

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**

**FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ  
KATEDRA MATERIÁLŮ A TECHNOLOGIÍ**

**Interakce vysokonapět'ových elektroizolačních  
systémů s HVDC**

**Ing. Ondřej Kozák**

Školitel: Doc. Ing. Pavel Trnka, Ph.D.  
Školitel specialista: Ing. Josef Pihera Ph.D.

**Plzeň 2021**

## **Prohlášení o duševním vlastnictví**

Tímto předkládám k posouzení a obhajobě tezi k disertační práci zpracovanou během doktorského studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni. Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně s použitím literatury a zdrojů uvedených v seznamu na konci této práce.

V Plzni, 3. května 2021

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval svému školiteli doc. Ing. Pavlu Trnkovi, Ph.D. a odbornému školiteli Ing. Josefu Piherovi Ph.D. za odbornou pomoc, cenné rady, motivaci a připomínky při psaní překládané práce, ale také za trpělivou a stálou péči věnovanou po dobu celého studia. Dále bych rád poděkoval všem svým kolegům z Katedry technologií a měření za podporu a cenné připomínky při vzniku této práce.

**Ondřej Kozák**

## ANOTACE

Předložená práce se věnuje částečným výbojům v nehomogenních dielektrických materiálech v elektrickém poli. Jsou zde popsány základní druhy částečných výbojů, jejich podstata, vznik a jejich působení na elektroizolační materiál. Dále jsou popsány měřené veličiny, způsoby detekce částečných výbojů a jejich rozdílné vlastnosti při střídavém a stejnosměrném napětí. Pulzně sekvenční analýza z reálných měření byla porovnána se simulacemi výbojové činnosti a následně byla popsána podstata tvorby grafů pulzně sekvenční analýzy. Díky simulacím výbojové činnosti byl dále popsán i vliv rušení na výsledné obrazce pulzně sekvenční analýzy.

## **ABSTRACT**

This thesis deals with the partial discharges in inhomogeneous dielectric materials in an electric field. It describes basic kinds of partial discharges, fundamentals, formation and their effects on electro insulating materials. Furthermore, the thesis is devoted to measured variables, methods of partial discharge detection and their different properties under DC and AC voltage stress. Pulse sequence analysis (PSA) of real measurements was compared with the simulation of partial discharge activity and PSA plots creation was described. The simulation also helped to reveal the influence of interference and noise to pulse sequence analysis plots.

## Seznam symbolů a zkratk

Symboly proměnných a konstant		
Symbol	Základní jednotka	Význam
$C$	[F]	kapacita
$d$	[m]	vzdálenost
$E$	[V/m]	intenzita elektrického pole
$E_p$	[V/m]	elektrická pevnost
$q$	[C]	zdánlivý náboj
$t_i$	[s]	čas výskytu impulzu
$N$	[-]	opakovací kmitočet impulzů
$U$	[V]	napětí
$I$	[C/s; A]	střední proud částečných výbojů
$\varphi_i$	[°]	fázový úhel výskytu impulzu
$P$	[W]	výkon částečných výbojů
$D$	[C <sup>2</sup> /s]	střední kvadratický součet
$U_i$	[V]	počáteční napětí částečných výbojů
$U_e$	[V]	zhasací napětí částečných výbojů
$f_1, f_2$	[Hz]	dolní a horní mezní kmitočet
$Z(f)$	[Ω]	přenosová impedance
$\Delta q_n$	[C]	přírůstek zdánlivého náboje
$\Delta \varphi_n$	[°]	fázový posun částečného výboje
$\Delta U$	[V]	přírůstek napětí
$\Delta f$	[Hz]	šířka pásma
$f_m$	[Hz]	střední kmitočet
$\Phi$	[Wb]	magnetický tok
$FJ$	[-]	feritové jádro snímače
$Fe$	[-]	magnetický obvod statoru

**Anglické zkratky**

<b>Zkratka</b>	<b>Původní znění</b>	<b>Český význam</b>
AC	Alternating Current	střídavý proud
DC	Direct Current	stejnsměrný proud
DCN	Direct Current Negative	negativní stejnosměrný proud
DCP	Direct Current Positive	pozitivní stejnosměrný proud
HV	High Voltage	vysoké napětí
PSA	Pulse sequence analysis	pulzně sekvenční analýza
GIS	Gas insulated switchgear	zapouzďřená rozvodna
PRPD	Phase resolved partial discharges	
PD	Partial Discharges	částečné výboje

## Obsah

<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>6</b>
<b>OBSAH.....</b>	<b>8</b>
<b>ÚVOD.....</b>	<b>9</b>
<b>1 SOUČASNÝ STAV DIAGNOSTIKY ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ.....</b>	<b>10</b>
1.1 PODSTATA A VZNIK ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ .....	10
1.2 DETEKCE ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ.....	18
1.2.1 Detekce výbojů globální metodou.....	23
1.2.2 Detekce výbojů na základě časového rozlišení impulzů.....	24
1.2.3 Detekce výbojů na základě akustické emise.....	26
1.2.4 Detekce výbojů na základě energie vyzářené do volného prostoru.....	26
1.2.5 Radio Interference Voltage (RIV).....	27
1.3 KALIBRACE PŘÍSTROJŮ PRO MĚŘENÍ ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ.....	28
1.4 ČÁSTEČNÉ VÝBOJE PŘI STŘÍDAVÉM NAPĚTÍ .....	30
1.5 PROBLEMATIKA EVALUACE ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ PŘI STEJNOSMĚRNÉM NAPĚTÍ .....	32
<b>2 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE .....</b>	<b>35</b>
<b>3 NOVÉ METODY ANALÝZY ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ.....</b>	<b>37</b>
3.1 PULZNĚ SEKVENČNÍ ANALÝZA.....	37
3.2 SIMULACE Q-Q PSA GRAFŮ.....	38
3.3 VLIV RUŠENÍ NA Q-Q PSA.....	39
3.4 SIMULACE Q-T PSA GRAFŮ.....	44
3.4.1 Korona.....	46
3.4.2 Povrchové výboje.....	49
3.4.3 Vnitřní výboje.....	50
3.5 POROVNÁNÍ AC Q-T PSA PRO RŮZNÁ USPOŘÁDÁNÍ MĚŘÍCÍCH ELEKTROD.....	52
3.5.1 Korona.....	52
3.5.2 Povrchové výboje.....	58
3.5.3 Vnitřní výboje.....	64
<b>4 VLASTNÍ PŘÍNOS PRO VĚDNÍ OBOR.....</b>	<b>71</b>
<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>72</b>
<b>POUŽITÁ LITERATURA.....</b>	<b>72</b>
<b>SEZNAM PUBLIKACÍ AUTORA.....</b>	<b>78</b>



## Úvod

Tato práce je zaměřená na částečné výboje, jejich vznik a porovnání chování částečných výbojů při střídavém napětí (AC), negativním stejnosměrném napětí (DCN) a pozitivním stejnosměrném napětí (DCP). Je zde popsána fyzikální podstata vzniku částečných výbojů a jejich vliv na elektroizolační systémy strojů a zařízení. Největší pozornost je věnována novým trendům v oboru diagnostiky částečných výbojů, převážně pro částečné výboje při namáhání stejnosměrným elektrickým napětím. V současné době existuje celá řada evaluačních metod částečných výbojů, avšak žádná z nich nepracuje s částečnými výboji při stejnosměrném napětí. Stejnosměrné napětí ve všech odvětvích práce s elektrickou energií nabývá na významu, a proto je nezbytné takovou metodu zavést. Momentální trend v oblasti vyhodnocování částečných výbojů je pulzně sekvenční analýza (PSA) [1], [2], [3], [4]. Tato práce popisuje teorii, postup, druhy a možnosti PSA a vyhodnocuje její použitelnost v praxi.

Předkládaná práce je rozdělena do dvou hlavních kapitol. První kapitola je věnována základům, vzniku a charakteristice částečných výbojů (viz kapitola 1.1), odlišnosti částečných výbojů vyvolaných namáháním AC, DCN a DCP napětím, měřeným hodnotám částečných výbojů a metodám, jak částečné výboje detekovat a měřit. Druhá kapitola je zaměřena na nové metody detekce částečných výbojů a vliv rušení. Dále jsou zmíněny vyhodnocovací metody, kritéria přijatelnosti pro testování a způsoby vyhodnocování závad. Následuje popis současných metod vyhodnocování částečných výbojů při stejnosměrném napětí a dále jsou zmíněny i návrhy nových evaluačních metod. Pro lepší porozumění procesů tvorby PSA jsou základní grafy simulovány prostřednictvím algoritmů v softwaru Octave. Tyto simulace jsou porovnány s reálnými měřeními. V další části jsou popsány a porovnány pulzní diagramy a PSA grafy pro různé druhy částečných výbojů za působení AC, DCN a DCP napětí.

# 1 Současný stav diagnostiky částečných výbojů

Hlavní pozornost v oblasti diagnostiky elektrických zařízení je zaměřena na systémy síťového kmitočtu 50 Hz (respektive 60 Hz). Pro zařízení pracující na těchto kmitočtech jsou vypracovány metody a postupy, jak výbojovou aktivitu vyhodnotit či lokalizovat. Norma ČSN EN 60270 definuje:

- použité termíny
- měřené veličiny
- zkušební a měřicí obvody
- analogové a digitální metody
- metody a přístroje pro kalibraci
- zkušební postupy

Ačkoli norma EN 60270 popisuje měření částečných výbojů pro střídavé napětí až do 400 Hz či stejnosměrné napětí, není v současné době vypracovaná žádná metodologie, jak takto naměřené výsledky při stejnosměrném napětí vyhodnotit. I přes to, že současné měřicí systémy jsou způsobilé pro měření částečných výbojů i při stejnosměrném napětí. Podobná situace nastává i pro aplikace pracující s frekvencí vyšší než 1 kHz (spínané zdroje, elektronicky řízené motory). [5]–[9]

## 1.1 Podstata a vznik částečných výbojů

V dnešním světě převládá přenos elektrické energie v podobě střídavého proudu o různých napěťových hladinách a kmitočtech. Za prvé se jedná o přenosovou soustavu. Jde o přenos energie na velkou vzdálenost, z elektrárny do hlavních míst spotřeby. Za druhé se využívá distribuční síť, která má za úkol dodávání elektřiny k jednotlivým odběratelům, na vzdálenost mnohem kratší. Nejčastějšími napěťovými hladinami v ČR pro přenosovou soustavu jsou 110, 220 a 400 kV. Jelikož běžné generátory v elektrárnách generují napětí v rozmezí 10 až 25 kV, je potřeba před jejich připojením toto napětí transformovat na požadovanou hladinu. Transformování napětí probíhá většinou již v bloku elektrárny a následně na vyšší úrovni v rozvodných stanicích. [10]–[12]

Jelikož technické možnosti nedovolovali transformaci stejnosměrného proudu na vyšší hodnoty napětí (a tím omezit ztráty), střídavý proud převládl nad stejnosměrným a po

několik desetiletí hrál hlavní roli v silnoproudé technice. Avšak v posledních čtyřiceti letech byly budovány a testovány vysokonapěťové stejnosměrné přenosové sítě. Ačkoli se může zdát zavádění stejnosměrné soustavy jako krok zpět, není tomu tak. Moderní vysokonapěťové stejnosměrné systémy navazují do souvisejících střídavých systémů a v některých případech jsou i plně zapojeny do jejich funkce. Vysokonapěťové stejnosměrné přenosové sítě mohou nabídnout následující výhody a vylepšení:

- Ekonomický přenos elektrické energie na dlouhé vzdálenosti (např. ze vzdálených zdrojů do městských oblastí). Ekonomická výhodnost v tomto případě vychází ze skutečnosti, že stejnosměrné přenosové vedení je podstatně levnější než přenosové vedení střídavého proudu nebo napětí pro stejný výkon. Předpokládáme-li dostatečně velkou vzdálenost, volba stejnosměrného vedení bude ekonomicky výhodnější i s přihlédnutím na vysokou cenu konvertorových stanic na obou koncích vedení. Vyrovnaný stav v ceně střídavého a stejnosměrného vedení je přibližně 800 km (>1,000 MW) pro nadzemní vedení a přibližně 50 km pro kabely (100 MW-1,000 MW). [13], [14]
- Propojování nezávislých rozvodných sítí. Vysokonapěťová stejnosměrná soustava poskytuje asynchronní spojení mezi rozdílnými střídavými soustavami, které mohou pracovat na rozdílných frekvencích a/nebo rozdílných fázových posunů. Další rozdíl oproti střídavému vedení je ten, že reálná a jalová složka výkonu kompletně závisí na fázovém posunu a napětí na obou koncích vedení. Navíc zatímco si dvě napěťové soustavy udržují svoji nezávislost provozu, čerpají z výhod propojení jako je vzájemná podpora a spřažená záloha. Pokud je třeba provázat dvě rozdílné soustavy, používá se vazba s nulovou délkou trasy. Tyto vazby jsou nazývány „back-to-back“.
- Vysokonapěťové stejnosměrné soustavy jsou velice snadno ovladatelné a mohou poskytovat jak statickou, tak i dynamickou podporu rozvodným systémům. U určitých druhů soustav [13] po připojení vysokonapěťové stejnosměrné soustavy paralelně ke střídavé se zvýší přenosová kapacita sítě až o 50 %.
- Vysokonapěťová stejnosměrná soustava může být použita k přesné

frekvenční regulaci jedné z připojených střídavých rozvodných sítí.

- Vysokonapět'ové stejnosměrné systémy mohou omezit rušení v připojených střídavých systémech a přidružených generátorech.
- Na rozdíl od střídavých soustav, propojení vysokonapět'ovým stejnosměrným přenosovým systémem nezvyšuje poruchovost napojených střídavých soustav.

[13]

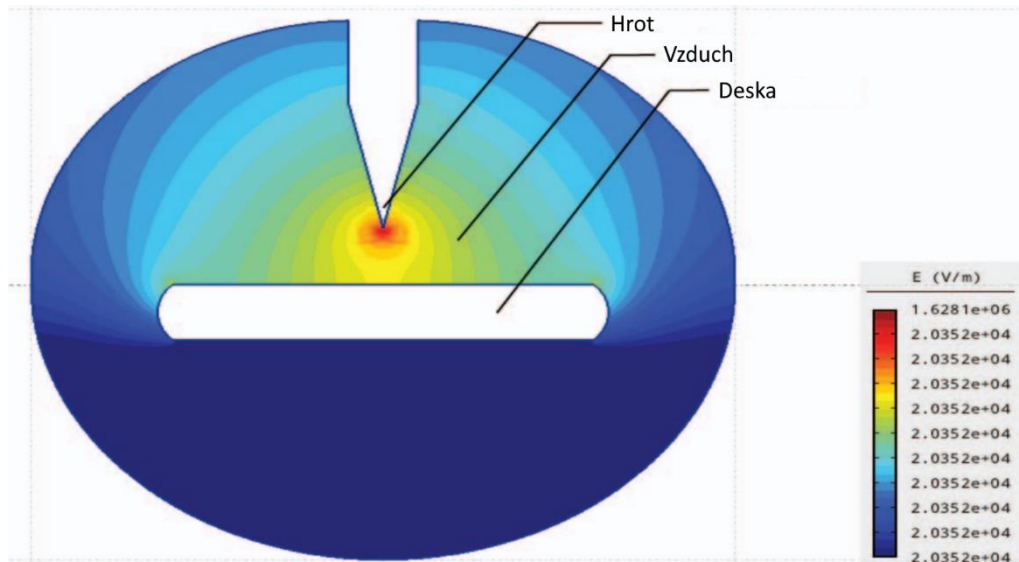
Částečné výboje se nachází ve všech odvětvích, kde se využívá elektrická energie – provází výrobu, vedení, transformaci i spotřebu elektrické energie. Jelikož trend vývoje směřuje k používání stejnosměrného napětí, je třeba obrátit pozornost i k částečným výbojům vznikajícím při stejnosměrném napětí. Podstata vzniku částečných výbojů při střídavém napětí, které rapidně snižují životnost izolace, je obecně známá [15], [16]. Dlouhodobá výbojová aktivita obvykle vede k erozi elektroizolačního materiálu kabelu [16](electrical treeing - „růst elektrického stromečku“), což může mít v budoucnu za následek naprosté selhání objektu. Částečný výboj, dle normy ČSN EN 60270 [5], je lokalizovaný elektrický výboj, který pouze částečně přemostuje prostor mezi vodiči a může a nebo nemusí působit v jejich okolí. Obecně jsou částečné výboje důsledkem lokálního elektrického namáhání izolace či jejího povrchu, které se běžně projevují jako impulz s dobou trvání méně než 1  $\mu$ s. Měření částečných výbojů je citlivá metoda pro měření místního elektrického namáhání, a tudíž je velmi často používáno jako ukazatel kvality izolace. Výskyt částečných výbojů poskytuje informace o stavu izolačního materiálu předtím, než dojde k samotnému plnému výboji. Tudíž materiál může být testován vysokým napětím, aniž by byl poškozen, proražen či jinak oslaben. Ačkoli každé elektrické namáhání materiálu se může projevit na životnosti izolace, jsou tato měření přijatelným důvodem, jak získat věrohodné výsledky, a tak odhalit (a následně opravit) nežádoucí degradaci na izolačních systémech elektrických strojů (motorů, transformátorů, spínačů atd.). [15]–[19]

Po nástupu vysokonapět'ových izolačních materiálů jako je polyetylén či epoxidová pryskyřice bylo nutností detekovat i vnitřní výboje vyskytující se v nehomogenitách materiálu, které při vysokém napětí mohou významně ohrozit izolační soustavu. Tyto částečné výboje mohou odhalit slabá místa izolace, kde by mohlo dojít k průrazu z jiné důvodu (tepelné namáhání, elektrický průraz...). Částečné výboje velice často předcházejí závadě na elektrickém zařízení, ačkoli nemusí být její příčinou. Právě z tohoto důvodu je velmi užitečná diagnostika v obvodech využívajících stejnosměrném napětí. Stejně druhy defektů, které byly zmíněny u

izolačních soustav pro střídavé napětí, se mohou vyskytnout i u stejnosměrných. [15], [20], [21]

Druhy částečných výbojů:

- a) **Vnější částečné výboje** – částečné výboje vznikající kolem elektrod či vodičů s malým poloměrem či zakřivením. (Doutnavé výboje, Koronové výboje, Trichelovy impulzy...). [19], [20]

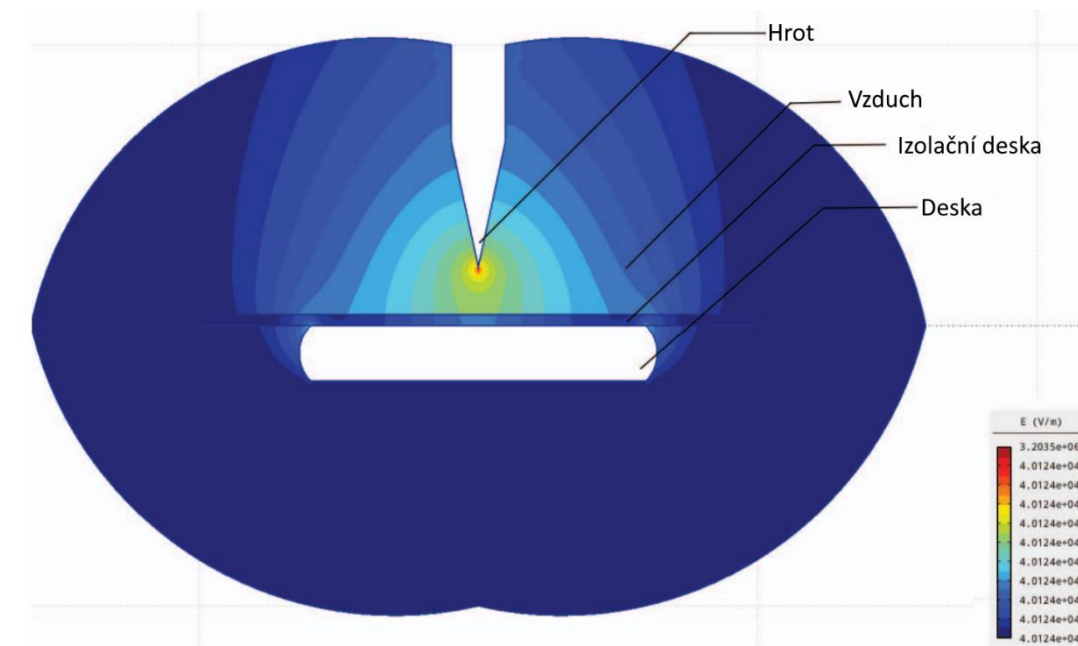


Obr. 1.1 Simulace rozložení intenzity elektrického pole při konfiguraci deska-hrot

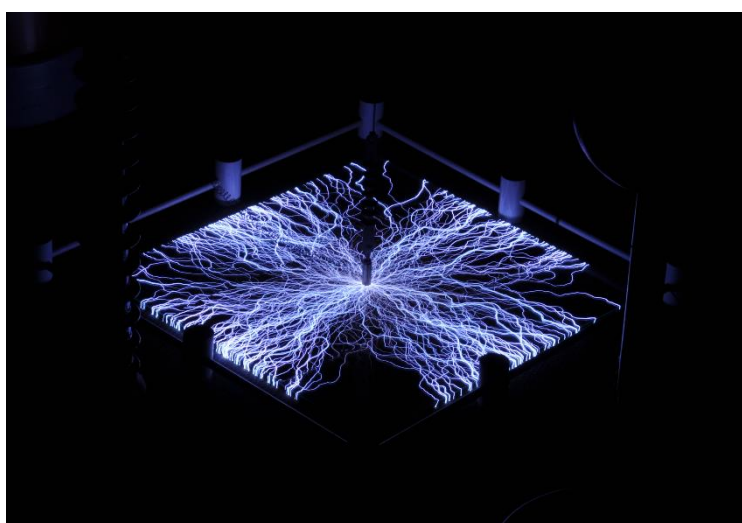


Obr. 1.2 Koronový výboj na izolátoru 500 kV nadzemního vedení, převzato z [22]

- b) **Povrchové částečné výboje** – částečné výboje vznikající na rozhraní pevného a plynného dielektrika. Nejčastějšími jsou klouzavé výboje. [8], [20]



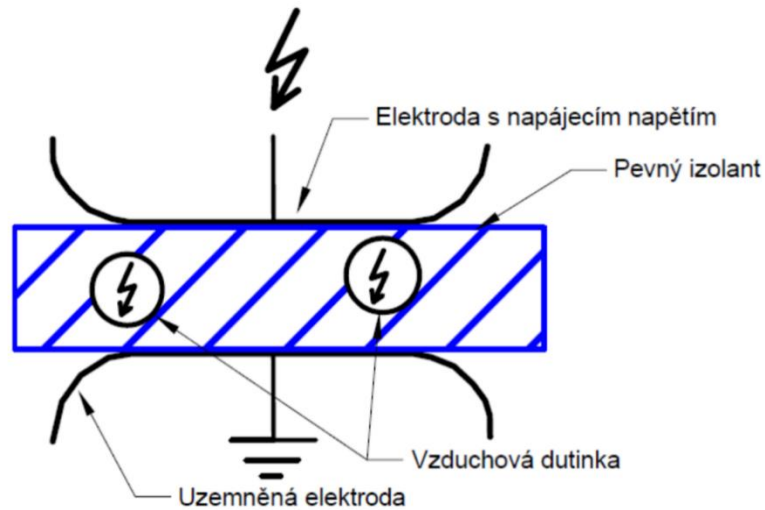
**Obr. 1.3 Simulace rozložení intenzity elektrického pole při konfiguraci deska-hrot s izolační deskou ( $\epsilon_r=3$ )**



**Obr. 1.4 Klouzavý výboj na povrchu izolační desky, převzato z [23]**

- c) **Vnitřní částečné výboje** – částečné výboje vznikající v dutinkách plynu u pevných či plynných dielektrik.

[20]



**Obr. 1.5** Vnitřní částečné výboje, převzato z [24]

Částečné výboje v pevné izolaci (vnitřní výboje) vznikají v dutinách či prasklinách obsahujících plyn nebo na povrchu přechodu pevná látka-plyn (klouzavé výboje). Dále se mohou objevovat vnější (korónové) výboje, které jsou důsledkem konstrukčního řešení elektrických zařízení (ostré hrany, malý průměr vodičů, nedostatečná vzdálenost bodů s rozdílným potenciálem atd.) Jedna z prvních provedených studií částečných výbojů při stejnosměrném napětí byla provedena v [25]. Bylo vypočteno, že četnost výbojů po zahoření výboje při zbytkovém napětí přes vybíjejí se dutinu je zanedbatelná ve srovnání s četností při zapalovacím napětím. Čím je větší zbytkové napětí, tím je i vyšší frekvence částečných výbojů. Bylo experimentálně dokázáno [20], že zde je přímá spojitost mezi frekvencí výbojů a vodivostí dielektrického materiálu. Studie fyzikálních mechanismů výbojů v dutinách vedla k představení termínu „Townsendův“ výboj a „streamerový“ výboj. Z experimentů popsaných v [26] a teoretických předpokladů vyplynulo, že mechanismy výbojů v malých dutinách jsou převážně „Townsendova“ druhu. [27], [28]

Pro vyhodnocení výbojové činnosti se získávají níže uvedené hodnoty definované normou ČSN EN 60270:

#### **Veličiny vztahující se k impulzům částečných výbojů**

- **Zdánlivý náboj  $q$**

*Je takový unipolární 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 částečného výboje; zdánlivý náboj je obvykle vyjádřen v pikocoulombech (pC).*

*Poznámka: Zdánlivý náboj se nerovná množství náboje lokálně působícího v místě výboje, který nemůže být měřen přímo. [5]*

- **Opakovací kmitočet impulzů  $N$**

*Vyjádřuje počet impulzů částečných výbojů za sekundu v případě stejně vzdálených impulzů. [5]*

- **Fázový úhel  $\varphi_i$  a čas  $t_i$  výskytu impulzu částečného výboje**

*Fázový úhel se vypočte dle vzorce:*

$$\varphi_i = 360(t_i/T)$$

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

*Fázový úhel je vyjádřen ve stupních ( $^\circ$ ). [5]*

#### **Veličiny integrované**

- **Střední proud částečných výbojů  $I$**

*Střední proud částečných výbojů je odvozená veličina představující součet absolutních hodnot jednotlivých úrovní zdánlivého náboje během zvoleného referenčního časového intervalu  $T_{ref}$  děleno tímto intervalem:*

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

*Tato veličina je obecně vyjádřena v coulombech za sekundu (C/s) nebo v ampérech (A). [5]*



- **Výkon částečných výbojů P**

Výkon částečných výbojů je odvozená veličina, která představuje střední výkon impulzu dodávaný na svorky zkoušeného objektu způsobený hodnotami zdánlivého náboje  $q_i$  během zvoleného referenčního časového intervalu  $T_{ref}$ :

$$P = \frac{1}{T_{ref}}(q_1 u_1 + q_2 u_2 \dots + q_i u_i)$$

Kde  $u_1, u_2 \dots u_i$  jsou okamžité hodnoty zkušebního napětí v okamžicích výskytu  $t_i$  jednotlivých úrovní zdánlivého náboje  $q_i$ ; musí být sledována znaménka jednotlivých hodnot. Výkon částečných výbojů je obecně vyjádřen ve wattech (W). [5]

- **Střední kvadratický součet D**

Střední kvadratický součet je odvozená veličina, která je součtem ploch jednotlivých úrovní zdánlivého náboje  $q_i$  během zvoleného referenčního časového intervalu  $T_{ref}$  děleným tímto intervalem:

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

Střední kvadratický součet je obecně vyjádřen v (coulombech)<sup>2</sup> za sekundu (C<sup>2</sup>/s). [5]

### Napětí vztahovaná k částečným výbojům

- **Počáteční napětí částečných výbojů  $U_i$**

Počáteční napětí částečných výbojů 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.

V praxi představuje počáteční napětí  $U_i$  nejnižší přiložené napětí, při kterém se úroveň veličiny impulzu částečného výboje rovná nebo převyšuje předepsanou nízkou hodnotu. Počáteční napětí částečných výbojů je obecně vyjádřeno ve voltech (V). [5]

- **Zhášecí napětí částečných výbojů  $U_e$**

Zhášecí napětí částečných výbojů je přiložené napětí, při kterém se ve zkoušeném objektu přestávají objevovat opakující se částečné výboje, je-li napětí přiložené ke

zkušebnímu objektu postupně snižováno z vyšší hodnoty, při které jsou pozorovány částečné výboje.

*V praxi představuje Zhášecí napětí částečných výbojů  $U_e$  nejnižší přiložené napětí, při kterém se úroveň zvolené veličiny impulzu částečného výboje nebo je menší než předepsaná nízká hodnota. Zhášecí napětí částečných výbojů je obecně vyjádřeno ve voltech (V). [5]*

### **Charakteristiky měřících systémů**

- **Přenosová impedance  $Z(f)$**

*Přenosová impedance je poměr amplitudy výstupního napětí k amplitudě konstantního vstupního proudu, jako funkce kmitočtu  $f$ , při sinusovém průběhu na vstupu. Přenosová impedance je obecně vyjádřena v ohmech na metr ( $\Omega/m$ ). [5]*

- **Dolní a horní mezní kmitočty  $f_1$  a  $f_2$**

*Dolní a horní mezní kmitočty jsou kmitočty, při kterých dochází k poklesu přenosové impedance  $Z(f)$  o 6 dB od nejvyšší hodnoty v propustném pásmu. Dolní a horní mezní kmitočty jsou obecně vyjádřeny v hertzech (Hz). [5]*

- **Střední kmitočet pásma  $f_m$  a šířka pásma  $\Delta f$**

*Pro všechny druhy měřících systémů je střední kmitočet pásma definován jako:*

$$f_m = \frac{f_1 + f_2}{2}$$

*a šířka pásma je definována jako:*

$$\Delta f = f_2 - f_1$$

*Střední kmitočet pásma a šířka jsou obecně vyjádřeny v hertzech (Hz). [5]*

## **1.2 Detekce částečných výbojů**

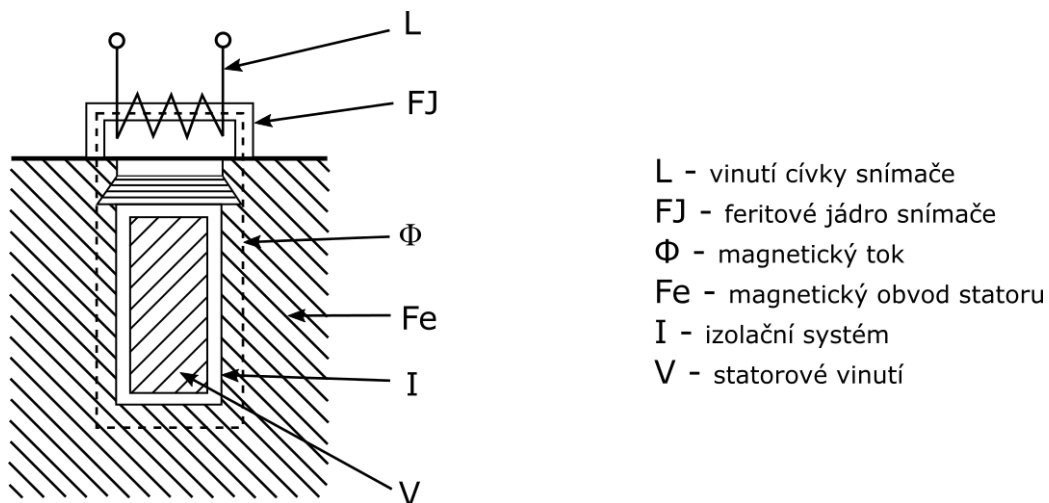
Systémy monitorování a diagnostiky izolací jsou základním prvkem pro údržbu a ekonomické využití vysokonapěťové techniky. V závislosti na vnitřních strukturách izolačních systémů se zde vyskytují rozdílné rozložení elektrického pole. V lokálních nehomogenitách

izolace se mohou vytvářet malé oblasti s výbojovou činností. Částečné výboje poukazují na rozdílné fyzikální a elektrické vlastnosti izolačních materiálů a různé druhy částečných výbojů jsou způsobeny rozdílnými příčinami. [29], [30]

Pro detekci částečných výbojů se používá několik rozdílných způsobů. Jedná se o metody – elektrické, akustické, optické a chemické měřicí techniky.

### 1. Elektrické

- Globální (viz kapitola 1.2.1)
- Lokalizační (např. metoda induktivně vázané sondy viz. Obr. 1.6)
- RIV (Radio Interference Voltage, kapitola 1.2.5)



**Obr. 1.6** Principiální schéma induktivně vázané sondy, převzato z [12]

### 2. Akustické

- Ultrazvuk
- Akustická emise (viz kapitola 1.2.3)

### 3. Optické

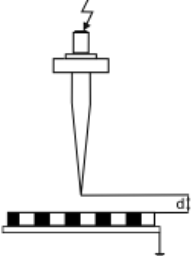
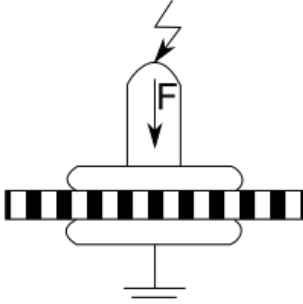
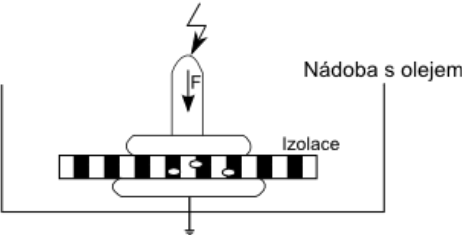
- Optická emise
- Detekce ultrafialového záření

### 4. Chemické

- Rozbor plynů z přehřáté izolace
- Rozbor oleje

[20], [29]

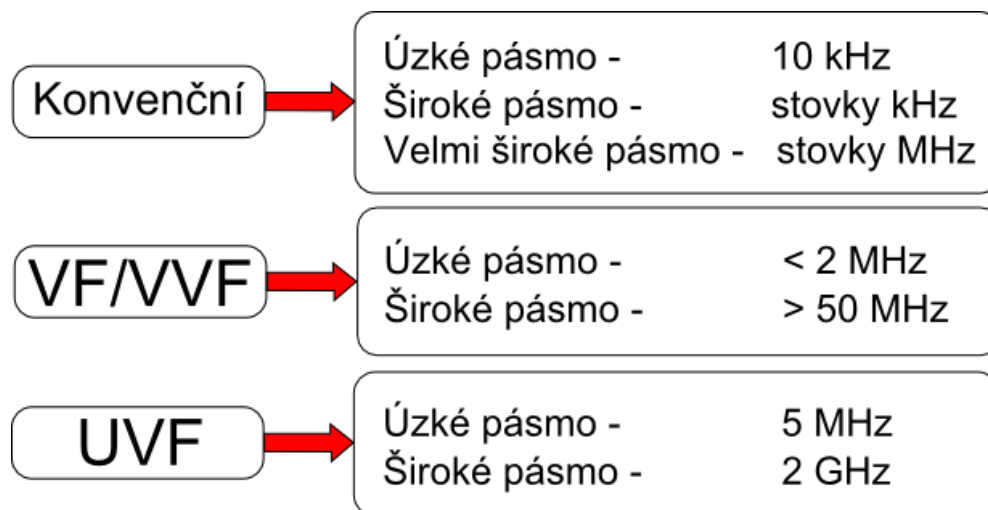
Pro generování různých modelových případů částečných výbojů se používají různá uspořádání měřicích elektrod. K měření vnějších částečných výbojů (korona) se používá např. uspořádání deska-hrot (Obr. 1.7 a)), pro měření povrchových částečných výbojů dvě deskové elektrody s izolačním materiálem mezi nimi (Obr. 1.7 b)) a pro měření vnitřních částečných výbojů se využívá uspořádání jako pro klouzavé s rozdílem, že elektrody se vzorkem jsou ponořeny v izolačním oleji (Obr. 1.7 c)). [31], [32]

1	<b>Korona</b> <b>Hrot-deska s izolačním materiálem</b>	
2	<b>Klouzavé výboje</b>	
3	<b>Vnitřní výboje</b> <b>Vnitřní dutinky v pevné izolaci</b>	

**Obr. 1.7 Elektrické metody měření částečných výbojů, převzato z [31]**

Běžné elektrické metody jsou využívány především pro detekci nehomogenit v izolaci (vnitřních výbojů), klouzavých výbojů a koronových výbojů. Nekonenční metody, jako je měření akustických nebo optických jevů, jsou používány pro přesnou lokalizaci částečných výbojů. Každý částečný výboj ve vzorku či zařízení způsobí krátký vysokofrekvenční proudový pulz v měřicím obvodu. Dostupné měřicí systémy jsou schopny detekovat vzniklý náboj a také určit polohu na fázi střídavého zkušebního napětí. Kromě toho je zaznamenáván i počet výbojů za jednotku času (četnost výbojů). Jsou používány rozdílné senzory pro detekci částečných výbojů. V nejjednodušším případě lze použít rezistor, který převádí proudový impulz

částečného výboje na napěťový signál. Charakteristiku detektoru (RLC detekční impedance – dvojbran) je možné upravit integrováním vzniklého signálu pro získání hodnoty vzniklého náboje jednotlivého výboje. Detektory s úzkým frekvenčním pásmem mají filtr/integrátor s šířkou pásma okolo 10 kHz. Detektory s širokým frekvenčním pásmem používají filtr/integrátor s šířkou pásma několik stovek kHz. [29], [33], [34]



**Obr. 1.8 Elektrické detekční systémy pro měření částečných výbojů,**  
převzato z [29]

Měření částečných výbojů je citlivá a efektivní metoda, jak zjistit počátek degradace v elektrické izolaci či selhávání izolace vlivem namáhání (elektrickým polem, teplotní namáhání, vibrace, vliv chemických sloučenin...). Vznik částečných výbojů v izolačním systému je charakterizován neperiodickými impulzy. Ačkoli je frekvenční spektrum těchto výbojů velice široké (jde až k jednotkám GHz), klasické systémy pro měření částečných výbojů běžně měří a analyzují v rozsahu 1 MHz [29]. Tudíž klasické měření nemůže obsáhnout celou charakteristiku částečných výbojů u různých izolačních systémů. Frekvenční pásma elektrických detekčních systémů pro měření částečných výbojů jsou popsány na Obr. 1.8.[29], [35]

Dle normy ČSN EN 60270 se za širokopásmový měřicí systém považuje takový systém, který je charakterizován přenosovou impedancí  $Z(f)$  s pevně danými hodnotami dolní a horní mezní frekvence  $f_1$  a  $f_2$  a dostatečným zeslabením pod  $f_1$  a nad  $f_2$ . Doporučené hodnoty  $f_1$ ,  $f_2$  a  $f_{\Delta}$  jsou:

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

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

$$100 \text{ kHz} \leq f_{\Delta} \leq 900 \text{ kHz};$$

[5]

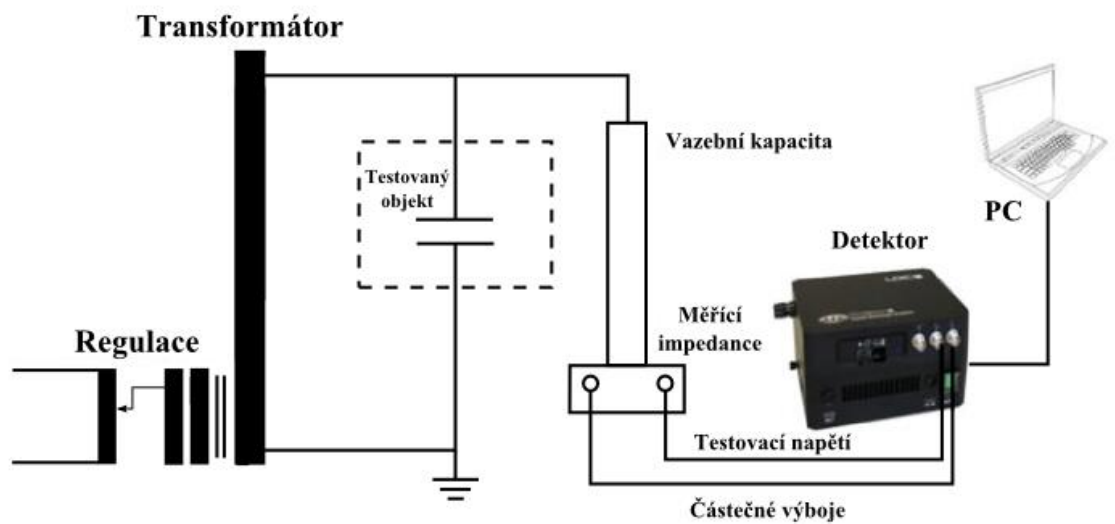
Dále norma ČSN EN 60270 specifikuje úzkopásmové přístroje pro měření částečných výbojů. Jsou charakterizovány malou šířkou pásma  $\Delta f$  a středním kmitočtem pásma  $f_m$ , který se může měnit v širokém frekvenčním rozsahu, ve kterém je amplitudové frekvenční spektrum proudového impulsu částečného výboje přibližně konstantní. Pro  $\Delta f$  a  $f_m$  jsou doporučeny hodnoty:

$$9 \text{ kHz} \leq \Delta f \leq 30 \text{ kHz}$$

$$50 \text{ kHz} \leq f_m \leq 1 \text{ MHz}$$

[5]

U nových systémů je tendence používat senzory a detektory s šířkou pásma do stovek MHz. Větší šířka pásma způsobuje to, že vzniklý výboj nemůže být přímo změřen detektorem, jelikož proud není přímo integrovaný [36]. Částečný výboj v polymerové izolaci má trvání pouze několik nanosekund a jeho frekvenční spektrum dosahuje 100 MHz. Pro měření částečných výbojů vysokých či velmi vysokých frekvencí se používají induktivní či kapacitní senzory s odlišnými šířkami pásma. Měřicí systémy s úzkým frekvenčním spektrem mohou pracovat se šířkou pásma 2 MHz, systémy se širokým frekvenčním spektrem mají šířku pásma i přes 50 MHz. Velmi krátké částečné výboje (menší než ns), například u plynem izolovaných rozvaděčů, emitují elektromagnetické vlny, jejichž spektrum dosahuje jednotek GHz. Pro částečné výboje s šířkou pásma dosahující ultra vysokých frekvencí jsou dvě možnosti měření. První je metoda s úzkým frekvenčním spektrem o šířce pásma pouze do jednotek MHz. Druhou možností je metoda s širokým frekvenčním spektrem o šířce pásma do 2 GHz. [29]



**Obr. 1.9** Zapojení měřicího systému pro elektrické měření částečných výbojů, převzato z [37]

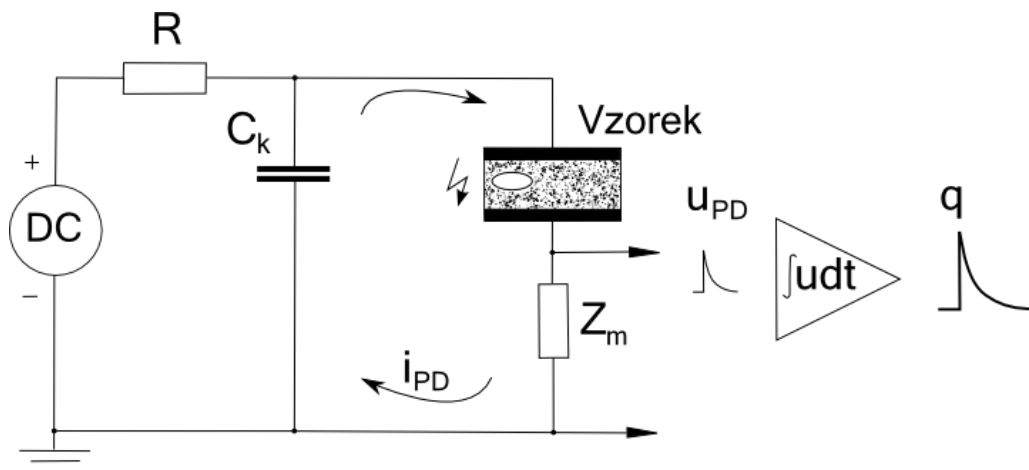
Mezi dvě hlavní elektrické měřicí metody patří:

- Detekce globální metodou
- Detekce výbojů na základě časového rozlišení impulzů

[38]

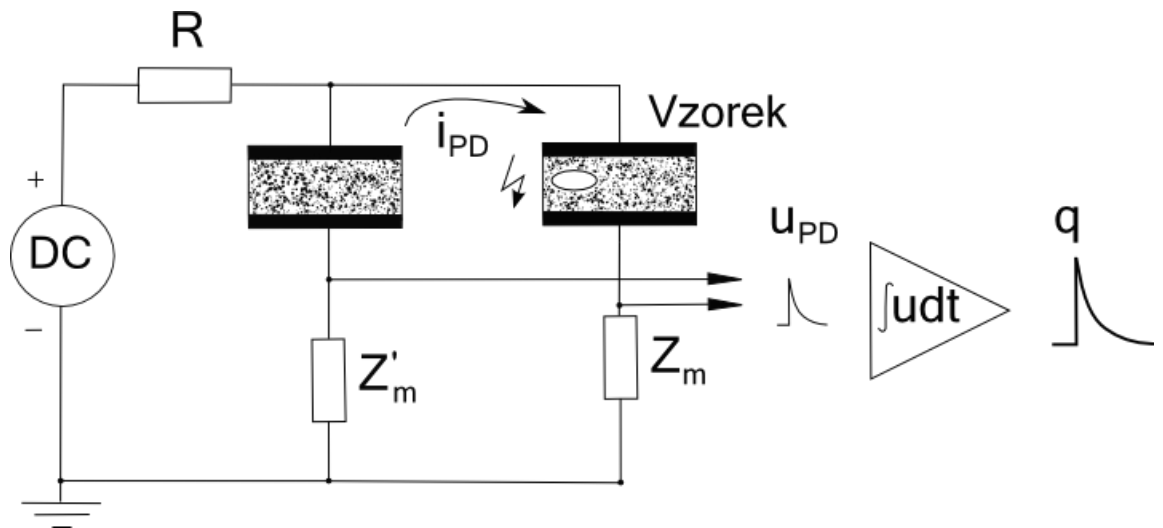
### 1.2.1 Detekce výbojů globální metodou

Tento měřicí systém (znázorněný na Obr 3.4) integruje procházející proud dle času. Tato integrovaná hodnota je nazývána zdánlivý náboj částečných výbojů  $q$ . Základní měřicí obvod je znázorněn na Obr. 1.10. [38]



**Obr. 1.10** Nevyvážený obvod pro měření částečných výbojů, převzato z [38]

Při stejnosměrném napětí všechny výboje uvnitř vzorku vyvolávají proud stejné polarity. Výboje vně vzorku vyvolávají proud opačné polarity, což může být použito pro potlačení vnějšího šumu a rušení [38]. Další metoda pro potlačení rušení je vyvážený detekční obvod znázorněný na Obr. 1.11. [38]



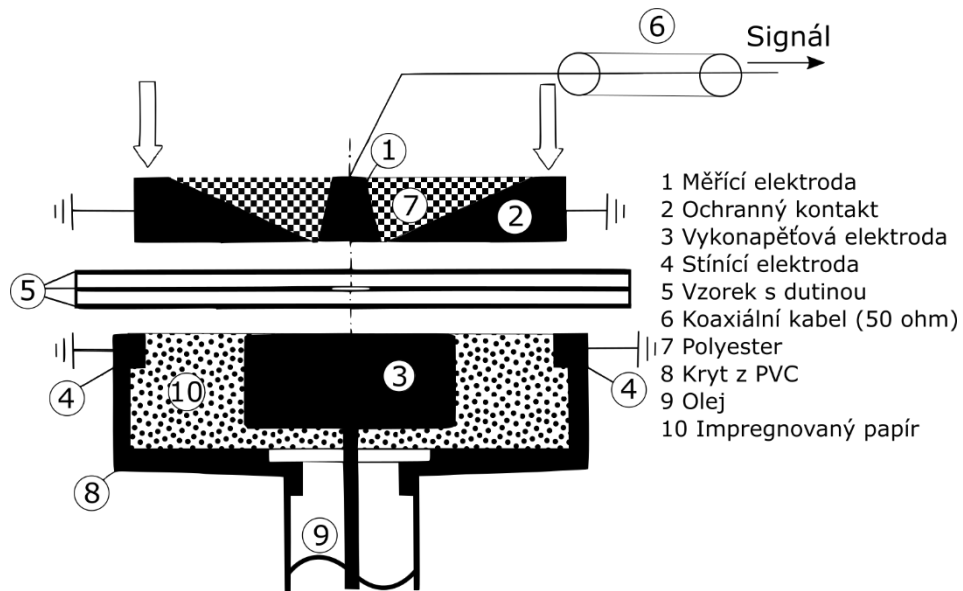
Obr. 1.11 Vyvážený měřicí obvod pro měření částečných výbojů, převzato z [38]

### 1.2.2 Detekce výbojů na základě časového rozlišení impulzů

Studie fyzikálních mechanismů částečných výbojů vedla k měření proudu procházejícího testovaným objektem. Pro tyto účely je používána metoda časového rozlišení impulzů. Vztah mezi mechanismem výbojů a degradací izolace byl zkoumán téměř pouze pro střídavé napětí, avšak zatím nebyla provedena žádná významná studie při stejnosměrném napětí. [38]

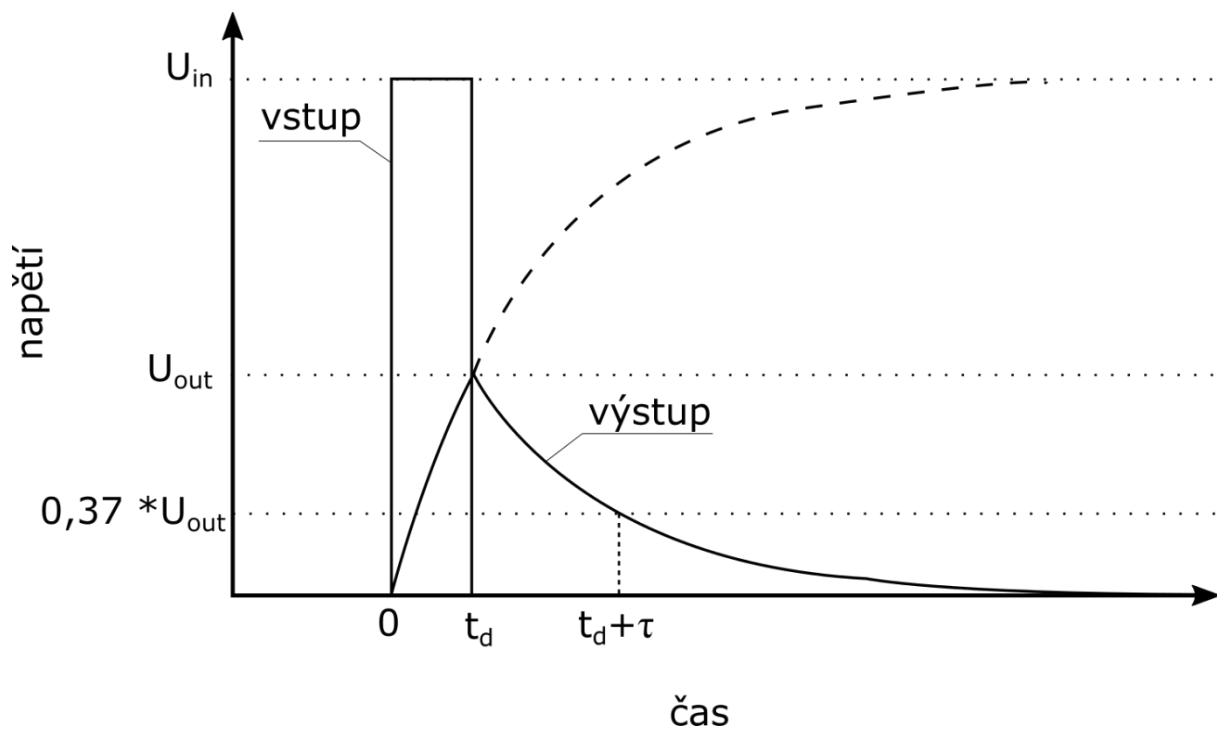
Ve srovnání s klasickou detekcí částečných výbojů, metoda časového rozlišení impulzů vyžaduje mnohem složitější měřicí techniku a výbojový obvod s velmi širokým frekvenčním pásmem, viz Obr. 1.12. U průmyslových měření se toto vztahuje pouze na určité testované objekty (kabely, GIS). Nicméně znalost výbojových mechanismů usnadňuje interpretaci naměřených hodnot výbojů klasickou metodou. [38]





**Obr. 1.12** Měřicí obvod pro měření částečných výbojů na základě časového rozlišení, převzato z [38]

V tomto zapojení zastává funkci vazebního kondenzátoru uzemněný ochranný kontakt. Měřicí impedance je tvořena impedancí  $50\Omega$  koaxiálního kabelu. Koaxiální kabel je připojen do osciloskopu a impedančně přizpůsoben. Osciloskop je nastaven na vzorkovací rychlost  $500 \text{ Msample/s}$  s analogovou šířkou pásma  $300 \text{ MHz}$ . [38]



**Obr. 1.13** Deformace signálu vlivem dolní propusti, f převzato z [38]

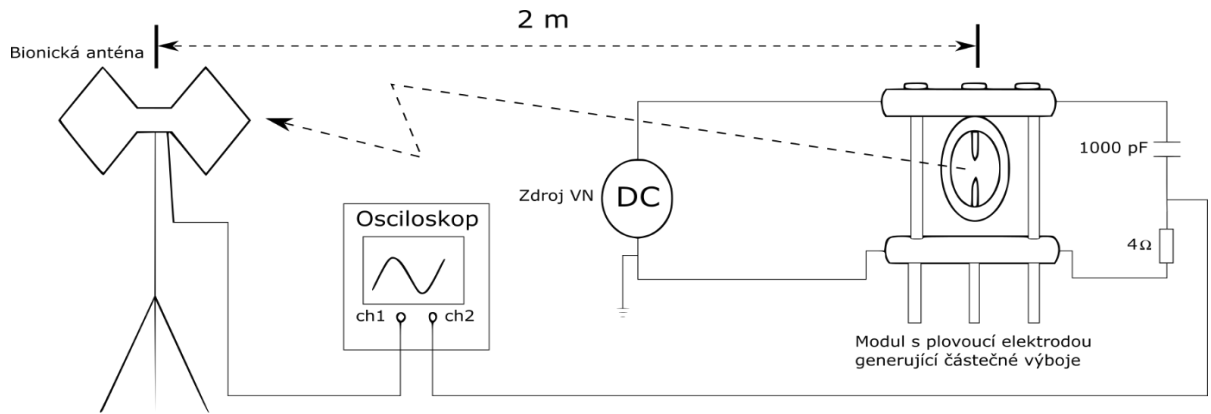
Časová konstanta celého měřicího systému může být odhadnuta dle následujících předpokladů. Obdélníkový impulz o trvání  $t_d$  a amplitudě  $U_{in}$  je deformován dolní propustí s časovou konstantou  $\tau$  (viz Obr. 1.13). Výstupní signál má amplitudu  $U_{out} < U_{in}$  a jeho dokmit je určen časovou konstantou  $\tau$ . Časová konstanta celého systému může být odhadnuta na 20 ns, pokud dokmit nejkratšího změřeného pulzu odpovídá časové konstantě systému. Hodnota 20 ns nestačí k udržení původního tvaru pulzu výboje, obzvláště v případě streamerových výbojů. Nicméně je krátká natolik, aby bylo možné jednoznačně určit rozdíl mezi Townsen dovými a streamerovými mechanismy výboji, jak popisuje Morshius v [39] pro AC.

### 1.2.3 Detekce výbojů na základě akustické emise

Částečné výboje mohou produkovat teplo, elektromagnetické záření a elektrický signál. Náhlé změny teploty v okolí místa výskyt částečných výbojů mohou vyvolat tlakovou vlnu, která má za následek akustickou emisi. Signál akustická emise, závislý na akustickém zdroji a mechanickém útlumu mezi přijímačem a akustickým zdrojem může být přijímán elektroakustickým senzorem. Akustické měření je známé jako jedno z nejvíce praktických způsobů lokalizace částečných výbojů na vysokonapět'ových zdrojích, jako jsou například transformátory. [40][41]

### 1.2.4 Detekce výbojů na základě energie vyzářené do volného prostoru

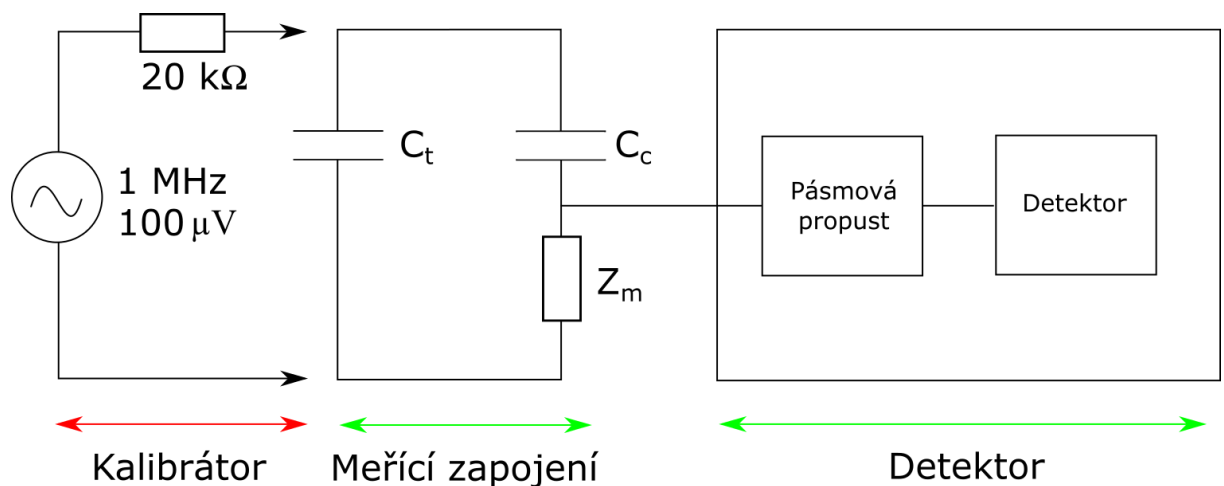
Měření vyzářené energie (Free-space radiometric measurement; Radiometrie volného prostoru; Obr. 1.14) využívá širokopásmovou anténu pro příjem elektromagnetické energie vyzařované zrychlujícím nábojem obsahujícím přechodný proud částečných výbojů. Při měření pomocí radiometrie volného prostoru je získaný signál úměrný časové derivaci proudu částečných výbojů. Z podstaty této metody je velice obtížně, ne-li nemožné, získat absolutní hodnotu intenzity částečných výbojů. To je způsobeno tím, že amplituda přijímaného signálu je ovlivněna několika faktory, které jsou ve větší či menší míře neobjasněné a minimálně v jenom případě prakticky neznámé. Tyto neznámé faktory zahrnují: ztráty po cestě mezi vyzařující strukturou a přijímací anténou, polarizaci vyzařovaného pole vzhledem ke směru přijímací antény, zisk přijímací antény vzhledem ke směru vyzařování a vyzařovaný výkon. Měření vyzářené energie může na rozdíl od běžného měření lokalizovat zdroj částečných výbojů. [42]–[44]



**Obr. 1.14** Měřicí obvod pro měření energie vyzářené do prostoru částečnými výboji, převzato z [42]

### 1.2.5 Radio Interference Voltage (RIV)

Toto měření (schéma na Obr. 1.15) bylo původně určeno k měření rušení v komunikačních sítích. Měřicí systémy RIV jsou, technicky vzato,  $\mu$  voltmetry se šířkou pásma 9 kHz a laditelnou středovou frekvencí od 10 kHz do 10 MHz. Právě tyto parametry v kombinaci s váhovou křivkou CISPR (udává útlum signálu na základě opakovací frekvence pulzů) dokážou oddělit signál částečných výbojů a potlačit signály ostatní. Základní rozdíl mezi globální metodou měření částečných výbojů a RIV a je v charakteristice vstupních filtrů a detekční jednotky, ale hlavně ve způsobu kalibrace. U RIV měření odpovídající normě NEMA-ANSI se měřicí obvod kalibruje napětím a měřené hodnoty jsou uváděny v  $\mu$ V. [45][46]



**Obr. 1.15** Zjednodušené zapojení pro měření RIV, převzato z [45]

### 1.3 Kalibrace přístrojů pro měření částečných výbojů

Kalibrace měřících přístrojů částečných výbojů spočívá v první řadě ve výběru vhodného vazebního kondenzátoru. Jeho kapacita  $C_k$  by měla být mnohonásobně vyšší než kapacita testovaného objektu  $C_t$ . To je způsobeno tím, že náboj dodávaný z vazební kapacity  $C_k$  je podstatně vyšší, a tudíž měřitelný náboj je rovný náboji způsobeným částečným výbojem. Tento náboj vyrovnává napět'ové poklesy způsobené lokálním průrazem v testovaném objektu. Teoretického předpokladu  $C_k \gg C_t$ , může být v praxi dosaženo jen velmi obtížně, jelikož příliš velká kapacita  $C_k$  by přetížila napájecí zdroj, který by nebyl schopen dodávat dostatečný výkon. Toto řešení by z ekonomického hlediska bylo příliš drahé a neefektivní. Pokud je zvolena kapacita vazebního kondenzátoru  $C_k$  jen lehce vyšší než kapacita testovaného objektu  $C_t$ , poměr mezi změřeným nábojem a skutečným nábojem způsobeným částečným výbojem se sníží kvůli nižšímu kompenzujícímu proudu  $i(t)$ . Je důležité podotknout, že tento jev je potlačen kalibračním procesem a neovlivňuje správnost měření [47]–[50]. Nicméně odstup signál šum je tímto ovlivněn, stejně tak i citlivost měření a možnost měřit nižší hodnoty náboje výbojové aktivity. Přesun náboje mezi testovacím objektem a vazební kapacitou může být popsán následující rovnicí:

$$Q = C_t \cdot \Delta U_t = (C_t + C_k) \Delta U'_t \quad (1)$$

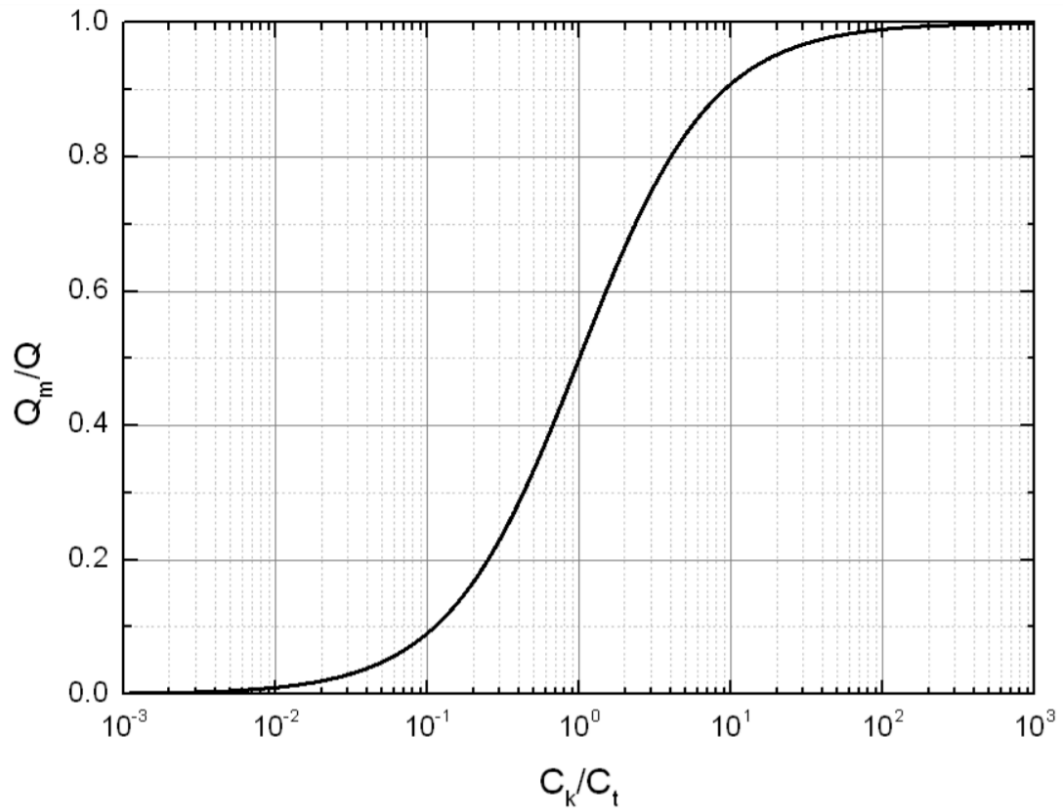
$\Delta U'_t$  vyjadřuje zbytkový pokles napětí po přenosu náboje. Měřený náboj  $Q_m$  je možné vypočítat ze vztahu:

$$Q_m = C_k \cdot \Delta U'_t \quad (2)$$

Výpočet poměru mezi zdánlivým nábojem a reálným nábojem je definován jako:

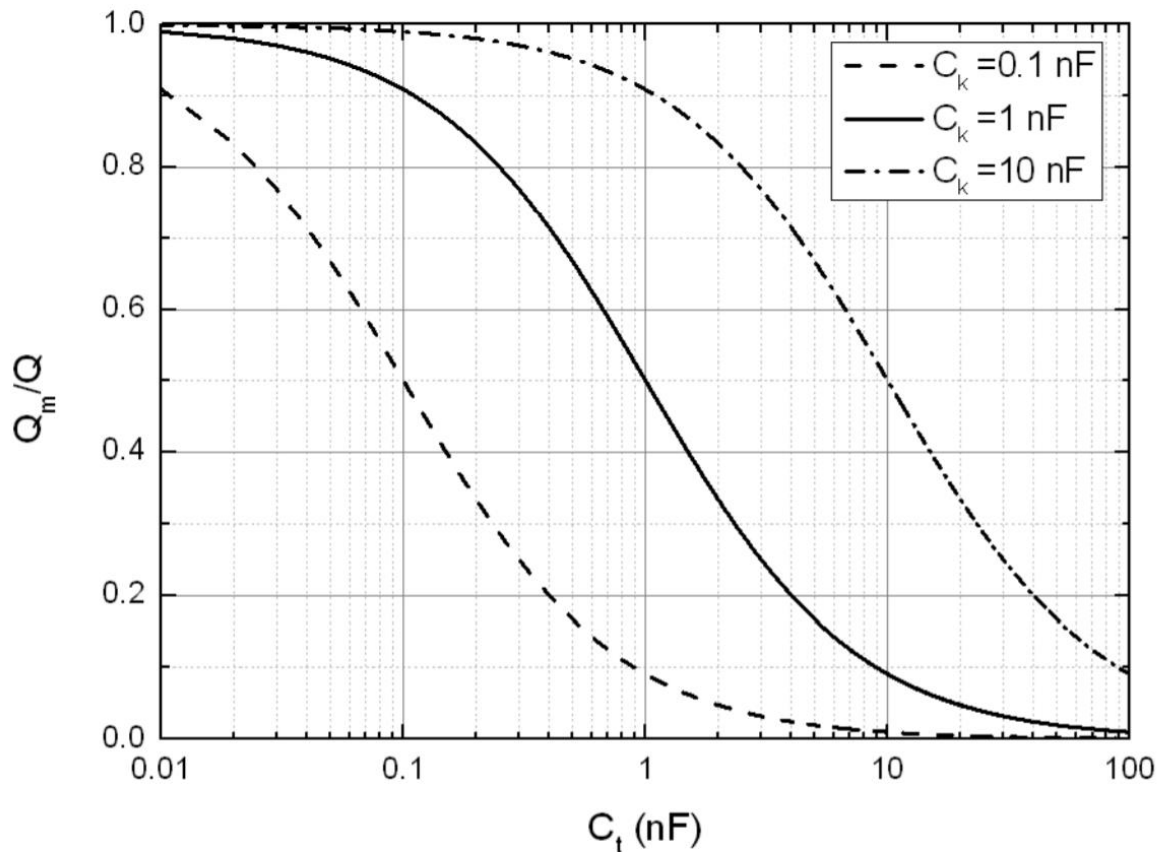
$$\frac{Q_m}{Q} = \frac{C_k}{C_k + C_t} \quad (3)$$

Závislost poměru měřeného a reálného (zdánlivého respektive) náboje na poměru  $C_k$  a  $C_t$  na Obr. 1.16. Z obrázku je zřejmé, že pokud je vazební kapacita  $C_k$  desetkrát vyšší než kapacita testovaného objektu  $C_t$ , tak poměr  $Q_m/Q$  je 90 procent. Pokud je  $C_k$  rovno  $C_t$ , bude poměr  $Q_m/Q$  pouze 50 procent. Pro dosažení poměru  $Q_m/Q$  jedna ku jedné je nutné zvolit vazební kapacitu stokrát větší, než je kapacita měřeného objektu ( $C_k/C_t$ ). [47]–[49], [51]



**Obr. 1.16** Závislost  $Q_m/Q$  na poměru  $C_k/C_t$ , převzato z [47]

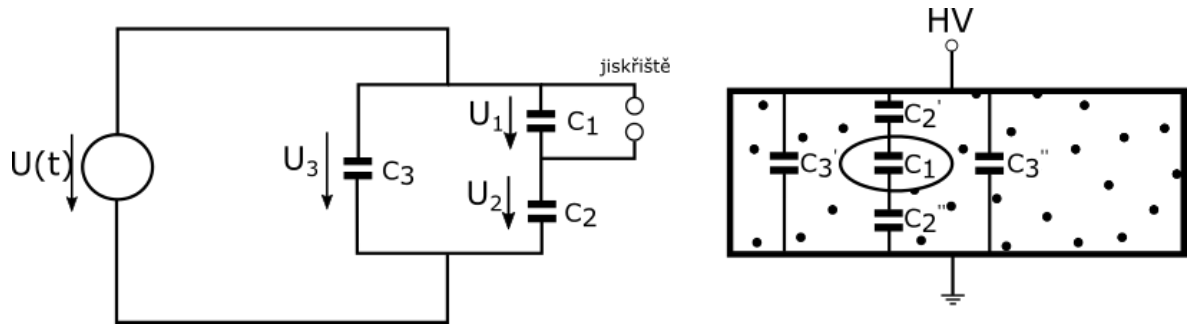
Obr. 1.17 vykresluje vztah mezi typickými hodnotami vazebních kapacit  $C_k$  a kapacit testovaných objektů  $C_t$ . Z toho vyplývá, že je nezbytné zvolit dostatečně velký vazební kondenzátor  $C_k$  pro dosažení kýžené citlivosti pro měření částečných výbojů. [47], [48] Postup kalibrace není součástí této práce. Kalibrace pro měření byla provedena dle [52] a podrobně popsána např. v [7], [49], [50], [53].



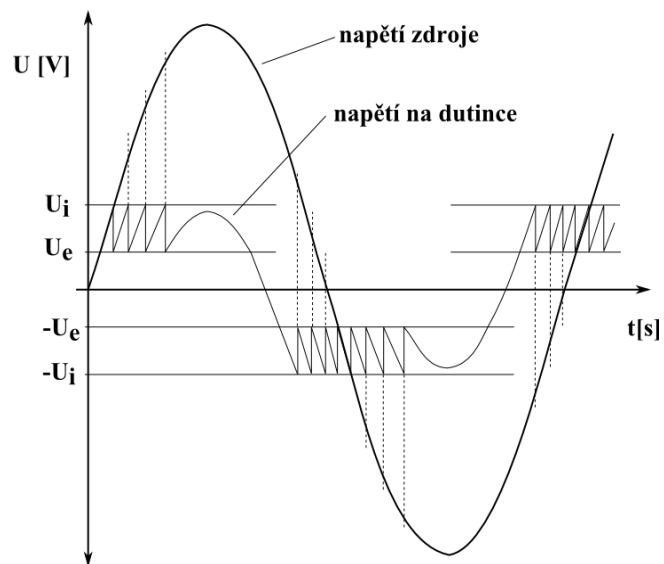
Obr. 1.17 Závislost  $Q_m/Q$  na rozdílných hodnotách  $C_k$ , převzato z [47]

#### 1.4 Částečné výboje při střídavém napětí

Na Obr. 1.19 je znázorněn typický průběh napětí částečných výbojů při střídavém napětí v pevném izolantu. Graf uvažuje konstantní napětí výbojů, jejich nezávislost polarity a to, že předchozí výboje neovlivňují elektrickou pevnost dutinky (viz náhradní schéma dutinky na Obr. 1.18). Jedním z nejvýznamnějších parametrů těchto měření je zdánlivý náboj  $q$ , protože jeho hodnota udává srovnání pro kalibrovaný normál a testovaný objekt. Jedná se o zdánlivou hodnotu náboje, kterou dodá vazební kapacita do měřicího obvodu a nemá přímou spojitost s reálným nábojem částečného výboje. Dalším parametrem je četnost výbojů  $n$ . Jedná se počet výbojů za jednotku času. Další z měřených údajů je fázový úhel  $\varphi$ , který udává úhel, kdy se vyskytl částečný výboj. Další doplňkové hodnoty jsou výkon výboje  $P$  či průměrný proud výboje  $I$ . [16], [54]–[57]



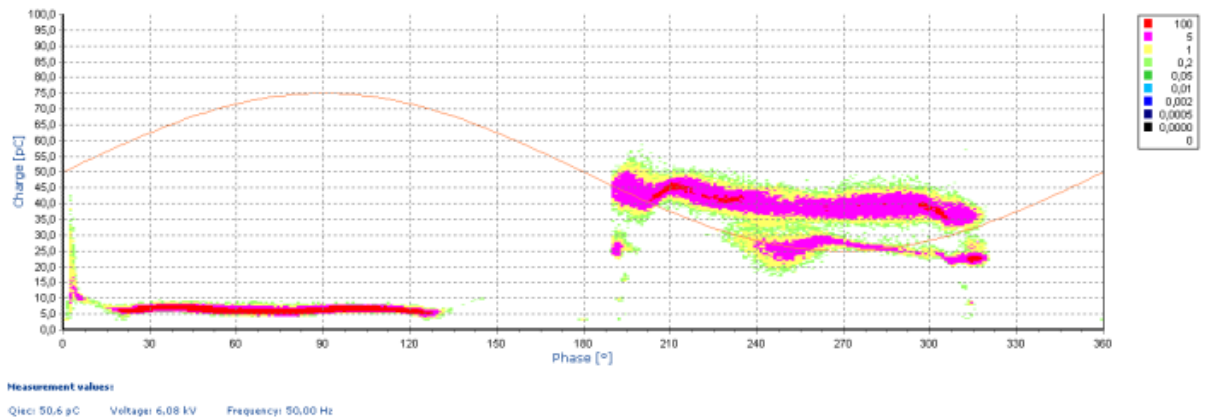
Obr. 1.18 Náhradní schéma dutinky v pevném dielektriku, převzato z [20]



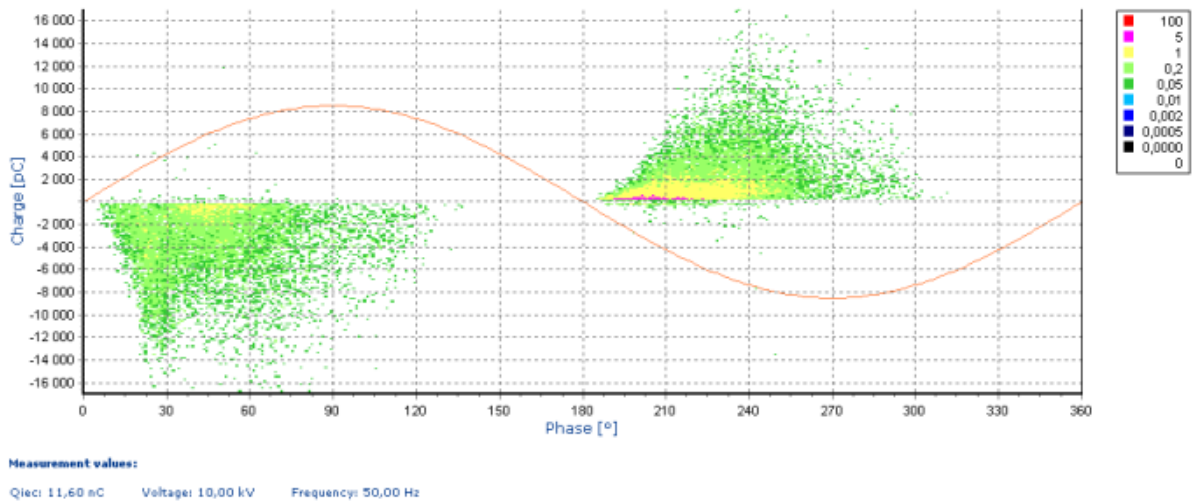
Obr. 1.19 Průběh napětí částečných výbojů [26]

$U_i$  – Zapalovací napětí částečných výbojů

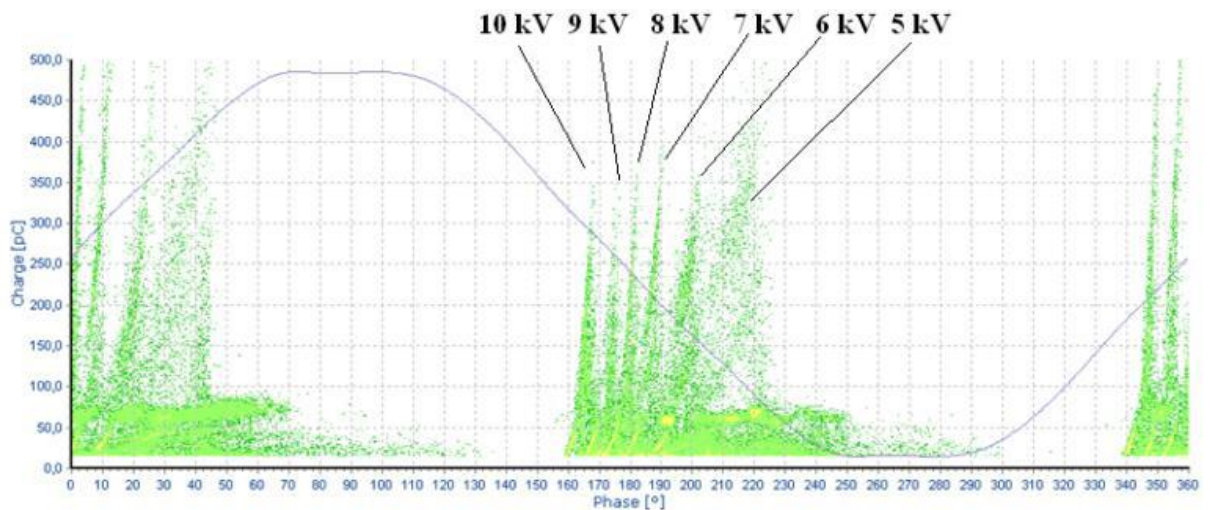
$U_e$  – Zhášecí napětí částečných výbojů



Obr. 1.20 PRPD Diagram pro uspořádání deska-hrot (korona) při střídavém napětí, převzato z [37]



**Obr. 1.21 PRPD Diagram pro klouzávé výboje při střídavém napětí,  
převzato z [37]**



**Obr. 1.22 PRPD Diagram pro vnitřní částečné výboje při střídavém napětí,  
převzato z [37]**

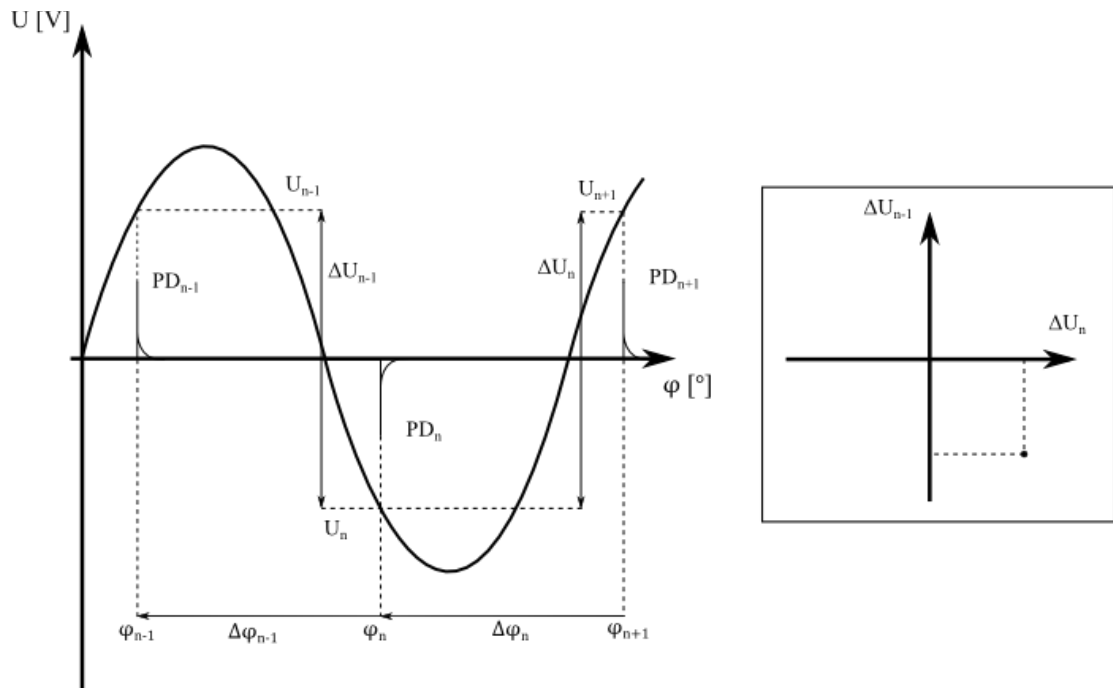
### 1.5 Problematika evaluace částečných výbojů při stejnosměrném napětí

Grafy PRPD (Obr. 1.20 - Obr. 1.22) jsou nejběžnější grafickou metodou pro znázornění částečných výbojů. Nicméně pro měření při stejnosměrném napětí není možnost pomocí PRPD vyhodnocovat výbojovou činnost, kvůli absenci fáze u stejnosměrného napětí. I přes grafické znázornění jsou stále nejdůležitějším měřítkem naměřené hodnoty zdánlivého náboje, napětí, četnost atd. [21], [58]–[60]

Jako možná metoda hodnocení výbojové činnosti při stejnosměrném napětí se jeví pulzně sekvenční analýza (Grafy PSA) původně vyvinuta pro střídavé napětí. Je vytvořena



třemi po sobě jdoucími impulzy vyvolanými částečnými výboji v závislosti na jejich napětí a fázového posunu. Kvůli absenci fáze při stejnosměrném napětí mohou být pro vyhodnocení použity hodnoty napětí v okamžiku impulzu, náboj impulzu či čas výskytu impulzu. Na Obr. 1.23 je ukázán postup tvorby PSA grafů. Pro vytvoření grafu jsou použité částečné výboje  $PD_{n-1}$ ,  $PD_n$  a  $PD_{n+1}$ , jejich napětí  $U_{n-1}$ ,  $U_n$  a  $U_{n+1}$ , jejich fázové posuny  $\varphi_{n-1}$ ,  $\varphi_n$  a  $\varphi_{n+1}$  a jejich zdánlivé náboje  $Q_{n-1}$ ,  $Q_n$  a  $Q_{n+1}$ . [21], [58], [61]–[63]



Obr. 1.23 Tvorba PSA grafů, převzato z [21]

Hodnoty pro grafy  $\Delta U_n/\Delta U_{n-1}$  (resp.  $\Delta\varphi_n/\Delta\varphi_{n-1}$ ,  $\Delta Q_n/\Delta Q_{n-1}$ ) byly vypočteny pomocí rovnic (4)-(9). Kde  $U$  je napětí ve voltech (V),  $\varphi$  je napětí ve stupních ( $^\circ$ ) a  $Q$  je zdánlivý náboj v piko coulombech (pC). [21]

$$\Delta U_n = U_{n+1} - U_n \quad (4)$$

$$\Delta U_{n-1} = U_n - U_{n-1} \quad (5)$$

$$\Delta\varphi_n = \varphi_{n+1} - \varphi_n \quad (6)$$

$$\Delta\varphi_{n-1} = \varphi_n - \varphi_{n-1} \quad (7)$$

$$\Delta Q_n = Q_{n+1} - Q_n \quad (8)$$

$$\Delta Q_{n-1} = Q_n - Q_{n-1} \quad (9)$$

[21]

Analýza provázanosti pulzů částečných výbojů a jejich chování s průběžnou degradací izolace umožňuje lepší porozumění fyzikálních procesů spojených s výbojovou činností.

Ukazuje základní informace o nahromaděném prostorovém náboji a snižuje ovlivnění elektrického pole vlivem pozitivního a negativního prostorového náboje. [3]

Korelace mezi výbojovými veličinami, jako jsou rozdíl napětí, amplituda pulzu či amplituda následného pulzu, umožňují sběr hodnotných dat s ohledem na základní fyzikální mechanismy lokálních degračních procesů, které nemohou být získány klasickými metodami analýzy částečných výbojů. [3], [64], [65]

Ačkoli metoda PSA není závislá na tvaru pulzů částečných výbojů, které jsou značně ovlivněny charakteristikou přenosové cesty signálu od zdroje částečných výbojů k detektoru a jejichž zaznamenávání vyžaduje vysokofrekvenční vazbu. Poslední poznatky ukazují, že by tyto informace mohli dopomoci k úspěšnému rozlišení původu částečných výbojů. Jako užitečné se jeví zaznamenávat tyto parametry:

- Amplitudu výboje (včetně polarity)
- Pozici pulzu (čas či fáze) a cyklus (pouze u střídavých napětí)
- Okamžité napětí v čase každého impulsu
- Tvar pulzů

[3], [53], [66], [67]

Oproti střídavému napětí mohou být u stejnosměrného napětí dvě konfigurace – pozitivní a negativní. Výsledky u měření korony na sestavě deska-hrot byly, dle očekávání, závislé na polaritě připojeného napětí. V případě kladného napětí na jehle dochází k deformaci elektrického pole v důsledku nahromadění kladných iontů (viz Obr. 1.24). V tomto případě vznikají dva protichůdné jevy:

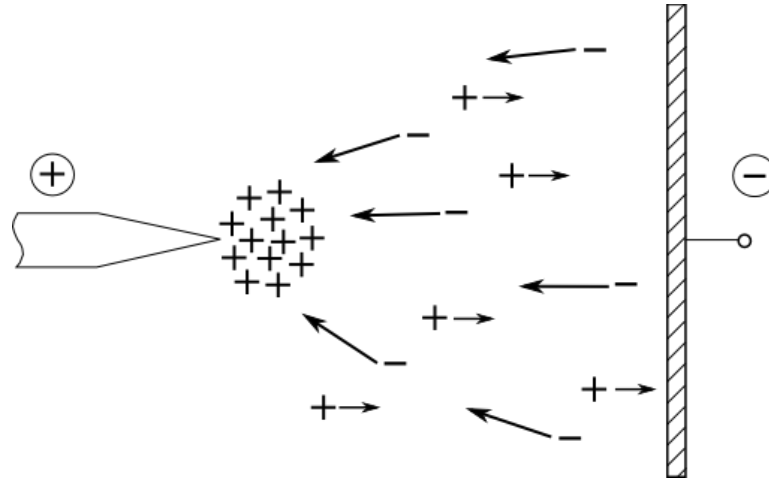
1. Hrot jehly se teoreticky zvětší, což vede k snížení intenzity elektrického pole v jeho okolí.
2. Potenciál kladné elektrody se přiblíží elektrodě negativní, takže elektrická intenzita pole se zvýší.

[37], [41]

O to, jaký jev převažuje rozhoduje rozložení elektrické intenzity (Obr. 1.1) a pohyblivost iontů v daném prostředí. V případě vzduchu nejprve převažuje první jev – hranice, kde se vyskytují výboje, je stálá v určité vzdálenosti od hrotu jehly. Pokud napětí v tomto okamžiku vzroste, začnou se zde vyskytovat výboje Townsendova typu. S vyšším napětím se

začnou tvořit streamery. Při dalším zvyšování napětí se teoretická vzdálenost elektrod snižuje a začíná převažovat jev druhý (růst intenzity elektrického pole). Díky těmto skutečnostem dochází k průrazu při nižším napětí než v případě negativního potenciálu na jehle.

V případě negativního napětí na jehle je intenzita elektrického pole nižší než v předchozím případě. Výsledkem je, že při negativním potenciálu na jehle je průrazné napětí vyšší než u kladného potenciálu. Hodnoty zdánlivého náboje jsou vyšší pro kladnou polaritu než pro zápornou díky silnější výbojové aktivitě. [37], [68]



**Obr. 1.24** Sestava deska-hrot při pozitivním stejnosměrném napětí, převzato z [37]

## 2 Cíle disertační práce

Současný vývoj a aplikovatelnost vysokonapěťových stejnosměrných systémů a zařízení si žádá diagnostiku ve výrobě, v distribuci všech stádií i ve spotřebě. V případě střídavého napětí se částečné výboje periodicky opakují. Ze závislosti polohy pulzů na fázi je možné určit typ výbojové činnosti. Další parametry jako četnost pulzů, náboj či proud pak dále určují závažnost poruchy v elektroizolačním systému zařízení. Pro stejnosměrné měřicí řetězce je možné využít hodnoty náboje, proudu a četnost pulzů. Avšak běžným postupem není možné z naměřeného signálu určit typ výbojové činnosti z důvodu absence fáze a synchronizace výbojů se stejnosměrným napětím. V tuto chvíli je velice obtížné diagnostikovat měřený objekt či zařízení. Bez znalosti typu výbojů není možné charakterizovat zdroj závady – není možné rozpoznat, zda se jedná např. o ostré hrany vodivých částí, špatnou penetraci distančních členů izolačním olejem, cizí objekt či špatně zvolená technologie. Cílem této disertační práce je návrh metody pro určení typu částečných výbojů při střídavém napětí. Dalším cílem je vývoj a ověření metodiky vhodných simulačních sekvencí a vytvoření vhodného testovacího souboru na němž budou odzkoušeny již dříve v literatuře popsané metodiky PSA. Bude proveden výběr

perspektivních metod na základě jejich počítačových simulací a porovnání výstupů simulací s daty z reálného měření. Posledním krokem bude ověření funkčnosti metody porovnáním výstupů pro jednotlivé druhy testovacího napětí na experimentálních uspořádáních.

#### 1. Definice problematických aspektů určování typů částečných výbojů

- Shrnutí dosud známých poznatku v oboru částečných výbojů, popis měřících uspořádání a simulace rozložení jejich elektrického pole.
- Definice měřených hodnot, definice detekčních metod a definice metod kalibrace přístrojů pro měření.

#### 2. Evaluace stejnosměrné výbojové činnosti je na základě charakterizujících vlastností

- Popis problematiky stejnosměrných částečných výbojů
- Vytvoření kritérií pro sestavení souboru vhodných metod pro diagnostiku částečných výbojů pro stejnosměrné napětí.

#### 3. Návrh nové metody pro vyhodnocování částečných výbojů při stejnosměrném napětí

- Simulace vybraných metod
- Porovnání výsledků simulací s daty z reálných měření

#### 4. Ověření nové metody pro vyhodnocování částečných výbojů při stejnosměrném napětí

- Zpracování a porovnání reálných dat pomocí vybrané metody pro různé typy výbojů a různé druhy napětí
- Ověření funkčnosti vybrané metody

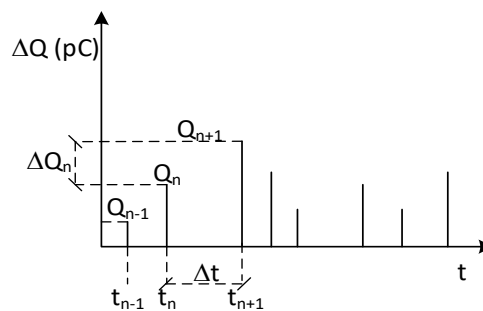
#### 5. Doporučení dalších kroků budoucího výzkumu

- Vytvoření databáze specifických výstupů pro jednotlivé typy částečných výbojů
- Kombinace metod pro zvýšení přesnosti a odolnosti proti rušení

### 3 Nové metody analýzy částečných výbojů

#### 3.1 Pulzně sekvenční analýza

Stejně jako v případě střídavého napětí, pracuje pulzně sekvenční analýza při stejnosměrném napětí s alespoň třemi po sobě jdoucími pulzy. Nejčastěji používané hodnoty jsou zdánlivý náboj  $Q$  a čas výskytu pulzu  $t$  (který lze vypočítat z periody a fáze u střídavých měřicích systémů). V tomto případě je zbytečné brát v úvahu hodnotu napětí, jelikož napětí pro DC je konstantní. Pro účely stejnosměrné PSA jsou použity následující rozdíly hodnot po sobě jdoucích pulzů (Obr 3.1) – viz rovnice (7)-(12)



Obr 3.1 Diagram používaných hodnot, převzato z [25]

Níže zmíněné základní rovnice popisují postup získávání hodnot pro DC PSA:

$$\Delta Q_n = Q_{n+1} - Q_n \quad (10)$$

$$\Delta Q_{n-1} = Q_n - Q_{n-1} \quad (11)$$

- Q-Q PSA:  $\Delta Q_n = f(\Delta Q_{n-1})$

$$\Delta t_n = t_{n+1} - t_n \quad (12)$$

$$\Delta t_{n-1} = t_n - t_{n-1} \quad (13)$$

- t-t PSA:  $\Delta t_n = f(\Delta t_{n-1})$

$$\Delta Q_n = Q_{n+1} - Q_n \quad (14)$$

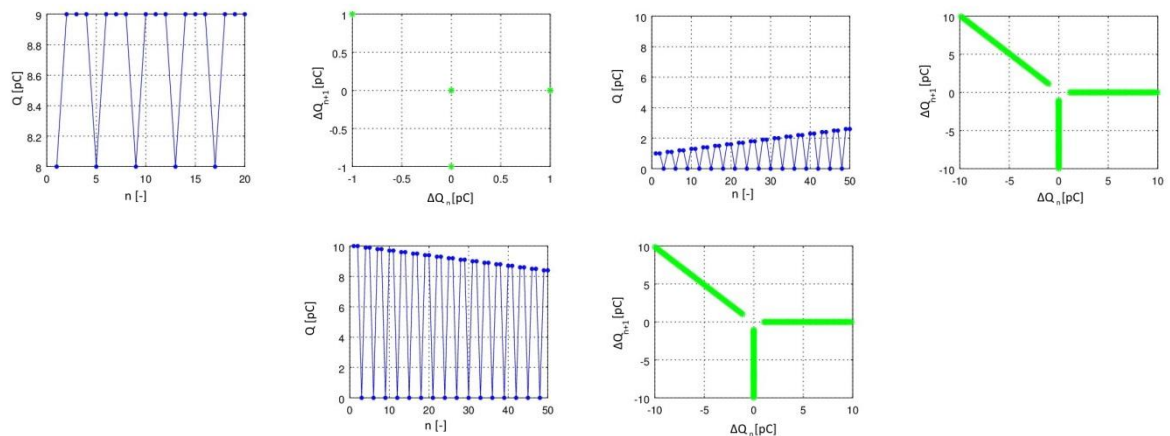
$$\Delta t = t_{n+1} - t_n \quad (15)$$

- Q-t PSA:  $\Delta Q_n = f(\Delta t_n)$

[25], [69]–[71]

### 3.2 Simulace Q-Q PSA grafů

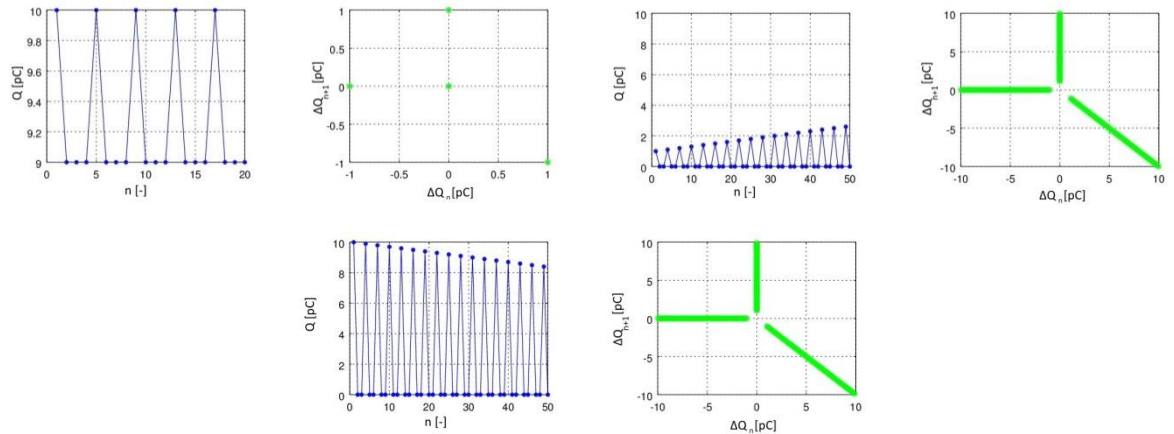
Ze zkušeností získaných z předešlých experimentů ([25], [31], [72]) vyplývá, že koronové částečné výboje (pouze Trichelovy pulzy) mají téměř konstantní amplitudu zdánlivého náboje. Malé odchylky zdánlivého náboje jednotlivých po sobě jdoucích pulzů zapříčiňují, že  $\Delta Q$  se pohybuje ve velice malém rozsahu hodnot. Nejčastěji vzniklé průběhy Q-Q PSA byly nasimulovány. Běžné matematické funkce byly zpracovány v programu Octave algoritmem pro Q-Q PSA. Simulace ukazují, že pro výsledný obrazec nezáleží na průběhu funkce (lineární, exponenciální atd.) ani na její polaritě.



**Obr 3.2 Simulace průběhů (sekvence High-High-High-Low) lineárních funkcí a jejich Q-Q PSA**

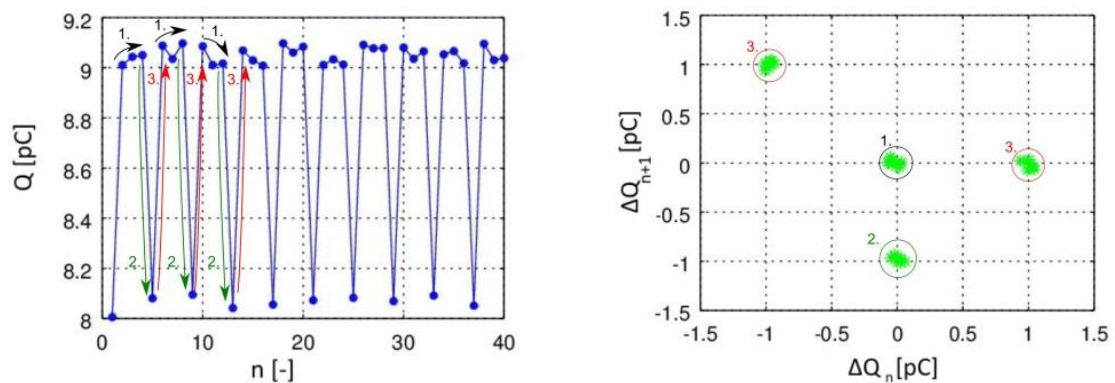
Pro simulace bylo nutné stanovit různé úrovně signálu. Vysokou úroveň (high, H) pro pulz s vysokou hodnotou zdánlivého náboje či velkou časovou prodlevu mezi pulzy a nízkou úroveň (low, L) pro pulzy s nízkou hodnotou zdánlivého náboje, nízkou časovou prodlevou mezi pulzy či rušení. Pro co nejjednodušší demonstraci a simulaci Q-Q PSA, byly hodnoty vysoké úrovně určeny jako větší než nula a hodnoty nízké úrovně byly stanoveny na nulu (bylo experimentálně ověřeno, že pokud jsou hodnoty H určeny např. větší než 5 a L např. 1, výsledný tvar grafu zůstane nezměněn, změní se pouze měřítko).

Sekvence hodnot pulzů vyobrazených v Obr 3.2 byly sestaveny v posloupnosti „High-High-High-Low“ (HHHL). Pokud se obrátí pořadí úrovní pulzů na sekvenci „Low-Low-Low-High“ (LLLH) výsledný obrazec Q-Q PSA grafu bude mít opačnou orientaci, viz Obr 3.3. Z výsledných grafů je zřejmé, že více než na polaritě funkce a na jejím průběhu záleží spíše na pořadí pulzů nízké úrovně a pulzů vysoké úrovně.



**Obr 3.3 Simulace průběhů (sekvence Low-Low-Low-High) lineárních funkcí a jejich Q-Q PSA**

V případě Q-Q PSA, nezáleží kolikrát se majoritní složka v průběhu (HHH v sekvenci „HHHL“ a LLL v sekvenci „LLLH“) opakuje. Zásadní vliv má přechod mezi jednotlivými úrovněmi signálu. Tento proces je popsán v Obr 3.4. Je zde nastíněno, které přechody formují, které části grafu.

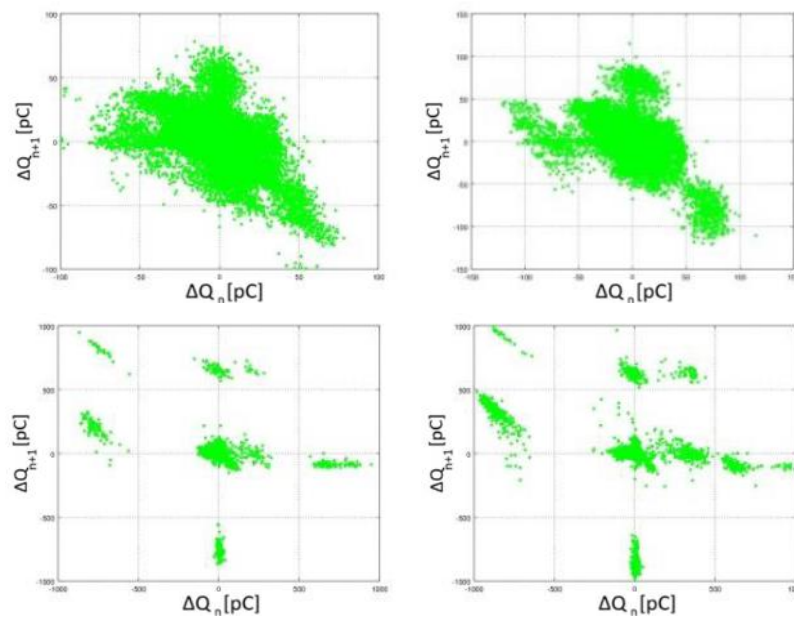


**Obr 3.4 Přechody mezi jednotlivými pulzy a proces formace Q-Q PSA**

### 3.3 Vliv rušení na Q-Q PSA

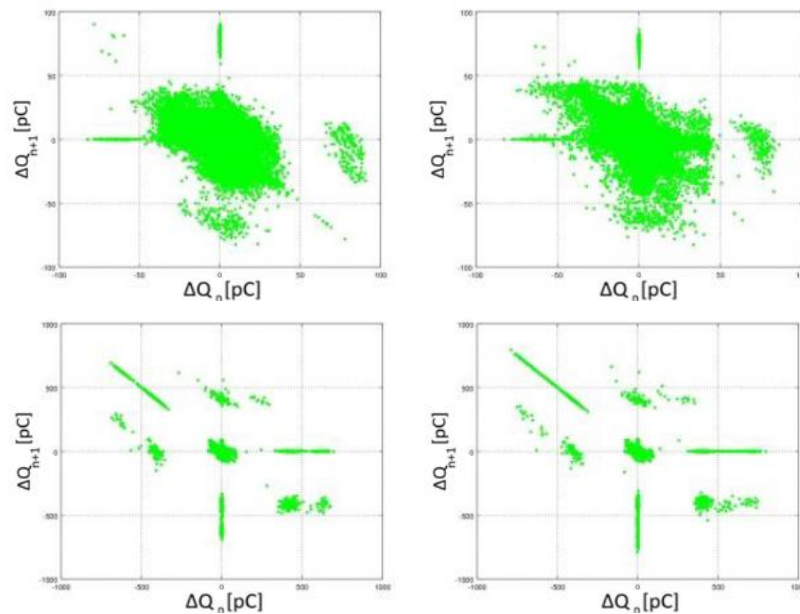
Z Obr 3.4 je zřejmé, že i nízká úroveň rušení ovlivní měření vysokou mírou nepřesnosti. Každý pulz rušení má významný vliv na výsledný tvar Q-Q PSA. Z toho vyplývá, že pro získání relevantních výsledku z Q-Q PSA grafů, je potřeba vyfiltrovat veškerý signál způsobený rušením či interferencemi. Toto tvrzení bylo experimentálně potvrzeno na měřicím seskupení deska-hrot pro střídavé koronové výboje, které mají velmi podrobně popsané chování. V ideálním případě jsou hodnoty zdánlivého náboje korony při střídavém napětí konstantní – pro tento případ by výsledné Q-Q PSA bylo tvořené pouze jedním bodem na souřadnicích [0;0],

viz Obr 3.10, horní část. Ve spodní části Obr 3.10 je znázorněna simulace reálné korony s pulzy v rozsahu od 9 do 10 pC. Na Obr 3.5 a Obr 3.6 jsou výsledné Q-Q PSA reálných měření. Měřené hodnoty byly získány na stejném měřicím seskupení deska-hrot, na stejném zdroji na stejné napět'ové hladině. Jediným rozdílem v měření bylo rozdílné nastavení měřicího aparátu, a to nastavení prahové úrovně (threshold) - Q-Q PSA grafy na Obr 3.6 jsou proto bez eliminace rušení. Pro měření při napětí 1,81 kV a 1,93 kV (Obr 3.5 a) a b)) byla nastavena filtrační úroveň na 1 pC. Pro měření při napětí 2,01 kV a 2,05 kV byla nastavena prahová úroveň na 7 pC (Obr 3.5 c) a d)). Útvar zobrazený na Obr 3.6 je tvořen prvotní fází korony (za přítomnosti pouze Trichelových pulzů). Ostatní útvary byly pravděpodobně způsobeny přítomností pulzů rušení s nízkou hodnotou zdánlivého náboje (sekvencemi Low-Low-Low-High).



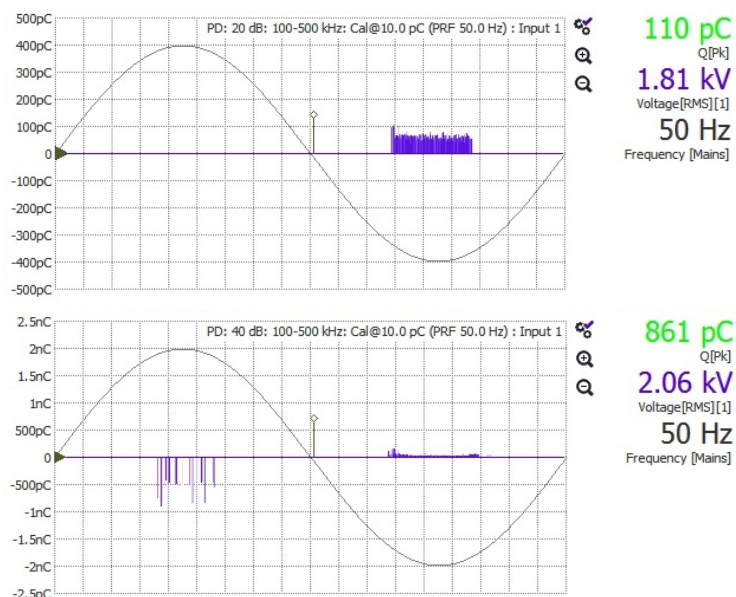
**Obr 3.5 Grafy Q-Q PSA s nastaveným filtrem – a) 1.81 kV AC, b) 1.93 kV AC, c) 2.01 kV AC, d) 2.05 kV AC)**





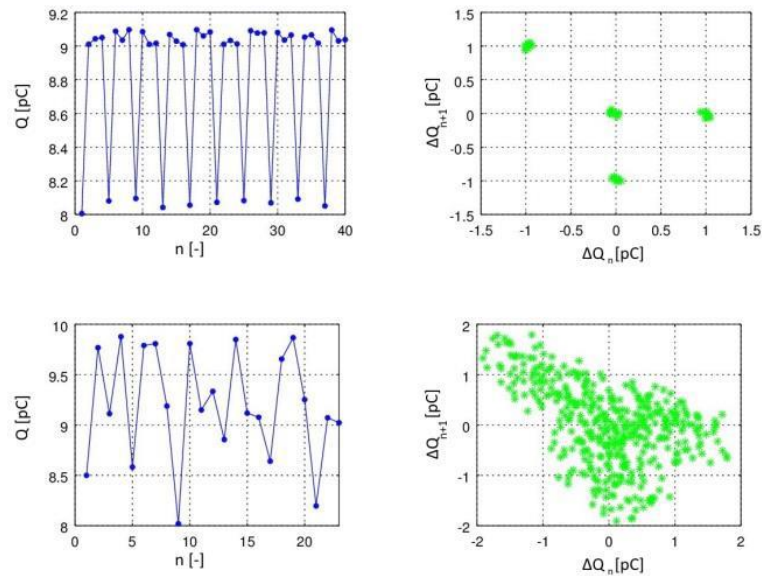
Obr 3.6 Grafy Q-Q PSA bez filtru– a) 1.81 kV AC, b) 1.93 kV AC, c) 2.01 kV AC, d) 2.05 kV AC)

Horní diagram ( $Q(\varphi)$ ) na Obr 3.7 odpovídá grafům na obrázku Obr 3.6 a) a Obr 3.6 b). - na výbojové činnosti se podílí pouze Trichelovy pulzy. Diagram ve spodní části Obr 3.7 odpovídá Q-Q PSA grafům na Obr 3.6 c) a Obr 3.6 d) - zde je zřejmá přítomnost Pre-breakdown streamerů (výboje, které značí blízkost průrazu) v pozitivní půlperiodě průběhu napětí.



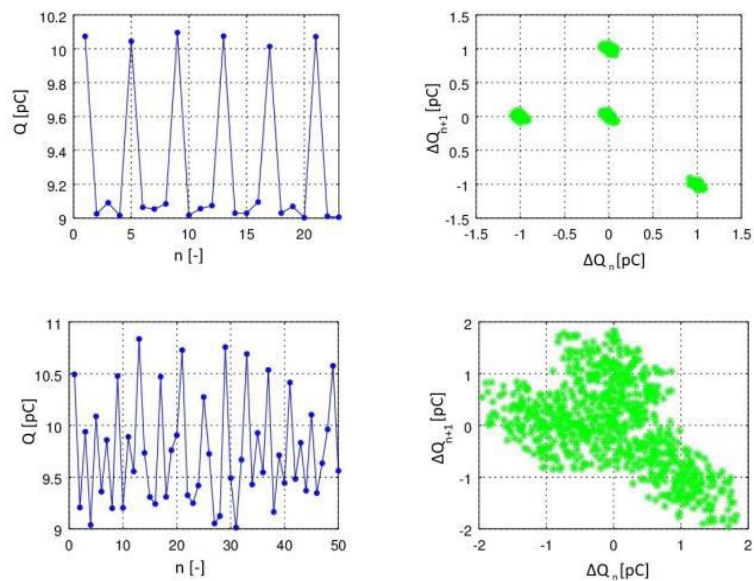
Obr 3.7 Pulzní diagramy (PRPD) koronových výbojů, horní diagram-1.81 kV – pouze Trichelovy pulzy; spodní diagram – 2.06 kV – Trichelovy pulzy a Pre-breakdown streamers

Na Obr 3.8 je simulována sekvence HHHL s přidáním rozptylem hodnot (rušení). S rostoucím rozkmitem hodnot se výsledný tvar grafu Q-Q PSA rozšiřuje. Spodní část Obr 3.8 znázorňuje typický Q-Q PSA útvar. Tento tvar „šipky“ u Q-Q PSA grafu je velmi častým výsledkem.



**Obr 3.8 Simulované průběhy (sekvence High-High-High-Low) s rozdílnými hodnotami rozkmitu a jejich Q-Q PSA**

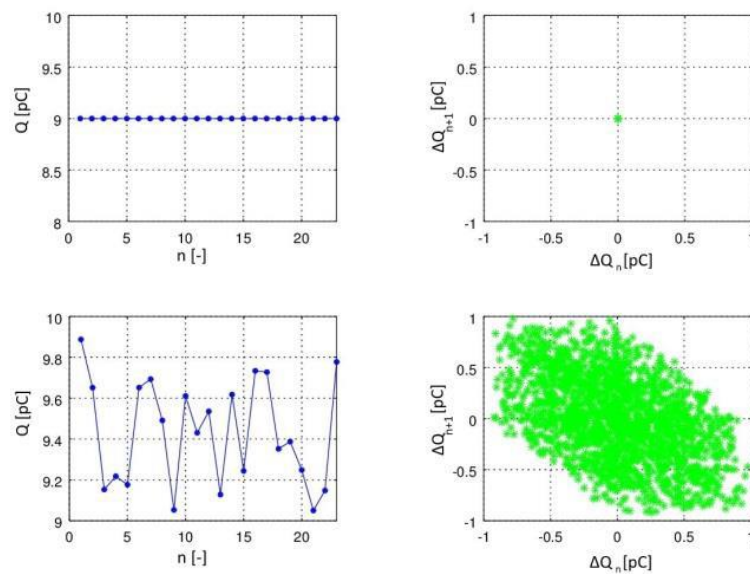
Obr 3.9 je průběh a graf Q-Q PSA pro sekvenci LLLH. Jedná se o stejný případ jako Obr 3.8, pouze výsledné obrazce mají opačnou orientaci.



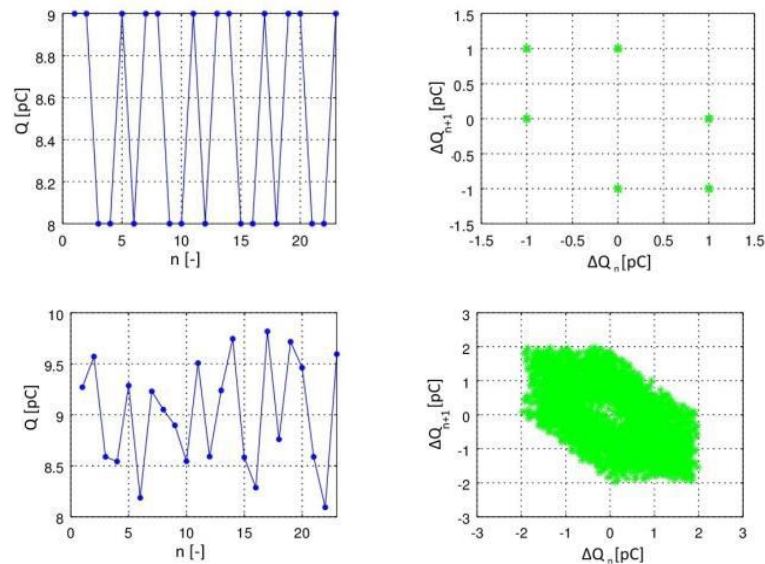
**Obr 3.9 Simulované průběhy (sekvence Low-Low-Low-High) s rozdílnými hodnotami rozkmitu a jejich Q-Q PSA**

Zvláštní případ nastane, pokud je sekvence HHHL následována sekvencí LLLH (nebo naopak). Během HHHL sekvencí vznikne graf viz Obr 3.8. Následně vznikne během sekvencí LLLH obrazec popsaný na Obr 3.9. Kombinací obou obrazců vznikne šestiúhelníkový tvar, viz Obr 3.10 až Obr 3.12.

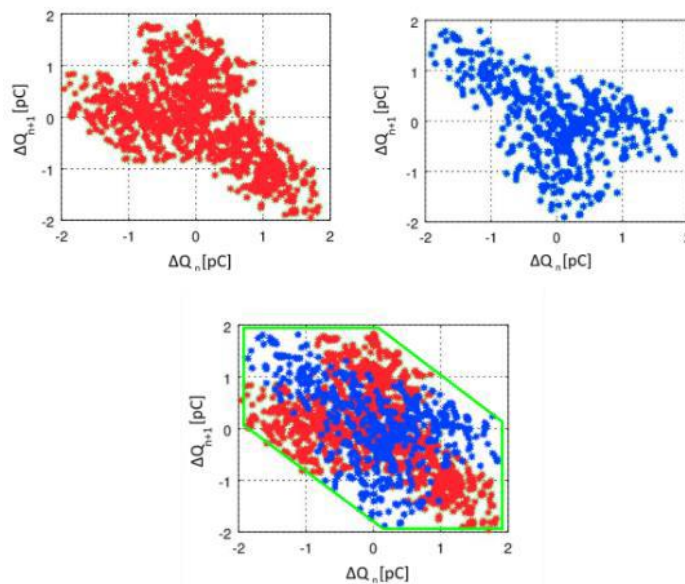
Za tohoto předpokladu je očekávaný výsledek měření reálné korony šestiúhelníkový Q-Q PSA graf. Z porovnání měření reálné korony a simulace měření korony vyplývá, že se tato teorie nepotvrdila. Ostatní měření ukázala, že výsledný Q-Q PSA graf korony může být jak šestiúhelník, tak tvar šipky obou orientací. Pokud je měření zatíženo dalším rušením či přechody mezi vyššími/nížšími úrovněmi pulzů, mohou se vytvořit další obrazce v grafu.



**Obr 3.10 Simulované průběhy ideální korony (horní) a reálné korony (spodní) a jejich Q-Q PSA**



**Obr 3.11 Simulované průběhy a grafy Q-Q PSA pro High-High-Low-Low-High-Low sekvence s konstantními hodnotami a náhodným rozkmitem**



**Obr 3.12 Vytvoření šestiúhelníkového Q-Q PSA grafu**

Analýza výše zmíněných grafů ukazuje, že rušení/interference v měření mají zásadní vliv na tvorbu Q-Q PSA grafů.

### 3.4 Simulace Q-t PSA grafů

Algoritmus Q-t PSA simuluje sekvenci osmi pulzů částečných výbojů, která je opakována tolikrát, aby vytvořila zřetelný obrazec ve výsledném grafu. Osm pulzů bylo zvoleno jako kompromis mezi možnostmi vytvářet komplexní obrazce a složitostí zadávání dat. Algoritmus umožňuje určit jednotlivé úrovně osmi pulzů a časovou prodlevu mezi nimi. Pro

dosažení optimálního výsledku (ne příliš hustý ani řídký výskyt bodů) je možné upravit počet opakování sekvence. Simulace byla vytvořena za účelem napodobit Q-t PSA vytvořená z dat získaných při reálných měření částečných výbojů a jejich validaci.

```

%time generation
step1=5 % 1st step between pulses [ms]
step2=1 % 2nd step between pulses [ms]
step3=1 % 3rd step between pulses [ms]
step4=1 % 4th step between pulses [ms]
step5=5 % 5th step between pulses [ms]
step6=1 % 6th step between pulses [ms]
step7=1 % 7th step between pulses [ms]
step8=1 % 8th step between pulses [ms]

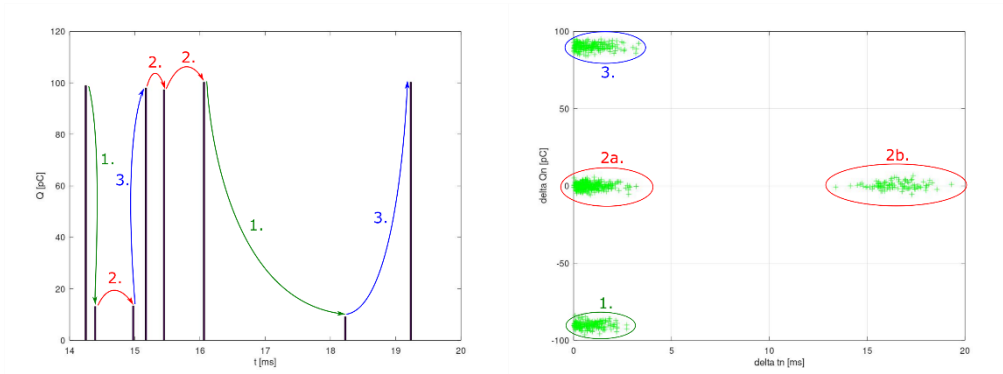
%discharge generation
val1=100 % 1st value of time, [pQ]
val2=100 % 2nd value of time, [pQ]
val3=100 % 3rd value of time, [pQ]
val4=100 % 4th value of time, [pQ]
val5=100 % 5th value of time, [pQ]
val6=100 % 6th value of time, [pQ]
val7=100 % 7th value of time, [pQ]
val8=100 % 8th value of time, [pQ]

coefT=2% Coeficient of time randomness
coefD=3% Coeficient of discharge randomness (noise level)
j=5000 % number of repetitions

```

**Obr 3.13 Příklad vstupních data simulace**

Obr 3.14 naznačuje proces tvoření jednotlivých klastrů. Z grafů je zřejmé, že přechod mezi jednotlivými pulzy má větší význam než přesná hodnota náboje daného pulzu či počet opakování pulzu dané hodnoty. Přechod mezi pulzy vysoké a nízké úrovně náboje vytváří v Q-t PSA klastry v záporné části osy  $\Delta Q_n$  (Obr 3.14, zelená, číslo 1). Přechod mezi pulzy o přibližně stejné úrovni náboje vytváří v Q-t PSA klastry na ose  $\Delta Q_n$  a jejím okolí (Obr 3.14, červená, číslo 2, 2a. a 2b.). Přechod mezi pulzy nízké a vysoké úrovně náboje vytváří v Q-t PSA klastry v kladné části osy  $\Delta Q_n$  (Obr 3.14, modrá, číslo 3). Tento mechanismus funguje analogickým způsobem v případě časové domény. Časová prodleva mezi dvěma po sobě jdoucími pulzy podobné hodnoty náboje vytváří posun klastru po ose x ( $\Delta t_n$ ). V tomto případě byly simulovány pouze 2 časové prodlevy mezi pulzy – krátké, v rozmezí hodnot od  $\approx 0$  ms do  $\approx 4$  ms, jsou reprezentovány klastry 1, 2a a 3 (Obr 3.14) a dlouhé, v rozmezí hodnot od  $\approx 14$  ms do  $\approx 20$  ms jsou reprezentovány klastrem 2b (Obr 3.14).



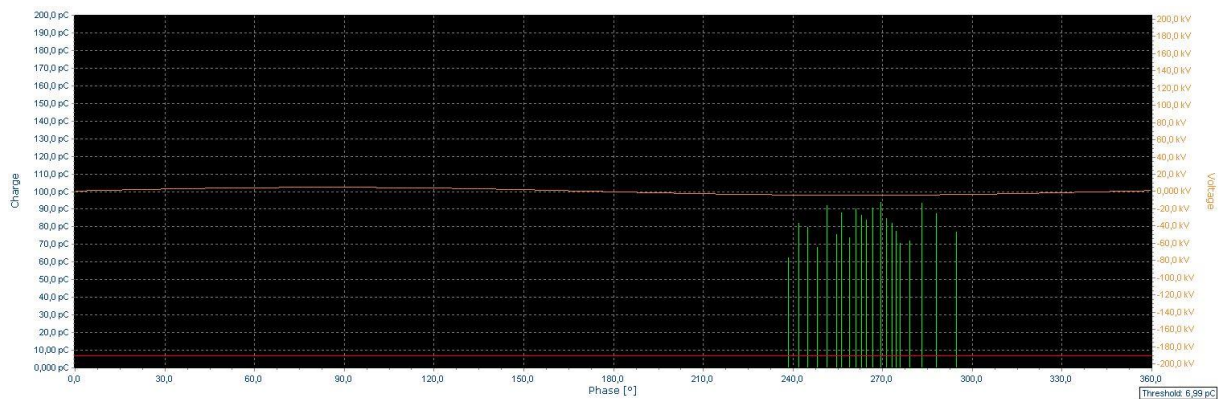
**Obr 3.14 Pulzní diagram s přechody mezi pulzy a formování Q-t PSA u simulovaných výbojů – sekvence pulzů o vysokých a nízkých úrovních náboje**



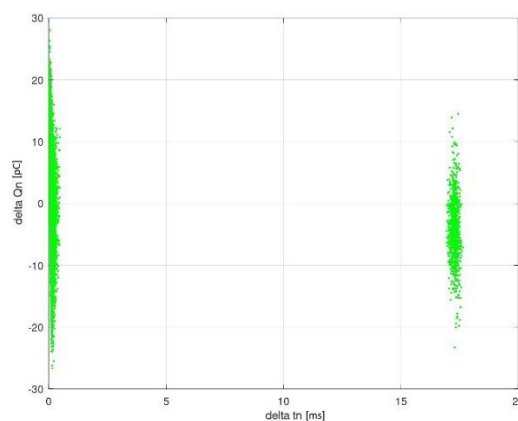
### 3.4.1 Korona

Z experimentů je patrné, že koronové výboje při střídavém napětí (pouze Trichelovy pulzy) mají téměř konstantní úroveň zdánlivého náboje [73]. Z toho vyplývá, že  $\Delta Q_n$  bude ve velmi malém intervalu (kvůli malým odchylkám náboje po sobě jdoucích pulzů). Z Obr 3.16 je patrné, že časová prodleva mezi jednotlivými pulzy se pohybuje v rozsahu hodnot desetín milisekund a dále v rozmezí 17 a 18 ms.

Nejjednodušším případem je počáteční fáze AC korony, kde jsou přítomny pouze Trichelovy pulzy (Obr 3.15 a Obr 3.16). Trichelovy pulzy se objevují v okolí maxima záporné půlperiody v pásmu, které se s rostoucím napětím rozšiřuje.

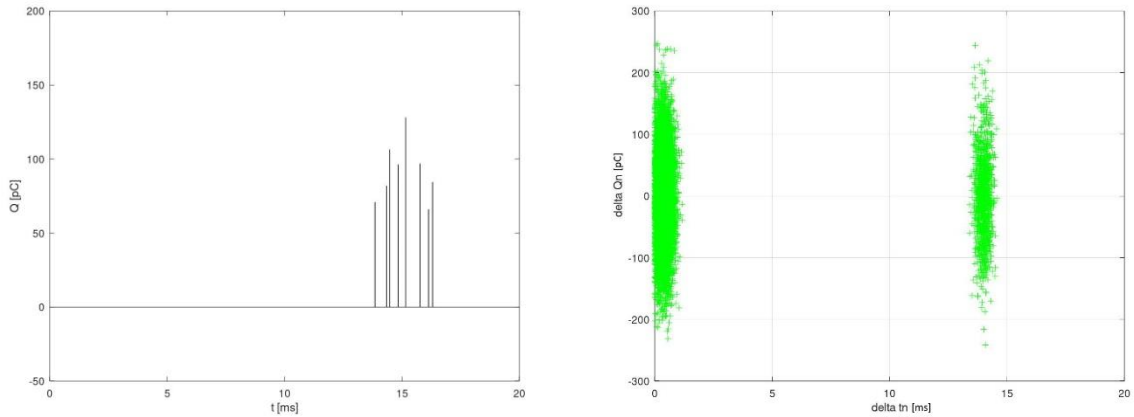


Obr 3.15 Pulzní diagram měřené AC korony (3,4 kV)



Obr 3.16 Q-t PSA měřené AC korony (3,4 kV)

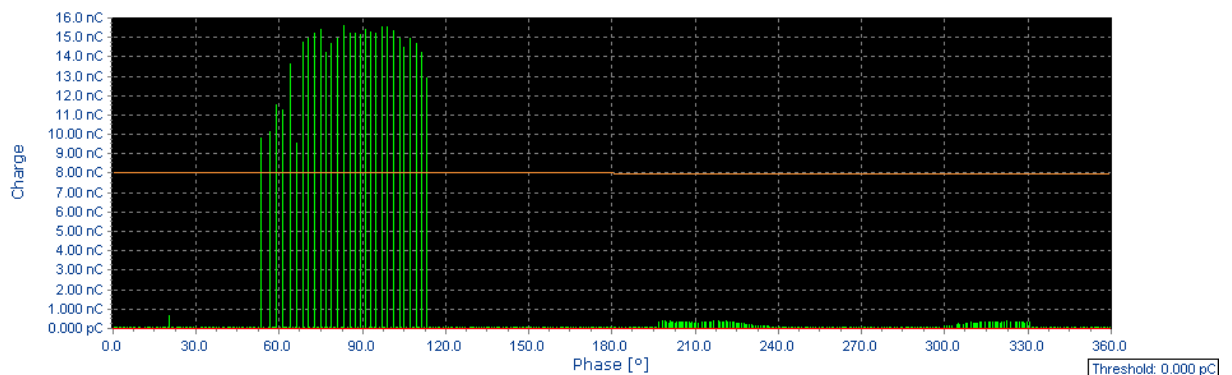
Na Obr 3.15 a Obr 3.16 je vyobrazen pulzní diagram a Q-t PSA měřené AC korony při střídavém napětí v počátečním stádiu. Levý Q-t PSA kluster v okolí  $\Delta t_n=0$  ms je vytvořen přechodem mezi Trichelovými pulzy v negativní části půlperiody napětí (mezi 13. a 17. milisekundou). Pravý Q-t PSA kluster je tvořen přechodem mezi posledním pulzem periody a prvním pulzem periody následující (časová prodleva okolo 14 ms).



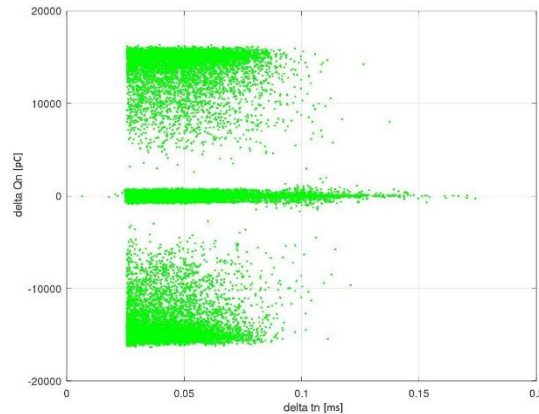
**Obr 3.17 Pulzní diagram a Q-t PSA simulované AC korony**

Simulace korony na Obr 3.17 potvrzuje chování reálných vnějších částečných výbojů. Vstupem do simulace byly pulzy jedné úrovně náboje s rozdílnými časovými prodlevami. Tyto hodnoty byly doplněny o náhodné odchylky tak, aby více napodobovaly reálné měření. Při tvorbě Q-t PSA vznikly 2 klastry podobného tvaru ve stejném pásmu  $\Delta Q_n$  s rozdílnou časovou prodlevou (okolo  $\Delta t_n=0$  ms a  $\Delta t_n=14$  ms) podobně jako v případě zpracování měřených hodnot (okolo  $\Delta t_n=0$  ms a  $\Delta t_n=16$  m). Rozdílné hodnoty náboje  $\Delta Q_n$  v simulaci a měření jsou způsobené vstupními hodnotami. Nicméně neovlivňují výslednou pozici klastrů ani jejich tvar.

Pokud testovací napětí přesáhne určitou mez začnou se objevovat pre-breakdown streamers v kladné půlperiodě. Přítomnost pre-breakdown streamers předznamenávají pravděpodobnost průrazu. Pulzní diagram a Q-t PSA měřené AC korony s pre-breakdown streamers jsou ukázány v Obr 3.18 a Obr 3.19.

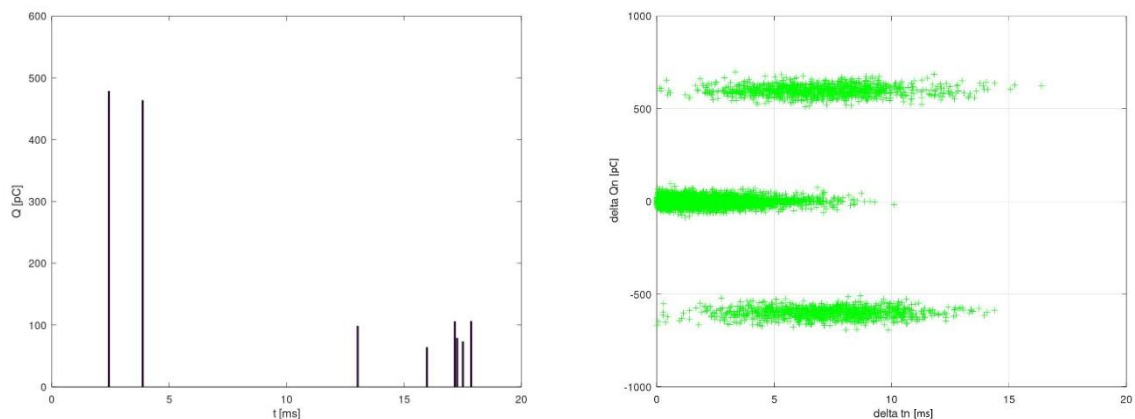


**Obr 3.18 Pulzní diagram měřené AC korony s pre-breakdown streamers (6,5 kV)**



**Obr 3.19 Q-t PSA měřené AC korony s pre-breakdown streamers (6,5 kV)**

Pulzní diagram a Q-t PSA na Obr 3.18 a Obr 3.19 vyobrazují korunu při střídavém napětí ve stádiu před průrazem. Q-t PSA se skládá ze 3 klastrů. Prostřední klastr, okolo  $\Delta Q_n=0$  pC, je vytvořen přechody mezi jednotlivými Trichelovými pulzy v negativní části půlperrody (mezi 10. a 18. ms) a dále přechody mezi jednotlivými pre-breakdown streamers (mezi 3. a 6. ms perrody). Horní Q-t PSA klastr je vytvořen přechody mezi posledním Trichelovým pulzem perrody a prvním pre-breakdown streamer v periodě další (přechod mezi pulzem nízké a vysoké hodnoty). Spodní Q-t PSA klastr je vytvořen přechodem mezi posledním pre-breakdown streamer a prvním Trichelovým pulzem (přechod mezi pulzem vysoké a nízké hodnoty). Všechny klastry se vyskytují v úzkém pásmu  $\Delta t$ , kvůli vysokému opakovacímu kmitočtu impulzů a šumu na pozadí. Horní a spodní klastry se pohybují v pásmu  $\Delta t=0,25-0,1$  ms. Prostřední klastr je v pásmu  $\Delta t=0,025-0,15$  ms. Odstup hodnot v mezích  $\Delta t=0-0,25$  ms je způsoben rozlišovací schopností měřících zařízení.



**Obr 3.20 Pulzní diagram a Q-t PSA simulované AC korony s pre-breakdown streamers**

Simulace korony s pre-breakdown streamers na Obr 3.20 ukazuje chování ideálního měření – s nízkou opakovací frekvencí a dokonalou filtrací šumu. Vstupem do simulace byly

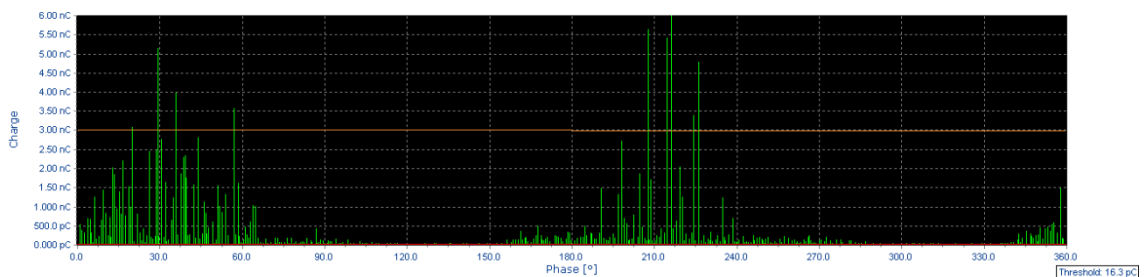


pulzy dvou úrovní náboje s rozdílnými časovými prodlevami. Tyto hodnoty byly doplněny o náhodné odchylky, aby více napodobovaly reálné měření. Simulované Q-t PSA má podobnou strukturu a tvar klastrů jako v případě naměřených hodnot. Odlišnosti jsou způsobeny absencí rušení a rozdílnou opakovací frekvencí pulzů. Rozdílné hodnoty náboje  $\Delta Q_n$  v simulaci a měření jsou způsobené vstupními hodnotami. Nicméně neovlivňují výslednou pozici klastrů ani jejich tvar.

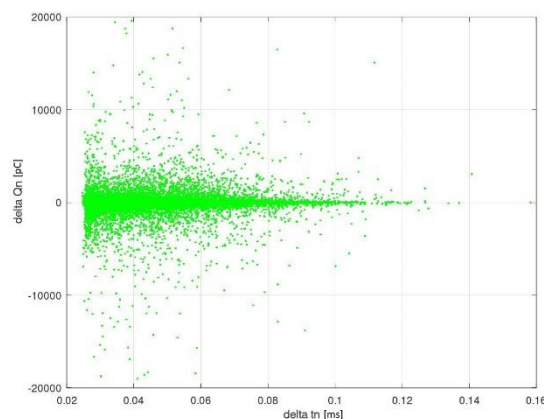
### 3.4.2 Povrchové výboje

Povrchová výbojová činnost začíná pulzy nízké amplitudy a malé opakovací frekvence. S rostoucím napětím roste i četnost pulzů a jejich amplituda až do chvíle, kdy napětí zdroje zapříčiní přeskok po povrchu izolace.

Střídavé povrchové výboje jsou specifické trojúhelníkovým tvarem pulzního diagramu, viz Obr 3.21. Tyto trojúhelníky mají vrchol v místě, kde napětí zdroje dosahuje maximálních hodnot v obou polovinách půlperiody. Pulzy nižších hodnot dosahují větší četnosti a naopak.



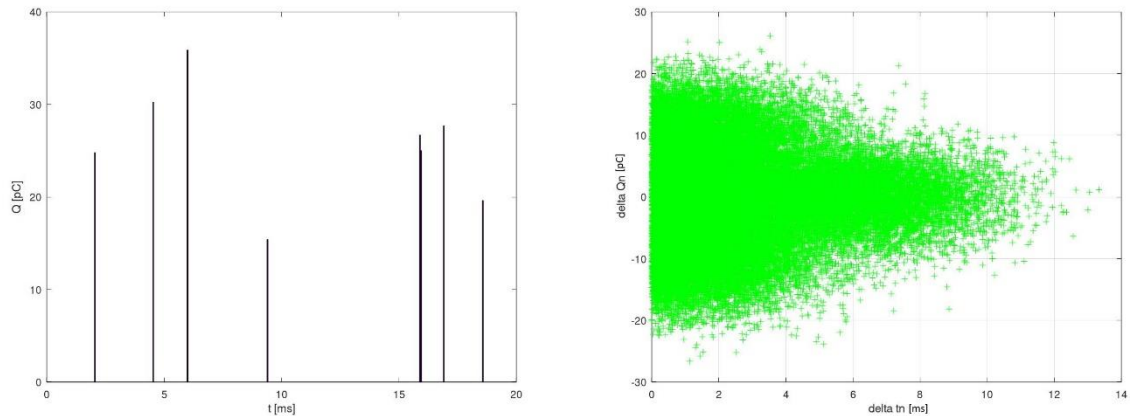
Obr 3.21 Pulzní diagram měřených AC povrchových výbojů (4 kV)



Obr 3.22 Q-t PSA měřených AC povrchových výbojů (4 kV)

Pulzní diagram a Q-t PSA zobrazeny na Obr 3.21 a Obr 3.22 znázorňují pozdější fázi střídavých povrchových výbojů při střídavém napětí. Jediný Q-t PSA klastr je vytvořen okolo

osy  $\Delta Q_n=0$  pC (od  $\Delta t_n=0,025$  ms to  $\Delta t_n=0,14$  ms) přechody mezi pulzy s malou odchylkou amplitud. Rozptýlené body nad hlavním klastrem jsou tvořeny rozdílem nábojů u vysokých pulzů s nízkou opakovací frekvencí a četnými pulzy s nízkou hodnotou náboje. Rozptýlené body pod hlavním klastrem jsou tvořeny rozdílem nábojů u četných pulzů s nízkou hodnotou náboje a vysokých pulzů s nízkou opakovací frekvencí.

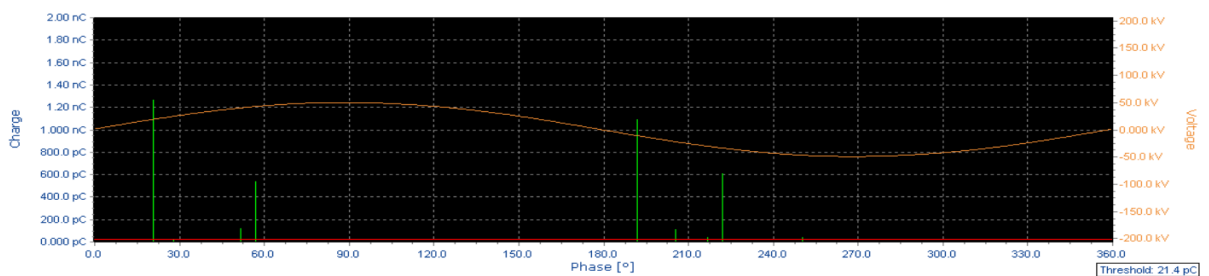


**Obr 3.23 Pulzní diagram a Q-t PSA simulovaných AC povrchových výbojů**

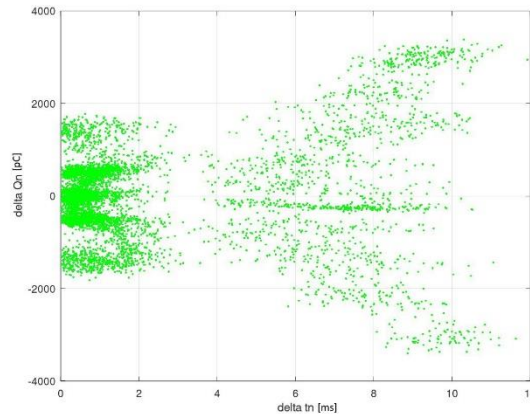
Simulace povrchových výbojů na Obr 3.23 potvrzuje chování reálného měření. Vstupem do simulace byly pulzy tří úrovní náboje s rozdílnými časovými prodlevami. Výsledkem je jeden trojúhelníkový klastr symetrický podle  $\Delta Q_n=0$  pC (od  $\Delta t_n=0$  ms do  $\Delta t_n=14$  ms) stejně, jako v případě zpracování naměřených hodnot. Rozdílné hodnoty náboje  $\Delta Q_n$  v simulaci a měření jsou způsobené vstupními hodnotami. Nicméně neovlivňují výslednou pozici klastrů ani jejich tvar.

### 3.4.3 Vnitřní výboje

Vnitřní střídavé výboje jsou velice charakteristické při metodě zobrazení PRPD – tyto „králičí uši“ (v angličtině „rabbit ears“) jsou znázorněny na Obr. 1.22. Tyto útvary jsou přítomné v kladné i záporné půlperiodě a jsou doprovázeny pulzy s mnohem menší amplitudou. S rostoucím napětím se tyto útvary napřimují až do průrazu.

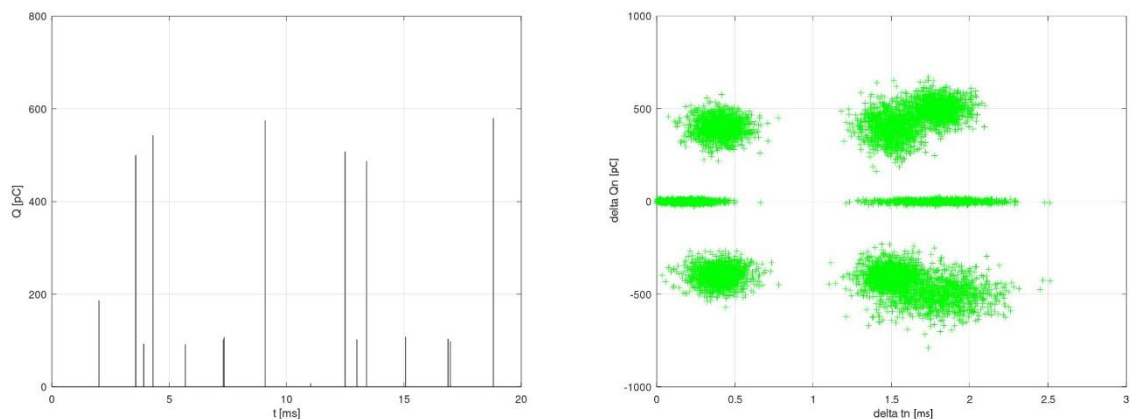


**Obr 3.24 Pulzní diagram měřených AC vnitřních výbojů (40 kV)**



**Obr 3.25 Q-t PSA měřených AC vnitřních výbojů (40 kV)**

Pulsní diagram a Q-t PSA zobrazené na Obr 3.24 a Obr 3.25 znázorňují vnitřní výbojovou činnost při střídavém napětí. Q-t PSA klastry nacházející se v rozmezí  $\Delta t_n=0-3$  ms;  $\Delta Q_n=-1000-1000$  pC a  $\Delta t_n=4-12$  ms;  $\Delta Q_n=-3500-3500$  pC mají podobný tvar (trojúhelník orientovaný doleva s centrální linií na  $\Delta Q_n=0$  pC) pouze v jiném měřítku. Menší trojúhelník je navíc lemován dvěma klastry v  $\Delta t_n=0-3$  ms;  $\Delta Q_n=\pm 1500$  pC.



**Obr 3.26 Pulsní diagram a Q-t PSA simulovaných vnitřních výbojů**

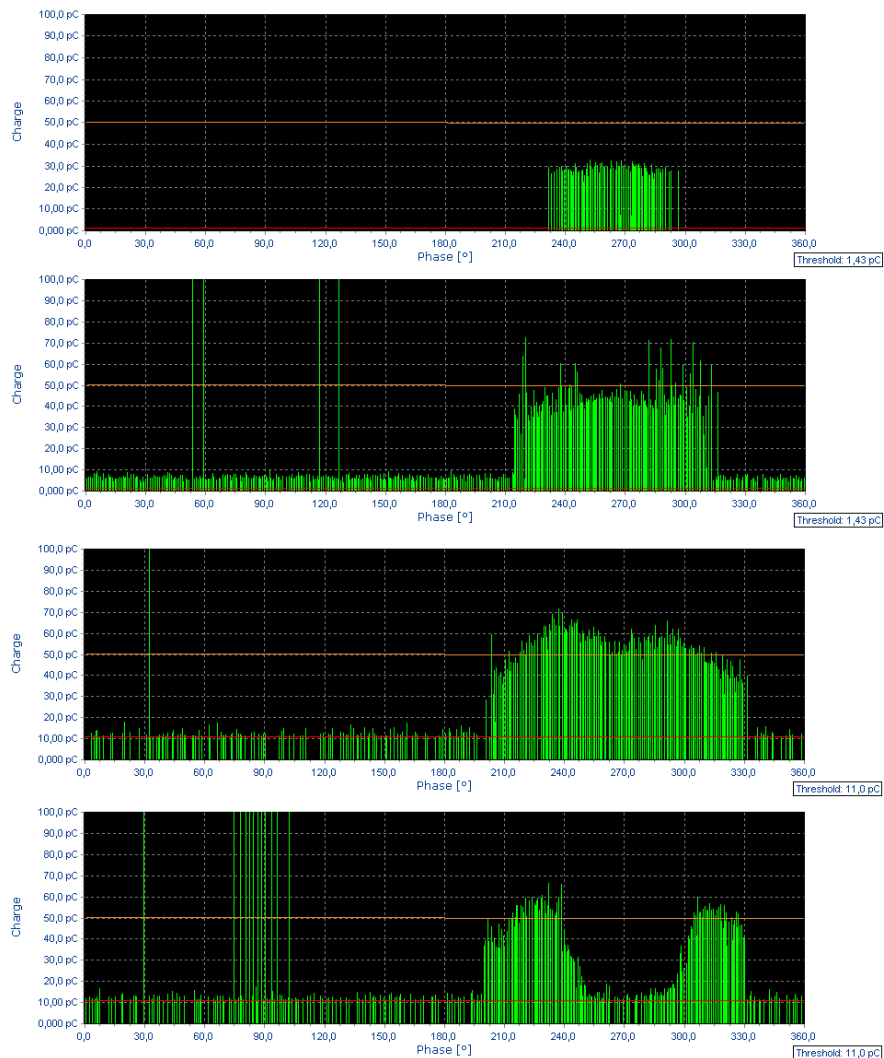
Kvůli složitosti výsledků z měřených dat byla simulace vnitřní výbojové činnosti zpracována pouze částečně. Výstupem simulace jsou dva hlavní klastry – účelem bylo alespoň zhruba napodobit dva doleva orientované trojúhelníky s centrální linií okolo  $\Delta Q_n=0$  pC. Ramena většího klastru byla vytvořena pomocí více menších klastrů plynule přecházejících do druhého. Pro úplnost simulace chybí klastry na  $\Delta t_n=0-0,6$  ms;  $\Delta Q_n=\pm 700$  pC. Ty nebyly výstupem simulace, protože algoritmus má pouze 8 vstupních proměnných, které nemohou obsáhnout takto komplexní problém.

### 3.5 Porovnání AC Q-t PSA pro různá uspořádání měřících elektrod

#### 3.5.1 Korona

Chování koronových výbojů při s rostoucím střídavém, stejnosměrném negativním a stejnosměrném pozitivním napětí je zobrazeno na Obr 3.27 - Obr 3.32.

Pulzní diagram korony při střídavém napětí 2,8 kV je zobrazena na Obr 3.27 nahoře – přítomny jsou pouze Trichelovy pulzy. Při zvýšení napětí na 4 kV se začínají objevovat pre-breakdown streamers (hodnota náboje až 1 nC). Při tomto napětí se pásmo Trichelových pulzů rozšíří a vzroste i jejich hodnota náboje. V tomto případě, pulzy pod 10 pC, mohou být považovány za šum pozadí. Při napětí 6 kV roste opakovací frekvence a náboj pre-breakdown streamerů. V případě Trichelových pulzů se navíc dále rozšiřuje i pásmo, ve kterém se vyskytují. V okolí 270 ° nastává lehký pokles výbojové aktivity. Pulzy do 20 pC mohou být považovány za šum pozadí. Úroveň napětí 6,5 kV se velice blíží průrazu. Pre-breakdown streamers dosahují hodnot 4 nC a Trichelovy pulzy jsou na stejné úrovni. Pokles výbojové aktivity v maximu záporné půlperiody je při tomto napětí je zjevný. Tento jev je způsoben velmi vysokou opakovací frekvencí Trichelových výbojů v daném pásmu, která zapříčiní zahlcení měřícího systému.

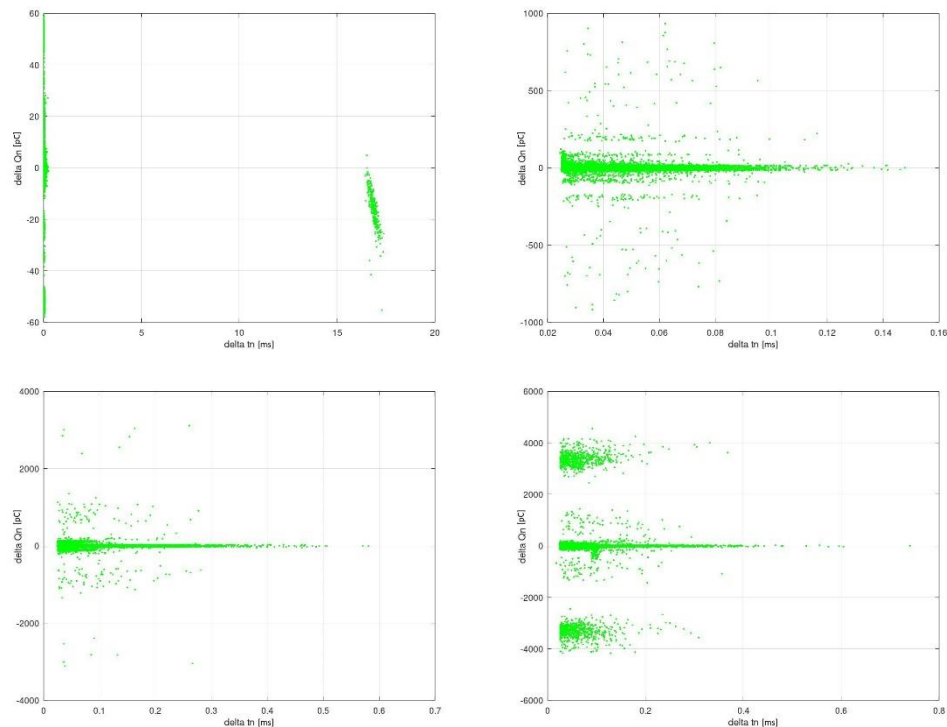


**Obr 3.27 Pulzní diagram měřené AC korony (odshora  $U=2,8$  kV;  $U=4$  kV,  $U=6$  kV,  $U=6,5$  kV)**

Q-t PSA vyobrazené na Obr 3.28 reprezentují totožné průběhy výbojové činnosti jako pulzní diagramy na Obr 3.27.

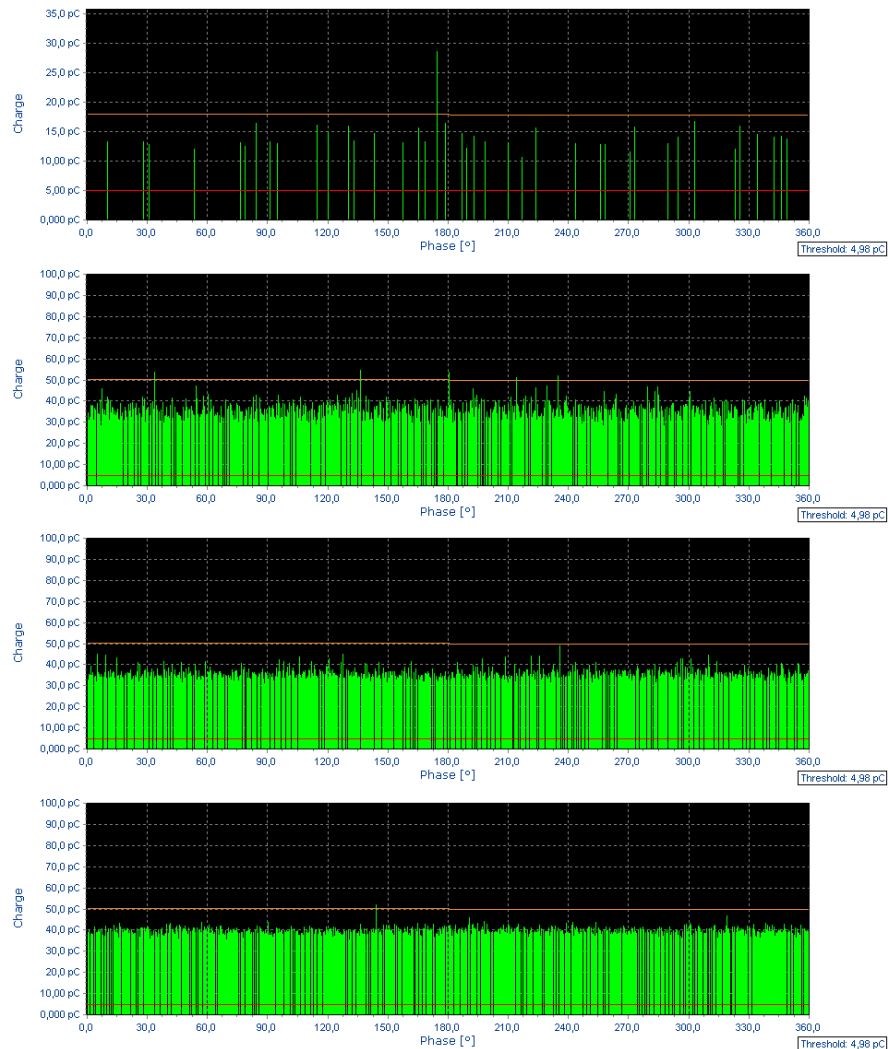
Graf pro napětí 2,8 kV se vyznačuje klastrem na souřadnicích  $\Delta t_n=17$  ms;  $\Delta Q_n=0-30$  pC, který je vytvořen přechodem mezi posledním Trichelovým pulzem a prvním Trichelovým pulzem následující periody. Rozptyl  $\Delta Q_n$  je způsoben jejich rozdílnými hodnotami. V případě 4 kV jsou patrné dvě linie bodů na souřadnicích  $\Delta t_n=0,025-0,06$ ;  $\Delta Q_n=\pm 100$  pC a další dvě linie na souřadnicích  $\Delta t_n=0,025-0,06$ ;  $\Delta Q_n=\pm 200$  pC. Tyto symetrické linie jsou vytvořeny přechodem mezi pre-breakdown streamers a Trichelovými pulzy (případně šumem). Středová linie ( $\Delta Q_n=0$  pC) je tvořena přechody mezi pulzy o téměř stejných hodnotách s různými časovými odstupy. Při napětí 6 kV nastává podobná situace jako v předchozím případě s tím rozdílem, že zmíněné linie nejsou bez přiblížení téměř viditelné. Dominující je středová linie a body rozptýlené od  $\Delta t_n=0,02$  ms do  $\Delta t_n=0,25$  ms dosahující až téměř  $\Delta Q_n=3000$  pC. Blízko

průrazu (6,5 kV) se vytvořila další symetrická dvojice klastrů přibližně kolem úrovně  $\Delta Q_n = \pm 3000$  pC od  $\Delta t_n = 0,01 - 0,2$  ms. Vznikla přechodem mezi pre-breakdown streamers a pulzy s nízkou úrovní a naopak.



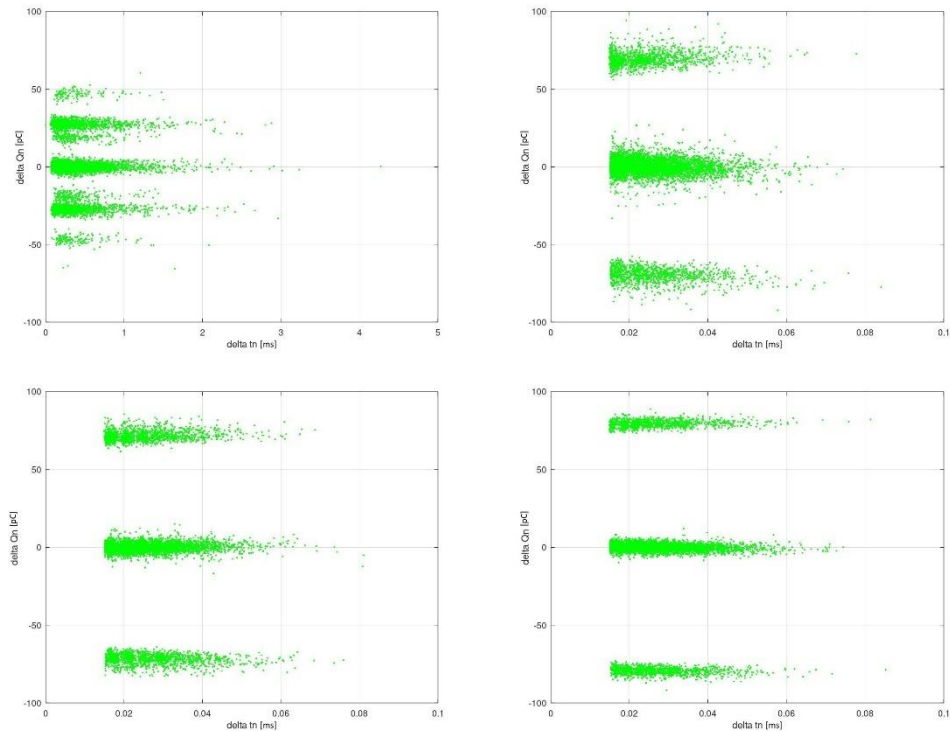
**Obr 3.28 Q-t PSA měřené AC korony (odshora vlevo U=2,8 kV; U=4 kV, U=6 kV, U=6,5 kV)**

Na Obr 3.29 jsou zobrazeny pulzní diagramy korony při DCN napětích 3,5 kV; 5 kV; 5,5 kV; a 6 kV. Při napětí 3,5 kV se hodnota náboje většiny pulzů pohybuje v rozmezí 10 až 17 pC. Při zvýšení napětí na hodnotu 5 kV se rapidně zvýšila opakovací frekvence pulzů a vzrostla také úroveň náboje na 30 až 40 pC. S dalším zvyšováním napětí se hodnota náboje pouze více přiblížila hodnotám 40 pC.



**Obr 3.29 Pulzní diagram měřené DCN korony (odshora  $U=3,5$  kV;  $U=5$  kV,  $U=5,5$  kV,  $U=6$  kV)**

PSA grafy korony změřené při DCN napětí 3,5 kV; 5 kV; 5,5 kV; a 6 kV jsou vyobrazeny na Obr 3.30. V prvním grafu jsou okolo centrálního klastru další tři dvojice symetrických linií – první v hodnotě přibližně  $\pm 15$  pC, druhá v  $\pm 25$  pC a třetí v  $\pm 50$  pC. Pulzy s největší četností (dle pulzního diagramu na Obr 3.29 se jedná o hodnoty okolo 15 pC) vytvářejí klastr okolo 0 pC a přechody na ostatní hodnoty další linie. Při napětích 5; 5,5 a 6 kV se již pulzy nižších hodnot nevyskytují, a proto mají grafu podobu centrálního klastru a jedním párem symetrických klastrů okolo hodnoty přibližně  $\pm 75$  pC. Z toho vyplývá, že při měření musejí být přítomné pulzy s hodnotami okolo 115 pC (přechod mezi pulzem o hodnotě 40 pC a 115 pC má za výsledek bod s hodnotou  $\Delta Q=75$  pC). Tyto pulzy mají velmi nízkou opakovací frekvenci, a tudíž nejsou viditelné na pulzních diagramem. S rostoucím napětím se rozkmit hodnot náboje snižuje, což zapříčiňuje zužování postranních linií na PSA grafech až do podoby zobrazené na Obr 3.30 pro 6 kV.



**Obr 3.30 Q-t PSA měřené DCN korony (odshora vlevo  $U=3,5$  kV;  $U=5$  kV,  $U=5,5$  kV,  $U=6$  kV)**

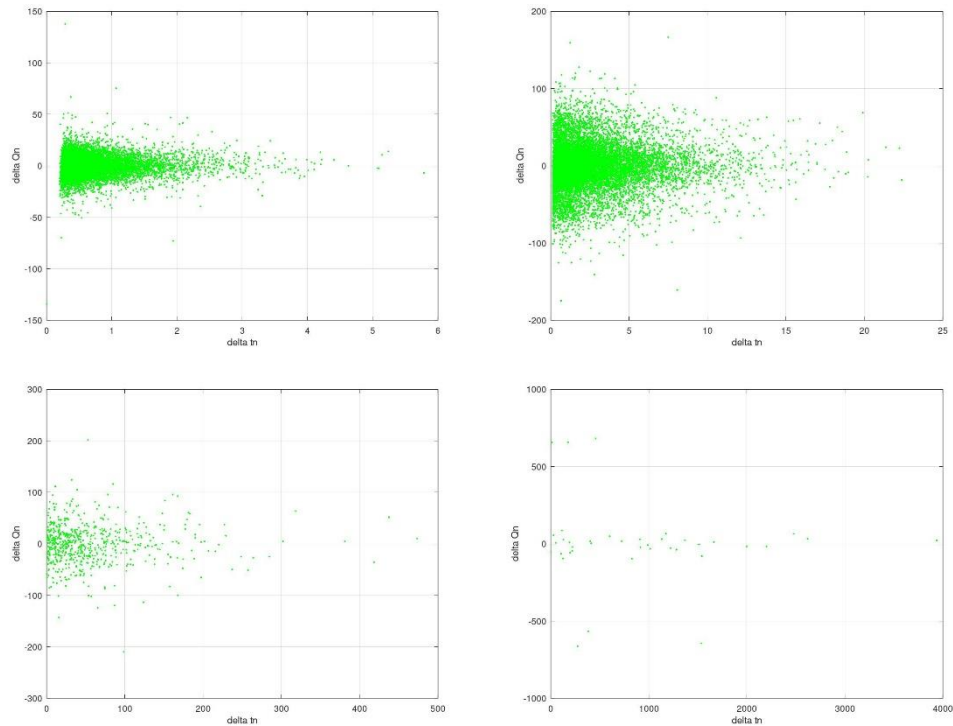
Pulzní digramy na Obr 3.31 popisují chování stejnosměrné pozitivní korony při napětích 4,5; 5,5; 6 a 6,5 kV. Z grafů vyplývá, že s rostoucím napětím klesá opakovací četnost výbojů, a naopak stoupá jejich náboj. Opakovací frekvence při 4,5 kV se pohybuje kolem 30 impulzů za 20 ms; při napětí 5,5 kV je opakovací frekvence kolem 8 impulzů za 20 ms a při napětí 6 a 6,5 kV je opakovací frekvence nižší než 1 impulz za 20 ms. Zdánlivý náboj pulzů při napětí 4,5 kV se pohybuje v hodnotách okolo 200 pC; při napětí 5,5 kV dosahuje k hodnotám 300 pC; při napětí 6 kV se úroveň náboje zvedla na 450 pC a při napětí 6,5 kV dosahuje hodnot větších než 600 pC.





**Obr 3.31 Pulzní diagram měřené DCP korony (odshora  $U=4,5$  kV;  $U=5,5$  kV,  $U=6$  kV,  $U=6,5$  kV)**

Q-t PSA diagramy na Obr 3.32 odpovídají pulzním digramům znázorněných výše. Při napětí 4,5 kV je centrální klastr vytvořen malými odchylkami náboje mezi pulzy v rozmezí 0-150 pC a s časovými rozestupy 0-6 ms. Zvýšení napětí na 5,5 kV způsobilo zvýšení rozdílů mezi pulzy od 0 do 250 pC. Stejně tak vzrostly i hodnoty časových prodlev mezi pulzy až do hodnot 25 ms. Dále se snižuje počet pulzů během měření. Tento trend s rostoucím napětím pokračuje – při napětí 6 kV dosahuje  $\Delta Q_n$  hodnot až  $\pm 1000$  pC a  $\Delta t_n$  až 500 ms. Při napětí 6,5 kV tyto veličiny nabývají hodnot až  $\pm 1000$  pC a 4000 ms.

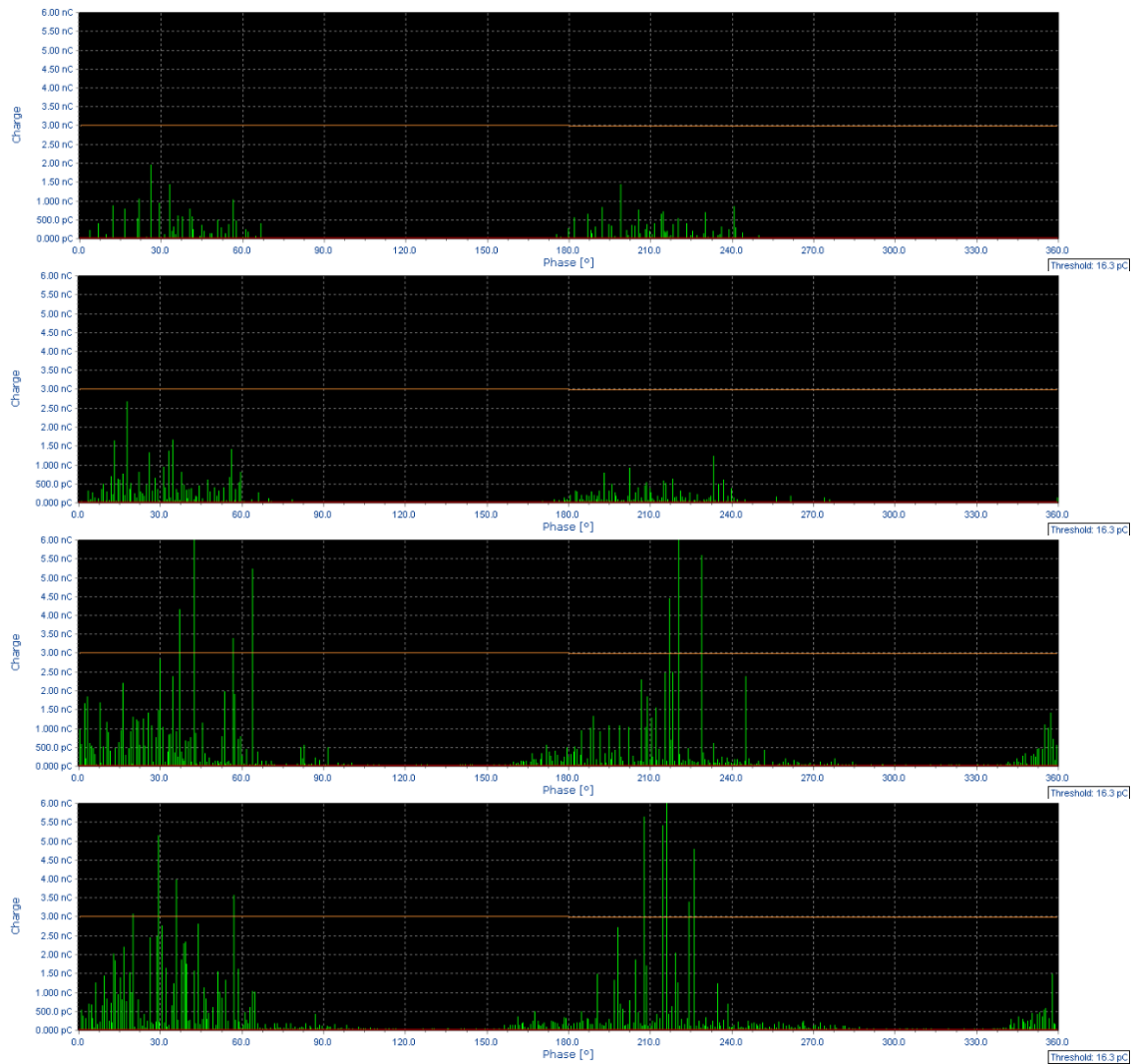


**Obr 3.32 Q-t PSA měřené DCP korony (odshora vlevo  $U=4,5$  kV;  $U=5,5$  kV,  $U=6$  kV,  $U=6,5$  kV)**

### 3.5.2 Povrchové výboje

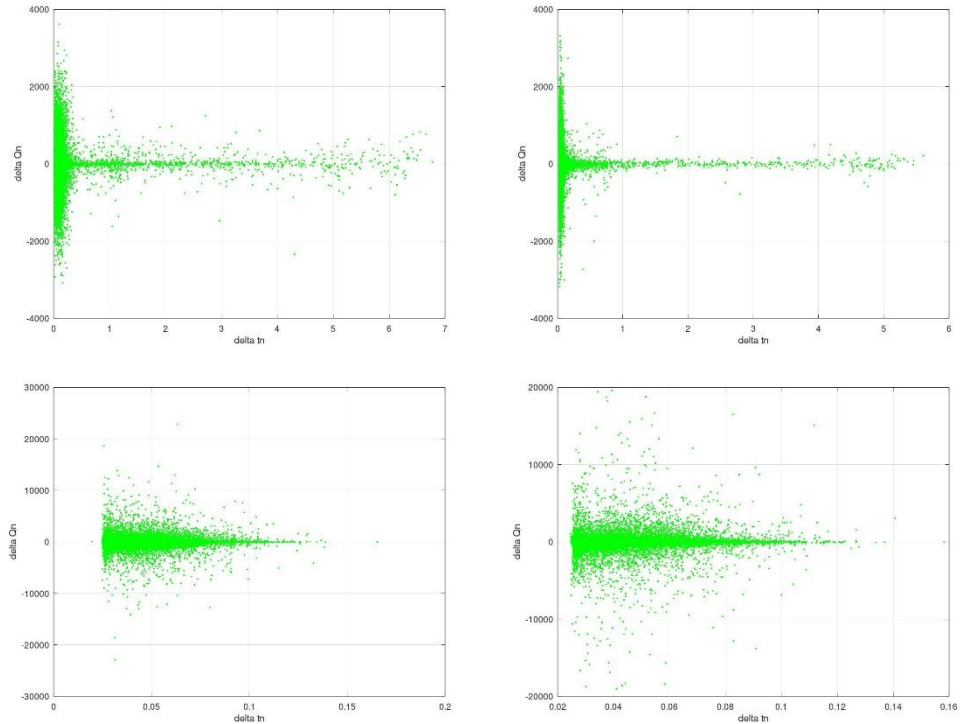
Chování povrchových výbojů při rostoucím střídavém, stejnosměrném negativním a stejnosměrném pozitivním je zobrazeno na Obr 3.33 - Obr 3.38. Pro střídavé povrchové výboje jsou charakteristické průběhy ve tvaru dvou trojúhelníků v každé půlperiodě sinusového průběhu napětí.

Pulzní diagram povrchových výbojů při střídavém napětí jsou ukázány na Obr 3.33. V tomto případě se výbojová činnost vyvíjí dle předpokladů – s rostoucím napětím roste i hodnota náboje jednotlivých pulzů (z maximálních hodnot náboje 3,97 nC na 35,3 nC), zároveň vzrůstá i opakovací frekvence (z průměrných 5,21 tisíců pulzů za sekundu na 21,5 tisíců pulzů za sekundu) a rozšiřuje se pásmo výskytu částečných výbojů až do okamžiku průrazu.



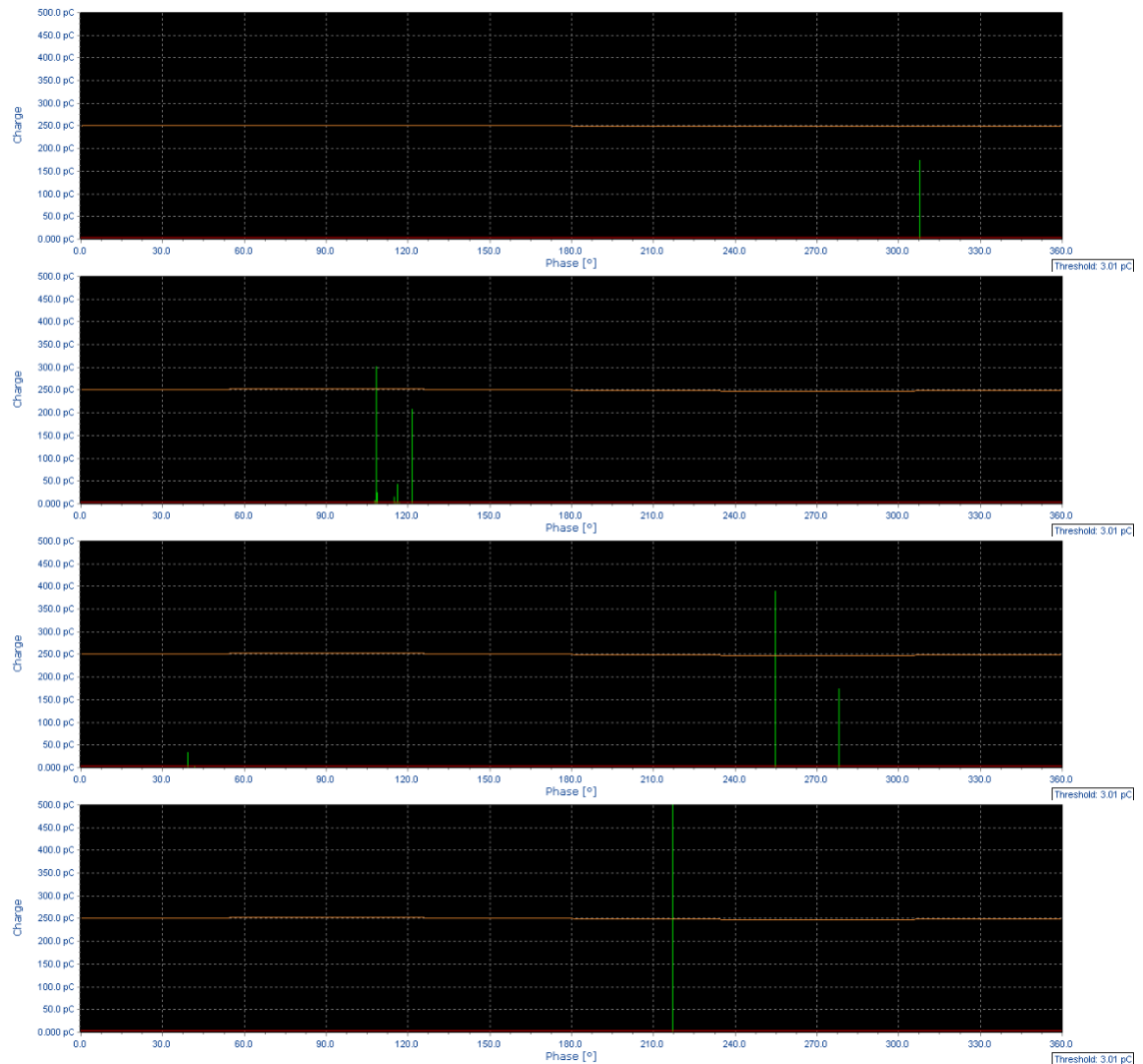
**Obr 3.33 Pulzní diagram měřených AC povrchových výbojů (odshora  $U=1,7$  kV;  $U=2,3$  kV,  $U=3,5$  kV,  $U=4$  kV)**

Z Obr 3.34 je patrné, že při napětí 1,7 kV a 2,5 kV jsou hodnoty rozdílů náboje po sobě jdoucích pulzů dosahují hodnot  $\pm 4000$  pC s maximální časovou prodlevou 7 ms. Na PSA grafu pro 2,7 kV je patrné zvýšení opakovací frekvence výskytu pulzu (pokles maximálních hodnot  $\Delta t_n$  na 6 ms a zúžení pásma s nejhustším výskytem pulzů v blízkosti hodnoty  $\Delta t_n=0$  ms). Při napětí 3,5 kV došlo k rapidnímu poklesu hodnot  $\Delta t_n$  na 0,2 ms a nárůstu hodnot  $\Delta Q_n$  na 22000 pC. Při dalším zvýšení napětí na 4 kV vývoj výbojové činnosti pokračoval ve zmíněném trendu – snížily se hodnoty  $\Delta t_n$  a zvýšila se četnost bodů s vyššími hodnotami  $\Delta Q_n$ .



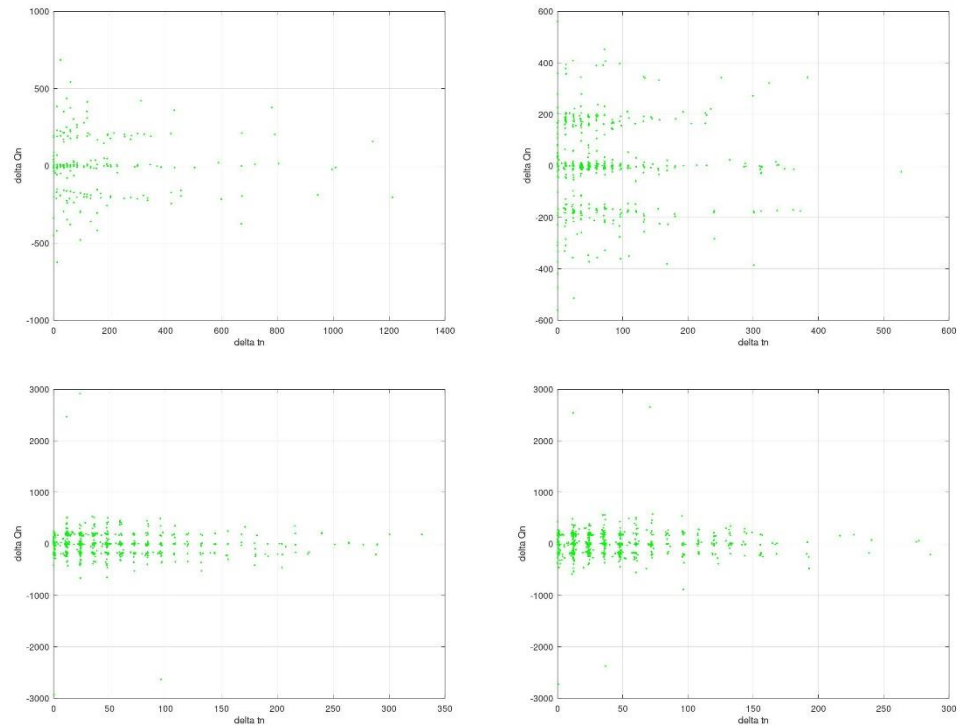
**Obr 3.34 Q-t PSA měřených AC povrchových výbojů (odshora vlevo  $U=1,7$  kV;  $U=2,3$  kV,  $U=3,5$  kV,  $U=4$  kV)**

Pulzní diagramy klouzavých výbojů při napětí DCN 12, 17, 19 a 21 kV na Obr 3.35 mají kvůli nízké opakovací frekvenci malou výpovědní hodnotu. Z průběhu vyplývá, že s rostoucím napětím roste i náboj jednotlivých pulzů a jejich opakovací frekvence. Maximální náboj pulzů byl při napětí 12 kV 628 pC; při 17 kV 557 pC; při 19 pC 2,92 nC a při 21 kV 2,73 nC. Průměrná opakovací frekvence byla při 12 kV 3,8 pulzů za sekundu; při 17 kV 8,5 pulzů za sekundu; při 19 kV 11,81 pulzů za sekundu a při 21 kV 13,7 pulzů za sekundu.



**Obr 3.35 Pulzní diagram měřených DCN povrchových výbojů (odshora  $U=12$  kV;  $U=17$  kV,  $U=19$  kV,  $U=21$  kV)**

Body PSA grafů na Obr 3.36 jsou v časové ose formovány do shluků přibližně každých 12,5 ms. Tento jev může být způsoben zvlněním stejnosměrného napětí, které je vyvoláno nedokonalou filtrací na výstupní straně vysokonapět'ového zdroje. Nabíjení a vybíjení filtračního kondenzátoru způsobuje gradient napětí, který vyvolává výbojovou aktivitu. Příčina shlukování bodů i v rovině  $\Delta Q_n$  s krokem přibližně 200 pC nebyla objasněna a bude předmětem dalšího výzkumu. Z grafů dále vyplývá, že s rostoucím napětím se zkracuje časová prodleva u hodnot  $\Delta t_n$  1200 ms až na hodnoty 300 ms. Hodnoty  $\Delta Q_n$ , až na výjimky v řádech jednotek, zůstávají po celý rozsah napětí v rozmezí  $\pm 500$  pC.



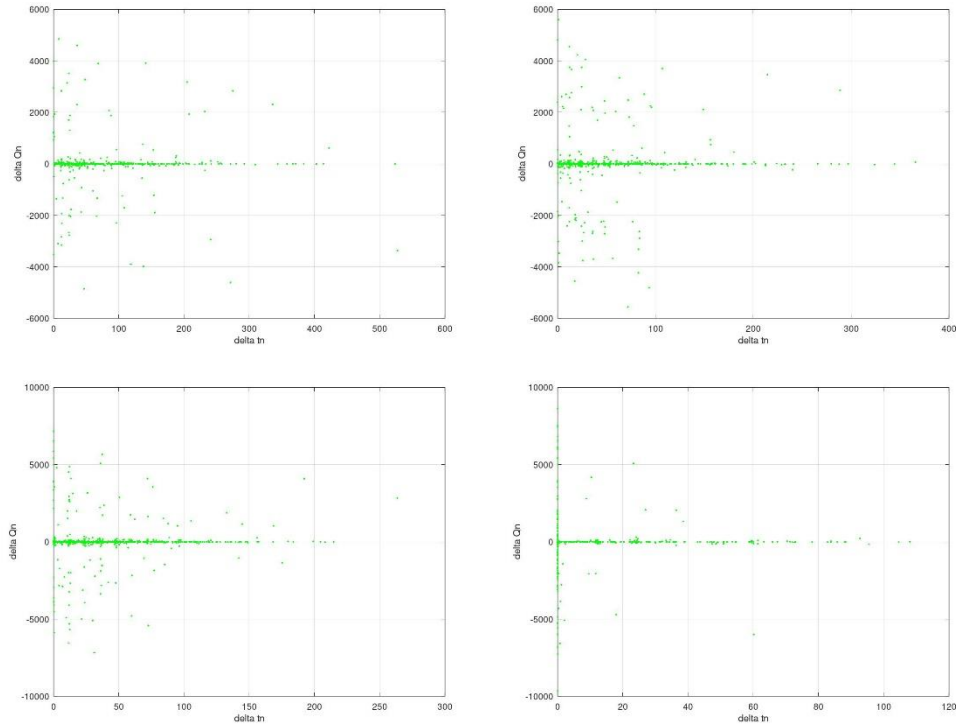
**Obr 3.36 Q-t PSA měřených DCN povrchových výbojů (odshora vlevo U=12 kV; U=17 kV, U=19 kV, U=21 kV)**

Obr 3.37 popisuje chování klouzavých výbojů při stejnosměrném pozitivním napětí. Při napětích 13, 16 a 19 kV se chování téměř nemění – došlo k nárůstu náboje jednotlivých pulzů z maximálních 4,85 nC na 7,16 nC a k nárůstu průměrného počtu z 7,6 na 16,3 pulzů za sekundu. V případě 22 kV tyto hodnoty vzrostly na 35,3 nC a průměrně 20,1 pulzů za vteřinu.



**Obr 3.37 Pulzní diagram měřených DCP povrchových výbojů (odshora  $U=13$  kV;  $U=16$  kV,  $U=19$  kV,  $U=22$  kV)**

Na Obr 3.38 jsou PSA grafy stejnosměrného pozitivního napětí úrovní 13, 16, 19 a 22 kV. Grafy pro 13 a 16 kV vykazují téměř totožné chování částečných výbojů –  $\Delta Q_n$  je v rozmezí  $\pm 6000$  pC a většina bodů je intervalu  $\Delta t_n$  0 až 400 ms, u napětí 13 kV 5 bodů překročilo hodnotu  $\Delta t_n$  400. U napětí 19 kV hodnoty  $\Delta Q_n$  dosahovaly  $\pm 10$  nC, stejně tak jako v případě 22 kV. Tyto napěťové hladiny jsou rozdílné v rozsahu  $\Delta t_n$  – u 19 kV bylo  $\Delta t_n$  0-270 ms, u 22 kV 0-110 ms. U napětí 22 kV je značné množství bodů v blízkosti  $\Delta t_n = 0$ , což vypovídá o tom, že tyto pulzy následovaly v krátkém sledu po sobě. Na základě dosavadních znalostí, jsou tyto body vyvolané rušením na pozadí.



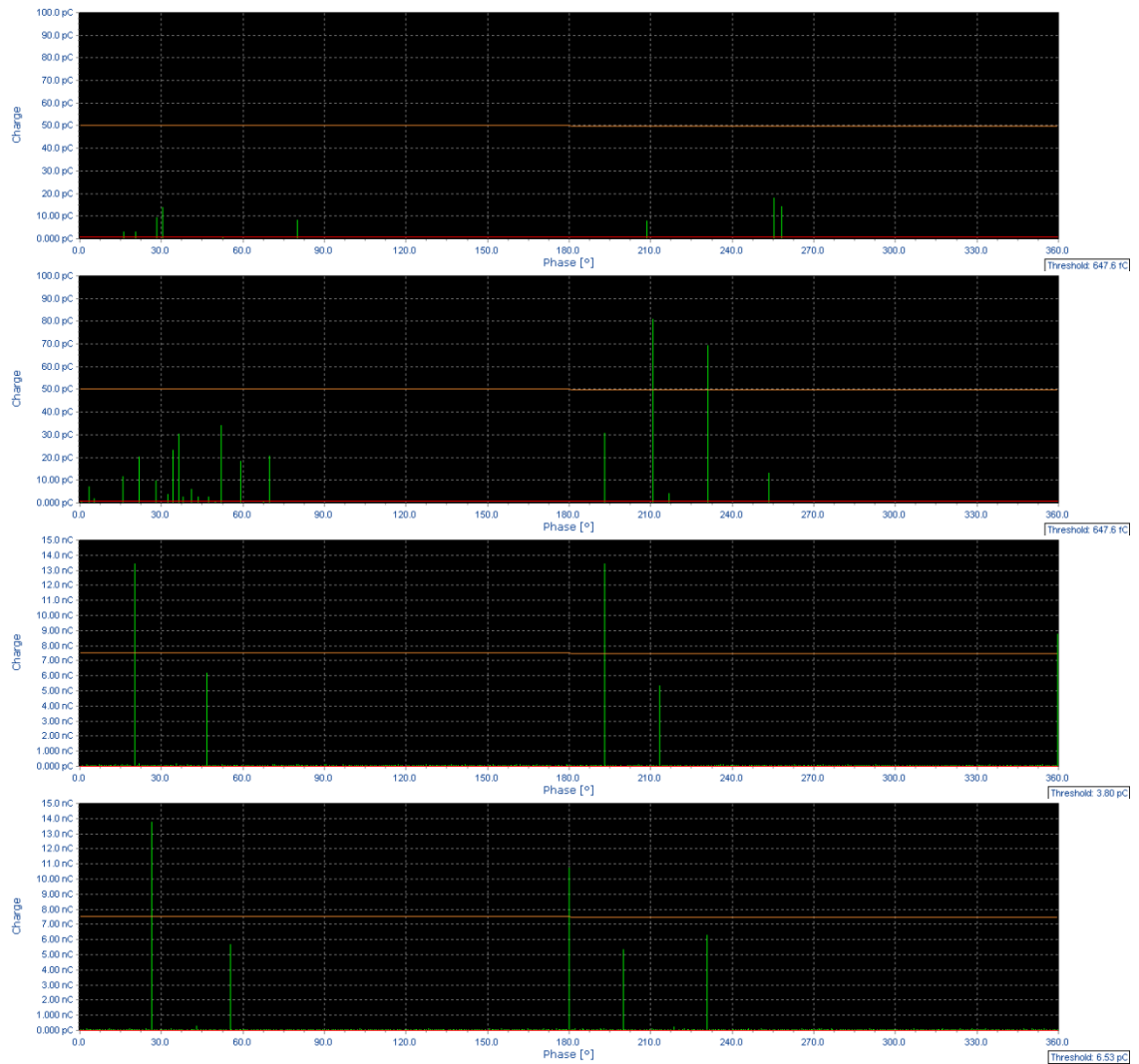
**Obr 3.38 Q-t PSA měřených DCP povrchových výbojů (odshora vlevo U=13 kV; U=16 kV, U=19 kV, U=22 kV)**

### 3.5.3 Vnitřní výboje

Vnitřní částečné výboje způsobené vlivem střídavého, stejnosměrného negativního a stejnosměrného pozitivního napětí jsou vyobrazeny na Obr 3.39 - Obr 3.44.

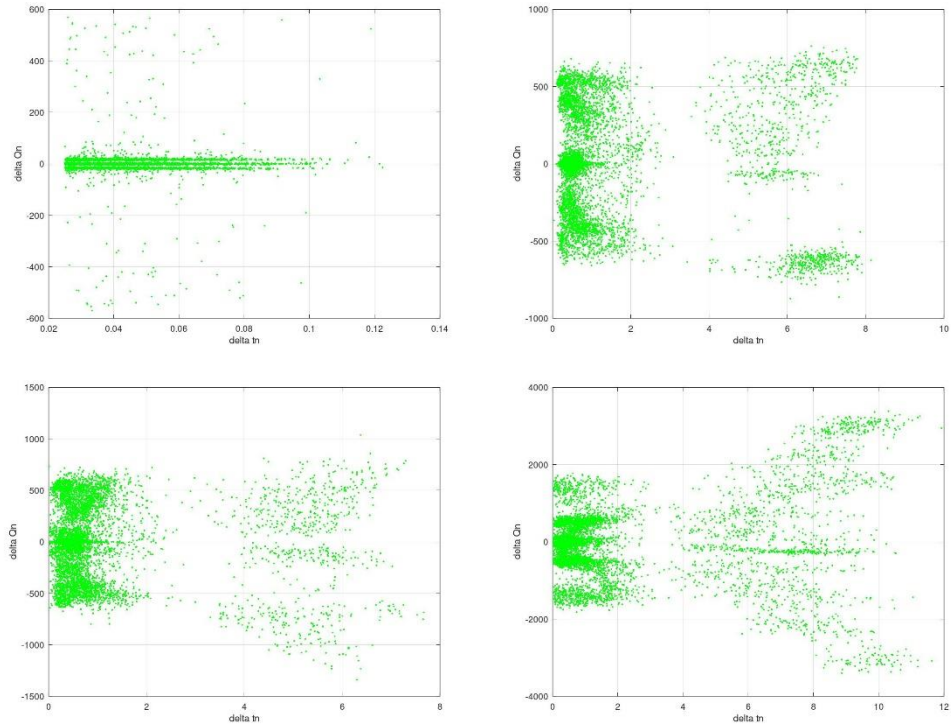
Na Obr 3.39 jsou pulzní diagramy vnitřních výbojů při různých úrovních střídavého napětí. Při střídavém napětí se výbojová aktivita chová podle předpokladů (viz. Obr. 1.22) – s rostoucím napětím roste i maximální náboj. Průměrný počet pulzů za sekundu je při 30 kV na hodnotě 21 400; při 35 kV je 625, při 40 kV je 833 a při druhém měření na úrovni napětí 40 kV s vyšší mezní hodnotou je na hodnotě 300. Vysoká opakovací frekvence u prvního měření je nízkou mezní hodnotou pulzů, a tudíž se do měření započtl i šum. Trend opakovací frekvence lze tedy označit za rostoucí s napětím.





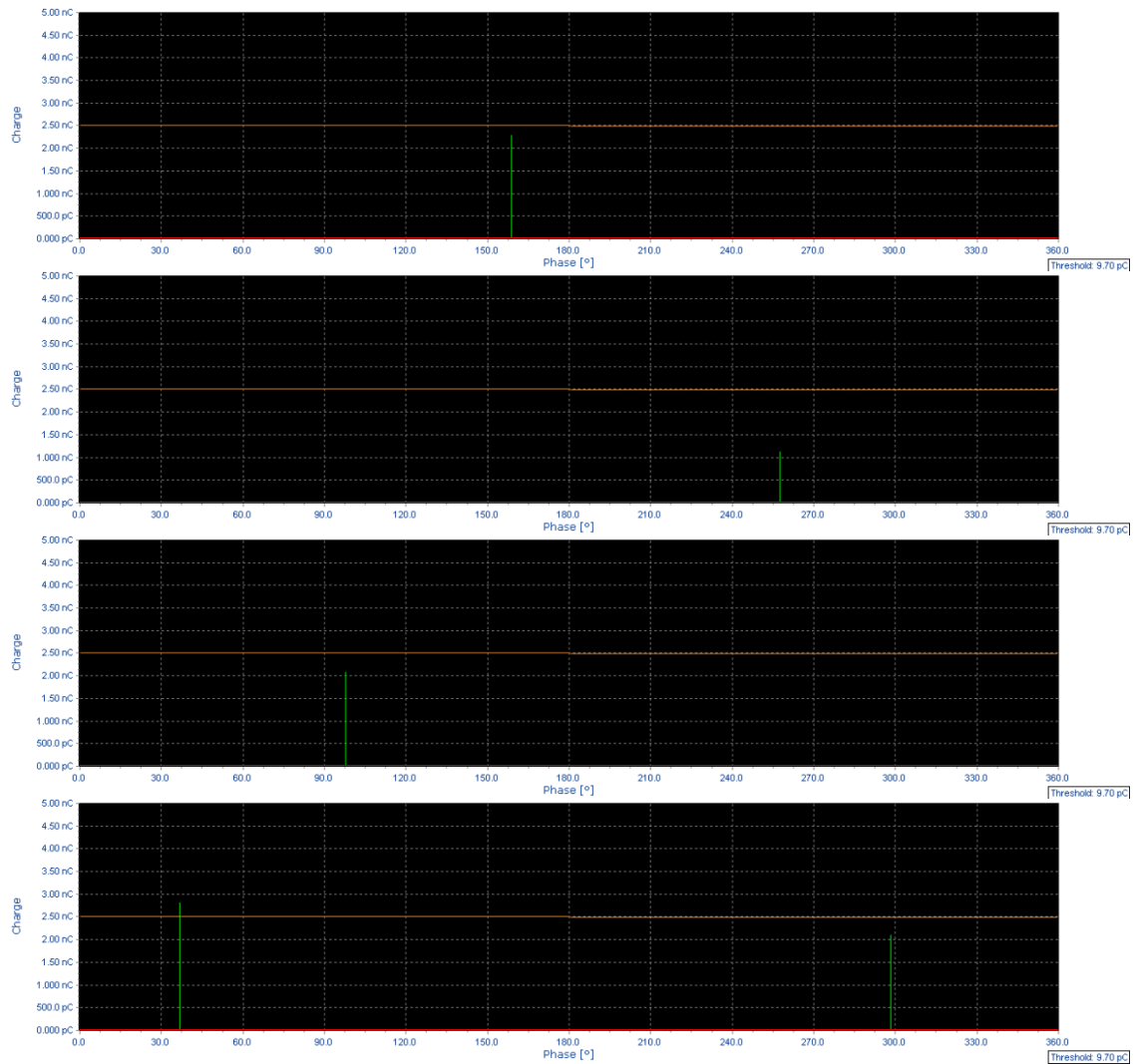
**Obr 3.39 Pulzní diagram měřených AC vnitřních výbojů (odshora  $U=30$  kV;  $U=35$  kV,  $U=40$  kV,  $U=40$  kV)**

Na Obr 3.40 jsou grafy PSA odpovídající pulzním digramům výše. Všechny grafy kromě prvního případu, kdy je výsledný graf ovlivněn rušením, vykazují podobně rysy. Počáteční klastry při napětí 35 kV se formují se s napětím se rozšiřují. Centrální klastř okolo hodnoty  $\Delta Q_n=0$  pC a dva symetrické klastry okolo hodnot  $\Delta Q_n=\pm 500$  pC se z počátečního intervalu  $\Delta t_n=0-2$  ms rozšiřuje až k  $\Delta t_n=3$  ms;  $\Delta t_n=4-8$  ms až k  $\Delta t_n=12$  ms, respektive a četnost bodů v klastrech nabývá na intenzitě. V případě obou měření při 40 kV by se mohlo jednat o tvar Q-t PSA grafu charakteristický právě pro vnitřní výbojovou činnost.



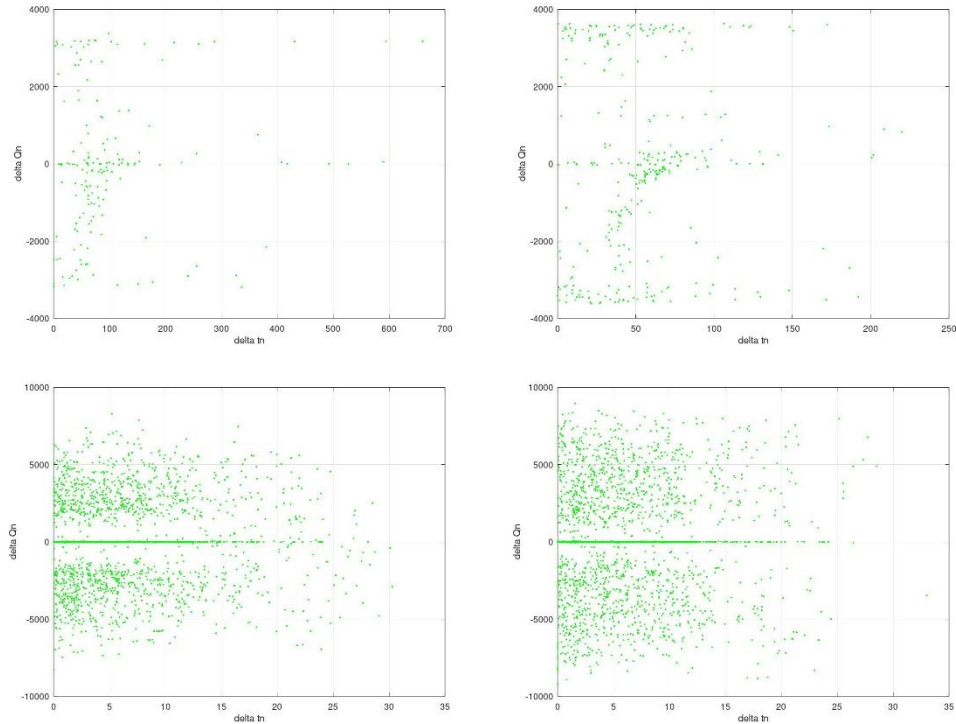
**Obr 3.40 Q-t PSA měřených AC vnitřních výbojů (odshora vlevo  $U=30$  kV;  $U=35$  kV,  $U=40$  kV,  $U=40$  kV)**

Vnitřní výbojové aktivity negativního stejnosměrného napětí (na Obr 3.41) má s rostoucím napětím vzestupnou tendenci. Průměrný počet pulzů začíná na 5,5 pulzech za sekundu při napětí 10 kV s maximální úrovní náboje 3,19 nC; při napětí 13 kV dosáhl hodnoty 10,5 pulzů za sekundu s nejvyšší úrovní náboje 3,64 nC ; při napětí 16,8 kV dosáhl hodnoty 100,06 pulzů za sekundu s nejvyšší úrovní náboje 8,28 nC a při napětí 18,4 kV 110,7 pulzů za sekundu s nejvyšší úrovní náboje 8,91 nC.



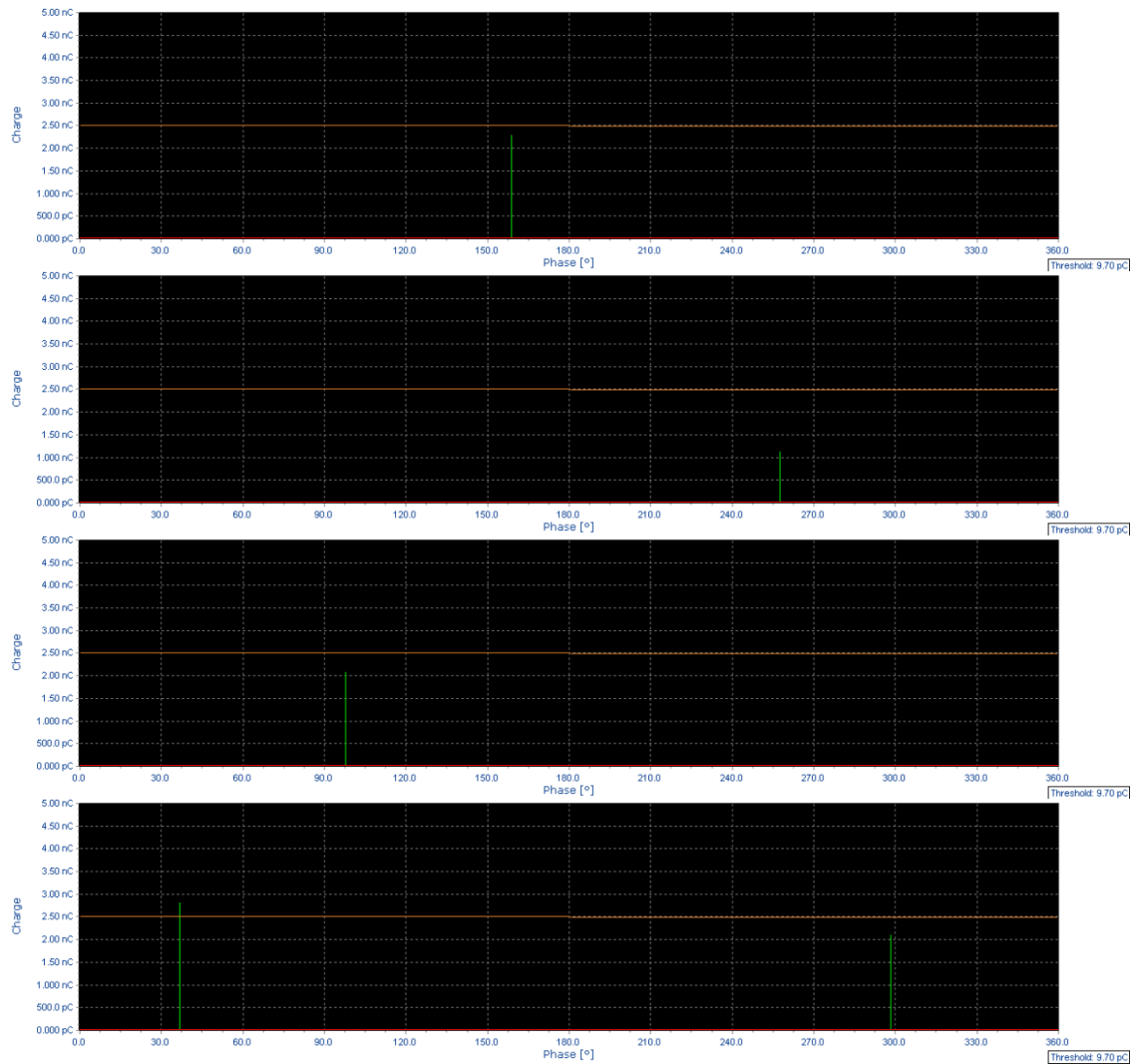
**Obr 3.41 Pulzní diagram měřených DCN vnitřních výbojů (odshora  $U=10$  kV;  $U=13$  kV,  $U=16,8$  kV,  $U=18,4$  kV)**

PSA grafy vnitřních výbojů při stejnosměrném negativním napětí jsou znázorněny na Obr 3.42. V prvním grafu, při napětí 10 kV, je viditelný náznak dvou symetrických klastrů ( $\Delta Q_n = \pm 3000$  pC) okolo středového klastru v  $\Delta Q_n = 0$  pC, podobně jako v případě DCN korony. V tomto případě, stejně tak jako v případě grafu pro napětí 13 kV, se zde objevuje úhlopříčný klaster ze souřadnic  $[0; -3000]$  do  $[100; 0]$ , který při dalším zvyšování napětí vymizí. Při napětích 16,8 a 18,4 kV jsou body rozptýleny v intervalu  $\Delta Q_n = \pm 10000$  pC v rozmezí časových rozdílů  $\Delta t_n = 0-30$  ms s výrazným klastrem v okolí  $\Delta t_n = 0$  ms.



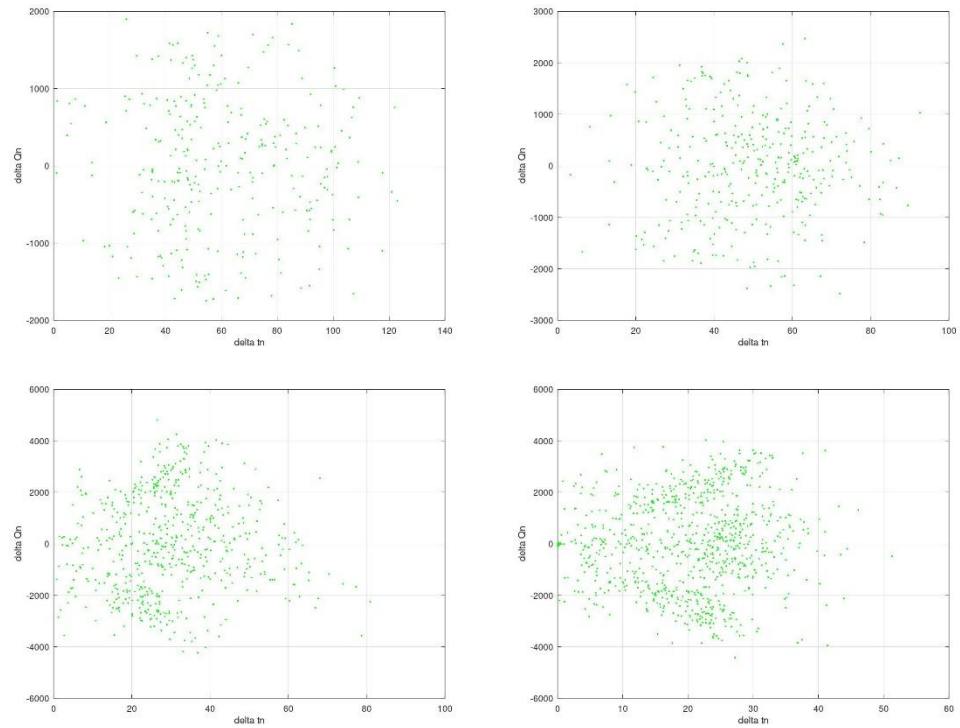
**Obr 3.42 Q-t PSA měřených DCN vnitřních výbojů (odshora vlevo U=10 kV; U=13 kV, U=16,8 kV, U=18,4 kV)**

Pulzní diagramy na Obr 3.43 popisují vnitřní výbojovou aktivitu při stejnosměrném pozitivním napětí. Tak jako v předchozích případech, průměrný počet výbojů za sekundu a maximální hodnota pulzu rostou s napětím. Při napětí 10 kV byl průměrný počet pulzů za sekundu 9,6 s nejvyšší hodnotou pulzu 1,91 nC; při napětí 13 kV 11,7 pulzů za sekundu s nejvyšší hodnotou pulzu 2,4 nC; při napětí 16,8 kV 19,5 pulzů za sekundu s nejvyšší hodnotou pulzu 4,6 nC; při napětí 18,4 kV 29,1 pulzů za sekundu s nejvyšší hodnotou pulzu 3,8 nC.



**Obr 3.43 Pulzní diagram měřených DCP vnitřních výbojů (odshora  $U=10$  kV;  $U=13$  kV,  $U=16,8$  kV,  $U=18,4$  kV)**

PSA grafy na Obr 3.44 popisují chování vyobrazené na pulzních diagramech zmíněných výše. V prvních dvou případech, pro napětí 10 kV a 13 kV, se grafy neformují v klastry. Tento jev je zřejmě způsoben nízkým počtem pulzů. V případě 16,8 kV a 18,4 kV jsou patrné tři formující se klastry s počátkem na souřadnicích  $[0;0]$ . Při 16,8 kV postranní klastry pokračují do souřadnic  $[40; \pm 4000]$  (pro 18,4 kV  $[30; \pm 4000]$ ) a středový klastr ve tvaru trojúhelníku, který vklíněn do prostoru mezi nimi. Grafy pro 16,8 a 18,4 kV vykazují podobné znaky jako v případě střídavého napětí.



**Obr 3.44 Q-t PSA Pulzní diagram měřených DCP vnitřních výbojů (odshora vlevo  $U=10$  kV;  $U=13$  kV,  $U=16,8$  kV,  $U=18,4$  kV)**

## 4 Vlastní přínos pro vědní obor

Jedním z hlavních cílů disertační práce bylo popsat a zhodnotit dostupné metody pro diagnostiku výbojové činnosti při stejnosměrném napětí, dále vznik a ověření metodiky pro diagnostiku a určení typu částečných výbojů v konkrétním měřicím uspořádání při stejnosměrném napětí. Tato metodika nebyla dosud dostupná. V současnosti známé jsou přístupy založené na různých druzích PSA, frekvenční analýzy, analýzy tvaru pulzů atd. Ze současně dostupné literatury nelze získat obecný návod, jak postupovat v případě vyhodnocování výbojové činnosti při stejnosměrném napětí, hlavně proto, že doposud nebyly stanoveny postupy, jak rozlišit jednotlivé základní typy výbojové činnosti při stejnosměrném napětí, kdy není k dispozici synchronizační signál základní harmonické a není tak možno vyjít z běžných fyzikálních zákonitostí při vzniku jednotlivých typů částečných výbojů.

Jako první bylo provedeno shrnutí všech metod pro analýzu částečných výbojů pro střídavé i stejnosměrné napětí. Byly definovány důležité parametry nutné pro popis určení druhu částečných výbojů. Byla provedena simulace elektrického pole základních měřicích uspořádání. **Byl proveden výběr kritérií pro vyhodnocování stejnosměrné výbojové aktivity.**

Podle zvolených kritérií byla jako perspektivní metoda pro vyhodnocování stejnosměrné výbojové činnosti zvolena pulzně sekvenční analýza. **Pro objasnění principu tvorby PSA byla navržena metoda simulace cvičných sekvencí po sobě jdoucích impulzů různých velikostí, která simulovala měření obsahující záznam samotných výbojových pulzů i šumu pozadí.** Tyto simulace byly dále přizpůsobeny, aby napodobovaly jednotlivé základní typy výbojové činnosti, a to jak pro střídavé napětí, tak i pro napětí stejnosměrné.

**Výsledky simulací byly potvrzeny srovnáním s výsledky pulzně sekvenční analýzy reálných měření.**

**Hlavní přínos disertační práce pro vědní obor je ověření funkčnosti pulzně sekvenční analýzy při pozitivním i negativním stejnosměrném napětí. Přínos spočívá v potvrzení, že pomocí metody PSA je možné i při stejnosměrném testovacím napětí rozlišení typu výbojové činnosti.**

## Závěr

Předložená práce je zaměřena na popis nehomogenního dielektrika s elektrickým polem vyvolávajícím částečné výboje. Teoretická část se zabývá teorií částečných výbojů pro střídavé a stejnosměrné napětí, dále pak praktickým porovnáním výbojové činnosti pro střídavé a stejnosměrné napětí, analýzou naměřených dat při laboratorních experimentech a popisem tvorby grafů pulzně sekvenční analýzy.

Jelikož světový trend směřuje k používání stejnosměrného napětí, je třeba vyvíjet odpovídající technologie a postupy diagnostiky stejnosměrných zařízení. Na úvod byla popsána podstata a vznik částečných výbojů, jejich vliv na elektrická zařízení a izolační prvky a měřené veličiny pro vyhodnocování částečných výbojů. Následující část byla zaměřena na principy detekce, vybrané metody měření, kalibrace měřicího systému a rozdíly částečných výbojů vyvolaných různými druhy napětí. V kapitole 1.4 byl uveden časový průběh impulzů částečných výbojů při střídavém napětí a PRPD diagramy pro různé druhy částečných výbojů, které není možné použít pro měření při stejnosměrném napětí. Z toho důvodu byla v následující kapitole popsána jedna z možných metod vyhodnocování stejnosměrné výbojové činnosti – grafy PSA.

Ve druhé kapitole byly popsány cíle disertační práce. Třetí kapitola se zabývá simulací výbojové činnosti pro snadnější pochopení principu utváření grafů PSA. V tomto případě byly použity pouze hodnoty náboje „Q-Q PSA“. Z grafů můžeme usoudit, že se tato metoda byla vyhodnocena nespolehlivá s velmi vysokou citlivostí na rušení, a tudíž má velice nízkou výpovědní hodnotu. Z výzkumu vyplývá, že pouze hodnota náboje neobsahuje dostatek informací o výbojové činnosti, aby mohla dostatečně popsat zdroj částečných výbojů. Nicméně nemůže být obecně označena za nevhodnou pro vyhodnocování stejnosměrné výbojové činnosti. Další část práce je zaměřena na metodu „Q-t PSA“ (závislost rozdílů náboje na čase výskytu pulzu), je perspektivnější pro diagnostiku stejnosměrné výbojové činnosti a poskytuje větší diverzitu výsledných PSA obrazců než „Q-Q PSA“. V případě, kdy jsou do analýzy výbojové aktivity k hodnotám náboje přidány i hodnoty času, vykazuje kombinace těchto dat větší výpovědní hodnotu.

Dále se nabízí možnost doplnit vyhodnocování výbojové aktivity podle parametrů jednotlivých pulzů. Měření, analýza a vyhodnocení výsledků dokazuje, že předložená metoda



má dostatečnou schopnost rozpoznání různých zdrojů částečných výbojů.

Možným směrem dalšího výzkumu je vytvoření databáze PSA klastrů specifických pro různé zdroje poruch elektrických zařízení, podle kterých by bylo možné jednoduše identifikovat závadu v systému a na následně ji tak lokalizovat. Dále by bylo možné metodu PSA doplnit či kombinovat s dalšími parametry, což by přispělo k vyšší přesnosti diagnostické metody a větší odolnosti vůči rušení.

## Použitá literatura

- [1] M. Hoof and R. Patsch, "Analyzing Partial Discharge Pulse Sequences - A New Approach to Investigate Degradation Phenomena," *IEEE Int. Symp. Electr. Insul.*, pp. 327–331, 1994.
- [2] M. Pompili, C. Mazzetti, and R. Bartnikas, "Partial discharge pulse sequence patterns and cavity development times in transformer oils under ac conditions," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 12, no. 2, pp. 395–403, 2005.
- [3] M. Hoof and R. Patsch, "Pulse-sequence analysis: a new method for investigating the physics of PD-induced ageing," *Sci. Meas. Technol. IEE Proc.*, vol. 142, no. 1, pp. 95–101, Jan. 1995.
- [4] R. Patsch and M. Hoof, "Pulse-Sequence Analysis, A way to get a better insight into the physics of discharges," in *International Conference on Partial Discharge 1993*.
- [5] ČSN EN 60270, *Technika zkoušek vysokým napětím - Měření částečných výbojů*. Praha: ČSN, 2001.
- [6] J. Rajtmajer, "Vysokonapěťové stejnosměrné izolační systémy," Západočeská Univerzita v Plzni, 2018.
- [7] T. Havlíček, "Částečné výboje v elektronických zařízeních pracujících na vyšších kmitočtech," Nov. 2009.
- [8] V. Mentlík, P. Trnka, M. Trnková, and L. Šašek, *Splehlivostní aspekty elektrotechnologie*. Praha: BEN - technická literatura, 2011.
- [9] W. J. K. Raymond, H. A. Ilias, A. H. A. Bakar, and H. Mokhlis, "Partial discharge classifications: Review of recent progress," *Measurement*, vol. 68, 2015.
- [10] I.A. Erinmez, "High Voltage Engineering Testing, Chapter 1: Electric power transmission and distribution systems," H. M. Ryan, Ed. Institution of Engineering and Technology, 2013.
- [11] W. Fabian, J.; Muhr, M.; Jaufer, S.; Exner, "Partial discharge behavior of mineral oil and oil-board insulation systems at HVDC," *IEEE Int. Conf. Cond. Monit. Diagnosis*, 2012.
- [12] K. Záliš and Akademie věd České republiky., *Částečné výboje v izolačních systémech elektrických strojů*. Academia, 2005.
- [13] G. O. Eidhin, "High Voltage Engineering Testing, Chapter 4: HVDC and power electronic system," H. M. Ryan, Ed. Institution of Engineering and Technology, 2013.
- [14] Europacable, "HV DC CABLES." [Online]. Available: <https://www.europacable.eu/energy/hvdc-cables>.
- [15] M. J. P. Jeroense, *Charges and Discharges in HVDC Cables: In Particular in Mass-impregnated HVDC Cables*. Delft University Press, 1997.
- [16] E. Gockenbach, "High Voltage Engineering Testing, Chapter 17: Partial discharges measuring techniques," H. M. Ryan, Ed. Institution of Engineering and Technology, 2013.
- [17] P. C. Baker, B. Stephen, and M. D. Judd, "Compositional modeling of partial discharge pulse spectral characteristics," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 62, no. 7, 2013.
- [18] P. Morshuis, "Defects and interfaces at DC voltage," in *Proceedings of 2011 International Symposium on Electrical Insulating Materials*, 2011, pp. 517–523.
- [19] P. T. V. Mentlík, J. Pihera, R. Polanský, P. Prosr, *Diagnostika elektrických zařízení*. 2008.
- [20] L. Prskavec, "Měření částečných výbojů," no. ČVUT Praha, Czech Republic, 2000.
- [21] F. H. Kreuger, *Partial discharge detection in high-voltage equipment*. Butterworths, 1989.
- [22] "Corona discharge." [Online]. Available: [http://en.wikipedia.org/wiki/Corona\\_discharge](http://en.wikipedia.org/wiki/Corona_discharge). [Accessed: 04-Nov-2019].
- [23] F. Mach, "Klouzavý výboj na povrchu izolační desky." [Online]. Available: [http://home.zcu.cz/~fmach/photos\\_and\\_images/Klouzavý\\_výboj\\_na\\_povrchu\\_izolační\\_desky.jpg](http://home.zcu.cz/~fmach/photos_and_images/Klouzavý_výboj_na_povrchu_izolační_desky.jpg). [Accessed: 04-Nov-2019].

- [24] P. Kalina, "Vyhodnocování výbojové činnosti v elektrických zařízeních," Západočeská univerzita v Plzni, 2016.
- [25] J. Pihera, R. Haller, O. Kozak, and J. Hornak, "Corona pulse sequence analysis at DC voltage," in *2016 17th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)*, 2016, pp. 1–6.
- [26] J. Pihera, P. Martínek, and P. Trnka, "Analýza signálu pulzů částečných výbojů," Apr. 2008.
- [27] U. Fromm, "Interpretation of partial discharges at dc voltages," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 2, no. 5, pp. 761–770, 1995.
- [28] P. H. F. Morshuis, "Degradation of solid dielectrics due to internal partial discharge: some thoughts on progress made and where to go now," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 12, no. 5, pp. 905–913, Oct. 2005.
- [29] R. Schwarz and H. M. Muhr, "Partial Discharge Impulse Characteristics of Different Detection Systems," no. Institute of High Voltage Engineering and System Management Graz University of Technology, Austria, 2007.
- [30] A. S. Deshpande, H. A. Mangalvedekar, and A. N. Cheeran, "Partial discharge analysis using energy patterns," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 53, 2013.
- [31] J. Pihera, P. Mráz, and R. Haller, "Partial Discharges Under Ac and Dc Test Conditions," in *Electric Power Engineering 2013*, 2013, pp. 1–6.
- [32] A. Abubakar Mas'Ud, B. G. Stewart, and S. G. McMeekin, "Application of an ensemble neural network for classifying partial discharge patterns," *Electric Power Systems Research*, vol. 110. 2014.
- [33] P. H. F. M. U. Fromm, "The Discharge Mechanism in Gaseous Voids at dc Voltage," *9th ISH, Pap. 4154*, 1995.
- [34] H. A. Ilias, M. A. Tunio, A. H. A. Bakar, H. Mokhlis, and G. Chen, "Partial discharge phenomena within an artificial void in cable insulation geometry: Experimental validation and simulation," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 23, no. 1, 2016.
- [35] E. C. Rogers and D. J. Skipper, "Gaseous discharge phenomena in high-voltage d.c. cable dielectrics," *Proc. IEE Part A Power Eng.*, vol. 107, no. 33, p. 241, 1960.
- [36] G. C. Stone, "Partial Discharge Diagnostics and Electrical Equipment Insulation Condition Assessment," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 12, 2005.
- [37] J. Pihera, R. Haller, and P. Mraz, "Partial discharges evaluation at DC voltage," in *Proceedings of the 2014 15th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)*, 2014, pp. 441–445.
- [38] U. Fromm, *Partial discharge and Breakdown Testing at High DC Voltage*. Delft University Press, 1995.
- [39] P. H. F. Morshuis, "Partial discharge mechanisms: Mechanisms leading to breakdown, analyzed by fast electrical and optical measurements," 1993.
- [40] H. S. and P. Najafi, Seyed Amir Mahmood;Werle, "Comparison of Acoustical Partial Discharge Signals under AC and DC Stress," in *Electrical Insulation Conference*, 2016.
- [41] Y. Du, B. X.; Li, Y. P.; Liu, "Hydrophobicity Evaluation of Silicone Rubber Insulator Using DC Discharge Induced Acoustic Wave," *IEEE*, 2013.
- [42] B. Jaber, A; Lazaridis, P; Zhang, Y; D Upton, D; Ahmed, H; Khan, U; Saeed and I. A. Mather, P; Vieira, M F ; Atkinson, R; Judd, M; Glover, "Comparison of Contact Measurement and Free-Space Radiation Measurement of Partial Discharge Signals," in *International Conference on Automation & Computing*, 2015.
- [43] O. Perpiñán, M. A. Sánchez-Urán, F. Álvarez, J. Ortego, and F. Garnacho, "Signal analysis and feature generation for pattern identification of partial discharges in high-voltage equipment," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 95, 2013.
- [44] D. An, L. Du, S. Liu, and X. Wu, "Study on ultra-high frequency partial discharge simulator and its propagation characteristics," in *2016 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)*, 2016, pp. 1–4.
- [45] P. Treyer, P. Mraz, and U. Hammer, "Partial discharge vs radio influence voltage (RIV) measurement," 2019.

- [46] “Partial Discharge Detector and Radio Interference Voltage Testing,” 2013. [Online]. Available: [http://www.huibers.info/media/PDF\\_Phenix/Deelontladingsmeter.PDF](http://www.huibers.info/media/PDF_Phenix/Deelontladingsmeter.PDF). [Accessed: 05-Nov-2019].
- [47] H. J. Weber, “Partial discharge Measuring Techniques.” Tettex-Information 21, 1984.
- [48] P. Osvath, W. Zaengl, and H. J. Weber, *Measurement of Partial Discharges - Problems and how they can be solved with a flexible measuring system*. Tettex-Information 23, 1985.
- [49] H. Tatizawa, M. Bottaro, W. Bassi, D. C. Rosendo, F. Bacega, and W. R. Bacega, “A Practical Approach for the Calibration of Partial Discharges Measurements at Field,” in *2018 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D)*, 2018, pp. 1–9.
- [50] J. Havunen and J. Hallstrom, “Application of Charge-Sensitive Preamplifier for the Calibration of Partial Discharge Calibrators Below 1 pC,” in *2018 Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2018)*, 2018, pp. 1–2.
- [51] A. Ovsyannikov and S. Zhivodernikov, “Inverted diagram of calibration for partial discharge measuring,” in *2008 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis*, 2008, pp. 93–95.
- [52] *IEC 60270 High-voltage test techniques – Partial discharge measurements*. .
- [53] J. Guo, E. Shu, and O. Morel, “Partial Discharge calibration using frequency domain measurement in power cables,” in *2014 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)*, 2014, pp. 200–203.
- [54] G. C. Montanari and A. Cavallini, “Partial discharge diagnostics: From apparatus monitoring to smart grid assessment,” *IEEE Electr. Insul. Mag.*, vol. 29, no. 3, 2013.
- [55] C. F. F. C. Cunha, A. T. Carvalho, M. R. Petraglia, and A. C. S. Lima, “A new wavelet selection method for partial discharge denoising,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 125, 2015.
- [56] X. Peng, C. Zhou, D. Hepburn, M. D. Judd, and W. H. Siew, “Application of K-Means method to pattern recognition in on-line cable partial discharge monitoring,” *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 20, no. 3, 2013.
- [57] M. S. A. Rahman, P. L. Lewin, and P. Rapisarda, “Autonomous localization of partial discharge sources within large transformer windings,” *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 23, no. 2, 2016.
- [58] X. Cavalini, A.; Montanari, C. G.; Tozzi, M.; Chen, “Diagnostic of HVDC Systems Using Partial Discharges,” *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. Vol. 18*, 2011.
- [59] S. Abdul Madhar, P. Mraz, A. Rodrigo Mor, and R. Ross, “Empirical analysis of partial discharge data and innovative visualization tools for defect identification under DC stress,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 123, p. 106270, Dec. 2020.
- [60] R. Piccin, A. Mor, P. Morshuis, A. Girodet, and J. Smit, “Partial discharge analysis of gas insulated systems at high voltage AC and DC,” *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 22, no. 1, 2015.
- [61] A. Pirker and U. Schichler, “Partial discharges at DC voltage - measurement and pattern recognition,” in *2016 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD)*, 2016, pp. 287–290.
- [62] M. S. Siregar, R. Woschitz, U. Schichler, A. Pirker, and Suwarno, “Partial discharge patterns on cross-linked polyethylene DC power cables,” in *2016 3rd Conference on Power Engineering and Renewable Energy (ICPERE)*, 2016, pp. 119–123.
- [63] P. Morshuis, A. Cavallini, D. Fabiani, G. Montanari, and C. Azcarraga, “Stress conditions in HVDC equipment and routes to in service failure,” *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 22, no. 1, 2015.
- [64] G. C. Niu, H. Q.; Cavallini, A.; Montanari, “Identification of Partial Discharges phenomena in HVDC apparatus,” *IEEE*, 2008.
- [65] P. Wang, A. Cavallini, G. Montanari, and G. Wu, “Effect of rise time on PD pulse features under repetitive square wave voltages,” *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 20, no. 1, 2013.
- [66] J. Pihera, J. Hornak, A. Voborník, L. Kupka, S. Chládek, and R. Haller, “Partial

- Discharges Pulse Shape Analysis at AC and DC,” 2019.
- [67] P. H. F. Morshuis and J. J. Smit, “Partial discharges at dc voltage: Their mechanism, detection and analysis,” *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 12, no. 2, pp. 328–340, 2005.
- [68] S. Abdul Madhar, P. Mráz, A. Rodrigo Mor, and R. Ross, “Study of Corona Configurations under DC Conditions and Recommendations for an Identification Test Plan,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 118, p. 105820, Jun. 2020.
- [69] M. Hoof and R. Patsch, “Voltage-difference analysis, a tool for partial discharge source identification,” *Electr. Insul. 1996., Conf. Rec. 1996 IEEE Int. Symp.*, vol. 1, pp. 401–406 vol.1, 1996.
- [70] M. Hoof and R. Patsch, “A physical model, describing the nature of partial discharge pulse sequences,” *Prop. Appl. Dielectr. Mater. 1997., Proc. 5th Int. Conf.*, vol. 1, pp. 283–286 vol.1, 1997.
- [71] M. Majidi, M. S. Fadali, M. Etezadi-Amoli, and M. Oskuoee, “Partial discharge pattern recognition via sparse representation and ANN,” *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 2015.
- [72] O. Kozák, “Partial discharges under DC voltage,” *Master’s thesis*, 2015.
- [73] P. Mráz, P. Treyer, and U. Hammer, “Evaluation and Limitations of Corona Discharge Measurements – An Application Point of View,” pp. 273–276, 2016.

## Seznam publikací autora

- [1] PIHERA, J., KOZÁK, O., HORNAK, J., KUPKA, L., HALLER, R. Partial discharges evaluation method at HVDC conditions. In *Conference proceedings : 20th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH 2017)*. Tucumán: National University of Tucumán, 2017. s. 1-5. ISBN: 978-987-45745-6-5
- [2] PIHERA, J., HALLER, R., KOZÁK, O., HORNAK, J. Corona pulse sequence analysis at DC voltage. In *Proceedings of the 2016 17th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)*. Prague: Czech Technical University in Prague, 2016. s. 359-363. ISBN: 978-1-5090-0907-7
- [3] PIHERA, J., TRNKA, P., KOZÁK, O., HORNAK, J. Pulse sequence analysis of corona discharge at DC voltage. In *Proceedings of International Conference on Diagnostic of Electrical Machines and Insulating Systems in Electrical Engineering (DEMISEE)*. Piscataway: IEEE, 2016. s. 71-76. ISBN: 978-1-5090-1249-7
- [4] KOZÁK, O., PIHERA, J. Partial Discharge Analysis and Simulation Using the Consecutive Pulses Correlation Method. In journal *Energies*. 2021, Impact factor: 2.702 (2019). ISSN: 1996-1073