

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Částečné výboje při stejnosměrném napětí**

**vedoucí práce: Ing. Josef Pihera Ph.D.  
autor: Ondřej Kozák**

**2015**



## **Anotace**

Diplomová práce je zaměřena na částečné výboje při různých druzích napětí. Pro uvedení do problematiky je v úvodu popsán princip a vznik částečných výbojů a jejich diagnostika a problematika. V další kapitole jsou popsány a vyhodnoceny konkrétní experimenty. Ve třetí kapitole je provedeno porovnání částečných výbojů při střídavém, negativním stejnosměrném a pozitivním stejnosměrném napětí. Dále jsou uvedeny dostupné měřicí systémy pro střídavé a stejnosměrné obvody.

## **Klíčová slova**

Částečné výboje, stejnosměrné napětí, střídavé napětí, korona

## **Abstract**

The final thesis is focused to partial discharges occurring at different kinds of voltages. For introduction into the issue is described inception of partial discharges, diagnostics and their risks. In next chapter are described and evaluated particular experiments. In third chapter is comparing of partial discharges at alternating, negative direct and positive direct voltage. Furthermore the available measuring systems for alternating and direct current are described.

## **Key words**

Partial discharges, PD, Corona, Alternating current, Direct Current, AC, DC

## **Prohlášení**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

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

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

V Plzni dne 7.5.2015

Ondřej Kozák

.....

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Josefovi Piherovi Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce. Dále pak mému kolegovi Bc. Martinovi Zapalačovi za rady při mé práci.

## Obsah

ÚVOD.....	8
<b>1 ČÁSTEČNÉ VÝBOJE.....</b>	<b>9</b>
1.1    PODSTATA A VZNIK.....	9
1.2    DETEKCE ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ.....	14
1.2.1 <i>Detekce globální metodou</i> .....	19
1.2.2 <i>Detekce výbojů na základě časového rozlišení impulzů</i> .....	20
1.3    ČÁSTEČNÉ VÝBOJE PŘI STRÍDAVÉM NAPĚTÍ.....	21
1.4    ČÁSTEČNÉ VÝBOJE PŘI STEJNOSMĚRNÉM NAPĚTÍ .....	22
<b>2 VYHODNOCENÍ ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ PŘI STRÍDAVÉM A STEJNOSMĚRNÉM NAPĚTÍ.....</b>	<b>25</b>
2.1    METODY MĚŘENÍ.....	25
2.2    VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ PŘI STRÍDAVÉM NAPĚTÍ .....	26
2.3    VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ PŘI NEGATIVNÍM STEJNOSMĚRNÉM NAPĚTÍ..	30
2.4    VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ PŘI POZITIVNÍM STEJNOSMĚRNÉM NAPĚTÍ ...	34
<b>3 POROVNÁNÍ NAMĚŘENÝCH DAT .....</b>	<b>39</b>
<b>4 PŘEHLED DOSTUPNÉ MĚŘÍCÍ TECHNIKY.....</b>	<b>44</b>
4.1    OMICRON .....	44
4.2    HAEFELY TEST AG.....	47
4.3    DOBLE .....	48
<b>5 ZÁVĚR .....</b>	<b>49</b>
<b>POUŽITÁ LITERATURA .....</b>	<b>50</b>
<b>PŘÍLOHA Č.1 – POROVNÁNÍ PSA GRAFŮ BEZ IZOLAČNÍ DESKY .....</b>	<b>52</b>
<b>PŘÍLOHA Č.2 – POROVNÁNÍ PSA GRAFŮ S IZOLAČNÍ DESKOU Z PMMA .....</b>	<b>53</b>

## Úvod

Předkládaná práce je zaměřena na vznik a porovnání částečných výbojů při střídavém, negativním stejnosměrném a pozitivním stejnosměrném napětí. V práci je popsán princip vzniku a vliv působení částečných výbojů na izolační systémy elektrických strojů a zařízení. Největší pozornost je věnována novým trendům v oblasti diagnostiky částečných výbojů, a sice částečných výbojů při působení stejnosměrného napětí. Další inovací v oboru je vyhodnocování měření částečných výbojů metodou Pulsně sekvenční analýzou (PSA). PSA grafy v této práci jsou uvedeny při střídavém, negativním stejnosměrném a pozitivním stejnosměrném napětí a s izolační deskou z PMMA a bez ní. Dále jsou porovnány pulzní diagramy a jim odpovídající PSA grafy.

Cíle této diplomové práce jsou:

- Provedení rešerše teorie částečných výbojů pro střídavé a stejnosměrné napětí.
- Provedení praktického porovnání výbojové činnosti pro střídavé a stejnosměrné napětí
- Provedení analýzy naměřených dat
- Provedení přehledu dostupné měřicí techniky částečných výbojů

Práce je rozdělena do čtyř částí; první se zabývá podstatou, vznikem a vlastnostmi částečných výbojů, druhá odlišnostmi výbojů při stejnosměrném a při střídavém napětí. Druhá část je praktická, kde jsou uvedeny a zhodnoceny naměřené hodnoty, grafy a diagramy. Ve třetí části jsou porovnány grafy a diagramy uvedené v druhé kapitole. V poslední kapitole jsou uvedeny a popsány dostupné měřicí systémy částečných výbojů.



# 1 Částečné výboje

## 1.1 Podstata a vznik

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 pro přenosovou soustavu jsou 110, 220 a 400 kV. Jelikož běžné generátory v elektrárnách generují napětí v rozmezí 10 až 25 kV, je třeba 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. [13]

Díky vynálezu transformátoru střídavý proud převládl nad stejnosměrným a po celá desetiletí byl v pozadí silnoproudé techniky. 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 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 pro nadzemní vedení a přibližně 50 km pro kabely [12].
- *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 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.
- Vysokonapěťové stejnosměrné systémy mohou omezit rušení v připojených střídavých systémech a přidružených generátorech.
- Na rozdíl od střídavých soustav, propojení vysokonapěťovým stejnosměrným přenosovým systémem nezvyšuje poruchovost napojených střídavých soustav.

[12]

Vznik částečných výbojů při střídavém napětí, které rapidně snižují životnost izolace, jsou obecně známá. Částečné výboje obvykle vedou k erozi či „růstu elektrického stromčku“ (electrical treeing) v materiálu, což může mít za následek naprosté selhání objektu. Částečné výboje provází výrobu, vedení, transformaci i spotřebu elektrické energie. Jelikož trend vývoje směřuje k používání stejnosměrného napětí, je třeba obrátit pozornost i k částečným výbojům při stejnosměrném napětí. Částečný výboj, dle normy IEC 60270, je lokalizovaný elektrický výboj, který pouze částečně přemostuje prostor mezi vodiči a může a 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 kritické hodnotě elektrické pevnosti izolačního materiálu,

předtím než dojde k samotnému plnému výboji. Tudíž materiál může být testován vysokým napětím, aniž by byl poškozen, proražen či jinak oslaben. Ačkoliv 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.) [2], [14]

Po nástupu vysoko-napětových izolačních materiálů jako je polyetylén či epoxydová 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. Ačkoli výboje nemusí být příčinou závady, velice často jí předchází. Právě z tohoto důvodu je velmi užitečné měřit částečné výboje i na stejnosměrném napětí. Stejně druhy defektů, které byly zmíněny u izolačních soustav pro střídavé napětí, se mohou vyskytnout i u stejnosměrných. [2], [8], [3]

Druhy částečných výbojů:

- a) **Vnější částečné výboje** – částečné výboje, které vznikají kolem elektrod či vodičů s malým poloměrem či zakřivením. (Doutnavé výboje, Koronové výboje, Trichelovy impulzy...).
- b) **Povrchové částečné výboje** – částečné výboje vznikající na rozhraní pevného a plynného dielektrika. Nejčastějšími jsou klouzavé výboje.
- c) **Vnitřní částečné výboje** – Částečné výboje vznikající v dutinkách plynu u pevných či plynných dielektrik.

[3]

Pro vyhodnocení výbojové činnosti se získávají níže uvedené hodnoty:

#### **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.* [20]

- **Četnost impulzů n**

*Četnost impulzů je poměr mezi celkovým počtem impulzů částečných výbojů zaznamenaných ve vybraném časovém intervalu a dobou trvání tohoto intervalu.* [20]

- **Opakovací kmitočet impulzů N**

*Vyjádřuje počet impulzů částečných výbojů za sekundu v případě stejně vzdálených impulzů.* [20]

- **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 ( $^\circ$ ).* [20]

### **Veličiny integrované**

- **Střední proud částečných výbojů I**

*Střední proud částečných výbojů je odvozená veličina představující součet absolutních hodnot jednotlivých úrovní zdánlivého náboje  $q_i$  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).* [20]

- **Výkon částečných výbojů P**

Výkon částečných výbojů je odvozená veličina, která představuje střední výkon impulsu 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 zkušební 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 ( $W$ ). [20]

- **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:

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

Střední kvadratický součet je obecně vyjádřen v (coulombech)<sup>2</sup> za sekundu ( $C^2/s$ ). [20]

### 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 impulsu částečného výboje rovná nebo převyšuje předepsanou nízkou hodnotu. [20]

- **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. [20]

### 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. [20]

- **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. [20]

- **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:

$$\Delta f = f_2 - f_1$$

[20]

## 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 rozdílná rozložení elektrického pole. V lokálních nehomogenitách izolace se mohou vytvářet malé oblasti s výbojovou činností. Částečné výboje poukazují na rozdílné fyzikální a elektrické vlastnosti izolantů a různé druhy částečných výbojů jsou způsobeny rozdílnými příčinami. [1]

Částečné výboje v pevné izolaci (vnitřní výboje) vznikají v dutinách či prasklinách obsahující plyn nebo po povrchu přechodu pevná látka-plyn. Jedna

z prvních provedených studií částečných výbojů při stejnosměrném napětí byla provedena v [15]. Bylo vypočteno, že četnost výbojů po zahoření výboje při zbytkovém napětí přes vybíjející 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 [5], 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 [16] a teoretických předpokladů vyplynulo, že mechanismy výbojů v malých dutinách jsou převážně „Townsendova“ druhu. [5]

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

**a) Elektrické**

- Globální
- Detekční
- Lokalizační

**b) Akustické**

- Ultrazvuk
- Akustická emise

**c) Optické**

- Optická emise
- Detekce ultrafialového záření

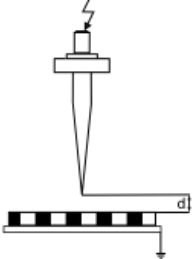
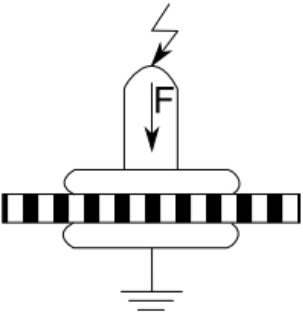
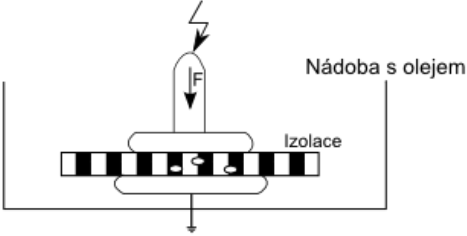
**d) Chemické**

- Rozbor plynů
- Rozbor oleje

[3],[1]

Pro elektrické měření a simulaci různých druhů částečných výbojů se používají různá uspořádání měřících elektrod. Pro měření vnějších částečných výbojů (korona) se používá např. uspořádání hrot-deska (Obr. 1.1. a)), pro měření povrchových částečných výbojů dvě deskové elektrody s izolačním materiálem mezi nimi (Obr. 1.1. 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. 1.1. c)). [7]

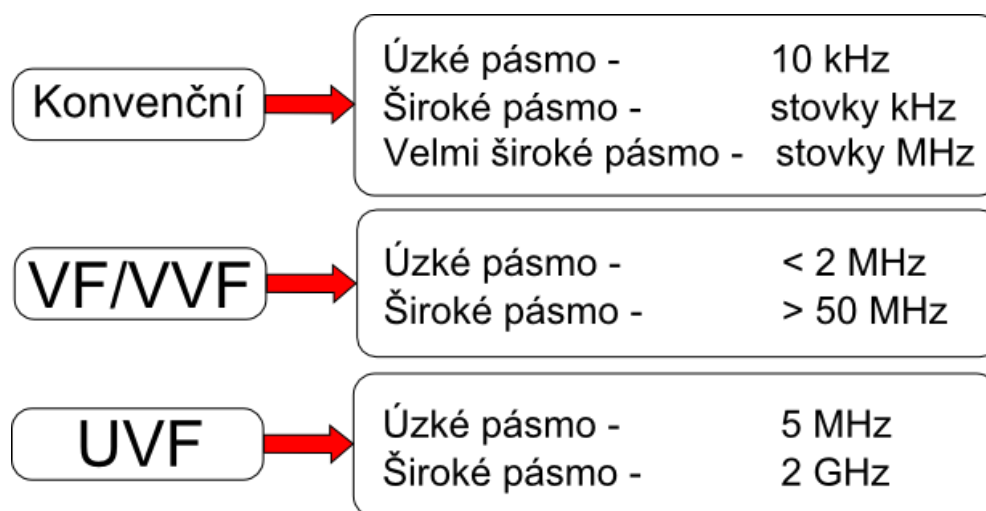
1	<b>Korona Hrot-deska s izolačním materiálem</b>	
2	<b>Klouzavé výboje</b>	
3	<b>Vnitřní výboje Vnitřní dutinky v pevné izolaci</b>	

Obr. 1.1. Elektrické metody měření částečných výbojů [7]

Běžné elektrické metody jsou využívány především pro detekci nehomogenit v izolaci, klouzavé výboje a koronové výboje. Nekonvenční 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 odpor, 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. [1]



**Obr. 1.2. Elektrické detekční systémy pro měření částečných výbojů [1]**

Měření částečných výbojů je citlivá a efektivní metoda jak zjistit počátek degradace v elektrické izolaci či selhávání izolace vlivem namáhání elektrickým polem. Vznik částečných výbojů v izolačním systému je charakterizován neperiodickými impulzy s dobou trvání  $10^{-9}$  až  $10^{-7}$  sekundy. Ačkoli je frekvenční spektrum těchto výbojů velice široké (jde až k GHz), klasické systémy pro měření částečných výbojů měří a analyzují pouze v rozsahu 1 MHz. Tudíž klasické měření nemůže obsáhnout kompletní charakteristiku částečných výbojů odlišných izolačních systémů. Pro elektrické měření zdánlivého náboje je možné využít širšího frekvenčního pásma, které je odlišné od šířky pásma v používaných systémech pro měření částečných výbojů. [1]

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:

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

$$f_2 \leq 500 \text{ kHz};$$

$$100 \text{ kHz} \leq f_\Delta \leq 400 \text{ kHz};$$

[20]

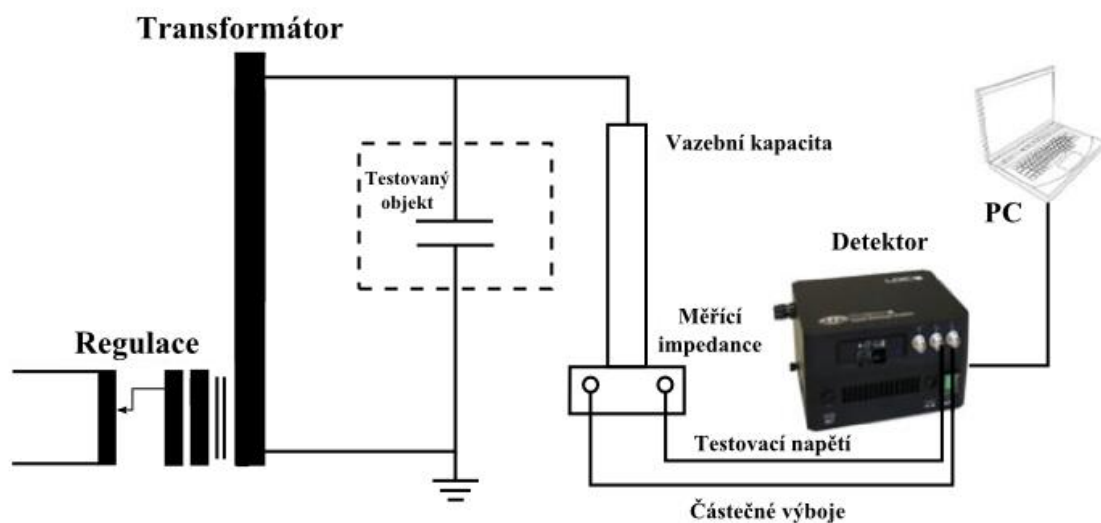
Dále norma ČSN EN 60270 specifikuje úzkopásmové přístroje pro měření částečných výbojů. Jsou charakterizovány malou šířkou pásma  $\Delta f$  a středním kmitočtem pásma  $f_m$ , který se může měnit v širokém frekvenčním rozsahu, ve kterém je amplitudové frekvenční spektrum proudového impulsu částečného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

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

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

[20]

U nových systémů je tendence používat senzory a detektory s šířkou pásma do stovek MHz. Větší šířka pásma zahrnuje to, že vzniklý náboj nesmí být přímo vytvořen (zobrazen) detektorem, protože proud není přímo integrován. Částečný výboj v polymerové izolaci se vyskytuje několik nanosekund a frekvenční spektrum dosahuje rozsahu 100 MHz. Pro měření částečných výbojů Vysoké frekvence/Velmi vysoké frekvence se používají induktivní či kapacitní senzory s odlišnými šířkami pásma. Šířka pásma měřicího systému může být do 2 MHz (úzké frekvenční spektrum) a stejně tak přes 50 MHz (široké frekvenční spektrum). Částečné výboje velmi krátkého trvání (menší než ns), například u plynem izolovaných rozvaděčů, emitují elektromagnetické vlny, jejichž spektrum dosahuje jednotek GHz. V oblasti detekčních systémů ultra vysokých frekvencí jsou dva druhy měření částečných výbojů. Je to metoda s úzkým frekvenčním spektrem o šířce pásma pouze do jednotek MHz a metoda s širokým frekvenčním spektrem o šířce pásma do 2 GHz. Akustické měření částečných výbojů využívá faktu, že je emitován akustický signál jako důsledek nárůstu tlaku způsobený výbojem v izolačním médiu. Kvůli krátké době trvání impulsů částečných výbojů je frekvence zvukové vlny daleko za mezí slyšitelnosti. [1]



Obr. 1.3. Koncept klasického měření částečných výbojů [9]

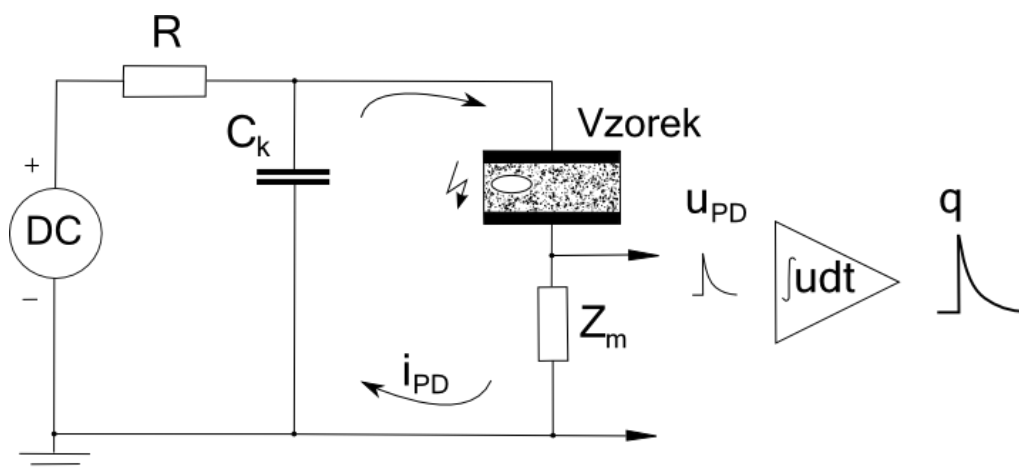
Mezi dvě hlavní elektrické měřicí metody patří:

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

[6]

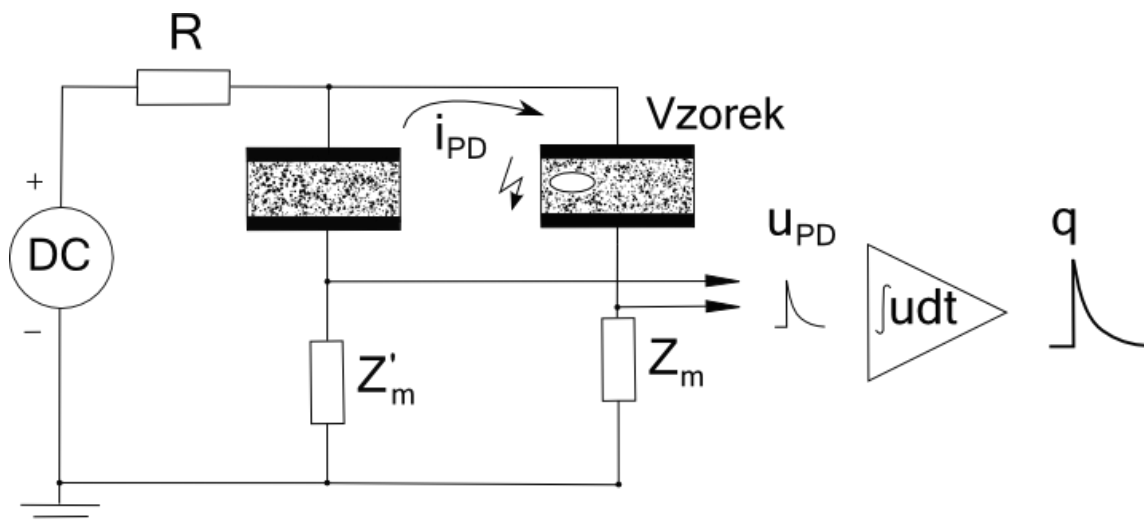
### 1.2.1 Detekce globální metodou

Tento měřicí systém integruje procházející proud dle času. Tato integrovaná hodnota je nazývána amplituda částečných výbojů  $q$ . Základní měřicí obvod je znázorněn na Obr. 1.4. [6]



Obr. 1.4. Nevyvážený obvod pro měření částečných výbojů [6]

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 [6]. Další metoda pro potlačení rušení je vyvážený detekční obvod znázorněný na Obr. 1.5. [6]



Obr. 1.5. Vyvážený měřicí obvod pro měření částečných výbojů [6]

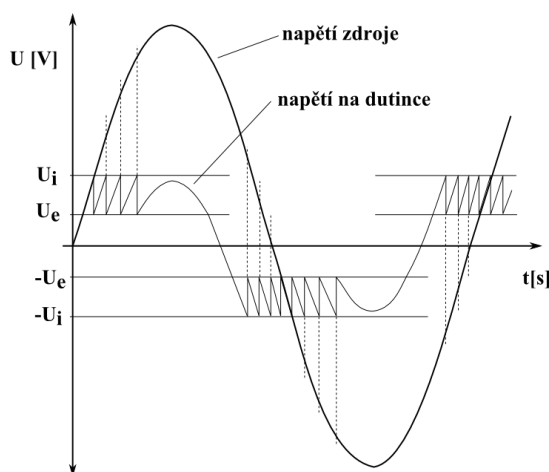
### 1.2.2 Detekce výbojů na základě časového rozlišení impulzů

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. [6]

Ve srovnání s klasickou detekcí částečných výbojů, metoda časového rozlišení impulzů vyžaduje mnohem složitější měřicí techniku a výbojový obvod s velmi širokým frekvenčním pásmem. U průmyslových měření se toto vztahuje pouze na určité testované objekty (kabely, GIS). Nicméně znalost výbojových mechanismů usnadňuje interpretaci naměřených hodnot výbojů klasickou metodou. [6]

### 1.3 Částečné výboje při střídavém napětí

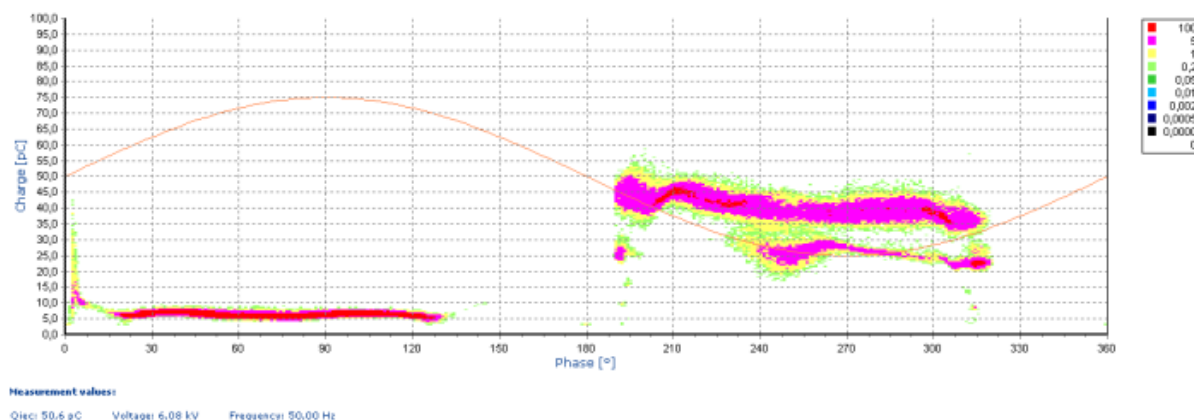
Na Obr. 1.6. je znázorněn typický průběh napětí částečných výbojů v pevném izolantu. Graf uvažuje konstantní napětí výbojů, jejich polaritní nezávislost a to, že předchozí výboje neovlivňují elektrickou pevnost dutinky. Jedním z nejvýznamnějších parametrů těchto měření je zdánlivý náboj  $Q$ , protože jeho hodnota udává srovnání pro kalibrovaný normál a testovaný objekt. Jedná se o zdánlivou hodnotu náboje, kterou dodá vazební kapacita do měřícího 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. Dále doplňkové hodnoty jsou výkon výboje  $P$  či průměrný proud výboje  $I$ . [14]



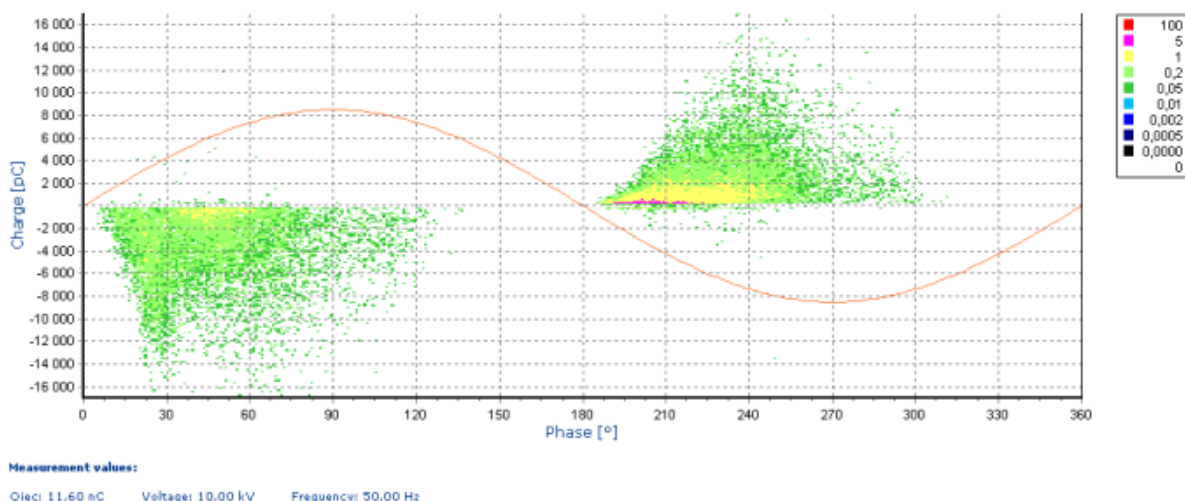
Obr. 1.6. Průběh napětí částečných výbojů [10]

$U_i$  – Zapalovací napětí částečných výbojů

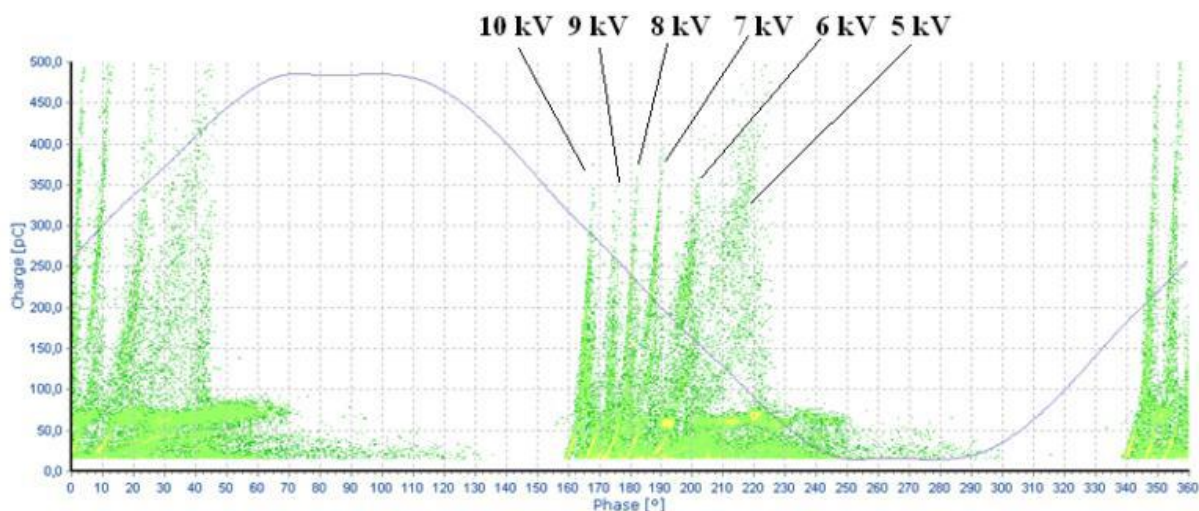
$U_e$  – Zhášecí napětí částečných výbojů



Obr. 1.7. PRPD Diagram pro uspořádání deska-hrot (korona) při střídavém napětí [9]



**Obr. 1.8. PRPD Diagram pro klouzávé výboje při střídavém napětí [9]**



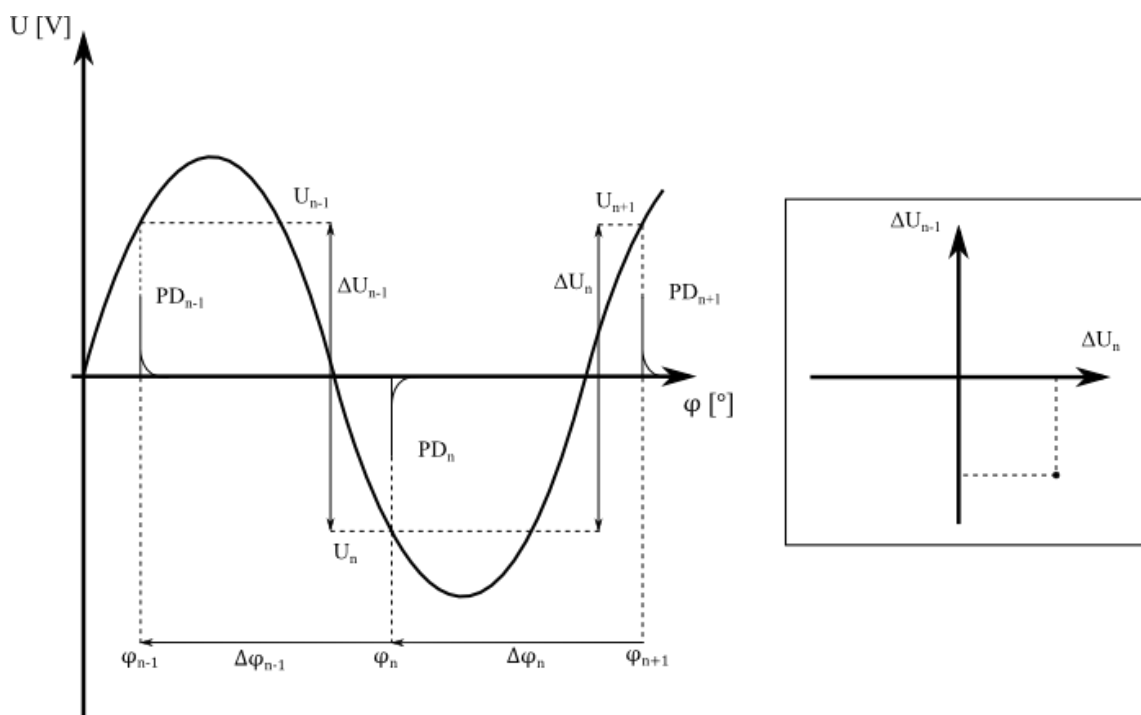
**Obr. 1.9. PRPD Diagram pro vnitřní částečné výboje při střídavém napětí [9]**

#### 1.4 Částečné výboje při stejnosměrném napětí

Grafy PRPD jsou nejběžnější grafickou metodou pro znázornění částečných výbojů – avšak při měření při stejnosměrném napětí není možnost zobrazovat průběhy pomocí PRPD, kvůli absenci fáze u stejnosměrného napětí. I přes grafické znázornění jsou stále nejdůležitějším měřítkem naměřené hodnoty zdánlivého náboje, napětí, četnost atd. [8]

Jako jedna z možných metod hodnocení výbojové činnosti při stejnosměrném napětí se jeví pulzně sekvenční analýza (Grafy PSA) pro střídavé napětí, je vytvořena

třemi impulzy vyvolanými částečnými výboji v závislosti na jejich napětí a fázového posunu. Kvůli absenci fáze při stejnosměrném napětí byly pro vyhodnocení použity hodnoty napětí v okamžiku impulsu a zdánlivého náboje. Hodnota zdánlivého náboje v těchto grafech není uvažována. Na Obr. 1.10. je ukázán postup tvorby PSA grafů. Pro vytvoření grafu jsou použity 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  $Q_{n+1}$ . [8]



**Obr. 1.10. Tvorba PSA grafů [8]**

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 (1)-(6). Kde  $U$  je napětí ve voltech (V),  $\varphi$  je napětí ve stupních ( $^\circ$ ) a  $Q$  je zdánlivý náboj v piko coulombech (pC). [8]

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

$$\Delta U_{n-1} = U_n - U_{n-1} \quad (2)$$

$$\Delta \varphi_n = \varphi_{n+1} - \varphi_n \quad (3)$$

$$\Delta \varphi_{n-1} = \varphi_n - \varphi_{n-1} \quad (4)$$

$$\Delta Q_n = Q_{n+1} - Q_n \quad (5)$$

$$\Delta Q_{n-1} = Q_n - Q_{n-1} \quad (6)$$

[8]

Analýza provázanosti pulzů částečných výbojů a jejich nestacionárního chování s průběžnou degradací izolace umožňuje lepší porozumění fyzikálním procesům spojených s výbojovou činností. Ukazuje základní informace o nahromaděném prostorovém náboji a snižuje ovlivnění elektrického pole vlivem pozitivního a negativního prostorového náboje. [21]

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 degradačních procesů, které nemohou být získány klasickými metodami analýzy částečných výbojů. [21]

Díky skutečnosti, že 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, není nezbytné zaznamenávat jiné parametry než:

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

[21]

Oproti střídavému napětí mohou u stejnosměrného napětí být 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. 1.11.). 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.

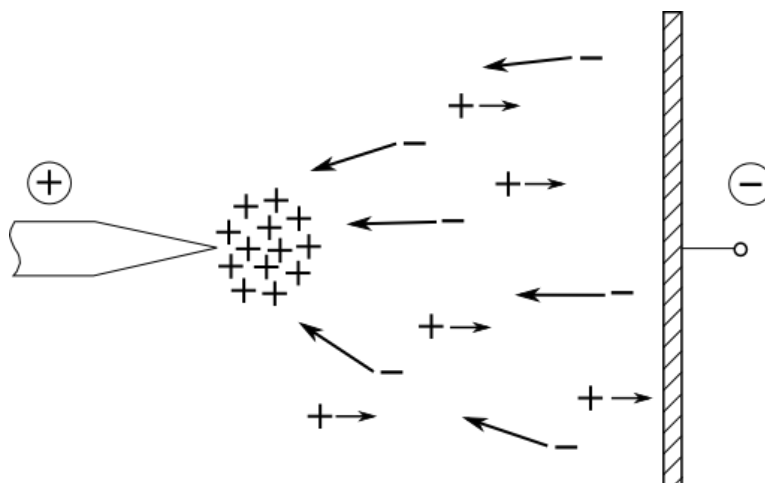
[9]

Pokud 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, později 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 vyšší výbojové aktivitě. [9]



Obr. 1.11. Sestava deska-hrot při pozitivním stejnosměrném napětí [9]

## 2 Vyhodnocení částečných výbojů při střídavém a stejnosměrném napětí

### 2.1 Metody měření

Pro ověření teoretických předpokladů proběhlo v rámci diplomové práce měření základního koronového uspořádání hrot-deska za užití standardizovaného měřicího obvodu pro částečné výboje obsahující vysokonapěťový zdroj ( $\leq 200$  kV střídavých,  $\leq 135$  stejnosměrných), vazební kapacitor ( $C=1000\text{pF} \pm 10\%$ ), měřící impedanci (LDM-5/U,  $Z=50\Omega$ ) a komerčně dostupný Partial Discharge Analyser PD SMART. Při těchto podmínkách byla dosažena měřící citlivost  $\leq 3$  pC. Pro lepší porovnání s údaji získanými při měření střídavým proudem bylo doporučeno IEC 60270 měřené veličiny popisující chování částečných výbojů měřit podle dobře známých PRPD grafů. Před každým měření proběhla standardizovaná kalibrace za použití kalibrátoru systémového

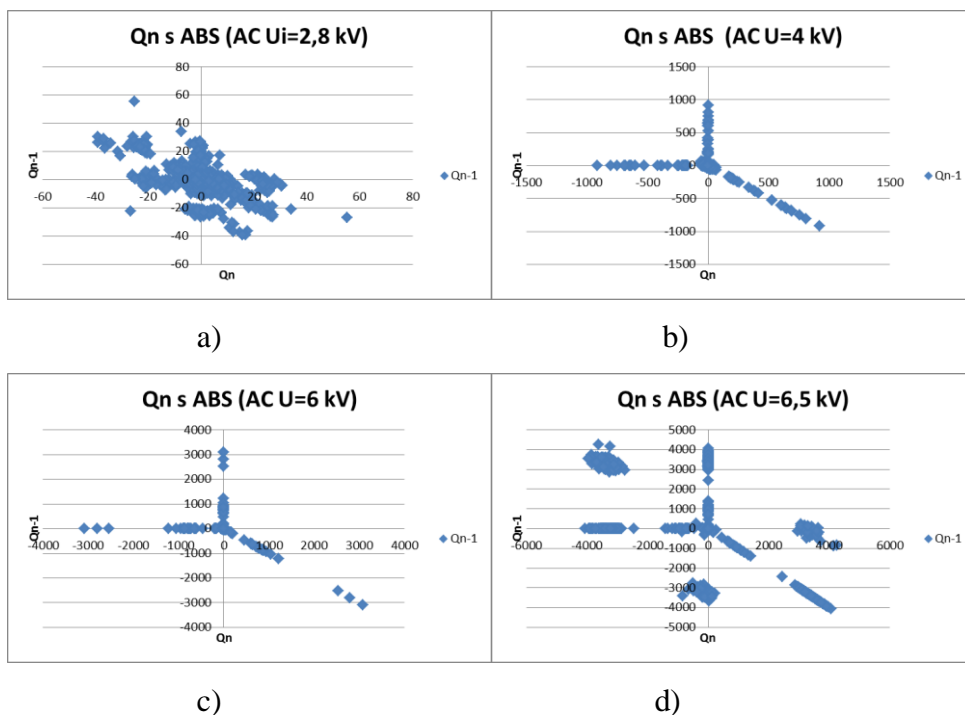
náboje LDC-5/S-3. Měření vnějších částečných výbojů mělo jako horní elektrodu ostrý jehlový hrot (s průměrem  $\sim 30 \mu\text{m}$ ) a jako dolní elektrodu kovovou desku – u některých měření zakrytou izolačním materiálem. Je třeba zmínit, že se průměr hrotu během měření může měnit – pravděpodobně je to způsobováno (korozivními) výbojovými procesy, v závislosti na velikosti použitého napětí a času testování, viz Obr. 2.1. Tloušťka testované vrstvy byla 2 mm a vzdálenost mezi hrotem jehly a izolačním materiálem byla 10 mm. [7]



**Obr. 2.1. Hrot jehly před a po namáhání vysokým napětím [7]**

## 2.2 Vyhodnocení výsledků při střídavém napětí

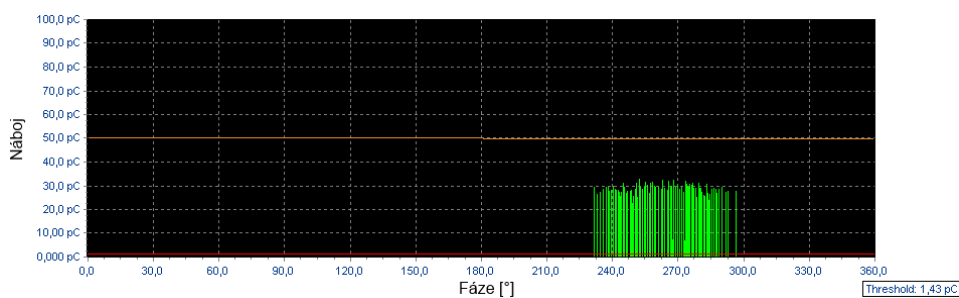
Na Obr. 2.2. je znázorněné vyhodnocení pomocí PSA grafů s veličinami  $\Delta Q_n/\Delta Q_{n-1}$  bez vložené izolace mezi hrot a desku při rozdílných napětích. Všechny hodnoty do grafů jsou brány z absolutních hodnot zdánlivých nábojů. Při zapalovacím napětí částečných výbojů  $U_i = 2,8 \text{ kV}$  (Obr. 2.2. a)) graf nebyl zcela zřetelný, což lze také přičíst vlivu rušení. Při vzrůstajícím napětí se body stále více vzdalovaly počátku a začaly se formovat. Na Obr. 2.2. b) je měření  $\Delta Q_n/\Delta Q_{n-1}$  při střídavém napětí 4 kV. Při napětí 6,5 kV se začaly objevovat další částečné výboje ve třech shlucích s opačnou polaritou než při nižších napětích, viz Obr. 2.2. d). Při vyšších napětích byly hodnoty grafu v rozmezí hodnot -4000 až 4000 – to znamená, že rozdíly zdánlivého náboje mezi po sobě jdoucími výboji byly značně vysoké. Všechny hodnoty těchto grafů byly vypočteny z rozdílů hodnot změřeného zdánlivého náboje, který byl předem převeden na jeho absolutní hodnoty - proto je v názvu grafu uvedeno „s ABS“



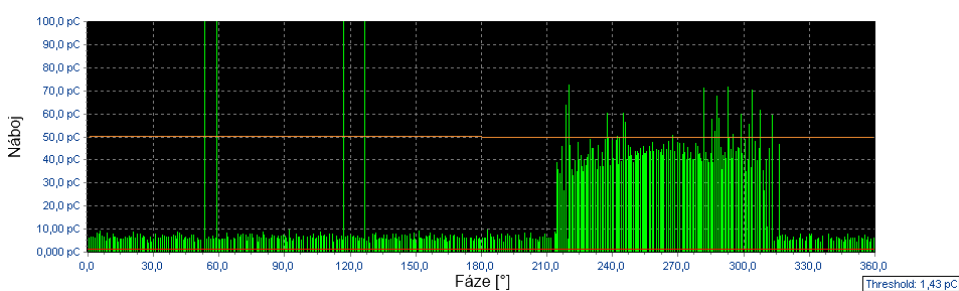
**Obr. 2.2. Průběhy  $\Delta Q_{en}/\Delta Q_{en-1}$  při střídavém napětí ve vzduchu**  
**a) při 2,8 kV b) při 4 kV c) při 6 kV d) při 6,5 kV**

Na Obr. 2.3. jsou pulzní diagramy totožných měření jako na Obr. 2.2, ze kterých byly vytvořeny předchozí grafy PSA. Na svislé ose je vynesena zdánlivý náboj v pikocoulombech a na vodorovné ose fáze napětí (pouze první) ve stupních. Při zapalovacím napětí  $U_i=2,8$  kV (Obr. 2.3. a)) byly detekovány částečné výboje v záporné půlplně periody od  $230^\circ$  do  $290^\circ$  a dosahovaly hodnoty 30 pC. Šum byl filtrován na hodnotě 1,43 pC – všechny výboje s nižší hodnotou nebyly zaznamenávány. U měření při 4 kV (Obr. 2.3. b)) částečné výboje byly detekovány i v kladné půlplně – s menší četností, ale o to s větší amplitudou. V záporné půlperiodě byly částečné výboje detekovány v rozsahu od  $210^\circ$  až do  $310^\circ$ . Velikost zdánlivého náboje se pohybovala okolo 50 pC. Ostatní výboje s nízkou amplitudou lze přičíst vlivu rušení, jelikož i při nulovém napětí ( $0^\circ$ ,  $180^\circ$ ,  $360^\circ$ ) a v jeho okolí, měla výbojová činnost téměř konstantní amplitudu. Při další hodnotě napětí – 6 kV (Obr. 2.3. c)) byla výbojová činnost téměř stejná jako při předchozím napětí, pouze s rozdílem, že částečné výboje v záporné půlplně dosahovaly hodnoty 60 pC. Změna nastala při napětí 6,5 kV (Obr. 2.3. d)). V kladné půlplně již nebyla výbojová činnost zanedbatelná jako v předchozích případech – výboje byly již pravidelné. Další změna nastala v záporné

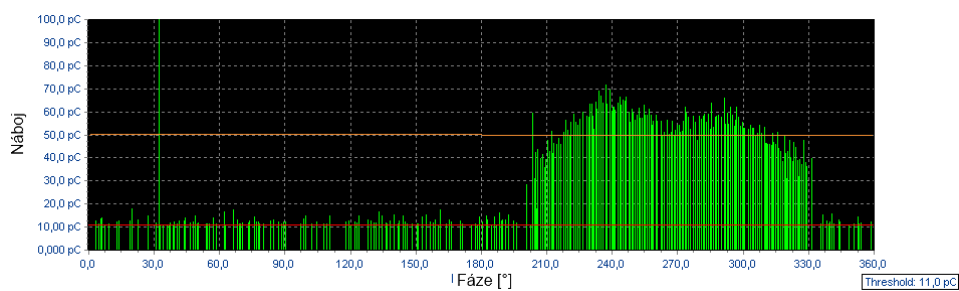
půlplně. Výbojová činnost poklesla v okolí maximálního záporného napětí (v okolí 270°), ale ve zbylé části záporné půlperrody stále dosahovala hodnot 60 pC.



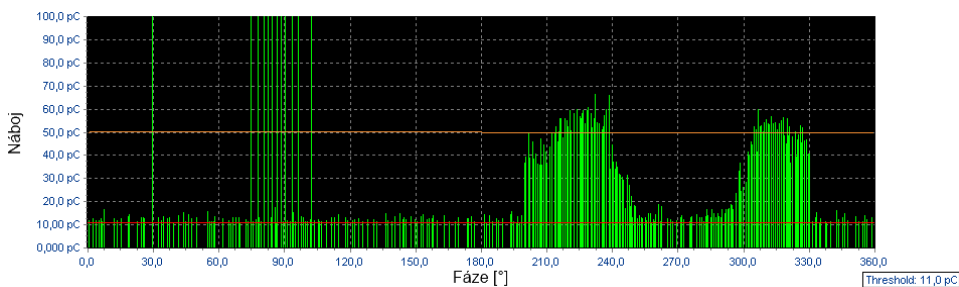
a)



b)



c)

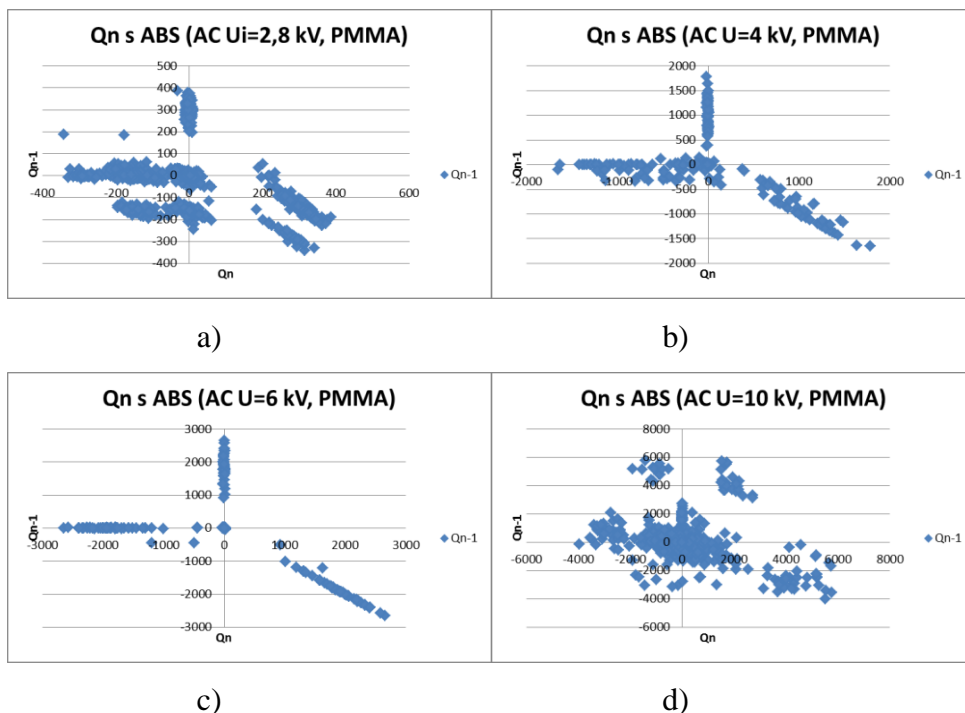


d)

**Obr. 2.3. Pulzní diagramy pro stejnosměrné napětí ve vzduchu**

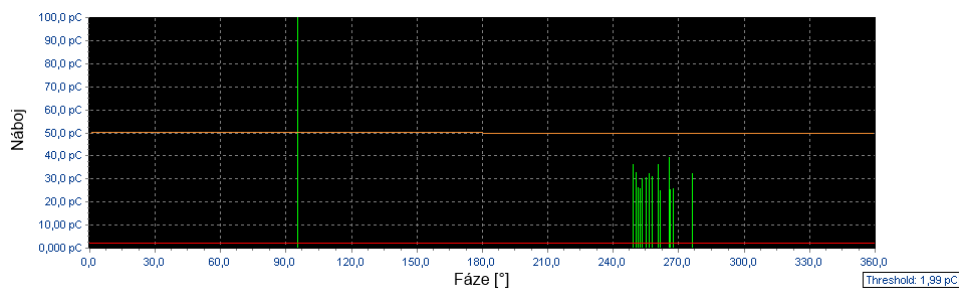
**a) při 2,8 kV b) při 4 kV c) při 6 kV d) při 6,5 kV**

U měření vzorku s vloženou izolační deskou z PMMA mezi desku a hrot byly průběhy měření velice podobné měření částečných výbojů bez izolační desky (Obr. 2.4.). Z počátku při zapalovacím napětí  $U_i=2,8$  kV převládá vliv rušení. S rostoucím napětím se grafy opět začaly formovat jako v předchozím případě. Při vyšších napětích (cca od 10 kV) se objevily další částečné výboje, které vytvořily další shluky bodů v grafu. Graf se pohybuje v hodnotách od -4000 do 6000.

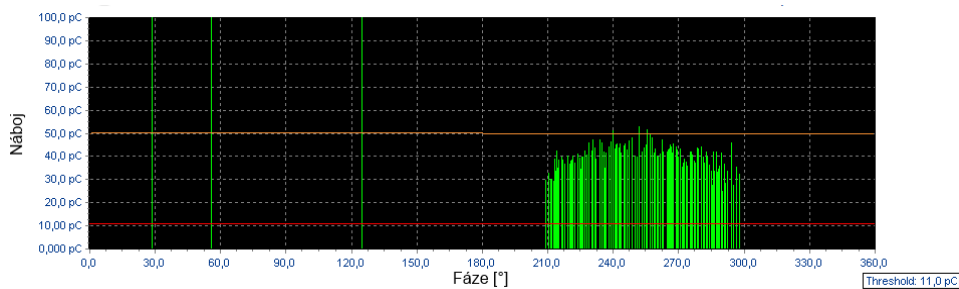


**Obr. 2.4. Průběhy  $\Delta Q_{en}/\Delta Q_{en-1}$  při střídavém napětí s PMMA**  
 a) při 2,8 kV b) při 4 kV c) při 6 kV d) při 10 kV

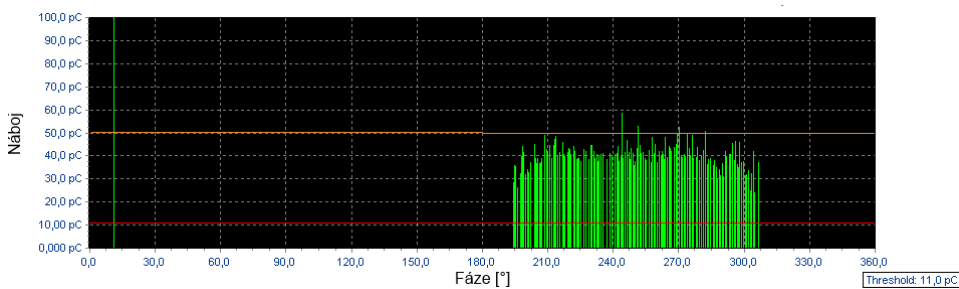
V případě stejnosměrného měření částečných výbojů s izolační deskou z PMMA vloženou mezi desku a hrot byly pulzní diagramy velice podobné jako ve vzduchu. Na Obr. 2.5. a) je vidět, že při stejném zapalovacím napětí ( $U_i=2,8$  kV) mají částečné výboje stejný zdánlivý náboj, pouze četnost částečných výbojů byla zřetelně nižší. Hodnota filtrování šumu byla 1,99 pC. Při napětí 4 a 6 kV byl průběh téměř totožný, jako při měření ve vzduchu. Průběhy jsou znázorněny na Obr. 2.5. b) a c). Filtr byl nastaven na hodnotu 11 pC. Dále při napětí 10 kV (Obr. 2.5. d)) opět vzrostla výbojová činnost v kladné půlvlně v okolí maximálního kladného napětí. Výboje dosahovaly hodnot vyšších než 100 pC. V záporné části periody se vyprázdnila oblast okolo maximální hodnoty záporného napětí.



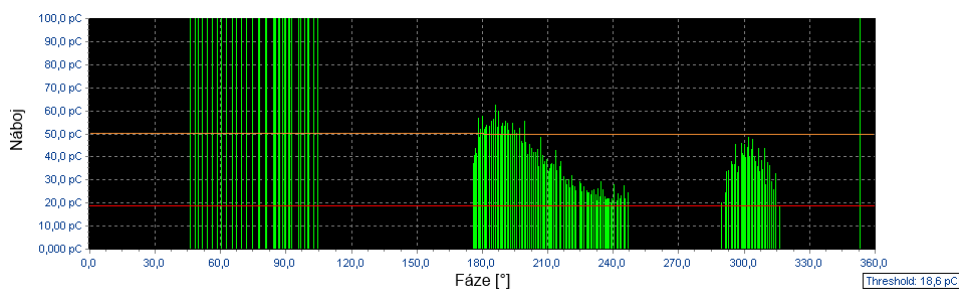
a)



b)



c)



d)

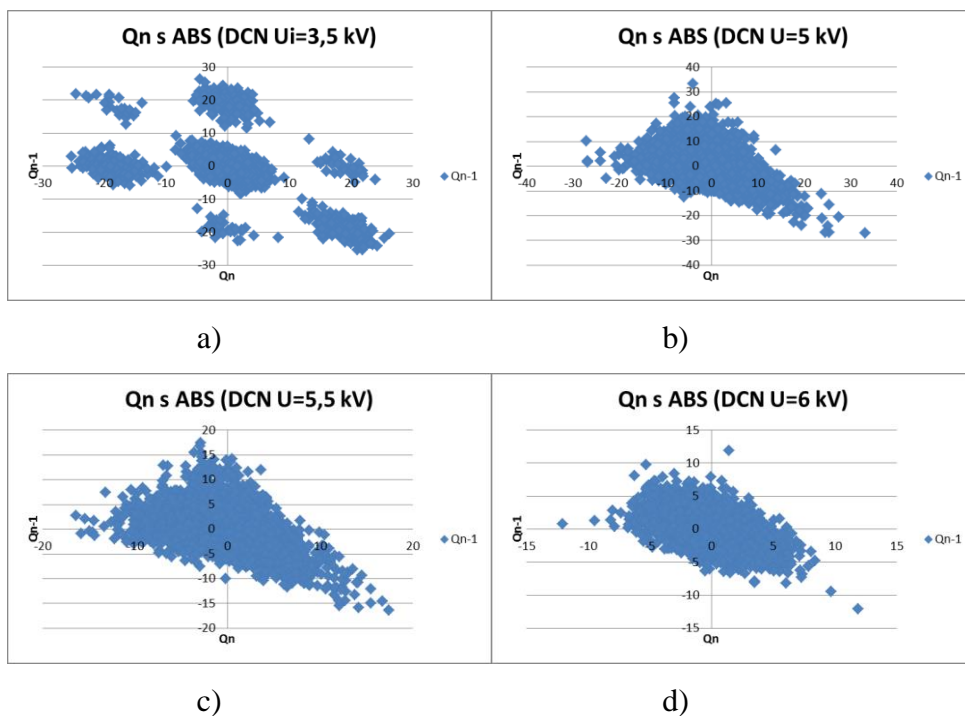
Obr. 2.5. Pulzní diagramy pro střídavé napětí s PMMA

a) při 2,8 kV b) při 4 kV c) při 6 kV d) při 10 kV

### 2.3 Vyhodnocení výsledků při negativním stejnosměrném napětí

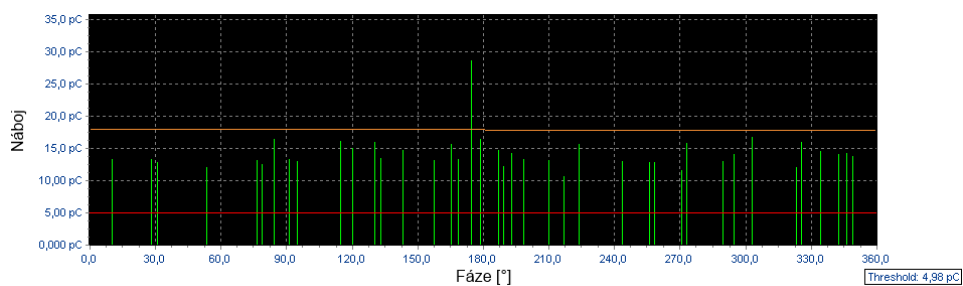
Na Obr. 2.6. jsou vykresleny PSA grafy pro  $\Delta Q_n/\Delta Q_{n-1}$  bez izolační desky při negativním stejnosměrném napětí. Zapalovací napětí částečných výbojů  $U_i=3,5$  kV bylo vyšší než zapalovací napětí při střídavém napětí, ale nebylo tak vysoké jako u

pozitivního stejnosměrného napětí. Průběhy PSA grafů se velice podobají PSA grafům při stejnosměrném napětí, s tím rozdílem, že výsledek byl opačné polarity a pohyboval se v rozmezí hodnot -20 až 20.

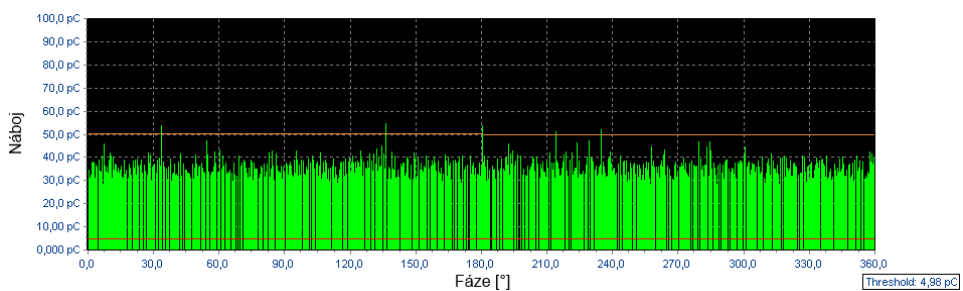


**Obr. 2.6. Průběhy  $\Delta Q_{en}/\Delta Q_{en-1}$  při stejnosměrném negativním napětí ve vzduchu a) při 3,5 kV b) při 5 kV c) při 5,5 kV d) při 6 kV**

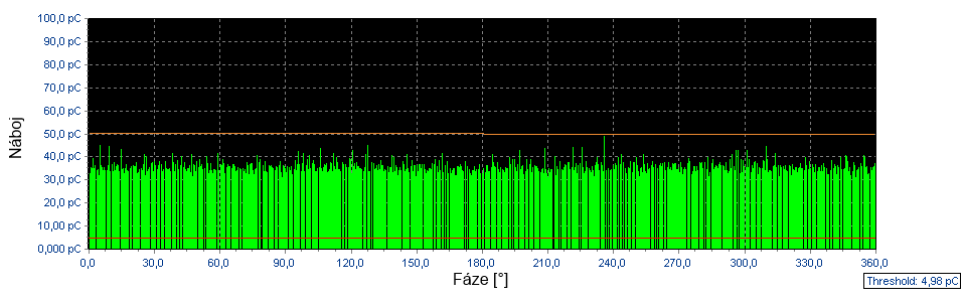
Na pulzním diagramu negativního stejnosměrného napětí ve vzduchu, Obr. 2.7. a) je znázorněn průběh částečných výbojů při zapalovacím napětí  $U_i=3,5$  kV. Při tomto napětí byla četnost výbojů nízká a pravidelná. Hodnoty impulzů se pohybovaly od 10 do 15 pC. Po zvýšení napětí na  $U=5$  kV (Obr. 2.7. b)), výbojová činnost rapidně vzrostla – jak četnost impulzů, tak i jejich hodnota zdánlivého náboje (pohybovala se převážně od 30 do 40 pC). Při dalším vzrůstu napětí na  $U=5,5$  kV (viz Obr. 2.7. c)) se impulzy opět zhustily a jejich amplituda se posunula k hladině 40 pC. Při napětí  $U=6$  kV se zdánlivý náboj částečných výbojů ustálil na hodnotě 40 pC (Obr. 2.7. d)). Po celou dobu měření byla filtrovaná na úroveň 4,98 pC.



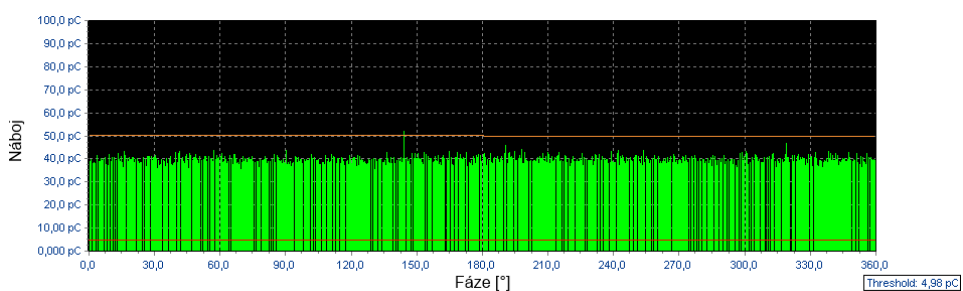
a)



b)



c)



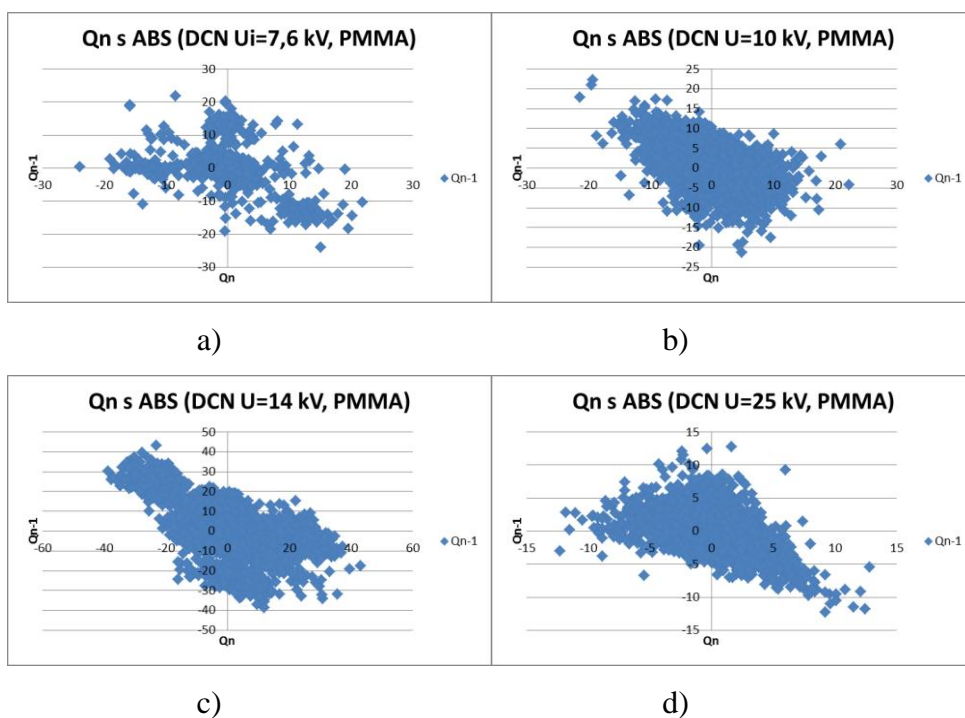
d)

**Obr. 2.7. Pulzní diagramy při negativním stejnosměrném napětí ve vzduchu**  
a) při 3,5 kV b) při 5 kV c) při 5,5 kV d) při 6 kV

U měření s izolační deskou z PMMA vloženou mezi desku a hrot se se vzrůstajícím napětím začal formovat graf podle stejného trendu jako ve vzduchu. Po dosažení hodnoty napětí 20 kV se polarita trendu grafu začala postupně obracet a při 25



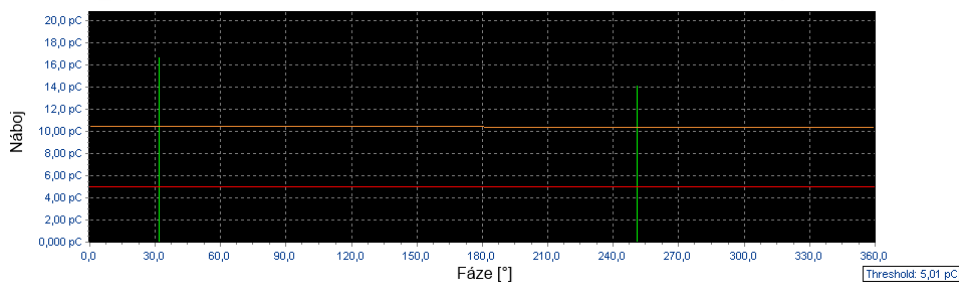
kV byla již zcela opačná. Body byly ve velice malém rozmezí hodnot oproti ostatním druhům měřeného napětí, tj. od -12 do 12. Viz Obr. 2.8.



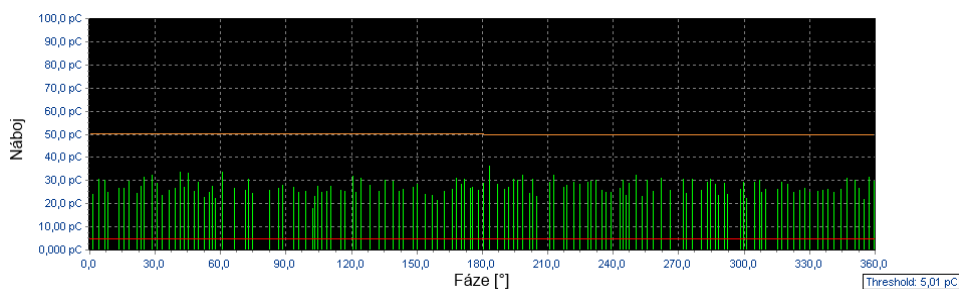
**Obr. 2.8. Průběhy  $\Delta Q_{en}/\Delta Q_{en-1}$  při stejnosměrném negativním napětí s PMMA**

**a) při 7,6 kV b) při 10 kV c) při 14 kV d) při 25 kV**

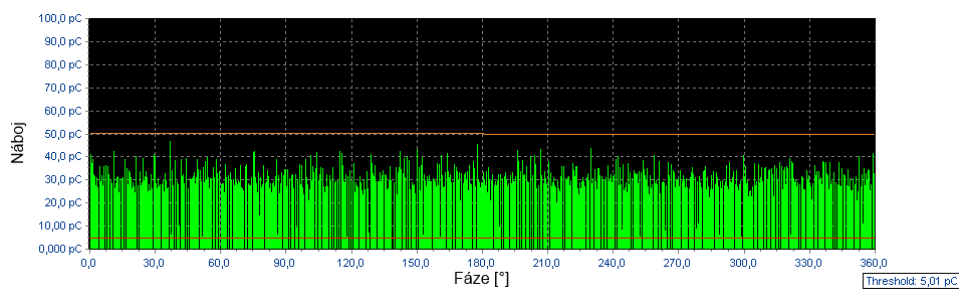
Pulzní diagramy částečných výbojů stejnosměrného negativního napětí s izolační deskou z PMMA mezi elektrodami deska-hrot byly velice podobné jako v případech bez izolační desky. Zapalovací napětí  $U_i$  se posunulo na hodnotu 7,6 kV (Obr. 2.9. a)) a výboje měly průměrnou hodnotu zdánlivého náboje 15 pC. Dále se zvyšujícím se napětím rostly i hodnoty zdánlivého náboje a četnost částečných výbojů. Při napětí 10 kV (Obr. 2.9. b)) již hodnota zdánlivého náboje vzrostla na 30 pC. Při napětí 14 kV (Obr. 2.9. c)) byla detekována vyšší četnost částečných výbojů, ale hodnota zdánlivého náboje se nezměnila. Po dosažení nejvyššího napětí, tj. 25 kV (Obr. 2.9. d)) se výbojová činnost ustálila na hodnotě 35 pC. Filtr byl po celou dobu měření nastaven na hodnotu 5,01 pC.



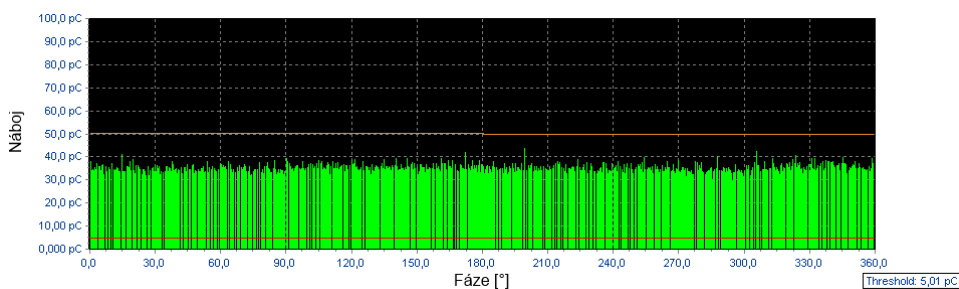
a)



b)



c)



d)

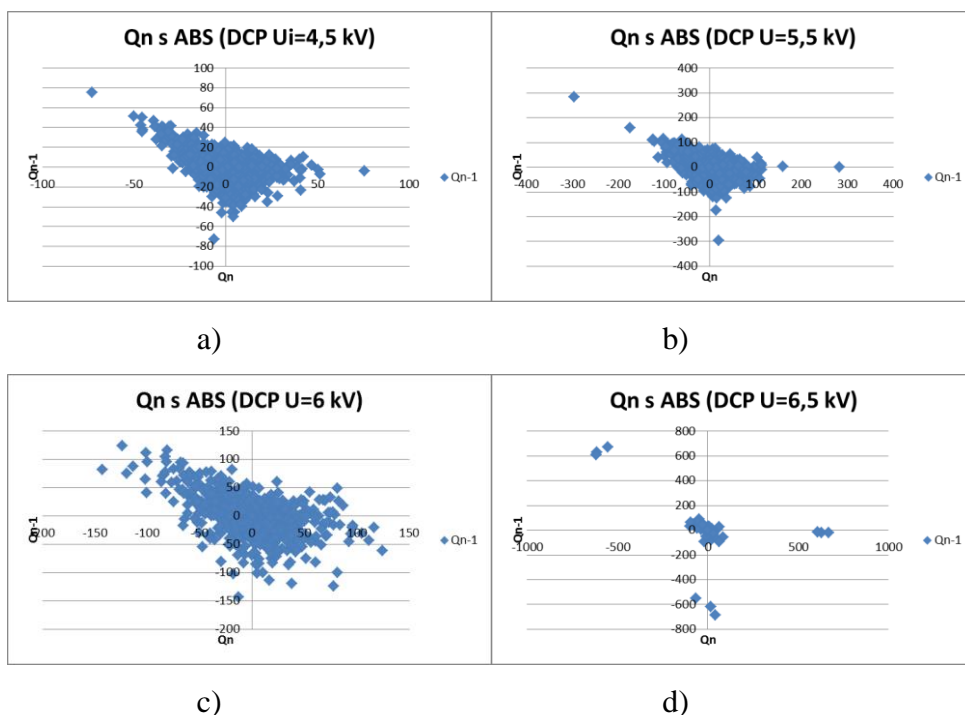
Obr. 2.9. Pulzní diagramy při negativním stejnosměrném napětí s PMMA

a) při 7,6 kV b) při 10 kV c) při 14 kV d) při 25 kV

## 2.4 Vyhodnocení výsledků při pozitivním stejnosměrném napětí

Dále jsou znázorněny PSA grafy pro veličiny  $\Delta Q_n/\Delta Q_{n-1}$ , bez vložené izolace a při pozitivním stejnosměrném napětí (Obr. 2.10). Při zapalovacím napětí částečných

výbojů  $U_i = 4,5$  kV se body formovaly jako při ostatních měřeních. Při vzrůstajícím napětí se opět body vzdalovaly počátku a vliv rušení již nebyl tolik patrný. Při napětí 6,5 kV byly částečné výboje v okolí souřadnic  $[0,0]$  vyvolány pouze rušením. U pozitivního stejnosměrného napětí bylo zapalovací napětí podstatně vyšší než u napětí střídavého. Hodnoty  $\Delta Q_n / \Delta Q_{n-1}$  při vyšších napětích se pohybovaly v oblasti hodnot -500 až 500.

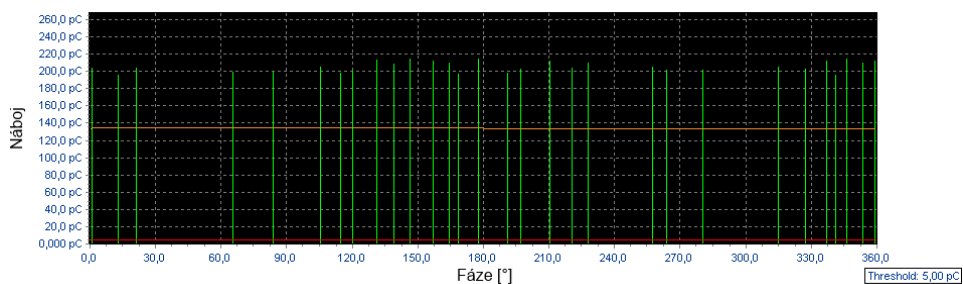


**Obr. 2.10. Průběhy  $\Delta Q_{en} / \Delta Q_{en-1}$  při stejnosměrném pozitivním napětí ve vzduchu**

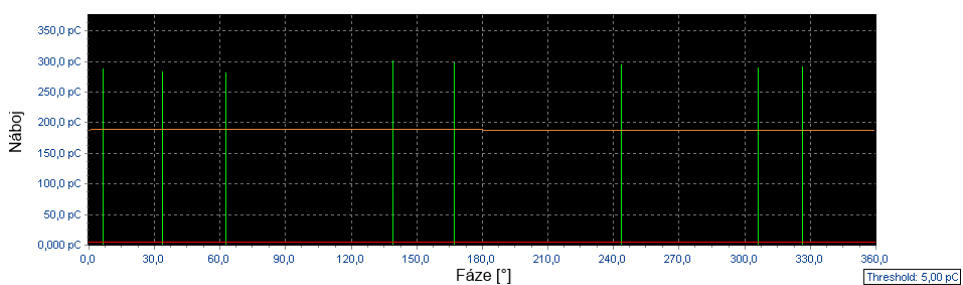
**a) při 4,5 kV b) při 5,5 kV c) při 6 kV d) při 6,5 kV**

Pulzní diagramy částečných výbojů stejnosměrného pozitivního napětí bez izolační desky ukazují vliv nabíjení měřicí soustavy na výbojovou činnost. Při zapalovacím napětí  $U_i = 4,5$  kV (na Obr. 2.11. a)) byla detekována výbojová činnost o zdánlivém náboji 200 pC s mnohem vyšší četností než při zapalovacím napětí u stejnosměrného negativního napětí. Dále pak při napětí 5,5 kV (Obr. 2.11. b)) výbojová činnost poklesla, avšak úroveň zdánlivého náboje částečných výbojů vzrostla na hladinu 250 pC. Tento trend pokračoval i nadále. Další zvýšení napětí (na 6 kV, Obr. 2.11. c)) způsobilo opět útlum četnosti částečných výbojů, ale pokračoval nárůst jejich zdánlivého náboje až na hodnotu 450 pC. Při napětí 6,5 kV byla aktivita výbojů

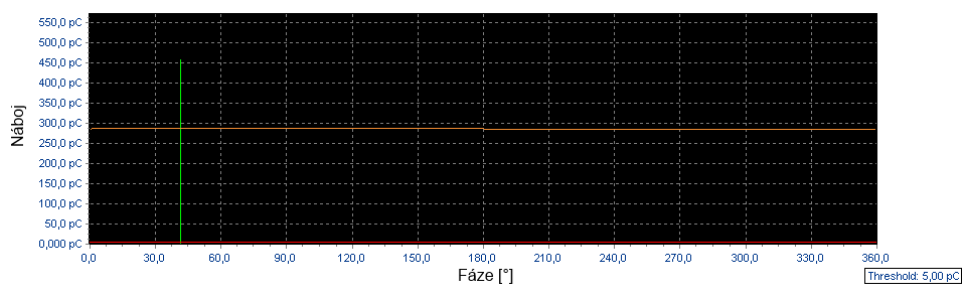
nejnižší, ale výboje dosahovaly nejvyšších hodnot zdánlivého náboje, a to až 630 pC. Tento trend lze přisuzovat vytvoření oblasti kladně nabitých částic v okolí obou měřících elektrod, které zabraňují průchodu elektronů.



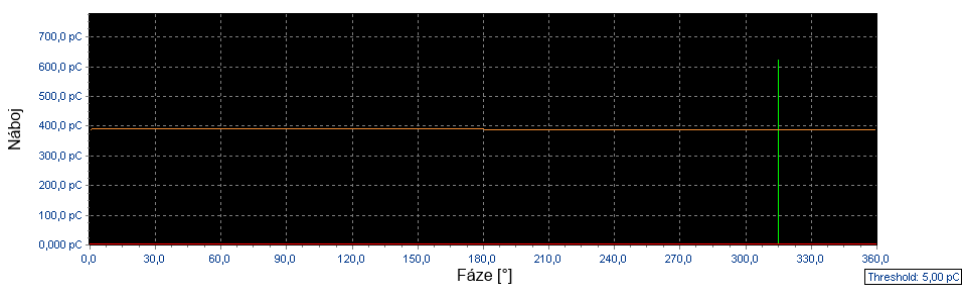
a)



b)



c)

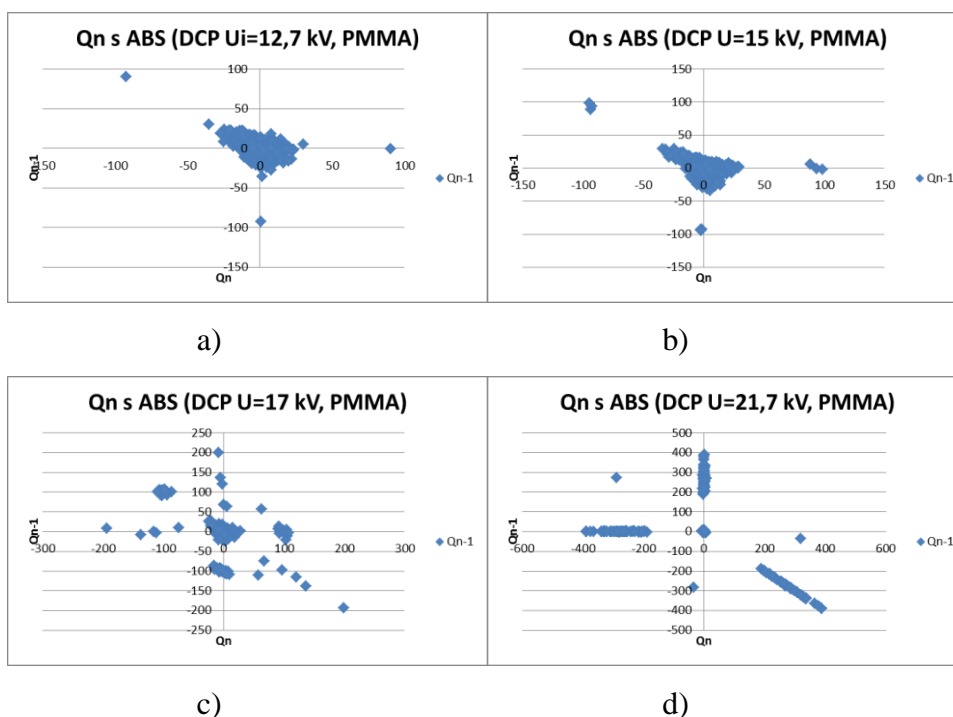


d)

**Obr. 2.11. Pulzní diagramy při pozitivním stejnosměrném napětí ve vzduchu**

**a) při 4,5 kV b) při 5,5 kV c) při 6 kV d) při 6,5 kV**

U pozitivního stejnosměrného měření s izolační deskou PMMA mezi hrotem a deskou byla výbojová činnost podstatně nižší než u měření bez izolační desky – pro porovnání u měření s izolační deskou z PMMA bylo zapalovací napětí částečných výbojů téměř třikrát větší a hodnoty se pohybovaly v podobných mezích, tj. -75 až 75. S rostoucím napětím se body opět vzdalovaly od středu grafu a při hodnotě napětí 17 kV se začaly tvořit segmenty dalších částečných výbojů s opačnou polaritou. Při napětí 21,7 kV se částečné výboje podobaly částečným výbojům u střídavého napětí, viz Obr. 2.12.

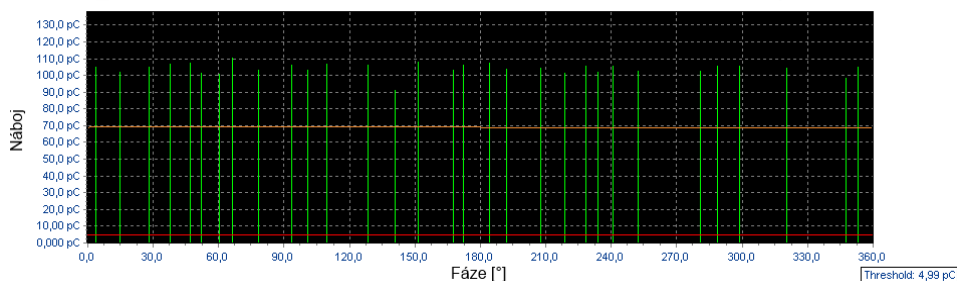


**Obr. 2.12. Průběhy  $\Delta Q_{en}/\Delta Q_{en-1}$  při stejnosměrném pozitivním napětí s PMMA**

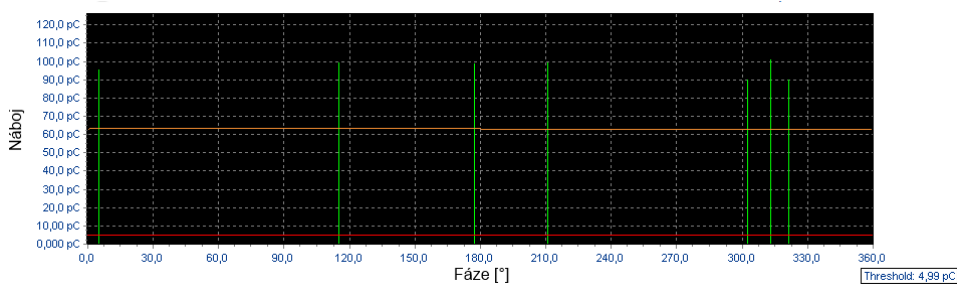
**a) při 12,7 kV b) při 15 kV c) při 17 kV d) při 21,7 kV**

Pulzní diagramy pro měření s izolační deskou z PMMA vsunutou mezi desku a hrot při pozitivním stejnosměrném napětí měly rozdílné výsledky než ve vzduchu. Již při zapalovacím napětí  $U_i=12,7$  kV, které bylo téměř třikrát větší než při měření ve vzduchu, byl zdánlivý náboj pouze 100 pC, což je méně než polovina u měření při pozitivním stejnosměrném napětí bez izolační desky. Viz Obr. 2.13. a). Po zvýšení napětí na 15 kV (Obr. 2.13. b)) se snížila výbojová aktivita, ale úroveň zdánlivého náboje zůstala na stejné hodnotě. Stejně tak jako v další části měření – napětí 17 kV,

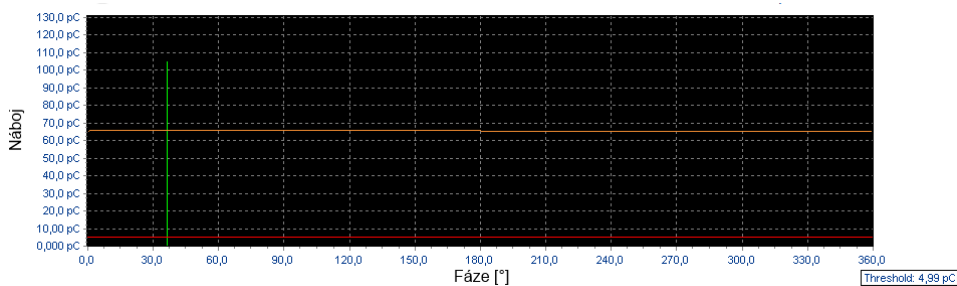
nižší četnost částečných výbojů a zdánlivý náboj 100pC, viz Obr. 2.13. c). Naopak při posledním měření při napětí 21,7 kV (Obr. 2.13. d)) částečné výboje dosahovaly velice nízké četnosti a úrovně zdánlivého náboje (6 pC). Filtr byl celou dobu nastaven na hodnotu 4,99 pC.



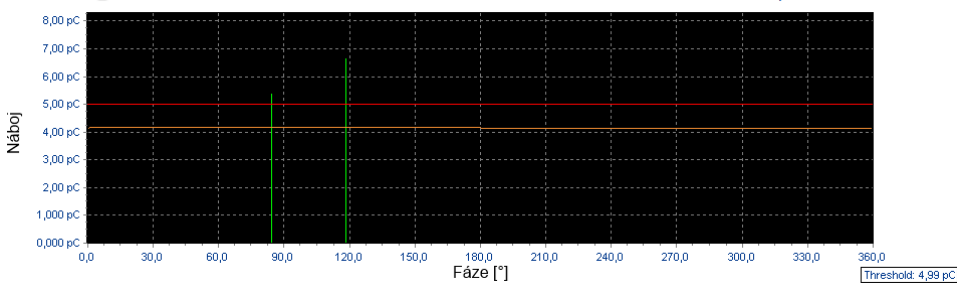
a)



b)



c)



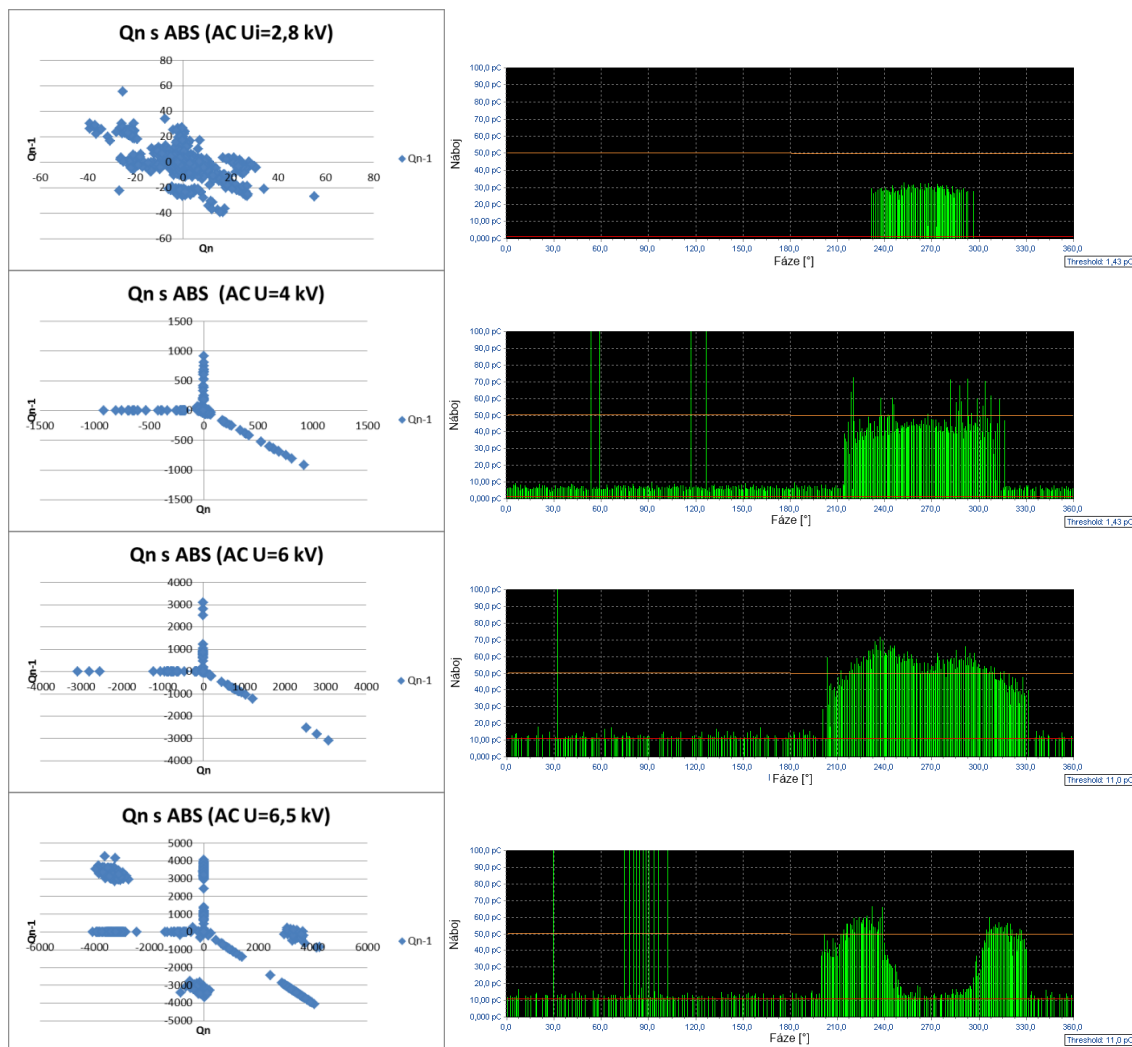
d)

**Obr. 2.13. Pulzní diagram při pozitivním stejnosměrném napětí s PMMA**

a) při 12,7 kV b) při 15 kV c) při 17 kV d) při 21,7 kV

### 3 Porovnání naměřených dat

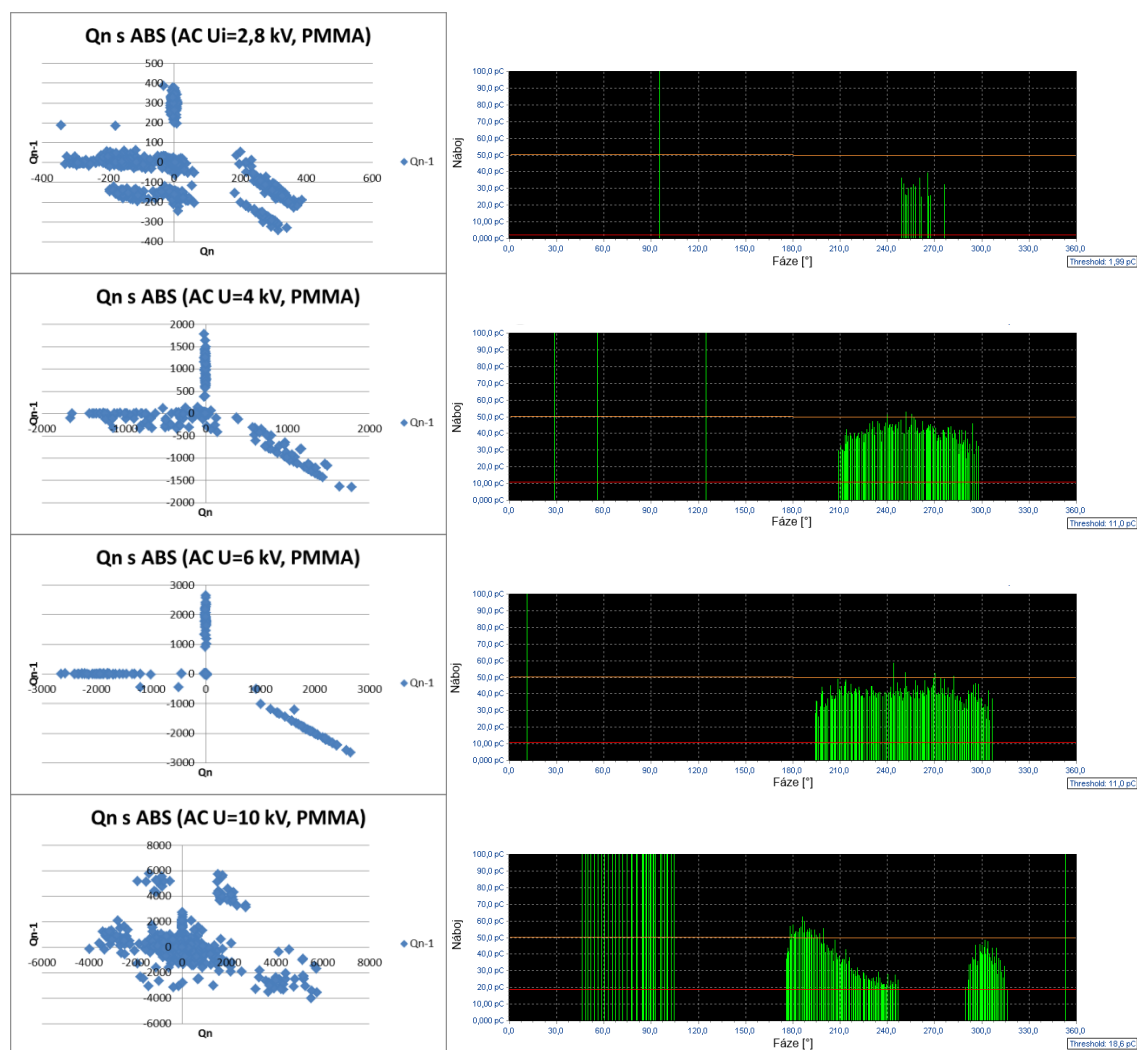
V této kapitole jsou porovnány PSA grafy s pulzními diagramy odpovídajících napětí a druhů izolace. Je zde zřetelné jak rozložení částečných výbojů a jejich velikost ovlivňuje PSA grafy. Porovnání PSA grafů při rozdílných druzích napětí a s izolační deskou z PMMA a bez ní je uvedeno v příloze.



**Obr. 3.1 Porovnání PSA grafů a pulzních diagramů u střídavého napětí uspořádání deska – hrot**

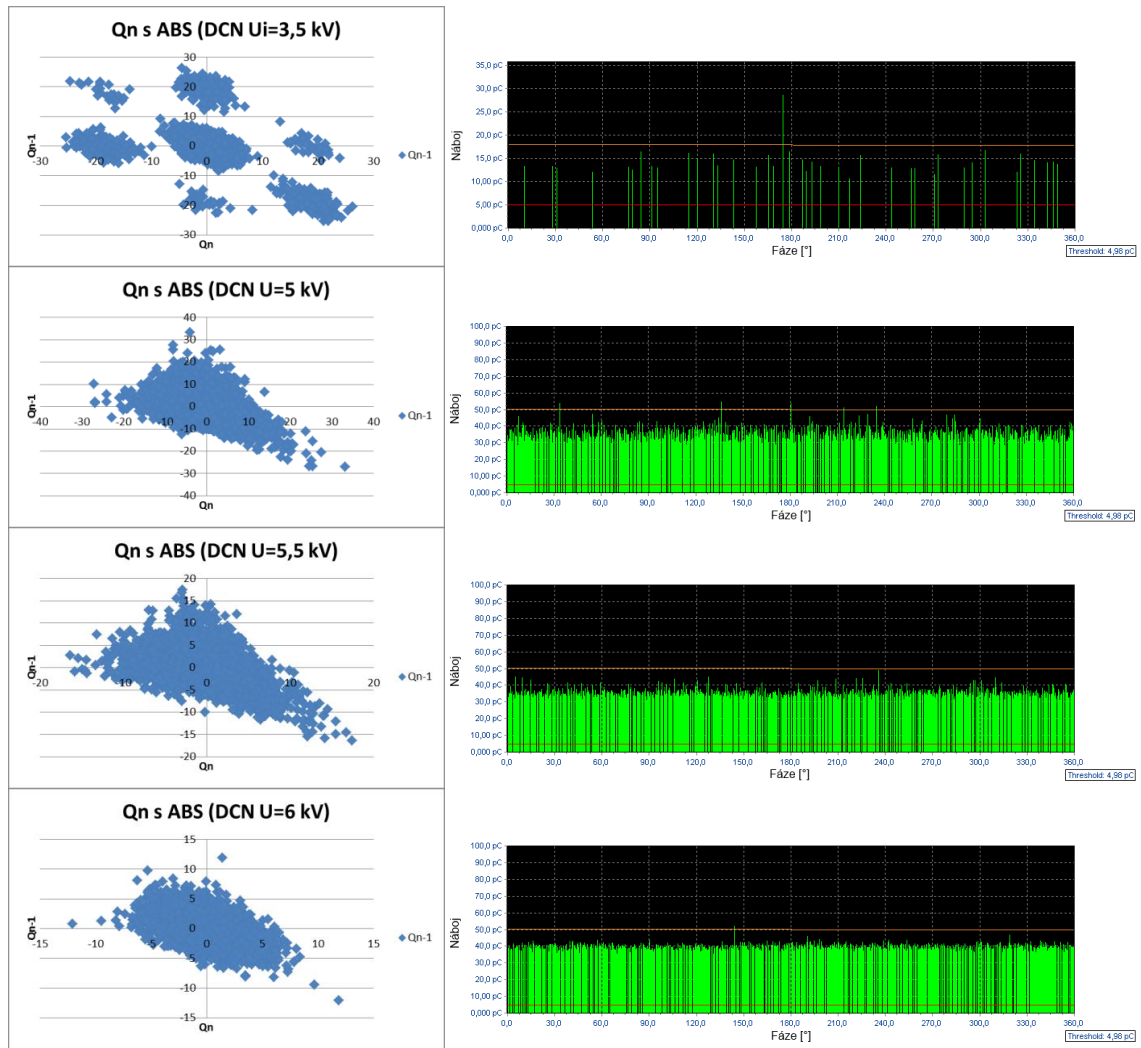
Na Obr. 3.1. Obr. 3.1 Porovnání PSA grafů a pulzních diagramů u střídavého napětí uspořádání deska – hrotje viditelné, jak impulzy částečných výbojů v kladné půlperiodě se formují v opačné polaritě v PSA grafu než impulzy z půlperiody záporné. Vznik vyprázdňené oblasti v okolí maxima záporné půlperiody je způsoben nedostatkem

měřicích systémů – četnost částečných výbojů je tak vysoká, že měřicí systém není schopen zpracovat takové množství dat.

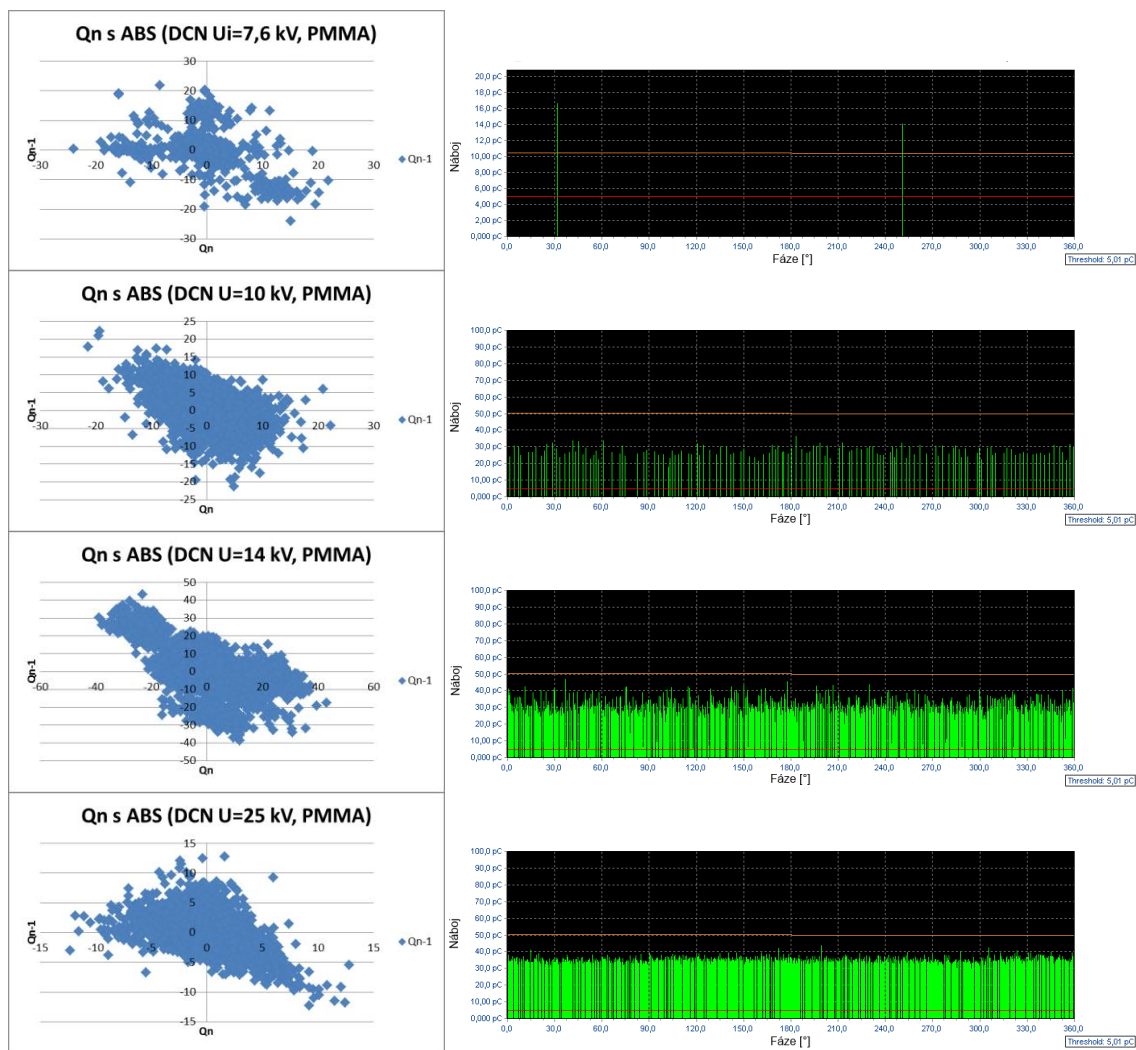


**Obr. 3.2** Porovnání PSA grafů a pulzních diagramů u střídavého napětí uspořádání deska – hrot s izolační deskou z PMMA

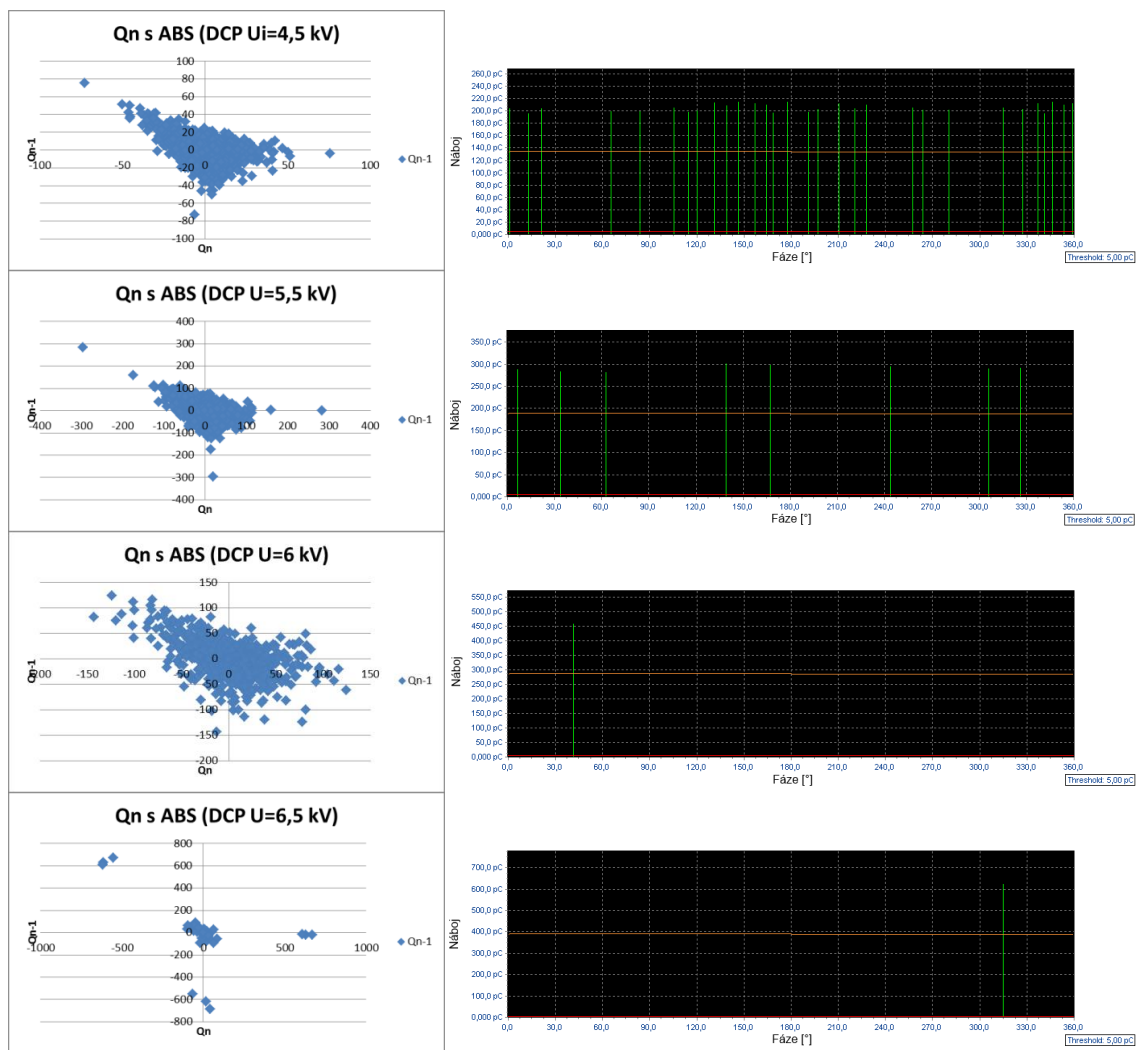




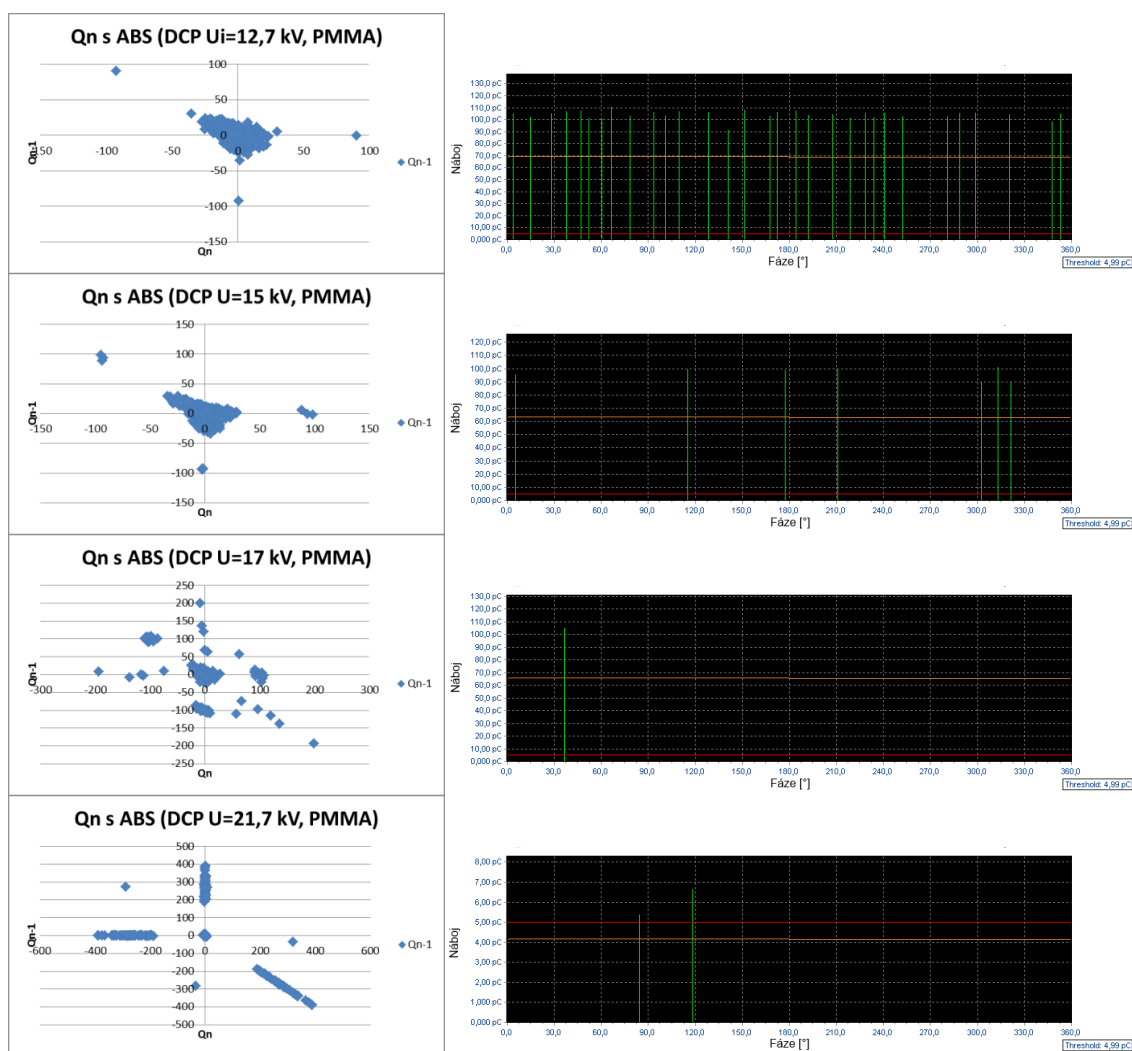
**Obr. 3.3 Porovnání PSA grafů a pulzních diagramů u negativního stejnosměrného napětí uspořádání deska – hrot**



**Obr. 3.4 Porovnání PSA grafů a pulzních diagramů u negativního stejnosměrného napětí uspořádání deska – hrot s izolační deskou z PMMA**



**Obr. 3.5 Porovnání PSA grafů a pulzních diagramů u pozitivního stejnosměrného napětí uspořádání deska – hrot**



Obr. 3.6 Porovnání PSA grafů a pulzních diagramů u pozitivního stejnosměrného napětí uspořádání deska – hrot s izolační deskou z PMMA

## 4 Přehled dostupné měřící techniky

### 4.1 Omicron

Prvním výrobcem, který má největší sortiment měřící techniky částečných výbojů je firma Omicron. Byla založena před třiceti lety v Rakousku, kde začala vyvíjet testovací sady pro různé aplikace. Nyní Omicron dodává testovací, diagnostické a monitorovací vybavení pro elektro průmysl po celém světě. [17]

### **Omicron MPD 500**

Omicron MPD 500 je měřicí systém částečných výbojů pro přejímkové a rutinní testování, distribučních transformátorů, motorů, průchodek atd.

- Nejjednodušší měření částečných výbojů s jednoduchým vyhodnocováním
- Automatický systém rychle rozhoduje o přijetí či odmítnutí zařízení
- Bezpečný provoz díky kompletní elektrické izolaci celého měřícího zařízení
- Detailní eliptické zobrazení částečných výbojů a PRPD (Q,  $\varphi$ , n) grafů
- Cenově dostupný systém pro běžné měření a testy v provozech

[17]

### **Omicron MPD 600**

Omicron MPD 600 je vyšší třída měřících a analytických systémů částečných výbojů. Využívá se pro testování transformátorů, GIS s rozšířením pro ultra vysoké frekvenční rozsahy, měření na točících strojích a místní testování a lokalizaci závad u kabelů

- Vysoká odolnost proti rušení pro měření částečných výbojů i při ztížených měřících podmínkách
- Vysoká měřicí přesnost díky kompletnímu digitálnímu zpracování dat
- Možnost rychle a snadno rozšířit na neomezený počet virtuálních měřících kanálů
- Nahrávání a následné přehrávání měření s možností plného řízení
- Kompatibilita s normou IEC 60270 – potvrzeno nezávislým měřícím institutem.

[17]

### **Omicron OMS 600**

Statically uložený měřicí systém Omicron OMS 600 pro průběžné měření výbojové činnosti. Umožňuje nepřetržité monitorování částečných výbojů ve statorových izolacích točivých strojů.

- Čtení dat ze synchronních multi-kanálů
- Pokročilé technologie jako 3PARD a 3CFRD pro rozlišení částečných výbojů
- Několik hradlových metod pro potlačení šumu (amplitudová, fázová, dynamická, frekvenční, kanálová)
- Mezi měřicí jednotkou a serverem je přenos dat zajištěn optickým vláknem
- Vysoká kapacita vazebních kondenzátorů (až do 2,2 nF)

[17]

### **Omicron OMS 605**

Přenosný měřicí systém Omicron OMS 605 pro periodické či dočasné monitorování výbojové činnosti na prvcích vysokého napětí, točivých strojích a kabelových systémech.

- Tři kanály pro synchronizované získávání dat
- Kufřík opatřen kolečky pro lehké přemístění na různá místa měření
- Měřicí systém pro náročné podmínky provozu (krytí IP65)
- Jednoduché a rychlé připojení měřicích modulů (systém plug-and-play)
- Kompatibilní s velkou škálou senzorů
- Komplexní analýza dat a vyhodnocení

[17]

### **Omicron OMS 800**

Pevně umístěný měřicí systém Omicron OMS 800 pro průběžné měření výbojové činnosti na vysokonapěťových kabelech a jejich příslušenstvích. Pro údržbu vysokonapěťových prvků.

- Inteligentní předběžné zpracování holých dat koncentrátorovou jednotkou
- Pokročilé oddělování dat synchronním multikanálovým a multispektrálním systémem
- Následné zpracování dat prováděno expertním systémem pro získání užitečných informací ohledně stavu izolačního systému
- Induktivní napájecí zdroj pro vnější napájení jednotek

[17]

## 4.2 Haefely Test AG

Dalším výrobcem měřicí techniky pro částečné výboje je firma Haefely Test AG. Tato firma byla založena roku 1904 Emilem Haefely ve Švýcarsku a je dodavatelem vysokonapěťové měřicí techniky. [18]

### **DDX 9121b**

DDX 9121b je modulární měřicí systém pro měření částečných výbojů.

- Až devět souběžných měřících vstupů
- Odpovídá normě IEC 60270
- Měření elektromagnetické interference
- Umožňuje detekci částečných výbojů při stejnosměrném napětí
- Automatické vyhodnocení vyhovujícího/nevhovujícího stavu zařízení na základě časové analýzy

[18]

### **DDX 7000 / DDX 7000SL / DDX 8003**

Tyto pokročilé detektory částečných výbojů dosahují vysoké měřicí přesnosti díky digitálnímu zpracování dat.

- Zahrnují potlačení šumu a lokalizátor poruch kabelů
- Vyhodnocování naměřených dat v reálném čase
- Spojuje analogový a digitální systém měření

[18]

## **DDX 9101**

DDX 9101 je efektivní řešení pro rutinní analogové testování částečných výbojů

- Automatické vyhodnocení vyhovujícího/nehovujícího stavu zařízení
- Kompatibilní s normami IEC a IEEE/ANSI pro testování částečných výbojů
- Přímá náhrada za starší analogové detektory jakékoli značky
- Snadno ovladatelný měřicí systém za přijatelnou cenu

[18]

## **4.3 Doble**

Firma Doble pomáhá svým zákazníkům vylepšovat chod a zvyšovat výkon systémů vysokého napětí více jak 85 let, ve 110 zemích světa. Doble nabízí diagnostická zařízení, služby a největší databázi statisticky důležitých výsledků testů na celém světě. [19]

### **PD-Smart**

PD-Smart je nová generace měřicích systémů částečných výbojů od firmy Doble. Spojuje moderní technologii a 40 let zkušeností práce s částečnými výboji. Tento systém umožňuje synchronní měření částečných výbojů, měření ve výrobě a používání multikanálů všech vysokonapěťových zařízení. [19]

### **LDS-6**

LDS-6 je sofistikovaný digitální měřicí systém částečných výbojů, který zahrnuje detekci částečných výbojů v souladu s mezinárodně uznávanými normami jako jsou IEC 60270, VDE 0434, ICEA T-24-380. LDS-6 je vybaven Doble Lemke analytickým a diagnostickým softwarem, který zajišťuje kompletní vyhodnocení částečných výbojů. [19]



## 5 Závěr

Cílem předložené diplomové práce bylo provést rešerši teorie částečných výbojů pro střídavé a stejnosměrné napětí, praktické porovnání výbojové činnosti pro střídavé a stejnosměrné napětí, analýza naměřených dat při laboratorních experimentech a vytvoření přehledu dostupné měřicí techniky částečných výbojů.

Jelikož světový trend směřuje k návratu 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 a vybrané elektrické metody měření – detekce částečných výbojů globální metodou a detekce částečných výbojů na základě časového rozlišení impulzů. V kapitole 1.3 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 a třetí kapitole byla specifikována laboratorní aparatura, která byla použita během experimentů, a vyhodnoceny získané údaje. Vyhodnocení bylo rozděleno do tří částí rozdělených podle použitého měřicího napětí. Pro každý druh napětí byly uvedeny čtyři PSA grafy pro určitá napětí, počínaje napětím zapalovacím a čtyři pulzní diagramy pro totožná napětí. S ohledem na PSA grafy vyplynulo, že chování nejbližší střídavému napětí má stejnosměrné pozitivní napětí, avšak s mnohem vyšším zapalovacím napětím, což je způsobeno nahromaděním kladných částic na hrotu jehly. Dále z grafů vyplynulo, že při obou druzích stejnosměrného napětí mají PSA grafy tendenci při určité hladině měřicího napětí obracet svojí polaritu. Tento jev nemá známou příčinu, avšak jeho objasnění by se mohlo stát námětem dalších experimentů či výzkumu. Na závěr bylo provedeno porovnání PSA grafů a pulzních diagramů.

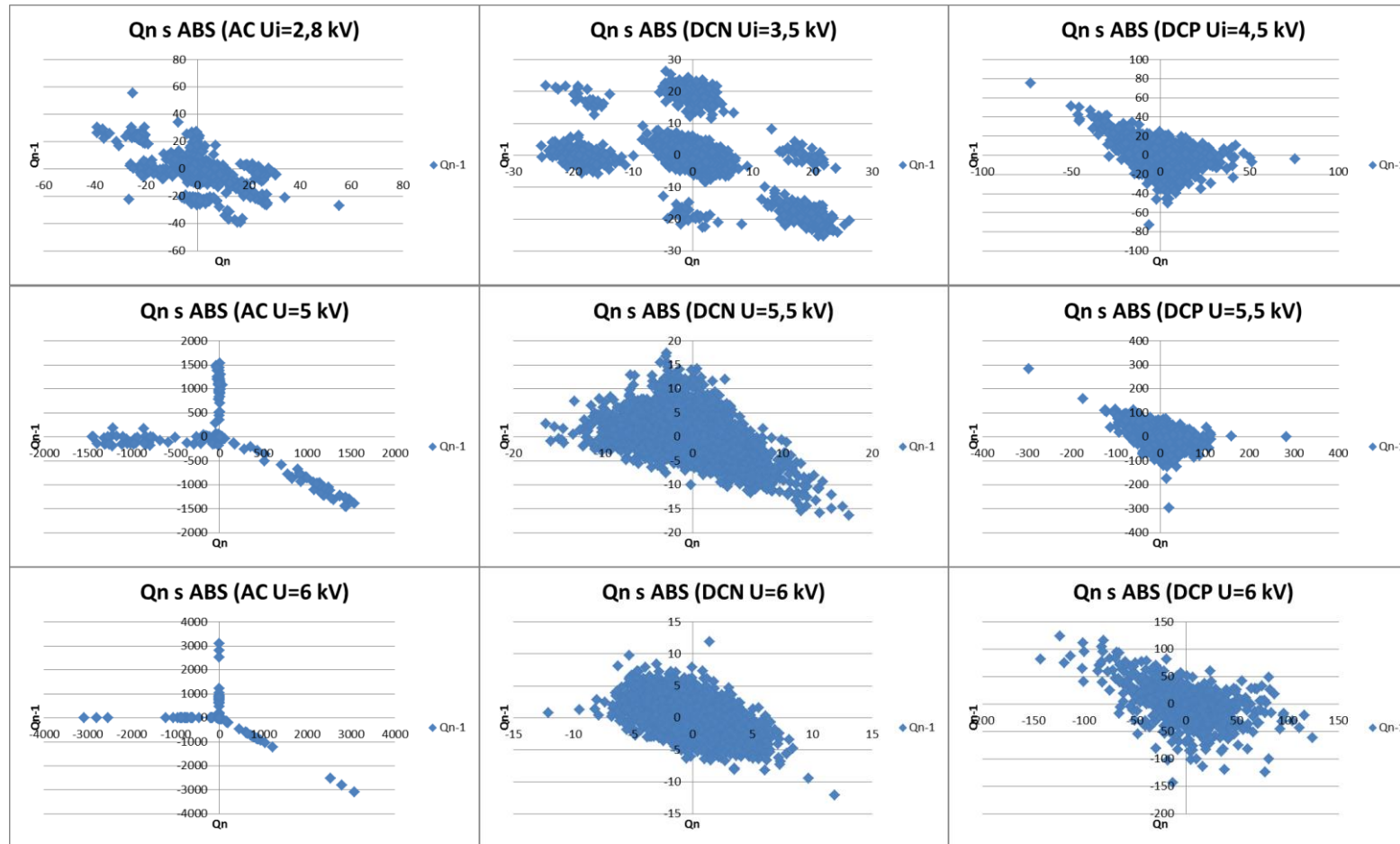
V poslední kapitole této diplomové práce byl uveden přehled dostupné měřicí techniky a to od nejvýznamnějších firem v oboru měření částečných výbojů - Omicron, Haefely Test AG a Doble.

## Použitá literatura

- [1] R. Schwarz, H. M. Muhr, *Partial Discharge Impulse Characteristics of Different Detection Systems*, 2007
- [2] M. Jeronense, *Charges and discharges in HVDC cables: in particular in mass-impregnated HVDC cables*. Delft, The Netherlands: Delft University Press, 1997. ISBN 904071438x.
- [3] L. Prskavec, *Měření částečných výbojů*, Semestrální project, ČVUT Praha, 2000
- [4] Tianyan Jiang, A. Cavallini, G. C. Montanari, Jian Li, *Partial Discharge Activities of Pressboard/oil Insulation under AC plus DC Voltages*, 2013
- [5] U. Fromm, *Interpretation of partial discharges at dc voltages*, Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on , vol.2, no.5, pp.761-770, Oct 1995
- [6] U. Fromm, *Partial discharge and breakdown testing at high DC voltage*. Delft: Technische Universiteit Delft, 1995. ISBN 9040711550.
- [7] J. Pihera, P. Mraz, R. Haller, *Partial discharges under AC and DC test conditions*, 14th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE), Kouty nad Desnou, Czech republic, 2013
- [8] F. Kreuger, *Partial discharge detection in high-voltage equipment*. Boston: Butterworths, 1989, ix, 193 p. ISBN 0408020636.
- [9] J. Pihera, P. Mraz, R. Haller, *Partial Discharge Evaluation at DC Voltage*, 2014
- [10] J. Pihera, P. Martínek, P. Trnka, P. Netolický, 2008. ElectroScope. Analýza signálu pulzů částečných výbojů [online]. (2) [cit. 2015-05-06]. ISSN 1802-4564. Dostupné z: 147.228.94.30/images/PDF/Rocnik2008/cislo2\_2008/r2c2c1.pdf
- [11] T. Havlíček, *Částečné výboje v elektronických zařízeních pracujících na vyšších kmitočtech*, Dizertační práce, VUT Brno, 2009
- [12] H. M. Ryan, *High voltage engineering and testing*. Chapter 4: HVDC and power electronic system, Gearóid ó hEidhin, 3rd edition. London: Institution of Engineering and Technology, 2013. ISBN 9781849192637.

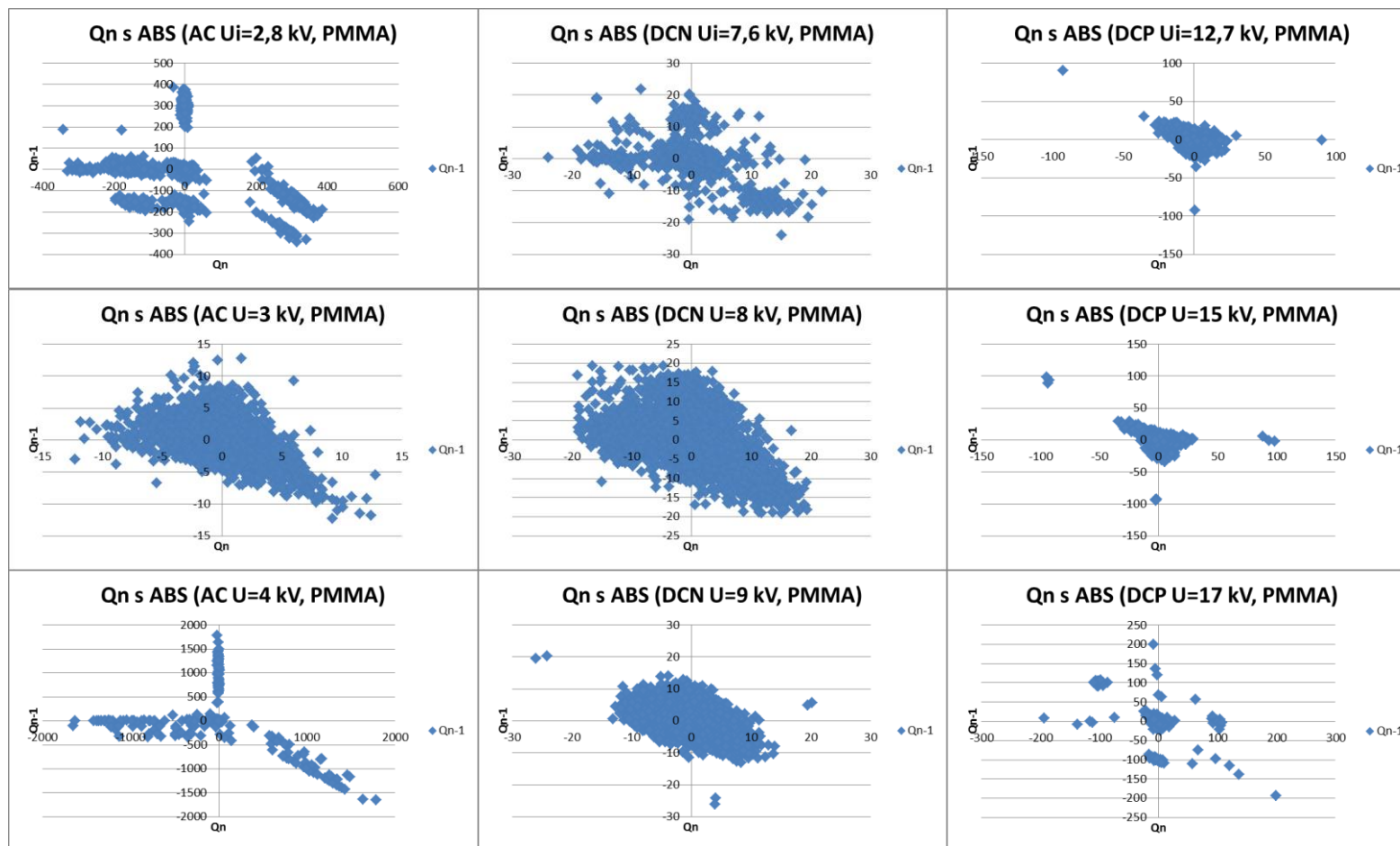
- [13] H. M. Ryan, *High-Voltage Engineering and Testing*, Chapter 1: Electric power transmission and distribution systems, I.A. Erinmez, 3rd edition. London: Institution of Engineering and Technology, 2013. ISBN 9781849192637.
- [14] H. M. Ryan, *High-Voltage Engineering and Testing*, Chapter 17: Partial discharges measuring techniques, Ernst Gockenbach, 3rd edition. London: Institution of Engineering and Technology, 2013. ISBN 9781849192637.
- [15] E. C. Rogers, D. J. Skipper, *Gaseous Discharge Phenomena in HV dc Cable Dielectrics*, Proc. IEE, Vol. 107, Part A, pp. 241-254, 1960
- [16] U. Fromm, P. H. F. Morshuis, *The Discharge Mechanism in Gaseous Voids at dc Voltage*, 9th ISH, Paper 4154, Graz, 1995
- [17] *Omicron* [online]. 2015 [cit. 2015-04-08]. Dostupné z: <https://www.omicron.at/en/>
- [18] *Haefely Test AG* [online]. 2015 [cit. 2015-04-08]. Dostupné z: <http://www.haefely.com/>
- [19] *DOBLE* [online]. 2015 [cit. 2015-04-08]. Dostupné z: <http://www.doble.com>
- [19] V. Mentlík, J. Pihera, R. Polanský, P. Prosr, P. Trnka, *Diagnostika elektrických zařízení*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2008, 439 s. ISBN 978-80-7300-232-9.
- [20] ČSN EN 60270. *Technika zkoušek vysokým napětím - Měření částečných výbojů*. Praha: ČSNI, Prosinec 2001
- [21] M Hoof, R. Patsch, *Pulse-Sequence Analysis: a new method for investigating the physics of PD-induced ageing*, IEE Proc.-Sci. Meas. Technol., Vol. 142, 1995
- [22] Y. Z. Arief, *Partial discharge characteristics in polymeric insulating material: experimental investigation on XLPE power cable and XLPE/EPR interfacial phenomena*. Saarbrücken: VDM Verlag, 2009. ISBN 9783639181777
- [23] K. Záliš, *Částečné výboje v izolačních systémech elektrických strojů*. Vyd. 1. Praha: Academia, 2005, Česká matice technická (Academia). ISBN 80-200-1358-x.

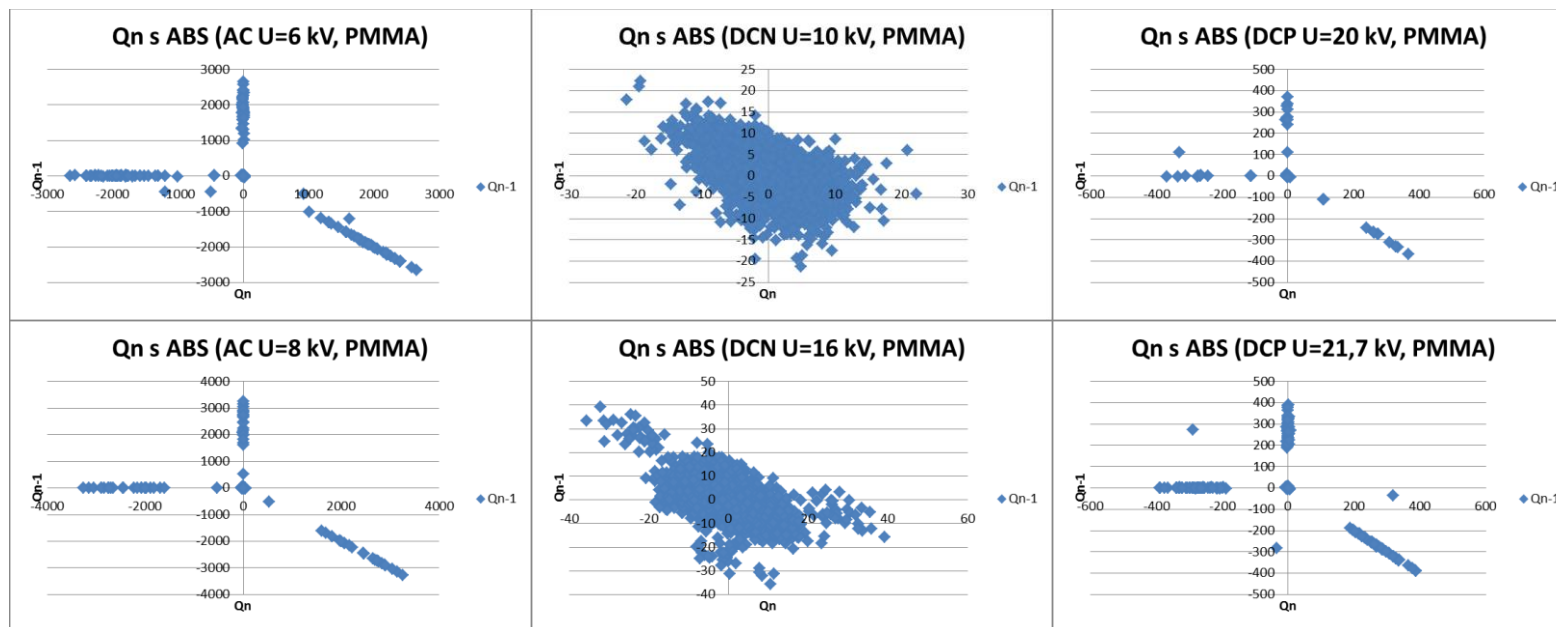
## Příloha č.1 – Porovnání PSA grafů bez izolační desky



Obr. 1. PSA grafy bez izolační desky pro různá napětí

## Příloha č.2 – Porovnání PSA grafů s izolační deskou z PMMA





Obr. 2. PSA grafy s izolační deskou z PMMA pro různá napětí