku [°].

Pro lokaci v 3D prostoru jsou potřeba minimálně čtyři piezoelektrické senzory [11].

Výhodou je umístění senzorů na povrch tělesa a není třeba jiných zásahů do konstrukce zařízení. Další výhodou je, že je možné kontinuální monitorování objektu s menší časovou náročností v porovnání s postupným testováním jinými metodami. Nevýhodou této metody je, že příčinu vzniku akustické vlny přesně neznáme. Použití metody je tak limitováno tvarem a povrchem tělesa, přenosovou cestou a homogenitou materiálu. Tato nevýhoda se výrazně uplatňuje u silně nehomogenních prostředí [11].

2.2.2 Příklad používaného zařízení

Většina renomovaných výrobců detektorů částečných výbojů počítá s možností využití akustické detekce ČV a nabízí tato zařízení v off-line i on-line režimu. Jedním z takových zařízení pro sledování částečných výbojů v on-line režimu je AR-700 Acoustic PD Analyser, výrobce firma Dimrus (*Obr. 2.13*). Toto zařízení lze využít pro měření na nádobách výkonových transformátorů, spínacích přístrojích izolovaných plynem, zapouzdřených systémech a dalších vysokonapěťových zařízeních [12].



Obr. 2.13 AR-700 Acoustic PD Analyser [12]

AR-700 má čtyři akustické kanály a jeden elektrický kanál. Kombinací akustické a elektrické detekce umožňuje nejen detekci a lokalizaci izolačních problémů, ale také kvantifikaci závažnosti problému [12].

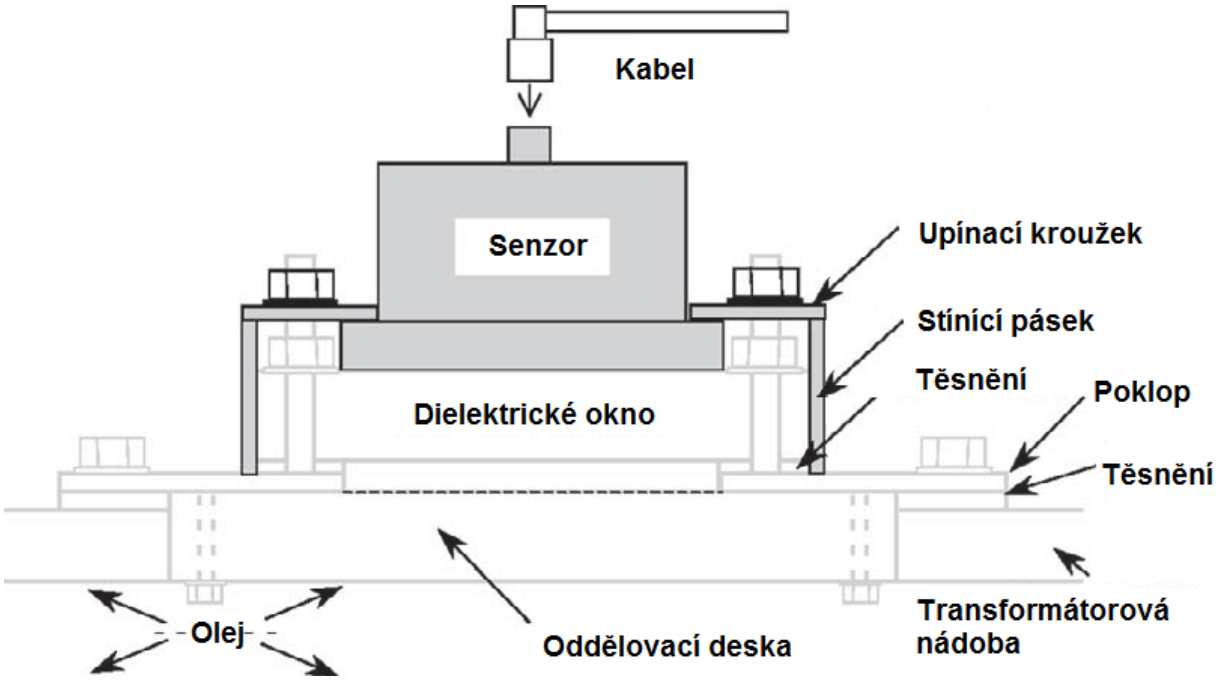
2.3 Elektromagnetické metody

Jedná se o zkoušky založené na elektromagnetických projevech částečného výboje.

2.3.1 UHF technologie

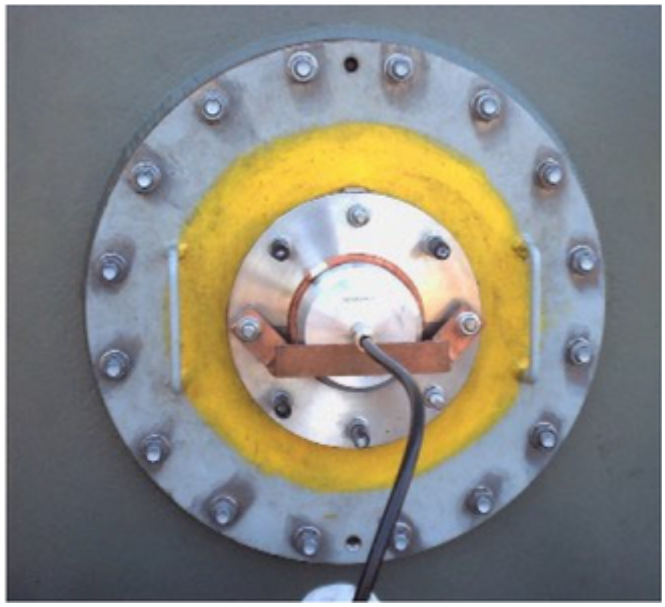
Cílem této metody je, podobně jako u předešlých metod, posouzení stavu zařízení s ohledem na přítomnost částečných výbojů. Metoda má velký potenciál pro detekci, rozpoznání a lokalizaci částečného výboje, zejména u plynem izolovaných systémů, ale také

výkonových transformátorů, izolace kondenzátorů, kabelů, průchodek a vypínačů. Je zařazena také do nové mezinárodní normy IEC/TS 62478. UHF technologie dosahuje v porovnání s klasickými metodami vyšší citlivosti a lepšího poměru signál/šum. Pro montáž anténních snímačů ale vyžaduje dielektrická okna vytvořená na povrchu vn zařízení (*Obr. 2.14* a *Obr. 2.15*). Tento požadavek může u některých zařízení (výkonové transformátory) limitovat nasazení metody.



Obr. 2.14 UHF senzor přímo umístěný na dielektrickém okně – schéma [13]

Pokud jsou senzory používány k lokalizaci částečného výboje, je třeba trojice snímačů. V případě stávajících transformátorů není tento postup možný kvůli absenci dielektrických oken. UHF technologie je v tomto případě použitelná pouze u olejového výpustního ventilu (*Obr. 2.16*), a to vzhledem k jeho poloze a přítomnosti jediného senzoru omezuje její využití [14].



Obr. 2.15 UHF senzor přímo umístěný na dielektrickém okně [14]

Podle studie J. Lopez-Roldan a spol. [15] z různých experimentálních pokusů dosahovala nejlepších výsledků pro tuto metodu anténa dlouhého kuželovitého tvaru (λ/4 monopól) o délce větší než 100 mm. Tvar antény je kompromisem pro aplikaci senzoru ve výpustním otvoru transformátoru, protože výsledky měření závisí na hloubce zasunutí antény do transformátoru. Výsledky měření jsou srovnatelné s elektrickou metodou, aniž by byly zaznamenány problémy způsobené okolním rušením [14][15].

Obr. 2.16 UHF senzor přímo umístěný v olejové výpusti [14]

2.3.2 Příklad používaného zařízení

Jedním z přístrojů pro měření a vyhodnocování elektromagnetických signálů částečných výbojů v rozvodnách může být například Doble PDS100 (*Obr. 2.17*). Jeho výhodou je kompaktnost, snadno se přenáší a detekce částečných výbojů je velmi rychlá (do několika sekund). Rozsah frekvencí přístroje je 50 MHz – 1 GHz. Přístroj umožňuje analýzu elektromagnetických signálů z externích i interních zdrojů v závislosti na použitých senzorech [16].

Obr. 2.17 Doble PDS100 – vlevo; EMI Surveyor - vpravo [16][17]

Nadřazeným nástrojem k PDS100 je od značky Doble EMI Surveyor (*Obr. 2.17*). Přístroj je určený pro neinvazivní diagnostiku motorů, generátorů, přípojnic a dalších vn zařízení elektráren a rozvoden. Měřič může identifikovat více než 65 různých elektrických a mechanických závad souvisejících s výskytem ČV v elektroizolačním materiálu, výskytem koróny, analyzovat náhodný šum nebo identifikovat závady spojené s výskytem elektrického oblouku. Rozsah frekvencí je díky EMI části rozšířen o pásmo od 50 kHz do 100 MHz, celkový rozsah i s RFI částí je 50 kHz – 1000 MHz [17].

2.4 Chemické metody

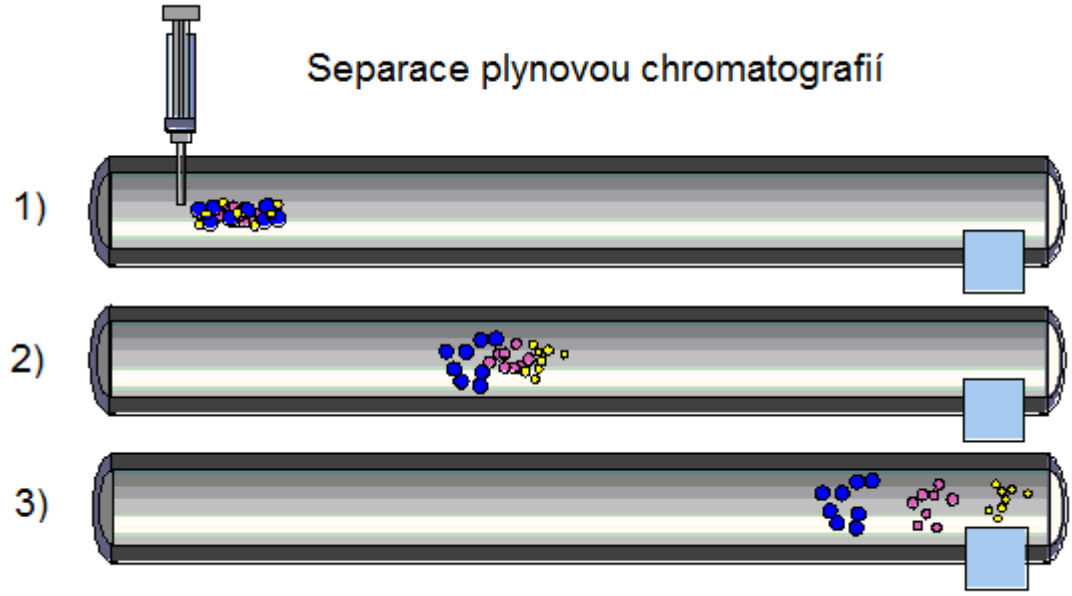
Tato zkouška je založena na chemických projevech částečného výboje. Pokud se jako izolační a chladicí médium VN zařízení používá olej nebo plyn (SF_6 nebo H_2 u velkých generátorů), je možné detekovat ČV rozborem degradačních produktů – plynů obsažených v izolačním médiu. K tomu se využívají plynové analyzátory detekující přítomnost H_2, CO, CO_2 a dalších plynů, které jsou například součástí on-line monitorovacích systémů transformátorů. Jako příklad je na *Obr. 2.18* zobrazen Calisto 2.

Obr. 2.18 Calisto 2 od firmy Morgan Schaffer [18]

2.4.1 Metoda detekce plynných složek

Pro určení jednotlivých složek obsažených ve vzorku plynu získaného z izolačního systému vn zařízení se používá metoda plynové chromatografie (DGA). Tato metoda využívá fyzikálně-chemických procesů, ke kterým dochází v důsledku negativních tepelných, elektrických či kombinovaných jevů při vzniku částečných výbojů a jiných poruchových stavech v izolačním systému zařízení. Degradační procesy vedou k tvorbě rozkladových

plynů, jejichž obsah v izolačním systému udávaný v jednotkách ppm (parts per million) poskytuje informace o přítomnosti výbojů, intenzitě degradačních procesů a procesu stárnutí materiálu nebo o výskytu náhlých poruchových stavů. Pro dosažení vysoké citlivosti metody u vzorků plynů rozpuštěných v oleji (výkonové transformátory) se používají dva detektory, detektor tepelné vodivosti (TCD), který zaznamenává atmosférické plyny (H_2, O_2, N_2) a detektor plamenově ionizační (FID) pro zjištění uhlovodíků [19][20].



Obr. 2.19 Separace plynovou chromatografií [21]

Pro zjištění stavu izolačního systému se používá posouzení trendu v rychlosti vývinu rozkladových plynů podle normy ČSN IEC 60 599, kde jsou uvedeny obvyklé hodnoty množství a přírůstků plynů. Z důvodů porovnání získaných vzorků a následného vytvoření regresivní přímky, je třeba odebrat vzorek nejlépe na začátku běžného provozu stroje. Pro detailnější analýzu je vodné zavést pravidelný odběr vzorků. Výsledky plynové chromatografie je možné interpretovat různým způsobem. Často užívanou metodou je použití poměrových kritérií, tedy sledování poměrů jednotlivých plynů (vodík H_2, etylen C_2H_4, metan CH_4, acetylen C_2H_2 a etan C_2H_6). Metodika vyhodnocení je opět uvedena v normě ČSN IEC 60 599 [19][22].

2.5 Optické metody

Optické metody detekce jsou závislé na přístupnosti místa vzniku výboje optickému pozorování. Spektrum světelného záření produkovaného výbojem je závislé na prostředí, ve kterém výboj vzniká a také na tlaku a teplotě. Optické sledování výbojů je využíváno především u externích výbojů (koróna).

Optické metody je možné rozdělit podle přístupnosti místa vzniku výboje na vnější přístupné (rozvodny, vedení) nebo vnější nepřístupné (transformátor, elektromotor, GIS). U přístupných lze použít:

- ***Lidské oko***
- ***Zesilovač světla***
- ***Korónová kamera***

Pokud se jedná o nepřístupná místa, potom to jsou:

- ***Optický kabel***
- ***Fotodioda***
- ***Kolimátor [22]***

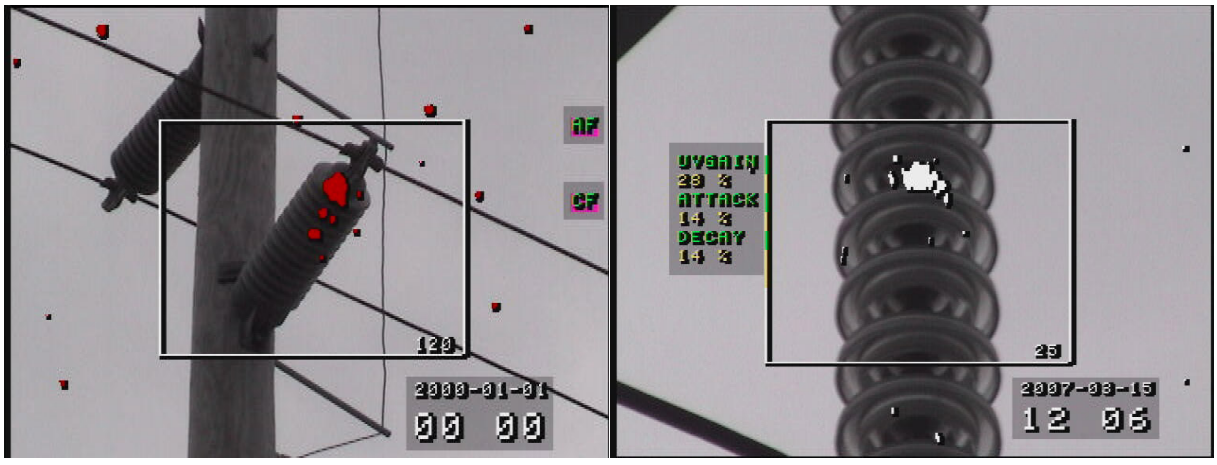
Mimo korónovou kameru je komerční využití uvedených metod prakticky nulové. Prozatím probíhají převážně laboratorní pokusy s různými typy měřicích zařízení založených na optických vlastnostech částečného výboje.

2.5.1 Korónová kamera

Jedním z typů částečného výboje může být koróna. Pro detekci koróny je možné využít korónovou kameru. Dlouholetým výrobcem takových přístrojů je například firma CSRI. Hlavní aplikace korónových kamer je v oblasti sledování korónových výbojů na prvcích VVN a ZVN, ale také třeba na zkušebních systémech vysokonapěťových laboratoří [23].

Obr. 2.20 Kamera CoroCAM 504 [23]

Jedním z mnoha typů je univerzální kamera CoroCAM 504 (*Obr 2.20*). Kamera může pracovat s vysokou citlivostí v denním i nočním režimu. Pro denní použití musí být použito solární stínidlo. Detekce UV spektra je v rozsahu 240 – 280 nm vlnové délky. V případě využití solárního stínidla je maximální UV citlivost $3 \cdot 10^{-18}$ watt/cm^2, bez použití stínidla $1 \cdot 10^{-18}$ watt/cm^2. UV obrazy mohou být zobrazeny jednotlivě nebo jako překrytí na obrazu viditelného spektra (*Obr. 2.21*). Je možný až dvojnásobný optický zoom bez způsobení odchylek v zobrazení. Hlavní uplatnění má kamera při sledování přenosové a distribuční soustavy, rozvoden vysokého napětí, VN elektrických prvků, vinutí motorů a generátorů [24].

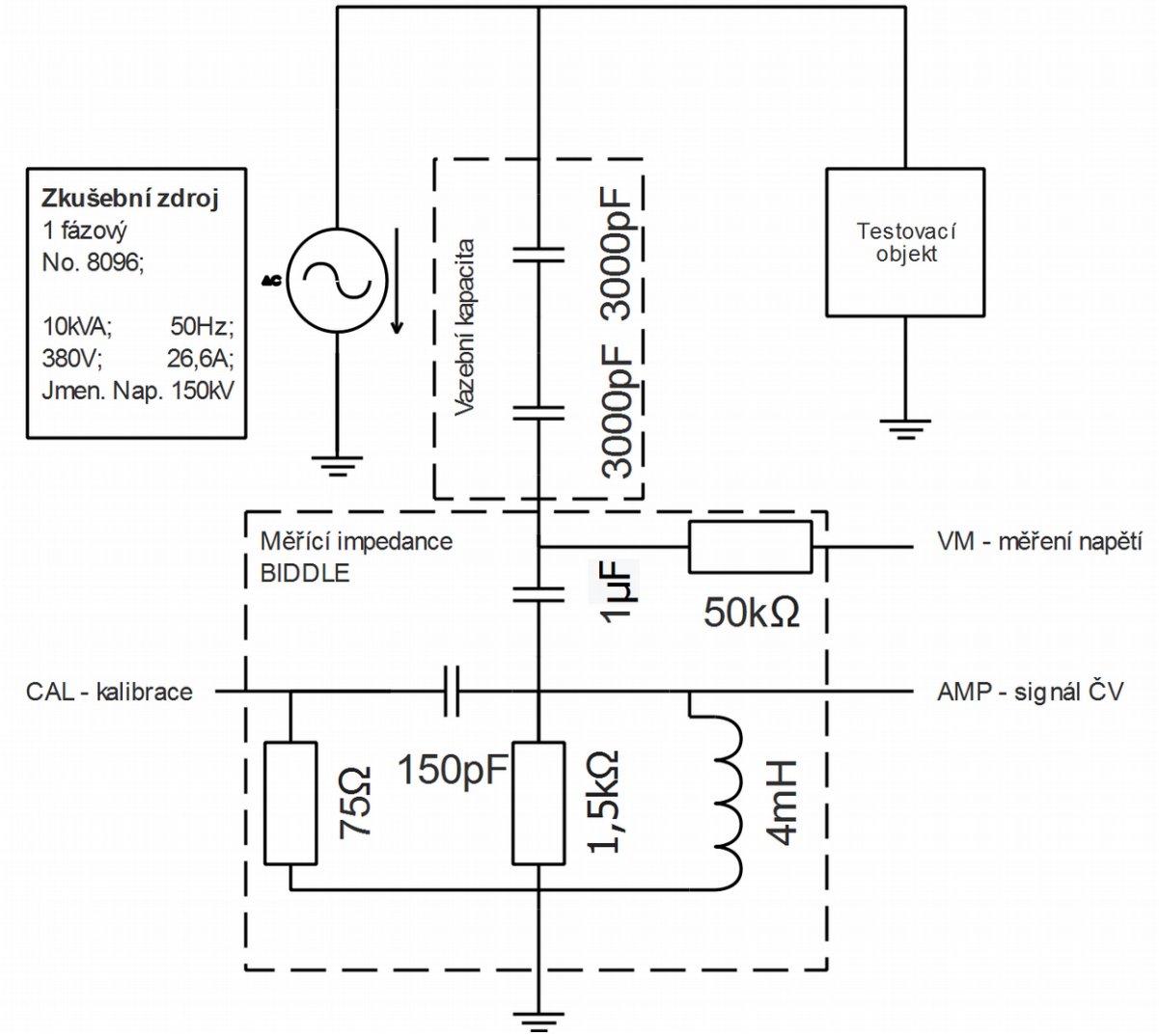


Obr. 2.21 Záběry z kamery CoroCAM 504 při sledování koróny [24]

3 ICMsystem

Praktická část této diplomové práce byla realizována na měřicím systému ICMsystem od firmy Power Diagnostix. Jedná se o komplexní zařízení pro měření částečných výbojů, které umožňuje záznam a zpracování proudových impulzů vlastních výbojů i záznam zkušebního napětí.

Blokové schéma VN obvodu pro měření částečných výbojů včetně vazebního členu, který byl pro měření v diplomové práci používán, je znázorněno na obrázku (*Obr. 3.1*) .



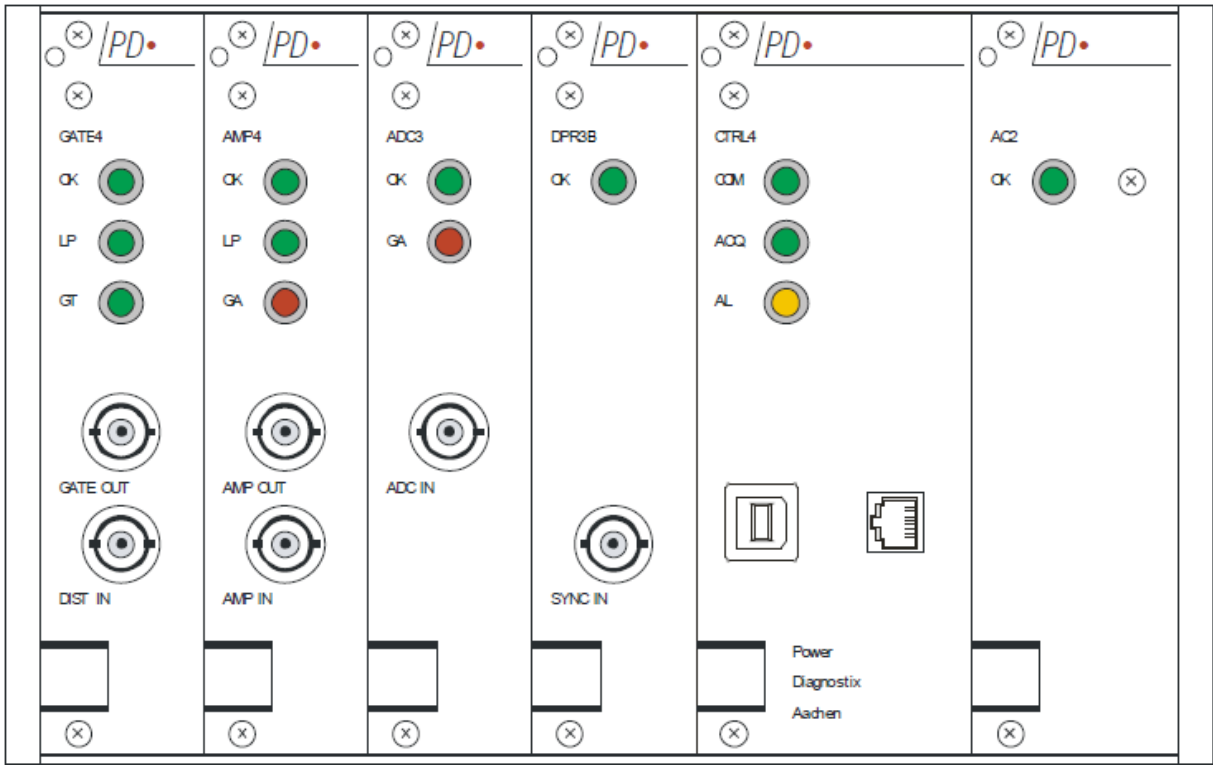
Obr. 3.1 Schéma zapojení pro měření částečných výbojů v laboratoři vysokého napětí na ZČU

3.1 Hardwarová část ICMsystem

V následující části práce je popsána hardwarová část ICMsystemu. Hardwarová část měřiče se skládá z jednotlivých modulů, které zajišťují záznam, zesílení a digitální zpracování měřených veličin.

3.1.1 Moduly ICMsystem

Měřicí přístroj ICMsystem je postaven z několika modulů. Volba jednotlivých modulů se řídí jejich parametry a je závislá na potřebách zákazníka, tedy na typu měření, pro které bude systém využíván, pro jaké zkušební objekty a v jakém prostředí bude měření probíhat. Od tohoto se odvíjí také počet modulů. Měřicí přístroj, na kterém jsem měřil, byl jednokanálový a měl šest modulů (*Obr. 3.2*)(*Příloha A*). Tyto moduly jsou popsány níže.



Obr. 3.2 Měřicí zařízení ICMsystem v laboratoři vysokého napětí na ZČU [25]

AC2 modul slouží k napájení přístroje. Zelená LED dioda indikuje zapojení přístroje do sítě a jeho zapnutí. Vstupní napájecí napětí je od 95 – 260 V střídavého napětí [25].

CTRL4 modul obsahuje systémové a komunikační rozhraní. Standardně modul obsahuje výstup USB a GPIB. K dispozici jsou i moduly s vestavěným modemem pro připojení

k internetu nebo s optickým komunikačním rozhraním. Má tři LED diody. První s označením COM signalizuje komunikaci s počítačem, druhá ACQ signalizuje probíhající sběr dat a třetí AL bliká s výskytem částečných výbojů. Modul je vybaven reproduktorem a umožňuje výboje nebo rušivé signály interpretovat také v akustické podobě. [25].

DPR3B modul obsahuje referenční logiku fáze a času a obvod pro měření napětí. Jednotka pro sběr dat je uzpůsobena pro vzorkování vstupního napětí a díky tomu může program zobrazovat měřený signál ve skutečném tvaru. Jednotka může být trigována jak zkušebním napětím, tak ze sítě nebo z externího zdroje. LED dioda zobrazuje funkčnost synchronizace [25].

ADC3 modul slouží k digitalizaci analogového signálu. Zpracovává jednotlivé impulzy, určuje jejich velikost a polaritu a může pracovat s různými tvary signálu, které se mohou v praxi vyskytnout. Nastavení A/D převodníku mají velký vliv na výsledky měření. Toto Správné nastavení se významně podílí například na minimalizaci šumu nebo na zamezení opakovaného zaznamenávání oscilujících signálů. K této problematice se váží dva parametry Dead Time (DT – mrtvý čas) a Low Level Discriminator (LLD – potlačení nízkých úrovní), které jsou vysvětleny v další části práce.

Pro kódování při digitalizaci v ADC3 modulu je jako základní rozlišení 12 bitů, s dynamickou kompresí do 8 bitů (±11 bitů do ±7 bitů). Je také nabídnuta volba mezi několika dalšími metodami kódování:

- ***Lineární bipolární (±7 bit, standardní nastavení)***
- ***Lineární unipolární (8 bit)***
- ***Logaritmické bipolární (2 dekády, například 1-100% v ±7 bitech)***
- ***Logaritmické unipolární (2 dekády, například 1-100% v 8 bitech)***
- ***Sinus (sine x)***
- ***Odmocnina ze sinu ($(\sin x)^{1/2}$) [25]***

AMP4 modul obsahuje hlavní zesilovač systému s počítačově ovládanými pásmovými propustmi. Také napájí předzesilovač RPA1. Dále obsahuje analogový spínač, který otevírá cestu signálu a tzv. *pC-metr* s A/D převodníkem pro měření zdánlivého náboje podle normy ČSN EN 60270.

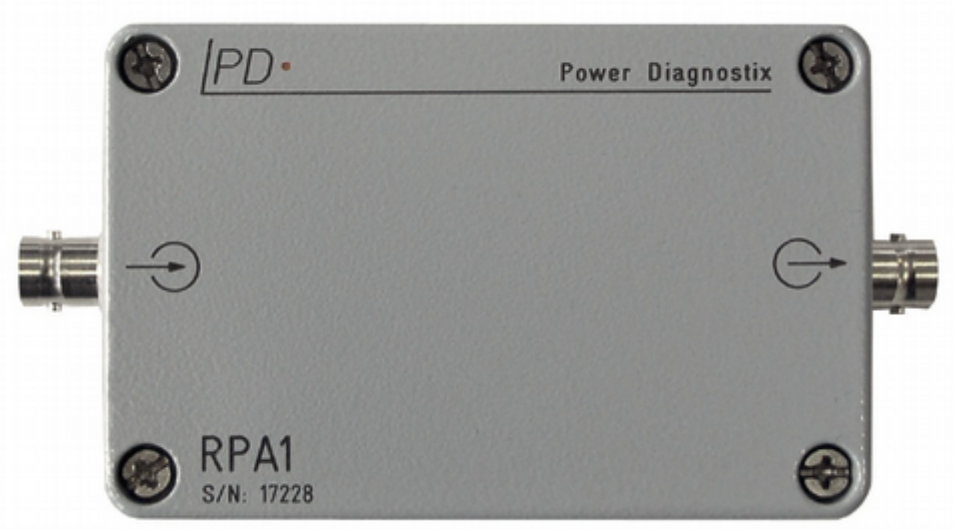
Signál částečného výboje by měl být připojen nejlépe přes RPA předzesilovač do AMP IN vstupu. RPA zajišťuje impedanční přizpůsobení měřicí cesty a eliminuje zatížení snímací impedance kapacitou koaxiálního kabelu.

Dolní pásmové propustě mají mezní frekvenci 40, 80, 100 kHz a horní propusť hodnoty 250, 600, 800 kHz. Při porovnání s kapitolou 2.1.6 lze dojít k závěru, že se jedná o širokopásmový přístroj. Rozsah zesílení je 1, 2, 4, 8, 10, 20, …, 200, 400, 800. Vstupní impedance 50 Ω [25].

GATE4 modul slouží primárně k eliminaci záznamu rušivých signálů z okolí. Tento modul má identické obvody jako AMP4 modul s předzesilovačem, vnitřními zesilovači a filtry. Pokud jsou na modulu GATE4 zaznamenány hodnoty rušivého signálu větší než nastavená mez, modul vyšle signál a dojde k přerušení záznamu na AMP4 a/nebo na ADC3 modulu [25].

3.1.2 Předzesilovač ICMsystem

RPA1 (*Obr. 3.3*) je předzesilovač vytvořený pro měření v nižších frekvencích dle normy ČSN EN 60270. Propustné frekvenční pásmo RPA1 je o něco širší než nejširší propustné pásmo filtrů v modulech ICMsystem (AMP4 a GATE4). Tím je zajištěno, že šířku pásma řídí pouze filtry měřicí jednotky. Vstupní citlivost je v řádu pC a závisí na efektivitě vazebního obvodu a úrovni šumu. Za určitých okolností může být citlivost nižší než 0,1 pC [25].



Obr. 3.3 Předzesilovač RPA1 [25]

3.1.3 Kalibrátor

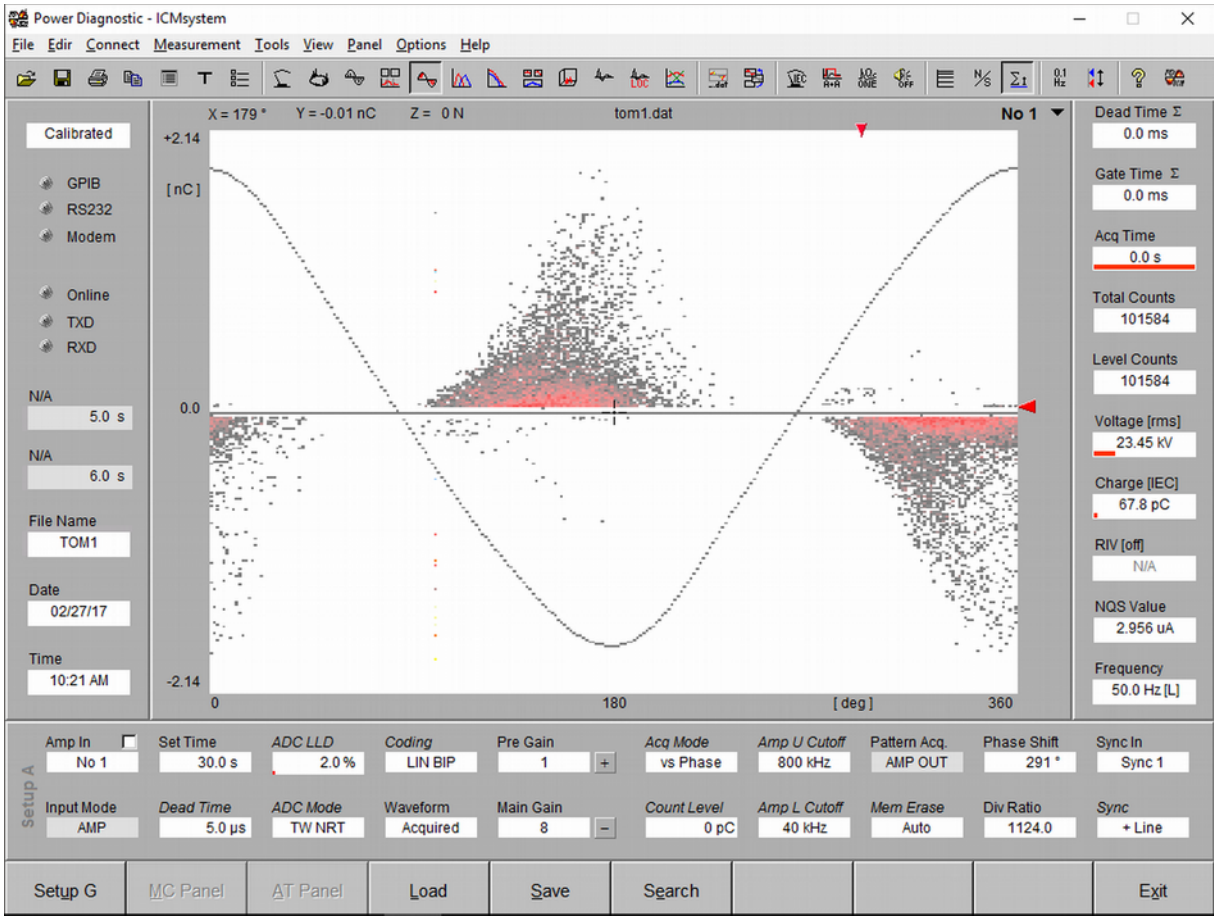
ICMsystem dodává mnoho kalibrátorů pro mnoho typů měření. Při mém měření byl použit kalibrátor CAL1A, který je podle specifikací výrobce vhodný pro měření v laboratořích. Kalibrátor generuje pulzy o velikosti 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100 pC. Splňuje podmínky dne normy ČSN EN 60270 (viz kapitola 2.1.7) [25].

3.2 Softwarová část

ICMsystem je plně počítačově řízený pomocí dodávaného softwaru. Software je vytvořen v programovacím jazyce LabWindows/CVI. Software může být provozován na operačním systému Windows XP, Vista, Windows 7 a Windows 8. Poslední aktuálně dostupná verze softwaru není kompatibilní se systémem Windows 10, se kterým pracují nové řídicí počítače. Na nových Windows 10 je program velice nestabilní a aplikace často zamrzala. Problém řešilo pouze vypnutí aplikace a její restartování spojené s rizikem ztráty dat. Proto jsem měřil na počítači s operačním systémem Windows 7.

ICMsystem software obsahuje všechny nezbytné funkce k ovládání měřicího přístroje, pro zobrazení a úpravu parametrů a pro zobrazení získaných dat. Dále obsahuje funkci k opětovnému načtení již uložených měření a také funkce pro ukládání a export obdržených dat [25].

V textu níže je popsáno uživatelské rozhraní. Pro lepší pochopení ovládání programu je v práci uvedený *Obr. 3.4*, který ukazuje náhled na celou aplikaci bezprostředně po jejím spuštění včetně dosud nepřepsaného předchozího záznamu výbojů. V diplomové práci jsem používal poslední verzi softwaru ICMsystem 4.73s [25]. Umístění všech funkcí a ukazatelů popisovaných v kapitole 3.2 je patrné z celkového náhledu na *Obr. 3.4*.

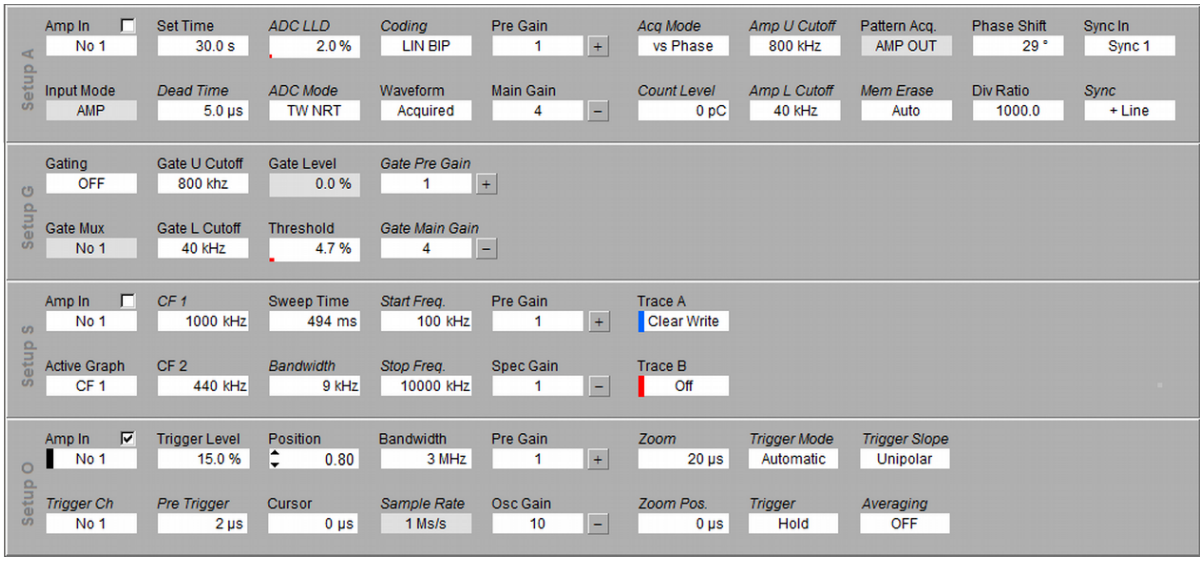


Obr. 3.4 Uživatelské prostředí ICMsystem

3.2.1 Hlavní ovládací prvky

Hlavní funkce programu jsou ovládány řadou tlačítek na panelu v nejnižší části displeje (Setup G, MC panel, …, Exit), viz *Obr. 3.4*.

Po stisknutí tlačítka *Setup G*, dojde k přepnutí ovládací lišty (*Obr. 3.5*) a k změně tlačítka na *Setup* s dalším písmenem v pořadí (G, S, O, A a znovu). Každá z těchto lišt slouží k ovládání jiného módu aplikace pro měření. Jednotlivé panely jsou popsání níže.



Obr. 3.5 Subpanely Setup softwaru ICMsystem; od shora Setup A, G, S a O

- ***Setup A***

Při spuštění aplikace se automaticky spustí nejdůležitější ovládací panel – Setup A. Ten slouží k ovládání měření částečných výbojů. Lze v něm upravovat parametry měření. Podrobněji se tímto panelem a jeho funkcemi zabývá kapitola 4.1.1.

- ***Setup G***

Slouží k ovládání modulu GATE4, tedy k nastavení parametrů pro eliminaci rušivých signálů z okolí měřicího obvodu. Funkčnost modulu jsem ověřil pomocí antény blízkého pole, ale vlastní modul není vybavený originálním vazebním prvkem a vzhledem k používání měřiče ve stíněné laboratoři jsem s tímto modulem dále nepracoval.

- ***Setup S***

Primárně určeno k ovládání modulu GATE4, slouží k nastavení parametrů pro zpracování a spektrální analýzu signálů.

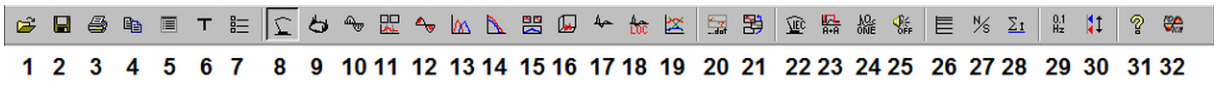
- ***Setup O***

Slouží k ovládání režimu *Osciloskop*. Z *Obr. 3.5* je zřejmé, že osciloskopický režim umožňuje použití základních nastavení a funkcí osciloskopu.

Na spodní liště je dále umístěno tlačítko *Load*, které slouží k načtení uloženého měření a tlačítko *Save* pro uložení daného měření. To znamená vytvoření Reportu s nastavením měření, s kalibrací a daným výsledkem měření do formátu DAT. Tento report lze otevřít pouze v ICMsystem softwaru. Tlačítko *Search* se zobrazí pouze pokud není připojen a zapnut měřicí systém a slouží k jeho detekci a k následnému propojení hardwaru se softwarem. Tento dialog se automaticky zobrazí při spuštění aplikace ICMsystem. Další tlačítka se aktivují po připojení měřicího zařízení a systém se přepne do režimu on-line (*Příloha B*). Tlačítkem *Offline* dojde k přerušení komunikace mezi měřicím zařízením a softwarem. Dále tlačítko *Start* zahájí ukládání dat dle zadaných parametrů. Po spuštění této analýzy se změní opět tlačítka na panelu hlavních ovládacích prvků (*Příloha C*), tato dvě tlačítka *Stop* a *Cancel* jsou červená a jejich funkce je zastavení probíhajícího měření. Po stisku *Stop* dojde pouze k zastavení měření, kdy se dále může pracovat s již naměřenými daty, ale zastavení měření může chvíli trvat. Tlačítko *Cancel* zastaví okamžitě měření (využívá se při chybném nastavení měření). Již naměřená data nemají vypovídací hodnotu (může být nesprávně zobrazen DT, atd.). Pokud bylo měření zastaveno tlačítkem *Cancel*, tak tlačítko *Reload* nahraje data z mezi-paměti a tím opraví chybné zobrazení dat (nesprávně zobrazený DT, atd.). Poslední tlačítko *Exit* je určeno k ukončení aplikace [25].

3.2.2 Nástrojová lišta

Dalším důležitým panelem pro ovládání je nástrojová lišta (*Obr. 3.6*). Lze ji nalézt v horní části aplikace, přesněji se jedná o druhý panel shora.



Obr. 3.6 Toolbar – Nástrojová lišta s číselným popisem tlačítek – Verze aplikace 4.73

- 1 – *Load*, jeho funkce je stejná, jako u výše zmiňovaného tlačítka *Load*.
- 2 - *Save*, je to duplikace tlačítka *Save*, již výše zmiňovaného.
- 3 – *Print*, tlačítko sloužící k přímému tisku na výchozí tiskárnu.
- 4 – *Copy*, načtení aktuálního grafu aplikace do schránky paměti, graf je následně možné vložit do běžných softwarů pro úpravu obrázků nebo do dalších dokumentů. Ovšem jako obraz, není možnost vložení jako graf.
- 5 – *Edit Report*, tím lze upravit report (*Příloha D*) o aktuálním měření, který se ukládá zároveň s výsledky měření.

- 6 – *Edit Template* (*Příloha E*) slouží k tvorbě šablon nastavení měření, které lze přes toto tlačítko vytvářet, ukládat a načítat. Zajímavou funkcí je zamčení určitého parametru, který se po načtení dané šablony nedá měnit. Lze vytvořit až deset takových šablon.
- 7 – *Edit Preferences* otevře nastavení aplikace (*Příloha F*). Veškerá nastavení zůstávají uložená i po vypnutí aplikace. Po nainstalovaní programu a při prvotním startu aplikace, je nutné po připojení USB k počítači otevřít tento dialog a zaškrtnout COM s číslem portu USB, ke kterému je přístroj ICMsystem připojen, viz obrázek (*Příloha F*). Dále je zde možné nastavit pod záložkou *Files* v jaké verzi .DAT se budou výsledky ukládat.
- 8 – *Meter* přepne obrazovku do on-line měřicího režimu (*Příloha G*). Na této obrazovce jsou v horní části dvě okna. V levém se zobrazuje aktuální výbojová činnost v *nC* či *pC,* v pravém horním okně je zobrazeno aktuální napětí. Ve spodním velkém okně běží on-line záznam výbojové činnosti a napětí na čase (0 – 100 s).
- 9 – *Ellipse* přepne na displej (*Příloha H*), který je podobný níže popsanému zobrazení *Scope*. V tomto módu je fáze od 0° do 360° rozdělena na dvě části reprezentující každá půlku sinusoidy. Každý puls částečného výboje je zobrazen jako dvojitá vertikální linka.
- 10 – *Scope* přepne displej na zobrazení (*Příloha I*), které napodobuje zobrazení analogových detektorů částečných výbojů. Režim může být aktivován během běžícího měření, aniž by došlo k jeho ovlivnění.
- 11 – *Spectrum* zobrazí displej, na kterém je v dolní části obrazovky záznam frekvenčního spektra (*Příloha J*). Ten obsahuje dva posuvné ukazatele pro volbu střední frekvence. Ke každému ukazateli je přiřazeno jedno ze dvou okének v horní liště. Po stisku tlačítka *Start* začne měření (je možné přepnout na záložku *Map*, viz *Příloha K*, kde je zobrazen změřený první ukazatel).
- 12 – *Map* je nejdůležitější tlačítko, přepne na displej pro standardní měření částečných výbojů (*Obr. 3.4*). Na ose *x* je fáze nebo čas a na ose *y* je velikost náboje. Barva udává četnost výskytu v dané fázi či čase, při stejném *q*. Podrobněji je tato problematika popsáno v kapitole 4.1.1.
- 13 – *Projections vs. X* přepne na zobrazení četnosti částečných výbojů v závislosti na fázi (*Příloha L*). Červená křivka zobrazuje počet kladných výbojů a modrá počet záporných výbojů.

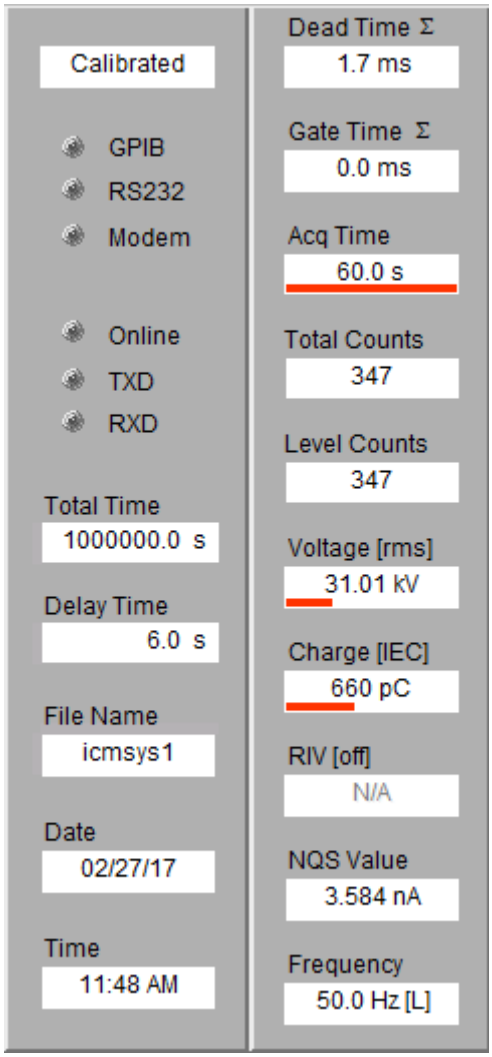
- 14 – *Projections vs. Y* přepne na zobrazení četnosti částečných výbojů v závislosti na velikosti náboje (*Příloha M*). Červená křivka zobrazuje počet kladných výbojů a modrá počet záporných výbojů.
- 15 – *Trending* tlačítko přepne na obrazovku, jež je vyobrazena v *Příloze O*, na které se dají vyhodnotit hodnoty NQS (střední proud částečných výbojů viz kapitola 3.2.3 - *NQS Value)* v libovolných časových úsecích měření, které je možné navolit na spodní obrazovce. Zvolení časového intervalu je možné pomocí posunu dvojicí modrých kurzorů, kde hodnota NQS v tomto intervalu je napsána v levém horním okénku. Červené kurzory fungují stejně, jenom pro pravé horní okénko.
- 16 – *3D-Animation* přepne obrazovku na 3D graf (*Příloha P*), který je trojrozměrným zobrazením vzorku měření, totožným se záložkou *Map*. Lze jím pomocí kurzoru otáčet. Osa *x* je fáze či čas, osa *y* je velikost náboje a na ose *z* je zobrazena četnost výbojů, která je v záložce *Map* zobrazena barevnou škálou.
- 17 – *Oscilloscope* zobrazí displej podobný jako u digitálních osciloskopů (*Příloha Q*). Je nutné přepnout hlavní ovládací panel na Setup O, jak je vysvětleno v kapitole 3.2.1.
- 18 – *Cable Fault Location* – přepne celý program na funkci, která dokáže lokalizovat závady v kabelech (*Příloha R*). Tato funkce je pouze možná jen s poslední verzí modulu zesilovače.
- 19 – *Reset Stripchart* funkce resetuje on-line běžící vyobrazení částečných výbojů a napětí na záložce *Meter*.
- 20 – *Change Measuring Mode* přepínaná mezi dvěma módy měření *standart* (standartní) a *consecutive* (po sobě/průběžný). Standardní mód se používá pro běžné, jednorázové měření, kde po uplynutí nastaveného měřicího času můžeme s daty ihned pracovat v programu ICMsystem. Po přepnutí na průběžný mód se zpřístupní na levém informačním panelu (*Obr. 3.7*) položky Total Time a Delay Time. Pokud tyto položky vyplníme například podle *Obr. 3.7* (Total Time – 1000000 s, Dealy Time – 6 s) a do položky Set Time vložíme 30 s a spustíme měření, tak po dobu 30 s bude probíhat měření, které se posléze uloží do výchozího adresáře jako *icmsys10001.dat*. Následně program počká 6 s a poté začne opět měřit 30 s interval, který uloží jako *icmsys10002.dat*. To se bude opakovat do uplynutí celkového času (Total Time – 1000000 s), stisknutí tlačítka Stop nebo do zaplnění disku. Soubory se dají samostatně otevřít v aplikaci ICMsystem a dále analyzovat.

- 21 – *Enable/Disable Offline Replay* slouží k zapnutí nebo vypnutí funkce, která umožní přepočítat výsledky pro zobrazení s redukovaným měřicím časem, aby je bylo možné porovnat s jinými měřeními s kratší dobou sběru dat.
- 22 – *Charge Meter Mode* přepíná mezi třemi měřicími módy: *Fast Mode*, *Normal Mode* a *IEC Mode*. To se projeví již na obrazovce *Meter* a také při měření klasického vzorku – *Map*.
  - *Fast Mode* vždy zobrazuje největší hodnotu náboje, kterou dokáže v minimálním měřicím úseku zaznamenat.
  - *Normal Mode* funguje podobně jako *Fast mode*, ale zohledňuje reálné fyzikální vlastnosti analogových měřicích přístrojů, kdy pracuje se setrvačností a bez velmi prudkých změn (pohyb ukazatele na stupnici).
  - *IEC Mode* zobrazuje výsledky měření dle normy ČSN EN 60270. Tato problematika je popsána v kapitole 2.1.8.
- 23 – *Gate Mode* slouží k přepínání možností fungování GATE4 modulu. Po stisku tlačítka dojde k rotaci mezi třemi funkcemi:
  - *A+A* tato funkce způsobí, že ve chvíli, kdy modul GATE4 dle nastavení vyhodnotil překročení povolené meze rušení, pozastaví zpracování dat na modulech AMP4 a ADC3.
  - *AMP* funguje stejně jako A+A s tím rozdílem, že pozastaví pouze AMP4.
  - *ADC* má opět stejnou funkci jako A+A s tím rozdílem, že pozastaví pouze modul ADC3.
- 24 – *Calibration Mode* funkce umožňuje u vícekanálových měřicích přístrojů volit mezi kalibrací jednoho, právě aktivního kanálu, nebo kalibrací všech kanálů přístroje stejně. Vzhledem k možným odchylkám v důsledku konkrétní konfigurace zapojení není kalibrace všech kanálů pro některé testy vhodná.
- 25 – *Change Sound Mode* tímto tlačítkem se zapne či vypne vestavěný reproduktorek v modulu CTRL4.
- 26 – *Enable Log. Proj.* ovlivňuje položky typu *Projections vs. X*, *Y*, *Trending*, grafy mohou být zobrazeny s logaritmickou nebo lineární osou, tlačítko umožňuje volbu měřítka.

- 27 – *Enable Counts per second* opět ovlivňuje položky *Projections vs. X*, *Y* a *Trending*, kde se po stisknutí tohoto tlačítka místo celkového počtu pulzů, zobrazí počet pulzů za sekundu.
- 28 – *Enable Level Count Mode* způsobí změnu dvou okének (čtvrtého a pátého) v pravém informačním panelu (*Obr. 3.7*). Pokud je zapnutý, ve čtvrtém okénku pod názvem *Total Counts* je zobrazen celkový počet zaznamenaných částečných výbojů. V pátém okénku shora pod názvem *Level Counts* je potom zobrazen celkový počet výbojů překračujících nastavenou hladinu (kladných i záporných) nábojů v políčku *Count Level* v Setup A. Hladinu náboje pro čítač pulzů je také možné nastavit polohou modrého trojúhelníkového kurzoru, který se aktivuje stisknutím tlačítka *Enable Count Level Slider*. V případě vypnutí funkce se zobrazí v jednom okénku počet kladných výbojů a v druhém počet záporných výbojů.
- 29 – *Enable Manual Frequency Mode* povolí ruční nastavení frekvence zkušebního napětí. V rozsahu mezi 20 Hz až 400 Hz je frekvence měřená automaticky přístrojem. V případě, kdy bude frekvence nižší než 20 Hz, je nutné nastavit frekvenci manuálně.
- 30 – *Enable Count Level Slider* umožňuje přepínat mezi funkcemi postranního jezdce na pravé straně měřicího okna. Jezdec má dva významy. Pokud je šipka červená, nastavuje LLD. Modrá šipka nastavuje hladinu náboje (*Count Level*) pro čítač pulzů, viz výše uvedené funkce.
- 31 – *Help Index* v použité verzi ICMsystem softwaru toto tlačítko nereagovalo.
- 32 – *Help About* otevře záložku (*Příloha S*) s informacemi o softwaru a s kontakty na podporu aplikace [25].

3.2.3 Informační panely

Pod nástrojovou lištou po pravé a levé straně aplikačního rozhraní jsou umístěny informační panely (*Obr. 3.4*), které jsou samostatně zobrazeny v *Obr. 3.7*.



Obr. 3.7 Levý a pravý informační panel

Na levém panelu je 6 okének. Shora:

- V prvním okénku se zobrazuje informace o stavu kalibrace *(Calibrated* nebo *Noncalibrated*) a označuje, zda je měřicí systém zkalibrován (neznamená to, že je zkalibrován správně k danému měření, ale že s danou nastavenou kalibrací pracuje), nebo není.
- *Total time*, okénko se aktivuje pouze v případě přepnutí měření na průběžný mód, kde je možné nastavit celkový čas nepřetržitého měření, viz kapitola 3.2.2 – 20 – Change Measuring Mode.
- *Delay Time*, stejně jako *Total Time* se aktivuje pouze při přepnutí měření na průběžný mód. Následně je v tomto okénku možné nastavit čas prodlevy mezi měřeními v průběžném módu, viz kapitola 3.2.2 – 20 – *Change Measuring Mode*.

- *File Name* slouží k nastavení jména souboru s koncovkou .DAT, který se vytvoří/přepíše při ukládání měření. V průběžném módu se k tomuto názvu připojí 0001.DAT a každé další měření má číslo výstupního souboru s tímto názvem zvětšené o jedna, viz kapitola 3.2.2 – 20 – *Change Measuring Mode*.
- *Date* zobrazuje aktuální datum, manuální přepis standardní cestou není možný (pouze přepsání data v nastavení Windows)
- *Time* zobrazuje aktuální čas, který se opět nedá standardní cestou přepsat. Čas se zobrazuje ve formátu AM/PM.

V případě načtení záznamu měření se okénka přizpůsobí hodnotám z načítaného souboru. Tím je možné zpětně zjistit datum a čas měření a další nastavení souboru změřených dat.

V horní části levého panelu jsou dvě trojice LED indikátorů, které v případě aktivace svítí zelenou barvou s výjimkou poslední dvojice, která má červenou barvu. První trojice *GPIB*, *RS232* (USB), *Modem* zobrazuje způsob připojení měřicího zařízení k počítači. LED indikátor *On-line* z druhé trojice značí, že propojení řídicího počítače a měřicího zařízení je aktivní. *TXD*, pokud bliká, signalizuje přenos dat z počítače do měřicího zařízení. Naopak *RXD* blikáním značí přenos dat z měřicího zařízení do počítače (měření).

Na pravém panelu se jedná o deset okének:

- *Dead Time Σ* ukazuje celkový dead time měření. Poměr této doby a celkové doby měření je důležitý ukazatel statistické věrohodnosti celého měření.
- *Gate Time Σ* ukazuje celkový čas, kdy modul GATE4 vyhodnotil překročení nastavené úrovně signálu a pozastavil měření kvůli vysokému zarušení z okolí. Důležitou informací je opět poměr celkové doby měření k době, kdy bylo měření pozastaveno, aby byla zaručena věrohodnost měření.
- *Acq Time* je kombinovaný indikátor (číselný údaj a sloupcový graf). Sloupcový graf ukazuje poměr mezi přednastaveným časem měření a dobou měření, která už skutečně uběhla.
- *Total Counts* a *Level Counts* jsou vysvětleny výše (Viz kapitola 3.2.2 – 28 – *Enable Level Count)*. Dvojitým poklepáním na jedno z těchto okének se otevře dialog (*Příloha T*), kde je možné stiskem Pos/Neg přepnout dvojici oken *Pos Counts* a *Neg*

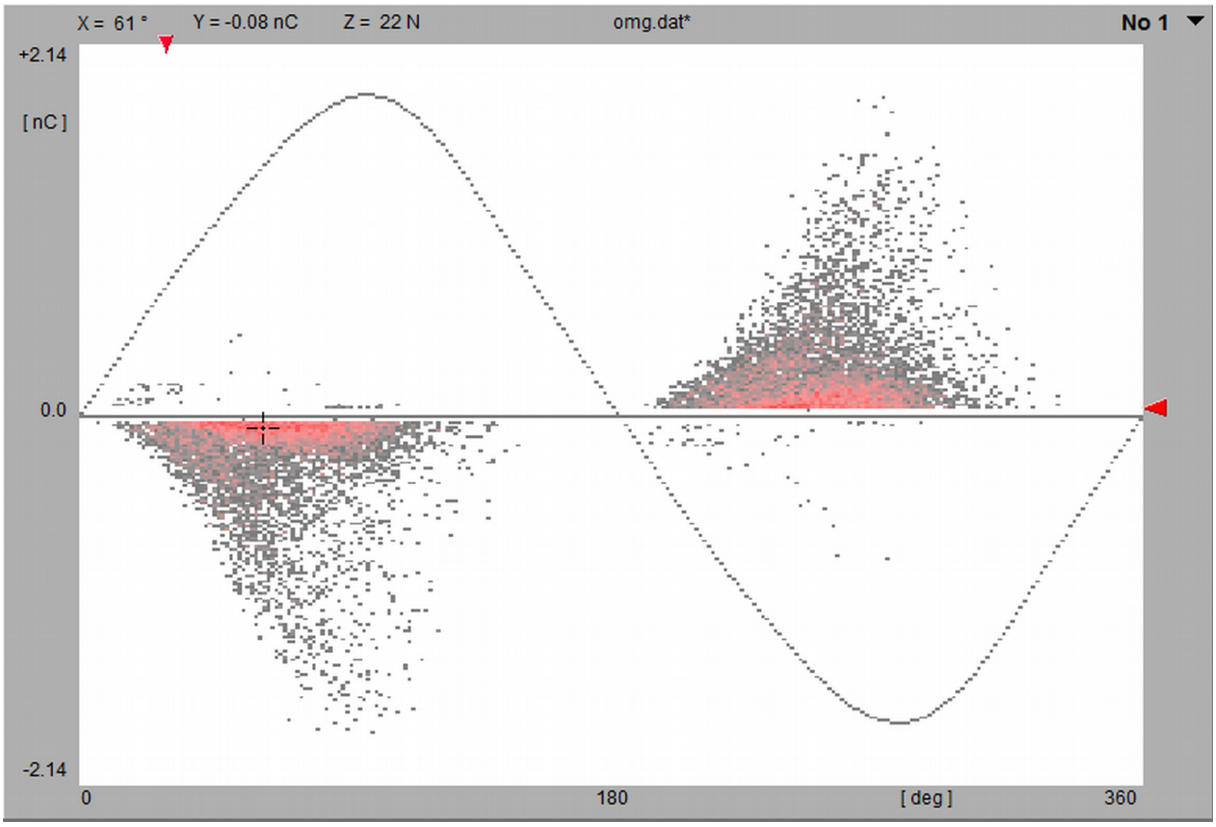
Counts, nebo lze do tohoto dialogu vepsat hodnotu pro *Level Count* nebo nechat číslici nula a po stisku OK se přepne na dvojici oken *Total Counts* a *Level Counts*.

- *Voltage [rms]* zobrazuje hodnotu vysokého zkušebního napětí s respektováním dělicího poměru děliče. Dvojitým poklepáním se přepíná mezi třemi možnými variantami ukazatele napětí:
  - *RMS* (Root Mean Square) – zobrazuje změřenou efektivní hodnotu sinusového průběhu napěťového signálu *u(t)*.
  - *Up/1.41* – zobrazuje matematicky vypočtenou (maximální hodnota dělená odmocninou ze dvou) efektivní hodnotu napětí z jakéhokoliv časového průběhu *u(t)*.
  - *DC* – určeno pro měření stejnosměrného napětí. Zobrazuje hodnotu *u(t)* zkušebního napětí stejnosměrného zdroje.
- *Charge [IEC]* zobrazuje aktuální velikost náboje. Dvojitým poklepání na toto okénko dojde k rotaci mezi měřicími módy, jež jsou vysvětleny výše (Viz kapitola 3.2.2 – 22 – *Charge Meter Mode)*.
- *RIV [off]* dvojitým poklepáním na tento text se zapne nebo vypne RIV měření. Pokud je RIV (*Radio Influence Voltage*) měření zapnuté, dvojitým poklepáním na okénko lze zapnout kalibraci RIV měření (*Příloha U*) NEMA 107 nebo CISPR 18-2.
- *NQS Value* je odvozená veličina (viz ČSN EN 60270), tedy střední proud částečných výbojů vypočítaný dělením celkové sumy náboje všech výbojových pulzů celkovým měřicím časem (C/s nebo A).
- *Frequency* zobrazuje frekvenci synchronizačního zdroje. *[L]* značí, že se jedná o automatickou synchronizaci a *[M]* indikuje manuální synchronizaci. Dvojitým poklepáním na okénko se otevře nastavení synchronizační frekvence (*Příloha V*). Automatická synchronizace je nastavena jako výchozí a pracuje v rozmezí 30 Hz až 400 Hz. Pro nižší frekvence než 30 Hz je nutné přepnout na manuální nastavení a frekvenci nastavit manuálně [25].

3.2.4 Grafické zobrazení měření, kalibrace měření a výstupy měření

V poslední části kapitoly 3.2 jsem se zaměřil na problematiku zobrazení a vyhodnocení výsledků analyzovaným softwarovým nástrojem. Pro objektivní a věcně správné posouzení stavu zkoušeného objektu je tato část softwaru klíčová a v kombinaci s nastavením parametrů

měření limituje možnosti daného měřicího systému. Pro nastavení parametrů systému a ověření chování zkoušeného objektu (zapalovací a zhášecí napětí výbojů) je výhodné využít on-line režim (záložka *Meter*). Vlastní měření je ale realizováno v režimu zaznamenávajícím standardní obrazce ČV (pattern). Režim pracuje pod záložkou *Map* na nástrojové liště a ve standardním měření je k němu přidružen Setup A, viz zobrazení příslušného okna v příloze (*Příloha W*) nebo případně výsledky předešlého měření, jako jsou například zobrazeny na *Obr. 3.8*.



Obr. 3.8 Obrazovka na záložce Map – po měření částečných výbojů

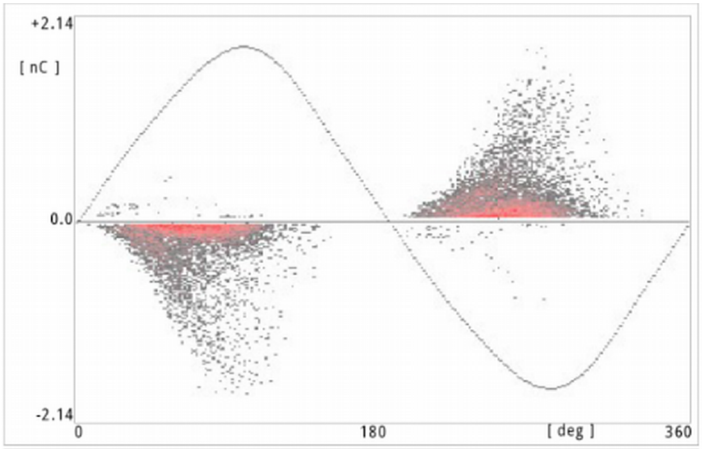
Na *Obr. 3.8* jsou vyobrazeny správně změřené částečné výboje. Rozlišení obrazovky je 256 x 256 x 65536 bodů, kde rozsah osy *x* a *y* je dána vzorkováním na A/D převodníku. Rozsah osy *z* je dána čítačovou pamětí, která je 1Mbit, což odpovídá 8bit x 8bit x 16bit, viz výše uvedený rozsah 256 x 256 x 65536 bodů. Jak již bylo zmíněno, na ose *x* je fáze nebo čas a na ose *y* je velikost náboje. Barva udává četnost výskytu výbojů v dané fázi nebo čase při stejném *q*. Po kliknutí na určitý bod na displeji se vypíší v horní části obrazovky hodnoty označeného bodu (fáze nebo čas, náboj a četnost odpovídající barevné škále), viz *Obr. 3.8* nahoře vlevo. Rozsah osy *y* je dán nastavením na Setup A (nastavení zesílení předzesilovače a hlavního zesilovače) a má přímou souvislost s kalibrací měřiče. Rozsah osy *x* je u fáze

neměnný (0° - 360°) a u časové závislosti je rozsah osy daný celkovou dobou měření. Dále je v grafu znázorněn průběh synchronizačního napětí. V případě vícekanálových měřicích systému lze kliknutím na text *NO 1*, v pravé horní části *Obr. 3.8* přepnout na jiný kanál. Korektnost měření lze softwarově zajistit pouze správným nastavením hodnot v Setup A a správnou kalibrací. Průběh měření a postup pro volbu parametrů nastavení bude vysvětlen v kapitole 4.

Kalibrace měřicího systému je prováděna v beznapěťovém stavu. Nejprve je nutné připojit kalibrátor splňující normu ČSN EN 60270, který generuje impulzy o známé hodnotě náboje dle schématu (*Obr. 3.1*). Následně je nutné zvolit v *Setup A* rozsah frekvencí (*Amp U/L Cutoff*) a nastavení zesílení (*Pre Gain/Main Gain*) tak, aby v okénku (*Charge*) v pravém informačním panelu dosahovala červená lišta zhruba do 2/3 šířky okénka (*Příloha X*). Po doběhnutí měření se dvojitým poklepáním na nejvyšší změřený bod otevře dialog s nastavením úrovně kalibrace (*Příloha X*). Jejím vložením podle nastavení kalibrátoru a potvrzením dojde k výpočtu korekčního faktoru pro záznam PD pattern a indikátor vrcholové hodnoty náboje. Obecně platí, že vždy po změně zkušebního obvodu je nutné znovu zkalibrovat zařízení. Software ale v případě, že není možné kalibraci provést, umožňuje kalibrovat bez měření kalibračního pulzu s využitím předchozích měření.

Výstup z aplikace ICMsystem lze rozdělit na dva základní typy. První jsou výsledky měření zpracované v tzv. patternu. Druhým je uložení průběhu měření nebo výsledků ve formátu DAT (Tlačítko *Save*) do tak zvaného reportu, který se dá ale načíst pouze v aplikaci ICMsystem.

Výsledky do patternu se dají uložit jednoduše. Stačí kliknout na *Save PD Pattern* v záložce File. Následně se objeví dialog, kde je možné vybrat uložení obrázku a jeho formát (png nebo bmp). Nicméně PD pattern (*Příloha Y*), který se tímto způsobem vytvoří, je velmi strohý a zcela nedostačující pro jakoukoliv další práci s daty, ať už se jedná o použití dat k výzkumným účelům, nebo pro vytvoření podrobné zprávy, například při vývojových měřeních zařízení. Lepšího výsledku dosáhneme, pokud zvolíme položku *Print…* v záložce *File*. Pokud zvolíme tisk do PDF, tak se vytvoří PDF s údaji, jež jsou prezentovány na *Obr. 3.9*. Výstup potom představuje určitou formu reportu, který ale poskytuje pouze základní informace o parametrech měření a záznamu.



File	: TOM	Voltage	: 23.5 kV	Total Counts	: 14151
Date	: 02/27/17	Frequency	: 0.0 Hz*	Level Counts	: 14151
Time	: 10:21 AM	S Dead Time	: 0.1 s		
Acq. Time	: 30.0 s	S Gate Time	: 0.0 s		

Address	: Adr 1	ACQ Mode	: vs Phase	Gating	: Off
Amp Mux	: CH 1	Q Cal	: 100.0 pC	Gate Mux	: CH 1
Set Time	: 30.00 s	U Cutoff	: 800 kHz	Gate U Cutoff	: 800 kHz
Dead Time	: 5.0 ı s	L Cutoff	: 40 kHz	Gate L Cutoff	: 40 kHz
LLD	: 2.0 %	Sound	: Off	Threshold	: 4.7 %
ADC-Mode	: TW NRT	Mem Erase	: Auto	Gate Pregain	: 1
Coding	: LIN BIP	Color	: Log	Gate Maingain	: 4
Waveform	: Acquired	Div Ratio	: 1124		
Pre Gain	: 1	Phase Shift	: 30é		
Main Gain	: 8	Sync	: + Line		

Report Name:	Report No.:
Test Obj. No:	Obj. Name:
Testing Pers.:	Executive:
	Inspector:
Comment:	

Obr. 3.9 PDF výstup z ICMsystem po tisku – Report

Druhou možností je uložení do již zmiňovaného formátu DAT (viz kapitola 3.2.1). Se záznamem měření je pak možné dále pracovat, ale pouze v softwaru ICMsystem. Práce s daty mimo tento software a jejich zpracování jinými standardně používanými nástroji není možné, což může v některých případech představovat omezení při využití výsledků měření.

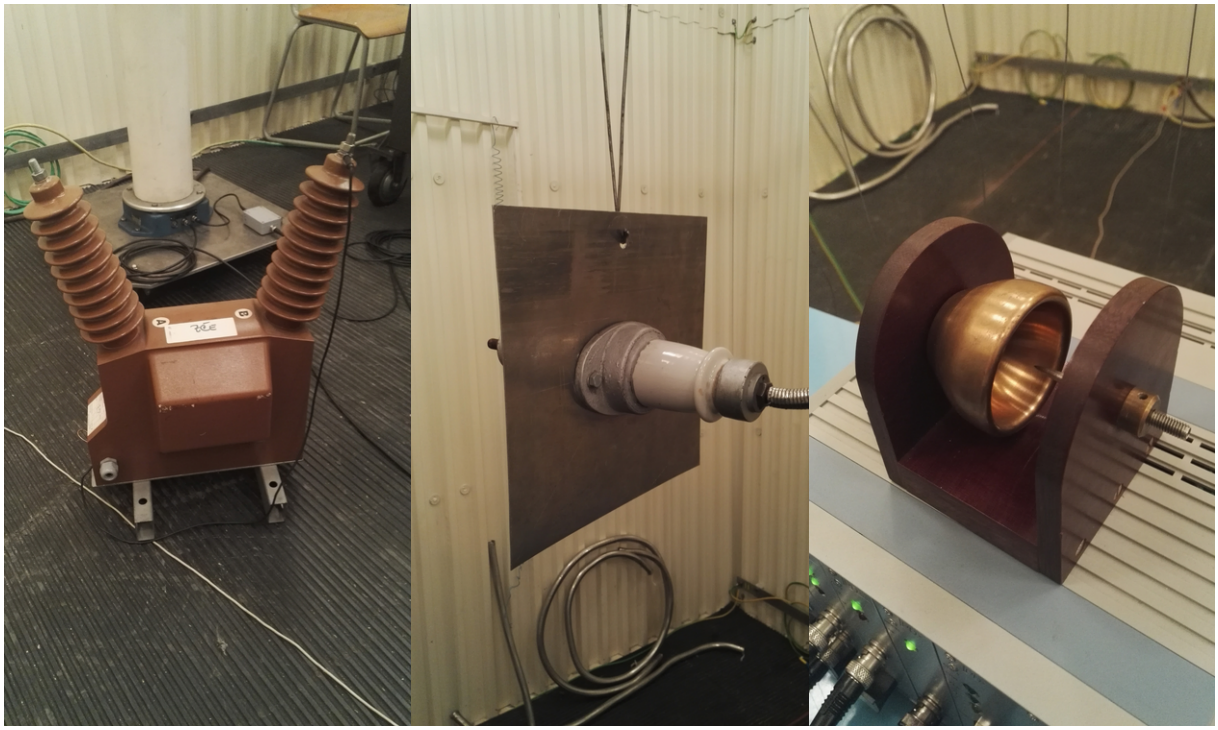
4 Měření částečných výbojů

Poslední částí mé diplomové práce je praktické měření částečných výbojů, kde je vyhodnocováno jejich zobrazení a vypovídací hodnota v ICMsystem a zpracování výstupních dat z této aplikace. Celé měření probíhalo v laboratoři pro měření částečných výbojů na KEE dle schématu na *Obr. 3.1*.

4.1 Zpracování měření částečných výbojů programem ICMsystem

V první fázi jsem se zaměřil na možnosti nastavení programu ICMsystem při měření částečných výbojů, kde na většinu měření byla využita nejnovější verze softwaru 4.73s. U některých měření byl využit i software 4.60, ale pouze z důvodu porovnání výsledků měření mezi těmito verzemi. Měřeno bylo na třech modelových případech, které jsou uvedeny na *Obr. 4.1*:

- ***Transformátor pro napájení dálkového ovládání úsekových odpojovačů***
- ***Průchodka – modelové uspořádání pro klouzavé výboje***
- ***Kalibrační jiskřiště***



Obr. 4.1 Zleva – Transformátor, Průchodka, Kalibrační jiskřiště

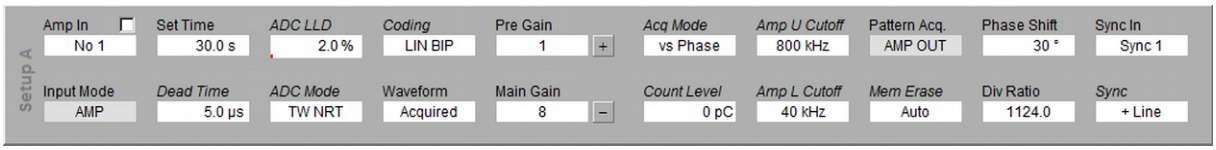
Software byl nainstalován a měření bylo prováděno na řídicím počítači HP (ProBook 4710s), který je v laboratoři částečných výbojů používán.

Při změně zapojení zkušebního obvodu, bylo nutno vždy před zahájením každého měření systém kalibrovat dle popisu v předchozí kapitole (viz kapitola 3.2.4).

4.1.1 Možnosti nastavení ICMsystem při měření částečných výbojů

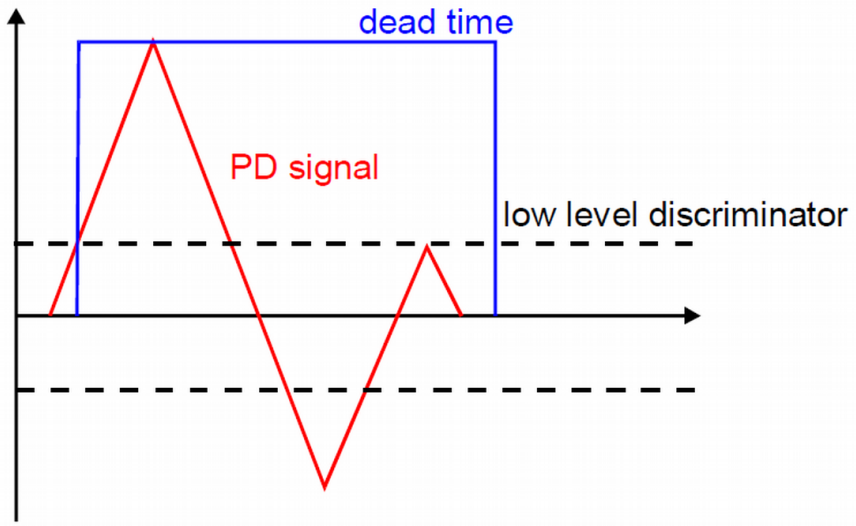
Jak již bylo v předchozím textu uvedeno, pro standardní měření částečných výbojů aplikací ICMsystem je nutné zvolit zobrazení *Map* a vybrat Setup A, viz *Obr. 3.4*. Měření výbojů bylo realizováno vždy pomocí modulu ADC3. Vzhledem k tomu, že pozadí laboratoře nepřekračuje za normálních podmínek hodnotu 1 pC a modul pro měření rušení není vybaven originálním snímacím členem, nebyl pro účely diplomové práce modul GATE4 využíván.

Pro následující popis možností nastavení měření částečných výbojů softwarem ICMsystem využijeme *Obr. 4.2*.



Obr. 4.2 Setup A a jeho parametry

- *Amp In* – Slouží k výběru kanálu v případě multikanálového měřicího systému. Pokud je přístroj jednokanálový, software možnost volby nenabízí.
- *Set Time* – Slouží k nastavení zvolené celkové doby měření. Nejkratší možný časový úsek je 10 ms, spodní limit je závislý na hardwarovém vybavení systému.
- *ADC LLD* – Zde lze nastavit hladinu LLD (low level discriminator). Ta slouží k potlačení nízkonapěťových výbojů, cokoliv pod touto hladinou není zaznamenáno. Prioritně slouží ve spolupráci s *Dead Time* (dle nastavení) k potlačení několikanásobného zaznamenávání oscilujících výbojů, jak je názorně zobrazeno na *Obr. 4.3*. Vhodné nastavení LLD může také zamezit záznamu nežádoucího šumu. Pokud je úroveň LLD zvolena příliš nízká, může dojít v důsledku zahlcení měřicí jednotky k významné ztrátě důležitých dat.



Obr. 4.3 Názorné zobrazení jak pracuje LLD a Dead Time [25]

- *Coding* – Lze vybrat mezi osou unipolární (kladná i záporná) a bipolární. Výhodou unipolárního uspořádání je dvojnásobná kvantovací přesnost.
- *Pre Gain* a *Main Gain* – Ovladače umožňují zvolit kombinaci zesílení předzesilovače a hlavního zesilovače pro optimalizaci zobrazení signálu na obrazovce aplikace. Nastavení zesilovačů je ovládáno tlačítky + a -. Volbu zesílení je možné kontrolovat v pravém panelu aplikace, kde je součástí okénka se zobrazenou úrovní výbojů červená lišta, která svou pozicí v šířce okna koresponduje se zvoleným zesílením. Plná výchylka lišty na celou šířku okna odpovídá plnému rozsahu svislé osy zobrazení výbojů. Zvolená kombinace zesílení je do určité míry limitovaná parametry obou zesilovačů a může ovlivnit měření. Doporučení pro standardní i speciální aplikace jsou uvedena v manuálu.
- *Acq Mode* – Zde je možné nastavit horní a dolní mezní kmitočet pásmové propusti měřiče. Význam volby kmitočtu pro měření výbojů byl diskutován v předchozím textu.
- *Amp U Cutoff* a *Amp L Cutoff* – Zde je možné nastavit horní a dolní mezní kmitočet.
- *Pattern Acq.* - Pokud je systém vybaven modulem AMPS pro spektrální analýzu, je možné využít volbu zobrazení výbojů v režimu AMP s pevnými limitními frekvencemi propustného pásma nebo SPEC režim s volitelnou střední frekvencí do 10 MHz a šířkou pásma 9 kHz nebo 300 kHz.
- *Phase Shift* – Slouží k posunu fáze. Pokud je měření synchronizováno zdrojem zkušebního napětí, nastaví se fázový posun automaticky podle zkušebního napětí. Doporučuje se měnit pouze v případě, že synchronizační zdroj není stejný jako napětí

způsobující částečné výboje. Jedná se pouze o posun grafického zobrazení částečných výbojů. Změnou tohoto údaje se nijak nezmění výsledné hodnoty ani se neovlivní měření.

- *Sync In* – Slouží k výběru kanálu pro synchronizaci u multikanálových měřicích systémů.
- *Input Mode* – Toto nastavení určuje, jestli vstup na GATE4 slouží k odstranění šumu (popisováno v kapitolách výše) nebo jako další měřicí kanál. Zobrazení změřených výbojů jako Pdpatterna je ale možné při použití modulu GATE pouze u přístrojů z roku 2015 a mladších. Přístroj v laboratoři pro měření částečných výbojů, se kterým jsem pracoval, umožňuje využití GATE modulu jako měřicího kanálu pouze v online režimu.
- *Dead Time* – Volitelný časový úsek, po který nebude přístroj měřit. Cílem je zamezit vícenásobnému zaznamenání oscilujícího signálu, pokud již došlo v důsledku překročení LLD ke změření vrcholové hodnoty impulzu výboje (*Obr. 4.3*). Nejkratší hodnota dead time je 5 μs. Špatné nastavení času DT může způsobit zaznamenání jednoho výboje vícekrát (příliš krátký čas DT) nebo nezaznamenání následujícího výboje (příliš dlouhý čas DT). Správná volba LLD a DT je navzájem závislá jak na charakteru výbojové činnosti, tak na hardwarových možnostech systému.
- *ADC Mode* – Na této položce lze vybrat režim spouštění A/D převodníku. Je závislý na hodnotě Dead Time. Lze vybírat mezi třemi režimy:
  - ***FP NRT - Firts Peak Non-Retriggerable*** – Je standardní mód, který vykazuje nejlepší výsledky pro většinu aplikací. První pulz překračující LLD určí polaritu, která bude měřena. Následně je zaznamenána vrcholová hodnota tohoto pulzu a zařízení po nastavenou dobu DT nezaznamená žádný další impulz. Po uplynutí této doby se cyklus opakuje.
  - ***FP RT - Firts Peak Retriggerable*** – Funguje podobně jako FP NRT. Rozdíl nastává, pokud v průběhu DT dojde k dalšímu překročení hranice LLD. V důsledku této události dojde k opětovnému prodloužení pozastavení měření o nastavený čas DT (viz *Příloha Z*). Dochází tím k prodlužování DT (global dead time) až do doby dokončení oscilací výboje, které překračují mez LLD. Použití tohoto režimu může ale u impulzů s vysokou četností opakování nebo se silnými

oscilacemi vést, zejména při nízké hladině LLD, až k úplnému ochromení přístroje. To je nutné vždy zvážit při jeho použití.

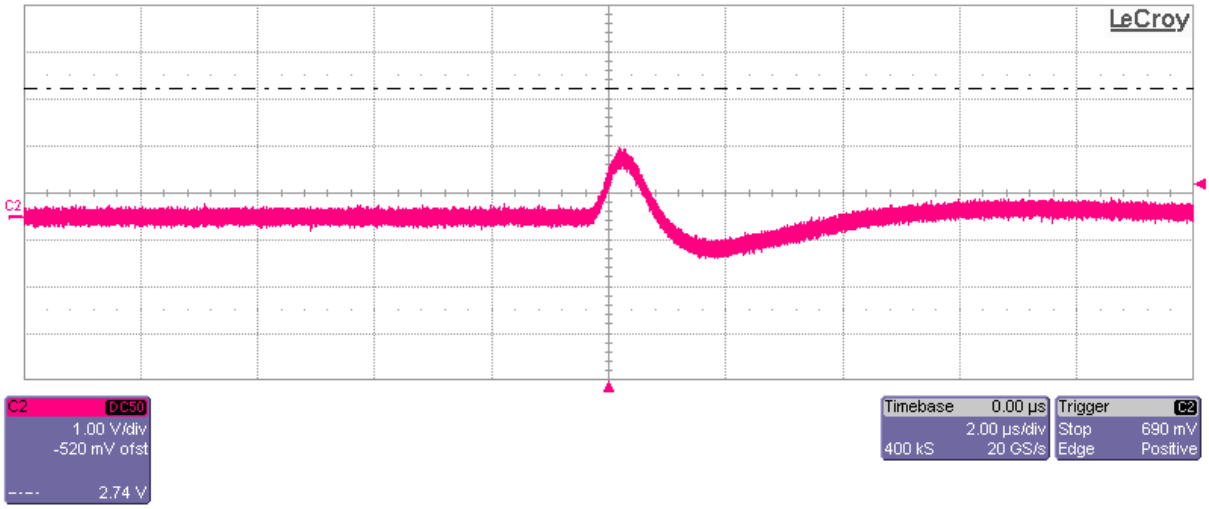
- ***TW NRT – Time Window Non-Retriggerable*** – Režim je určený pro zpracování signálů, kde v důsledku vlastností měřicí cesty má signál nízký první vrchol následovaný velkým vrcholem. Režim pracuje ve zvoleném časovém okně se dvěma detektory vrcholové hodnoty. Po dobu časového okna zaznamenává a porovnává vrcholové hodnoty a polaritu impulzů a zobrazuje pouze největší impulz. Volba LLD není proto u tohoto režimu tak kritická, jako u předchozích dvou (Viz *Příloha AA*).

- *Waveform* – Zde je možno nastavit v režimu měření výbojů v závislosti na fázi formu křivky napětí superponovanou do záznamu částečných výbojů (PDpattern). Jedná se o pomocnou křivku viz například *Obr. 3.8*, která představuje průběh zkušebního napětí. Systém nabízí několik variant zobrazení včetně změřené křivky zkušebního napětí, která zohledňuje i případnou deformaci sinusového signálu.
- *Count Level* – Vysvětleno v kapitole 3.2.2 – 28 – *Enable Level Count*.
- *Mem Erase* – Slouží k vymazání nebo ponechání změřeného záznamu při startu dalšího měření. V případě nastavení *Auto* se po zahájení měření předchozí zaznamenané měření smaže. Naopak při nastavení *Off* záznam zůstává a měření se připisuje k již naměřeným datům, což může být výhodné, v případě dlouho trvajících měřeních.
- *Div Ratio* - Je dělící poměr kapacitního děliče. Po dvojitém poklepání je možné vložit hodnotu napětí z měření na zkušebním zdroji a aplikace tento poměr vypočte sama.
- *Sync* – Určuje typ synchronizačního zdroje. *DC-Mode* je určený pro měření výbojů při stejnosměrném namáhání. Po zvolení *Line*, ať kladné nebo záporné, akceptuje systém frekvenci síťového napětí přístroje. V případě zvolení *Extern* lze zvolit frekvenci napětí ručně (Viz kapitola 3.2.3 – *Frequency*) [25].

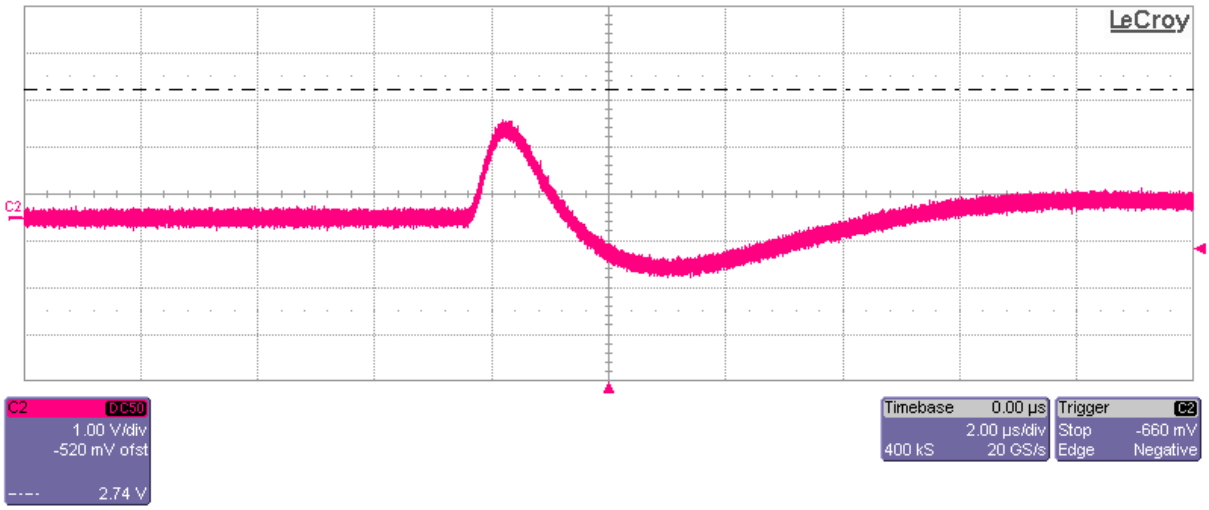
4.1.2 Měření s osciloskopem

Před vlastním měřením s ICMsystem jsem na třech výše uvedených zkušebních objektech testoval, zda v nich probíhá výbojová činnost a na jakých napěťových hladinách k ní dochází. Součástí úvodních testů byla také kontrola kalibrátoru používaného pro všechna další měření. Tyto testy jsem prováděl na osciloskopu LeCroy 7300A. Na *Obr. 4.4-6* je zaznamenaný jeden

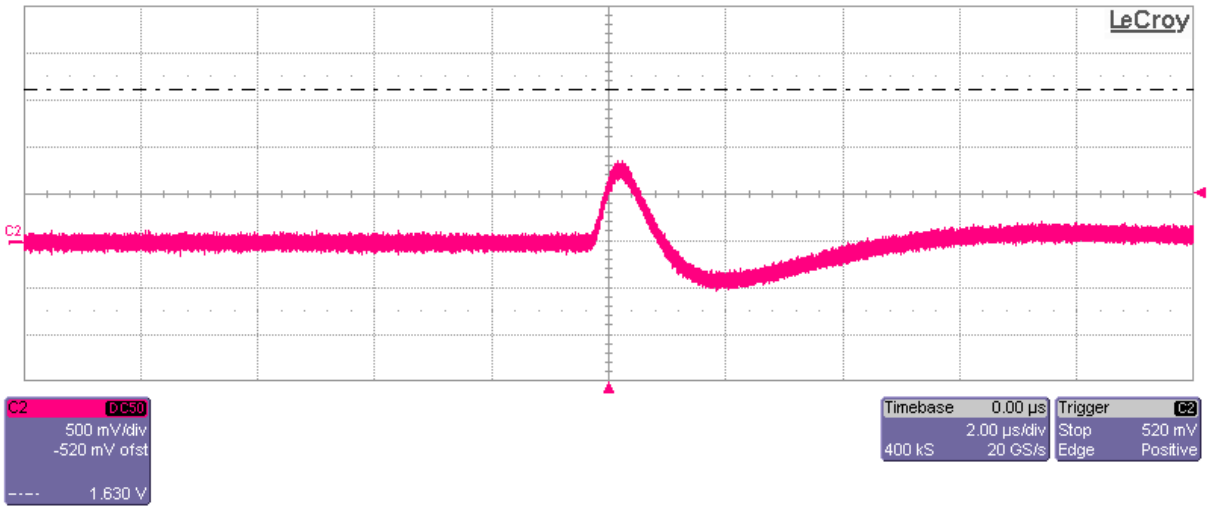
impulz částečného výboje transformátoru, průchodky a kalibračního jiskřiště. Jedná se o záznam signálu po zpracování vazebním členem měřicího obvodu. Výsledkem jsou impulzy prakticky stejného tvaru, lišící se amplitudou signálu. U transformátoru se jedná o vnitřní výboje v lité epoxidové izolaci, u průchodky je výbojová činnost způsobena klouzavými výboji na povrchu porcelánového tělesa a u kalibračního jiskřiště se jedná o korónu na hrotové elektrodě. Na *Obr. 4.7* je zachycen kalibrační impulz.



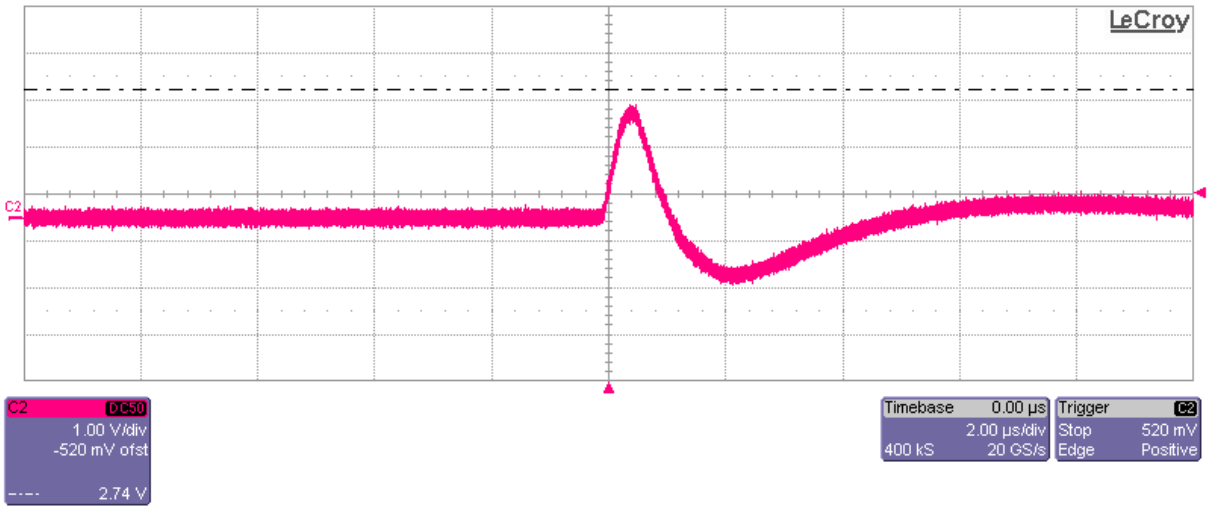
Obr. 4.4 Částečný výboj zachycený osciloskopem v transformátoru



Obr. 4.5 Částečný výboj zachycený osciloskopem na průchodce



Obr. 4.6 Částečný výboj zachycený osciloskopem u kalibračního jiskřiště

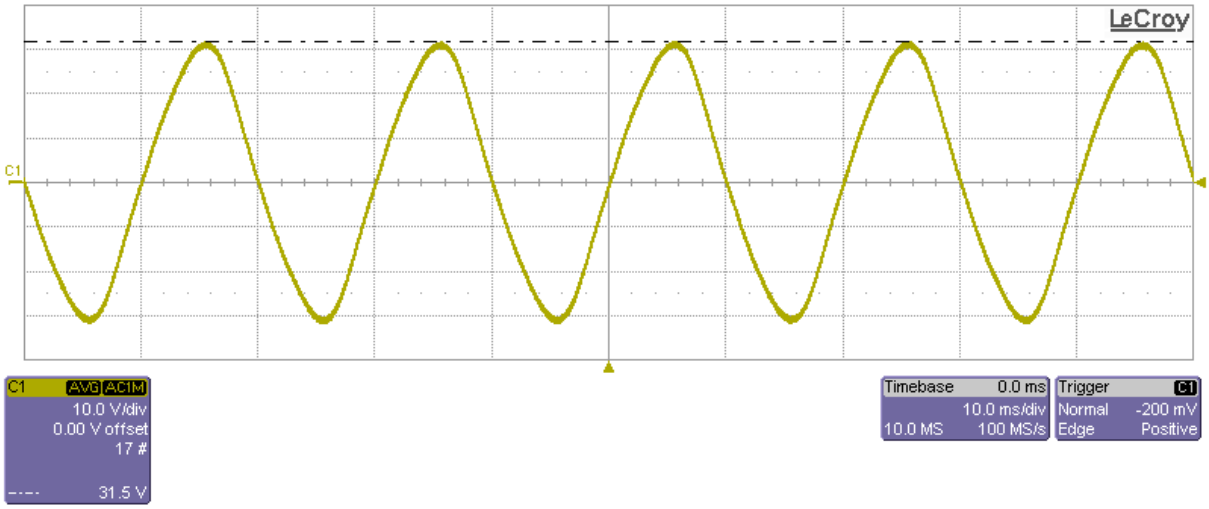


Obr. 4.7 Kalibrační impulz

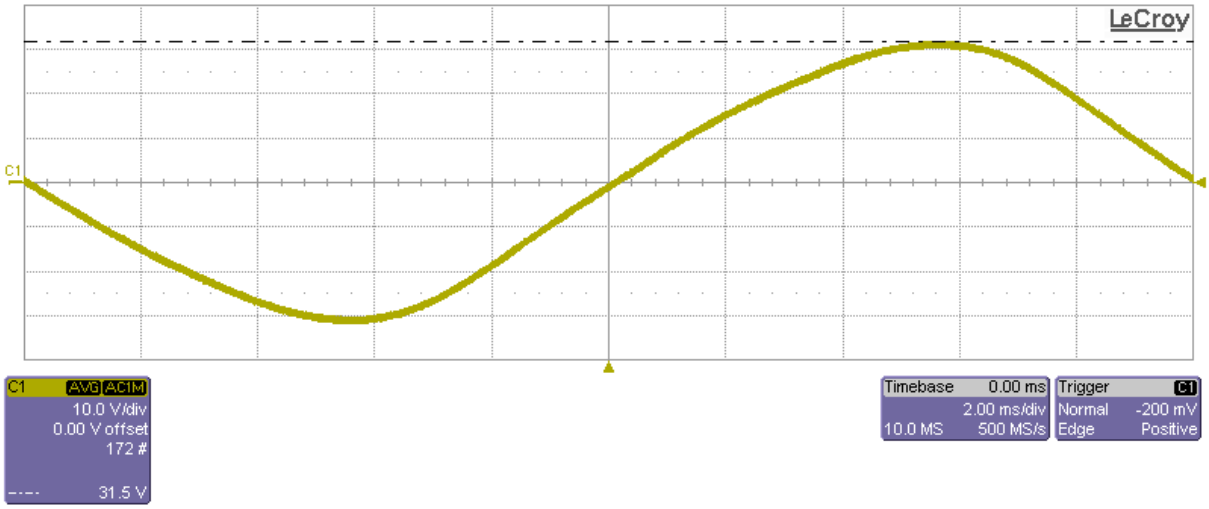
Pro porovnání je v *Příloze AB* zobrazen částečný výboj v transformátoru změřený osciloskopickým režimem v aplikaci ICMsystem.

Vzhledem k tomu, že po upgradu měřiče docházelo opakovaně k nesrovnalostem při měření zkušebního napětí softwarem ICM systém, testoval jsem na žádost laboratoře také tuto funkci. Z výsledků uvedených níže vyplývá, že problémy byly pravděpodobně vyvolány vydáním několika nových verzí softwaru dodavatele systému. Poslední verze softwaru, se kterou jsem pracoval, problémy s funkcí měření napětí odstranila. Napětí zkušebního zdroje bylo opět měřeno digitálním osciloskopem. Do měřicího obvodu byl jako zkušební objekt vložen transformátor. Na *Obr. 4.8* je zobrazen časový průběh napětí s efektivní hodnotou podle ukazatele měřicího systému vysokonapěťového zdroje 22,3 kV a na *Obr. 4.9*

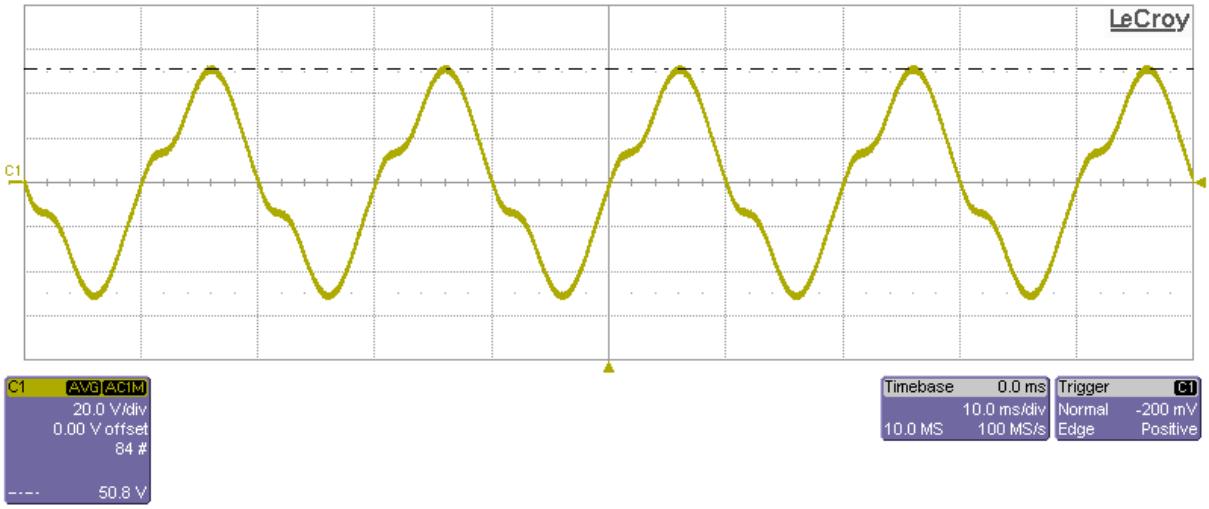
je zobrazena jedna perioda tohoto sinusového průběhu. Stejné je zobrazení na *Obr. 4.10* a *Obr. 4.11*, kde byla hodnota napětí 35,9 kV.



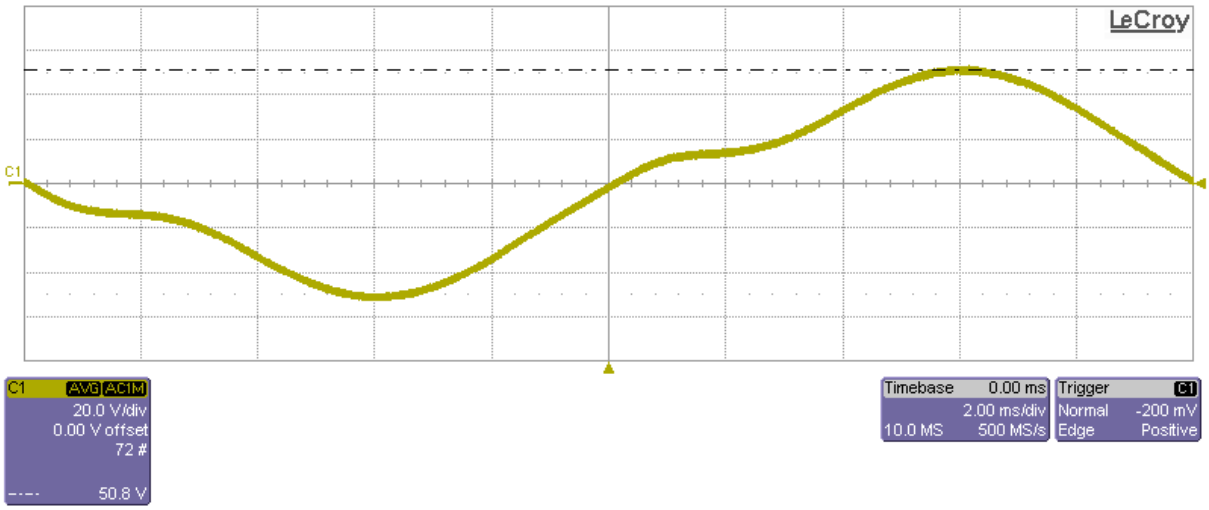
Obr. 4.8 Napětí zdroje zachycené osciloskopem – 22,3 kV



Obr. 4.9 Napětí zdroje zachycené osciloskopem – 22,3 kV; jedna perioda



Obr. 4.10 Napětí zdroje zachycené osciloskopem – 35,9 kV



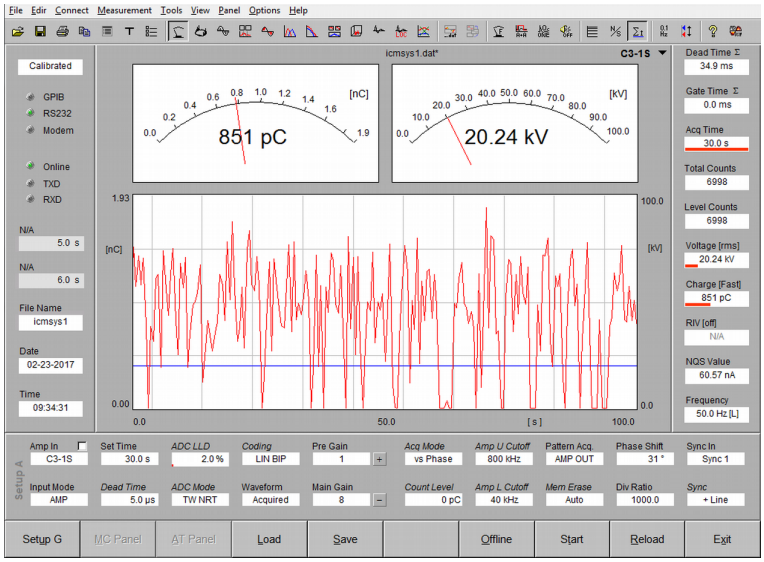
Obr. 4.11 Napětí zdroje zachycené osciloskopem – 35,9 kV; jedna perioda

Deformace napětí je způsobena připojením transformátoru pro napájení dálkového ovládání úsekových odpojovačů 22 kV/100 V jako zkušebního objektu. Výpočtem efektivní hodnoty z maximálních hodnot na *Obr. 4.9* a *Obr. 4.10* lze dojít k výsledkům (4.1), které odpovídají hodnotám na ukazateli napěťového zdroje, pokud respektujeme dělicí poměr kapacitního děliče měřicího obvodu částečných výbojů 1:1000.

$$\frac{31{,}5}{\sqrt{2}} = 22{,}2739\,V \simeq 22{,}3\,V\,; \quad \frac{50{,}8}{\sqrt{2}} = 35{,}921\,V \simeq 35{,}9\,V\,. \tag{4.1}$$

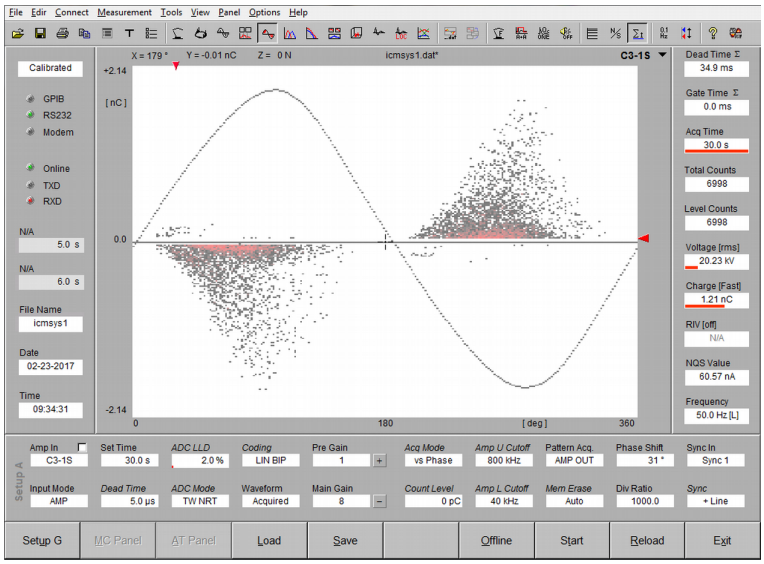
4.1.3 Odlišnosti v zobrazování výsledků měření při módech IEC, Normal a Fast

Další měření bylo již prováděno výhradně na měřicím systému ICMsystem. Prvním krokem bylo ověření vlivu volby měřicího módu (*IEC, Fast, Normal*) na výsledky měření. Princip funkce těchto módů je popsán v kapitole 3.2.2 - 22 – *Charge Meter Mode*. Porovnání bylo zaměřeno především na výsledky ve standardním zobrazovacím režimu PD pattern a na záznam v on-line měřicím režimu.



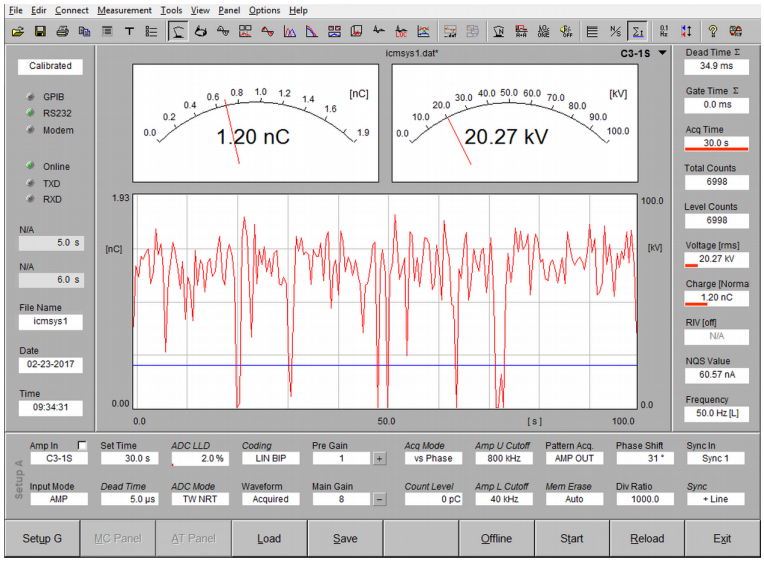
Obr. 4.12 Zobrazení výbojové činnosti na záložce Meter – Režim Fast – Transformátor

Nastavení parametrů vlastního měření je patrné z *Obr. 4.12*, viz Setup A v dolní části obrázku. Měření probíhalo po dobu 30 s, DT = 5 µs, LLD = 2 %, režim spouštění A/D převodníku byl TW NRT.

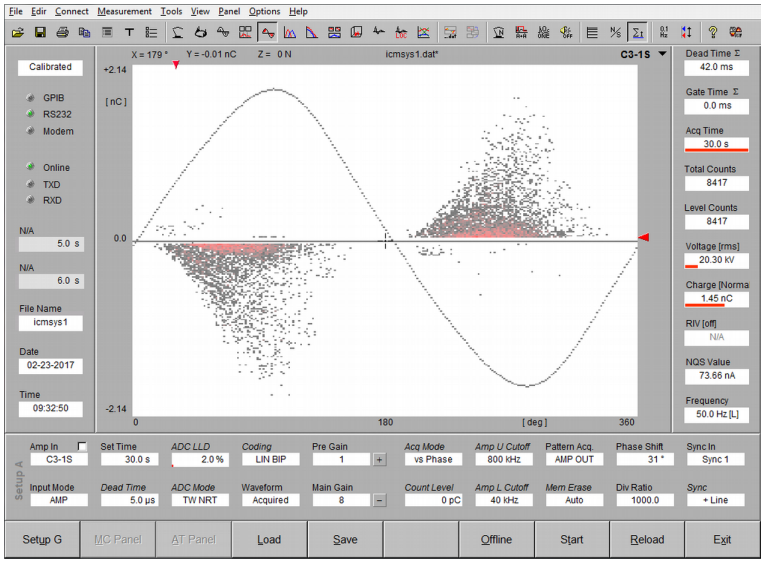


Obr. 4.13 Zobrazení výbojové činnosti na záložce Map – Režim Fast – Transformátor

Na *Obr. 4.12* je zobrazena výbojová činnost transformátoru v on-line režimu, kde byl nastaven mód *Fast*. Na záznamu jsou patrné velké skokové změny, které jsou způsobeny metodikou zobrazení v módu *Fast*. *Obr. 4.13* zobrazuje pattern v tomto módu.

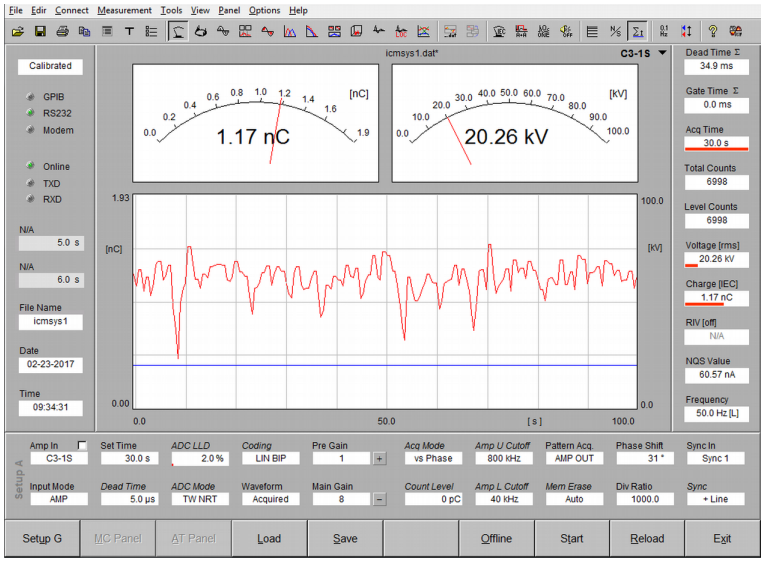


Obr. 4.14 Zobrazení výbojové činnosti na záložce Meter – Režim Normal – Transformátor

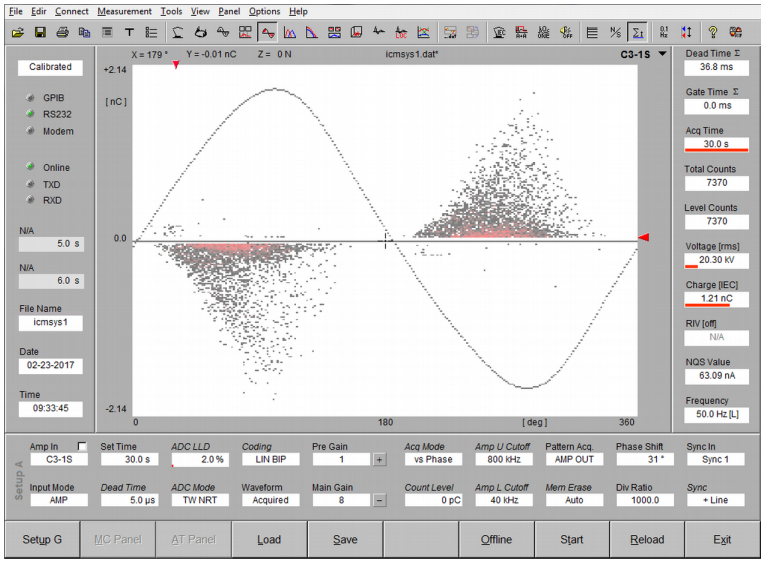


Obr. 4.15 Zobrazení výbojové činnosti na záložce Map – Režim Normal – Transformátor

Na *Obr. 4.14* je záznam výbojové činnosti při módu. Nastavení měřicího režimu bylo zachováno stejné, jako v předchozím případě. V porovnání s módem *Fast* (*Obr. 4.12*) není na záznamu tak vysoký počet skokových změn amplitudy signálu výbojů. Na *Obr. 4.15* je zobrazen pattern v módu *Normal*. Při porovnání s patternem na *Obr. 4.13* je zde pouze minimální rozdíl v rozložení výbojů v grafu. Nicméně je značný rozdíl v celkovém počtu výbojů, kde u módu *Normal* jich bylo o téměř patnáct set více. Tento rozdíl by neměl být způsoben změnou výbojové činnosti v transformátoru, což bylo empiricky odzkoušeno.



Obr. 4.16 Zobrazení výbojové činnosti na záložce Meter – Režim IEC – Transformátor

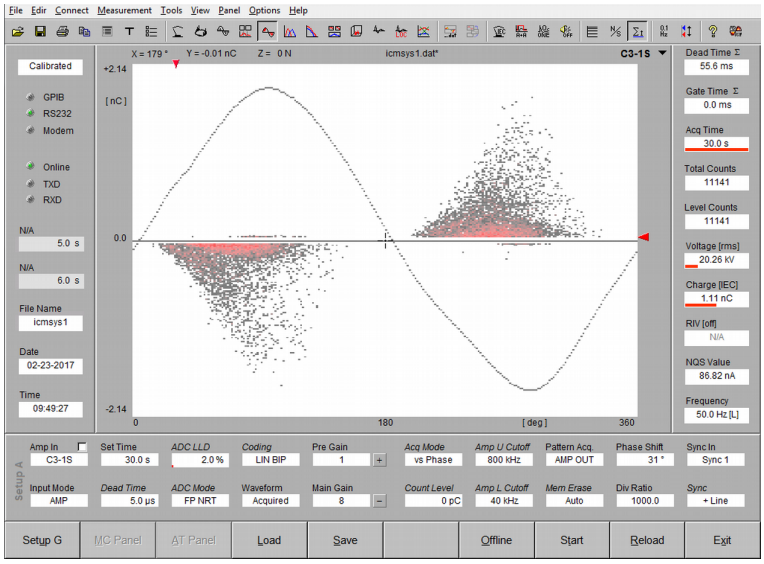


Obr. 4.17 Zobrazení výbojové činnosti na záložce Map – Režim IEC – Transformátor

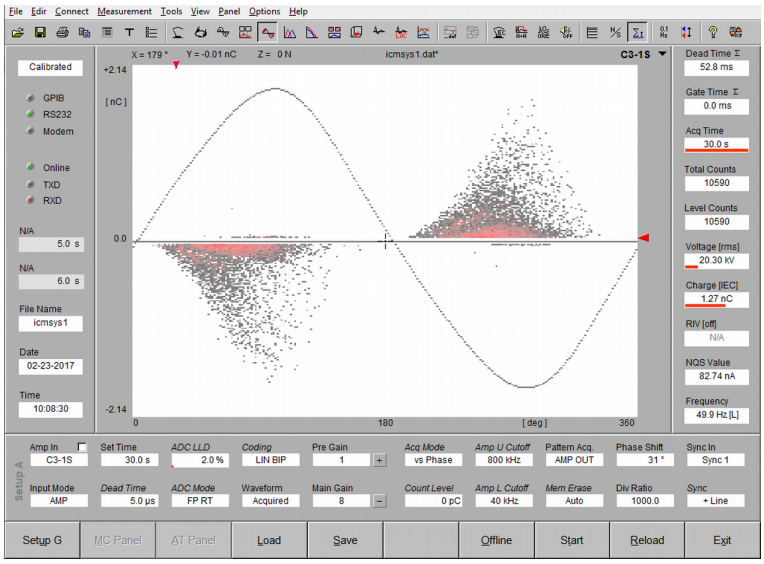
V posledním on-line měření na *Obr. 4.16* je vybrán mód *IEC*. *IEC* mód zobrazuje obalovou křivku výbojů v on-line režimu prakticky bez velkých skokových změn amplitudy v porovnání s ostatními módy, což je způsobeno metodikou zobrazování popsanou v kapitole 3.2.2 – 22 – *Charge Meter*. Pattern na *Obr. 4.17* opět nevykazuje žádné výrazné změny v rozložení výbojové činnosti v grafu. Celkový počet výbojů leží mezi hodnotami u *Normal* a *Fast*, přesně 7370, což je blíže k módu *Fast*. To odpovídá předpokladům, protože mód *IEC* pouze zmenšuje amplitudu (nikoliv četnost) a může tím v konečném důsledku způsobit, že část výbojů se dostane pod nastavenou hranici *LLD* 2 % a tím nedojde k jejich zobrazení.

4.1.4 Odlišnosti při měření s různým nastavením Dead Time

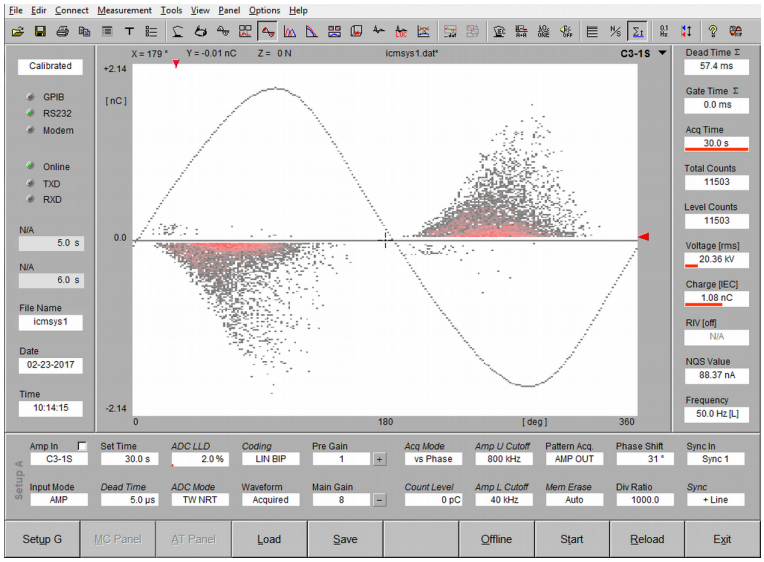
V této části práce se zabývám vlivem nastavení Dead Time. Měření byla prováděna na výše uvedených zkušebních objektech, ale v tomto případě i s využitím různých verzí softwaru, vždy se všemi třemi módy režimu DT (TW NRT – Time Window Non-Retriggerable, FP NRT – First Peak Non-Retriggerable a FP RT - First Peak Retriggerable) o různých délkách trvání DT.



Obr. 4.18 Zobrazení výbojové činnosti – DT – FP NRT – 5 µs – 4.73s - Transformátor

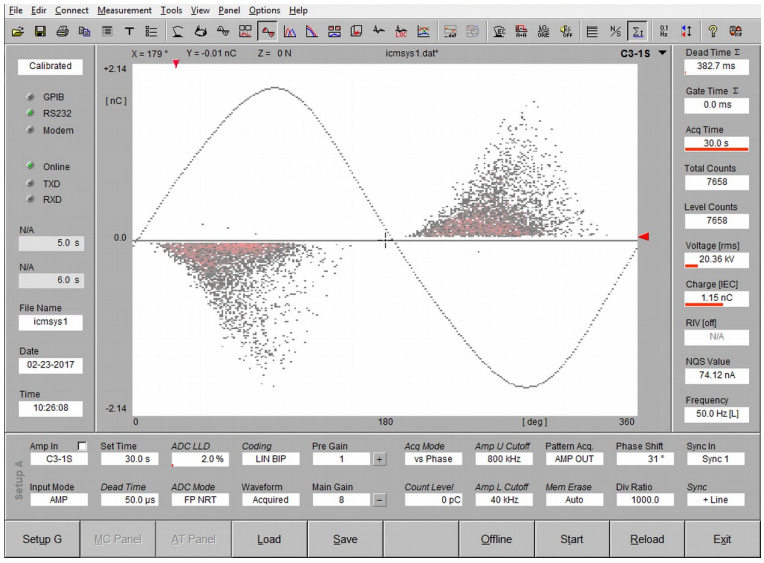


Obr. 4.19 Zobrazení výbojové činnosti – DT – FP RT – 5 µs – 4.73s - Transformátor

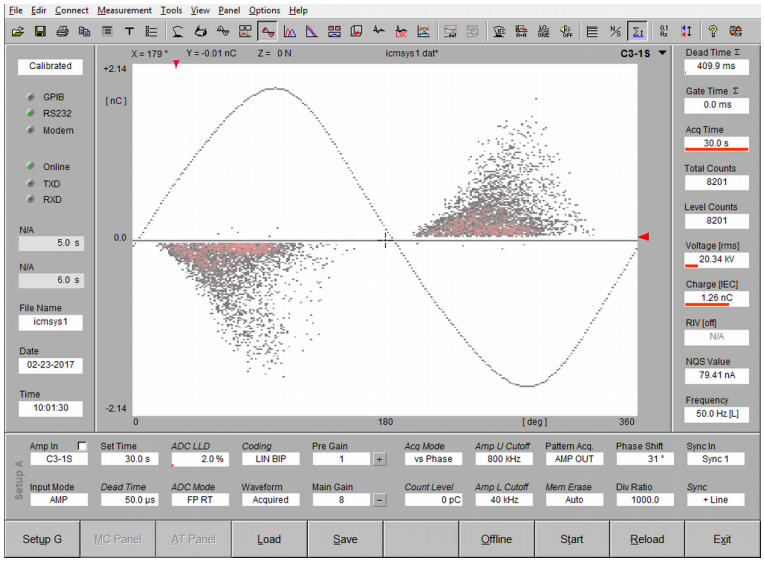


Obr. 4.20 Zobrazení výbojové činnosti – DT – TW NRT – 5μs – 4.73s – Transformátor

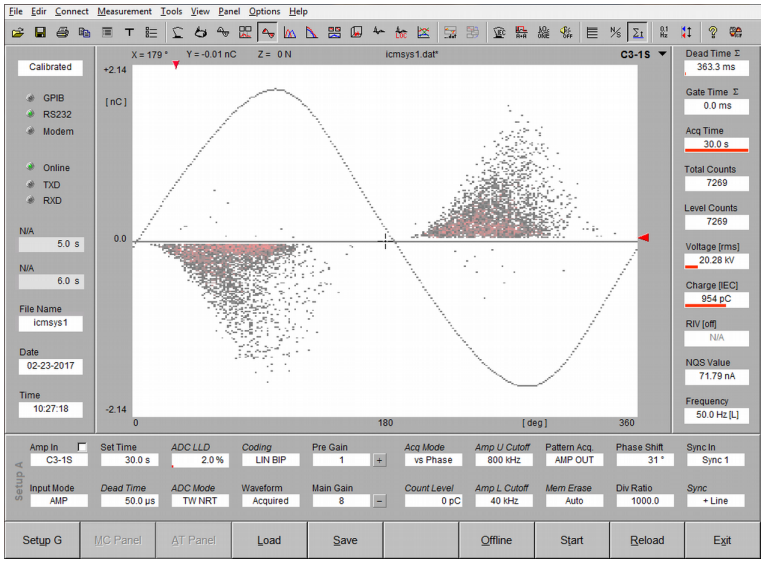
Na *Obr. 4.18-20* jsou vidět patterny při záznamu měření výbojů u transformátoru, kde byl nastaven DT na 5 μs. Čas záznamu byl 30 s a záznam probíhal na softwaru verze 4.73s, aktuálně nejnovější dostupné verzi. Dle předpokladů uvedených v kapitole 4.1.1 by měl být na patternu s módem FP RT největší čas celkového DT, ale byl naopak nejmenší. To lze vysvětlit velmi krátkým časem DT a charakterem signálu bez výrazných oscilací. Zajímavé ale je, že celkový počet výbojů u TW NRT byl největší. Je to pravděpodobně způsobeno velmi krátkým časovým oknem. Dále dle předpokladů se vlivem TW NRT zredukoval šum v místech opačné polarity, než se nachází většina zaznamenaných výbojů. Záznam u takto krátkého času DT je u všech třech módů velmi podobný.



Obr. 4.21 Zobrazení výbojové činnosti – DT – FP NRT – 50 μs – 4.73s - Transformátor



Obr. 4.22 Zobrazení výbojové činnosti – DT – FP RT – 50 µs – 4.73s - Transformátor

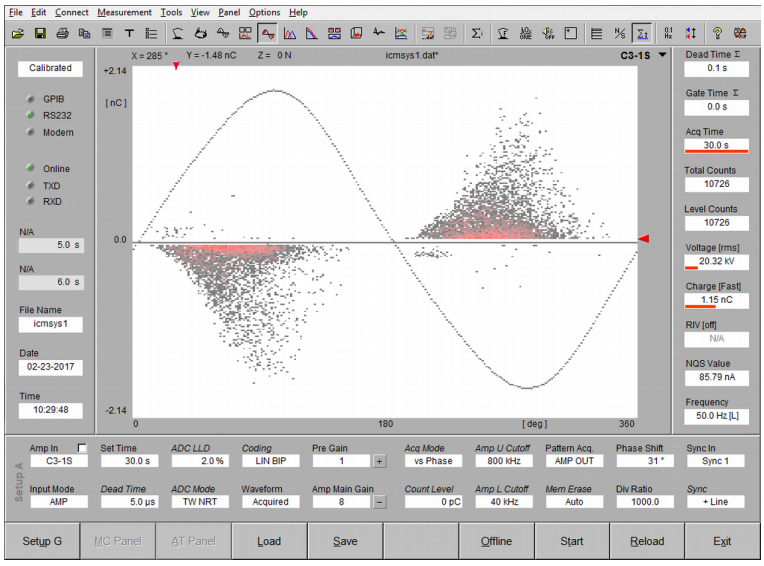


Obr. 4.23 Zobrazení výbojové činnosti na záložce Map – DT – TW NRT – 50 µs – 4.73s – Transformátor

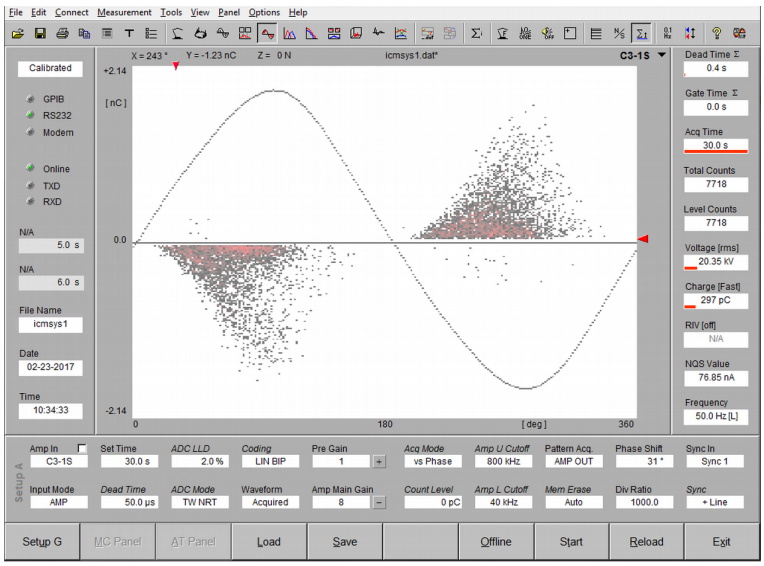
Na *Obr. 4.21-23* je zobrazeno měření se stejným nastavením jako v předchozím případě. Jediným rozdílem je hodnota DT, ten byl nastaven na 50 µs. Při porovnání těchto obrázků je patrné, že podle předpokladů u FP RT je nejdelší celkový DT. Rozdíly mezi rozložením náboje v patternu těchto módů jsou zanedbatelné. Větší rozdíly jsou u celkového počtu výbojů, kde mezi TW NRT a FP RT je rozdíl 932 výbojů (což je rozdíl o 11,37 %).

Porovnáním patternů s DT 5 µs a 50 µs lze dojít k závěru, že celkový DT dle předpokladů narůstá a důsledkem je snížení celkového počtu zaznamenaných výbojů. Dle mého názoru je pro tuto zkoušku vhodnější nastavení DT 5 µs nebo 10 µs. Vzhledem k *Obr. 4.5* by měl být

oscilační průběh výboje v 5 µs již pod hodnotou *LLD* a tím by nemělo docházet k zbytečnému pozastavení měření. Vliv režimů spouštění je obecně v tomto případě málo výrazný vzhledem ke zvolené nízké úrovni *LLD*.



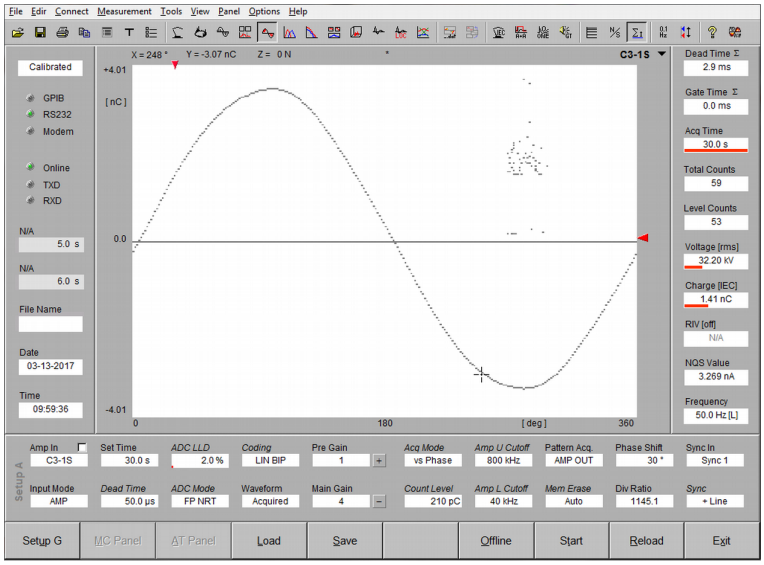
Obr. 4.24 Zobrazení výbojové činnosti – DT – TW NRT – 5 µs – 4.6 – Transformátor



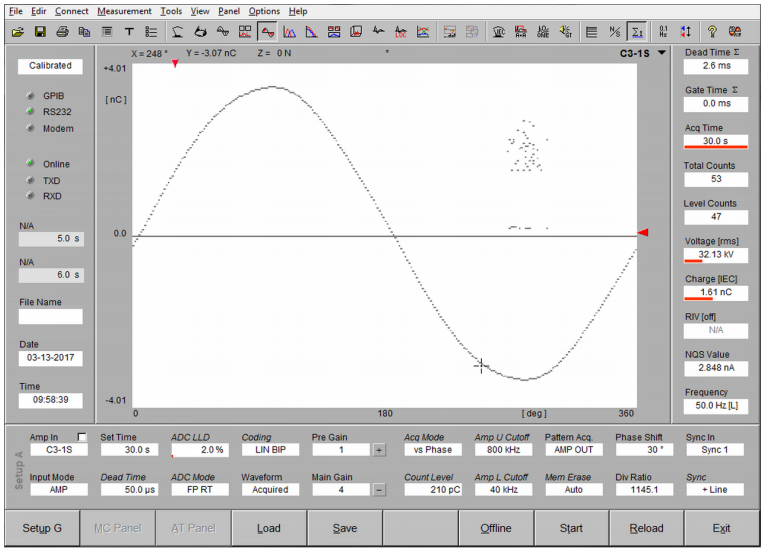
Obr. 4.25 Zobrazení výbojové činnosti – DT – TW NRT – 50 µs – 4.6 – Transformátor

Na *Obr. 24-25* jsou záznamy výbojů v režimu TW NRT pro DT 5 µs a 50 µs. Změna nastala ve verzi softwaru na 4.6. Cílem bylo zjistit, jestli jiná verze softwaru nebude vykazovat nějaké výrazné odchylky od patternů změřených ve verzi 4.73s. Při porovnání *Obr. 4.20* a *4.24* lze konstatovat, že nedochází prakticky k žádným výrazným odchylkám. Rozdíly v celkovém počtu výbojů a v hodnotě kumulativního DT je možné zdůvodnit

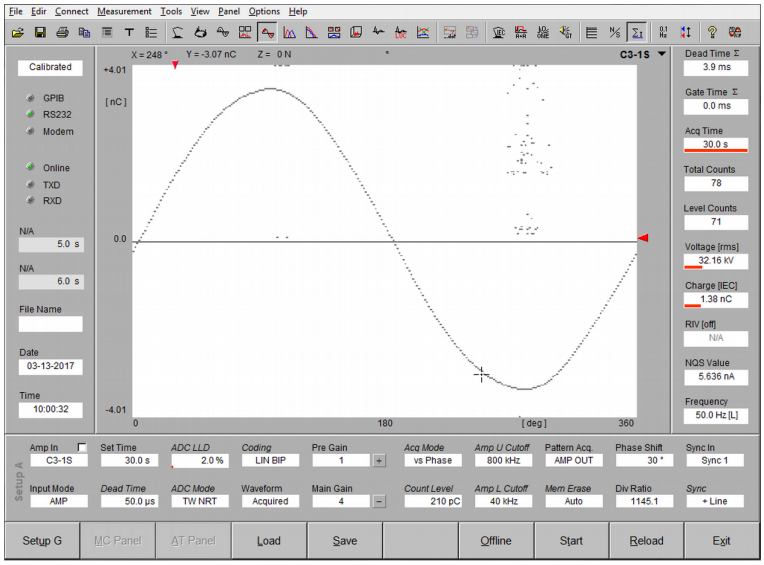
vlastními vnitřními procesy v poruchové lokalitě. Porovnáním *Obr. 4.23* a *4.25* lze dojít se stejnému závěru, k žádným odchylkám nedochází.



Obr. 4.26 Zobrazení výbojové činnosti – DT – FP NRT – 50 µs – 4.73s – Průchodka



Obr. 4.27 Zobrazení výbojové činnosti – DT – FP RT – 50 µs – 4.73s - Průchodka

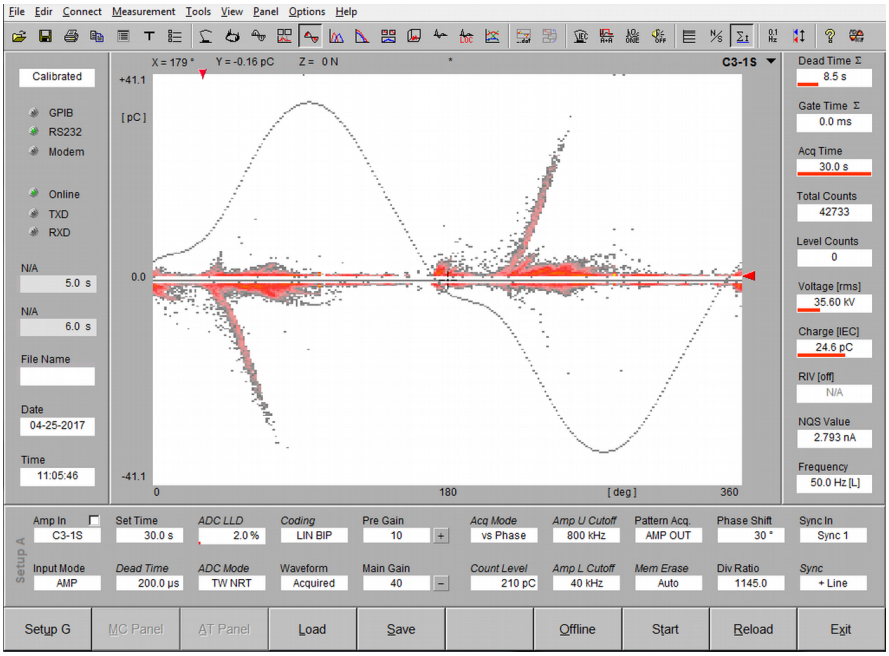


Obr. 4.28 Zobrazení výbojové činnosti – DT – TW NRT – 50 µs – 4.73s – Průchodka

Při posledním měření byl vyměněn transformátor a na místo zkušebního objektu byla umístěna průchodka. Na *Obr. 4.26-28* jsou zobrazeny patterny při sběru výbojů na průchodce, kde DT byl nastaven na 50 µs. Mezi záznamy nejsou patrné žádné větší rozdíly.

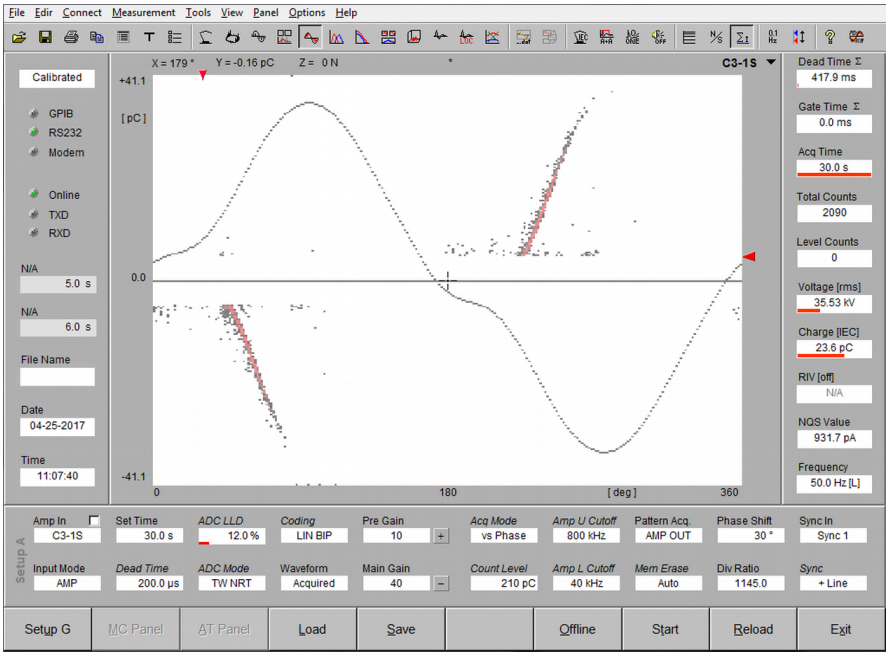
4.1.5 Změna hodnoty LLD

Nastavení hodnoty LLD je velmi důležité, zejména v návaznosti na zvolený dead time a režim spouštění, viz předchozí kapitola. Optimální kombinace uvedených parametrů vyžaduje značné zkušenosti s měřením výbojů na reálných zařízeních. Hlavní funkcí LLD je minimalizace záznamu rušivého signálu (šumu), druhou funkcí je v kombinaci s DT minimalizace několikanásobného záznamu oscilujícího výboje.



Obr. 4.29 Zobrazení výbojové činnosti – LLD – 2% - Transformátor

Na *Obr. 4.29* je zobrazen pattern výbojové činnosti transformátoru při hodnotě LLD 2 %. Záznam o trvání 30 s zaznamenal 42733 výbojů, kde u většiny je hodnota náboje nízká. Hodnota LLD 2 % by měla být v tomto případě dostačující, protože pozadí laboratoře se za normálních podmínek pohybuje do 0,7 až 0,8 pC.

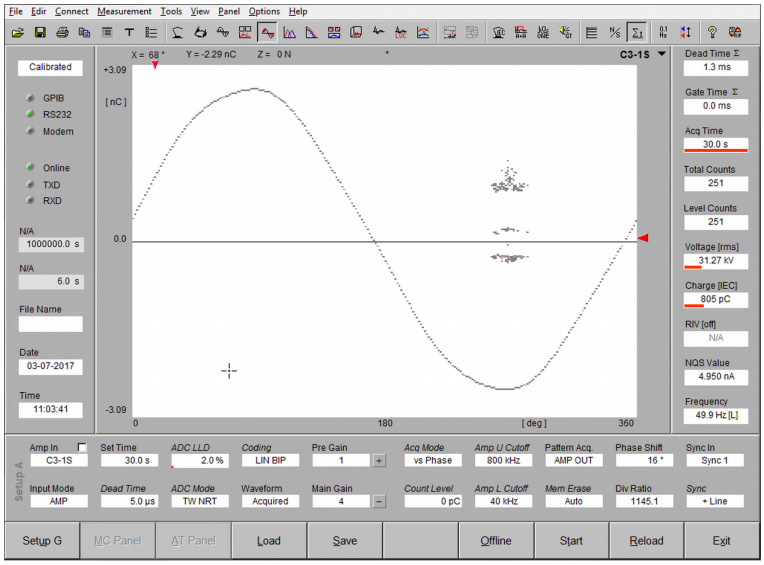


Obr. 4.30 Zobrazení výbojové činnosti – LLD – 12% - Transformátor

Při porovnání *Obr. 4.30* s *Obr. 4.29* je již na první pohled parné, že pattern obsahuje mnohem méně částečných výbojů (přesně o 40643 zaznamenaných výbojů, tudíž bylo potlačeno 95,1 % záznamu oproti prvnímu měření). Jediná změna nastala v nastavení *LLD*, kde při druhém měření byla hodnota nastavena na 12 %. Z *Obr. 4.30* je patrné, že je pro 12% *LLD* nižší četnost výbojů s vysokou úrovní. Tento jev je ale vzhledem k zachování trigovacího režimu pravděpodobně způsoben změnou charakteru výbojové činnosti v čase.

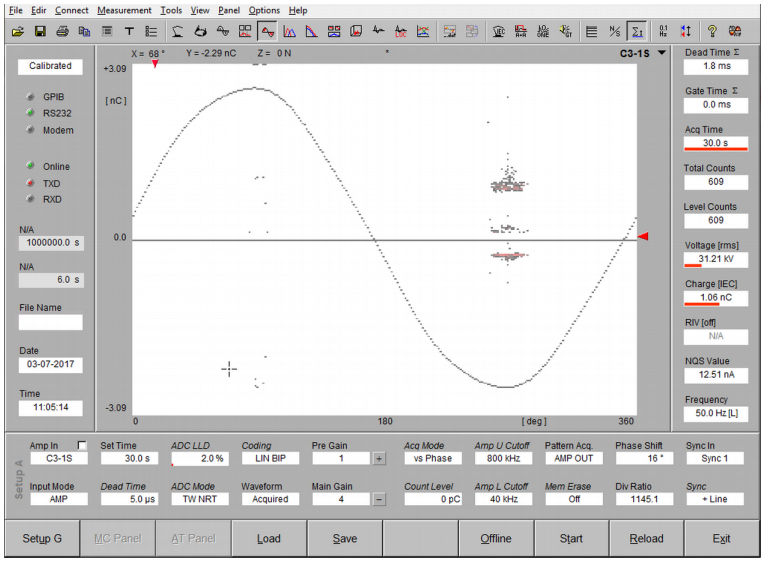
4.1.6 Změna Memory Erase

Funkce Memory Erase je velmi zajímavou vlastností softwaru. Vypnutí této funkce umožní navázat na již změřený soubor dat a zapnout další měření, které při stejném nastavení parametrů prodlouží celkovou dobu měření. To může být výhodné v případě měření s krátkým měřicím časem, u kterého například vzhledem k charakteru získaných dat obsluha dojde k závěru, že pro vyhodnocení zkoušky je nutné prodloužit čas měření. Lze tedy pouze nastavit čas, o který má být prodlouženo stávají měření a opětovně spustit záznam částečných výbojů, jehož výsledkem bude pattern obsahující záznam částečných výbojů po obě měření.



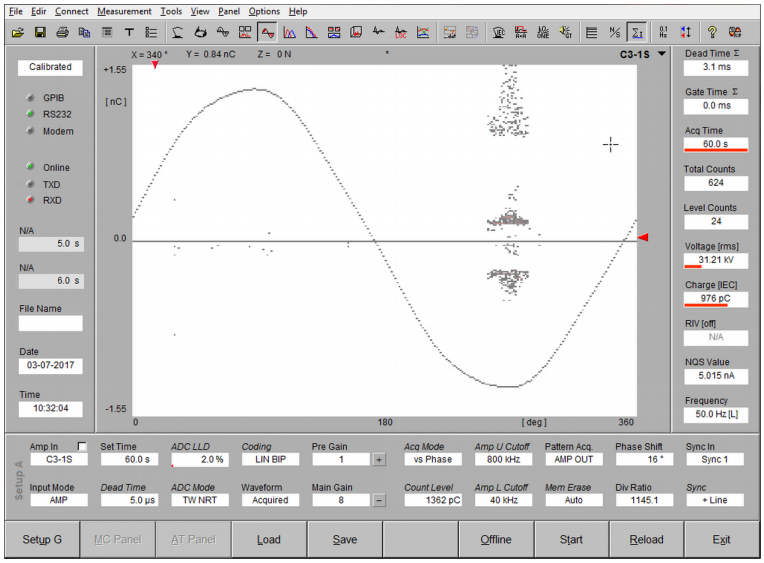
Obr. 4.30 Zobrazení výbojové činnosti – ME – Fáze – Konec prvního měření (30 s) - Průchodka

Na *Obr 4.30* je 30s záznam výbojové činnosti na průchodce. Poté byla přepnuta funkce ME na *Off*. Následným stisknutím tlačítka *Start* byl zahájen druhý 30s úsek měření. Po dokončení záznamu vznikl pattern, který je on *Obr. 4.31* a jehož celkový čas záznamu je 60 s. Celkový počet výbojů je více než dvojnásobný oproti prvnímu záznamu, což ukazuje na rozvoj výbojové činnosti (vlivem vnějších změn v důsledku ionizace) na průchodce.



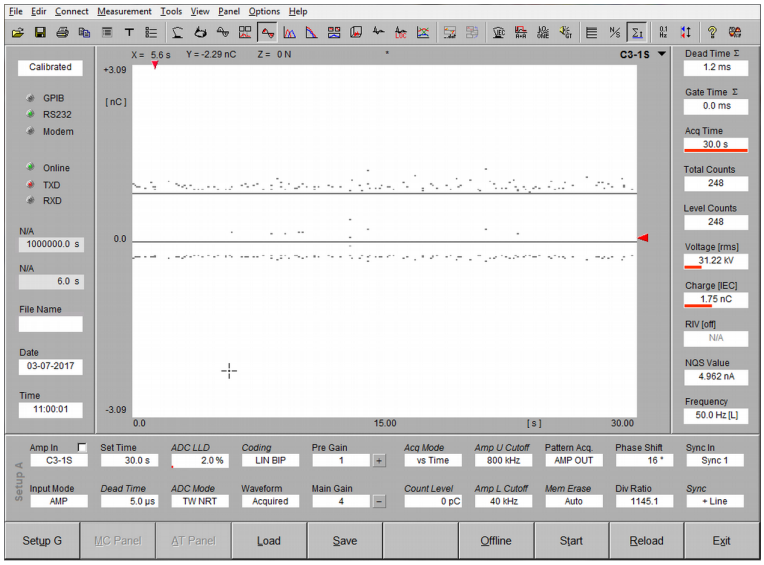
Obr. 4.31 Zobrazení výbojové činnosti – ME – Fáze – Konec druhého měření (30 + 30 s) - Průchodka

Na *Obr. 4.32* je vyobrazen pattern záznamu, který trval 60 s. Nastavení a podmínky byly stejné. Podle rozložení a celkového počtu výbojů lze usuzovat, že využití funkce ME nemá na výsledek měření podstatný vliv (svislá osa na *Obr. 4.32* má poloviční rozsah v porovnání s *Obr. 4.30* a *4.31*).



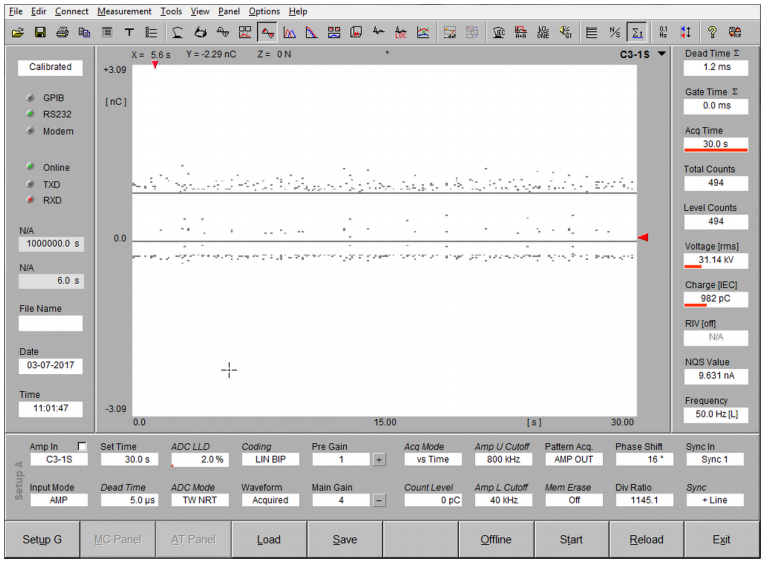
Obr. 4.32 Zobrazení výbojové činnosti – ME – Fáze – Konec měření bez ME (60 s) - Průchodka

Další měření v režimu ME bylo zaměřeno na záznam výbojové činnosti v případě, že se nejedná o závislost amplitudy výbojů na fázi, ale na čase. Na *Obr. 4.33* je vyobrazen pattern prvního 30s záznamu výbojové činnosti v čase. Měření opět probíhalo na průchodce.

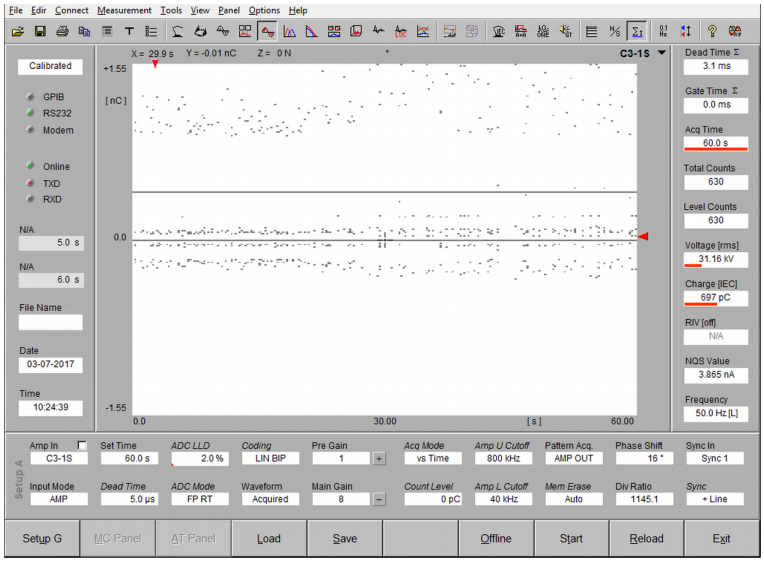


Obr. 4.33 Zobrazení výbojové činnosti – ME – Čas – Konec prvního měření (30 s) - Průchodka

Oproti měření v závislosti na fázi již druhý záznam nemá stejnou vypovídací hodnotu vzhledem k tomu, že data se připisují znovu od začátku na 30s osu *x* (Viz *Příloha AC*). Výsledný pattern na *Obr. 4.34* vlastně zobrazuje dvojnásobek výbojů za 30s. Toto řešení není pro analýzu některých měření vhodné.



Obr. 4.34 Zobrazení výbojové činnosti – ME – Čas – Konec druhého měření (30 + 30 s) - Průchodka

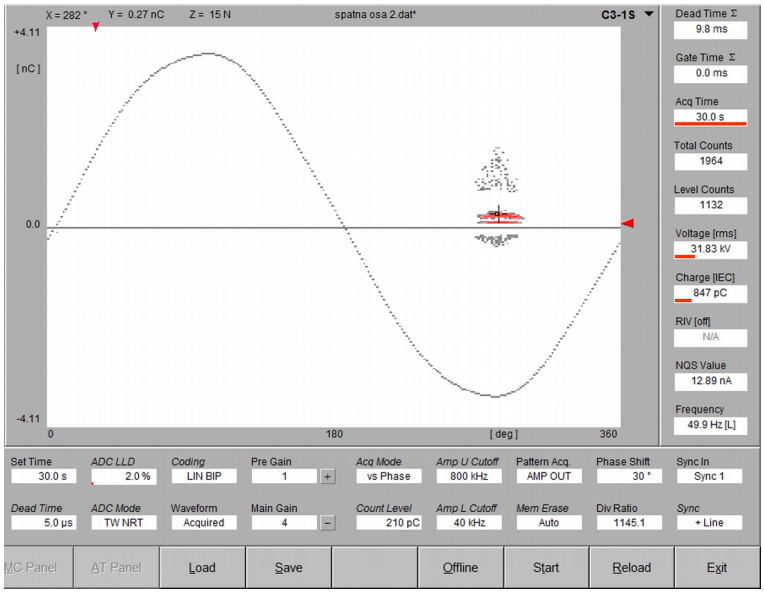


Obr. 4.35 Zobrazení výbojové činnosti – ME – Čas – Konec měření bez ME (60 s) - Průchodka

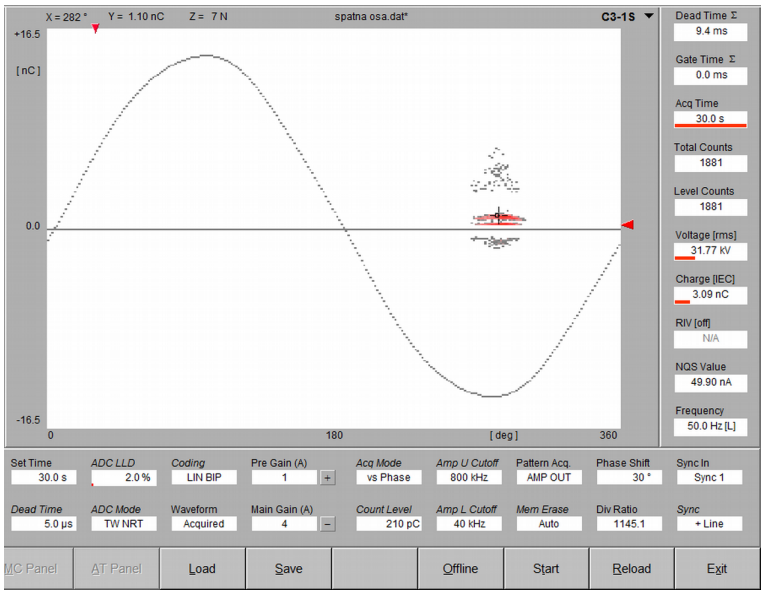
Zajímavým vylepšením pro další verzi ICMsystem by byla možnost změření dalšího vzorku, do již změřeného patternu, ale s volbou jiného barevného zastoupení četnosti výboje. Tím by bylo možné přehledně porovnávat změnu výbojové činnosti. Ať už u stejného zařízení v jiných časech (částečné výboje se mohou při vystavení stejnému napětí v čase, vlivem vnitřních dějů, měnit). Nebo ještě dále dokázat porovnat dva vzorky různých měření.

4.1.7 Problémy při měření částečných výbojů systémem ICMsystem

V průběhu mé práce s verzí softwaru 4.73s jsem narazil na některé problémy s použitím aplikace, které uvádím v následujícím textu. První problém se objevil při zapnutí automatického ovládání rozsahů zesílení (*Pre Gain* a *Main Gain*). Nejnižším možným zesílením je kombinace nastavení 1 *Pre Gain* a 4 *Main Gain*, jak je možné vidět na *Obr. 4.36*. Osa *y* je od -4,11 nC do +4,11 nC. Pokud zapneme automatický režim, dojde při zaznamenání vyšší hodnoty náboje, než 4,11 nC k posunutí rozsahu os na hodnoty -16,5 nC až +16,5 nC (*Obr. 4.37*). Při porovnání těchto patternů je zřejmé, že změna měřítka os nevedla při opakovaném měření k přepočítání rozložení náboje v grafu a tak při automatickém režimu mohou být výsledky zavádějící. Problémy softwaru s měřením výbojů větších než několik nC se projevovaly po celou dobu měření a omezení měřicího rozsahu nebylo možné změnit ani kalibrací systému vysokou hodnotou náboje (do 20 nC).

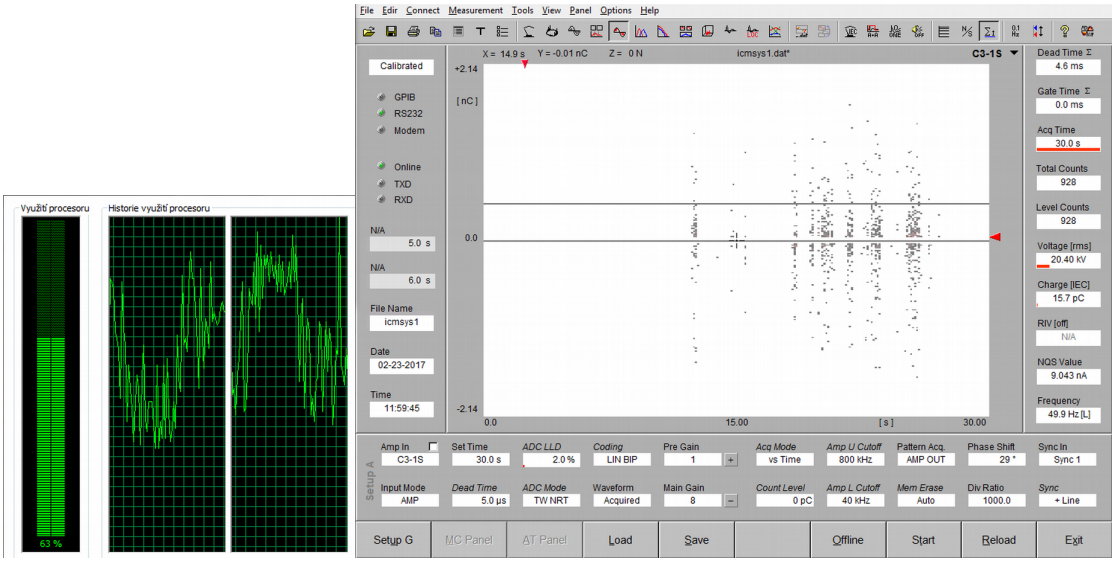


Obr. 4.36 Správné nastavení osy manuálně – správné zobrazení osy



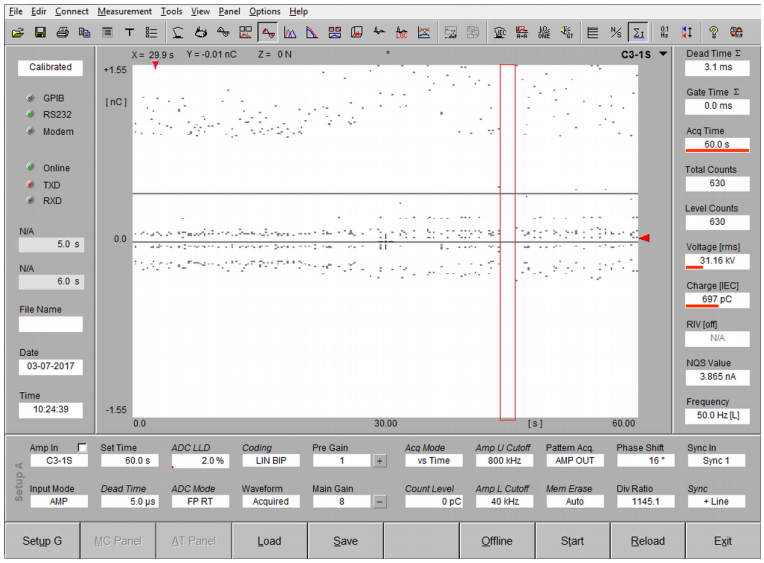
Obr. 4.37 Špatné nastavení osy automaticky – špatné zobrazení osy

Dalším problémem bylo „zamrzání“ softwaru. To se projevovalo hlavně při měřeních, kdy byl počítač spuštěn delší dobu (hodina a více) a byla na něm prováděna analýza dat. Příklad takového záznamu je uvedený na *Obr. 4.38*, kde je přiloženo i využití procesoru. Využití paměti RAM bylo pod 60 %. Výsledný pattern omezuje další analýzu dat.



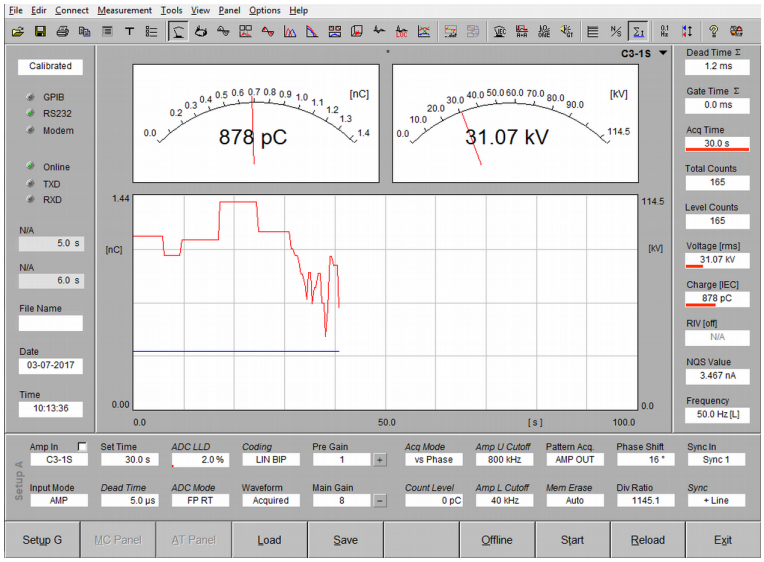
Obr. 4.38 Vlevo – využití procesoru při záznamu patternu; vpravo – Pattern při „zamrzávání“

Dalším příkladem je *Obr. 4.39*, kde je červeným rámečkem zvýrazněna část, kdy systém zamrzl. Je tedy nutné si při sběru dat na tento problém dát pozor. Toto zamrznutí je možné vysvětlit zahlcením čítače, případně neodladěnou verzí softwaru či zarušením přenosu vlivem částečných výbojů, prioritně u průchodky (kde vzniká koróna), ale tyto problémy nastávaly i u měření s transformátorem. Přesnou příčinu se mi odhalit nepodařilo.



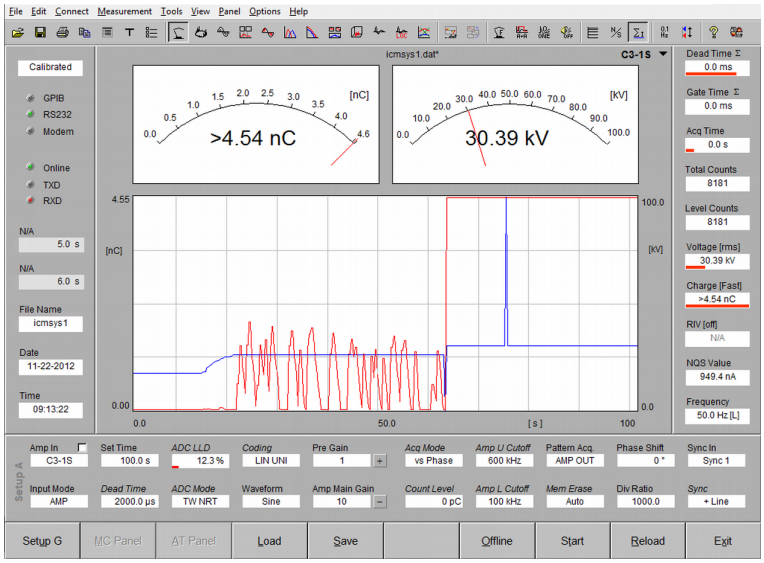
Obr. 4.39 Pattern při minoritním zamrzání, červeně zvýrazněna oblast zamrznutí

Dále se tyto problémy v záznamu ukazují na nespojitém průběhu v záložce *Meter* (*Viz Obr. 4.40*), kde po dokončení měření se stává záznam opět plynulým. V tomto případě se ovšem nemusí jednat o chybu, ale pouze o neschopnost hardwaru či softwaru měřit a zobrazovat signál ČV plynule v záložce *Meter*.



Obr. 4.40 Záložka Meter při „zamrzávání“

V souvislosti s výše uvedenou možností zarušení komunikace vnějšími výboji u průchodky (klouzavá korona) uvádím následující obrázek (*Obr. 4.41*). Záznam byl pořízen při zvyšování napětí zdroje, kde při zapálení korony došlo k tomuto záznamu na záložce *Meter* (*Obr. 4.41*). Tuto anomálii se mi nepodařilo objasnit.



Obr. 4.41 Zarušení ICMsystem

4.2 Zpracování výstupních dat z programu ICMsystem

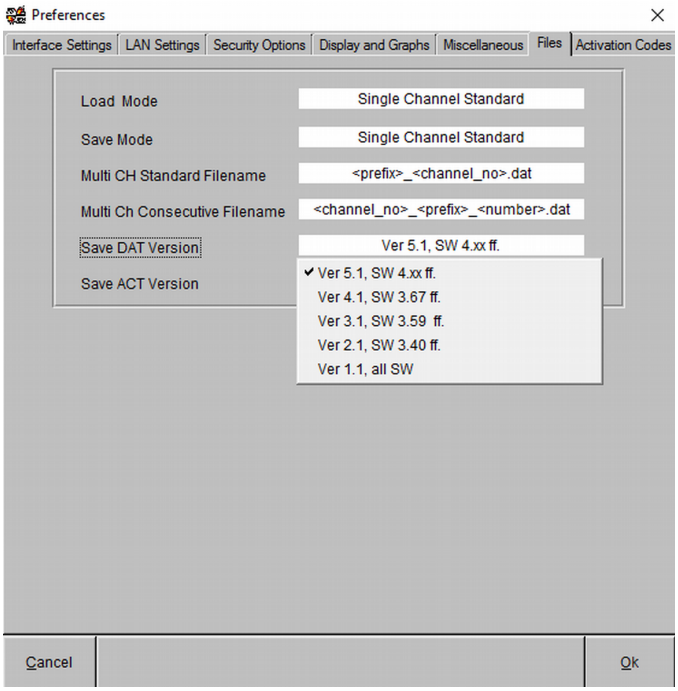
Vzhledem k tomu, že některé aplikace pro zpracování dat nefungují v softwaru optimálně nebo zcela chybí, zaměřil jsem se v rámci analýzy jednotlivých funkcí softwaru na možnost exportu raw dat ze softwaru ICMsystem v podobě, která by byla vhodná pro zpracování dat

jinými nástroji. Zejména pro vyhodnocování měření částečných výbojů při DC namáhání by tato možnost byla velmi výhodná. V dalších kapitolách je popsána tvorba takového nástroje pro export dat. Při vývoji aplikace jsem použil programovací jazyk JAVA.

4.2.1 Možnosti datových výstupů z ICMsystem a požadované vlastnosti těchto výstupů

Základním výstupe při měření částečných výbojů je již zmiňovaný pattern. Data nasbíraná a uložená pro tvorbu patternu se ukládají do formátu DAT, se kterým umí pracovat pouze ICMsystem.

Aplikace ICMsystem může ukládat data do souboru DAT v mnoha verzích, jak je zřejmé z *Obr. 4.42*. Pro nejjednodušší kódování byla vybrána Ver 1.1 all SW, která by měla zajistit kompatibilitu nástroje pro zpracování dat se všemi verzemi ICMsystem. Takže prvním krokem je uložení změřeného patternu ve verzi 1.1 do souboru DAT. Tento soubor má vždy přesně danou velikost a systém zakódování informace je pokaždé také stejný.



Obr. 4.42 Možnosti ukládání verzí v nastavení ICMsystem pod záložkou Files

Tento soubor se dá externě otevřít v mnoha freewarových aplikacích. Pro názornost je v *Příloze AD* zobrazena část hexadecimálního uspořádání patternu v aplikaci PSPad. Tato

data ovšem bez znalosti systému tvorby dat programem ICMsystem nemají žádnou vypovídací hodnotu.

4.2.2 ICMprint

Aby bylo možné takto vytvořená data zpracovat byl využit program ICMprint. Jedná se o starší software, který uměl u původní verze softwaru ICMsystem dodané s měřičem tyto soubory DAT zobrazovat a následně převést do TXT souboru, zde vytvoří tabulku o velikosti 256 x 265, kde nahradí číselnými hodnotami osu *z*. Problém nastal s aktualizací měřicího zařízení, kdy program ICMprint nedokázal načíst DAT soubor vytvořený novými verzemi ICMsystem, z důvodu změny velikosti souboru DAT. Staré soubory DAT byly velikosti 132248 B, naopak nové soubory DAT byly velikosti 164982 B.

TXT soubor vytvořený tímto programem je možné vidět v *Příloze AE*. Tato data vyexportovaná do Microsoft Office Excel již měla určitou vypovídací hodnotu a bylo s nimi možné dále pracovat. V *Příloze AF* je zobrazen načtený starý soubor DAT v aplikaci IMCprint.

4.2.3 Tvorba programu pro úpravu dat do ICMprint

Pro řešení tohoto problému jsem se rozhodl, po prostudování DAT souborů vytvořených novými verzemi v porovnání se staršími verzemi, ke zkrácení délky souboru a jeho načtení ICMprint. Pro zkrácení jsem vytvořil program v programovacím jazyku JAVA, jehož zdrojový kód je v *Příloze AG*. Jeho grafická podoba je vidět na *Obr. 4.43*. Po stisku tlačítka *Vyber soubor* v řádku *Zdrojový soubor* je možné v adresáři zvolit soubor DAT, který byl uložen z ICMsystem 4.73s ve verzi 1.1. Dále stiskem tlačítka transformovat se vytvoří nový soubor DAT do cílového adresáře o zkrácené velikosti 132248 B. Nazývejme jej „*DATm*“.

Obr. 4.43 Transformátor dat

Tento *DATm* lze již načíst programem ICMprint (Stiskem tlačítka *Load*). Nicméně se jedná z důvodu ořezání parametrických dat o výsledek, který neodpovídá přesně

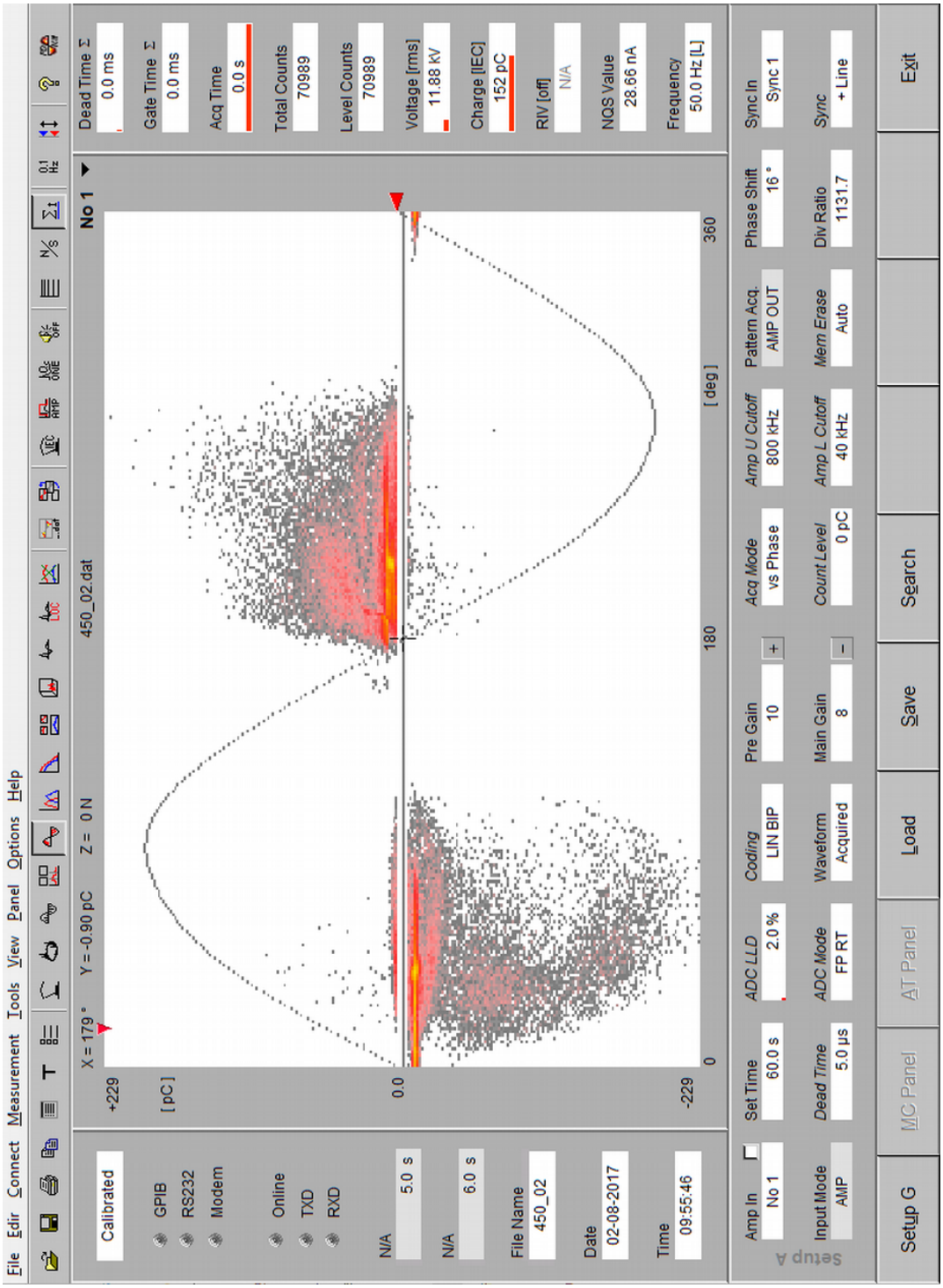
původnímu patternu. Dalším krokem je vybrání *Option* a změnění *Export type* na TXT. Dále stisknutím tlačítka *Export* se vytvoří stejnojmenný soubor TXT.

4.2.4 Tvorba tabulky k vyhodnocení výsledků zkoušky v aplikaci Excel

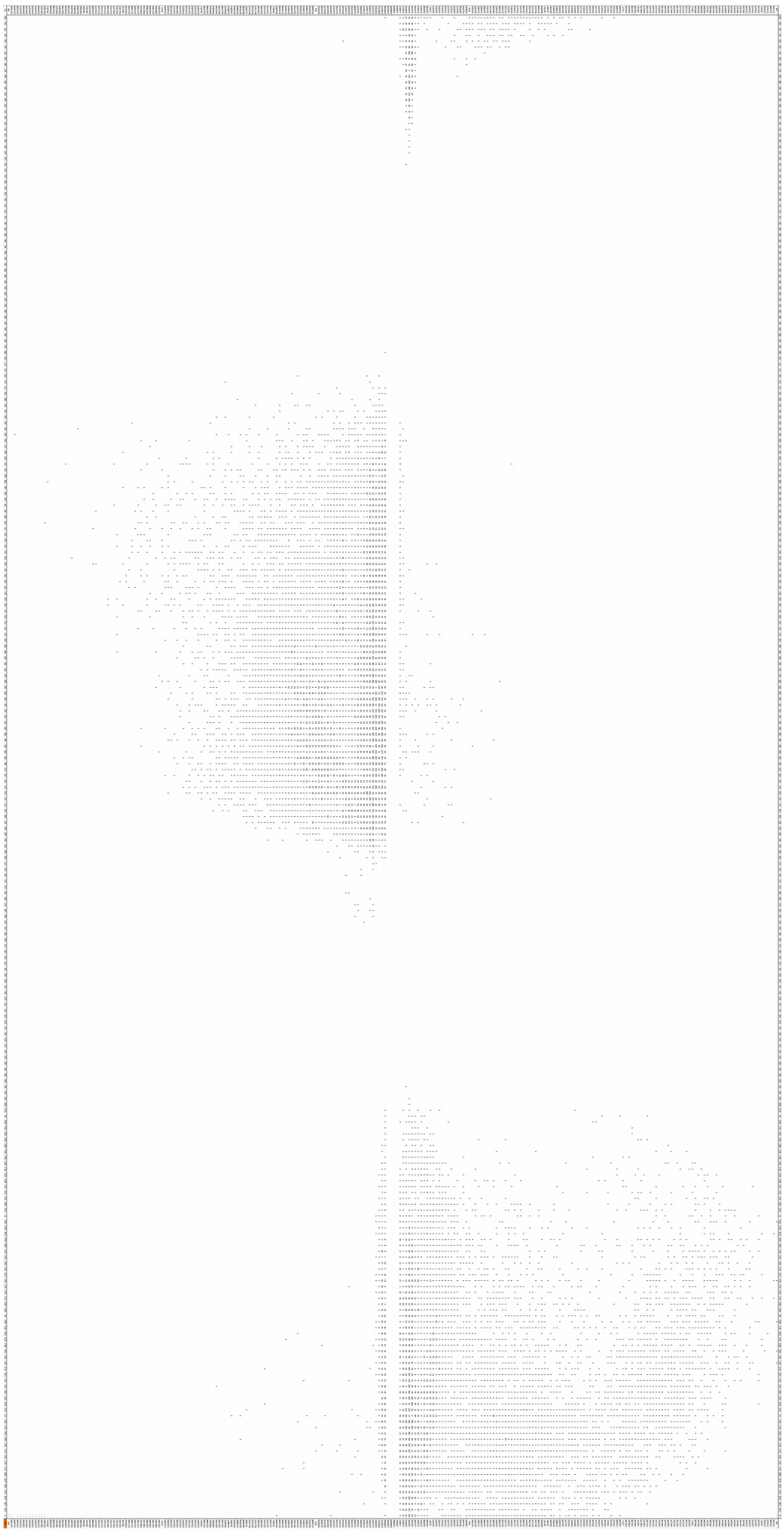
Tento textový soubor (TXT) vytvořený ze souboru *DATm* programem ICMprint je možné importovat do Excelu, jako oddělovač je vložen tabulátor (tento vytvořený soubor nazývejme „*XLSXm*“). Bez znalosti originálního patternu tato data stále nemají prakticky žádnou vypovídací hodnotu.

Z tohoto důvodu byl vytvořen vzor/šablona v tabulce Excel, který za použití funkcí dokáže tabulku v souboru *XLSXm* převést do tabulky, která již odpovídá patternu. Jedinou nevýhodou je, že se musí ručně zadat z původního patternu v ICMsystem, zda bylo měření prováděno v závislosti na fázi nebo na čase a je nutné zadat ručně hodnoty počátků a konců os *x* a *y*. Shoda mezi výslednou tabulkou a původním patternem byla ověřena na reálných záznamech z měření s různým charakterem výbojů.

Jako příklad je uveden na *Obr. 4.44* pattern, který bude převeden do číselné podoby do tabulky Excelu. Tento pattern prošel výše zmíněným procesem a výsledkem byla tabulka zobrazená na *Obr. 4.45* a *Obr. 4.46*.



Obr. 4.44 Původní pattern v ICMsystem



Obr. 4.45 Datový pattern vytvořený postupem v DP – Excel tabulka

26,04314																								1	
24,24706								2										1							
22,45098											1			1											
20,6549												1					1								
18,85882								1																	
17,06275			1																						
15,26667																1	1								
13,47059																1									
11,67451					1																				
9,878431																	1		1						1
8,082353												1	1	1	1	1	1	1	1	3		2	3	5	2
6,286275				1			1	8	2	2	11	5	11	15	15	11	20	33	20	17	41	32	24	37	25
4,490196	1		2	2	8	11	14	13	12	15	22	23	22	33	27	27	27	42	32	29	44	42	40	32	26
2,694118																									
0,898039																									
-0,89804																									
-2,69412																									
-4,4902	6	4	4	7	10	9	9	7	8	17	14	10	11	11	17	15	10	10	9	7	9	10	5	7	9
-6,28627	11	10	13	14	19	14	16	30	23	22	19	16	14	21	31	47	56	49	25	15	20	18	10	10	18
-8,08235	29	19	24	16	23	36	36	57	49	43	47	45	44	38	61	156	216	231	127	52	33	27	8	27	18
-9,87843	118	131	35	210	47	35	11	45	72	75	55	247	241	241	246	85	185	15	163	32	206	196	149	122	110
-11,6745	59	52	52	28	43	31	45	49	66	62	53	57	67	60	77	119	146	4	28	198	120	63	50	51	54
-13,4706	12	7	8	10	9	9	17	14	22	16	20	31	24	19	23	22	31	48	57	58	37	26	19	8	8
-15,2667	7	12	8	7	13	7	9	9	17	15	15	17	24	21	14	18	12	16	17	15	12	10	6	8	7
-17,0627	2	7	12	5	8	13	7	12	6	11	9	9	9	13	8	8	7	9	9	5	4	13	5	6	8
-18,8588	2	3	2	2	10	4	4	5	9	14	12	10	18	13	11	18	7	13	9	13	11	10	8	12	6
-20,6549	1	1		4	2	8	10	9	12	9	11	10	3	15	10	6	11	12	9	9	16	13	22	10	9
-22,451			1	1	1	4	4	9	4	5	7	9	13	16	9	15	13	21	13	16	20	18	13	15	11
-24,2471			1		2	4	3	5	2	2	3	3	3	7	8	12	11	15	11	12	16	20	7	12	13
-26,0431				1	3	2	3	2	3	3	5	3	4	7	5	3	6	12	4	6	11	11	8	9	9
-27,8392		1			1	1	3	1	1	3	2	2	2	5	3	3	3	2	4	2	7	2	6	7	6
-29,6353	1	1	1		3	1	1	1	1	4		1	4	3	2	5	3	2	5	1	4	3	4	3	4
-31,4314	1			1	1	1	2	3	7	1		5	1	2	4	3	1	3	3	3	1	2	2	2	1
-33,2275	2		1	2	3	1	3	2	2	1	4		3		1	1	2	3	2	1		2		2	1
-35,0235	2	1	2	1	2	1		1	3	2	2	1	1	3	4	3	2	3	3	2	2		1	2	1
-36,8196	1	1		3	2	3		1		3	5	3	2	2	1	3	2			3	4	4	1	3	5
-38,6157	2		1	1	2		2	1	2	3	1	2	3	3	5	2		1	1	1	2		2	1	2
-40,4118	1			1	1	2	1	1	2	5	2	2		2	1	1		3	3	1	1	3	1	1	1
-42,2078			2	1	1	5	1	6	2		1	1		2	2	3	4	4	1		1	3	1	2	3
-44,0039	2	2		2		2	2	2	5	2	4		3	4	1	1	3	2	2		3	2	2	1	3
-45,8	2	1	3	1	5	2	3	5	7	2	2		1	4	4	1	1	7		3		1		2	1
-47,5961	1	2	3	1	3	1	3	2	2	5	2	3	1	1	5	3	4	3	2	2	1	2	1	2	
-49,3922	2	2	4	6	4	1	4	6	2	4	1	1	3	5	2	5	5	2	2	3	4	2	3	2	1
-51,1882	1	1	1	3	5	2	2	9	4	2	7	7	4	3	1	5	5		1	1	5	2	1		3
-52,9843	2	1	2		1		3	4	2	6	5	7	5	5	1	2	6	3		1	3	3	2	2	2
-54,7804	1	2	3			3	4	3	5	2	6	7	7	4	4	4	2	4	4	2	4	3	1	4	1
-56,5765	1	5		1	2	2	4	4	7	5	2	3	3	3	1	4	4	3	3	3	4	1		6	5
-58,3725	1	1	1	2	4	2	3	4	7	2	5	9	5	6	2	3	2	3	5	1	4	4	2	6	2
-60,1686	2	1	3	2		7	4	4	1	4	3	8	2	3	4	4	5	10	3	1	3	3	2	1	1
-61,9647	3		1	1	1	3	2	4	3	2	8	4	4	2	2	4	8	5	2	2	4	6		2	2
-63,7608	1	1	1		2	3	1	5	8	7	4	1	6	4	5	3	3	4	4		3	4	2	1	3
-65,5569	4	2	1	1	3	2	4	7	6	6	3	4	8	7	5	5	5	2	7	3	2	3	1	4	4
-67,3529	1	5	3	4	7	3	5	6	4	1	6	5	4	14	5	3	6	4	3	3		2	2		3
-69,149	1	3	2	1	2	3	4	4	4	3	5	2	3	4	3	9	1	5	3	5	2	4		1	1
-70,9451	2	1	2	1	6	4	3	3	6	4	1	7	4	6	5	6	6	2	1	2	2	2			2
-72,7412	2	2	2	2	4	3	2	5	4	5	7	7	3	5	3	3	7	4	5	1	3	2	4	1	2
-74,5373	3	1	2	1	1	1		3	4	7	2	3	4	4	3	2	6	5	5	1	2	1		1	2
-76,3333	1		1	1	2	5	1	1	8	5	5	5	5	6	3	7	7	2	2	3	1	1	1		1
-78,1294	2	1	2	1	3	1	1	6	5	5	3	3	4	5	1	5	3	5	4	1	3	1	1	1	7
-79,9255	1		4	2	4	1	3	1	8	5	8	3	3	1	3	1	3	7	8	1	5	2	1		1
-81,7216	1		2	1		3	4	3	6	4	3	8	5	2	7	4	3	3	5	2		3	1	1	1
-83,5176	1	3	1	2	2	2	3	3	5	6	4	5	6	6	3	4	4	5	3	1	3	2	1	1	4
-85,3137	1	1	4		2	5	4	2		1		3	1	4	4	6	4	1		2	3	2		2	2
-87,1098	1		2	2			1	5	8	4	1	2	2	1	2	5	5	1	3	2	4		1	2	2
-88,9059	1	1	1	1	3		1	2	2	4	1	4	1	6	2	8	1	6	2	3	1	1	2	1	1
-90,702	1	1	1	1	2	1	3		6	4	2	6	2	1	2	1	3	5	5	3	3		4		1
-92,498		2		2		3	2		1	2	7	4	1	4	6	2	3	4	3	1	1		2		1

Obr. 4.46 – Přiblížení Excel tabulky

5 Závěr

V úvodu mé práce jsem se zabýval stručným popisem částečného výboje. Dále jsem se zaměřil na diagnostické metody detekce částečných výbojů, kde jsem se zabýval pěti hlavními detekčními metodami (elektrickou, akustickou, elektromagnetickou, chemickou a optickou metodou). U všech zmíněných způsobů měření částečného výboje jsem popsal metodiku zkoušky a zmínil příklady používaných zařízení.

U elektrické metody je popsán podrobně princip měření částečných výbojů s fyzikálním popisem, popisem důležitých veličin a dále byly vypsány důležité poznatky z normy ČSN EN 60270. Tato metoda byla pro moji práci stěžejní, z důvodu použití v praktické části diplomové práce.

V třetí části práce jsem popisoval hardware a software ICMsystem. U hardwarové části jsem vyjmenoval součásti ICMsystem a popsal jejich funkčnost a technické specifikace. Poukázal jsem na jejich limity a výhody. Dále jsem přesně popsal zapojení měřicího systému ICMsystem v laboratoři ZČU. V softwarové části jsem vysvětlil princip funkce aplikace ICMsystem, princip záznamu částečného výboje v zkušebním obvodu, popsal jsem grafické rozhraní, jeho ovládání a možnosti analýzy konečných dat. Opět jsem se snažil poukázat na výhody a úskalí aplikace.

V poslední části práce jsem prováděl měření v laboratoři ZČU přístrojem ICMsystem. Byla provedena odlišná měření na různých zařízeních. Změnou parametrů metody záznamu jsem zkoumal vliv těchto změn na výsledek měření a porovnával tyto výsledky. Dále jsem se zaměřil na výstup raw dat z ICMsystem.

V první fázi měření byla zkoumána výbojová činnost osciloskopem. Tyto hodnoty dávají podklady pro práci se softwarem ke správnému nastavení parametrů záznamu, aby došlo co k nejmenšímu zkreslení výsledků (nastavení DT a LLD).

Dále bylo na žádost laboratoře měřeno zkušební napětí. Výsledky vyplývající z záznamu osciloskopu jsou po vypočtení schodné s vstupním napětím a s hodnotou napětí, zobrazenou

v ICMsystem při zadání správného dělicího poměru napětí. Tím byla dokázána správnost výsledných hodnot.

Při zkoumání odlišností při změně módů záznamu nebyly objeveny odchylky od teoretických předpokladů. Mód IEC v on-line režimu minimalizuje skoky v záznamové činnosti. U módu Normal byl zaznamenán největší výskyt částečných výbojů. Výsledné patterny se mezi sebou, mimo četnost výbojů, lišili bezvýznamně.

Odlišnosti při měření s různými režimy a délkami DT byly znatelné. Část měření nebyla v souladu s teoretickými předpoklady. Vysvětlení těchto neshod by měla být proměnlivá výbojová činnost v čase v zařízení, případně krátký čas záznamu, kde mohlo dojít k statistickým odchylkám. Zajímavé je, že při trojici stejných měření, kde byl změněn pouze parametr ADC Mode, byla největší četnost výbojů zaznamenána na vzorku s největším celkovým DT. Při zkoumání různých verzí softwaru (4.73s a 4.6) nebyly nalezeny odchylky od výsledků. Dále bylo definováno, dle záznamů z osciloskopu, nejvhodnější nastavení DT pro transformátor. Bylo zaznamenáno a zkoumáno více kombinací nastavení, ale z prostorových i časových důvodů nebyly v práci uvedeny.

Při změně parametru LLD došlo opět k odchylce od teoretických předpokladů, kdy u záznamu s hodnotou LLD 12 % sice došlo k markantnímu poklesu zaznamenaných částečných výbojů oproti LLD s hodnotou 2 %, ale při porovnání těchto výsledků je výskyt nad 12% hladinou náboje druhého vzorku menší, než u prvního. To lze opět vysvětlit změnou výbojové činnosti v transformátoru v čase, či krátkým časem sběru dat.

Zajímavou vlastností je Memory Erase, kdy je možné po dokončení záznamu patternu zahájit další měření a získat rozšířený záznam. I u této funkce jsem narazil na úskalí, na které je třeba si dát pozor. U záznamu, kde osou x je čas vzniká vrstvení záznamu na stejný pattern, nedojde však ke změně osy a tím dojde ke zkreslení výsledků (minimálně se jedná o špatné označení os – například 60s záznam zobrazen na 30s ose). Možným zlepšením by byla možnost změny barvy u druhého záznamu (případné zapnutí a vypnutí zobrazení jednoho záznamu) a tím by byla umožněna komparace těchto záznamů.

Při zkoumání prostředí aplikace ICMsystem jsem zjistil občasné nedostatky verze 4.73s a jejího manuálu. Jedním z těchto nedostatků je nefunkčnost některých tlačítek (Help), dále se jedná o chybějící popis v manuálu některých částí aplikace (CFL). Dalším minoritním nedostatkem na který je třeba si dát pozor je, že v režimu Trending při měření výbojové činnosti na čase zůstává osa x fáze. Nicméně firma Power Diagnostix neustále pracuje na vývoji aplikace, což dokazují časté aktualizace (uvolňování nových verzí softwaru). Při dokončování práce jsem se dozvěděl, že má vyjít opět novější verze programu.

Dále je třeba si dát pozor při záznamu dat, kdy může dojít k popisovanému vynechávání záznamu („zamrznutí“) a tím dojít ke zkreslení výsledků. Příčinu se mi přesně nepodařilo nalézt. Taká je třeba si dát pozor, že on-line režim při spuštěném záznamu zobrazuje výbojovou činnost zkresleně. Jako velký nedostatek je v této verzi možnost přepnutí režimu rozsahu na automatický režim, kde při překročení nejnižšího rozsahu dojde ke změně os, ale bez přepočtení rozložení náboj na patternu a tím k zjevnému zkreslení výsledků.

Dále byl řešen nedostatek, kdy bylo potřeba měřit výboje s hodnotou větší než přibližně 4,5 nC, což byl maximální rozsah, který byl s kalibrátorem CAL1A, při hodnotě 100 pC, možno dosáhnout. Starší verze ICMsystem dokázaly se stejným kalibrátorem pracovat s většími rozsahy. Ovšem nepodařilo se mi žádným způsobem změnit nastavení aplikace. Tato problematika nastavení těchto hodnot není nijak v manuálu vysvětlena. Je ovšem možné, že se jedná o dočasné omezení verze aplikace 4.73s nebo se jedná o záměrné omezení ze strany výrobce z důvodu minimalizace zkreslení dat. Tím je ale zbytečně omezen záznam, který by podal alespoň přibližnou vypovídací hodnotu s odchylkami v řádu maximálně procent. Při použití externího zapůjčeného kalibrátoru s vyšší hodnotou náboje byla docíleno zvětšení os, nicméně ani tato kalibrace nebyla pro některá měření dostačující.

V konečné fázi jsem se zaměřil na žádost laboratoře KEE na zisk raw dat z aplikace ICMsystem. Jako nejvhodnější řešení byla zvolena varianta se změnou grafického patternu do číselné podoby v tabulce Excel. Pro tuto metodiku jsem vytvořil program a podrobně popsal kroky k vytvoření Excel tabulky s raw daty. U takto získaných dat bylo empiricky ověřeno, že data přesně odpovídají originálnímu patternu vytvořenému programem ICMsystem. Tento program a následný postup by měl být využitelný i pro další verze ICMsystem při zachování daného kódování.

Seznam literatury a informačních zdrojů

[1] ING. MARTÍNEK, Petr. Teoretická a experimentální analýza částečných výbojů v dielektriku elektrických strojů. Plzeň, 2005. DISERTAČNÍ PRÁCE. ZČU Fel. Vedoucí práce Doc. Ing. Jiří Laurenc, CSc.

[2] Advanced PD Monitoring of Power Transformers. HitPages [online]. Espoo, 2009 [cit. 2016-12-12]. Dostupné z: https://www.hitpages.com/doc/6407894710878208/5#pageTop

[3] ČSN EN 60270. Technika zkoušek vysokým napětím - měření částečných výbojů. Praha: Český normalizační institut, 2007.

[4] LDS-6. Doble [online]. Boston, MA, United States: Doble Engineering Company, 2017 [cit. 2017-03-19]. Dostupné z: http://www.doble.com/product/lds-6/

[5] Doble Lemke LDS-6 PLUS PD Test System [online]. HV TECHNOLOGIES, 2013 [cit. 2017-04-21]. Dostupné z: http://www.hvtechnologies.com/HVSolutions/MeasurementSystems/LDS6andLDS6PDTestSystem/tabid/144/Default.aspx

[6] LDS-6/UHF. Direct industry [online]. 2017 [cit. 2017-03-19]. Dostupné z: http://www.directindustry.com/prod/doble-lemke/product-55765-365633.html

[7] MPD 600. Omicron [online]. Omicron, 2017 [cit. 2017-03-19]. Dostupné z: https://www.omicronenergy.com/en/products/all/primary-testing-monitoring/mpd-600/#Description

[8] MPD 600 [online]. © OMICRON L2662, 2016 [cit. 2017-04-21]. Dostupné z: https://www.omicronenergy.com/fileadmin/user_upload/pdf/literature/MPD-600-Brochure-ENU.pdf

[9] DDX 9121B. Haefely Hipotronics [online]. Hubbell Incorporated, 2016 [cit. 2017-03-19]. Dostupné z: http://www.haefely-hipotronics.com/products/product/ddx-9121b-3/

[10] DDX 9121b [online]. Switzerland: HAEFELY HIPOTRONICS, 2016 [cit. 2017-04-21]. Dostupné z: http://www.haefely-hipotronics.com/wp-content/uploads/2014/11/160407_Press_Release_DDX-9121b_DS2.pdf

[11] KREIDL, Marcel a Radislav ŠMÍD. Technická diagnostika: senzory, metody, analýza signálu. Praha: BEN - technická literatura, 2006. Senzory neelektrických veličin. ISBN 80-7300-158-6.

[12] Partial discharge analyser (Acoustic). Martec [online]. Martec, 2017 [cit. 2017-03-10]. Dostupné z: http://www.martec.co.za/partial-discharge-analyser-acoustic/

[13] JUDD, Martin D., Li YANG a Ian B. B. HUNTER. Partial Discharge Monitoring for Power Transformers Using UHF Sensors Part 1: Sensors and Signal Interpretation. DEIS: Feature Article. 2005, , Sv. 21 No. 2.

[14] P. AGORIS, S. MEIJER a J. J. SMIT. Sensitivity Check of an Internal VHF/UHF Sensor for Transformer Partial Discharge Measurements. IEEE. , 428.

[15] Optimisation of a Sensor for Onsite Detection of Partial Discharges in Power Transformers by the UHF Method. IEEE. 2008, 15(6), 1634 – 1639.

[16] PDS100. Doble [online]. Watertown: Doble Engineering Company, 2017 [cit. 2017-03-14]. Dostupné z: http://www.doble.com/wordpress/wp-content/uploads/PDS100_US_HR_web.pdf

[17] EMI Surveyor. Doble [online]. Watertown: Doble Engineering Company, 2017 [cit. 2017-03-14]. Dostupné z: http://www.doble.com/wordpress/wp-

content/uploads/EMI_surveyor_web.pdf

[18] Morganschaffer [online]. morganschaffer, 2015 [cit. 2017-04-23]. Dostupné z: https://www.morganschaffer.com/products.php?id=4

[19] DGA - Plynová chromatografie - příklad a možnosti hodnocení. ELDIAG s.r.o [online]. Praha: ELDIAG, s.r.o, 2006 [cit. 2017-01-26]. Dostupné z: http://www.eldiag.cz/cz/texty/dga-plynova-chromatografie-priklad-a-moznosti-hodnoceni

[20] MENTLÍK, Václav. Diagnostika elektrických zařízení. Praha: BEN - technická literatura, 2008. ISBN 978-80-7300-232-9.

[21] Chemistry 2. Chemsite [online]. Sudbury: Dan Damelin, ©2000-2007 [cit. 2017-03-29]. Dostupné z: http://chemsite.lsrhs.net/Intro/chromatography.html

[22] IEC 62478. Slide Player [online]. Grat: University of Technology, ©2016 [cit. 2016-12-17]. Dostupné z: http://slideplayer.com/slide/1579129

[23] CSIR - CoroCAM. Tmvss [online]. NETservis, 2017 [cit. 2017-03-10]. Dostupné z: http://www.tmvss.cz/vyrobci/csir-corocam

[24] CoroCAM 504. Uvirco [online]. Lara, 2015 [cit. 2017-03-14]. Dostupné z: http://uvirco.co.za/products/corocam-504/

[25] POWER DIAGNOSTIX. ICMsystem Digital Partial Discharge Recording: User Manual. Rev. e4.20. Aachen: Power Diagnostix Systems, 2016.

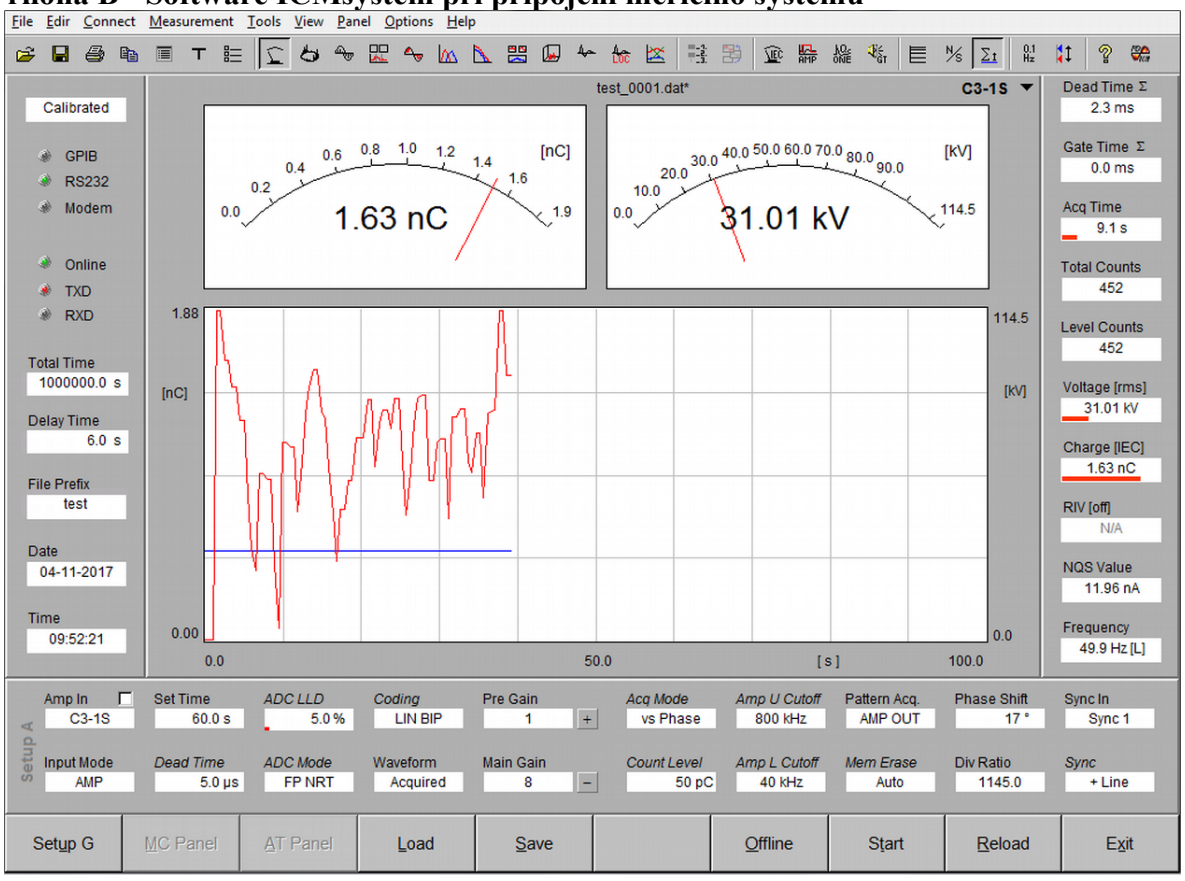
Seznam příloh

Příloha A - Měřicí zařízení ICMsystem v laboratoři KEE na ZČU
Příloha B - Software ICMsystem při připojení měřicího systému
Příloha C - Hlavní panel ICMsystem při průběhu zkoušky
Příloha D - Report
Příloha E - Templates – Šablony
Příloha F - Preferences – Nastavení
Příloha G - Meter
Příloha H - Ellipse
Příloha I - Scope
Příloha J - Spectrum
Příloha K - Spectrum – přepnuto na záložku Map
Příloha L - Projections vs. X
Příloha M - Projections vs. Y
Příloha N - Trending – při měření
Příloha O - Trending - po skončení měření
Příloha P - 3-D Animation – 3D zobrazení
Příloha Q - Oscilloscope
Příloha R - Cable Fault Detection
Příloha S - Help About
Příloha T - Dialog při poklepu na Total Counts/Level Counts či Pos Counts/Neg Counts
Příloha U - RIV nastavení
Příloha V - Edit Sync. Frequency – Nastavení synchronizační frekvence
Příloha W - Obrazovka na záložce Map – bez předešlého nebo vynulovaného měření
Příloha X - Kalibrace
Příloha Y - Obrázek získaný uložením měření v aplikaci ICMsystem
Příloha Z - Firts Peak Retriggerable
Příloha AA - Time Window Non-Retriggerable
Příloha AB - ČV v transformátoru změřený osciloskopickým režimem v aplikaci ICMsystem
Příloha AC - Připisování dat při Memory Erase
Příloha AD - DAT soubor ICMsystemu otevřený v PSPadu
Příloha AE - TXT soubor vytvořený ICMprint
Příloha AF - ICMprint s načtenou patternou ze starší verze DAT souboru
Příloha AG - Zdrojový kód ICMTransformace

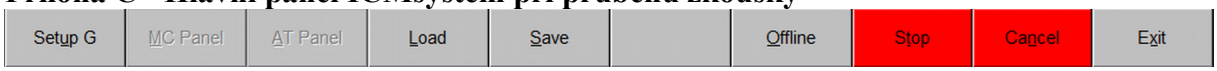
Přílohy

Příloha A - Měřicí zařízení ICMsystem v laboratoři KEE na ZČU

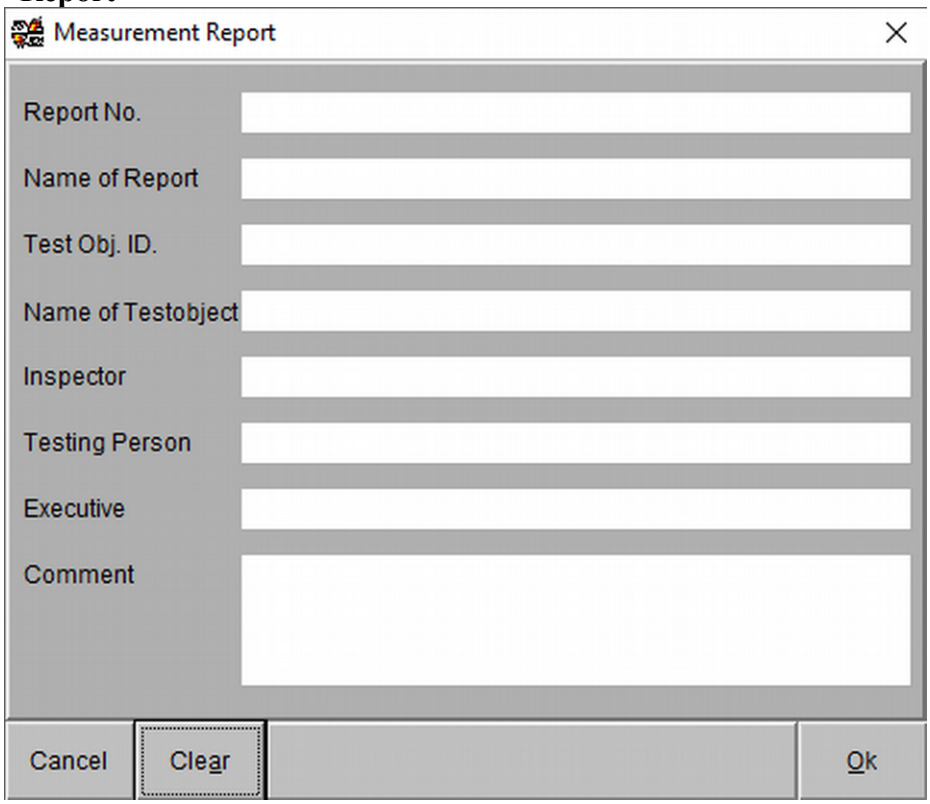
Příloha B - Software ICMsystem při připojení měřicího systému



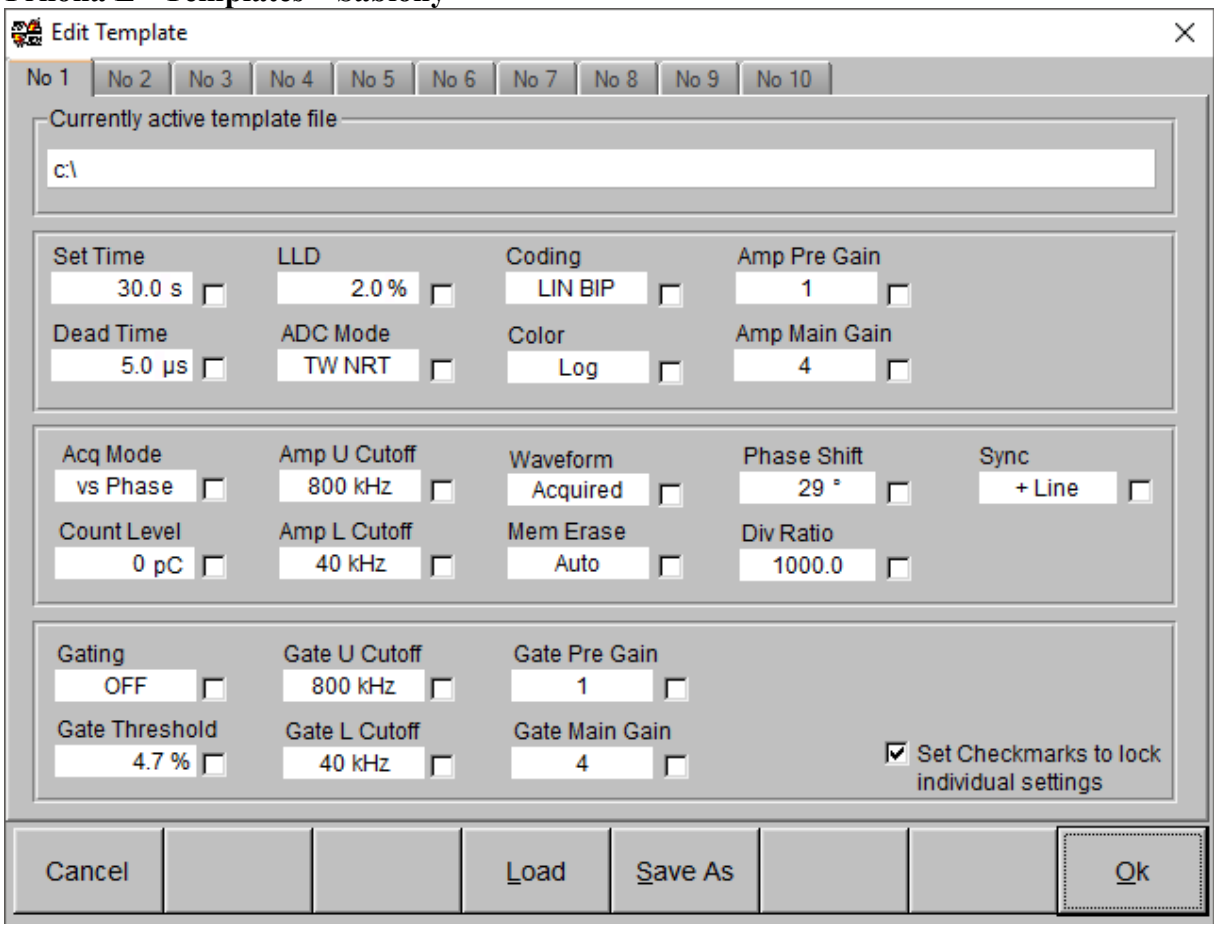
Příloha C - Hlavní panel ICMsystem při průběhu zkoušky



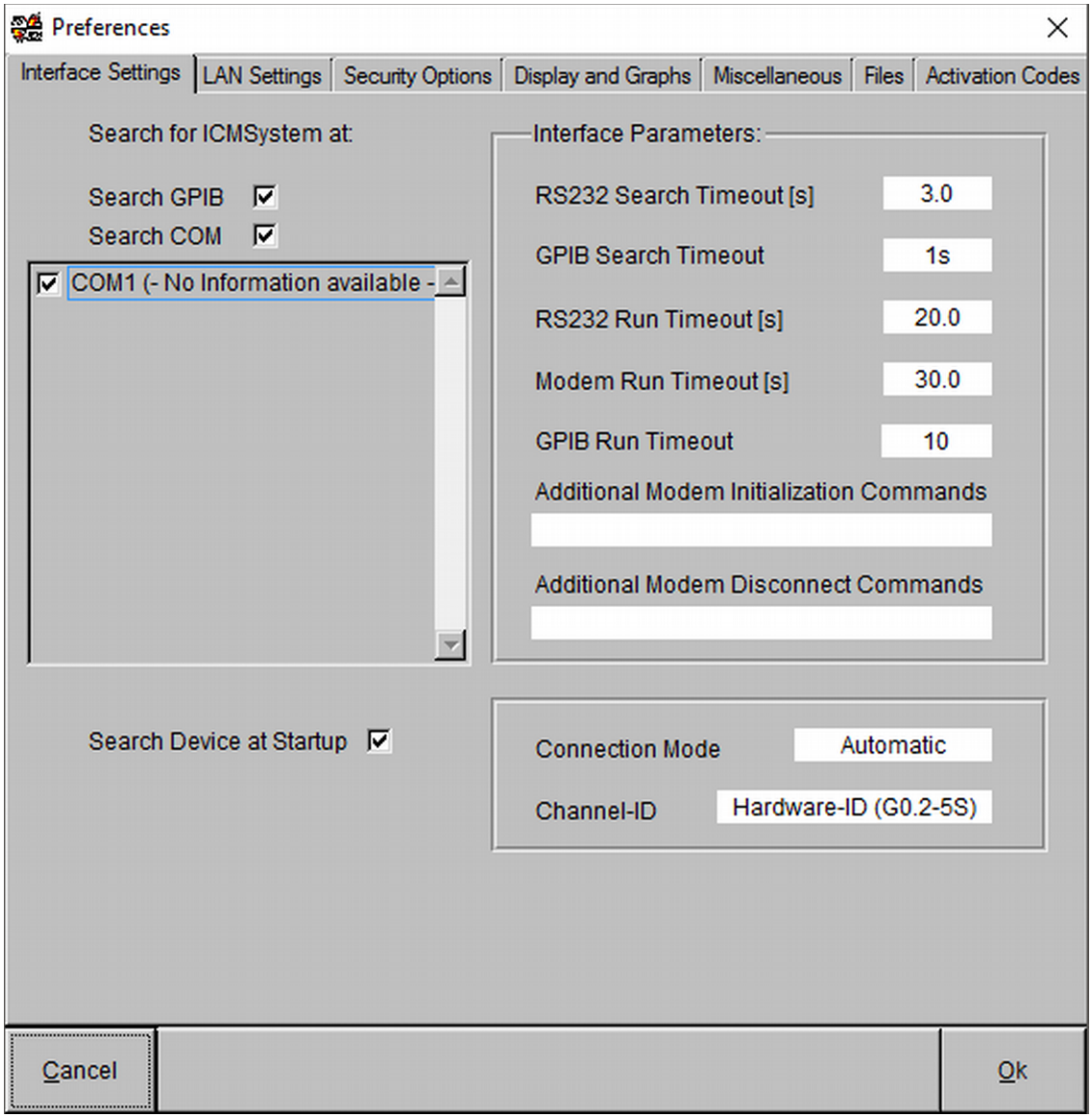
Příloha D - Report



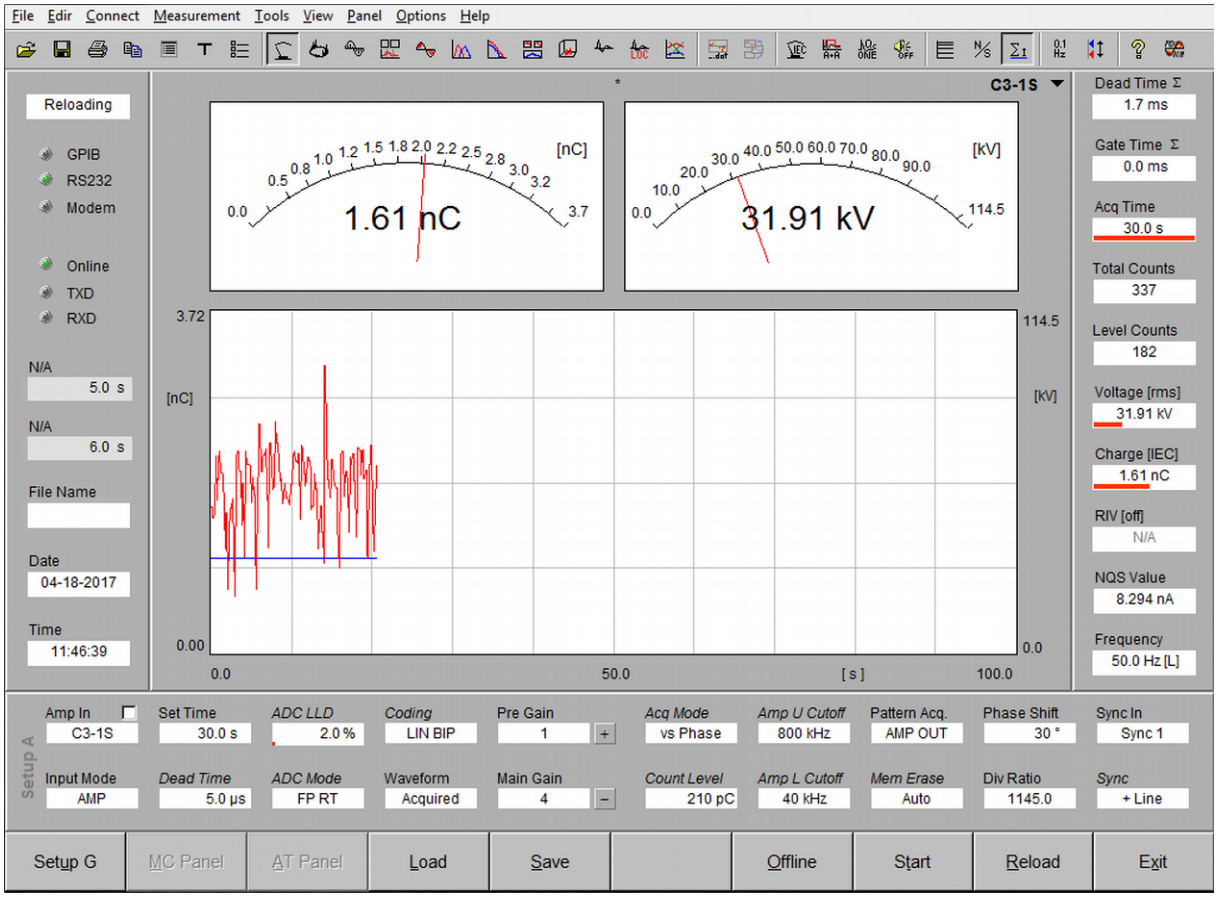
Příloha E - Templates – Šablony



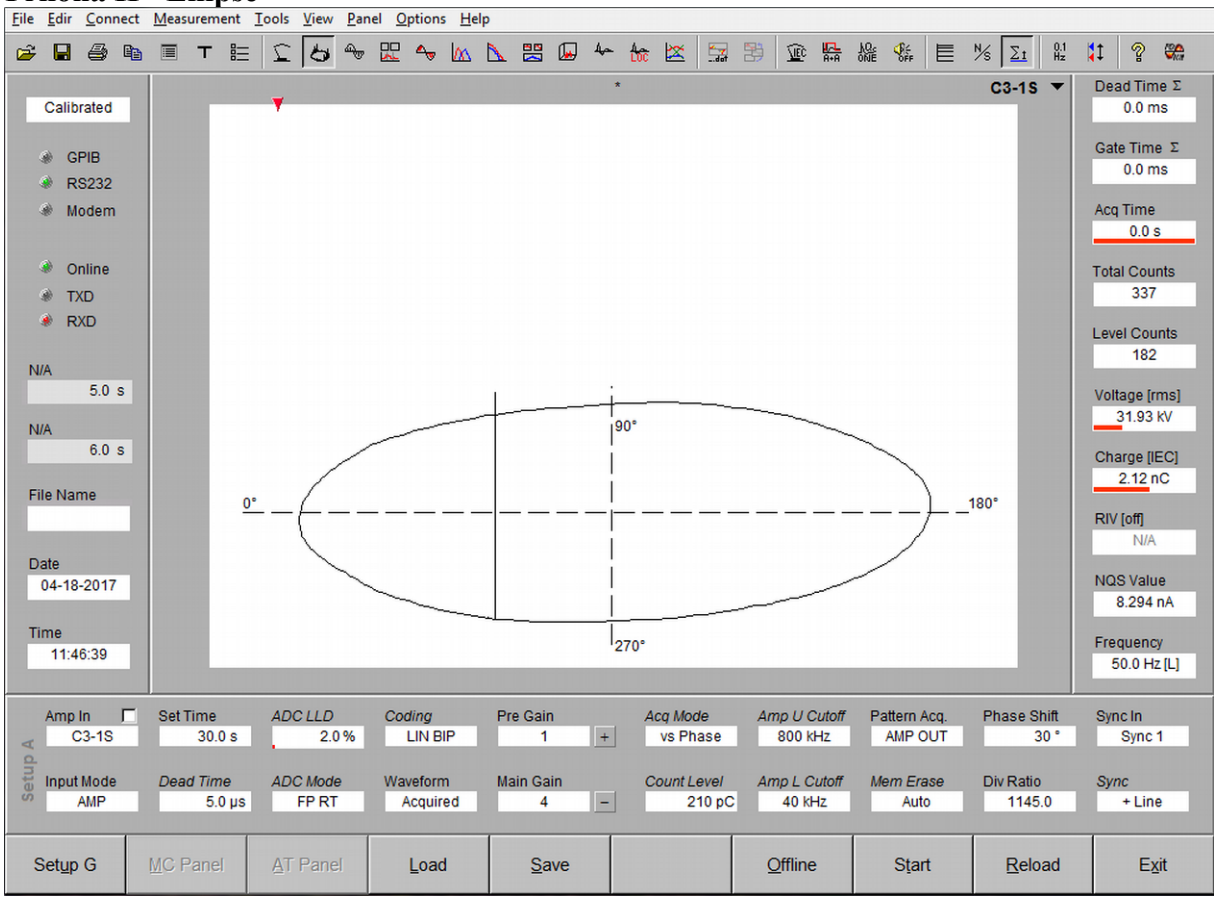
Příloha F - Preferences – Nastavení



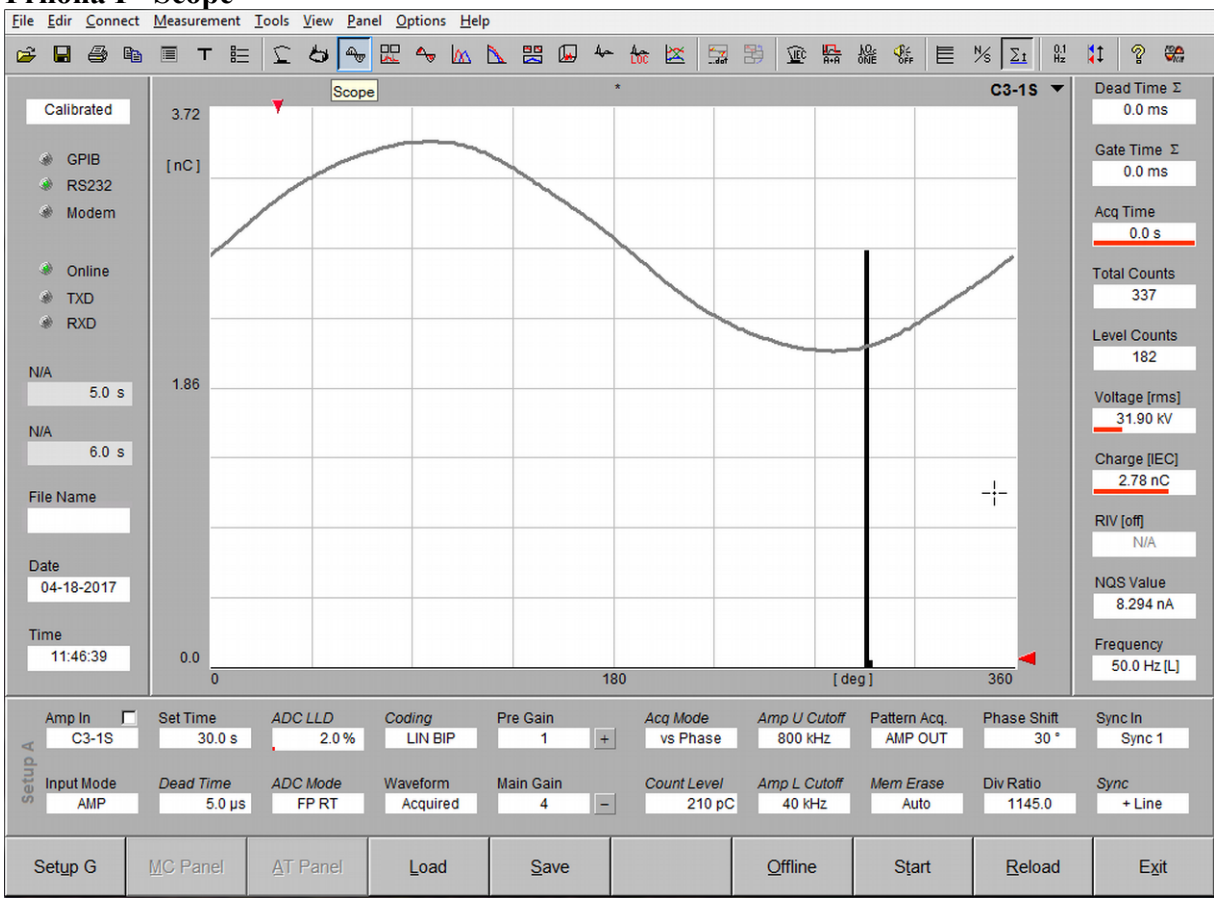
Příloha G - Meter



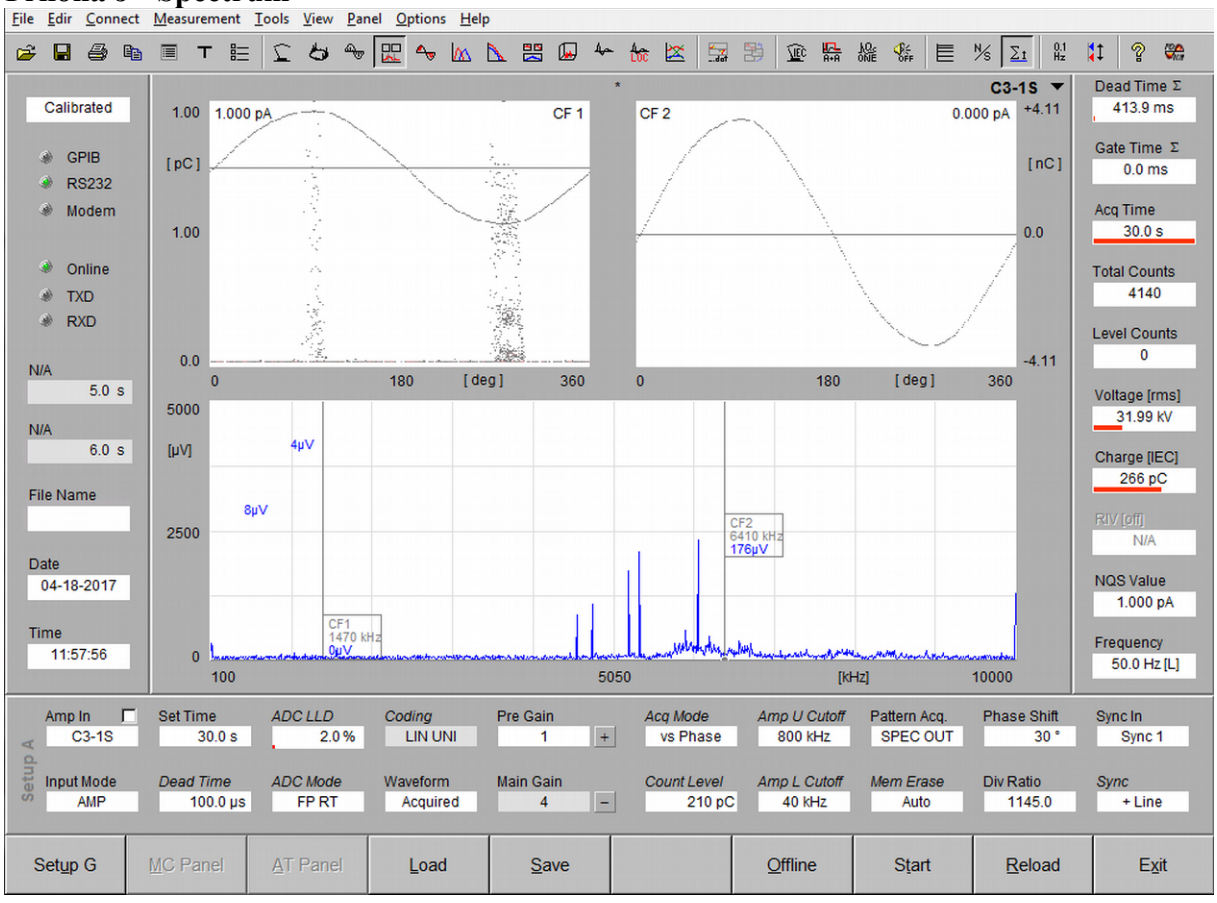
Příloha H - Ellipse



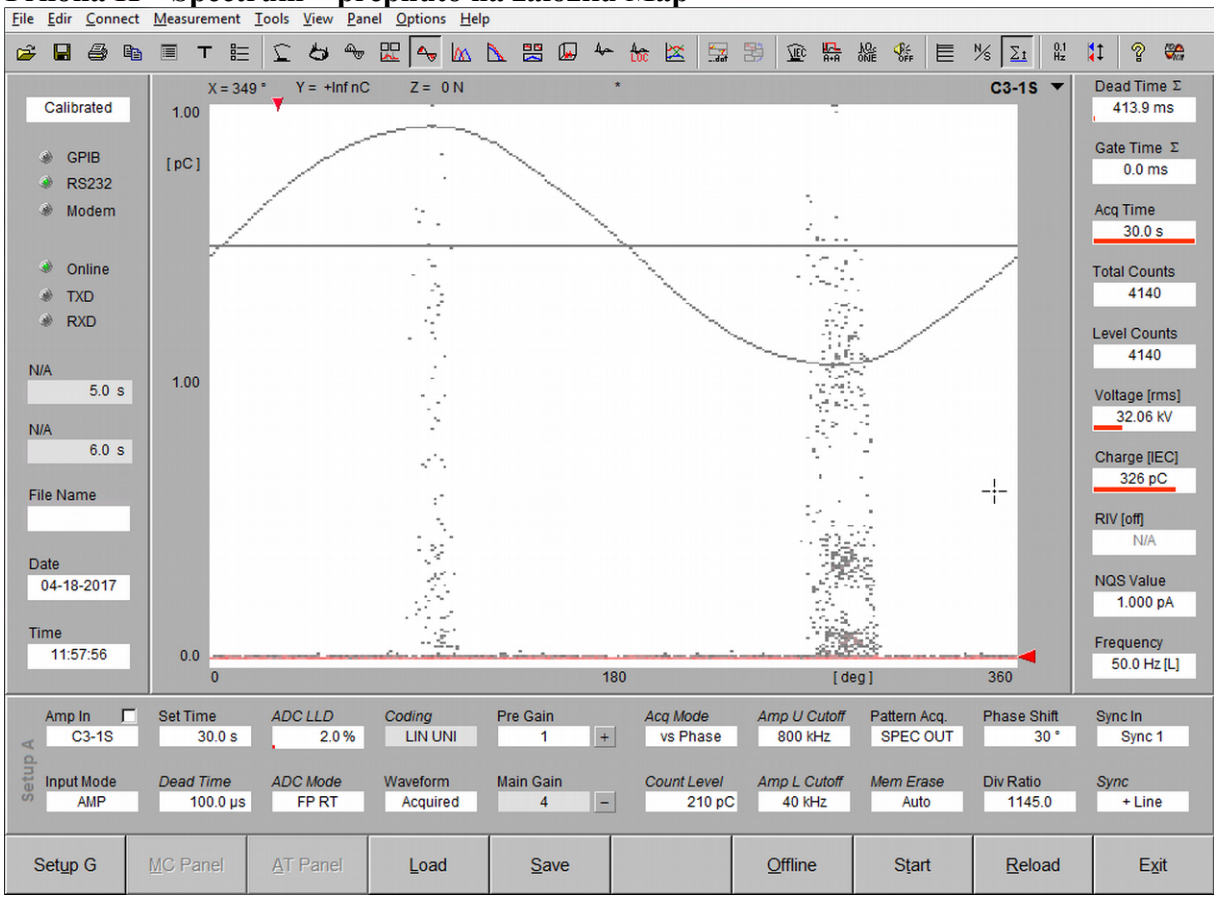
Příloha I - Scope



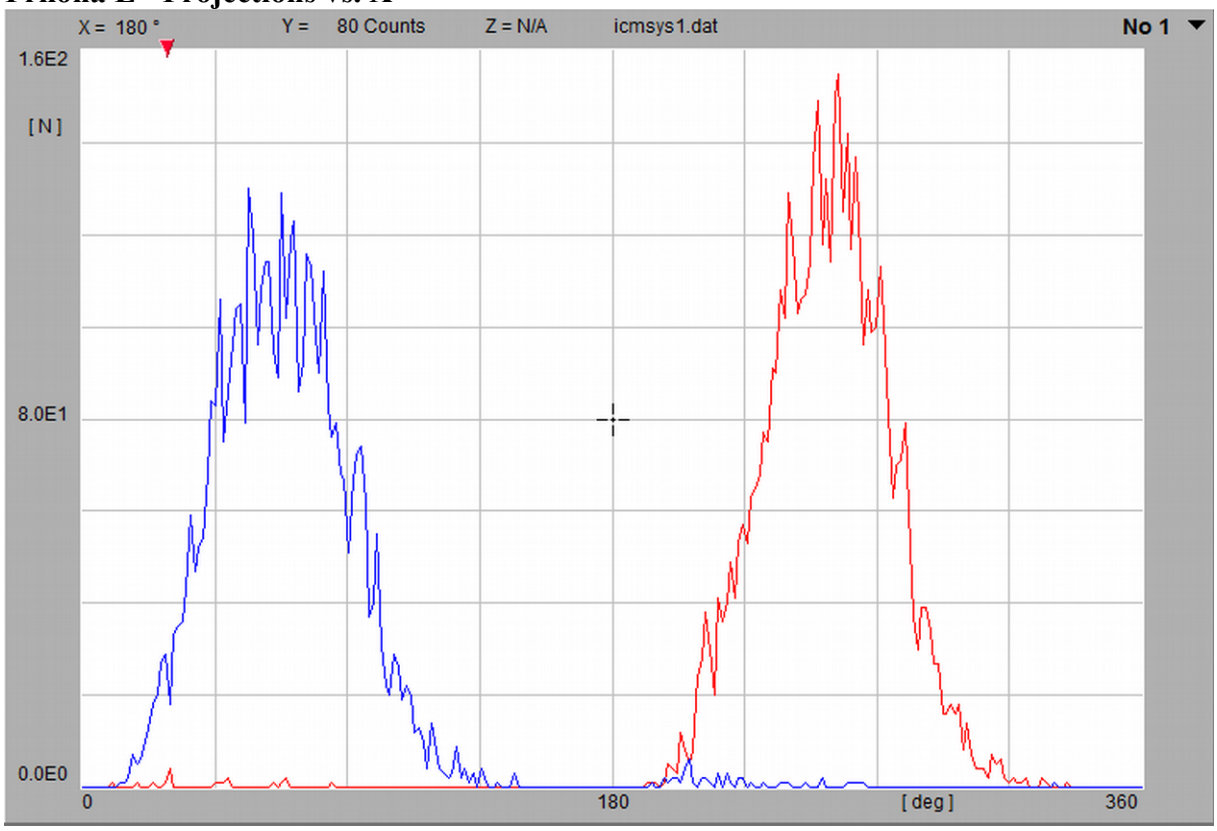
Příloha J - Spectrum



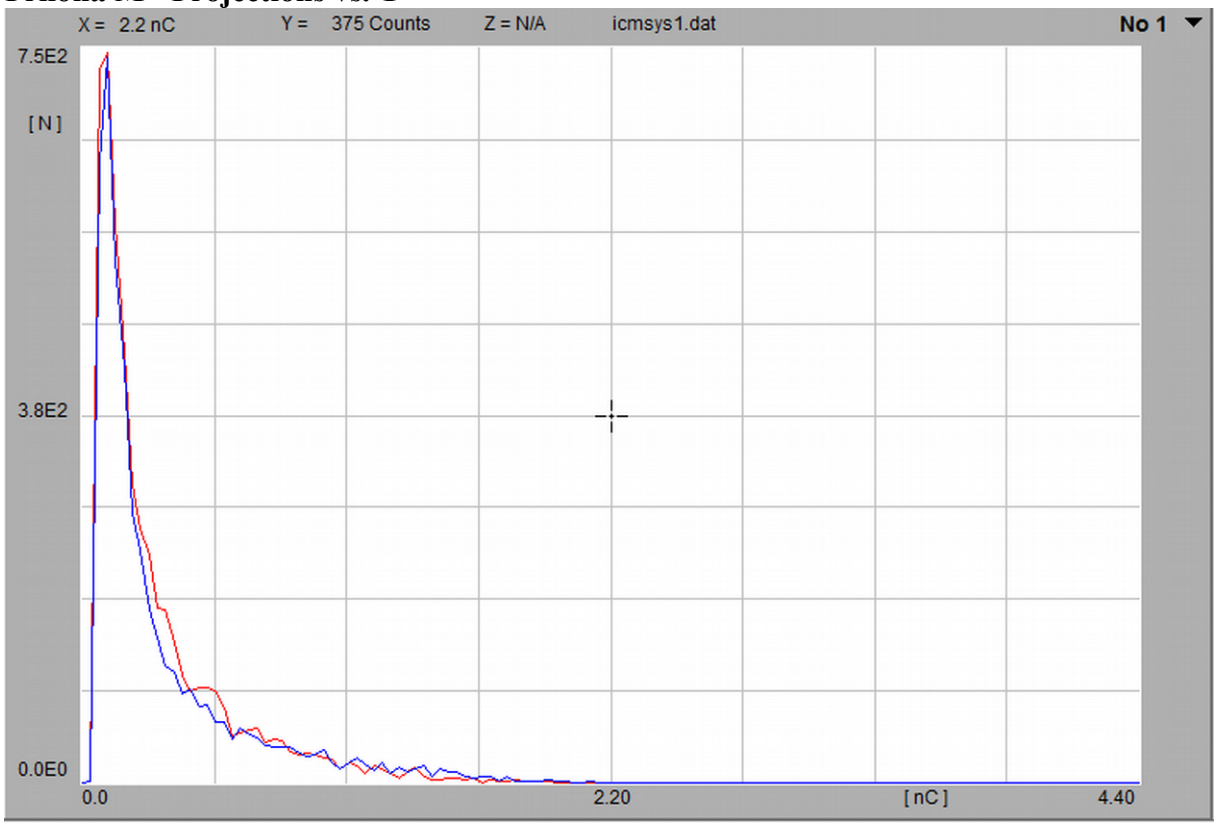
Příloha K – Spectrum – přepnuto na záložku Map



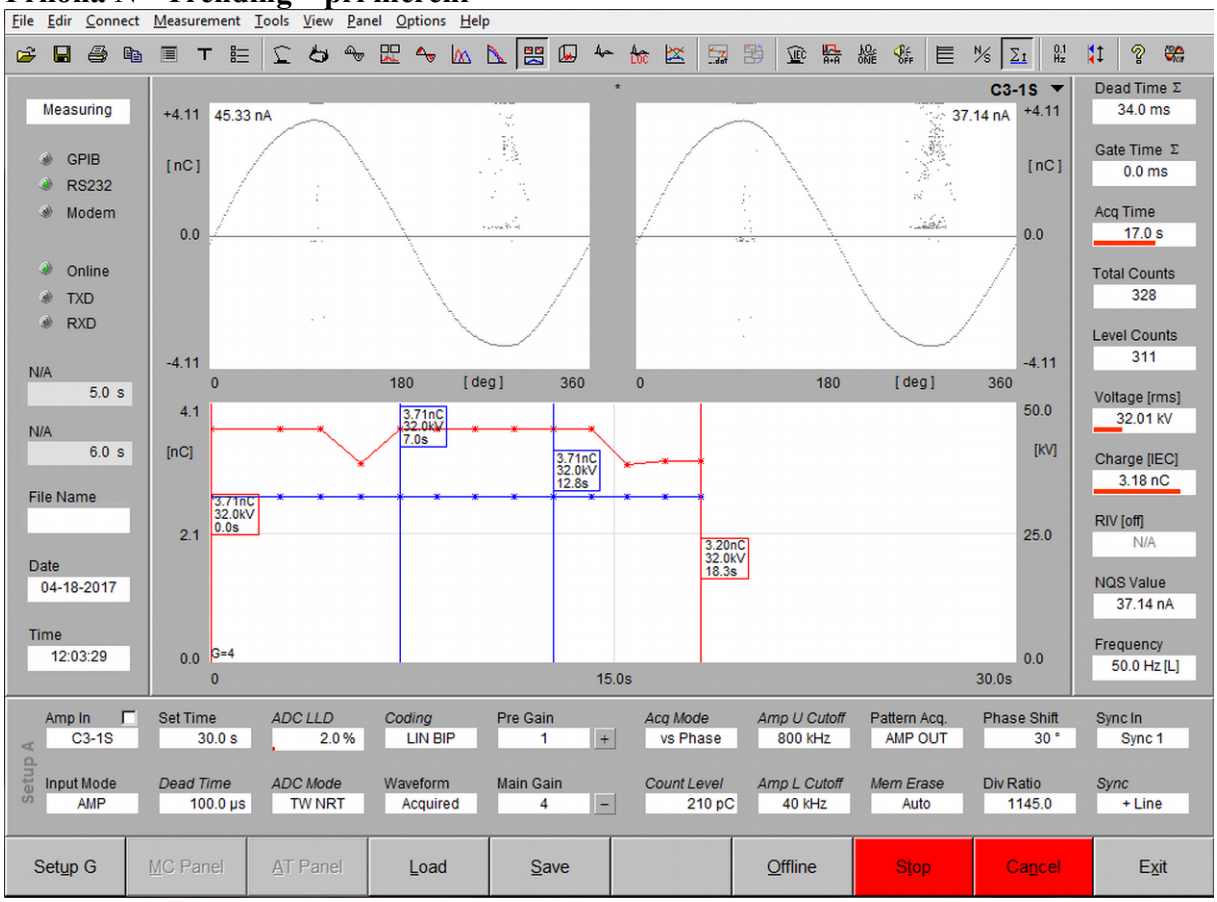
Příloha L - Projections vs. X



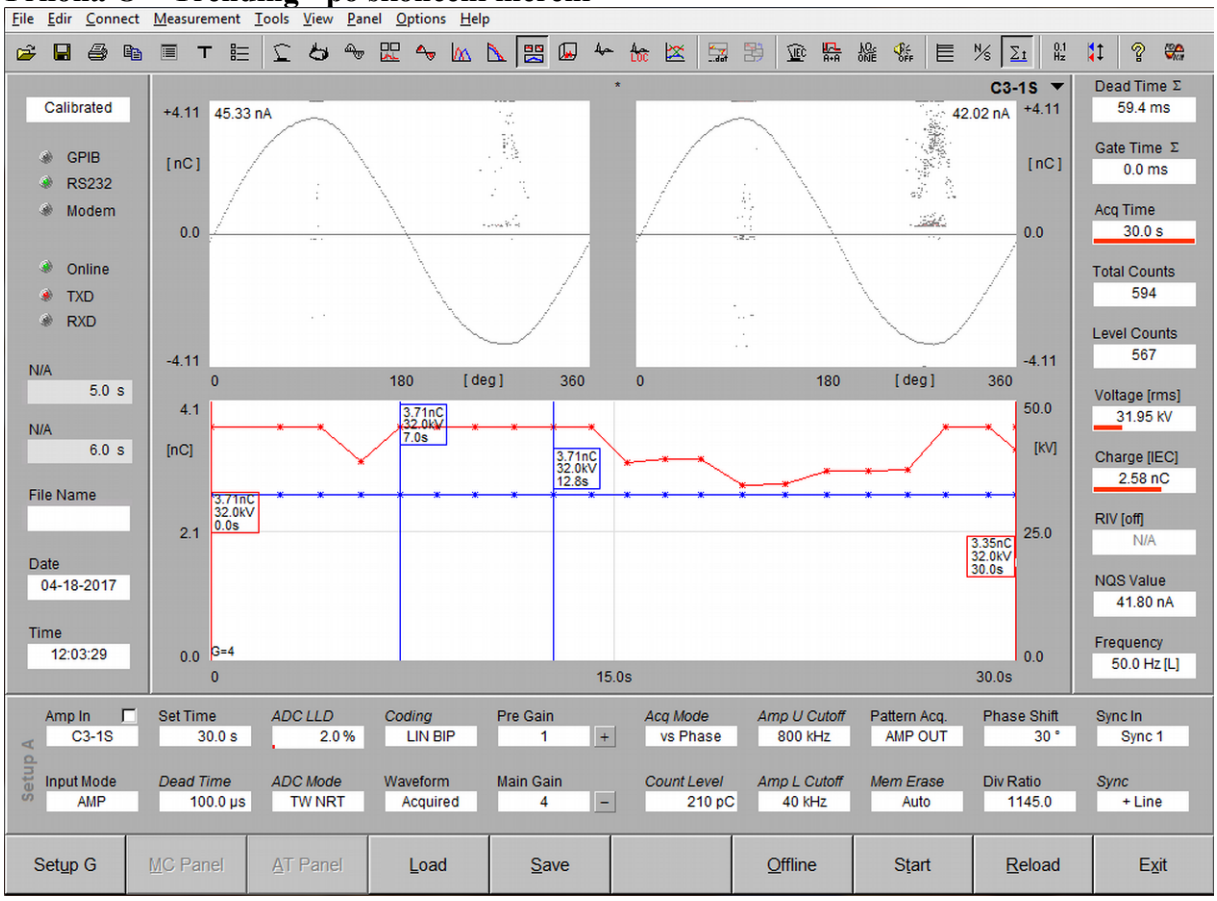
Příloha M - Projections vs. Y



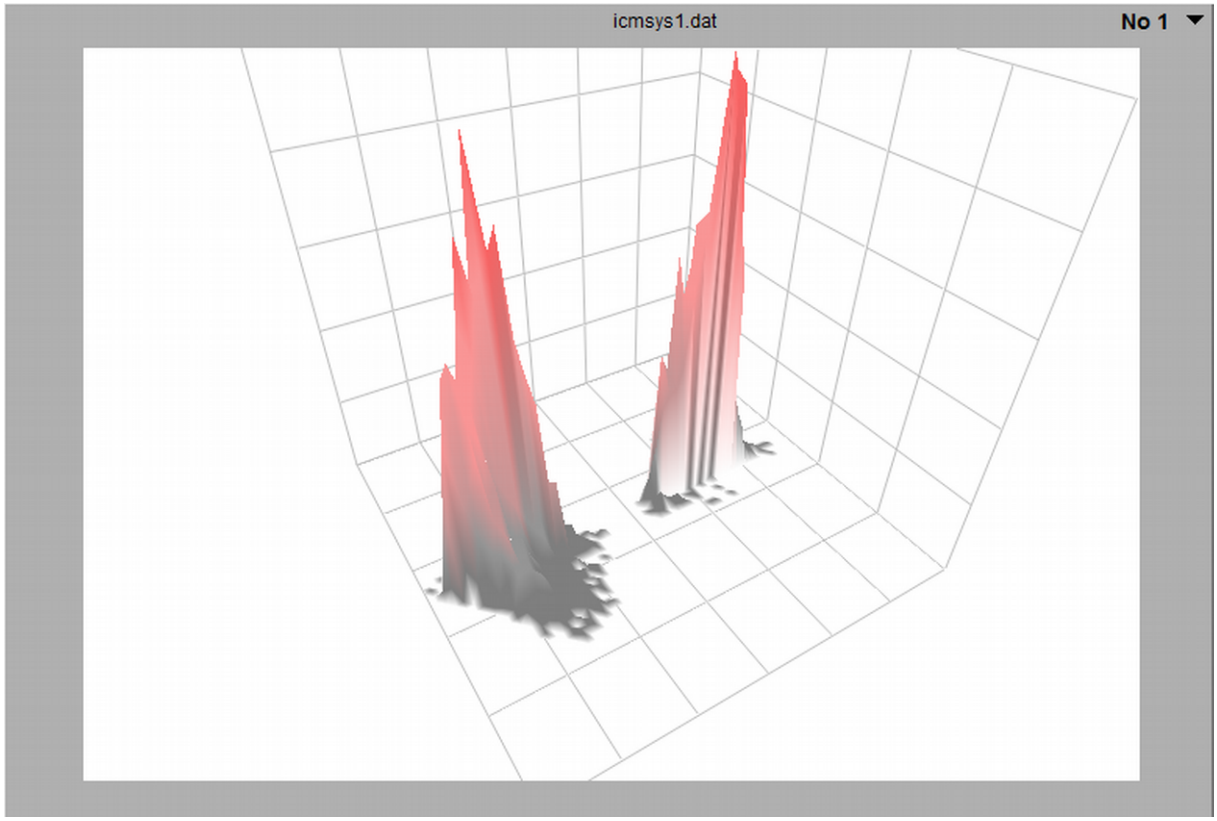
Příloha N - Trending – při měření



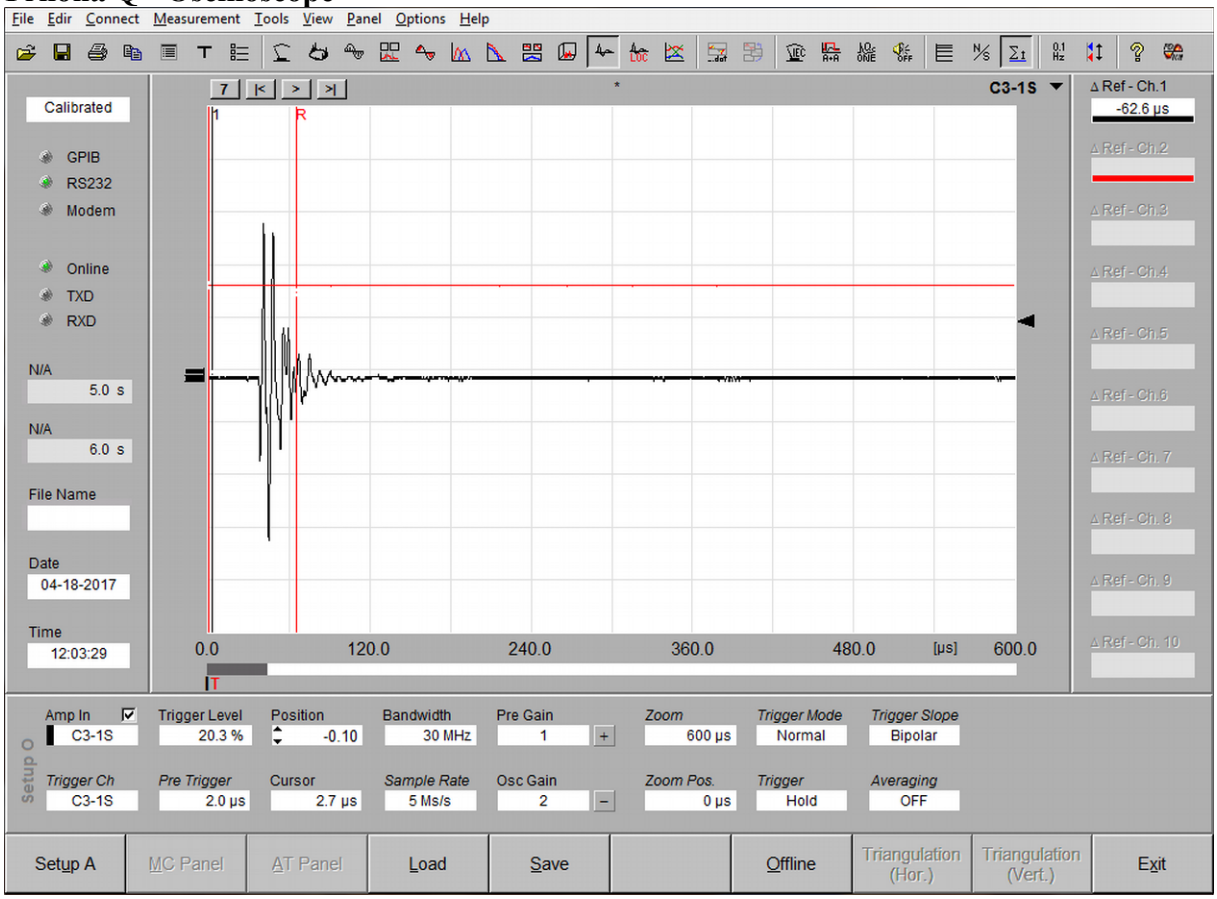
Příloha O – Trending - po skončení měření



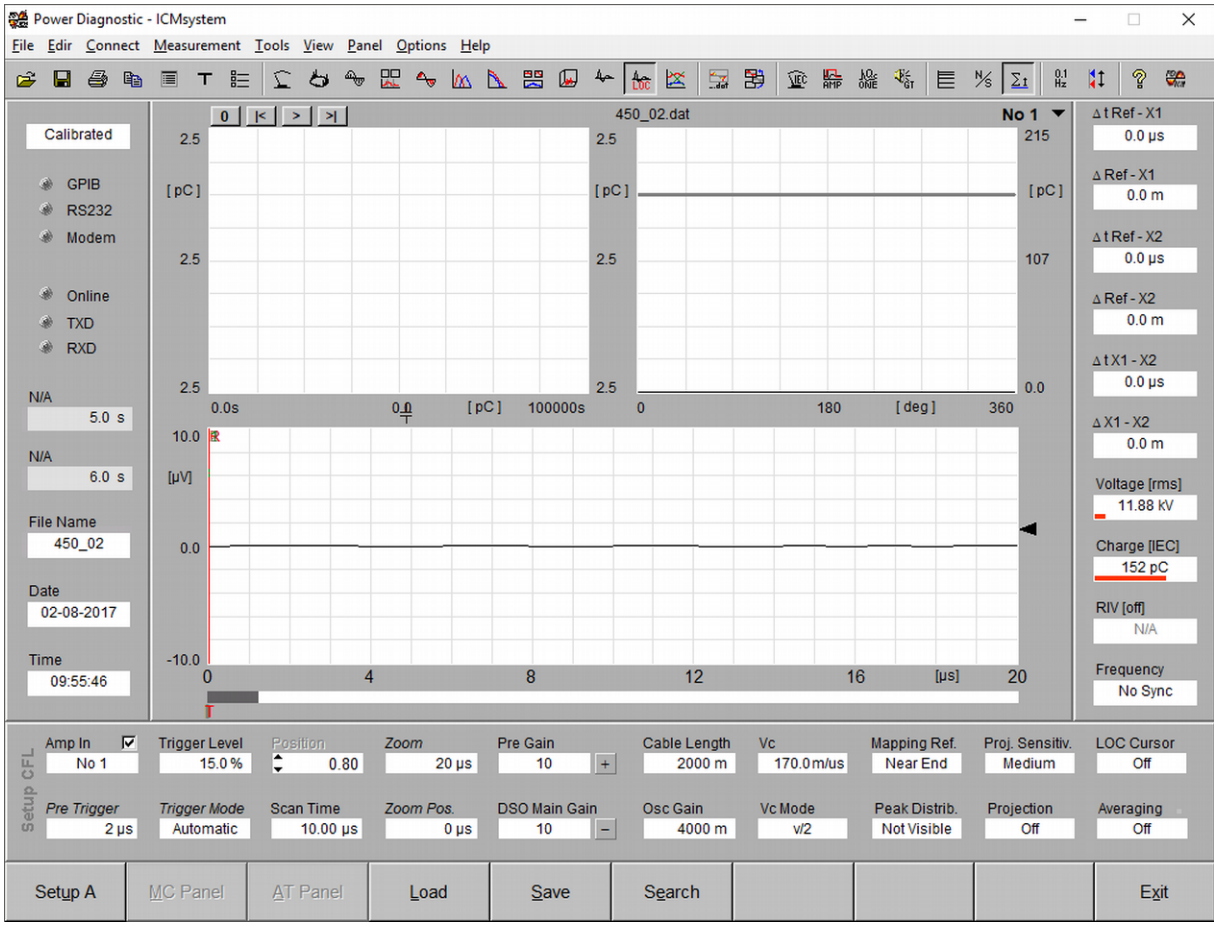
Příloha P - 3-D Animation – 3D zobrazení



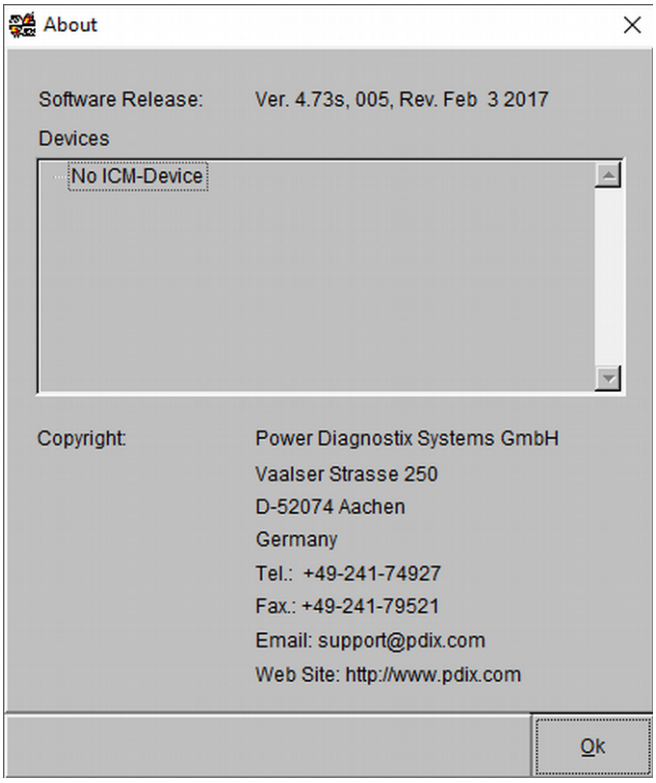
Příloha Q - Oscilloscope



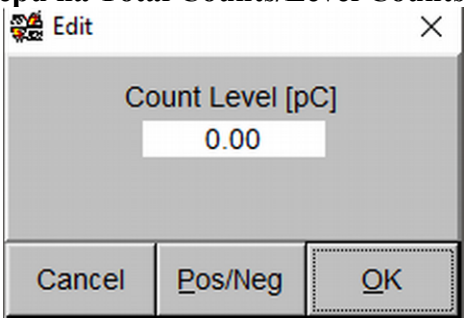
Příloha R – Cable Fault Detection



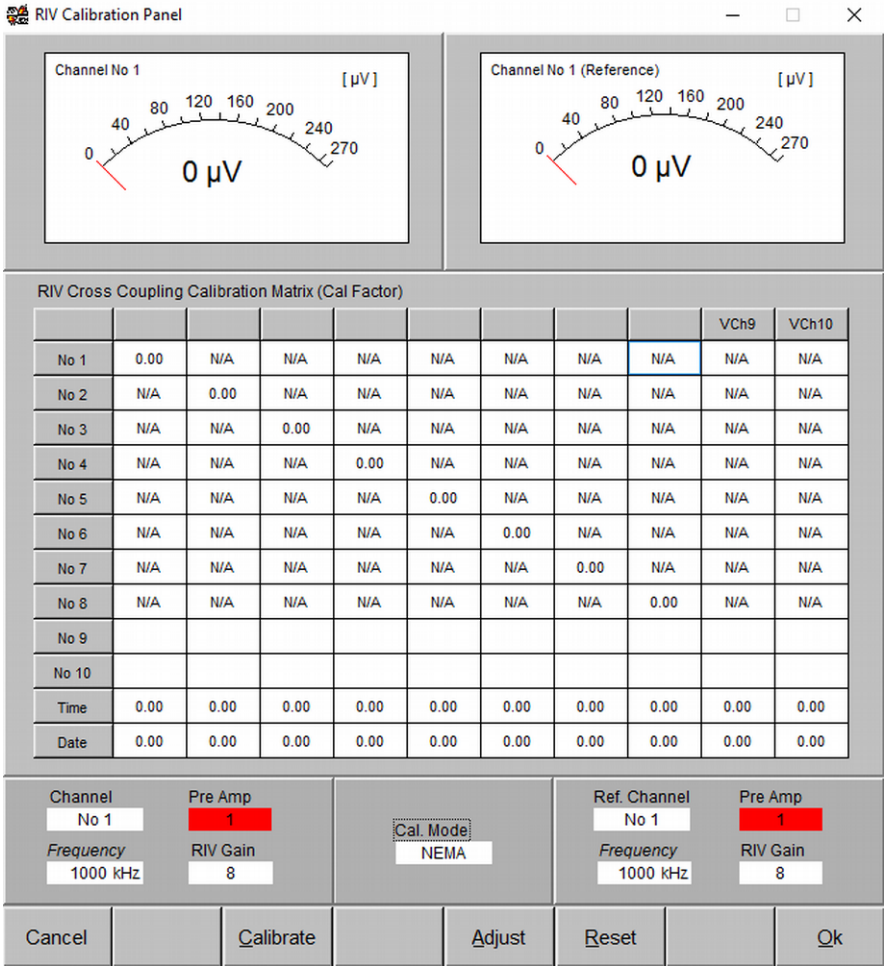
Příloha S – Help About



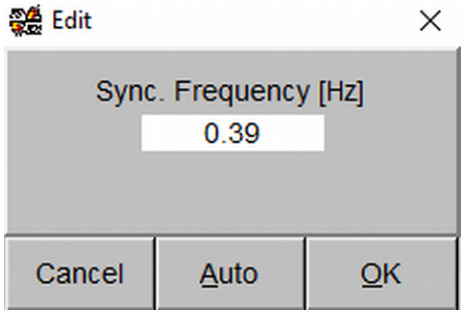
Příloha T – Dialog při poklepu na Total Counts/Level Counts či Pos Counts/Neg Counts



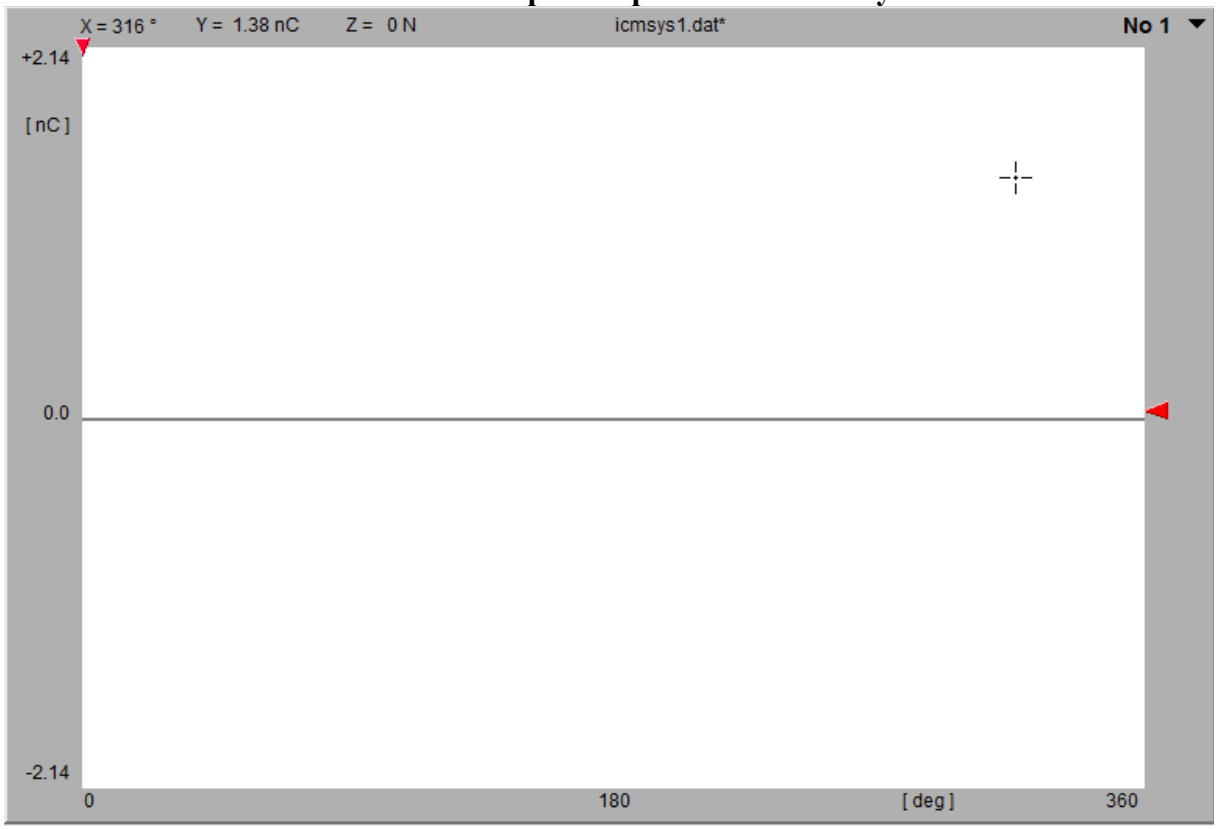
Příloha U - RIV nastavení



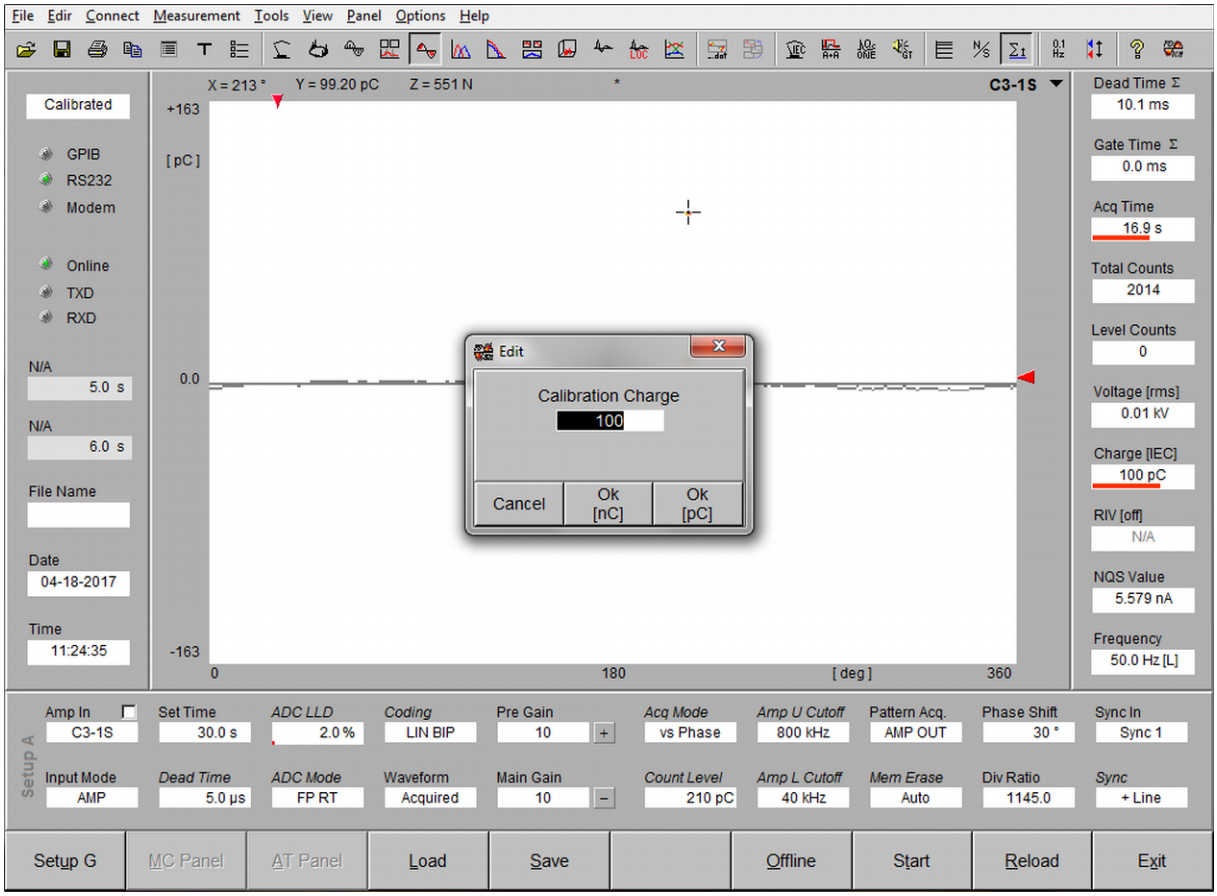
Příloha V - Edit Sync. Frequency – Nastavení synchronizační frekvence



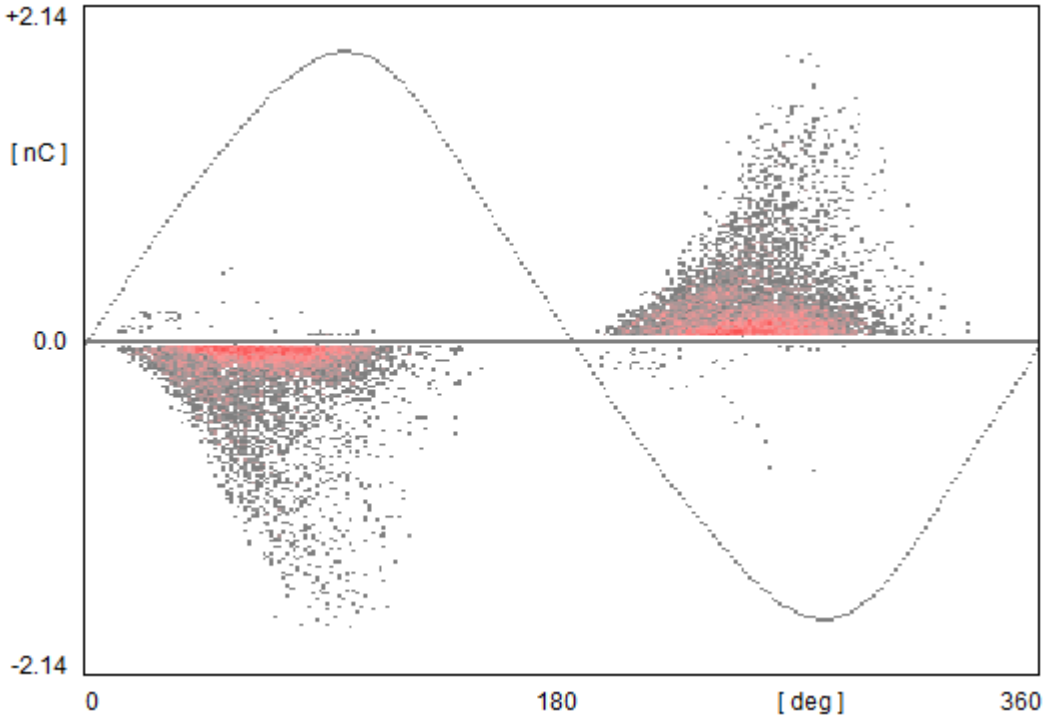
Příloha W - Obrazovka na záložce Map – bez předešlého nebo vynulovaného měření



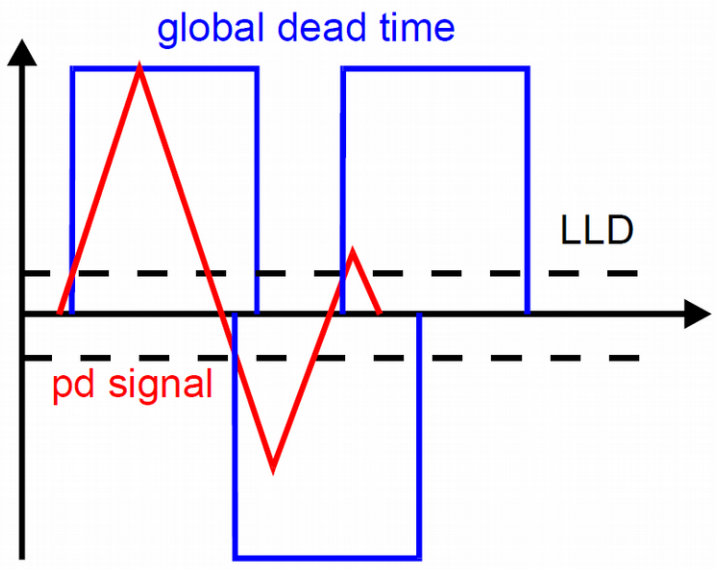
Příloha X - Kalibrace



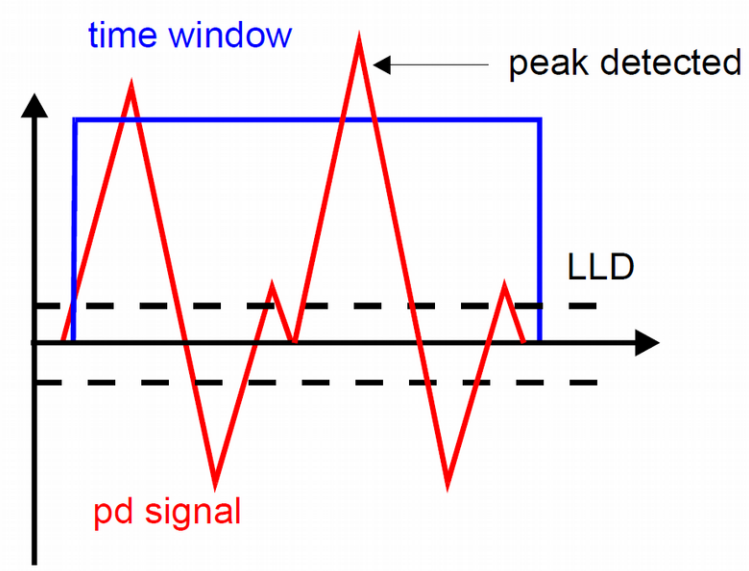
Příloha Y - Obrázek získaný uložením měření v aplikaci ICMsystem



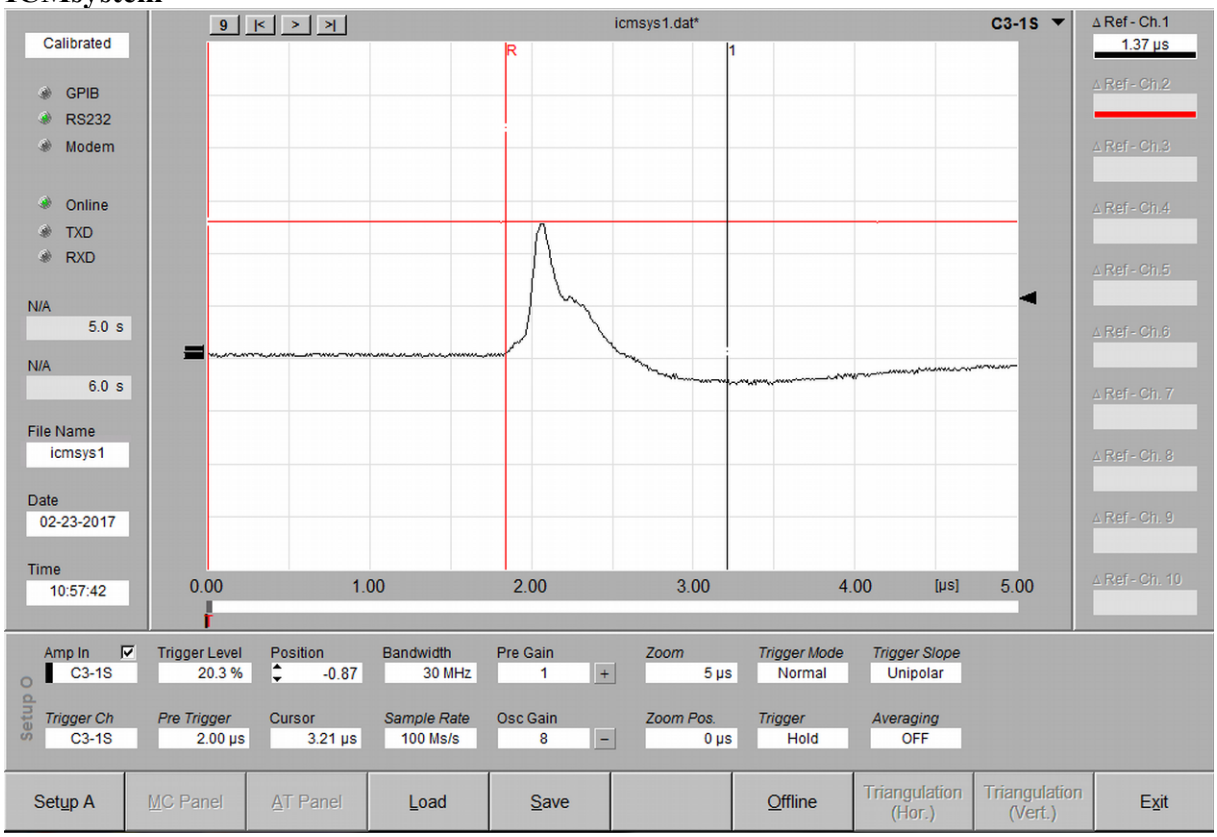
Příloha Z – Firts Peak Retriggerable



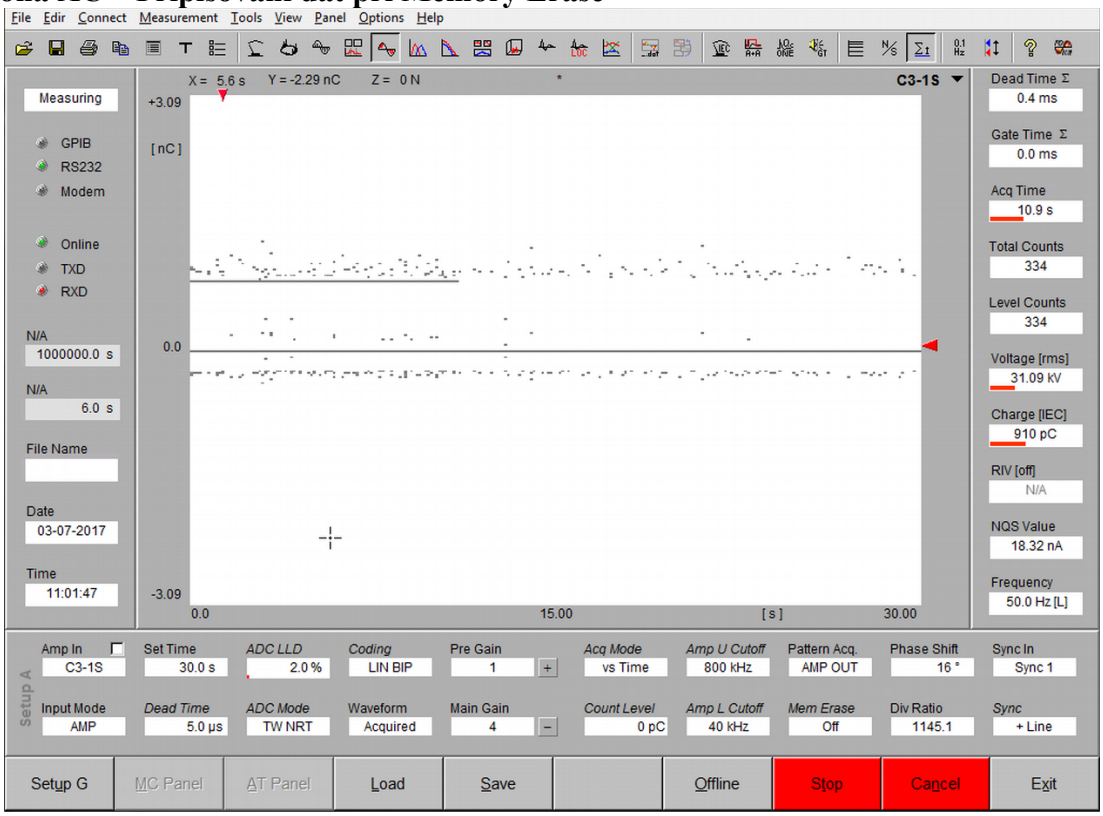
Příloha AA - Time Window Non-Retriggerable



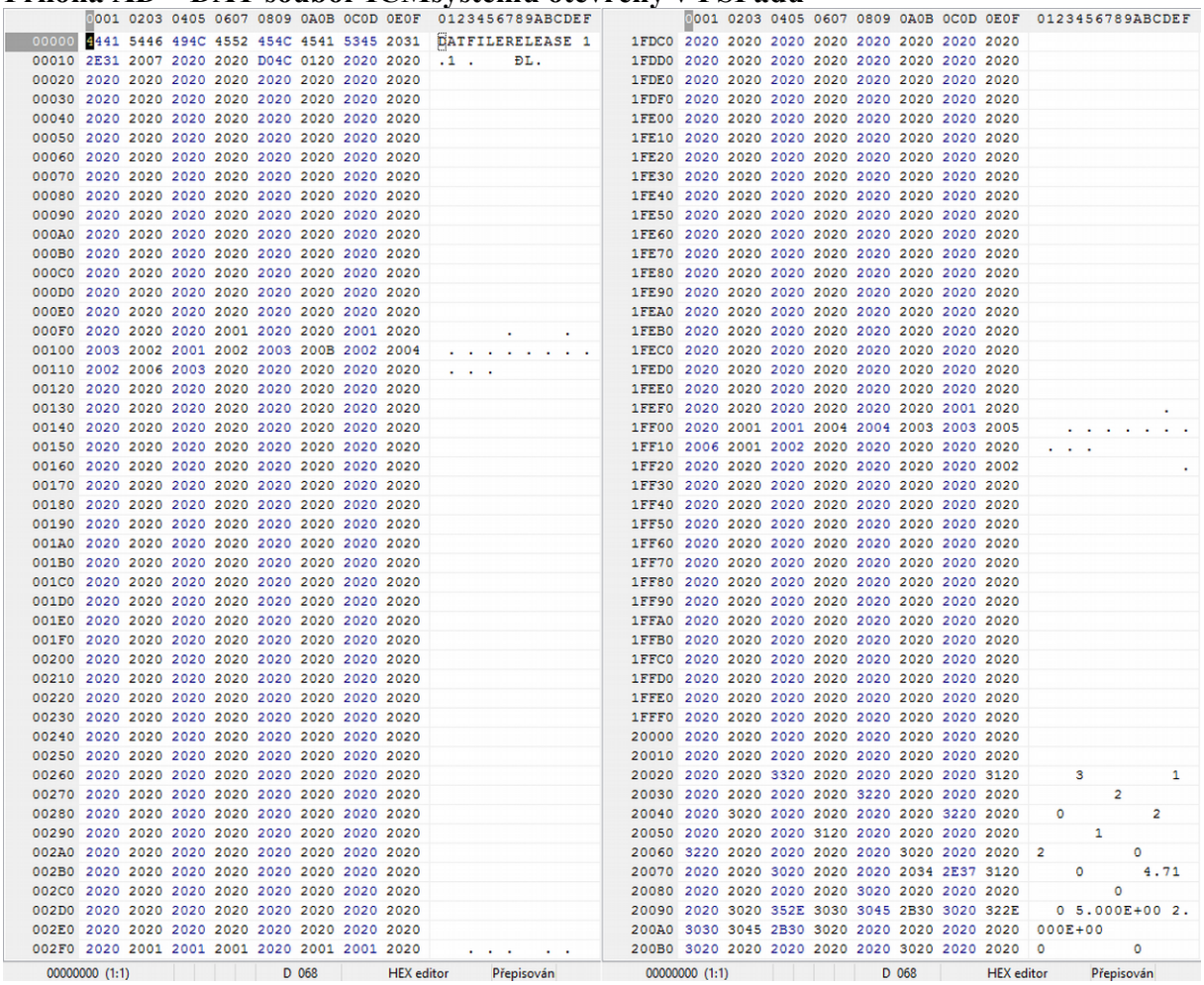
Příloha AB - ČV v transformátoru změřený osciloskopickým režimem v aplikaci ICMsystem



Příloha AC – Připisování dat při Memory Erase

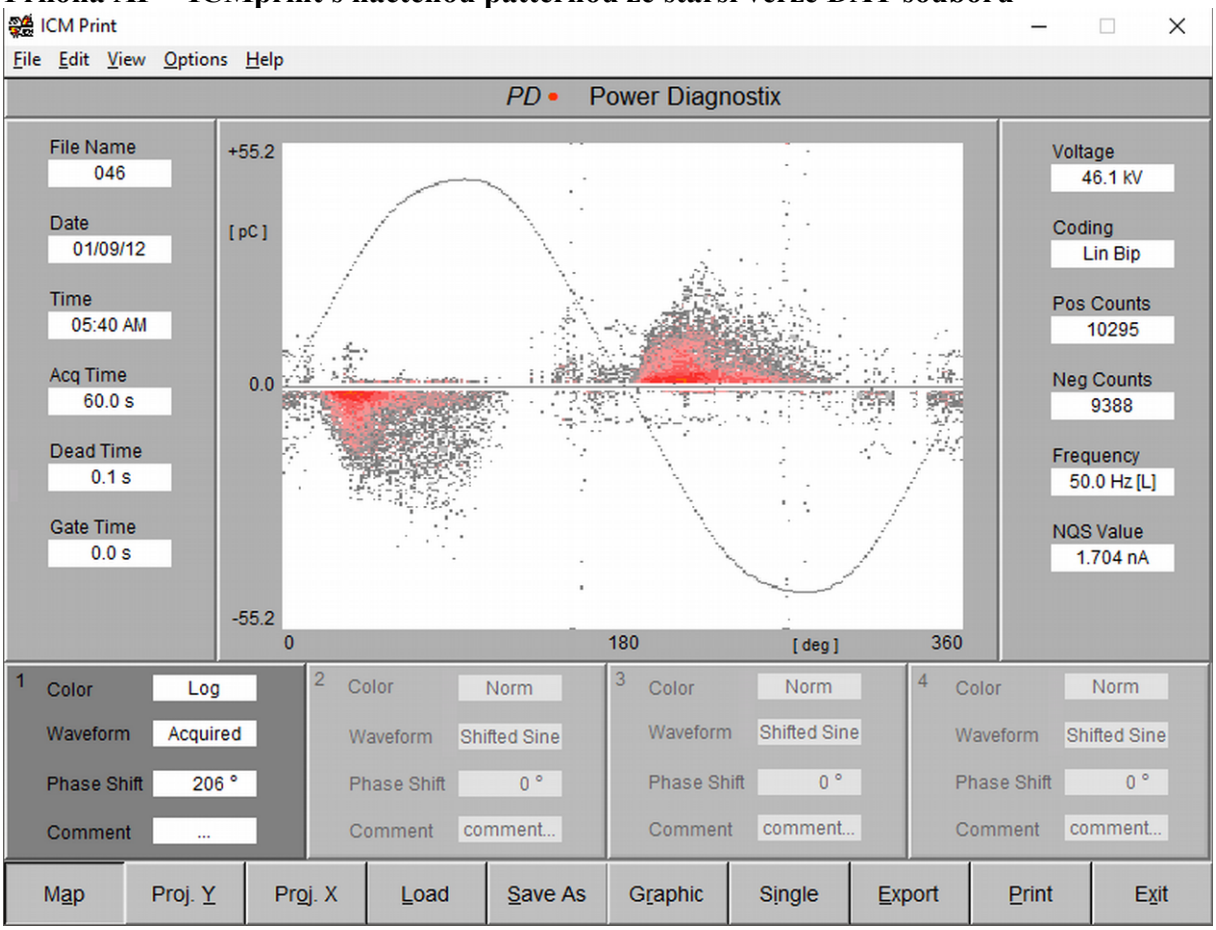


Příloha AD – DAT soubor ICMsystemu otevřený v PSPadu



Příloha AE – TXT soubor vytvořený ICMprint

Příloha AF – ICMprint s načtenou patternou ze starší verze DAT souboru



Příloha AG – Zdrojový kód ICMTransformace

```
package cz.tomasvrbka.gui;
import javax.swing.*;
import javax.swing.filechooser.FileNameExtensionFilter;
import java.awt.*;
import java.io.File;
import java.io.FileOutputStream;
import java.io.IOException;
import java.nio.file.Files;

public class MainPanel extends JPanel {
    private static final int DESTINATION_FILE_SIZE = 132248;
    private static final int SOURCE_FILE_SIZE = 164982;
    public MainPanel() {
        this.setLayout(new GridLayout(3, 3));
        this.setVisible(true);
        JTextField sourcePathJF = new JTextField();
        JTextField destinationPathJF = new JTextField();
        // Source button
        JButton sourceBT = new JButton("Vyber soubor");
        sourceBT.addActionListener(actionEvent -> {
            JFileChooser fc = new JFileChooser("Vyber soubor");
            fc.setCurrentDirectory(new File("."));
            fc.setFileSelectionMode(JFileChooser.FILES_ONLY);
            fc.setFileFilter(new FileNameExtensionFilter("Data files",
"dat"));
            int retVal = fc.showDialog(MainPanel.this, "Vyberte zdrojový
soubor");
            if (retVal == JFileChooser.APPROVE_OPTION) {

sourcePathJF.setText(fc.getSelectedFile().getAbsolutePath());
                System.out.println(destinationPathJF.getText());
                if (destinationPathJF.getText().isEmpty()) {
destinationPathJF.setText(fc.getSelectedFile().getAbsolutePath() +
".strip.dat");
                }
            }
        });
        // Destination button
        JButton destinationBT = new JButton("Vyber soubor");
        destinationBT.addActionListener(actionEvent -> {
```

```
            JFileChooser fc = new JFileChooser("Vyber soubor");
            fc.setCurrentDirectory(new File("."));
            fc.setFileSelectionMode(JFileChooser.FILES_ONLY);
            fc.setFileFilter(new FileNameExtensionFilter("Data files",
"dat"));
            int retVal = fc.showDialog(MainPanel.this, "Vyberte zdrojový
soubor");
            if (retVal == JFileChooser.APPROVE_OPTION) {
 destinationPathJF.setText(fc.getSelectedFile().getAbsolutePath());
            }
        });
        // Transformation button
        JButton transformBT = new JButton("Transformovat");
        transformBT.addActionListener(actionEvent -> {
            File sourceFile = new File(sourcePathJF.getText());
            if (sourceFile.exists() && sourceFile.isFile() &&
sourceFile.canRead()) {
                try {
                    byte[] bytes = Files.readAllBytes(sourceFile.toPath());
                    // Check source file size
                    if (bytes.length == SOURCE_FILE_SIZE) {
File destinationFile = new File(destinationPathJF.getText());
                        byte[] newBytes = new byte[DESTINATION_FILE_SIZE];
                        System.arraycopy(bytes, 0, newBytes, 0,
DESTINATION_FILE_SIZE);
                        FileOutputStream stream = new
FileOutputStream(destinationFile);
                        try {
                            stream.write(newBytes);
                            stream.flush();

                            JOptionPane.showMessageDialog(null,
                                    "Soubor byl úspěšně transformován.",
                                    "Úspěch",
                                    JOptionPane.INFORMATION_MESSAGE
                            );
                            // Clear text inputs
                            sourcePathJF.setText("");
                            destinationPathJF.setText("");
                        } finally {
                            stream.close();
```

```
                    }
                } else {
                    JOptionPane.showMessageDialog(null,
                            "Načtený soubor nemá očekávanou velikost.",
                            "Chyba",
                            JOptionPane.ERROR_MESSAGE
                    );
                }
            } catch (IOException e) {
                JOptionPane.showMessageDialog(null,
                        "Chyba při načítání dat.",
                        "Chyba",
                        JOptionPane.ERROR_MESSAGE
                );
            }
        } else {
            JOptionPane.showMessageDialog(null,
                    "Zdrojový soubor nelze otevřít.",
                    "Chyba",
                    JOptionPane.ERROR_MESSAGE
            );
        }
    });
    // Add components to panel
    this.add(new JTextArea("Zdrojový soubor: "));
    this.add(sourcePathJF);
    this.add(sourceBT);
    this.add(new JTextArea("Cílový soubor:"));
    this.add(destinationPathJF);
    this.add(new JButton("Vyber soubor"));
    this.add(new JTextArea(""));
    this.add(new JTextArea(""));
    this.add(transformBT);
  }
}
```