

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Vyhodnocování výbojové činnosti v elektrických
zařízeních**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Pavel KALINA**
Osobní číslo: **E14N0062P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektroenergetika**
Název tématu: **Vyhodnocování výbojové činnosti v elektrických zařízeních**
Zadávací katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

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

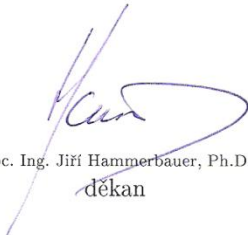
1. Zpracujte přehled v současné době používaných způsobů měření a vyhodnocování výbojové činnosti v elektrických zařízeních s ohledem na platné normativní dokumenty i nové trendy v této oblasti.
2. Realizujte měření výbojů s konkrétním měřicím systémem.
3. Na základě získaných poznatků a provedených měření diskutujte metodiku měření a možnosti vyhodnocení a interpretace změřených veličin.

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: **15. října 2015**
Termín odevzdání diplomové práce: **16. května 2016**


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




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

V Plzni dne 15. října 2015

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na částečné výboje. V první části je pro uvedení do problematiky popsán vznik výbojů, poté jsou popsány v dnešní době používané metody pro měření a vyhodnocování částečných výbojů s ohledem na platnou technickou normu. Následně je proveden rozbor digitálního měřicího přístroje od firmy Power Diagnostix. Poslední část je zaměřena na měření částečných výbojů při střídavém tak i stejnosměrném napětí, vyhodnocení výsledků a metodiky měření.

Klíčová slova

částečné výboje, výbojová činnost, měřicí systém, ICM systém, snímací impedance, impulzy, zdánlivý náboj

Abstract

This diploma thesis is focused on the partial discharge. The first part is described generation of the partial discharge and introduction to the problems. Then they are described used methods for measurement and evaluation of partial discharge according to applicable technical standard nowadays. Subsequently, is described an analysis of digital measuring device from Power Diagnostix. The last part is focused on measurement the partial discharge for AC and DC voltage, the results evaluation and the measurement methodologie.

Key words

partial discharges, discharge activity, measurement system, the ICM system, the sensing impedance, impulses, apparent charge

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 12.5.2016

Pavel Kalina

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucí diplomové práce doc. Ing. Evě Müllerové, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK V KAPITOLE 1	10
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK V KAPITOLE 2	10
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK V KAPITOLE 3	10
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK V KAPITOLE 4	11
ÚVOD	12
1 OBECNĚ O ČÁSTEČNÝCH VÝBOJÍCH	13
1.1 ČÁSTEČNÉ VÝBOJE	13
1.1.1 Vnější částečné výboje	14
1.1.2 Povrchové částečné výboje.....	15
1.1.3 Vnitřní částečné výboje.....	16
1.2 VELIČINY CHARAKTERIZUJÍCÍ ČÁSTEČNÉ VÝBOJE	18
1.3 PŮSOBENÍ ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ NA IZOLAČNÍ MATERIÁLY	20
2 METODY MĚŘENÍ ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ	23
2.1 ELEKTRICKÉ METODY	23
2.1.1 Globální metoda měření částečných výbojů.....	24
2.1.2 Metoda induktivně vázané sondy.....	27
2.1.3 Metoda diferenciální elektromagnetické sondy.....	28
2.1.4 Kapacitní drážková sonda	28
2.1.5 LEMKE sonda	29
2.1.6 UHF senzory.....	30
2.2 NEELEKTRICKÉ METODY	31
2.2.1 Akustická detekce.....	32
2.2.2 Optická detekce.....	33
2.2.3 Chemická detekce	33
3 DIGITÁLNÍ MĚŘICÍ SYSTÉM ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ	34
3.1 HARDWARE DIGITÁLNÍHO MĚŘICÍHO SYSTÉMU	36
3.1.1 Jednotlivé moduly měřicího systému	36
3.1.2 Předzesilovač a hlavní zesilovač	37
3.1.3 Snímací impedance s vazební kapacitou (vazební jednotka).....	38
3.1.4 Kalibrátor	40
3.2 SOFTWARE DIGITÁLNÍHO MĚŘICÍHO SYSTÉMU.....	41
3.2.1 Nastavení hodnot detektoru	43
3.2.2 Zobrazování naměřených dat ICM systému	45
4 VLASTNÍ MĚŘENÍ ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ	49
4.1 MĚŘENÍ KORÓNY	50
4.2 MĚŘENÍ VNITŘNÍCH VÝBOJŮ	51
4.3 MĚŘENÍ KLOUZAVÝCH VÝBOJŮ	52

I.	<i>Vliv volby mrtvé doby.....</i>	54
II.	<i>Vliv změny prahové úrovně LLD %.....</i>	57
III.	<i>Porovnání trigovacích režimů</i>	61
IV.	<i>Vliv změny frekvenčního pásma.....</i>	64
V.	<i>Vliv zesílení.....</i>	68
4.4	STEJNOSMĚRNÉ VÝBOJE	69
I.	<i>Vliv časové doby měření u koróny.....</i>	71
II.	<i>Vliv časové doby u stejnosměrných vnitřních výbojů</i>	73
5	ZÁVĚR	76
	SEZNAM LITERATURY	78
	PŘÍLOHY	1

Seznam symbolů a zkratk

Seznam symbolů a zkratk v kapitole 1

q	zdánlivý náboj impulzu částečného výboje	(pC)
n	četnost impulzů	(-)
Φ_1	fázový úhel	(°)
t_i	doba měření	(s)
I	střední proud částečných výbojů	(Cs ⁻¹)
T	časová perioda	(s)
D	střední kvadratický součet	(C ² s ⁻¹)
P	výkon částečných výbojů	(W)
u_1	okamžitá hodnota zkušebního napětí	(V)
U_1	zapalovací napětí částečných výbojů	(kV)
U_e	zhášecí napětí částečných výbojů	(kV)
H	vodík	
C	uhlík	
O	kyslík	
XLPE	zesítný polyetylen	

Seznam symbolů a zkratk v kapitole 2

T_1	doba čela impulzu	(ns)
T_2	doba půltýlu	(ns)
Q	náboj	(pC)
C_k	vazební kapacita	(F)
Z_{mi}	měřicí impedance	(Ω)
C_a	kapacita dutinky izolačního systému	(F)
Z	blokovací filtr	(Ω)
i_a, i_k	nabíjecí kapacitní proud	(A)
t	doba trvání výboje	(s)
ΔU_a	úbytek napětí na zkoušeném objektu vyvolaný výbojem	(V)
i(t)	proudový impulz	
q	zdánlivý náboj impulzu částečného výboje	(pC)
$\Delta U'_a$	změna napětí v měřicím obvodu	(V)
q_m	měřitelný náboj	(pC)
Δf	šířka pásma	(Hz)
+i, -i	kladný, záporný proud	(A)
RLC	paralelní spojení daných prvků	
UHF	senzor s využitím ultra vysoké frekvence	
PD	partial discharge (částečné výboje)	
HV	hight voltage (vysoké napětí)	
AE	akustická emise	
AC / DC	střídavé / stejnosměrné napětí	

Seznam symbolů a zkratk v kapitole 3

GPIB	rozhraní zajišťující komunikaci s počítačem
RS232	další rozhraní které je k dispozici
AC2	napájecí modul

CTRL4	řídící modul	
DPR3	modul obsahující logiku, paměť a měřící obvody	
AMP3	modul obsahující hlavní zesilovač a pásmové filtry	
RPA1L	typ předzesilovače	
ADC3	modul představující A/D převodník	
GATE3	modul stejný jako AMP3 ale navíc měření signálu šumu	
AMP	výstup měřeného signálu na snímací impedanci	
VM	výstup na snímací impedanci lze získat obraz zkuš. napětí	
C_k	vazební kapacita	(pF)
C	kapacita snímací impedance	(μ F)
R_m	rezistor ve snímací impedanci	(Ω)
L	filtrovací indukčnost	(mH)
Q	činitel jakosti	
f_0	rezonanční frekvence	(kHz)
T_r	časová rozlišovací schopnost	(μ s)
CAL1A	typ kalibrátoru	
k	konstanta převodu	(-)
C_{kal}	nízkonapěťový kondenzátor kalibrátoru	(pF)
U_{kal}	impulzy skokového napětí kalibrátoru	(V)
Q_{kal}	kalibrační náboj	(pC)
TXD	přenos dat do přístroje	
RXD	přenos dat z přístroje	

Seznam symbolů a zkratk v kapitole 4

CAL1A	typ kalibrátoru	
HST1	zesilovač přivádějící průběh zkušebního napětí	
DPR3	modul obsahující logiku, paměť a měřící obvody	
U_n	výstupní napětí vysokonapěťového zdroje	(kV)
S_n	výkon vysokonapěťového zdroje	(kVA)
f	frekvence	(Hz)
Q_{kal}	kalibrační náboj	(pC)
VTDO	zkušební transformátor	
U_1, U_2	vstupní, výstupní napětí	(V)
LLD	spouštěcí prahová úroveň	
FP RT	režim s opětovným spouštěním	
FP NRT	režim bez opětovného spouštění	
TW NRT	režim spouštění v časovém okně	
Δf	šířka frekvenčního pásma	(kHz)
T	časová konstanta integračního členu	(ns)
τ	časová konstanta impulzů ČV	(ns)
AC, DC	střídavé, stejnosměrné napětí	
q_a	nahromaděný zdánlivý náboj	(pC)
m	počet impulzů částečných výbojů	

Úvod

Předkládaná práce je zaměřena na způsoby měření a vyhodnocování výbojové činnosti v elektrických zařízeních. Z důvodu bezpečnosti provozu zařízení je nutné provádět odizolování určitých částí. Zde se mohou použít pevné, kapalné nebo plynné izolační systémy, které jsou během provozu zařízení namáhány různými vlivy, např. částečnými výboji. Ty mají za následek zhoršení izolačních vlastností, které se negativně projeví na životnosti a spolehlivosti elektrického zařízení.

I v dnešní době vzhledem k nedokonalosti při výrobě izolačních systémů dochází vlivem opakující se činnosti částečných výbojů ke značnému stárnutí izolace, což může vést k úplnému proražení. Proto jsou dnes kladeny velké požadavky na výzkum detekce částečných výbojů, která by odhalila výbojovou činnost a tím by došlo ke včasné výměně nebo opravě části elektrického zařízení.

Práce popisuje vznik částečných výbojů a jejich důsledky na izolační materiály. Dále jsou v práci popsány elektrické i neelektrické metody, které jsou dnes nejčastěji používány a normou definovány pro měření částečných výbojů v elektrických zařízeních. Pozornost je také věnována novým trendům v této oblasti, jako jsou např. UHF senzory. Největší pozornost je však věnována digitálnímu měřicímu přístroji částečných výbojů ICM systém od firmy Power Diagnostix, který prošel aktualizací softwaru. Z hlediska aktualizace softwaru byl měřicí přístroj vybaven novými funkcemi, které vyžadovaly částečnou změnu hardwaru.

V práci jsou popsány jeho hlavní funkce a parametry, které je nutno nastavit pro optimální výsledky měření částečných výbojů. Dále bylo provedeno měření výbojové činnosti s daným měřicím systémem pro střídavé napětí, došlo k porovnání a vyhodnocení naměřených veličin s nastavenými parametry měřicího systému pro všechna měření. Následně byly uvedeny požadavky na měřicí systém podle *normy ČSN EN 60270*.

V poslední řadě je provedeno seznámení s výboji při (*DC*) napětí a provedeno porovnání rozdílů při měření mezi (*AC*) a (*DC*) napětím. Na závěr bylo provedeno měření částečných výbojů při stejnosměrném napětí pro různé časy a zhodnocení vlivu doby měření na četnost výbojů.

1 Obecně o částečných výbojích

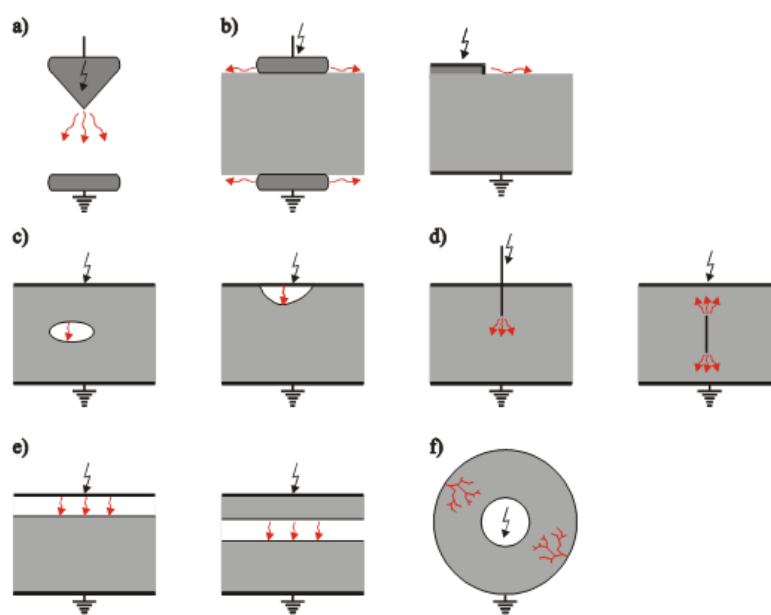
1.1 Částečné výboje

V elektrických strojích, zařízeních ale i elektrických vedeních apod. je důležité detekovat přítomnosti elektrických výbojů v pevném, plynném tak i kapalném dielektriku izolačního systému (1). Tyto izolační systémy mají svá slabá místa, která se vyskytují uvnitř dielektrika a mají nejčastěji lokální charakter¹. Pokud se tato místa nacházejí mezi nabitými elektrodami, může dojít k překročení elektrické pevnosti dielektrika v daném místě, což vede ke vzniku výboje (2). Jedním z druhů těchto elektrických výbojů jsou částečné výboje.

Částečný výboj je charakterizován jako neúplný elektrický výboj, který vzniká v oblasti nehomogenit uvnitř dielektrika, např. dutinka, bublina. V tomto případě dochází k částečnému přemostění izolace mezi vodiči nebo elektrodami, zatímco zbylá část neporušeného dielektrika má i nadále tak velikou elektrickou pevnost, že dokáže odolávat namáhání provozním či zkušebním napětím (2). Obvykle se výboje objevují v izolaci, kde je velké elektrické namáhání, tj. mezi izolací a vodičem, mezi izolací a železem stroje, nebo na povrchu izolace v okolí vodičů. Proto můžeme částečné výboje rozdělit z hlediska výskytu výboje v dielektriku. Nejčastěji se výboje objevují jako impulzy, které mají dobu trvání menší než 1 μ s (1).

Vznik těchto uvedených částečných výbojů zapříčiňuje špatná výroba izolačních systémů nebo elektrické namáhání, překračující danou mez, tj. nedodržení technologických postupů, užití nepříliš přesné technologie, špatné navržení, ale také se zde projeví překročení provozních podmínek izolačních systémů, jako je např. elektrická pevnost (1). Částečné výboje negativně ovlivňují vlastnosti izolačních systémů elektrickými, erozivními, chemickými a tepelnými vlivy. To má za následek degradaci izolace, urychlení stárnutí a tím snížení její spolehlivosti a životnosti.

¹ Jedná se například o nedokonalý pevný termoplastický izolant, který obsahuje dutinku nebo nehomogenitu.



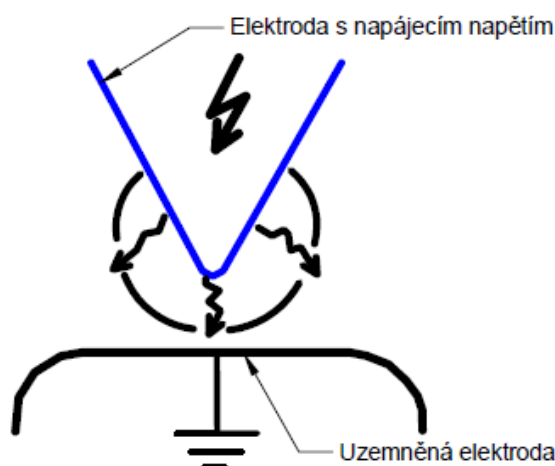
Obr. 1-1: Vznik částečných výbojů a) vnější, b) povrchové, klouzavé výboje, c, d, e, f) vnitřní částečné výboje (2)

Částečné výboje dělíme z hlediska místa jejich výskytu na vnější, vnitřní a povrchové výboje, viz Obr. 1-1.

- a) **Vnější částečné výboje** - Tyto výboje jsou specifické u elektrod malých poloměrů, jako je uspořádání hrot - deska, nebo tenkých vodičů ve vzduchu, plynu nebo kapalině.
- b) **Povrchové částečné výboje** - Jedná se o výboje, ke kterým dochází v okolí elektrod na rozhraní pevného a plynného dielektrika, např. klouzavé výboje.
- c) **Vnitřní částečné výboje** - Vznik těchto výbojů je nejčastěji v plynech, které jsou obklopeny kapalným nebo pevným dielektrikem. Jedná se o plynné dutinky nebo bubliny v pevném či kapalném dielektriku.

1.1.1 Vnější částečné výboje

Tento typ výboje nejčastěji vzniká v okolí ostrých kovových hrotů, které jsou umístěny v plynném prostředí, jako je např. uspořádání hrot - deska (1). Jak již vidíme na Obr. 1-2, kde se nachází elektroda, na níž je přivedené napájecí napětí a deska (druhá elektroda), která je uzemněná.



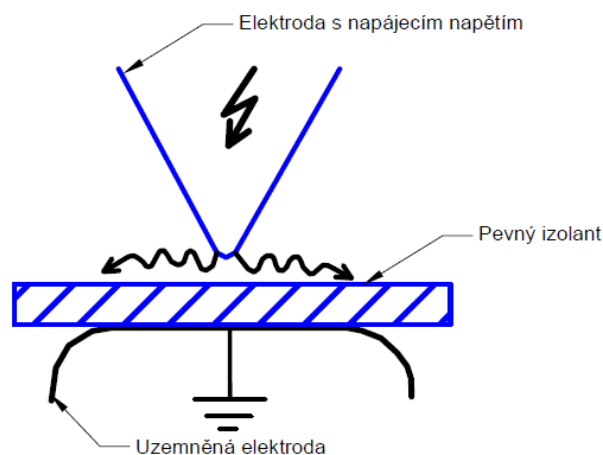
Obr. 1-2: Vnější částečný výboj v uspořádání hrot - deska (3)

Ke vzniku částečných výbojů dochází především na kovovém hrotu elektrody, kde je největší elektrické pole, zatímco v ostatním prostoru je intenzita elektrického pole malá. V místech kde je malé elektrické pole, nedojde v lavině k vytvoření dostatečného počtu nosičů náboje, výboj je neúplný a obklopuje elektrody. To se projevuje jako slabé světélkování, doprovázené šumem a praskáním. Takovému jevu se říká koróna. Jestliže zvýšíme přiložené napětí, potom dojde k přechodu z koróny na souvislý výboj, který je závislý na vzdálenosti mezi elektrodami. (4)

1.1.2 Povrchové částečné výboje

Jestliže překročíme velikost střídavého napětí mezi elektrodami o určitou velikost, začnou vznikat na povrchu pevného izolantu tzv. klouzavé výboje. Ty se vyskytují nejčastěji v praxi u průchodek, kondenzátorů, vystupujících vinutí z drážek točivých strojů, kabelových koncovek, atd...

Děj si lze představit jako dvě elektrody rozdílných napěťových hladin, které jsou od sebe izolovány pevným izolantem.



Obr. 1-3: Vznik klouzavého výboje

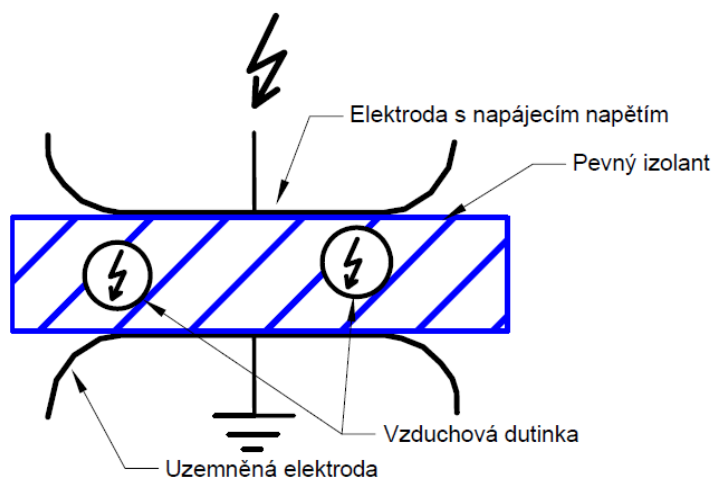
Jestliže zvýšíme napětí na elektrodě, začne se při určitém napětí objevovat souvislý výbojový prsten. Pokud napětí opět vzroste, bude se výboj šířit po povrchu izolantu ve tvaru drobných slabě světélkujících vláken, jejichž délka je závislá na polaritě elektrody. Zvýšíme-li napětí na danou kritickou hodnotu, vlákna začnou podstatně rychleji růst a některé se mohou rozvětlovat i značně daleko. Vytvářejí tak stvoly, které světélkují modrobílou barvou a jsou doprovázeny praskáním. Pokud by se nadále zvyšovalo napětí, tyto stvoly začnou přecházet na klouzavé jiskry, které mohou přeskočit na druhou elektrodu, jak již vidíme na Obr. 1-4. (5)



Obr. 1-4: Ukázka klouzavého výboje na pevném izolantu

1.1.3 Vnitřní částečné výboje

Jde o typ částečných výbojů vznikajících ve vzduchové nehomogenitě uvnitř dielektrika, jestliže přiložíme vnější napětí na daný zkoumaný objekt (1). Pokud se zvýší napětí, objeví se v dutinkách výboje, které mají nejčastěji lavinový nebo jiskrový charakter. Nejnižší napětí, při kterém se vyskytnou částečné výboje, nazýváme počáteční napětí částečných výbojů U_i , jak je již uvedeno v kapitole 1.2 (5).



Obr. 1-5: Výbojová činnost v dutince uvnitř dielektrika (6)

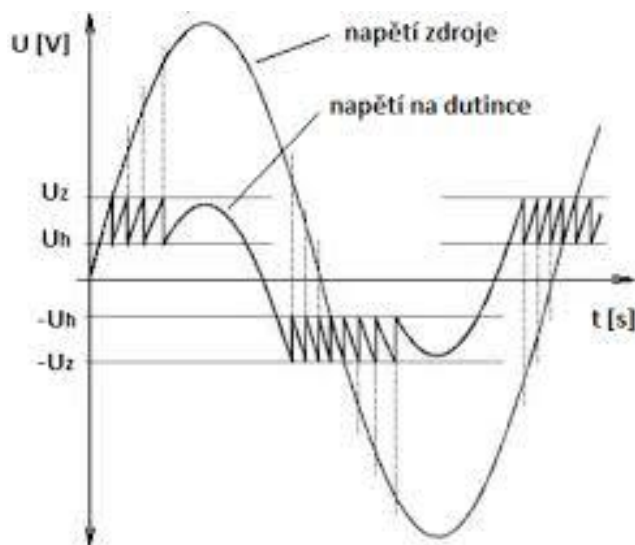
Vznik výbojové činnosti je důsledkem rozdílného elektrického namáhání v plynu dutinky a okolního pevného nebo kapalného dielektrika. Tato namáhání jsou rozdělena v opačném poměru, tudíž plyn v dutince je vždy více namáhán než okolní izolant. Z toho plyne, že v dutince je vždy elektrická pevnost menší a tudíž v ní dojde k průrazu při nižším napětí, než je průrazné napětí okolního izolantu. (4)

Podle Paschenova zákona můžeme říci, že při stejném napětí k přeskoku ve všech dutinkách současně nedojde, avšak dojde k postupným přeskokům při různě velikých napětích v závislosti na velikosti dutinek. Při těchto přeskokách se molekuly plynu rozpadají na ionty kladné a záporné, které se pohybují v elektrickém poli opačným směrem. To vede k nahromadění náboje na stěnách dutinky a tím vytváří uvnitř dutinky elektrické pole opačné polarity. Výboj se v dutince vyskytuje do té doby, dokud není na protilehlých stěnách v dutince nahromaděný tak veliký náboj, aby napětí kleslo na hodnotu zhasacího napětí U_e , při němž výboj zhasíná. Toto napětí je uvedeno v kapitole i). (1) (4)

Zvyšováním přiloženého napětí na izolantu dochází k nárůstu napětí na dutince až do hodnoty zápalného napětí a děj se tak opakuje.

Pokud se však přiložené napětí na izolantu nezvyšuje, nahromaděný náboj na stěnách dutinky klesá. Tím roste napětí v dutince až na hodnotu zápalného napětí, kdy vzniká v dutince nový výboj. Rychlost klesání nahromaděného náboje na stěnách dutinky je závislá na povrchovém odporu dutinky a vnitřním odporu daného izolantu. Rychlost je rozhodujícím prvkem zobrazující velikost časového intervalu mezi dvěma výboji, které po sobě následují v jedné dutince. Ke srovnání můžeme pohlédnout na nekvalitní izolanty, kde je interval kratší než 1 s, naopak ve vynikajících izolantech může být tento interval až několik hodin. (4) (1)

Přivedením střídavého napětí se tyto děje vyskytují opakovaně v obou polaritách, jak je již zobrazeno na Obr. 1-6 (4).



Obr. 1-6: Průběh napětí na dutince s výboji, při střídavém napětí zdroje (7)

1.2 Veličiny charakterizující částečné výboje²

Elektrické parametry jsou nejdůležitější z hlediska hodnocení aktivity částečných výbojů. Máme několik veličin, které se dají naměřit a několik veličin které jsou odvozené. Veličiny slouží k charakterizování částečných výbojů a definuje je *norma ČSN EN 60270*. Jedná se tedy o veličiny:

a) Zdánlivý náboj impulzu částečného výboje q

Je takový náboj, který je-li injektován ve velmi krátkém čase mezi svorky zkoušeného objektu v předepsaném zkušebním obvodu, by měl na měřicím přístroji způsobit stejnou výchylku jako vlastní proudový impulz částečných výbojů. Obvykle je vyjádřen v pikocoulombech (pC).

b) Četnost impulzů n

Poměr mezi celkovým počtem impulzů částečných výbojů zaznamenaných ve vybraném časovém intervalu a dobou trvání tohoto intervalu.

² Kapitola 1.2 převzata z normy ČSN EN 60270

c) Fázový úhel Φ_i a čas t_i výskytu impulzu částečného výboje

$$\Phi_i = 360(t_i/T) (\text{°}) \quad 1-1$$

Kde t_i je čas měřený mezi předešlým kladným průchodem zkušebního napětí nulou a impulzem částečného výboje a T je perioda zkušebního napětí.

d) Střední proud částečných výbojů I

Odvozená veličina představující součet absolutních hodnot jednotlivých úrovní zdánlivého náboje q_i během zvoleného referenčního časového intervalu T děleno tímto intervalem:

$$I = \frac{1}{T} [|q_1| + |q_2| + \dots + |q_i|] (\text{Cs}^{-1}) \quad 1-2$$

e) Střední kvadratický součet D

Odvozená veličina, která je součtem ploch jednotlivých úrovní zdánlivého náboje q_i během zvoleného referenčního časového intervalu T děleným tímto intervalem.

$$D = \frac{1}{T} [q_1^2 + q_2^2 + \dots + q_i^2] (\text{C}^2\text{s}^{-1}) \quad 1-3$$

f) Výkon částečných výbojů P

Odvozená veličina, která představuje střední výkon impulzu dodaný na svorky zkoušeného objektu způsobený hodnotami zdánlivého náboje q_i během zvoleného referenčního časového intervalu T .

$$P = \frac{1}{T} [q_1 u_1 + q_2 u_2 + \dots + q_i u_i] (\text{W}) \quad 1-4$$

kde u_1, u_2, \dots, u_i jsou okamžité hodnoty zkušebního napětí v okamžiku výskytu t_i jednotlivých úrovní zdánlivého náboje q_i .

g) Zkušební napětí částečných výbojů

Předepsané napětí přiložené předepsaným zkušebním postupem pro měření částečných výbojů, během kterého by neměl zkoušený objekt vykazovat částečné výboje překračující úroveň předepsaných částečných výbojů.

Předepsaná úroveň částečného výboje je největší úroveň jakékoli veličiny vztahující se k impulzům částečných výbojů přípustná ve zkoušeném objektu. U zkoušek střídavým napětím je předepsaná úroveň zdánlivého náboje q nejvyšší opakovaně se vyskytující úroveň částečných výbojů.

h) Počáteční napětí částečných výbojů U_i

Je přiložené napětí, při kterém jsou poprvé ve zkoušeném objektu pozorovány opakující se částečné výboje, je-li napětí přiložené ke zkoušenému objektu postupně zvyšováno z nižší hodnoty, při které nejsou pozorovány žádné částečné výboje.

i) Zhášecí napětí částečných výbojů U_e

Je přiložené napětí, při kterém se ve zkoušeném objektu přestávají objevovat opakující se částečné výboje, je-li napětí přiložené ke zkoušenému objektu postupně snižováno z vyšší hodnoty, při které jsou pozorovány částečné výboje.

1.3 Působení částečných výbojů na izolační materiály

Jak již bylo v předchozím textu uvedeno, působení částečných výbojů na izolační systémy má negativní vliv na jejich stav. Částečné výboje způsobují svými přímými ale i nepřímými účinky v nehomogenitách dielektrika jak chemické, tak i fyzikální změny izolantu. Jedná se o typické nevratné změny, které mají za následek zhoršování elektrických vlastností daných materiálů. (1)

V posledních 10 až 20 letech bylo dosaženo významného pokroku ve výzkumu, který se zabýval částečnými výboji a jejich důsledků na stárnutí izolací. Obecně jsou uvedeny procesy, které mohou negativně ovlivňovat vlastnosti dielektrika:

1) Elektrické účinky

Jestliže dojde v dutince ke vzniku oblouku, můžeme předpokládat, že tento oblouk vytvoří vodivou dráhu. Pokud budeme mít vysokou intenzitu elektrického pole, dojde v tomto místě k čistě elektrickému průrazu. Následkem je šíření vodivé dráhy skrze dielektrikum. (1) (5)

Další ničivý účinek nastává dopadáním iontů a elektronů na stěny dutinky, které se projeví jako zeslabení tloušťky izolační vrstvy. Dopadání iontů a elektronů může být rovnoměrné nebo dopadat pouze do několika míst, kde se mohou začít vytvářet hlubší

jamky a tím dochází k úbytku materiálu. Úbytek materiálu je způsoben chemickou přeměnou původního izolantu na těkavé látky, které mají za následek degradaci materiálu. Tím dochází ke zvětšování dutinky až do takového stavu, kdy může dojít k průrazu celého dielektrika. (4)

2) Účinky záření vznikajícího při výbojích

Na tyto účinky při výbojích nelze zapomínat. Jedná se o ultrafialové záření, které vzniká při výbojích společně s viditelným zářením. Ultrafialové záření je vyznačováno větší energií, což vede ke vzniku více chemických reakcí a tudíž rychlejší degradaci izolantu. (4)

3) Chemické účinky

Vznik chemických účinků je při déle trvajícím elektrickém namáhání, kdy při částečných výbojích vzniká tzv. aktivní dusík, atomární kyslík a ozón, který má na izolační vrstvy výrazné oxidační účinky. Lze očekávat určitý rozklad izolantu. (4) U organických izolantů byly zpozorovány četné rozklady materiálu v okolí dutinek (5). Výsledkem těchto chemických účinků jsou pevné, plynné a kapalné vedlejší produkty prostupující do pevného dielektrika a tím vytvářejí vodivé cesty nemalých rozměrů (1).

a) Pevné produkty:

Pevné produkty vznikají až po několika hodinách působení částečných výbojů. Objevují se ve formě krystalů se složením hydrátu kyseliny šťavelové. Vznikají z kapiček, které při nárazu částečných výbojů krystalizují. Výskyt krystalů je pouze tehdy, pokud jsou v atmosféře všechny z uvedených prvků, jako je H, C a O. (8)

b) Plynné produkty:

Jsou zkoumány plynovou chromatografií ve stárnoucí buňce, ve které byly XLPE (polyetyleny) vystaveny činnosti částečných výbojů. Bylo nalezeno velké množství uhlíkových dioxidů a monoxidů a malé množství vodíku. Další metodou měření zaměřenou na složení plynů byla metoda spektroskopická. V tomto měření se opět objevily oxidy uhlíku a vodík. Za hlavní degradační plyny jsou potvrzeny vodík, oxid uhličitý, metan a oxid uhelnatý. (8)

c) Kapalné produkty:

Při výzkumu kapalných produktů se ukázalo, že na povrchu XLPE se vytvořily kapičky jen v takovém případě, pokud atmosféra obsahovala vlhkost a byl v ní přítomen oxid uhelnatý. Dále bylo zjištěno, že kapičky obsahují jednoduché organické sloučeniny

jako je kyselina octová, mravenčí a další karboxylové kyseliny. Pokud však chybí jeden z prvků H, C nebo O, tak se kapička nevyskytne. Hlavním účinkem vzniku tekutých vedlejších produktů je silný nárůst povrchové vodivosti stěn dutinky. To je způsobeno degradačními produkty, které se rozpustí ve vodě a tím vytvoří elektrolytickou vrstvu. (8)

4) Tepelné účinky

Jestliže dojde k velmi vysoké výbojové činnosti, můžeme říci, že oteplení vzniklé výbojovou činností je srovnatelné s oteplením, které mají za následek dielektrické ztráty. To vede ke snížení napětí tepelného průrazu. Při výbojové činnosti může zahřátý kanál na tak vysokou teplotu způsobit zuhelnatění dielektrika. (4)

Studovaný experiment na XLPE (polyetylen) se vzduchovou mezerou 50 μm byl vystaven částečným výbojům při teplotách až 160 $^{\circ}\text{C}$. Došlo ke změně charakteru reakčních produktů na povrchu i v mezeře polyetylen. Bylo zpozorováno zvýšení objemu a oxidace povrchu se vzrůstající teplotou. Nejvyšší nárůst byl při teplotě mezi 80 a 100 $^{\circ}\text{C}$. Tento stejný experiment probíhal i v epoxidové pryskyřici se vzduchovou mezerou 0,125 mm. I u tohoto experimentu byly výsledkem změny reakčních produktů závislé na teplotě. Při vysoké teplotě však začala měknout epoxidová pryskyřice a tudíž byl snížen účinek částečných výbojů. (8)

2 Metody měření částečných výbojů

Výbojová činnost v izolantech je doprovázena řadou fyzikálních jevů, které mají elektrický i neelektrický charakter. Jedná se tedy o proudové impulzy a vytvoření elektromagnetického pole, jenž má elektrický charakter. Světelné záření jak viditelného tak ultrafialového spektra, chemické zplodiny a tepelný ohřev, vznikající při výbojové činnosti mají charakter neelektrický.

Z hlediska charakteru těchto fyzikálních jevů, které mohou vzniknout, detekujeme přítomnost výbojové činnosti do takové míry, abychom byli schopni určit místo vzniku a velikost rozvinutí výbojové činnosti.

Pro určení místa vzniku výbojové činnosti používáme lokalizační metodu měření. Globální metoda se používá pro získání celkového stavu izolace tím způsobem, že se měří částečné výboje v daném zařízení. Lokalizační metoda je využívána pro nález zdrojového místa částečných výbojů. Nejčastěji se tyto dvě metody používají kombinovaně, kde globální metoda určí velikost výbojové činnosti a lokalizační metoda najde přesné místo vzniku částečných výbojů. (1)

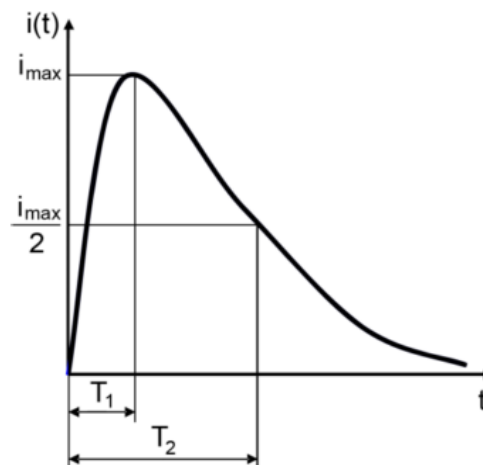
2.1 Elektrické metody

Principem elektrických metod, sloužící pro detekování částečných výbojů je měření proudových impulzů, které vznikají při částečných výbojích. Proudové impulzy jsou měřitelnou částí výbojové činnosti, a proto lze za pomoci vhodného snímacího obvodu určit velikost částečných výbojů.

Délka proudového impulzu částečných výbojů je závislá na materiálu, v němž došlo ke vzniku výbojů. V pevném izolantu impulzy výbojů trvají kratší dobu, zatímco u kapalných izolantů trvají delší dobu. Potom doba čela impulzu T_1 je u pevných izolantů několik ns , zatímco doba půltýlu T_2 je několik desítek ns . U kapalných izolantů jsou tyto doby zvýšeny na cca μs .

Na *Obr. 2-1* můžeme vidět proudový impulz, jehož velikost náboje je dána plochou pod křivkou podle vztahu 2-1 (1).

$$Q = \int_0^{\infty} i(t) dt \quad 2-1$$



Obr. 2-1: Průběh proudového impulsu částečného výboje (1)

2.1.1 Globální metoda měření částečných výbojů

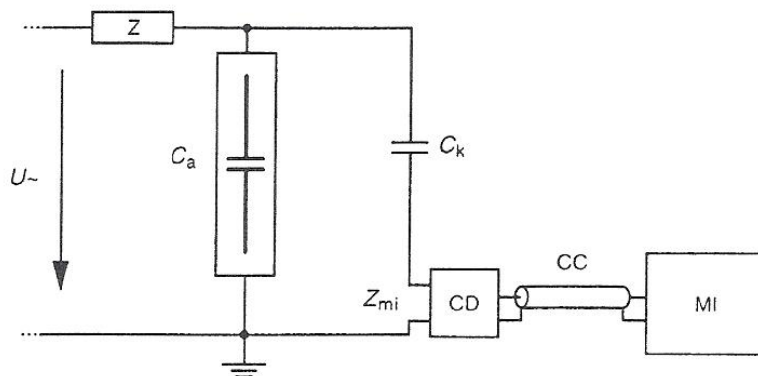
Jde o jednu z nejrozšířenějších metod, která je vhodná pro detekci částečných výbojů. Detekční větev je zapojena nejčastěji paralelně k uzemněnému zkoumanému objektu a je tvořena sériovým spojením vazebního kondenzátoru C_k a měřicí impedancí Z_{mi} . Sledování impulsů částečných výbojů dochází pomocí měřicí impedance Z_{mi} , která je nejčastěji tvořena jako RLC člen, který má ochranné prvky proti přepětí a také slouží k odfiltrování superponovaných pulzů od napájecí frekvence. (1) (5)

Kapacita C_a charakterizuje zkoušený objekt, v jehož izolačním systému se nachází dutinka. Na tyto dvě paralelně zapojené kapacity C_a a C_k je přes impedanci Z , která slouží jako blokovací filtr přivedeno vysokonapěťové zkušební napětí. Po přivedení zkušebního napětí zdroj nabíjí kapacitními proudy i_a a i_k obě kapacity. V době, kdy dochází v dutince k výboji, je doba trvání výboje skutečně malá (řádově 10^{-8} až 10^{-7} s). Na konci této doby výboj vyvolá na svorkách zkoumaného objektu úbytek napětí ΔU_a . Jelikož se jedná o rychlý přechodný děj, na který zdroj se svou velikou indukčností nemá vliv, musí být respektován zákon zachování náboje, proto dojde v obvodu k přerozdělení náboje na jednotlivých kapacitách. Potom tedy vazební kondenzátor C_k kompenzuje úbytek náboje na kapacitě C_a , který vznikl působením částečných výbojů. Tato kompenzace úbytku náboje se projeví v obvodu jako proudový impuls $i(t)$, který je možno změřit a tím vyhodnotit velikost zdánlivého náboje a i částečných výbojů. (2) (9)

Proudové impulsy, vznikající v důsledku částečných výbojů se superponují na kapacitní proudy i_k a i_a , které mají v obou paralelních větvích obvodu opačný směr,

zatímco amplituda zůstává stejná. Potom oblast, kde je největší četnost výbojů odpovídá místu největšímu rozdílu změny zkušební napětí. (2)

Norma ČSN EN 60270 specifikuje tři základní zapojení přímého měření částečných výbojů. Nejčastější zapojení vidíme na *Obr. 2-2* (1).



Obr. 2-2: Obvod pro měření částečných výbojů s paralelní snímací impedancí (2)

U_{\sim} - vn zkušební transformátor, Z - vnitřní impedance zdroje (filtr), C_a - zkoušený objekt,
 C_k - vazební kapacita, Z_{mi} - vstupní impedance měřicího systému, CD - vazební zařízení,
 CC - spojovací kabel, MI - měřicí zařízení (detektor ČV)

U všech třech základních zapojení je nejdůležitějším prvkem vazební kondenzátor. Norma ČSN EN 60270 definuje vazební C_k jako kondenzátor, který musí být v provedení s nízkou indukčností. Měl by vykazovat dostatečně nízkou hladinu částečných výbojů při předepsaném zkušebním napětí, aby bylo možné provést měření předepsané úrovně částečných výbojů.

Jedna z výhod je vysoká citlivost měření, kterou je možno regulovat velikostí vazební kapacity s výjimkou měření na zařízeních s vysokou kapacitou. Nevýhodou těchto metod je citlivost na rušivé vlivy, tj. elektromagnetické vlny, ale také se zde projeví vlivy způsobené samotnými prvky v měřicím obvodu. (1)

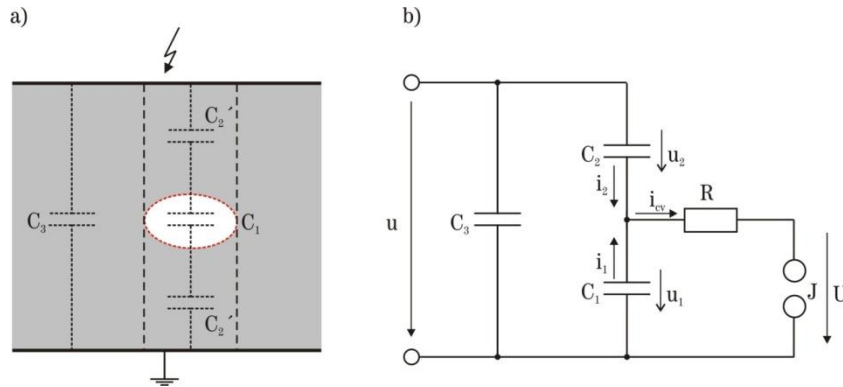
a) Měřitelný náboj

Z metodiky měření popsané v předchozím textu je patrné, že náboj potřebný na kompenzaci úbytku napětí při výbojové činnosti ve zkoušeném objektu, je odebírán z vazební kapacity C_k . Proto lze říci, že velikost proudových impulzů $i(t)$ je závislá na poměru C_k/C_a .

Pokles napětí na zkoušeném objektu ΔU_a vyvolaný výbojem v dutince izolačního systému, je úměrný velikosti zdánlivého náboje na svorkách zkoušeného objektu.

$$\frac{q}{\Delta U_a} = C_3 + \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \quad 2-2$$

Vztah mezi zdánlivým nábojem q a změnou napětí, která se objeví na svorkách zkoušeného objektu ΔU_a , je vyjádřen podle schématu kapacitního modelu dutinky v dielektriku, viz Obr. 2-3.



Obr. 2-3: Schéma kapacitního modelu dutinky pevného izolačního systému (1)

Jestliže vezmeme v potaz malé rozměry dané dutinky, tak potom můžeme zanedbat její kapacitu C_1 a vztah se tak zjednoduší.

$$q = (C_3 + C_2)\Delta U_a \quad 2-3$$

Pokud je velikost kapacity $C_k \gg C_a$, potom přenášený náboj proudovými impulzy se rovná zdánlivému náboji q . Ve skutečnosti z problematického a finančního hlediska při výrobě vazebního kondenzátoru není velikost kapacit $C_k \gg C_a$.

Jestliže je vazební kapacita C_k jen o trochu větší než kapacita zkoušeného objektu C_a , potom dochází ke ztrátě citlivosti v měřicím obvodu a tudíž je vyrovnávací proud $i(t)$ menší. Z hlediska přerozdělování náboje v obvodu je možno před a po přerozdělení náboje sestavit následující rovnici.

$$q = C_a \Delta U_a = (C_a + C_k) \Delta U'_a \quad 2-4$$

$\Delta U'_a$ je změna napětí v měřicím obvodu po přerozdělení náboje a proto je možné velikost náboje, který je dodaný z vazební kapacity změřit. Nazýváme ho měřitelný náboj a značí se q_m .

$$q_m = C_k \Delta U'_a \quad 2-5$$

Vyjádřením $\Delta U'_a$ ze vztahu 2-5 a dosazením do rovnice 2-4 dostáváme vztah mezi

měřitelným a zdánlivým nábojem. Poměr nábojů je velikost citlivosti měřicího obvodu, který slouží pro měření částečných výbojů.

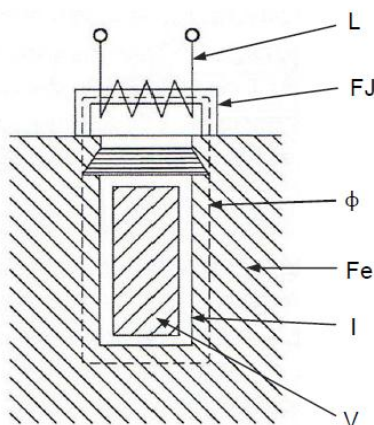
$$\frac{q_m}{q} = \frac{C_k}{(C_a + C_k)} \quad 2-6$$

Jestliže chceme dosáhnout velké citlivosti při měření částečných výbojů, musíme dobře zvolit velikost vazební kapacity C_k ke kapacitě zkoušeného objektu C_a . Po zvolení vazební kapacity vypočteme poměr dle vztahu 2-6, kde vyjde dosažitelná citlivost pro měření. Správně provedenou kalibrací se vyhneme nesprávnému vyhodnocování částečných výbojů vznikajících v izolačních systémech daných zařízení.

2.1.2 Metoda induktivně vázané sondy

Metoda induktivně vázané sondy slouží pro diagnostiku výbojové činnosti, která vzniká v elektrických točivých strojích. Patří mezi lokalizační metody, určující místo vzniku výbojové činnosti. Měření se provádí na elektrickém točivém stroji, z kterého je vyjmutý rotor a induktivní snímač je přiložen nad drážku vinutí, viz *Obr. 2-4*. (3) (10)

Induktivní snímač tvoří otevřené feritové jádro, na němž je navinuta cívka. Snímač spolu s magnetickým obvodem statoru stroje a vodičem vinutí tvoří proudový transformátor. V sekundárním vinutí, tj. cívice sondy proudového transformátoru se naindukují pulzy, které vyvolaly proudy částečných výbojů protékající ve vinutí. (1) (3)



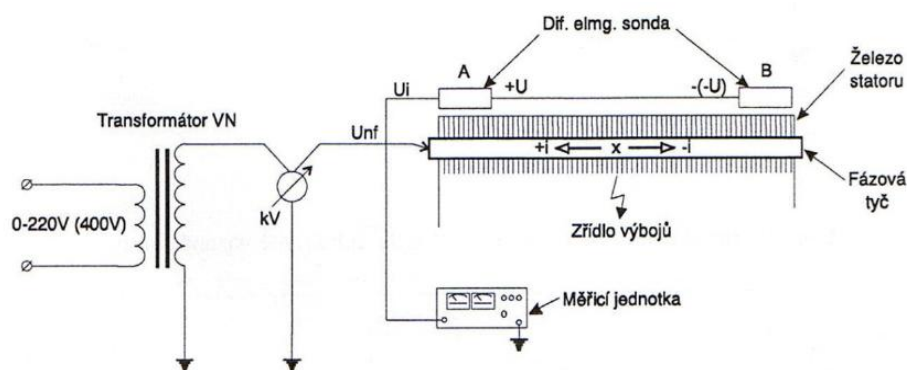
Obr. 2-4: Přiložení induktivně vázané sondy na drážku vinutí (6)

L – vinutí cívky snímače, FJ – feritové jádro snímače, Φ – magnetický tok, Fe – magnetický obvod statoru, I – izolační systém, V – statorové vinutí

2.1.3 Metoda diferenciální elektromagnetické sondy

Jedná se o lokalizační metodu sloužící k určení zdroje výbojů. Používá se pro měření částečných výbojů v drážkách statorového vinutí točivých strojů. Sonda této metody je složena ze dvou induktivních snímačů spojených sériově, elektricky proti sobě. Můžeme to chápat tak, že v každém snímači se indukuje stejně veliké napětí ale opačné polarity. Každý snímač je umístěn na jednom konci tyče statorového vinutí, jak je již vidět na Obr. 2-5. (1) (3)

Jestli-že zdroj částečných výbojů leží vně ohraničené části, potom prochází proudové impulzy, které byly vyvolány proudy částečných výbojů vlivem elektromagnetického pole oběma snímači stejným směrem. Naindukovaná napětí ve snímačích jsou stejně veliká, avšak opačné polarity a tak se odečtou. Pokud zdroj částečných výbojů leží mezi snímači, teče ke snímači A proud $+i$ a ke snímači B proud $-i$. Proudů v induktivních snímačích naindukují napětí, které je ve snímači A kladné. Ve snímači B, jehož vinutí je vinuto opačně, by se naindukovalo napětí opačné snímači A. Pokud však tímto snímačem protéká proud záporné polarity, bude výsledné indukované napětí ve snímači B kladné. Výsledné napětí bude součet naindukovaných napětí ve snímačích. (10)



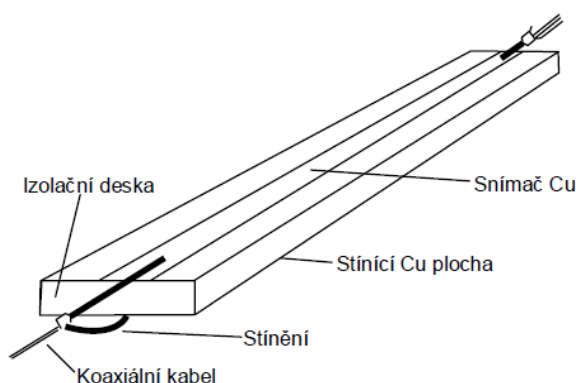
Obr. 2-5: Schéma zapojení diferenciální elektromagnetické sondy (3)

2.1.4 Kapacitní drážková sonda

Je metoda umožňující měření částečných výbojů za provozu elektrických strojů. Jde o citlivý snímač, který se vkládá při výrobě nebo údržbě elektrického stroje přímo pod drážkové klíny do statorových drážek. Snímač je tedy pevně zabudován v dané drážce stroje a snímá vysokofrekvenční elektromagnetické pulzy, které vytvořily částečné výboje. (1) (6)

Principem snímače je detekovat energii elektrického pole, které vznikne při výbojové činnosti. Kapacitní drážková sonda je složena z izolační destičky, která je z jedné strany opatřena stínící měděnou fólií a na straně druhé je úzký měděný pásek, sloužící jako snímač, viz *Obr. 2-6*. Koaxiální kabely zajistí přenos signálů z obou konců sondy do vyhodnocovacích zařízení. Je možné snímat šířku pásma od 10 do 1000 MHz. (10)

Výhodou této metody je možnost měření za provozu stroje a odolnost vůči okolnímu rušení.



Obr. 2-6: Složení kapacitní drážkové sondy (6)

2.1.5 LEMKE sonda

Jak již bylo dříve uvedeno, elektromagnetické pole vytvořené částečnými výboji v místě izolačního systému, je možné zachytit pomocí kapacitních nebo induktivních snímačů a antén.

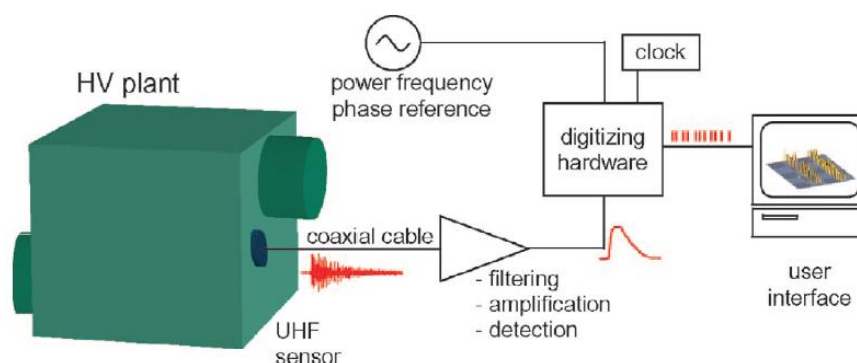
V tomto případě je snímač tvořen plošnou kapacitní nebo lineárně induktivní sondou, která je připojena na vstup diferenciálního zesilovače. Ten potlačuje rušivé vlivy cizích signálů a polí. Princip tohoto systému záleží na širokopásmovém zesílení impulzů, které jsou vyvolány částečnými výboji a dále na elektronické integraci, aby bylo možné vyhodnotit zdánlivý náboj. Amplituda výstupního signálu potom odpovídá velikosti zdánlivého náboje. Tento signál je přiveden do osciloskopu, kde je možné průběh zaznamenat a popřípadě uložit. (1)

2.1.6 UHF senzory

Relativně nová technika v měření částečných výbojů. Jedná se o on-line detekční techniku, která využívá pro detekci částečných výbojů ultra vysokou frekvenci (UHF) o rozsahu kmitočtového spektra od 200 MHz do $1,5\text{ GHz}$. Detekuje vysokofrekvenční elektromagnetické pole v nádobě transformátoru. Uvádí se nejčastěji v oblasti diagnostiky transformátorů, kde ukazuje velký potenciál pro on-line detekci, rozpoznání a lokalizaci četnosti částečných výbojů. Dále je tato metoda schopna: (11)

1. odhalit jakoukoli aktivitu výbojové činnosti, která mohla nastat z vady izolace,
2. určit místo vady izolace, tedy místo výbojové činnosti,
3. určit typ vady izolace.

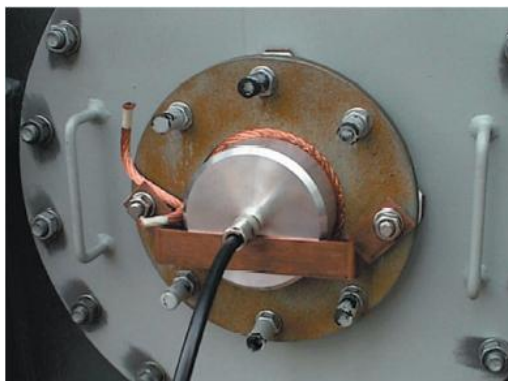
Všechny tyto získané informace povedou k vyhodnocení rizikovosti poruch izolace daného transformátoru. (11)



Obr. 2-7: Princip UHF měřicího systému (12)

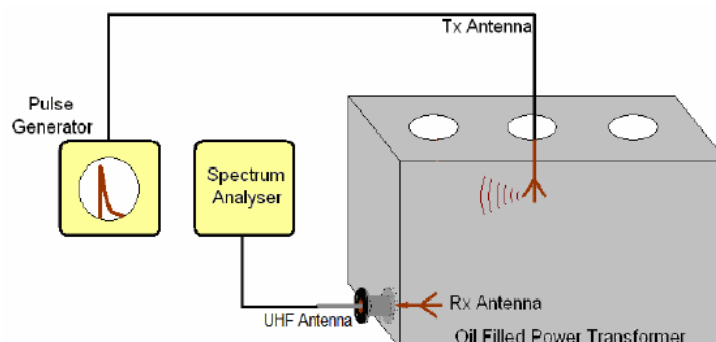
UHF snímače musí být širokopásmové, protože obsah frekvence signálů částečných výbojů se mohou značně lišit v závislosti na jejich poloze a signálové cestě. Signály z jednoho nebo více senzorů jsou filtrovány a zesíleny před tím než jsou digitalizovány. (12)

Vzhledem ke snímání dat vyžaduje metoda nejméně tři dielektrická okna osazená na nádrži transformátoru s umístěnými čidly. U starších transformátorů se jedná o složitý krok, kde by se nejprve musela z transformátoru vypustit hladina oleje, poté vytvořit do nádoby dielektrická okna a následně vložit senzory. Zde je kladen veliký důraz na izolaci mezi nádobou transformátoru a dielektrickým oknem (čidlem), kde by tato izolace měla mít stejnou životnost jako transformátor. (11)



Obr. 2-8: Pohled na UHF senzor, umístěný v nádobě transformátoru (13)

Jako druhou variantu je možné použít druhý typ čidla, který se zpravidla instaluje do vypouštěcího ventilu transformátorového oleje. Testováním se zjišťovalo, jaký senzor bude nejlepší pro vložení do nádoby. Nejlepší a nejvýkonnější typ senzoru se ukázal být kuželový. Frekvenční rozsah snímání je od 300 MHz do $1,3\text{ GHz}$. Senzor je zalit do epoxidové pryskyřice, aby byla zvýšena jeho mechanická pevnost. Poté je vložen do vypouštěcího ventilu transformátoru prostřednictvím posuvného upevnění, kterým se dá nastavit vysunutí senzoru do nádoby a také má omezovat únik oleje. Nastavením většího vysunutí senzoru do nádoby se zvyšuje citlivost senzoru. (14)



Obr. 2-9: Testování senzoru umístěného ve vypouštěcím ventilu (14)

2.2 Neelektrické metody

Je to detekce založená na principu snímání neelektrických projevů při vzniku částečných výbojů. Patří sem např.: vznik chemických zplodin při výbojové činnosti, viditelné světelné záření, záření ultrafialového spektra, tepelný ohřev a zvukové vlny, které mohou být ve slyšitelném tak i ultrazvukovém pásmu.

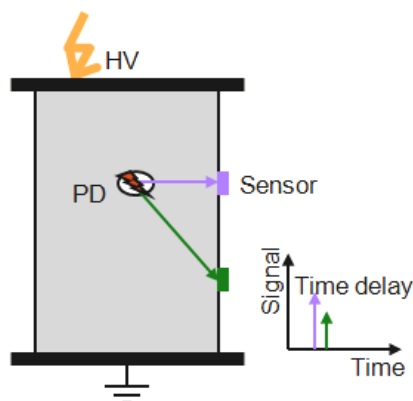
Všechny tyto neelektrické projevy vzniklé při výbojové činnosti můžeme vhodným způsobem detekovat a lokalizovat, tím určit míru rozvinutí výbojové činnosti a místo, kde

ke vzniku činnosti došlo.

Pro detekování těchto veličin je nutno použít speciální měřicí přístroje, jako je např. termovize, plynová chromatografie, směrové mikrofony zachycující různá frekvenční pásma, přístroje pro noční vidění atd...

2.2.1 Akustická detekce

Všechny částečné výboje jsou doprovázeny akustickými emisemi, které jsou tvořeny zvukovými vlnami širokého spektra frekvencí a šířeny z místa vzniku výbojové činnosti do okolí. Metoda akustické detekce slouží pro měření akustických signálů, které byly vytvořeny částečnými výboji. Nejčastěji používanými snímači jsou mikrofony snímající signály ve slyšitelném i ultrazvukovém pásmu nebo jiná čidla, jako např. piezoelektrická. (1)



Obr. 2-10: Akustická detekce výbojové činnosti pomocí senzorů na stěně nádoby (15)

Systém akustické detekce se nejčastěji používá při měření částečných výbojů v transformátorech, kde transformátorový olej tvoří hlavní izolaci a zároveň chladičí kapalinu. Transformátory by měly být testovány ve výrobním závodě, kde by měly odolat testům střídavého napětí ale také zkoušce izolačního odporu stejnosměrným zkušebním napětím. Test stejnosměrným zkušebním napětím může indikovat přítomnost vady v izolační struktuře transformátoru. Přítomnost sebemenší vady v konstrukci izolace za normálních provozních napětí může způsobit lokální zvýšení pole v blízkosti defektu izolace a tím vznik koróny nebo částečných výbojů. Ty se projeví ve formě hluku šířícího se všemi směry od zdroje. Uvolněnou energii detekujeme upevněným snímačem na povrchu konstrukce a nazýváme ji akustická emise (AE). (16)

Způsob měření akustické emise můžeme rozdělit dle metody, kterou chceme

lokalizovat místo vzniku výbojové činnosti. Prvním způsobem je použití jedné akustické sondy, kterou budeme hledat místo nejsilnějšího signálu. Druhý způsob spočívá v použití více akustických sond připevněných na vnější část nádoby, společně se softwarovým zpracováním naměřených hodnot. Frekvenční spektrum akustické metody měření je od 10 Hz do 300 kHz. (1) (15)

2.2.2 Optická detekce

Jak bylo dříve uvedeno, výbojová činnost se může projevovat ve viditelném, ultrafialovém a infračerveném spektru. U viditelného spektra je možnost pozorování výbojové činnosti pouhým okem nebo vhodnou optickou metodou, tj. (kamera, fotografie).

V pozorovaném zařízení zanechává výbojová činnost stopy poškození, které slouží pro určení místa a rozsahu působení výbojové činnosti. Pro pozorování stop se používá osvit ultrafialovým světlem nebo přímo lidským okem. Nevýhodou však je, že tuto metodu lze použít jen u částí zařízení, která jsou lehce přístupná.

Přítomnost výbojové činnosti se projevuje značným ohřevem v místě vzniku částečných výbojů. Proto je možno zkoumat objekt termovizní kamerou s vysokou citlivostí. (1) (15)

2.2.3 Chemická detekce

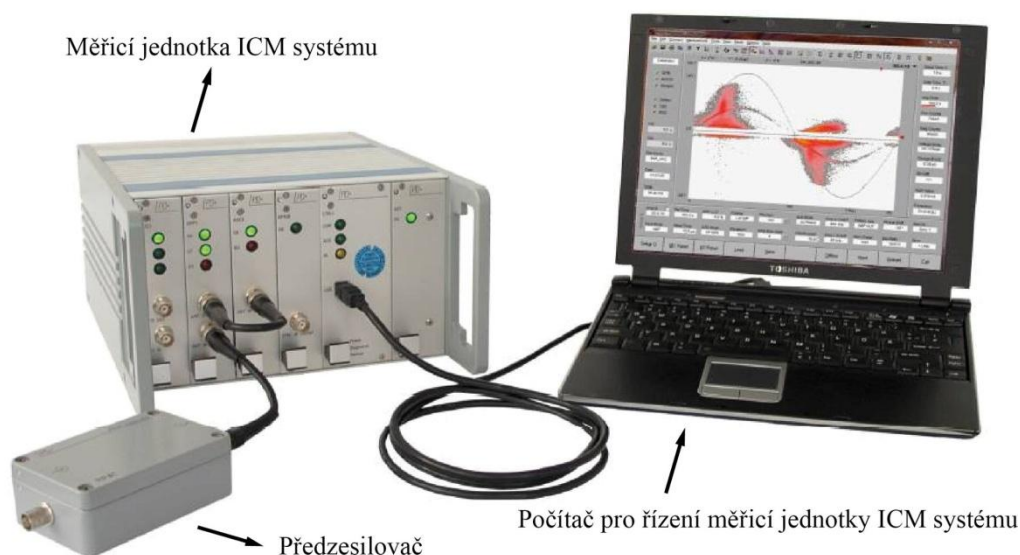
Metoda detekující vznik produktů při výbojové činnosti s plynem v dutinkách dielektrika. Provádí se u přístrojů, které mají olejové nebo plynné izolační systémy. Analýza vzniklých produktů výbojové činnosti informuje o závažnosti degradace měřeného zařízení.

Do této chemické detekce je zahrnuta metoda plynové chromatografie a metoda indikující ozón v chladicím médiu daného zkoumaného zařízení. Důsledkem působení výbojů se v izolačním oleji začnou objevovat různé plyny, které mohou být analyzovány a tím určeny jednotlivé druhy závad izolačního systému. Jedná se o rozpouštění pěti plynů v izolačním médiu. Vodík H_2 , metan CH_4 , etan C_2H_6 , etylen C_2H_4 , acetylen C_2H_2 a propylen C_3H_6 .

Za přítomnosti kyslíku při výbojové činnosti dochází k ionizačním procesům a tím vzniká ozón O_3 . Koncentrace ozónu v chladicím vzduchu je zjišťováno metodou kolorimetrickou, elektromechanickou nebo fotometrickou. (1) (15)

3 Digitální měřicí systém částečných výbojů³

ICM systém od firmy Power Diagnostix je detektor částečných výbojů, který je plně řízen počítačem. Všechny jeho ovládací prvky a displeje jsou přístupné na obrazovce řídicího počítače s grafickým uživatelským rozhraním. Signál získaný na snímací (měřicí) impedanci, který odpovídá impulzům částečných výbojů, je veden stíněným kabelem do zesilovače, kde se signál zesílí a poté v analogově digitálním převodníku dojde k převodu analogového signálu do digitální podoby. Získané digitální impulzy částečných výbojů jsou systémem tříděny s ohledem na velikosti impulsu a jeho fázovou polohu výskytu do trojrozměrného průběhu, který můžeme vidět na obrazovce řídicího počítače na *Obr. 3-1*. Třetí rozměr představují barvy, jejichž odstín a sytost zobrazují četnost výskytu.



Obr. 3-1: Digitální měřicí systém částečných výbojů

Jednotka ICM systému je složena z několika modulů a obvodů, které mají různou funkci. Jedná se např. o zesilovač, *A/D* převodník, mikro řadiče a řadič *GPIB*, který zajišťuje komunikaci s počítačem. Z *Obr. 3-1* je možno vidět přední panel jednotky ICM, která je osazena vstupními a výstupními signálními konektory, led indikátory, otočným přepínačem pro nastavení *GPIB* adresy. Na zadním panelu jednotky ICM se nachází vstupní a výstupní konektor *TTL Sync*, konektor nesoucí *15 V DC* pro napájení externích doplňků, přívodní konektor *230 V AC*, spínač a pojistku. Dále nese také důležitý konektor *IEEE488* a křídlovou matici pro bezpečné propojení kovového rámu se zemí.

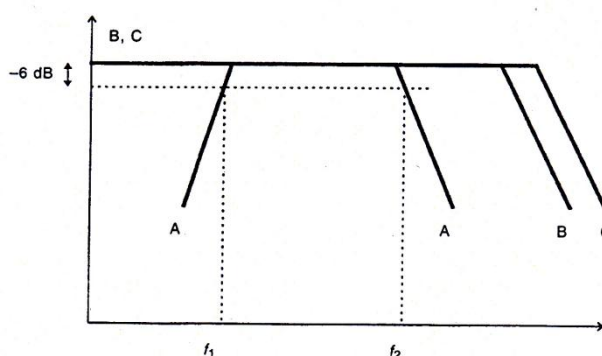
³ Kapitola 3 zpracována pomocí (21) (2) (19) (20)

Požadavky na digitální přístroj pro měření částečných výbojů normou ČSN EN 60270

Zobrazit hodnotu největší opakovaně se vyskytující úrovně částečných výbojů.

Přístroj musí vyhovovat požadavkům:

- Amplitudové kmitočtové spektrum vstupních impulzů musí být alespoň konstantní v rozmezí šířky pásma Δf měřicího systému. Potom je velikost výstupního impulsu napětí úměrná náboji vstupního impulsu.



Obr. 3-2: Amplitudové kmitočtové spektrum širokopásmového systému

A – šířka frekvenčního pásma měřicího přístroje, B – amplitudově kmitočtové spektrum impulsu ČV,
C - amplitudově kmitočtové spektrum kalibračního impulsu, f_1 – dolní mezní kmitočet,
 f_2 – horní mezní kmitočet

- Zobrazení jednotlivých výstupních impulzů napětí na obrazovce může přispět k rozpoznání zdroje **částečných výbojů** a odlišení od rušení. Impulzy napětí by měly být zobrazovány buď s lineární časovou základnou, nebo se sinusovou časovou základnou synchronizovanou s kmitočtem zkušebního napětí.
- Použití indikačního přístroje nebo zapisovače pro **kvantitativní určení největší opakovaně se vyskytující úrovně**. Čtecí část přístroje je založena na digitální detekci vrcholových hodnot pomocí softwaru s velmi krátkou časovou konstantou.
- Odezva systému na sled impulzů, které jsou složeny z dostatečně velikých stejně vzdálených zdánlivých impulzů q se známým **opakovacím kmitočtem N** , musí být taková, aby záznam R pořizovaný přístrojem indikoval úrovně, které jsou uvedeny v Tab. 1. Předpoklad je nastavení plného rozsahu.

Tab. 1: Odezva na sled impulzů přístrojů pro měření částečných výbojů

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

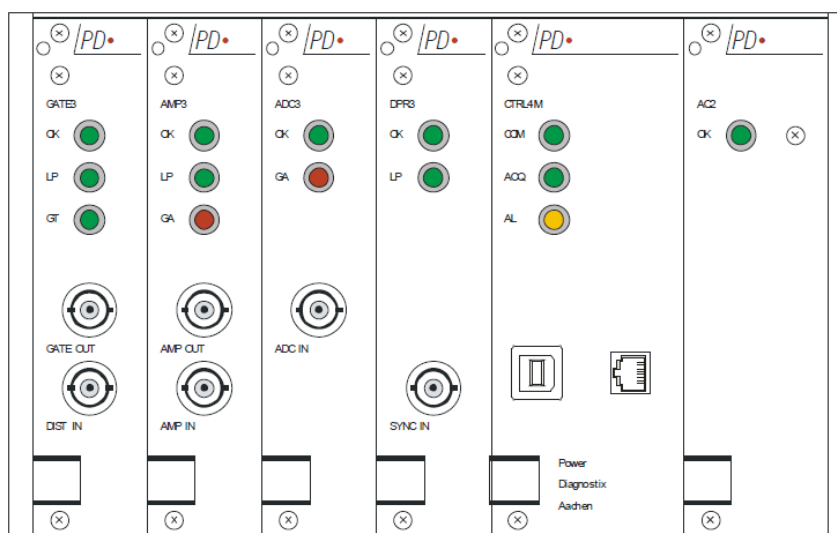
Požadavky na měření zdánlivého náboje q

- Odezva přístroje obvykle zahrnuje hladiny kontinuálního nebo základního šumu z vedení. Tento šum může být způsoben **šumem pozadí** nebo velkým množstvím **impulzů částečných výbojů**, jejichž úroveň je malá v porovnání s největší měřenou úrovní. Může být zaveden práh citlivosti z důvodu zamezení záznamu takovýchto signálů. Je-li práh použit, musí být zaznamenán.

3.1 Hardware digitálního měřicího systému

3.1.1 Jednotlivé moduly měřicího systému

Nejdůležitějšími částmi měřicí jednotky ICM jsou jednotlivé moduly, které je možno vidět na *Obr. 3-3*. Prvním modulem zprava je napájecí modul označen jako *AC2* vybaven *LED* kontrolkou, která signalizuje stav zapnutí.



Obr. 3-3: Panel digitálního měřicího systému s jednotlivými moduly

Další modul je řídicí *CTRL4*, ten zajišťuje komunikaci s připojeným počítačem pomocí rozhraní *GPIB* nebo *USB* .

Modul *DPR3* obsahuje referenční logiku a to jak fázovou tak časovou, paměť a měřicí obvody napětí. Průběh napětí je vzorkován, tudíž program může zobrazit jeho skutečný tvar.

Jedním nejdůležitějším modulem z hlediska vstupu měřeného signálu je modul *AMP3*, který obsahuje hlavní zesilovač měřeného signálu a pásmové filtry. Pásmový filtr má dolní mezní frekvenci 40, 80, 100 kHz a horní mezní frekvenci filtru je možno volit

z 250, 600, 800 kHz. Z těchto uvedených frekvencí daného filtru je možno říci, že se jedná o širokopásmový měřicí systém částečných výbojů, jak již uvádí norma ČSN EN 60270. Norma dovoluje hodnoty pro dolní frekvenci f_1 od 30 kHz do 100 kHz a horní frekvenci f_2 do 500 kHz. Signál částečných výbojů je přiveden z měřicí impedance přes připojený předzesilovač *RPAIL* na svorku hlavního zesilovače *AMP IN*. Zesílený a filtrovaný signál je veden koaxiálním kabelem z hlavního zesilovače *AMP OUT* na svorku *ADC IN* do modulu *ADC 3*, který představuje *A/D* převodník.

A/D převodník zpracovává jednotlivé analogové impulzy vyvolané částečnými výboji do digitální podoby, určuje jejich velikost a polaritu. Nastavení převodníku před vlastním měřením je nutné pro přesný výsledek měření. Toto nastavení má značný vliv na vyhodnocování měřených impulzů. Pokud bychom neprovedli správné nastavení převodníku, došlo by tak k patřičně velikému ovlivnění přesnosti měření a tím i výsledků.

Modul *GATE3* je totožný s obvody jednotky *AMP3* jako je vstup, předzesilovač, zesilovač a filtry. Navíc od jednotky *AMP3* obsahuje počítačem řízený spínač. Pokud zesílený signál šumu překročí prahovou hodnotu, dojde k sepnutí spínače a internímu zaslání signálu do modulu *AMP3* a *ADC3*, kde je následně zabráněno v konverzi měřeného signálu *A/D* převodníkem. Externí anténa přijímá rušivý signál z okolí, kde je přes předzesilovač zesílen a přiveden do modulu *ADC3*. Jestliže se však provádí měření v laboratoři, která je od okolí odstíněna, tudíž by se neměly vyskytovat rušivé signály je možné modul *GATE3* zcela vypnout. Norma ČSN EN 60270 připouští míru rušivého signálu nižší než 50 % předepsané přípustné úrovně částečných výbojů.

3.1.2 Předzesilovač a hlavní zesilovač

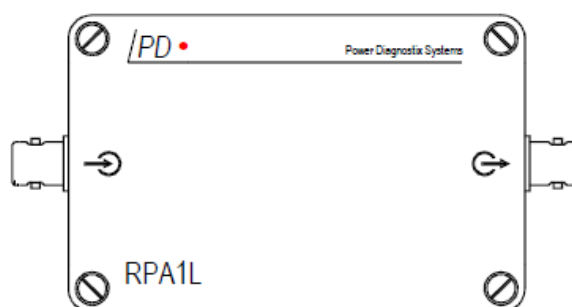
RPAIL je jedním ze standardní řady předzesilovačů pro měření ve frekvenčním rozsahu v souladu s normou ČSN EN 60270. Předzesilovač se používá pro úpravu signálu, který je snímán měřicí impedancí a poslán koaxiálním signálním kabelem do hlavního zesilovače modulu *AMP3*. Samotný signál částečných výbojů odfiltrovaný od kapacitních proudů je veden z výstupu na snímací impedanci (*AMP*) do předzesilovače. Ten se umísťuje blízko ke zdroji signálu, kde působí jako impedanční převodník, jehož hlavní funkcí je přizpůsobit měřicí cestu tak, aby snímací impedance nebyla zatěžována kapacitou koaxiálního kabelu. Také obsahuje ochranu proti přepětí. Ta chrání moduly měřicího systému při případném měření, kde by mohlo dojít k nárůstu napětí nad patřičnou mez.

Hodnota výstupního napětí na předzesilovači je stále úměrná náboji přenášenému

proudovým impulzem. Následně je hodnota výstupního napětí vedena do hlavního zesilovače, který má frekvenční rozsah $40 - 800 \text{ kHz}$. Hlavní zesilovač zajišťuje nejen zesílení signálu, ale také má zvýšit filtrační účinek. Navrhuje se s vlastnostmi širokopásmové propusti, aby dokázal přenést signály v oblasti, kde může dojít k měnící se rezonanční frekvenci v závislosti na hodnotách kapacity C_a a C_k .

Vlastní integraci průběhu krátkodobého impulzu vyvolaného částečným výbojem většinou obstará širokopásmový nebo úzkopásmový měřicí systém. V podstatě se jedná o pásmové filtry a zesilovače. Měřitelné proudy částečných výbojů mohou mít rozdílné průběhy. Frekvenční spektrum částečných výbojů závisí na úhlové frekvenci ω , kde výsledkem je tedy frekvenční charakteristika neboli amplitudové spektrum. Z těchto charakteristik je dané, že proudové impulzy částečného výboje s menší časovou konstantou trvají kratší dobu a mají vyšší frekvence. Potom z frekvenční závislosti filtru je dán dobrý výsledek integračních účinků, pokud je horní mezní frekvence měřicího zařízení f_{hm} nižší než horní mezní frekvence přenášeného spektra impulzu f_{hi} .

Šířka frekvenčního pásma předzesilovače *RPA1L* je $40 \text{ kHz} - 20 \text{ MHz}$. Frekvenční pásmo předzesilovače je širší než největší šířka pásma, kterou poskytuje hlavní zesilovač modulu *AMP3*. Z porovnání frekvenčních pásem předzesilovače a hlavního zesilovače je možné usoudit, že na šířku měřeného frekvenčního pásma nemá předzesilovač vliv. Šířka měřeného pásma je dána pouze nastaveným frekvenčním rozsahem filtru hlavního zesilovače.

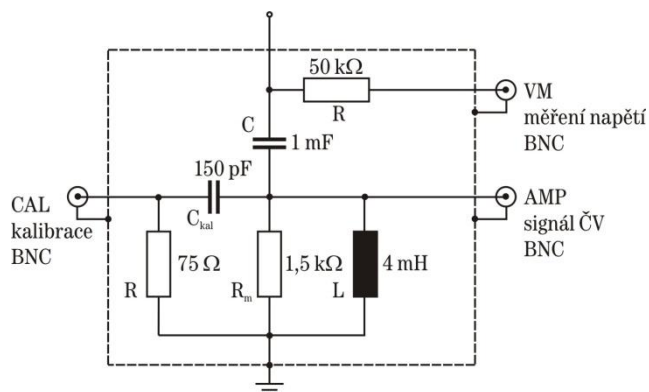


Obr. 3-4: Předzesilovač pro digitální měřicí systém

3.1.3 Snímací impedance s vazební kapacitou (vazební jednotka)

Vazební jednotka je tvořena sériovým spojením vazebního kondenzátoru C_k a snímací impedance, která se podílí na převodu proudových impulzů částečných výbojů přivedených na vstup. Pro ICM systém je popsána vazební jednotka, která bude použita

v průběhu měření částečných výbojů, Obr. 3-5. Je složena z vazební kapacity $C_k=1500\text{ pF}$ a nízkonapěťové kapacity snímání impedance $C=1\text{ }\mu\text{F}$, které tvoří kapacitní napěťový dělič. Snímací impedance je nejčastěji tvořena paralelním obvodem RLC . Na výstup (VM) nízkonapěťové kapacity umístěné ve snímací impedanci, lze získat obraz zkušebního napětí. Z výstupu (VM) vede koaxiální kabel do modulu $DPR3$, kde je přiváděný signál vzorkován a následně digitálním měřicím systémem zobrazen. Přivedené proudové impulzy vzniklé výbojovou činností jsou odporem R_m ve snímací impedanci převáděny na napěťové. Měřené proudové impulzy jsou superponovány na harmonické kapacitní proudy síťové frekvence, proto je nutné odfiltrovat nežádoucí kapacitní proudy. Paralelně umístěná indukčnost L ke snímacímu odporu R_m představuje pro kapacitní proudy zanedbatelnou impedanci, to má za následek odfiltrování kapacitních proudů, které jsou svedeny do země. Potom je samotný odfiltrovaný signál částečných výbojů veden z výstupu (AMP) koaxiálním kabelem na svorku hlavního zesilovače $AMP\ IN$. Je třeba také respektovat kapacitu koaxiálního kabelu, která se přiřazuje paralelně ke snímacímu odporu R_m . Ve snímací impedanci je také zapojena vnitřní kalibrační kapacita $C_{kal}=150\text{ pF}$. Ta slouží pro přímou kalibraci měřicího obvodu. *Vazební jednotka má důležitou ochrannou funkci, galvanicky odděluje citlivé elektronické obvody od vn obvodu.*



Obr. 3-5: Vazební jednotka a náhradní schéma snímání impedance

Snímací impedance musí být navržena tak, aby na ni přechodný děj dozníval co nejkratší dobu z důvodu přípravy na další impulz částečných výbojů. Doba doznívání závisí na činiteli jakosti Q a rezonanční frekvenci f_0 . Rezonanční frekvence nemůže být vysoká z důvodu zhoršení integračních účinků snímací impedance. Hodnota činitele jakosti se optimálně pohybuje $Q=0,75$ a rezonanční frekvence typická pro snímací impedance je $f_0=80\text{ kHz}$.

Dosažením do vztahu 3-1 dostaneme výslednou časovou rozlišovací schopnost snímací impedance.

$$T_r = \frac{1}{f_0} (\mu s) \quad 3-1$$

Technická norma ČSN EN 60270 uvádí časovou rozlišovací schopnost T_r pohybující se v rozsahu 5 – 20 μs . Šířka pásma Δf se pohybuje od 100 kHz do 400 kHz.

3.1.4 Kalibrátor

Kalibrace se provádí za účelem stanovení konstanty převodu k pro měření zdánlivého náboje. Při měření částečných výbojů je v současné době obvyklé udávat měřenou veličinu zdánlivý náboj q . Vzhledem k tomu, že každý měřicí přístroj reaguje na měřitelný náboj q_m , který je zlomkem zdánlivého náboje závislým na velikosti vazební kapacity, je proto nutné před každým měřením částečných výbojů provést kalibrační měření. Kalibrační přístroj může být součástí měřicího přístroje nebo zcela nezávislý přístroj na baterie. Potom se jedná o kalibraci přímou nebo nepřímou. V obou případech je použit stejný zdroj pravoúhlých impulzů napětí U_{kal} , které jsou vysílány přes známou velikost kondenzátoru C_{kal} . Nízkonapěťový kondenzátor C_{kal} je zapojen v sérii s generátorem impulzů skokového napětí U_0 a tím vzniká kalibrační náboj q_0 .

$$q_{kal} = U_{kal} * C_{kal} (pC) \quad 3-2$$

Potom je celková konstanta převodu k celého měřicího systému dána poměrem 3-3. Pro dosažení vysoké citlivosti měření je nutné, aby konstanta převodu byla co nejmenší. Ve vlastním měření se musí změřená hodnota částečných výbojů detektorem vynásobit touto konstantou převodu k , aby byla docílena požadovaná hodnota zdánlivého náboje.

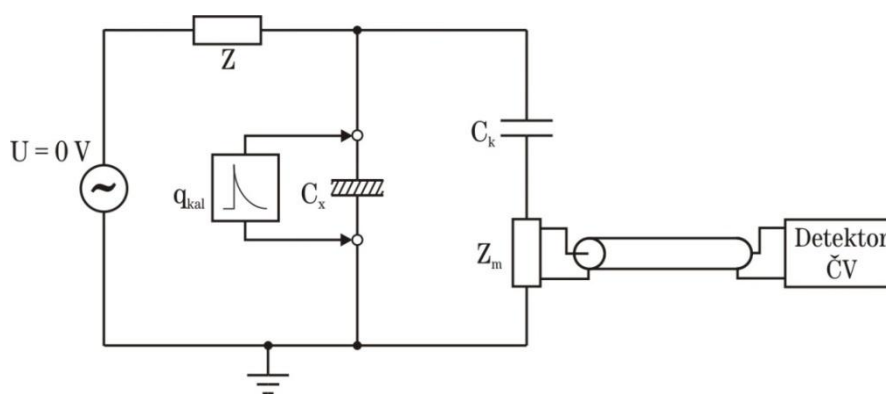
$$k = \frac{q_{kal}}{q_m} (-) \quad 3-3$$

Ve skutečnosti však nelze vygenerovat impulzy, které by měly ideální skokové napětí, proto mají proudové impulzy pomalejší dobu nárůstu čela. Požadavek normou ČSN EN 60270 na dobu nárůstu napěťového impulzu musí být menší než 60 ns, aby frekvenční spektrum bylo podobné spektru částečných výbojů.

Standardní kalibrační zdroje pro kalibraci měření částečných výbojů jsou v souladu s mezinárodními normami. Norma ČSN EN 60270 uvádí kalibrační postup, kde by kalibrace měřicího systému určeného pro měření zdánlivého náboje q měla být provedena

prostřednictvím kalibrátoru injektováním proudových impulzů do svorek zkušebního objektu, jak je vidět na Obr. 3-6. Jelikož je C_{kal} kalibrátoru často reprezentován nízkonapěťovým kondenzátorem, provádí se kalibrace kompletního zkušebního uspořádání se zkušebním obvodem bez napětí. Norma uvádí, že by kondenzátor C_{kal} neměl být větší než $0,1 C_a$, aby měla kalibrace platnost.

Pro naše měření bude použit kalibrační impulzní generátor CAL1A, který umožňuje kalibraci měření částečných výbojů dle normy ČSN EN 60270. Velikost nízkonapěťového kondenzátoru kalibrátoru CAL1A je $C_{kal}=0,8 \text{ pF}$ a napěťové impulzy o velikosti až $U_{kal}=125 \text{ V}$. Ten generuje na svém koaxiálním výstupu kalibrační náboj různé polarity o velikosti 1, 2, 5, 10, 20, 50 nebo 100 pC.



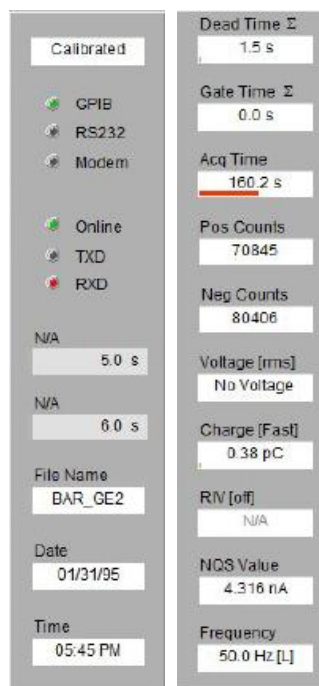
Obr. 3-6: Zapojení kalibrátoru při kalibraci měřicího systému

Kalibrátory podléhají normou ČSN EN 60270 udávaným zkouškám a provozním kontrolám z důvodu stanovení a udržování charakteristik měřicích systémů. Jde o zkoušky: typové, výrobní kusové, provozní a provozní kontrolu.

3.2 Software digitálního měřicího systému

Jedná se o standardní řídicí software ICM systému, který obsahuje veškeré funkce k ovládání přístroje, prohlížení a upravování nastavení aplikace, sběru dat, vyhodnocování a vykreslování výsledků. Obsahuje také funkce jako je re-load, export získaných dat nebo jednoduchý tisk.

Na spodní části displeje se nachází řada tlačítek, které představují hlavní funkce programu. Tlačítka mohou být spouštěna pomocí funkčních kláves počítače F1 až F10.



Obr. 3-7: Jednotlivé bloky měřicího systému ICM

V bloku na pravé straně displeje jsou zobrazeny výsledky měření jako je napětí, frekvence, velikost náboje částečných výbojů, četnost výbojů jak v kladné tak v záporné půlvině sinusového průběhu, jak je vidět na Obr. 3-7. Na levé straně se nachází blok indikující komunikační panel, zobrazuje údaje o datu a čase, popřípadě načteného souboru. Následně budou popsány jednotlivé položky, kde první z nich je:

Kumulovaná mrtvá doba (*Dead time*) je vyjádřena v sekundách a vyjadřuje dobu, po kterou měřicí detektor během měření nezaznamenává impulzy částečných výbojů. Jedná se o součet všech mrtvých dob během celé doby měření. Vztah tohoto kumulovaného mrtvého času a času pořízení je důležitým ukazatelem statistické spolehlivosti celého měření.

Souhrnná hradící doba (*Gate time*) je vyjádřena v sekundách a představuje celkovou dobu, kdy byl modul *GATE3* detektoru během měření aktivní, došlo k odfiltrování rušení způsobeného vnějším prostředím.

Doba měření (*Acq time*) jedná se o dobu, po kterou probíhá vlastní měření vyjádřené v sekundách.

Četnost kladných a záporných výbojů (*Pos Counts, Neg Counts*) tyto dvě položky zobrazují počet výbojů, které vznikly v kladné a záporné půlvině po dobu měření. Také je možné položky přepnout tak, aby se zobrazila celková hodnota všech výbojů a zároveň počet největší opakovaně se vyskytující úrovně jak definuje norma ČSN EN.

Zkušební napětí (*Voltage*) respektuje zadaný poměr napěťového děliče a položka umožňuje zadání aktuální hodnoty napětí pro korekci dělicího poměru děliče.

Velikost zdánlivého náboje (*Charge*) zobrazuje aktuální velikost náboje měřeného vrcholovým A/D převodníkem modulu AMP3.

Průměrný výbojový proud (*NQS Value*) jde o průměrný průtok proudu, který je dán podílem součtu zdánlivých nábojů všech impulzů a zvolenou dobou měření.

Poslední položkou tohoto bloku je **frekvence** (*Frequency*) jenž ukazuje frekvenci synchronizačního zdroje. Kliknutím na tuto položku je možné ručně přenastavit synchronizační frekvenci nebo zvolit automatický výpočet synchronizační frekvence, která je synchronizována s kmitočtem zkušebního napětí 50 Hz, jak definuje norma ČSN EN.

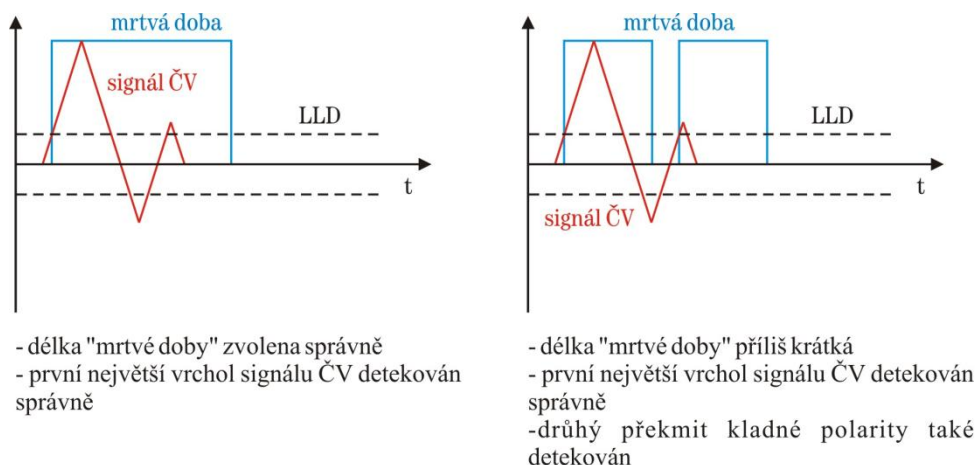
Na levé straně displeje ICM systému jak je vidět na Obr. 3-7 se nachází blok, který zobrazuje položky, informující o stavu načteného souboru nebo měření a používaného komunikačního kanálu. V horní části levého bloku je umístěno šest LED ukazatelů, kde první tři uvádějí rozhraní, které je k dispozici (*GPIO, RS232 nebo modem*). Zbýlé tři ukazatele zobrazují aktivní připojení, např. online, dále probíhající přenos dat do přístroje (*TXD*) nebo z přístroje (*RXD*). Textový displej zobrazuje název aktuálního souboru dat. Další dva zbývající displeje zobrazují datum a čas, kdy bylo zahájeno měření aktuálního souboru dat.

3.2.1 Nastavení hodnot detektoru

ICM systém je navržen tak, aby splňoval požadavky na měření částečných výbojů nejen v běžném laboratorním prostředí, ale i při měření v terénu, kde je téměř nemožné kontrolovat podmínky měření. Proto software měřicího systému nabízí velkou škálu nastavení různých parametrů, kdy přenastavením těchto parametrů dojde k vyrovnání měřicího systému s ne příliš perfektním prostředím daného měření. Na druhé straně při nastavování parametrů dochází ke snížení výkonu, který má přístroj k dispozici. Dále budou popsány hlavní parametry, které musí být správně nastaveny před samotným použitím detektoru.

Mrtvá doba (*Dead Time*) je doba, po kterou systém zpracovává zaznamenaný impulz a nedokáže tedy v tomto čase zaznamenávat další impulzy. Nejkratší *mrtvá doba*, kterou má systém k dispozici je 5 μ s. Velikost *mrtvé doby* by se měla volit co nejmenší, avšak dostatečně velká, aby nebyl jeden impulz nebo jeho doznívání zaznamenáno vícekrát, viz Obr. 3-8. Pokud by byla *velikost mrtvé doby* nastavena na malou hodnotu,

došlo by během doby měření k nárůstu *celkové kumulativní mrtvé doby*. Jestliže dosáhne vysokých hodnot, snižuje se věrohodnost měření.



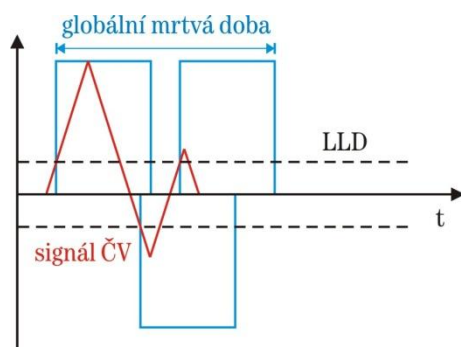
Obr. 3-8: Grafické zobrazení závislosti mrtvé doby a prahové úrovně LLD na signálu ČV

Spouštěcí prahová úroveň (ADC LLD) představuje nastavitelnou úroveň. Jestliže nastane impulz s takovou amplitudou, která převyší nastavenou úroveň *LLD*, spustí se *A/D* převodník, který převede zachycený impulz. Slouží k odstranění trvale přítomné hladiny šumu v měřeném signálu, nebo vyřadí z měření malé impulzy s velikou četností. Optimálním nastavením tohoto parametru lze snížit *celkovou kumulativní mrtvou dobu*. Dvojitým kliknutím na tento parametr se zobrazí výběrové okno, kde lze zvolit velikost nastavitelné úrovně *LLD* (2, 5, 10, 20 %), která je stejná pro obě polaridy. Velikost této úrovně je odvozena z maximálního rozsahu zdánlivého náboje.

Režim ADC (ADC Mode) je režim spouštění převodníku, který má tři provozní režimy pro vyrovnání s možnými vlastnostmi vzniklými při měření částečných výbojů.

První provozní režim *spouštění bez opětovného spouštění (FP NRT)* je charakterizován spuštěním *A/D* převodníku při prvním impulzu, jehož velikost překročí nastavenou hodnotu *LLD*. Nastavením *mrtvé doby* nedojde k zaznamenání dalšího impulzu, *Obr. 3-8*.

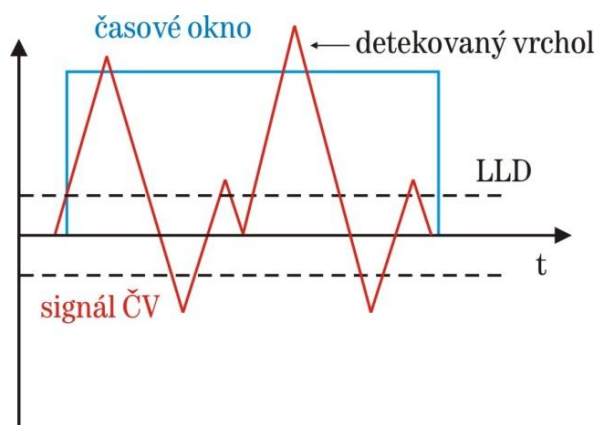
Druhý provozní režim *spouštění s opětovným spouštěním (FP RT)*. V tomto režimu dochází k automatickému prodlužování mrtvé doby *A/D* převodníku tak, aby nedošlo k více než jednomu záznamu daného impulzu. Potom tedy je *mrtvá doba* vhodně přizpůsobena k velikosti času zániku výboje (impulzu).



- zamezeno mnohačetným detekcím jediného impulzního signálu ČV
- automatické rozšíření "mrtvé doby" na "globální mrtvou dobu"

Obr. 3-9: Režim A/D převodníku- spouštění s opětovným spouštěním (FP RT)

Třetí provozní režim (*TW NRT*) neboli *spouštění v časovém okně*. Naměřené kladné i záporné impulzy během nastavené mrtvé doby jsou registrovány. Po skončení časového okna, které je úměrné nastavené velikosti *mrtvé doby* jsou porovnány velikosti a amplitudy impulzů, z nichž největší impulz je uložen a zobrazen. Impulzy menší velikosti jsou zanedbány.



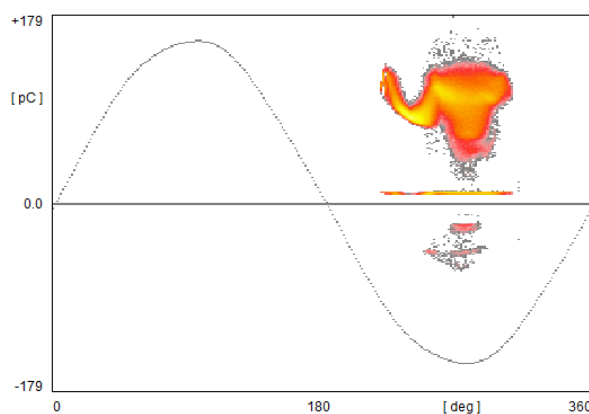
Obr. 3-10: Režim A/D převodníku- spouštění v časovém okně (*TW NRT*)

Dále systém obsahuje plno dalších parametrů, jejichž nastavením nedojde ke změně výsledného zobrazení.

3.2.2 Zobrazování naměřených dat ICM systému

Měřicí systém má několik režimů, ve kterých lze provádět měření. Jedním z režimů je standardní režim měření, který je aktivní ihned po připojení. Software tedy přenáší nastavená data do přístroje a následně z něj obdrží základní naměřená data, jde tedy

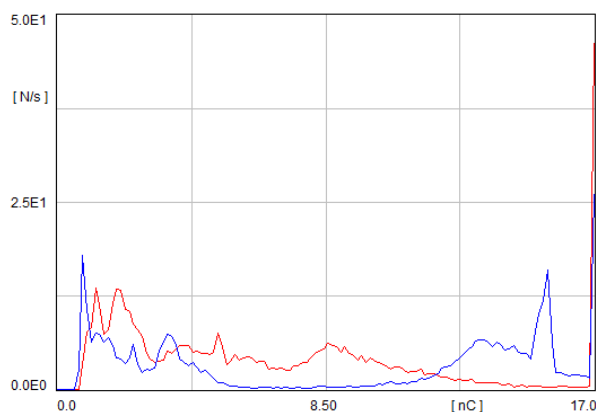
o vhodné nastavení detektoru při měření základních dat. Základní data jsou zkušební napětí, frekvence a velikost zdánlivého náboje částečných výbojů. Velikost dat je zobrazována na obrazovce počítače a jakákoliv změna v nastavení detektoru se projeví na velikostech základních dat, která jsou měřena. Jestliže dojde ke vhodnému nastavení detektoru, je možné přejít do režimu sběru dat a tedy začít se samotným měřením, kde je možné naměřená data ukládat.



Obr. 3-11: Amplitudově-fázové rozložení

System má k dispozici čtyři různé režimy zobrazení naměřených hodnot. První z nich je vidět na *Obr. 3-11*, jedná se o základní typ zobrazení tedy amplitudově-fázové rozložení, které můžeme chápat jako třírozměrný graf. Tento graf představuje naměřené hodnoty zdánlivého náboje odpovídající částečným výbojům v závislosti na fázi zkušebního napětí a četnosti, se kterou se výboje vyskytují. Každý šedý bod znázorňuje vrcholovou hodnotu impulzu částečného výboje v dané fázi (*osa x*) vzhledem k napětí zkušebního zdroje s konkrétní amplitudou (*osa y*). Četnost impulzů je zobrazena pomocí škály barev, od šedé zobrazující nejmenší počet impulzů částečných výbojů přes červenou, žlutou, až po světle modrou, která značí nejvyšší četnost impulzů. Zjištění informací o impulzech částečných výbojů v každém místě zobrazení lze provést pomocí kurzoru. Na vybraném místě detektor zobrazí velikost zdánlivého náboje, fázi a četnost částečných výbojů, které zaznamenal.

Druhým dostupným režimem zobrazení je četnost výbojů v závislosti na fázi zkušebního napětí za celou dobu měření, nebo vztažené na jednotku času (N/s), jak je znázorněno na *Obr. 3-12*. *Osa Y* zobrazující četnost výbojů může být v lineárním, nebo v logaritmickém měřítku.



Obr. 3-12: Zobrazení četnosti výbojů, vztažené na jednotku času v závislosti na fázi zkušebního napětí

Norma ČSN EN 60270 udává velikost indikované úrovně přístrojem Tab. 2 pro opakovací kmitočet dostatečně velikých stejně vzdálených impulzů. Předpokládá se nastavení plného rozsahu.

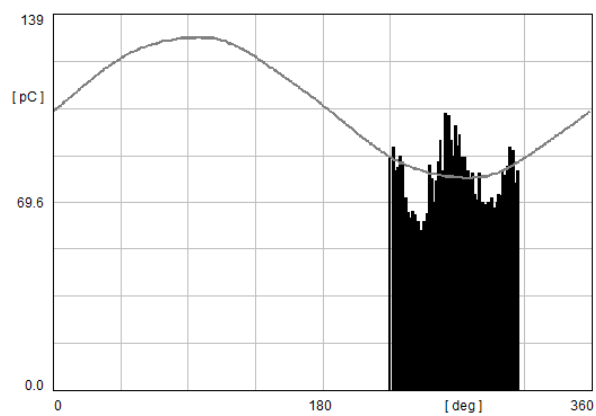
Tab. 2: Odezva na sled impulzů přístrojů pro měření ČV

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

Na Obr. 3-12 software měřicího systému poskytuje dva průběhy, modrý průběh je úměrný četnosti výbojů, které se vyskytly v záporné půlplně zkušebního napětí a červený průběh, odpovídá četnosti vyskytující se v kladné půlplně.

Další ze čtyř možných zobrazení představuje závislost četnosti výbojů na velikosti zdánlivého náboje, kde četnost výbojů může být jako u předchozího zobrazení vztaženo na celou dobu měření, nebo na jednotku času (N/s).

Čtvrtý režim zobrazení, který je k dispozici, se nazývá tzv. osciloskopický režim. Jde o pseudo-analogový osciloskop zobrazující velikost částečných výbojů jako u starších analogových detektorů. Tento režim zobrazení je užitečný ke sledování změn ve výskytu částečných výbojů, zatímco probíhá samotné měření. Potom systém zobrazuje impulzy částečných výbojů, které se vyskytly v průběhu běžného cyklu přenosu dat. Data pro tento režim zobrazení jsou odvozena výpočtem odchylky mezi dvěma po sobě jdoucími přenosy dat z paměti detektoru. Rychlost znovu zobrazení naměřených dat závisí nejen na výkonu mikroprocesoru počítače ale také na rychlosti, se kterou dokáže počítač spolu s detektorem komunikovat. Na konci měření je zobrazena celková obálka všech výbojů naměřených za celou přednastavenou dobu. Obálku je možné vidět na Obr. 3-13. Tento typ zobrazení se nejčastěji používá při porovnání výsledků měření se staršími typy analogových detektorů.



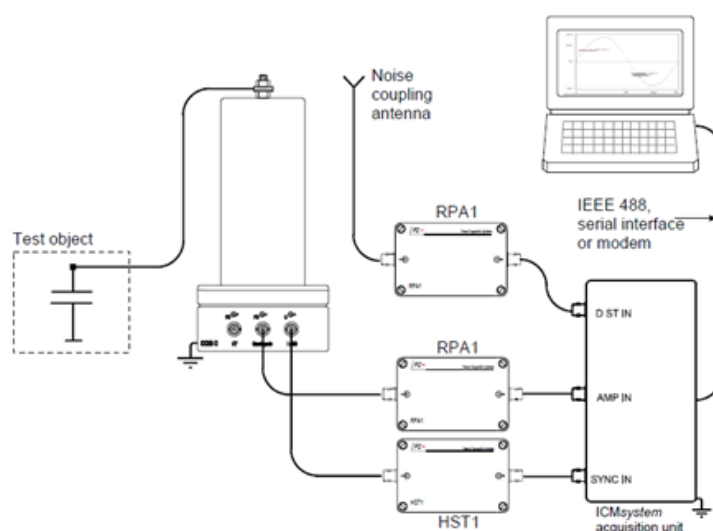
Obr. 3-13: Celková obálka výbojů v osciloskopickém režimu

4 Vlastní měření částečných výbojů

Pro porovnávání a vyhodnocování vhodných nastavení digitálního měřicího přístroje ICM systému s požadavky, které uvádí *norma ČSN EN 60270*, bylo provedeno několik typů měření částečných výbojů. Prvním typem bylo měření koróny jak v kladné tak v záporné polaritě, následně byly změřeny vnitřní výboje, klouzavé výboje a jako poslední měření částečných výbojů bylo provedeno měření koróny se stejnosměrným napětím v obou polaritách.

Před každým typem měření se provedla kalibrace měřicího systému kalibrátorem CAL1A splňující požadavky *normy ČSN EN 60270*, dodaným výrobcem pro digitální měřicí přístroj ICM systému. Schéma zapojení kalibrátoru je na *Obr. 3-6*.

Všechna jednotlivá měření se prováděla pro nastavený čas 60 s a s různými nastavenými hodnotami mrtvé doby, spouštěcí prahové úrovně, režimu A/D převodníku, šířky frekvenčního pásma, ale také zesílení. Typy měření byly zapojeny podle schéma *Obr. 4-1* s výjimkou zapojení antény ke snímání rušivého signálu. Zesilovač *HST1* přiváděl obraz zkoušeného napětí z výstupu vazební jednotky do modulu *DPR3*, kde byl napěťový signál vzorkován a přenesen do počítače, ve kterém bylo možné tuto velikost a průběh sledovat.



Obr. 4-1: Schematické zapojení měřicího obvodu pro měření částečných výbojů

Vazební jednotka byla připojena na vysokonapěťový zdroj zkušební napětí, který je tvořen autotransformátorem, jímž bylo regulováno a měřeno zkušební napětí a vysokonapěťovým transformátorem. Vysokonapěťový zdroj dosahuje parametrů, viz *Tab. 3* a je zobrazen na *Obr. 4-2*.



Obr. 4-2: Vysokonapětový zdroj zkušební napětí

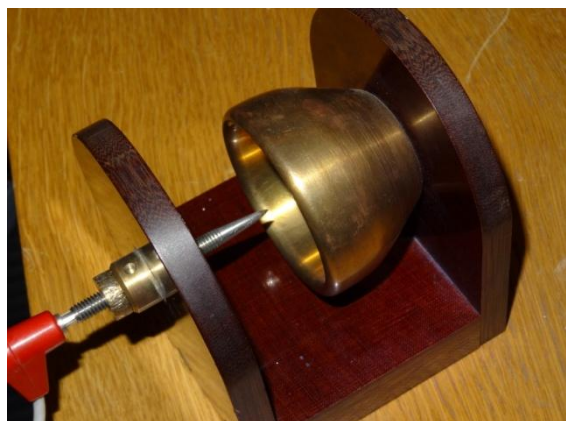
Tab. 3: Parametry vysokonapětového zdroje

<i>Jmenovité napětí</i>	$U_n=150\text{ kV}$
<i>Jmenovitý výkon</i>	$S_n=10\text{ kVA}$
<i>Frekvence</i>	$f=50\text{ Hz}$

4.1 Měření koróny

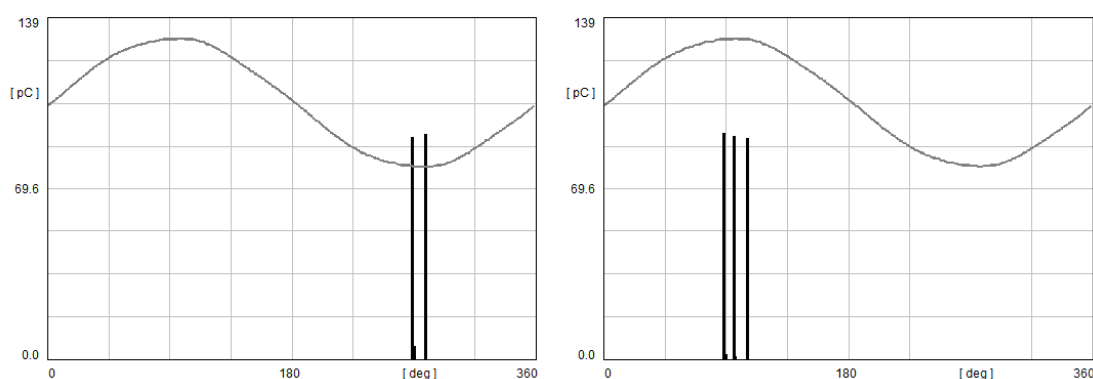
Před začátkem samotného měření jsem provedl patřičnou kalibraci daného měřicího obvodu. Postup samotné kalibrace byl v souladu s *technickou normou ČSN EN 60270*. Kalibrační přístroj byl připojen paralelně k vazební jednotce a zároveň tedy i ke zkoušenému objektu. Na kalibračním přístroji byl nastaven z důvodu nepříliš se měnící velikosti náboje částečných výbojů koróny kalibrační impulz $q_{kal}=100\text{ pC}$, kterým se provedla kalibrace obvodu pro měření koróny.

Zkoušený objekt představovalo uspořádání “hrot – miska“ neboli standardizované kalibrační jiskřiště *Obr. 4-3*. První zapojení bylo s přivedeným střídavým napětím na hrotu a uzemněnou miskou. Druhé zapojení spočívalo v přivedení střídavého napětí na misku, hrot byl uzemněn. Došlo k porovnání chování ICM systému při obou variantách měření.



Obr. 4-3: Standardizované kalibrační jiskřiště

Nastavením hodnoty napětí na $U_n=4,2\text{ kV}$ se začala vyskytovat mezi hrotem a miskou koróna. V online režimu ICM systému jsem pozoroval velikost měnícího se náboje částečných výbojů v závislosti na čase a velikost přiloženého napětí. Přepnutím do osciloskopického režimu bylo možné pozorovat vznik částečných výbojů, viz Obr. 4-4.



Obr. 4-4: Osciloskopický režim výbojové činnosti kladné a záporné koróny 4,2 kV

4.2 Měření vnitřních výbojů

Před tímto měřením se provedla kalibrace daného měřicího obvodu pomocí stejného kalibračního přístroje jako u předchozího měření, avšak kalibrační impuls byl nastaven z důvodu měnící se velikosti náboje vnitřních částečných výbojů na $q_{kal}=50\text{ pC}$.

Zkoušený objekt byl transformátor VTDO 25 viz Obr. 4-5, jehož použití je nejčastěji v elektrických sítích VN pro napájení (nabíjení) baterií vypínacího mechanismu dálkově ovládaných úsečníků (DOÚ) nebo automatických úsečníků (AÚ). Jmenovité napětí na primární straně je $U_1=22\text{ kV}$ a výstupní napětí $U_2=100\text{ V}$. Zkouška byla zaměřena na izolaci daného transformátoru, což byla pryskyřice obsahující svojí nedokonalostí vzduchové bublinky nebo vzduchové mezery.



Obr. 4-5: Zkoušený objekt transformátor VTDO 25

Norma udává zkušební napětí transformátoru hodnotou $U_n=40$ kV. Nastavením střídavého napětí na hodnotu $U_n=32$ kV a ponecháním tohoto napětí na zkoušeném objektu začal po krátkém čase ICM systém zobrazovat vzniklé částečné výboje. Posléze jsem provedl měření a vyhodnocení naměřených dat, ze kterých je možné určit vhodné nastavení daných prvků, které by vedlo k objektivnímu záznamu skutečné hladiny výbojové činnosti v zařízení.

4.3 Měření klouzavých výbojů

Jak jsem výše uvedl, i před tímto měřením se provedla kalibrace měřicího systému. Kalibrační impuls jsem zvolil z důvodu neznámé velikosti klouzavých výbojů na $q_{kal}=100$ pC. Po samotné kalibraci měřicího systému se kalibrační přístroj odpojil a systém byl připraven pro zaznamenávání a vyhodnocování částečných výbojů.

Zkoušený objekt byla průchodka, kterou můžeme vidět na Obr. 4-6 a byla připojena paralelně k vazební jednotce.

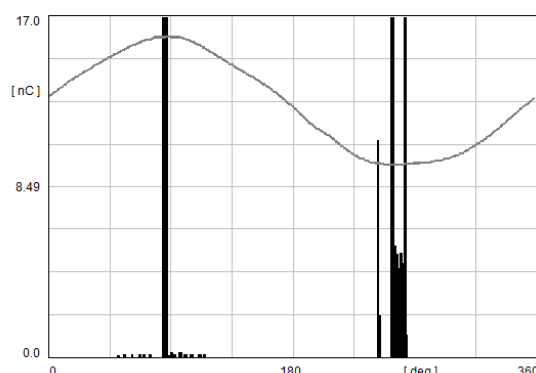


Obr. 4-6: Průchodka pro měření klouzavých výbojů

Po přivedení zkušebního napětí a postupném zvyšování se začaly objevovat výboje, které měly charakter koróny. Při zvýšení napětí a docílení hodnoty cca $U_n=32\text{ kV}$ se začaly objevovat klouzavé výboje se značnou velikostí nábojů. Bylo možné je zaznamenat i sluchem. Značně velké impulzy částečných výbojů dosahovaly velikostí, které překračovaly horní hranici zobrazovacích schopností měřiče. Jednoduše řečeno signál byl tak veliký, že i při sníženém zesílení na nejnižší hodnotu ho měřič nezaznamenal bez omezení.

Jediným možným způsobem změření klouzavých výbojů o tak značné velikosti nábojů až desítek nC , by byla možnost provést kalibraci pomocí kalibračního přístroje, který dokáže kalibrovat na hodnoty nC .

Nastavením hodnoty napětí na $U_n=32\text{ kV}$ jsem pozoroval v online režimu ICM systému velikost měnícího se náboje částečných výbojů v závislosti na čase a velikost přiloženého napětí. Přepnutím do osciloskopického režimu bylo možné pozorovat vznik klouzavých částečných výbojů, viz Obr. 4-7.

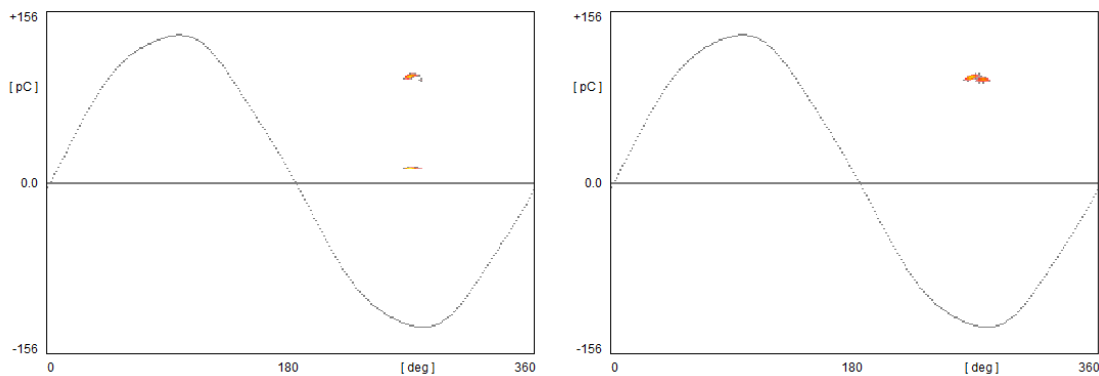


Obr. 4-7: Osciloskopický režim výbojové činnosti klouzavých výbojů 32 kV

Následně jsem provedl měření a porovnání nastavených hodnot v závislosti na výsledku měření.

I. Vliv volby mrtvé doby

Pro nastavenou hodnotu *mrtvé doby* $5\ \mu\text{s}$ jsem změřil amplitudově-fázové rozložení, kde je možné pozorovat četnost výbojů, která je zobrazena škálou barev. Na *Obr. 4-8 a)* a *Obr. 4-9 a)* je možné vidět četný výskyt větších impulzů částečných výbojů, které mají velikost zdánlivého náboje okolo $100\ \text{pC}$ a výskyt menších impulzů v okolí prahové úrovně *LLD*, jejichž velikost zdánlivého náboje je daleko menší. Rozložení lze vysvětlit pomocí *mrtvé doby*, která udává dobu, po kterou systém zpracovává jeden impulz, a tedy nemůže přijmout jiný impulz. Nastavení *mrtvé doby* $5\ \mu\text{s}$ se projevilo na četnosti velkých výbojů. Vlivem zaměstnávání detektoru malými impulzy nedošlo k zachycení správné četnosti velkých impulzů.

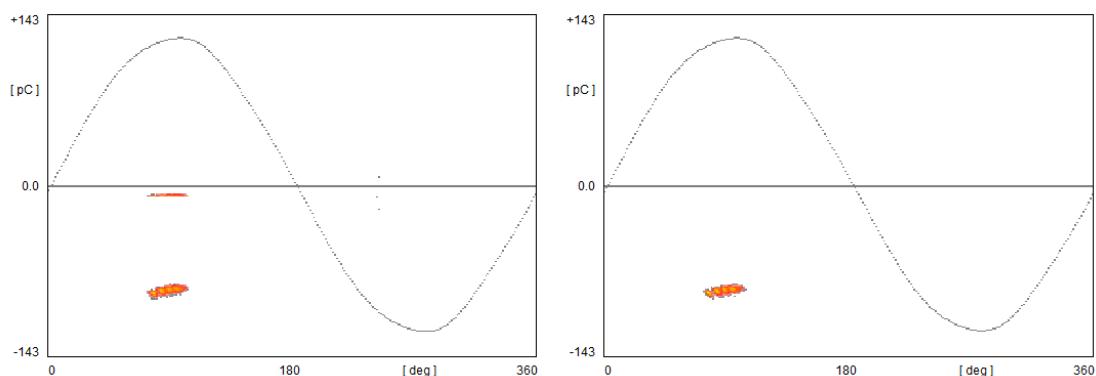


a) *mrtvá doba* $5\ \mu\text{s}$

b) *mrtvá doba* $20\ \mu\text{s}$

Obr. 4-8: Amplitudově-fázové rozložení ČV kladné koróny 4,2 kV

Nastavením hodnoty $20\ \mu\text{s}$ došlo k prodloužení doby zpracovávání jednoho impulzu systémem. Potom ICM systém reagoval pouze na větší impulzy částečných výbojů, to se projevilo větší četností velkých výbojů. Viz *Obr. 4-8 b)* a *Obr. 4-9 b)*.



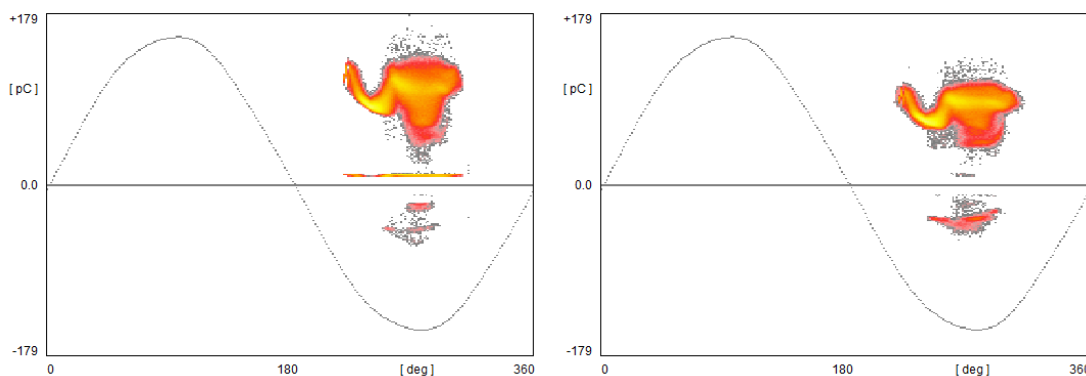
a) *mrtvá doba* $5\ \mu\text{s}$

b) *mrtvá doba* $20\ \mu\text{s}$

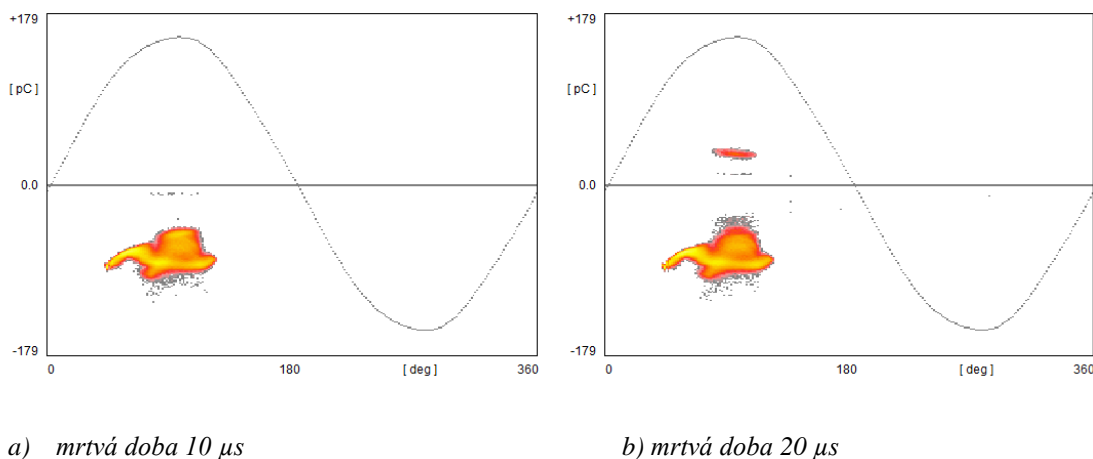
Obr. 4-9: Amplitudově-fázové rozložení ČV záporné koróny 4,2 kV

S odkazem na *Obr. 3-8* bych volil velikost mrtvé doby tak, aby nedocházelo k zaznamenávání jednoho impulsu vícekrát. U měření s nastavenou *mrtvou dobou* $5 \mu\text{s}$ je možné, že systém zaznamenal vícekrát samotný impuls nebo jeho doznívání. To se projevilo snížením četnosti větších výbojů. Dostatečně dlouhou *mrtvou dobu* bych volil $20 \mu\text{s}$.

Změnou napětí došlo k nárůstu četnosti výbojů a změně charakteristického zobrazení v podobě rozšířeného záznamu, viz *Obr. 4-10* a *Obr. 4-11*. Na *Obr. 4-10 a)* a *Obr. 4-11 a)* lze pozorovat překmity do opačné polarity a pás četnosti výbojů, který je důsledkem překmitu úrovně *LLD*. To je způsobené nevhodným nastavením *mrtvé doby* a prahové úrovně *LLD*, kdy je nastavena malá *mrtvá doba*. Systém zpracovává impuls, který překročil úroveň *LLD* po dobu *mrtvé doby*. Může se stát, že při další *mrtvé době* zaznamená doznívající předchozí impuls, který svou velikostí překročí úroveň *LLD*. To vede k vynechání větších impulsů pocházejících od částečných výbojů ve zkoušeném zařízení. Může se to projevit na celkové četnosti.

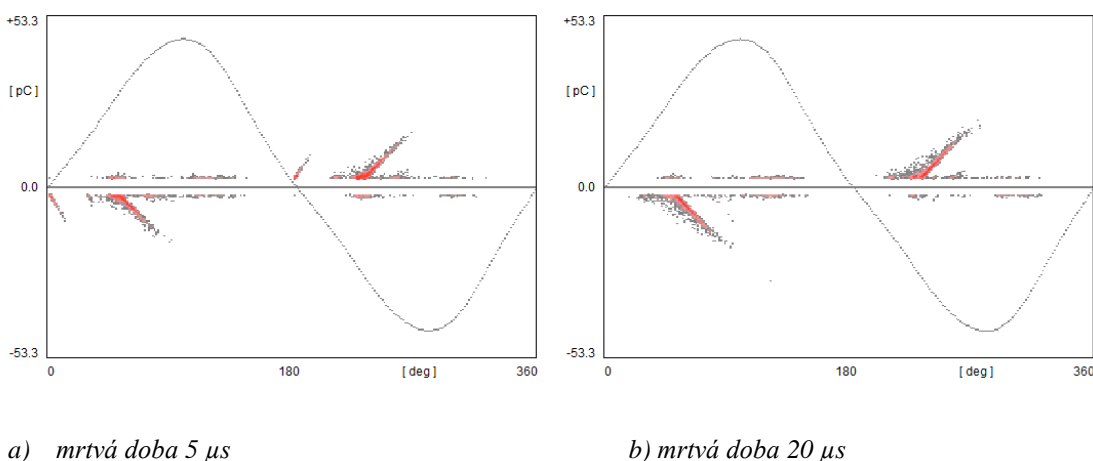
a) *mrtvá doba* $10 \mu\text{s}$ b) *mrtvá doba* $20 \mu\text{s}$ *Obr. 4-10: Amplitudově-fázové rozložení ČV kladné koróny 6 kV*

Zvýšením *mrtvé doby* systém zpracovával impuls dostatečně dlouho a reagoval pouze na první nejvyšší vrchol impulsu signálu. Tím se odstranil pás četnosti výbojů v okolí prahové úrovně *LLD* a došlo k zobrazení více středních překmitů do opačné polarity.



Obr. 4-11: Amplitudově-fázové rozložení ČV záporné koróny 6 kV

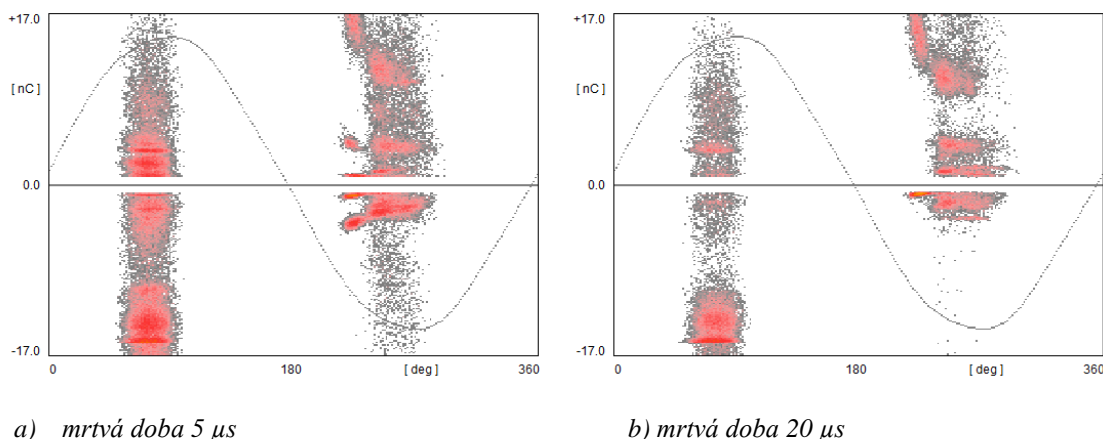
U vnitřních výbojů Obr. 4-12 si lze všimnout menší četnosti při nastavené mrtvé době 5 μ s. Výsledky jsou podobné jako u měření koróny 4,2 kV, kde došlo vlivem malé mrtvé doby k nesprávnému zaznamenání četnosti velkých výbojů.



Obr. 4-12: Amplitudově-fázové rozložení vnitřních ČV 32 kV

Nastavení větší mrtvé doby 20 μ s vedlo k nezaznamenání doznívajících nebo malých impulzů, což se projevilo zvýšením četnosti velkých výbojů.

Z porovnání klouzavých výbojů zobrazeno na Obr. 4-13 a) a b) je vidět, že při nastavené mrtvé době 5 μ s systém zobrazil četnost menších impulzů v blízkosti úrovně LLD, ale také četnost ve středním pásmu. To mohlo být způsobeno dozníváním velikých impulzů nebo vznikem koróny. Při prodloužení mrtvé doby na 20 μ s došlo k zobrazení velikých impulzů klouzavých výbojů přesahující rozsah měřicího systému a četnost impulzů v okolí úrovně LLD a ve středním pásmu byla omezena.

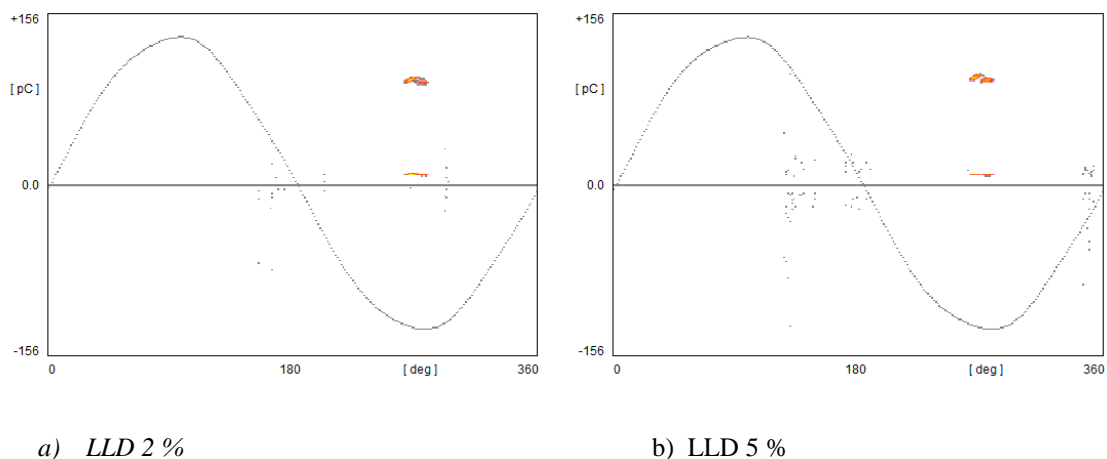


Obr. 4-13: Amplitudově-fázové rozložení klouzavých ČV 32 kV

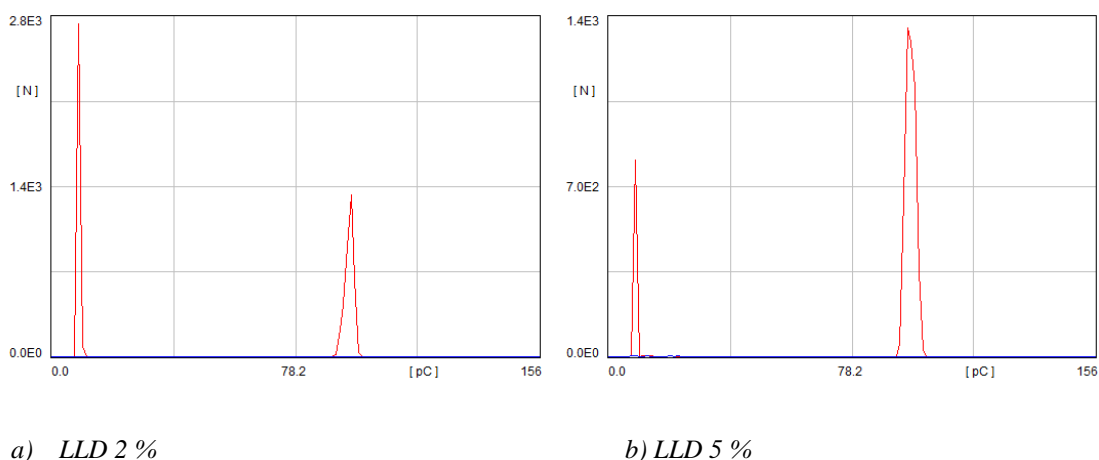
Z výše uvedeného vyplývá, že nastavení malé velikosti *mrtvé doby* může vést k mnohačetným záznamům jednoho impulzu, to je způsobeno vlivem doznívání. Zvýšenou *mrtvou dobou* dochází ke ztrátě záznamu některých impulzů a výsledky měření mohou být tedy zkreslené. Navíc musím znát celkovou velikost *kumulované mrtvé doby*, která se nasčítá po celou dobu měření. Ta nesmí být příliš dlouhá, jinak by ovlivnila přesnost měření. Pro dosažení přesného měření je proto třeba provést vhodné nastavení *mrtvé doby* a úrovně *LLD*. To se však v praxi nastavuje obtížně, protože většinou není známý typ výbojové činnosti, který může pocházet i z více zdrojů.

II. Vliv změny prahové úrovně LLD %

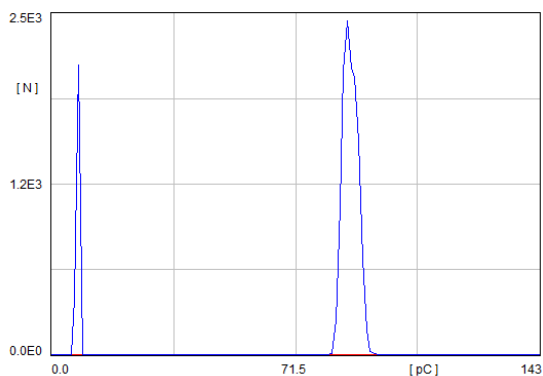
Nastavením *mrtvé doby* na 10 μ s a snížením prahové úrovně *LLD* na hodnotu 2 % bylo dosaženo především větší četnosti v okolí *LLD*. Jde o nastavitelnou úroveň, která spustí *A/D* převodník jestliže nastal impulz, jehož amplituda byla větší než nastavená úroveň. Výsledkem měření je závislost četnosti impulzů částečných výbojů na velikosti zdánlivého náboje pro nastavené *LLD* 2 % a *LLD* 5 %. Porovnáním naměřených hodnot, které je možno vidět na Obr. 4-15 a) a Obr. 4-15 b) lze říci, že pro nastavené *LLD* 2 % je četnost menších impulzů patřičně větší než u *LLD* 5 %.



Obr. 4-14: Amplitudově-fázové rozložení ČV kladné koróny 4,2 kV



Obr. 4-15: Závislost četnosti impulzů ČV na velikosti zdánlivého náboje kladné koróny 4,2 kV

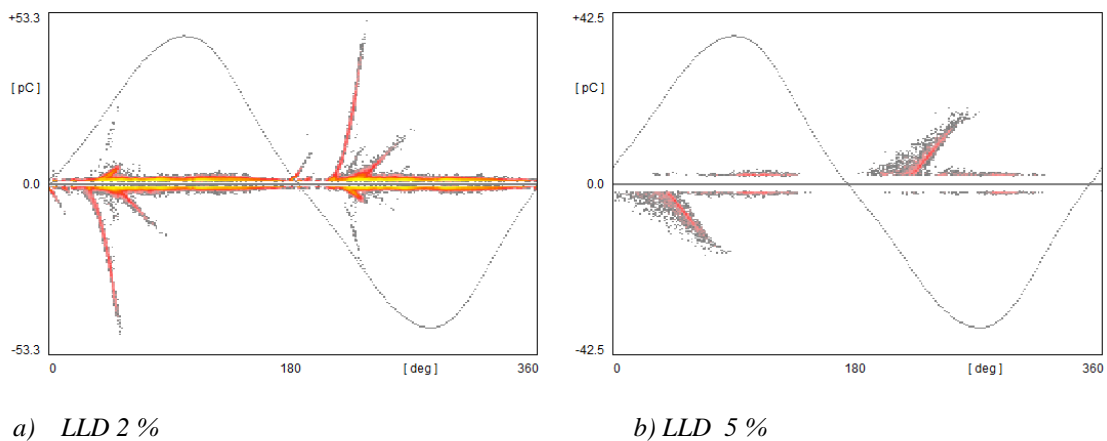


Obr. 4-16: Závislost četnosti impulzů ČV na velikosti zdánlivého náboje záporné koróny 4,2 kV při LLD 5 %

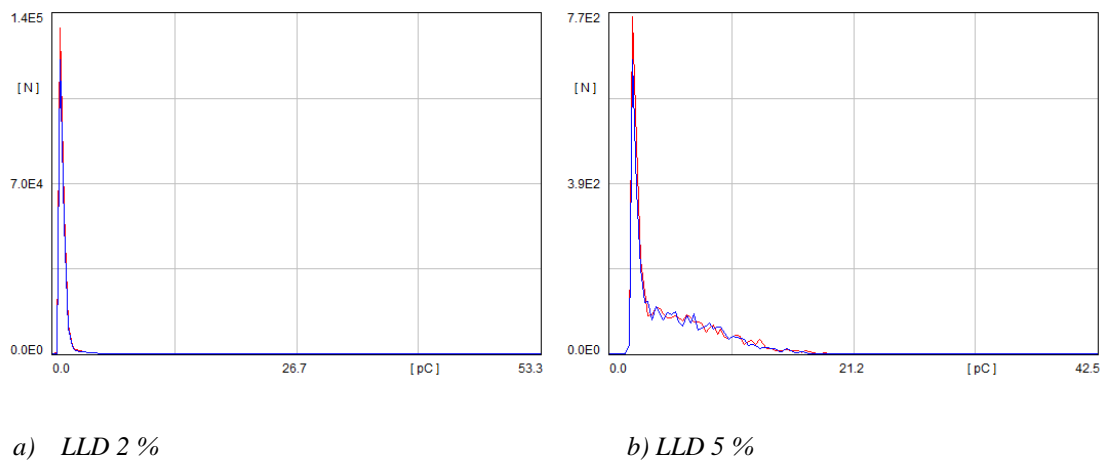
U vnitřních výbojů Obr. 4-17 při nastavené úrovni LLD 2 % je možné vidět v této blízkosti úrovně pás značně velké četnosti impulzů částečných výbojů. Z porovnání Obr. 4-17 a) a Obr. 4-17 b) lze říci, že při nastavení úrovně LLD 2 % je pás značně veliké četnosti tvořen rušivým pozadím způsobeným dozníváním větších impulzů nebo šumem v měřicím signálu. Na Obr. 4-17 a) je možné pozorovat v okolí průběhu sinusovky s nulou zobrazení velkých impulzů. Ty mohly být zapříčiněny závadou během doby měření pod

napětím nebo vlivem menší četnosti malých impulzů v této oblasti. Potom tedy nebyl detektor zahlcen četností malých impulzů a mohl zaznamenat ty velké.

Na Obr. 4-18 je vidět jak výrazně se změnil četnost velkých impulzů přenastavením prahové úrovně *LLD*. Zvýšením prahové úrovně došlo k omezení velké četnosti malých impulzů. Potom nebyl detektor zahlcen těmito malými impulzy, což se projevilo nárůstem četnosti velkých impulzů.

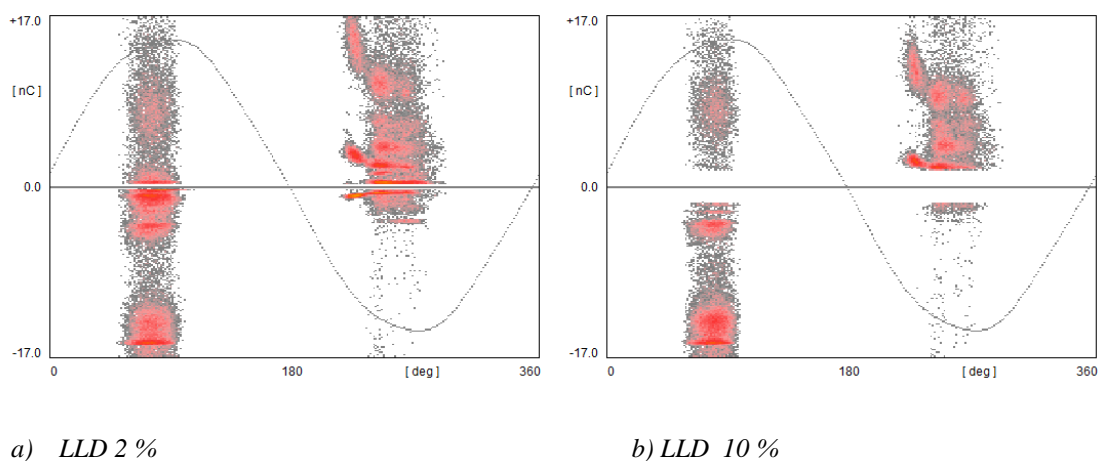


Obr. 4-17: Amplitudově-fázové rozložení vnitřních ČV 32 kV

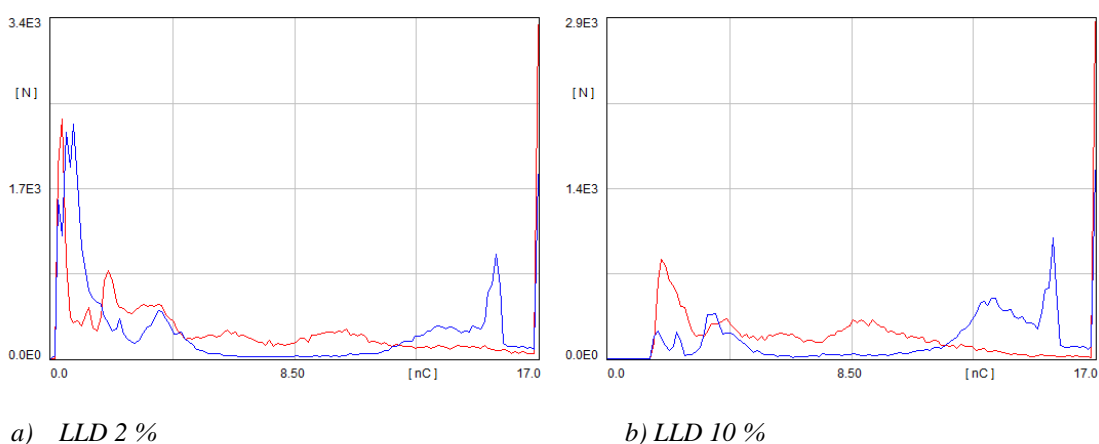


Obr. 4-18: Závislost četnosti impulzů vnitřních ČV na velikosti zdánlivého náboje 32 kV

Jako u koróny nebo vnitřních výbojů je konstatování vlivu nastavené úrovně *LLD* na klouzavé výboje téměř shodný. Na Obr. 4-19 lze pozorovat rozdíl mezi úrovní *LLD 2 %* a *10 %*. To se projevilo zanedbáním malých impulzů, jak je možné vidět na Obr. 4-20.



Obr. 4-19: Amplitudově-fázové rozložení klouzavých ČV 32 kV



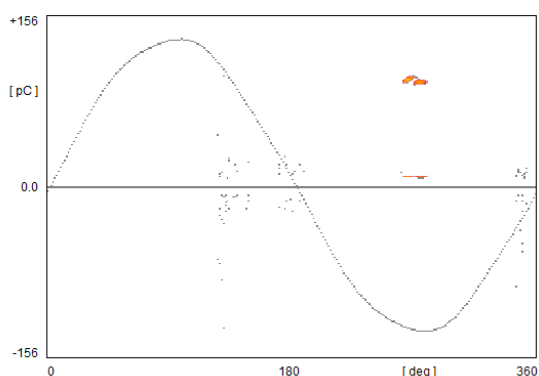
Obr. 4-20: Závislost četnosti impulzů klouzavých ČV na velikosti zdánlivého náboje 32 kV

Z výše uvedeného plyne nevýhoda nastavení malé prahové úrovně *LLD*. Spočívá v tom, že systém zpracovává malé impulzy, dozníváním velikých impulzů nebo přítomné hladiny šumu v měřicím signálu. Tím může dojít k vynechání zpracování větších impulzů, jak definuje *norma ČSN EN 60270*. Navíc se může promítnout jak v četnosti velikých impulzů, tak i v celkové četnosti. Hodnotu spouštěcí prahové úrovně *LLD* bych volil nepatrně větší oproti úrovni šumu nebo dle povolené velikosti výbojů pro daný typ zařízení. V mém případě *LLD 5 %* nebo *10 %*.

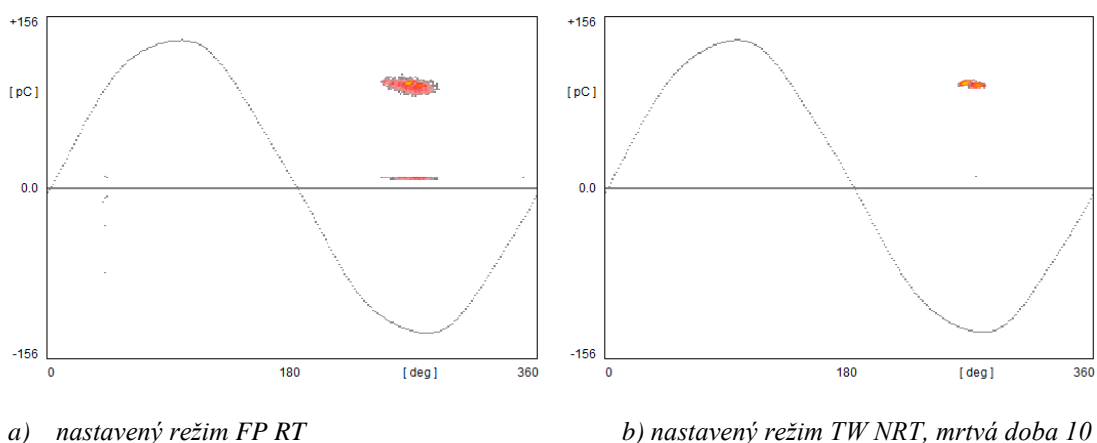
Definice normy ČSN EN 60270: Odezva přístroje obvykle zahrnuje hladiny kontinuálního nebo základního šumu z vedení. Tento šum může být způsoben **šumem pozadí** nebo velikým množstvím **impulzů částečných výbojů**, jejichž úroveň je malá v porovnání s největší měřenou úrovní. Může být zaveden práh citlivosti z důvodu zamezení záznamu takovýchto signálů. Je-li práh použit, musí být zaznamenán.

III. Porovnání trigovacích režimů

Provozní režimy (*FP NRT*), (*FP RT*) a (*TW NRT*) se od sebe liší důležitými vlastnostmi při měření. Ty jsou podrobněji popsány v kapitole 3.2.1. Porovnáním naměřených hodnot s jednotlivými režimy lze komentovat režim (*FP RT*), kde došlo systémem k automatickému prodloužení *mrtvé doby* na tzv. *globální mrtvou dobu* A/D převodníku tak, aby byl impuls částečného výboje zaznamenán pouze jednou. To se projevilo nárůstem četnosti velkých impulsů od režimu (*FP NRT*) Obr. 4-22 a Obr. 4-22 a). Nastavením režimu (*TW NRT*) systém zaznamenal pouze největší impulsy v nastavené *mrtvé době*. Z porovnání režimů (*FP RT*) a (*TW NRT*) na Obr. 4-22 a Obr. 4-23 vyplývá, že režim časového okna je vhodnější za určitých okolností. Vzhledem nastavené menší *mrtvé doby* došlo k zaznamenání větší četnosti impulsů než u režimu (*FP RT*). Lze tedy říci, že režim časového okna (*TW NRT*) je vhodnější, ale závisí na dobře zvolené velikosti *mrtvé doby*.



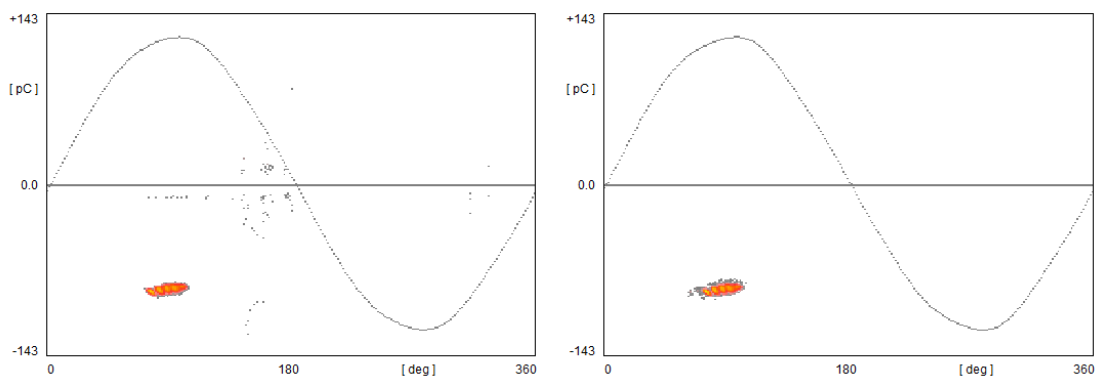
Obr. 4-21: Amplitudově-fázové rozložení ČV kladné koróny 4,2 kV režim *FP NRT*



a) nastavený režim *FP RT*

b) nastavený režim *TW NRT*, mrtvá doba 10 μ s

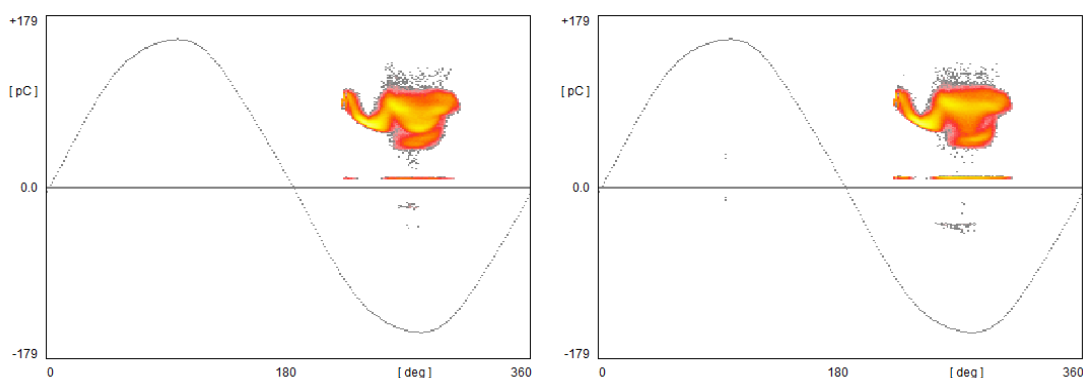
Obr. 4-22: Amplitudově-fázové rozložení ČV kladné koróny 4,2 kV

a) nastavený režim *FP RT*b) nastavený režim *TW NRT*, mrtvá doba $9 \mu\text{s}$

Obr. 4-23: Amplitudově-fázové rozložení ČV záporné koróny 4,2 kV

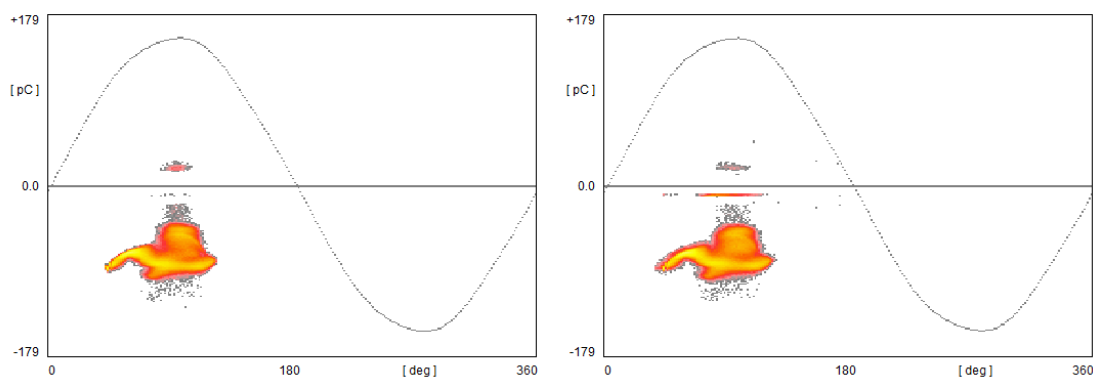
Na Obr. 4-24 a Obr. 4-25 jsou vidět průběhy koróny při zvýšeném napětí s nastavenými režimy (*FP RT*) a (*TW NRT*). Ze všech záznamů je patrné, že se jedná o velkou četnost impulzů. U režimu (*FP RT*) může dojít vlivem velké četnosti impulzů k nárůstu *globální mrtvé doby*. Potom je třeba dobře nastavit úroveň *LLD*, která by mohla svojí malou velikostí způsobit enormní nárůst *globální mrtvé doby*, což by vedlo ke “slepotě” neboli ztrátě schopnosti záznamu impulzů.

Porovnáním režimů na Obr. 4-24 lze komentovat větší výskyt impulzů u režimu (*FP RT*) při měření kladné koróny. U režimu (*TW NRT*) došlo vlivem velké četnosti a nastavené *mrtvé doby* k nárůstu celkové *kumulované mrtvé doby*, což mohlo mít patřičný vliv na přesnost měření. Ačkoli by neměla mít malá úroveň *LLD* značný vliv na ztrátu velkých impulzů, je možné vidět na Obr. 4-24 b) pás značné četnosti v okolí úrovně *LLD*, který mohl zapříčinit ztrátu některých velkých impulzů.

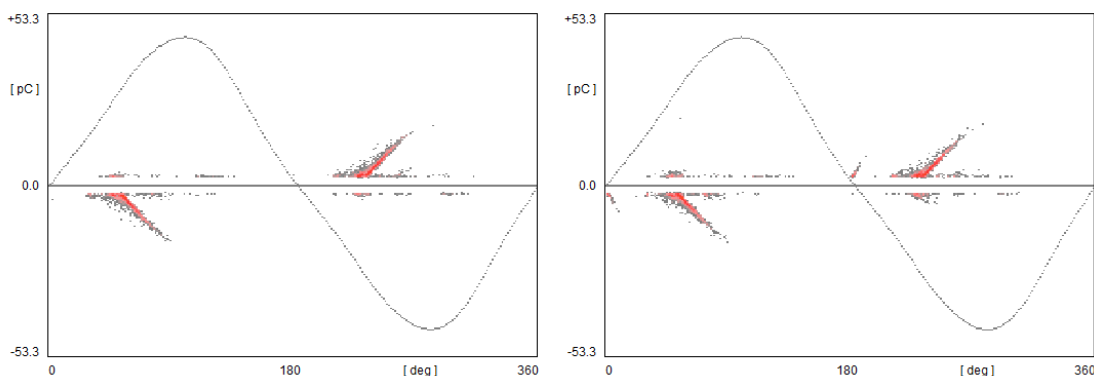
a) nastavený režim *FP RT*b) nastavený režim *TW NRT*, mrtvá doba $10 \mu\text{s}$

Obr. 4-24: Amplitudově-fázové rozložení ČV kladné koróny 6 kV

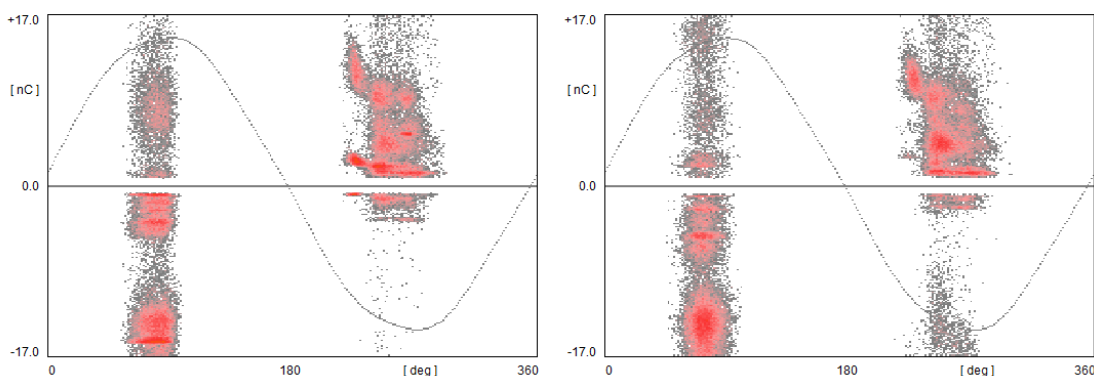
Z porovnání na *Obr. 4-25* je patrná větší četnost velkých impulzů u režimu (*TW NRT*). To může být zapříčiněno kratší celkovou *kumulovanou mrtvou dobou*. Stejně jako u *Obr. 4-24 b*) je možné že došlo vlivem malé úrovně *LLD* ke ztrátě některých velkých impulzů. I přes nastavenou hodnotu *mrtvé doby* $10\ \mu\text{s}$ a *LLD* 5 % byl snímán pás četnosti v okolí úrovně *LLD*. Z důvodu zamezení nárůstu *celkové kumulativní mrtvé doby* bych volil zvýšení úrovně *LLD*.

a) nastavený režim *FP RT*b) nastavený režim *TW NRT*, mrtvá doba $10\ \mu\text{s}$ *Obr. 4-25: Amplitudově-fázové rozložení ČV záporné koróny 6 kV*

Na *Obr. 4-26* uvedu porovnání režimů (*FP RT*) a (*TW NRT*) u vnitřních výbojů. U obou dvou záznamů se jedná o menší četnost impulzů. Pro režim (*FP RT*) byla nastavena úroveň *LLD* 5 %. Vlivem menší četnosti impulzů nenarostla *globální mrtvá doba*. Potom došlo k přesnějšímu záznamu impulzů částečných výbojů. Režimem (*TW NRT*) došlo k zobrazení největších impulzů během nastavené *mrtvé doby* $10\ \mu\text{s}$. Lze tedy říci, že četnost velkých impulzů je téměř shodná pro oba typy měření.

a) nastavený režim *FP RT*b) nastavený režim *TW NRT*, mrtvá doba $10\ \mu\text{s}$ *Obr. 4-26: Amplitudově-fázové rozložení vnitřních ČV 32 kV*

Porovnání režimů na klouzavých výbojích je znázorněno na *Obr. 4-27*. Režim (*FP RT*) jsem nastavil s úrovní *LLD 5 %*. Nastavením malé úrovně *LLD 5 %* systém zaznamenal větší četnost impulzů v blízkosti této úrovně. Mohlo to být způsobeno nárůstem *globální mrtvé doby*, která zapříčinila neschopnost záznamu velkých impulzů. Potom tedy je vhodnější režim (*TW NRT*), kde jsem dosáhl záznamu větší četnosti velkých impulzů pro *LLD 5 %* a *mrtvou dobu 10 μs*. Vzhledem k tomu, že impulzy zobrazeny v okolí úrovně *LLD* mají značnou velikost, bych zdůraznil, že se jedná o impulzy vzniklé korónou.

a) nastavený režim *FP RT*b) nastavený režim *TW NRT*, mrtvá doba $10 \mu\text{s}$ *Obr. 4-27: Amplitudově-fázové rozložení klouzavých ČV 32 kV*

Na závěr lze říci, že je v tomto případě vhodnější režim časového okna (*TW NRT*), který zaznamenává větší množství velkých impulzů než režim (*FP RT*). U režimu (*TW NRT*) závisí na dobře zvolené velikosti *mrtvé doby* a u velkých četností i úrovní *LLD*, jelikož její malá hodnota může mít vliv na záznam velkých impulzů. U režimu (*FP RT*) je nutné správně nastavit úroveň *LLD* tak, aby při velké četnosti nedošlo k nárůstu *globální mrtvé doby* a tím k neschopnosti záznamu impulzů. U obou režimů zejména při velké výbojové činnosti je nezbytně nutné znát celkovou *kumulativní mrtvou dobu*, její nárůst by vedl ke snížení přesnosti měření.

IV. Vliv změny frekvenčního pásma

Nastavováním frekvenčního pásma lze měnit citlivost měřicího systému na impulzy částečných výbojů. *Technická norma ČSN EN 60270 uvádí, pokud je amplitudové kmitočtové spektrum vstupních impulzů konstantní alespoň v rozmezí šířky pásma Δf měřicího přístroje, potom je odezva přístroje na impuls napětí s vrcholovou hodnotou úměrná náboji vstupního impulsu.*

Nejvyšší citlivost měřiče je dosažena při frekvenčním rozsahu $40 - 800 \text{ kHz}$.

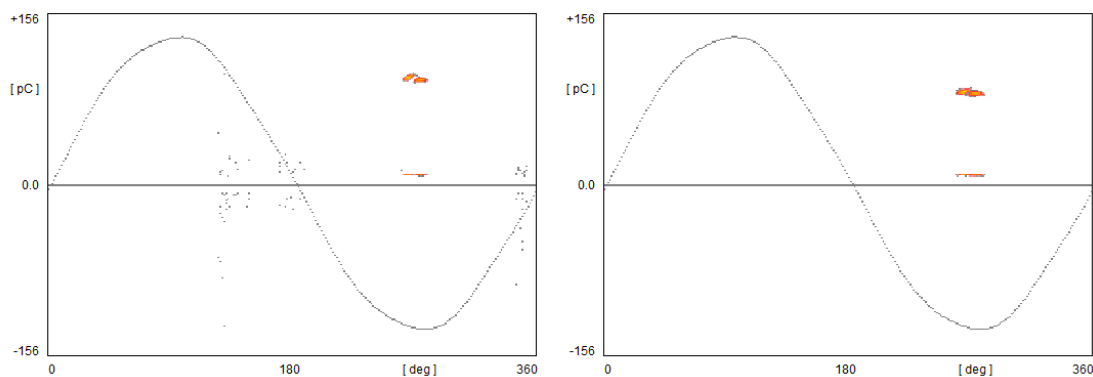
V tomto rozsahu je časová konstanta T integračního členu RC poměrně malá oproti časovým konstantám proudových impulzů částečných výbojů τ a platí $T \leq \tau$. Při této podmínce se tvar výstupního napěťového signálu blíží k tvaru vstupního signálu proudového impulzu.

Snížením horní meze na 40 - 600 kHz a následně snížením horní i dolní meze na 100 - 250 kHz došlo k zúžení frekvenčního pásma měřiče a vzrostla časová konstanta T integračního členu RC . Potom bude platit, že velikost časové konstanty T bude větší než časová konstanta některých proudových impulzů $T > \tau$. Proudový impulz je pro RC integrační člen velmi rychlým dějem, tím dochází ke zkreslení amplitudy výstupního napěťového signálu.

Na následujících záznamech je možné pozorovat zkreslení amplitudy impulzů částečných výbojů při snižování frekvenčního pásma detektoru. Zároveň je také možné pozorovat vliv snižování frekvenčního pásma na četnost impulzů. Jelikož dochází ke změně tvaru a amplitudy impulzů ve frekvenčním spektru výbojů, zmenšením frekvenčního pásma detektoru dojde k omezenému zachycení impulzů, kde některé impulzy nemusí být vůbec zachyceny, což se projeví na četnosti. Opět však záleží na vhodném nastavení ostatních parametrů, např. na Obr. 4-32 a) byl detektor zaměřen na výboji menší amplitudy, snížením horní mezní frekvence detektoru došlo ke změně zobrazení a detektor zobrazil i veliké impulzy.

Ze záznamů je patrné, čím užší šířka pásma je nastavena, tím je docíleno většího zkreslení amplitudy a četnosti impulzů. Pro přesné měření bych proto doporučil ponechat šířku pásma na co největší hodnotě.

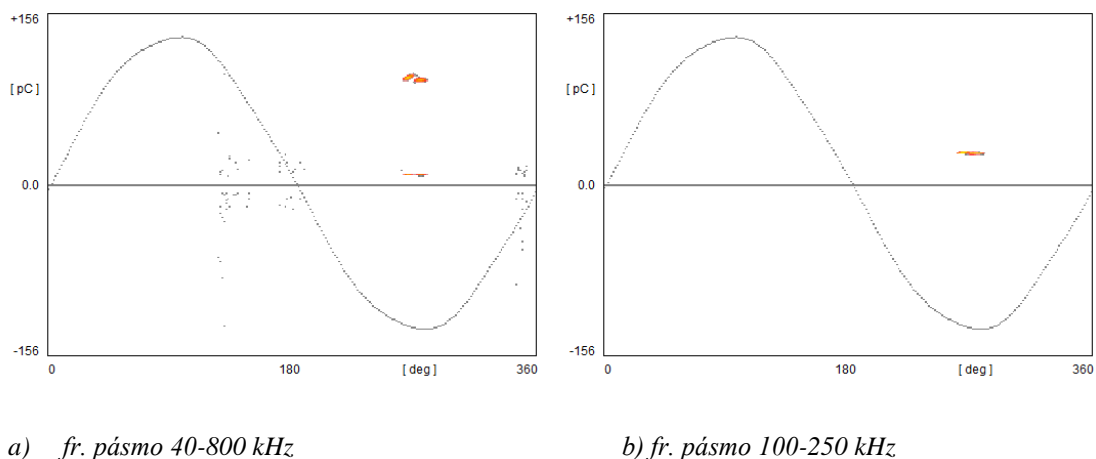
Záznamy zobrazující závislost četnosti impulzů na velikosti zdánlivého náboje je možné pozorovat v příloze.



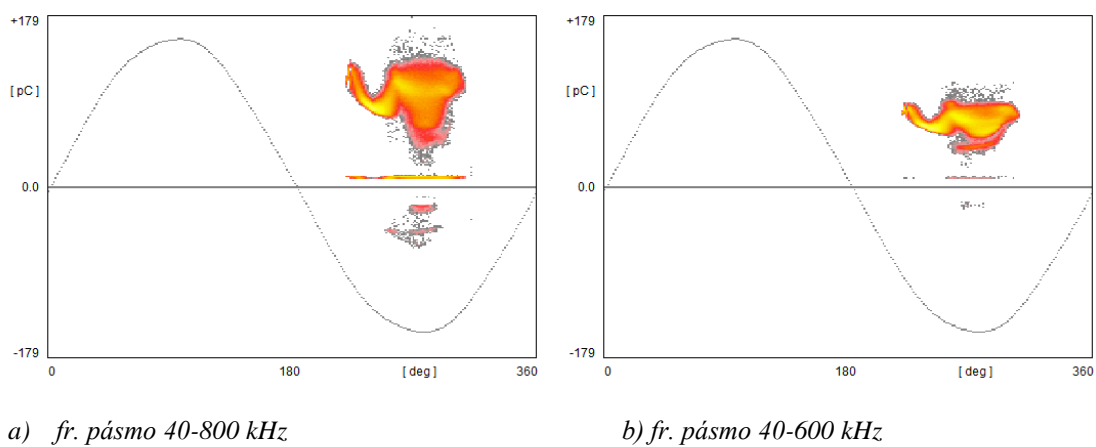
a) fr. pásmo 40-800 kHz

b) fr. pásmo 40-600 kHz

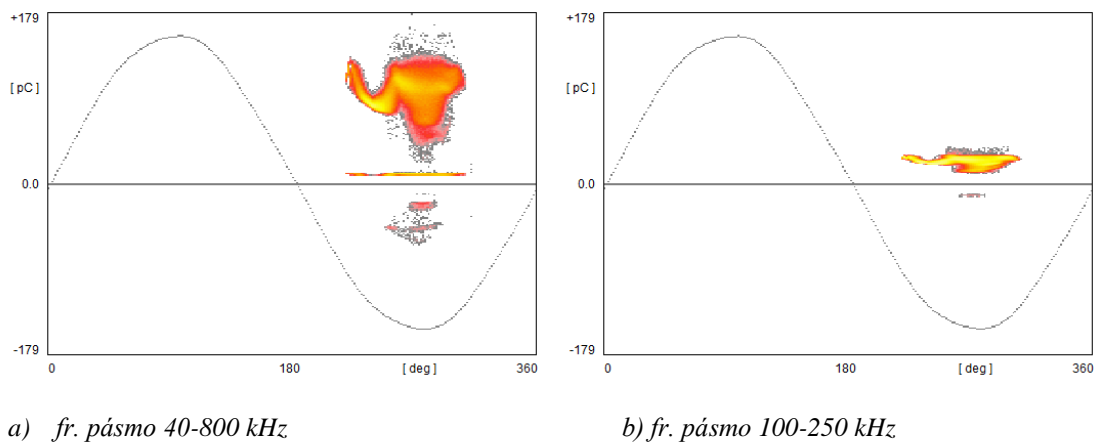
Obr. 4-28: Amplitudově-fázové rozložení ČV koróny 4,2 kV



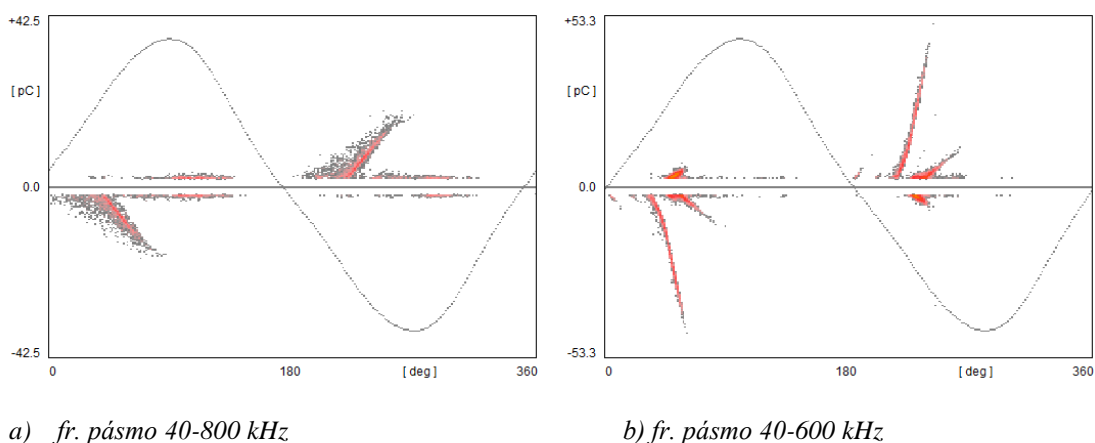
Obr. 4-29: Amplitudově-fázové rozložení ČV koróny 4,2 kV



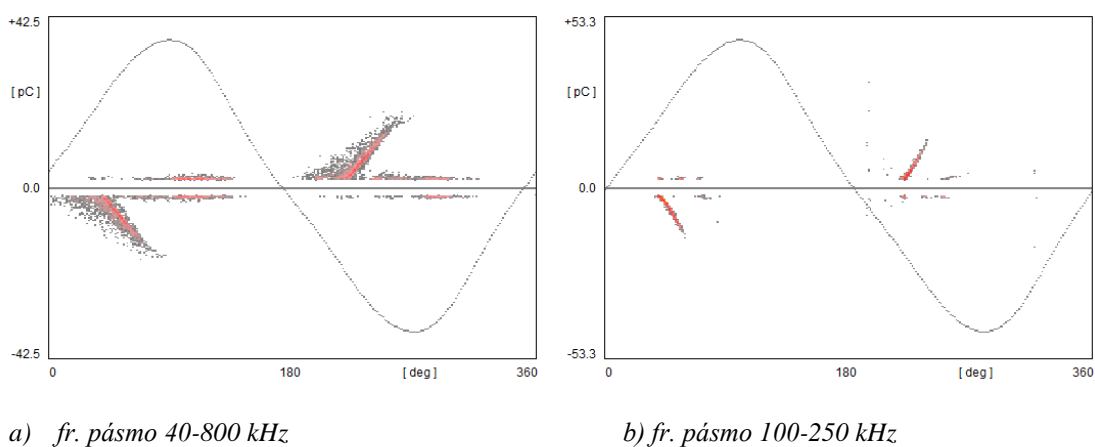
Obr. 4-30: Amplitudově-fázové rozložení ČV koróny 6 kV



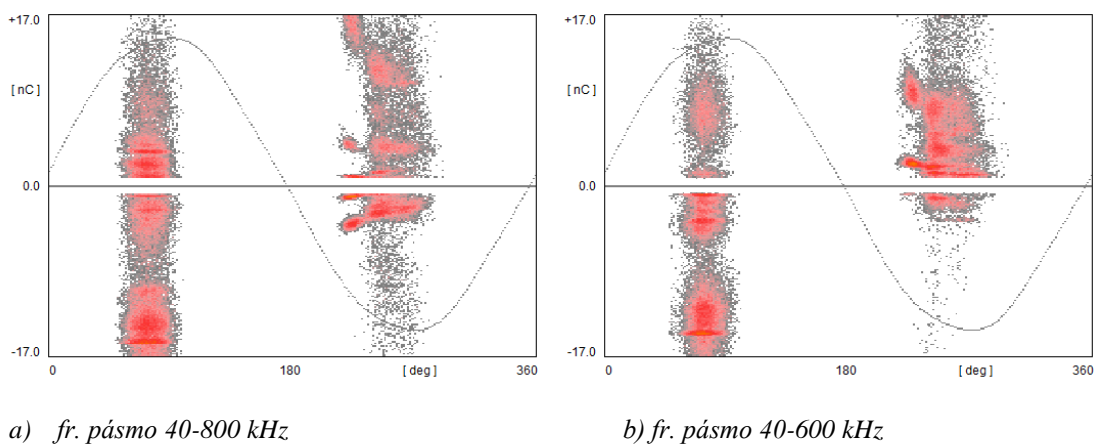
Obr. 4-31: Amplitudově-fázové rozložení ČV koróny 6 kV



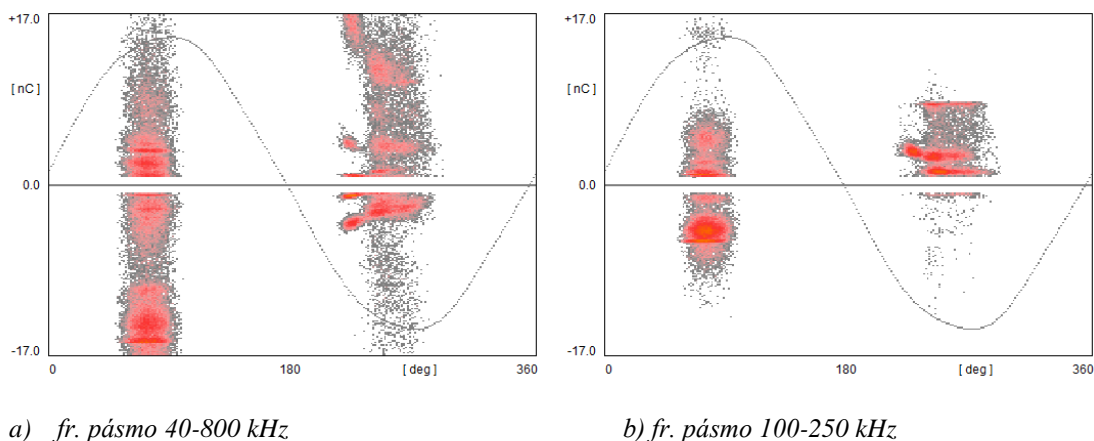
Obr. 4-32: Amplitudově-fázové rozložení vnitřních ČV 32 kV



Obr. 4-33: Amplitudově-fázové rozložení vnitřních ČV 32 kV



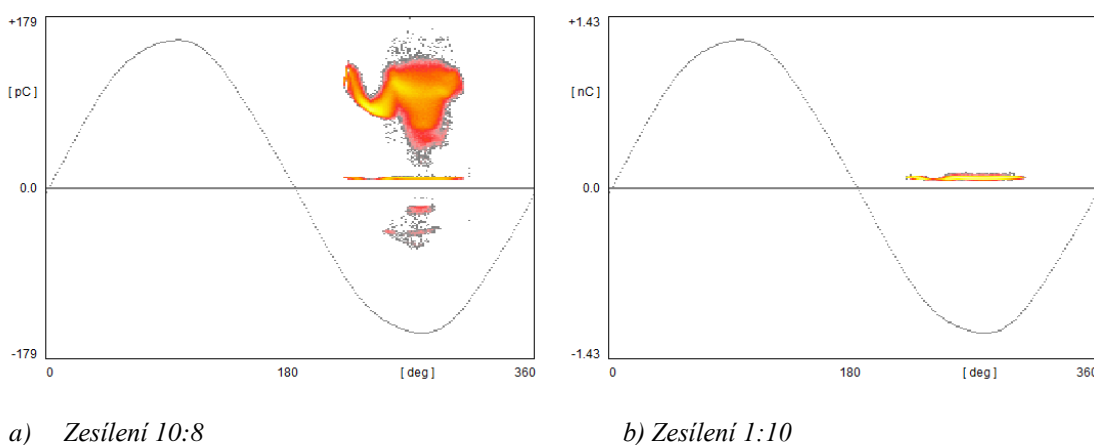
Obr. 4-34: Amplitudově-fázové rozložení klouzavých ČV 32 kV



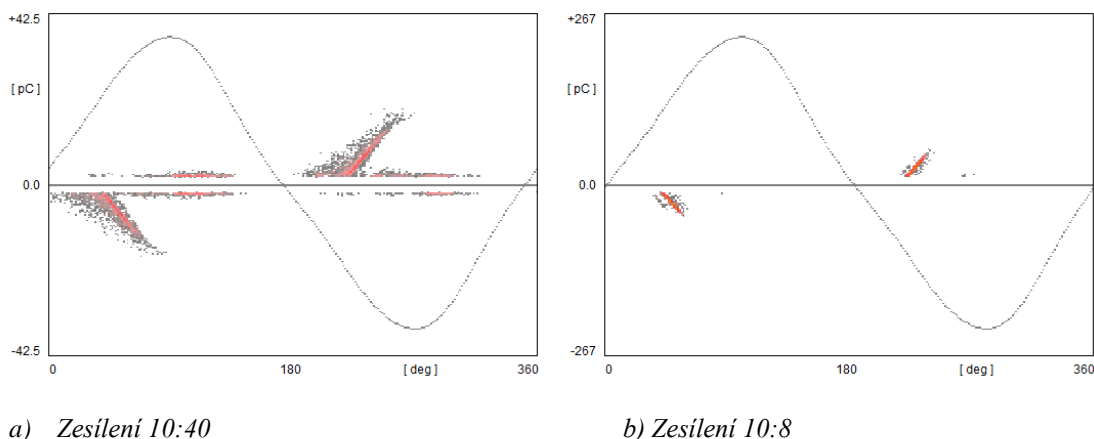
Obr. 4-35: Amplitudově-fázové rozložení klouzavých ČV 32 kV

V. Vliv zesílení

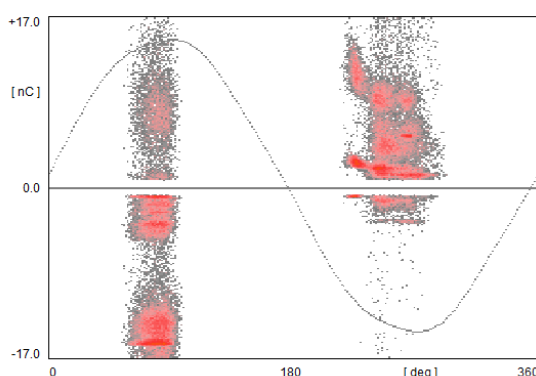
Nejlepší variantou je volit zesílení před začátkem samotného měření neboli při samotné kalibraci. Jestliže by očekávaná hodnota úrovně částečných výbojů, pro kterou se provedla kalibrace, byla ve skutečnosti daleko menší nebo naopak větší, došlo by přenastavením zesílení ke zkreslení skutečné amplitudy. Z toho vyplývá, že každá změna zesílení během měření má za následek zvětšení odchylky od skutečné hodnoty zdánlivého náboje. Vzniklou odchylku by bylo možné odstranit novým překalibrováním pro každé zesílení. Jelikož se však jedná o poměrně časově dlouhou záležitost, je tedy pro dosažení nejvyšší přesnosti měření vhodné zvolit si velikost zesílení, provést na něm kalibraci a poté jej neměnit.



Obr. 4-36: Amplitudově-fázové rozložení ČV kladné koróny 6 kV



Obr. 4-37: Amplitudově-fázové rozložení vnitřních ČV 32 kV



Obr. 4-38: Amplitudově-fázové rozložení klouzavých ČV 32 kV

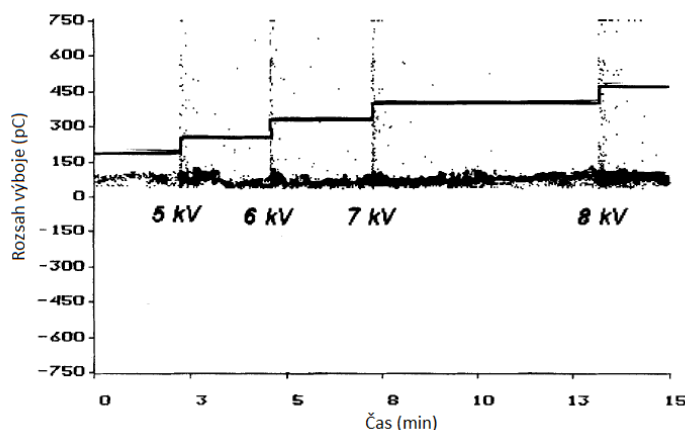
4.4 Stejnoseměrné výboje

Technika detekce částečných výbojů je známa delší dobu, avšak většina měření částečných výbojů byla prováděna se střídavým napětím (AC). Dnes však důvodem nárůstu využití stejnosměrných vysokonapěťových zařízení, jako je např. přenos elektrické energie na velké vzdálenosti, použití měničů a trakčního zařízení je kladen důraz na stejnosměrné výboje, jejich měření a vyhodnocování. V dnešní době umožňují moderní plně digitální měřicí systémy pro diagnostiku částečných výbojů měření jak při střídavém tak stejnosměrném napětí. Jedním z hlavních důvodů aktualizace softwaru a hardwaru ICM systému od firmy Power Diagnostix byl mód pro měření stejnosměrných výbojů.

Četnost stejnosměrných výbojů je závislá na časovém intervalu Δt , který představuje součet doby zotavení t_R a doby čekání na volný elektron t_L . Po uplynutí této doby Δt dochází k opětovnému zapálení částečného výboje. Potom lze četnost stejnosměrných výbojů vyjádřit pomocí převrácené hodnoty, viz rovnice 4-1.

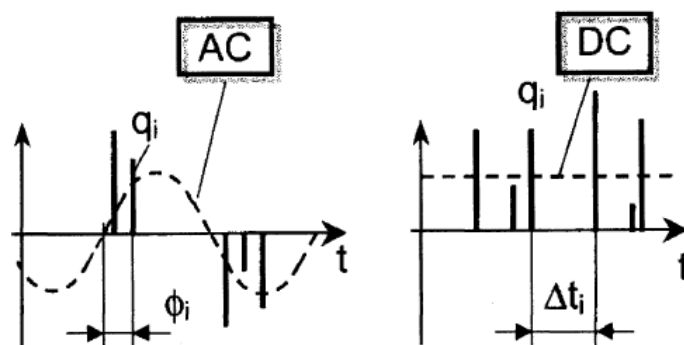
$$n = \frac{1}{\Delta t} \quad 4-1$$

Po přiložení napětí dochází tzv. k polarizaci dielektrika. To se projeví nárůstem jeho vodivosti a přítomností vodivostního proudu. Z Obr. 4-39 je patrné, že k nárůstu četnosti výbojů dochází vlivem zvyšování napětí. Zvyšování napětí má za následek kratší dobu čekání na volný elektron t_L , tím se snižuje časový interval Δt a zvyšuje se četnost. (17)



Obr. 4-39: Vliv zvyšování napětí na četnost výbojů (17)

Zkoušený objekt představovalo kalibrační jiskřiště. Jelikož jsou částečné výboje při střídavém napětí vyhodnocovány podle fázového úhlu, neboli každý výboj je umístěn na křivce napětí, bylo nutné v ICM systému nastavit *DC mód*, kterým došlo k přenastavení fázové osy na časovou. U výbojové činnosti při (*DC*) napětí lze měřit dvě základní veličiny tj. velikost výboje q a čas vzniku výboje t , to je možné vidět na Obr. 4-40. Jak jsem popsal dříve, velikosti výbojů jsou u střídavého napětí zobrazovány v závislosti na fázovém úhlu a četnosti výskytu, která je dána překrýváním jednotlivých impulzů. Jedná se tedy o trojrozměrné zobrazení a vyhodnocování výbojové činnosti. Jinak je tomu u výbojů při stejnosměrném napětí, kde je fázový úhel nahrazen dobou vzniku výboje. Jedná se tedy pouze o dvourozměrné zobrazení, kde třetí rozměr chybí.



Obr. 4-40: Zobrazení základních veličin při měření částečných výbojů u střídavého a stejnosměrného napětí (17)

Stejně jako u měření se střídavým napětím, je nutné provést kalibraci i před zahájením měření stejnosměrných výbojů. Kalibraci jsem provedl kalibračním impulzem $q_{kal}=100 \text{ pC}$, který se přivedl na zkoušený objekt. Zdrojem stejnosměrného napětí byl vysokonapěťový zkušební zdroj schopný dodat napětí $U_n=50 \text{ kV}$, viz Obr. 4-41.



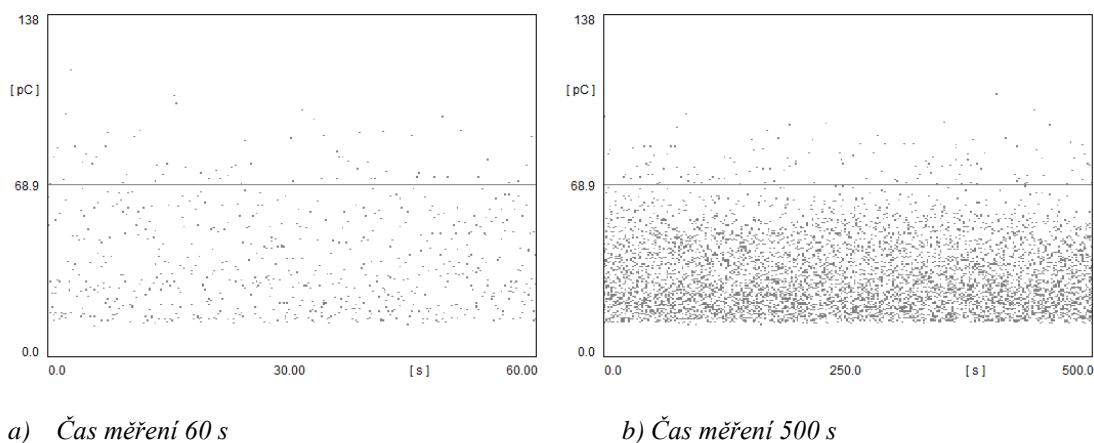
Obr. 4-41: Zdroj vysokonapěťového zkušební DC napětí

Pro vlastní měření jsem použil z hlediska jednoduššího a nejpoužívanějšího způsobu reprezentace grafické vyjádření velikosti výboje na funkci času. Měření jsem provedl pro obě polaritu hrotu a různou délkou měření, aby bylo možné posoudit vliv doby měření na naměřené výsledky.

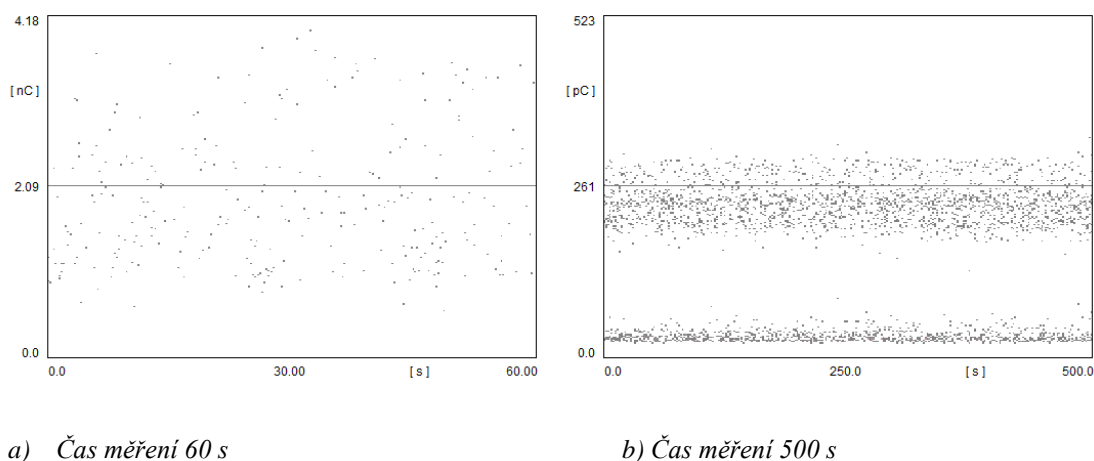
I. Vliv časové doby měření u koróny

Velikost zdánlivého náboje impulzu q je zobrazena na okamžité době vzniku výboje t . Časový interval Δt představuje dobu mezi po sobě jdoucími impulzy ČV. Z Obr. 4-42 a Obr. 4-43 je možné komentovat, že zvýšením doby měření nedojde k nárůstu

četnosti. To může být způsobené unášením plynných produktů vzduchem směrem pryč od místa výboje. U *Obr. 4-42 b)* a *Obr. 4-43 b)* dojde vlivem větší časové osy pouze k "hustějšímu" zobrazení impulzů vedle sebe. Potom tedy lze říci, že je časový interval mezi po sobě jdoucími impulzy Δt shodný pro libovolné délky měření, avšak pouze s konstantním napětím.

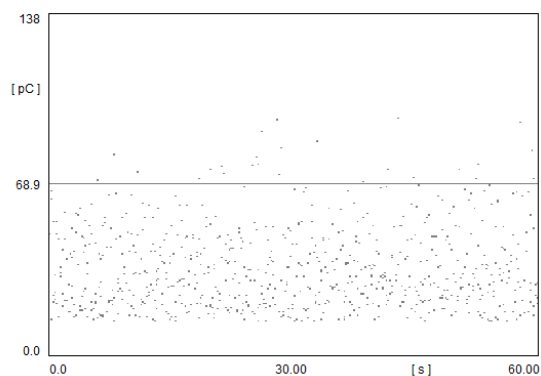


Obr. 4-42: Amplitudově-časové rozložení ČV DC kladné koróny



Obr. 4-43: Amplitudově-časové rozložení ČV DC záporné koróny

Doba zpracování jednoho impulzu, která je způsobena výrobními vlastnostmi součástí systému je úměrná *mrtvé době*. Proto jsem použil pro zpřesnění měření trigovací režim (*FP RT*), který si dobu zpracování jednoho impulzu nastavoval automaticky. Vlivem nastavení trigovacího režimu došlo v zobrazení k nepatrnému zvýšení četnosti impulzů.



Obr. 4-44: Amplitudově-časové rozložení ČV DC koróny pro režim FP RT

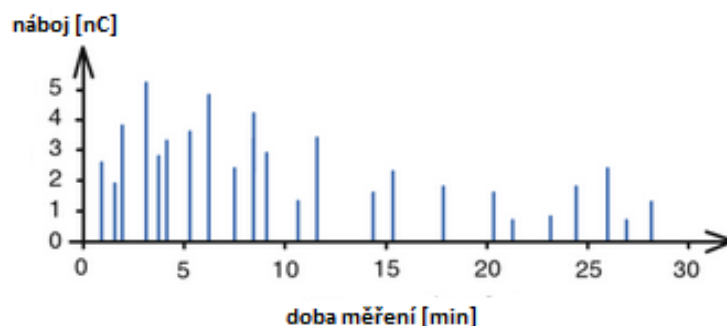
II. Vliv časové doby u stejnosměrných vnitřních výbojů

Jelikož se v dnešní době vlivem dokonalejší technologií při výrobě a objevování nových materiálů používají pevná dielektrika, podléhají dnes tyto izolační systémy přísným kontrolám a testům na vznik výbojové činnosti.

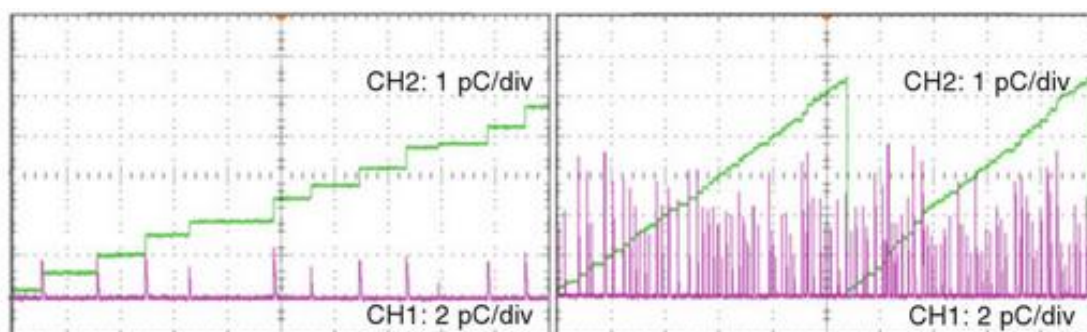
Při těchto vnitřních výbojích se molekuly plynu rozpadají na ionty kladné a záporné, které se pohybují v elektrickém poli opačným směrem. To vede k nahromadění náboje na stěnách dutinky a tím vytváří uvnitř dutinky elektrické pole opačné polarity. Výboj se v dutince vyskytuje do té doby, dokud není na protilehlých stěnách v dutince nahromaděný tak veliký náboj, aby napětí kleslo na hodnotu zhasacího napětí U_e , při němž výboj zhasíná. Zvyšováním přiloženého napětí na izolantu dochází k nárůstu napětí na dutince až do hodnoty zápalného napětí a děj se tak opakuje.

Pokud se však přiložené napětí na izolantu nezvyšuje, nahromaděný náboj na stěnách dutinky klesá. Tím roste napětí v dutince až na hodnotu zápalného napětí, kdy vzniká v dutince nový výboj. Rychlost klesání nahromaděného náboje na stěnách dutinky je závislá na povrchovém odporu dutinky a vnitřním odporu daného izolantu. Rychlost je rozhodujícím prvkem zobrazující velikost časového intervalu mezi dvěma výboji, které po sobě následují v jedné dutince.

Zatímco prodloužení doby měření nemá na vnější výboje vliv, přiložením stejnosměrného napětí na izolační systém s vnitřní nehomogenitou dochází vlivem zvýšené doby měření k poklesu četnosti výbojů. Následně může dojít při extrémně dlouhé době záznamu nebo při vyšší aktivitě ČV k ustálenému stavu (obnovení provozních podmínek), což se projeví klesnutím nahromaděného náboje téměř na nulu. Potom je vhodné ukončit měření před tím, než by došlo k tomuto stavu. Z praktických zkušeností by měla být doba měření alespoň 30 minut při konstantním zkušebním stejnosměrném napětí. (18)



Obr. 4-45: Vliv doby měření na četnost vnitřních výbojů (18)



Obr. 4-46: Závislost velikosti výbojů na čase (fialově), zaznamenaný akumulovaný náboj na době měření (zeleně) (18)

Velikost výboje je závislá na intenzitě elektrického pole uvnitř dutinky v okamžiku vzniku výboje. Potom tedy má velikost přepětí přímý vliv na velikost toho výboje.

Norma ČSN EN 60270:

Nahromaděný zdánlivý náboj q_a

Součet zdánlivého náboje q_i všemi jednotlivými impulzy s velikostí větší než je nastavená prahová úroveň a vyskytující se v průběhu určeného časového intervalu Δt .

Počet impulsů částečných výbojů m

Celkový počet impulsů částečných výbojů, které překračují nastavenou prahovou úroveň ve stanoveném časovém intervalu Δt , by neměl přesahovat předepsaný celkový počet.

Závěrem lze říci, že proudění vzduchu mezi “hrotem“ a “miskou“ kalibračního jiskřiště má tendenci snižovat časové konstanty zotavení izolace. Tím dochází ke snižování časového intervalu mezi dvěma výboji, které po sobě následují. Potom tedy u plyných izolačních systémů dochází k výbojům častěji než např. u pevných izolačních systémů, kde dochází vzhledem velmi nízké vodivosti dielektrika k pomalému klesání nahromaděného náboje v dutince. Doba zotavení takového izolačního systému je řádově několik sekund nebo minut.

Z porovnání naměřených dat a teoretických poznatků o stejnosměrné výbojové činnosti v pevných dielektrikách bych doplnil, že by bylo vhodné pro měření stejnosměrné výbojové činnosti volit režim (*FP RT*) a digitální měřicí přístroj od firmy Power Diagnostix vybavit o schopnost měření nahromaděného náboje. Tím by bylo snadnější kontrolovat dobu měření a dospět tak k přesnějším výsledkům.

Další možnost vyhodnocení

Kromě zobrazování naměřených dat ve formě průběhů, at' už amplitudově-fázové rozložení nebo závislost četnosti na velikosti zdánlivého náboje je také možné provést tisk výsledků měření. K tomu je použit program ICM print, který je schopen provést export do formátu * BMP nebo * TXT souborů. Soubor je vykreslen se všemi položkami, které byly nastaveny při měření ve formátu prostého textu, po němž následuje vygenerovaná tabulka dat seřazena do 256 sloupců a 256 řádků, přičemž každá hodnota udává četnost výbojů při dané velikosti náboje a velikosti fázového úhlu. Výřez touto tabulkou je možné pozorovat v příloze *Tab. 4*. U (*DC*) výbojů lze vidět ve vygenerované tabulce pouze hodnoty 0, 1. Hodnota uvedena v tabulce jako 0 zobrazuje nepřítomnost výboje, zatímco hodnota 1 udává informaci o přítomnosti vzniku výboje dané velikosti a době jeho vzniku. Potom je možné z tabulky určit časový interval Δt mezi dvěma výboji, které po sobě následují.

5 Závěr

Cílem diplomové práce bylo provést teoretický rozbor v současné době používaných metod pro měření a vyhodnocování částečných výbojů v elektrických zařízeních s ohledem na platnou *technickou normu ČSN EN 60270* a zároveň zjištění nových trendů vyhodnocování výbojové činnosti. Relativně novou technikou měření částečných výbojů jsou (*UHF*) senzory, které využívají pro měření výbojové činnosti velké kmitočtové spektrum až do $1,5\text{ GHz}$. Touto technikou je navíc možné určit místo vzniku výbojové činnosti a typ vady izolace. Jelikož je kladen veliký důraz na životnost izolace mezi dielektrickým oknem (čidlem) a nádobou transformátoru, stala se dnes proto rozšířenější variantou montáž kuželového senzoru zalitého v pryskyřici do vypouštěcího ventilu transformátorové nádoby.

Díky rozvoji digitální techniky jsou v dnešní době často používány moderní plně digitální měřicí systémy pro diagnostiku částečných výbojů. Jedny z největších výhod oproti prvním měřicím systémům jsou v měření četnosti impulzů, možnosti ukládání a vyhodnocování naměřených dat. Tím došlo k novému pohledu na problematiku částečných výbojů. Proto byla následující třetí část práce zaměřena na digitální měřicí přístroj částečných výbojů ICM systém od firmy Power Diagnostix, který prošel celkovou aktualizací softwaru, v němž byl měřicí přístroj vybaven novými funkcemi, které vyžadovaly i částečnou změnu hardwaru. Nedílnou součástí práce byl proveden popis důležitých parametrů detektoru, tj. *mrtvá doba*, prahová spouštěcí úroveň *LLD* a trigovací režimy.

V poslední čtvrté části bylo realizováno měření částečných výbojů s digitálním měřicím přístrojem od firmy Power Diagnostix. Jednalo se o měření koróny, vnitřních výbojů a klouzavých výbojů. Následně došlo k porovnání a vyhodnocení naměřených výsledků u všech typů výbojové činnosti a diskutování vlivu nastavených parametrů na samotné výsledky měření. Ověřil jsem, že nastavené parametry, které tzv. řídí činnost detektoru při samotném měření, ovlivňují jeho výsledky. Jednotlivé parametry detektoru spolu úzce souvisí, tudíž nepřesným nastavením byt' jen jednoho z nich může dojít k zatížení výsledků měření chybami, které jsou způsobeny chybným počátečním nastavením parametrů detektoru. Proto je potřeba tyto parametry vhodně nastavit. To se však v praxi nastavuje dosti obtížně, protože většinou není známý typ výbojové činnosti, který může pocházet i z více zdrojů. Z popisu digitálního měřicího systému a experimentálních měření, které byly provedeny, došlo k objasnění metodiky měření

výbojové činnosti.

Jelikož je v dnešní době kladen důraz na měření a vyhodnocování stejnosměrných výbojů, umožňují proto moderní plně digitální měřicí systémy pro diagnostiku částečných výbojů měření jak při střídavém tak stejnosměrném napětí. Jedním z hlavních důvodů aktualizace softwaru a hardwaru ICM systému od firmy Power Diagnostix byl mód pro měření stejnosměrných výbojů. Z porovnání měření koróny při stejnosměrném napětí a teoretických poznatků vyplynulo, že impulzy částečných výbojů při (*DC*) napětí jsou zobrazovány v závislosti na době vzniku výboje a zobrazení je tedy dvourozměrné oproti zobrazení výbojů změřených při (*AC*) napětí. Došlo k ověření teoretických poznatků, kde doba měření neměla vliv na četnost výbojů. Avšak zpracováním teoretických poznatků o vnitřních výbojích při (*DC*) napětí bylo zjištěno, že u tohoto typu výbojové činnosti dochází vlivem zvýšené doby měření ke snižování četnosti výbojů až k možnému obnovení provozních podmínek.

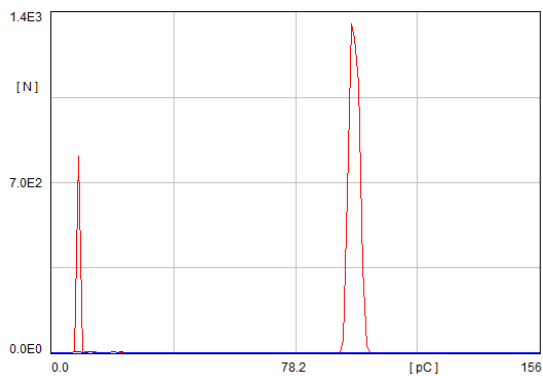
Závěrem lze říci, že ICM systém s aktualizovaným softwarem a hardwarem vyhovuje a splňuje podmínky *normy ČSN EN 60270* pro měření výbojové činnosti. Jelikož je metodiky měření částečných výbojů při (*DC*) napětí nová a nepříliš prozkoumaná, bylo by vhodné vybavit tento přístroj o schopnost měření nahromaděného náboje, což by vedlo ke zpřesnění výsledků.

Seznam Literatury

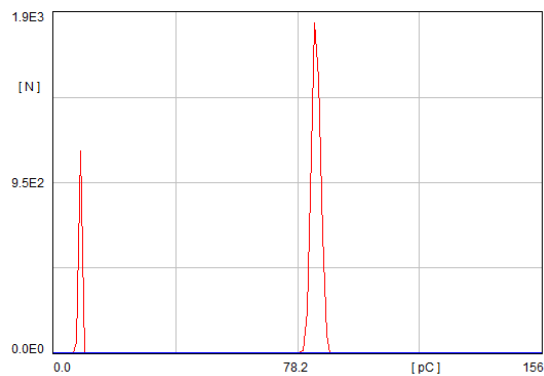
- [1] **Václav Mentlík, Josef Pihera, Radek Polanský, Pavel Prosr, Pavel Trnka.** *Diagnostika elektrických zařízení.* Praha : BEN, 2008. ISBN 978-80-7300-232-9.
- [2] **Martínek, Petr.** *Teoretická a experimentální analýza částečných výbojů v dielektriku elektrických strojů.* Plzeň, 2005. Disertační práce.
- [3] **Vratislav, Macek.** *Částečné výboje.* Brno, 2014. Diplomová práce.
- [4] **Mentlík, Václav.** *Dielektrické prvky a systémy.* Praha : BEN, 2006. 80-7300-189-6.
- [5] **Veverka, Antonín.** *Technika vysokých napětí.* Praha : SNTL, 1978.
- [6] **Trkovský, Tomáš.** *Použití kapacitních a induktivních snímačů pro on-line detekci částečných výbojů.* Plzeň, 2010. Bakalářská práce.
- [7] **Marek, Hajný.** *Studie antikoronových ochran u velkých točivých strojů.* Plzeň, 2014. Bakalářská práce.
- [8] *Degradation of Solid Dielectrics due to Internal Partial Discharge: Some thoughts on progress made and where to go now.* **Morshuis, Peter H.F.** s.l. : IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 12, No. 5, 2005.
- [9] *Guide for Electrical Partial Discharge Measurements in compliance to IEC 60270.* **Lemke, Eberhard.** s.l. : TECHNICAL BROCHURE, 2008.
- [10] **Karel, Záliš.** *Částečné výboje v izolačních systémech elektrických strojů.* Praha : Academia, 2005. 80-200-1358-X.
- [11] *Sensitivity Check of an Internal VHF/UHF Sensor for Transformer Partial Discharge Measurements.* **P. Agoris, S. Meijer, and J. J. Smit.** 2001.
- [12] *Partial Discharge Monitoring for Power Transformers Using UHF Sensors Part 1: Sensors and Signal Interpretation.* **Martin D. Judd, Li Yang, Ian B. B. Hunter.** 2005.
- [13] *Partial Discharge Monitoring for Power Transformers Using UHF Sensors Part 2: Field Experience.* **Martin D. Judd, Li Yang, Ian B. B. Hunter.** 2005.
- [14] *Design and Testing of UHF Sensors for Partial Discharge Detection in Transformers.* **J. Lopez-Roldan, T. Tang, M. Gaskin.** 2008. 978-1-4244-1622-6.
- [15] *A Prospective Standart for Acoustic and Electromagnetic Partial Discharge Measurements.* **Muhr, Michael.** s.l. : Institute of Hight Voltage Engineering and System Management University of Technology Graz.
- [16] *CHARACTERIZATION OF PARTIAL DISCHARGES IN TRANSFORMER OIL INSULATION UNDER AC AND DC VOLTAGE USING ACOUSTIC EMISSION TECHNIQUE.* **Ramanujam Sarathi, Prathap D. Singh, Michail G. Danikas.** s.l. : Journal of ELECTRICAL ENGINEERING, 2007.
- [17] **Peter H.F. Morshuis, Johan J. Smit.** *Partial Discharges at dc Voltage: Their Mechanism, Detection and Analysis.* IEEE transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2005. 1070-9878.
- [18] **Wolfgang Hauschild, Eberhard Lemke.** *Hight - Voltage Test and Measuring Techniques.* Berlín : s.n., 2014. 978-3-642-45351-9.
- [19] **ČSN EN 60270.** *Technika zkoušek vysokým napětím- Měření částečných výbojů.* Praha : Český normalizační institut, 2001.
- [20] *User Manual Digital Partial Discharge Recording.* **Power Diagnostix.**

- [21] *Technika měření částečných výbojů* . **H.J.Weber.** Zurich : TETTEX AG INSTRUMENTS.

Přílohy

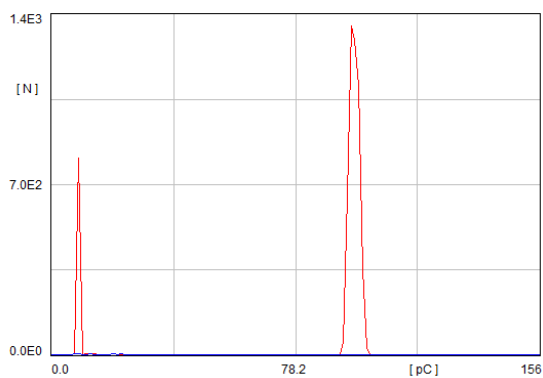


a) fr. pásmo 40-800 kHz

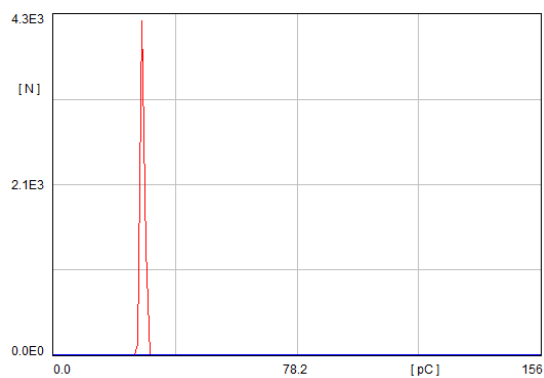


b) fr. pásmo 40-600 kHz

Obr. 0-1: Závislost četnosti impulzů ČV koróny 4,2 kV na velikosti zdánlivého náboje

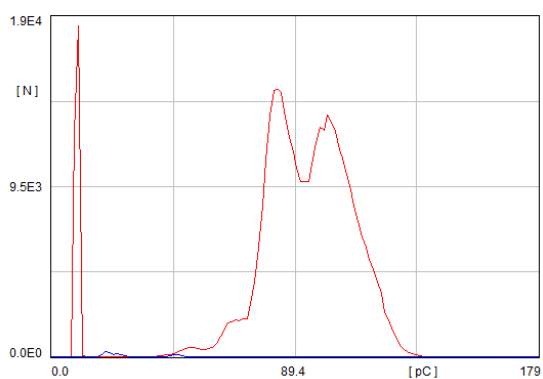


a) fr. pásmo 40-800 kHz

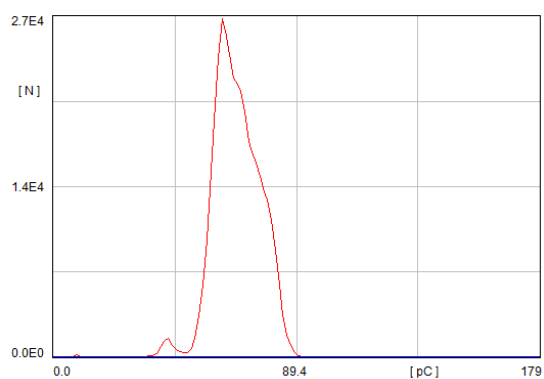


b) fr. pásmo 100-250 kHz

Obr. 0-2: Závislost četnosti impulzů ČV koróny 4,2 kV na velikosti zdánlivého náboje

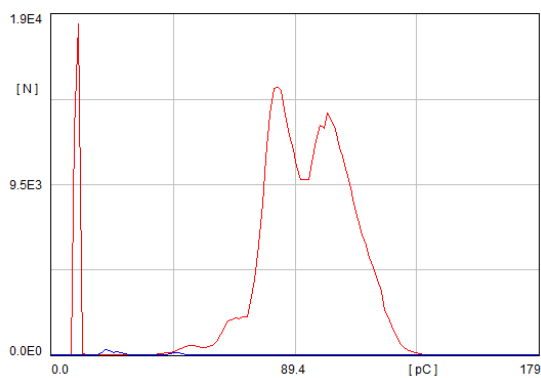


a) fr. pásmo 40-800 kHz

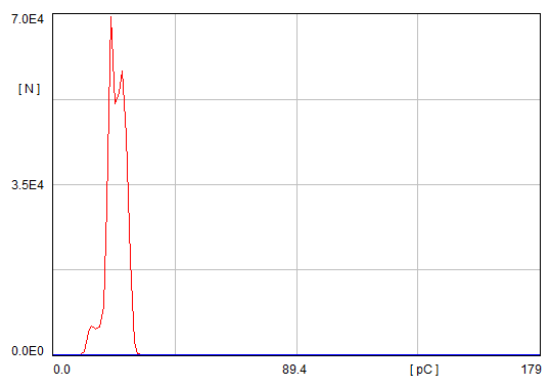


b) fr. pásmo 40-600 kHz

Obr. 0-3: Závislost četnosti impulzů ČV koróny 6 kV na velikosti zdánlivého náboje

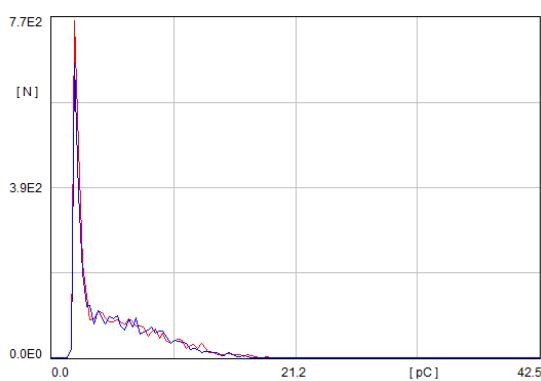


a) fr. pásmo 40-800 kHz

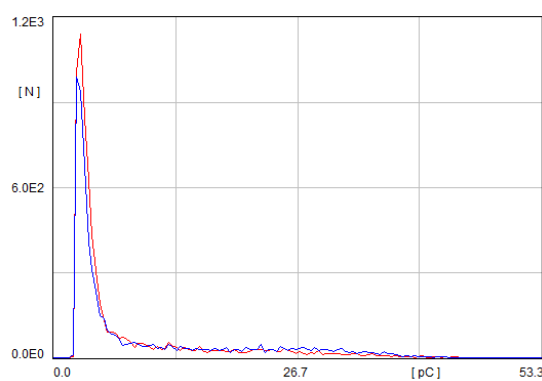


b) fr. pásmo 100-250 kHz

Obr. 0-4: Závislost četnosti impulzů ČV koróny 6 kV na velikosti zdánlivého náboje

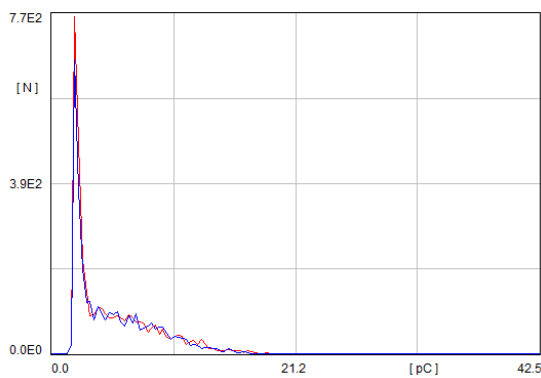


a) fr. pásmo 40-800 kHz

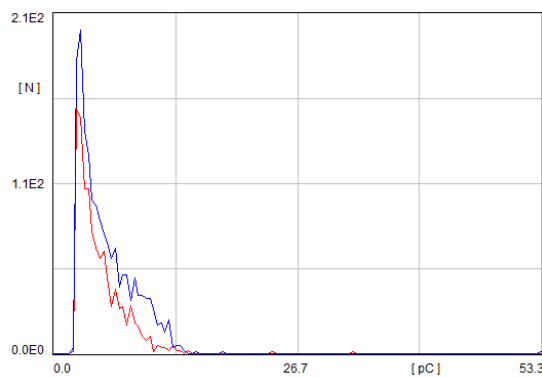


b) fr. pásmo 40-600 kHz

Obr. 0-5: Závislost četnosti impulzů vnitřních ČV 32 kV na velikosti zdánlivého náboje

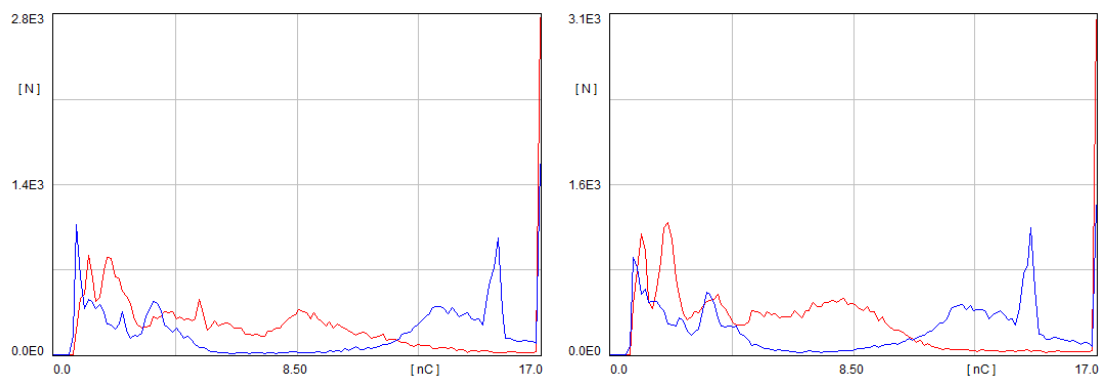


a) fr. pásmo 40-800 kHz

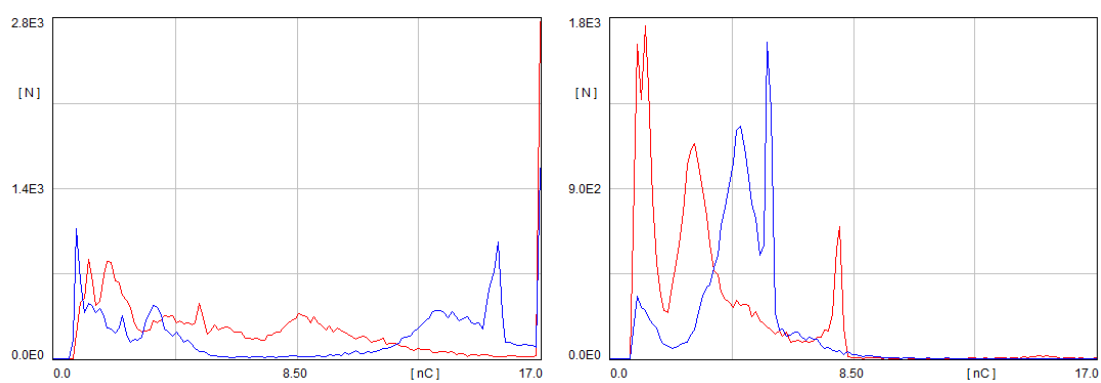


b) fr. pásmo 100-250 kHz

Obr. 0-6: Závislost četnosti impulzů vnitřních ČV 32 kV na velikosti zdánlivého náboje

a) *fr. pásmo 40-800 kHz*b) *fr. pásmo 40-600 kHz*

Obr. 0-7: Závislost četnosti impulzů klouzavých ČV 32 kV na velikosti zdánlivého náboje

a) *fr. pásmo 40-800 kHz*b) *fr. pásmo 100-250 kHz*

Obr. 0-8: Závislost četnosti impulzů klouzavých ČV 32 kV na velikosti zdánlivého náboje

Tab. 4: Výřez tabulkou ICM systému 256 x 256 parametrů

		Osa X [°]																											
Osa Y [pC]	1	1	0	2	1	1	2	0	0	0	1	0	1	0	0	0	2	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0		
	1	3	3	1	2	0	1	0	0	1	1	1	2	0	0	3	3	0	1	1	1	1	0	3	1	0	0	1	
	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	2	0	2	2	2	3	3	0	1	1	1	2	0	0	0	0	0	0	
	0	1	1	4	0	0	2	0	3	1	1	1	1	0	0	4	1	2	0	0	1	1	0	0	1	1	0	3	
	1	1	0	1	2	1	1	0	0	0	2	2	1	3	1	3	2	2	0	1	0	1	0	2	0	0	0	1	
	0	3	0	1	2	2	3	0	1	0	2	3	2	0	2	1	2	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0
	1	1	3	4	2	1	3	1	3	4	1	2	0	0	0	2	1	1	1	0	3	0	1	0	0	0	0	1	1
	2	1	1	2	0	2	6	4	2	0	2	3	3	2	0	1	1	4	2	0	0	1	0	0	2	1	0	0	0
	2	1	2	2	0	0	2	1	4	1	2	1	5	1	2	2	1	2	0	0	1	0	1	0	1	3	0	1	1
	6	1	1	1	3	2	5	5	4	5	4	5	4	2	3	0	1	2	3	4	1	2	1	1	1	0	1	0	0
	3	1	7	2	4	3	3	4	1	3	1	3	2	3	1	0	3	1	0	2	1	1	0	0	1	1	0	0	0
	1	3	2	1	3	2	4	5	4	3	3	4	3	4	3	4	1	3	0	1	2	1	0	0	3	2	5	1	1
	4	4	4	1	4	3	2	4	4	2	7	2	3	4	5	5	3	0	1	0	2	0	0	1	0	0	2	1	1
	3	6	3	7	3	8	7	2	2	4	2	4	5	4	3	1	1	3	1	3	3	2	3	1	2	3	0	1	1
	7	2	4	3	2	5	5	6	8	3	4	3	4	1	4	3	2	4	4	3	1	2	1	1	1	1	2	0	0
	3	3	3	4	5	5	3	6	5	9	5	5	5	1	2	3	5	1	6	6	1	1	2	2	1	4	1	0	0
10	5	4	7	4	6	5	5	3	3	5	4	2	2	4	1	2	3	0	2	1	2	3	1	2	1	2	1	4	4

Ymin: -55,2 *Xmin:* 0
Ymid: 0 *Xmax:* 180
Ymax: +55,2 *Xmid:* 360
Yunit: [pC] *Xunit:* [°]