

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE**

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Výboje v AC a DC vysokonapět'ových systémech**

*Originál (kopie) zadání BP/DP*

## **Abstrakt**

Uvedená diplomová práce je zaměřena na problematiku částečných výbojů při střídavém a stejnosměrném napětí. Zabývá se mechanismem, měřením, analýzou a interpretací částečných výbojů při stejnosměrném napětí. V práci je uvedené měření vzniku korony a časosběrné měření vnitřních výbojů a korony pro AC a DC a jejich grafická analýza.

## **Klíčová slova**

Částečné výboje, AC, DC, vnitřní částečné výboje, korona, povrchové výboje, částečné výboje v oleji, částečné výboje Towsendova typu, strimér, zápalné napětí, interpretace částečných výbojů

## **Abstract**

This thesis is focused on the issue of partial discharges at AC and DC voltage. It deals with the mechanism, measurement, analysis and interpretation of partial discharge at DC voltage. The work contains measurement and graphical analysis of corona and internal discharges at AC and DC voltage .

## **Key words**

Partial discharge, AC, DC, internal partial discharges, corona discharges, surface discharges, partial discharges in oil, Townsend-like discharges, streamer-like discharges, inception voltage, interpretation of partial discharges

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracovala 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 bakalářské/diplomové práce, je legální.

.....  
podpis

V Plzni dne 7.5.2015

Bc. Kateřina Kopelentová

## **Poděkování**

Ráda bych poděkovala Doc. Ing. Evě Müllerové, Ph.D. za odborné vedení práce a cenné rady. Mé poděkování patří též mojí mamince a prarodičům za podporu při studiu.

# Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>7</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>8</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>10</b>
<b>1. MECHANISMUS ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ</b> .....	<b>11</b>
1.1 ČÁSTEČNÉ VÝBOJE PŘI STEJNOSMĚRNÉM NAPĚTÍ.....	12
1.1.1 Vnitřní částečné výboje .....	12
1.1.2 Vnější částečné výboje .....	15
1.1.3 Částečné výboje v kapalném dielektriku .....	18
<b>2. CHARAKTERISTICKÉ PARAMETRY A CHOVÁNÍ VÝBOJŮ PŘI STEJNOSMĚRNÉM NAPĚTÍ</b>	<b>18</b>
2.1 ČETNOST ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ .....	18
2.2 VLIV POLARIZACE DIELEKTRIKA NA ČÁSTEČNÉ VÝBOJE .....	19
2.3 VLIV TEPLoty .....	21
2.4 ROZSAH PARAMETRŮ VÝBOJE.....	21
2.5 VNITŘNÍ VÝBOJE.....	21
2.6 KORONA .....	24
2.7 POVRCHOVÉ VÝBOJE .....	26
2.8 VÝBOJE V OLEJI .....	27
2.9 PAMĚŤOVÝ EFEKT.....	28
<b>3. MĚŘENÍ ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ PŘI STEJNOSMĚRNÉM NAPĚTÍ.....</b>	<b>30</b>
3.1 ELEKTRICKÁ DETEKCE ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ .....	30
3.2 AKUSTICKÁ DETEKCE ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ .....	31
3.3 OPTICKÁ DETEKCE ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ .....	35
<b>4. VYHODNOCOVÁNÍ ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ PŘI STEJNOSMĚRNÉM NAPĚTÍ .....</b>	<b>36</b>
4.1 GRAFICKÁ PREZENTACE ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ PŘI STEJNOSMĚRNÉM NAPĚTÍ .....	38
4.2 TIME LAG/RECOVERY MODEL .....	42
4.2.1 Experimentální ověření metody.....	44
4.3 STATISTICKÁ ANALÝZA .....	47
4.4 METODA KLOUZAVÉHO PRŮMĚRU .....	49
4.5 DATABÁZE PRO KLASIFIKACI VÝBOJŮ.....	50
4.6 VÍCENÁSOBNÝ DEFECT .....	52
<b>5. VLASTNÍ MĚŘENÍ .....</b>	<b>53</b>
5.1 MĚŘENÍ VZNIKU VÝBOJE .....	53
5.2 ČASOSBĚRNÉ MĚŘENÍ VÝBOJŮ.....	57
<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>64</b>
<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ .....</b>	<b>66</b>

## Seznam symbolů a zkratek

$C_a$ .....	Kapacita izolantu (C)
$C_b$ .....	Kapacita oblasti dielektrika s dutinkou (C)
$C_c$ .....	Kapacita dutinky (C)
$C_k$ .....	Vazební kapacita (C)
$d$ .....	Doskok (m)
$E$ .....	Intenzita elektrického pole (V/m)
$H$ .....	Hustota rozložení pravděpodobnosti
$i_{pd}$ .....	Posuvný proud (A)
$k$ .....	Špičatost
$n$ .....	Četnost výbojů
$q$ .....	Velikost výboje (C)
$q_{pre}$ .....	Velikost předchozího výboje (C)
$q_{suc}$ .....	Velikost následujícího výboje (C)
$R_a$ .....	Odpor izolantu ( $\Omega$ )
$R_b$ .....	Odpor oblasti dielektrika s dutinkou ( $\Omega$ )
$R_c$ .....	Povrchový odpor dutinky ( $\Omega$ )
$S$ .....	Šikmost
$t$ .....	Čas (s)
$t_L$ .....	Časová prodleva (s)
$t_R$ .....	Doba zotavení (s)
$U_c$ .....	Napětí v dutince (V)
$U_i$ .....	Zapalovací napětí (V)
$U_{min}$ .....	Minimální průrazné napětí (V)
$U_R$ .....	Zbytkové napětí (V)
$U_{(t)}$ .....	Okamžité napětí
$Z_m$ .....	Snímací impedance ( $\Omega$ )
$\alpha$ .....	Ionizační koeficient
$\gamma$ .....	Sekundární ionizační činitel
$\Delta t$ .....	Časový interval (s)
$\Delta t_{pre}$ .....	Časový interval od předchozího výboje (s)



$\Delta t_{\text{suc}}$ .....	Časový interval do následujícího výboje (s)
$\Delta U$ .....	Přepětí (V)
$\eta$ .....	Koeficient asociace
$\Phi$ .....	Fázový úhel (°)
$\tau$ .....	Časová konstanta (s)
AC .....	Střídavý
CC .....	Křížová korelace
DC .....	Stejnoseměrný
FFT .....	Rychlá Fourierova transformace
IR .....	Infračervený
UV .....	Ultrafialový

## Úvod

Detekce a diagnostika částečných výbojů je základní metoda testování izolačních materiálů ve vysokonapětových systémech. V případě střídavého namáhání je problematika částečných výbojů dobře známá a jsou vytvořeny normalizované postupy pro testování. Z důvodu rostoucího využití stejnosměrných vysokonapětových zařízení se zvyšuje zájem o výzkum charakteru částečných výbojů při stejnosměrném napětí. Snahou dosavadních experimentů je vytvořit standart pro měření a vyhodnocování při stejnosměrném namáhání.

Pro klasifikaci typu defektu v AC zařízení se využívá měření fázového úhlu vzniku výboje v průběhu křivky napájecího napětí. Výsledná závislost má charakteristický průběh pro každý druh výboje. Ačkoliv detekce částečných výbojů při stejnosměrném napětí využívá stejné principy, interpretace výsledků je odlišná z důvodu absence fázového úhlu. Hlavním principem vyhodnocování částečných výbojů je nejprve detekce známých defektů a následné sestavení databáze. Pro určení neznámého typu částečného výboje se následně využívá srovnání s charakteristickými závislostmi obsaženými v databázi.

Nejvíce diskutovaným problémem při DC namáhání je vyhodnocování získaných dat a určování typu a polohy defektu izolantu. Provádějí se měření známých defektů pro různé veličiny a ze získaných dat se sestavují různé závislosti. Při určování neznámého defektu se hledá určitá podobnost grafů

Cílem této práce je shrnout poznatky ohledně částečných výbojů při stejnosměrném napětí z dosavadních výzkumů pro další vědeckou činnost. Práce se zabývá mechanismem částečných výbojů, jejich měřením a následným vyhodnocením.

# 1. Mechanismus částečných výbojů

Podle definice normy IEC 60270 je částečný výboj lokální výboj, při kterém nedochází k úplnému přemostění izolace mezi elektrodami. Částečné výboje jsou důsledkem lokálního elektrického namáhání uvnitř izolantu nebo na jeho povrchu. Tyto výboje se projevují jako pulz s dobou trvání kratší než  $1\mu\text{s}$ . [17]

Částečné výboje vznikají v nehomogenním dielektriku nebo v případě přítomnosti silně nehomogenního pole, které způsobuje zvýšené lokální elektrické namáhání izolace. V důsledku přítomnosti částečných výbojů dochází k degeneraci izolačních systému.

Částečné výboje můžeme podle místa výskytu rozdělit na:

- ***Vnější částečné výboje:***

Vnější částečné výboje pozorujeme v plynném dielektriku v okolí elektrod malých poloměrů nebo velkých zakřivení. Tento druh výboje nazýváme korona.

- ***Vnitřní částečné výboje:***

Tyto výboje se vyskytují v plynech obklopených pevným či kapalným dielektrikem.

- ***Povrchové částečné výboje:***

Povrchové částečné výboje neboli klouzavé výboje vznikají na rozhraní pevného a plynného dielektrika.

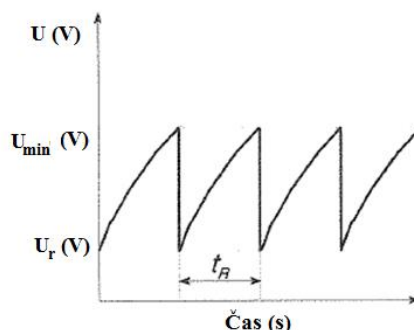
Dále můžeme rozdělit částečné výboje podle přiloženého napětí na částečné výboje při střídavém napětí a částečné výboje při stejnosměrném napětí. [7]

## 1.1 Částečné výboje při stejnosměrném napětí

### 1.1.1 Vnitřní částečné výboje

Vnitřní částečné výboje se vyskytují v dutinkách pevného dielektrika. Napětí v dutince roste, dokud nedojde k výboji. Vzniklý výboj vede k vytvoření náboje na povrchu dutinky, který způsobuje zánik výboje. [2]

Aby došlo k částečnému výboji, musí být splněny dvě podmínky. Zaprvé, velikost a rozložení elektrického pole v dutince musí být takové, aby došlo k samostatnému výboji. Tato podmínka je prezentována jako minimální průrazné napětí  $U_{\min}$  v dutince. Dále musí dojít k ionizačnímu procesu, který může být vyvolán volným elektronem, externím zdrojem radiace, nebo zachycením elektronu uvolněného předchozím výbojem. Vznik výboje vede k poklesu lokální intenzity pole pod minimální hodnotu  $E_{\min}$ , takže dochází k zhašení výboje. Po skončení výboje klesne napětí v dutince na zbytkovou hodnotu  $U_R$ , která ovšem není rovna nule. Aby došlo k dalšímu výboji, hodnota napětí v dutince musí opět dosáhnout minimální hodnoty  $U_{\min}$  za dobu zotavení  $t_R$ .



Obr. 1: Průběh napětí na dutince. Převzato z [2]

Proces výboje je silně ovlivněn velikostí přepětí  $\Delta U$ , které představuje hodnotu, o kterou je přesaženo minimální napětí potřebné k samostatnému výboji.

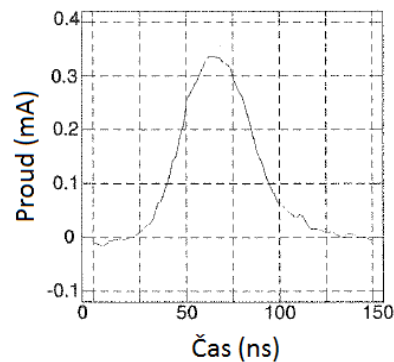
Napětí v dutince:

$$U_i = U_{\min} + \Delta U \quad (1.1)$$

Podle velikosti přepětí  $\Delta U$  můžeme rozdělit částečné výboje v analogii s Townsendovými výboji a striméry na částečné výboje Townsendova typu a částečné výboje typu strimér.

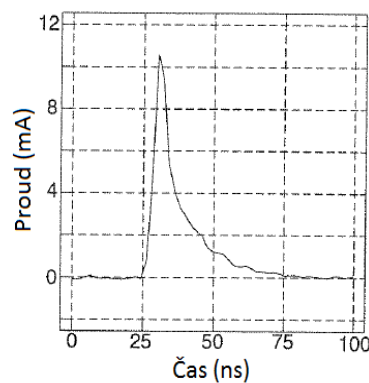
#### Částečné výboje Townsendova typu:

Tyto výboje vznikají při menší hodnotě přepětí, kdy  $\Delta U$  je rovno jednotkám voltů. Vyznačují se relativně malou proudovou amplitudou a velkou šířkou pulsu. Celková doba trvání výboje je úměrná velikosti dutinky v izolačním materiálu. Samotný výboj vyplňuje většinu objemu dutinky. Zbytkové napětí  $U_R$  v dutince se blíží minimální hodnotě průrazného napětí  $U_{\min}$ . Částečné výboje Townsendova typu se vyskytují především v malých dutinkách.



Obr. 2: Průběh částečného výboje Townsendova typu. Převzato z [8]

#### Částečný výboj typu strimér:

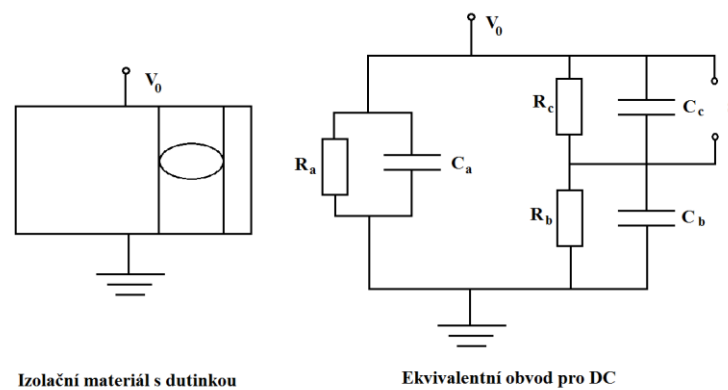


Obr. 3: Průběh částečného výboje typu streamer. Převzato z [8]

Pro tento druh výboje je typická vyšší hodnota přepětí  $\Delta U$ , velká proudová amplituda a rychlý průběh pulsu. Výboj pokrývá jen zlomek objemu dutinky. Zbytkové napětí v dutince  $U_r$  se blíží nulové hodnotě.[8, 2]

Ekvivalentní obvod:

Pro popis vnitřních částečných výbojů můžeme použít ekvivalentní obvod *Obr. 4*.



*Obr. 4: Ekvivalentní obvod pro vnitřní částečné stejnosměrné výboje. Převzato z [ 2]*

Kapacita  $C_a$  a odpor  $R_a$  představují parametry izolačního materiálu. Prvky  $C_b$  a  $R_b$  reprezentují vlastnosti části dielektrika, které je v sérii s dutinkou.  $C_c$  je kapacita dutinky a  $R_c$  je její povrchový odpor.

Pokud budeme uvažovat zjednodušený proces výboje jako jiskřiště S, dostaneme rovnici pro charakteristickou časovou konstantu  $\tau$ :

$$\tau = \frac{R_b R_c (C_b + C_c)}{R_b + R_c} \quad (1.2)$$

Napětí na dutince je dáno:

$$U_c(t) = U_{c,\infty} - (U_{c,\infty} - U_R) \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (1.3)$$

Kdy  $U_{c,\infty}$  vypočteme jako:

$$U_{c,\infty} = U \frac{R_c}{R_b + R_c} \quad (1.4)$$

[8]

### Porovnání s vnitřními částečnými výboji při střídavém napětí

- Na rozdíl od částečných výbojů při střídavém napětí, se polarita výbojů mění pouze bezprostředně po vypnutí zdroje napětí.
- Při AC výbojích dojde při změně polarit pole k uvolnění části elektronů zachycených na povrchu anody, a tak může dojít k další elektronové emisi. Avšak při DC výbojích musí být iniciační elektron nahrazen vodivostním proudem přes objem dielektrika. Z toho vyplývá, že časová prodleva  $t_L$  mezi jednotlivými výboji v AC a DC se bude lišit.
- Jelikož velikost přepětí  $\Delta U$  je závislé na časové prodlevě  $t_L$ , průběh napětí na dutince bude pro AC a DC odlišný. [2]

### 1.1.2 Vnější částečné výboje

V plynech můžeme pozorovat dva druhy částečných výbojů při stejnosměrném napětí. Koronu a povrchový výboj. Obecně pro tyto výboje platí stejné podmínky jako pro vnitřní částečné výboje. Dosažené minimální napětí  $U_{\min}$  a přítomnost iniciačního elektronu.

V blízkosti částečných výbojů dochází ke generování prostorového nebo povrchového náboje. Přítomnost náboje vede k poklesu intenzity pole a tak dochází k zániku výboje. Opětné zvýšení intenzity pole je způsobené rozpadem náboje akumulovaného při výboji, a tak může dojít k dalšímu výboji.

Korona:

Vlivem elektrického pole dochází k urychlování elektronů v jeho směru. Tyto elektrony tak mají dostatečnou energii, aby při srážce s jinou částicí došlo k uvolnění elektronu. Tento elektron je znovu urychlen a tak dochází ke vzniku elektronové laviny.

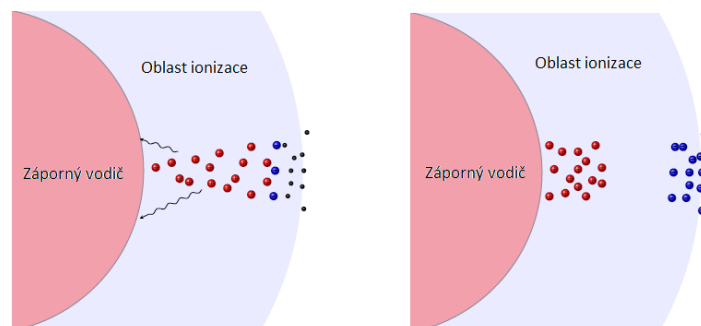
Pro samostatnou elektronovou lavinu platí vztah 1.5, kdy  $\alpha$  je ionizační koeficient,  $\eta$  je koeficient asociace,  $\gamma$  je sekundární ionizační koeficient.

$$n = n_0 \gamma e \int_0^d (\alpha - \eta) dx \quad (1.5)$$

Korona vzniká jen v případě nehomogenního pole, proto je pro výboj nutná alespoň jedna elektroda s velkým zakřivením. Chování korony má pulzní charakter. Parametry výboje jsou závislé na geometrii výbojové oblasti a na polaritě přiloženého napětí. Podle polaritě napětí dělíme koronu na zápornou a kladnou. [6, 2]

Záporná korona:

V okolí vodiče se záporným napětím existuje nestejně rozložené elektrické pole s nejvyšší intenzitou na jeho povrchu. Pokud přesáhne velikost napětí minimální hodnotu, stává se elektrické pole dostatečně velké pro vznik ionizace. Volně se vyskytující elektrony inicializují elektronovou lavinu v místě, kde je ionizační energie větší nebo rovná vazebné energii. Lavina směřuje k vodiči.



Obr. 5: Záporná korona. Převzato z [13]

Elektrony proudí směrem od vodiče mimo ionizační oblast, kde se slučují s neutrálními částicemi a tvoří záporné ionty. Kladné ionty, které vznikly při ionizaci, vyrážejí z povrchu

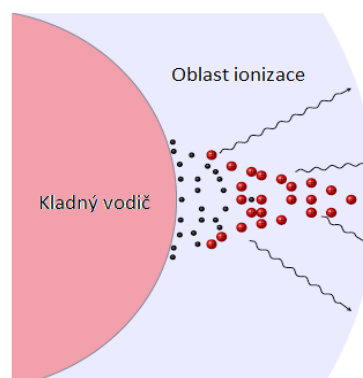


vodiče elektrony a vyvolávají tak sekundární ionizaci. Tato ionizace následně způsobuje soběstačný výboj, koronu. Po počáteční elektronové lavině vznikají v okolí vodiče, formováním pozitivních a negativních částic, dvě oblasti prostorového náboje. Vlivem kladného prostorového náboje dochází ke zvyšování elektrického pole v okolí vodiče. Narůstající záporný prostorový náboj vede ke snižování intenzity pole a tak dochází k uhašení náboje. Nový výboj může vzniknout až po rozptýlení záporného náboje. V závislosti na výsledném elektrickém poli rozlišujeme 3 druhy korony: Trichelovy výboje, doutnavý výboj a záporný strimér. Každý typ korony má charakteristický elektrický, fyzikální a vizuální projev.

#### Kladná korona:

V případě kladného vodiče je elektronová lavina vyvolána přirozenými procesy ve vzduchu tam, kde je ionizační konstanta  $\alpha$  větší než nula. Elektronová lavina se rozvíjí směrem k vodiči v rostoucím elektrickém poli. Elektrony se pohybují směrem k vodiči a zanechávají za sebou kladné ionty směřující na opačnou stranu.

Vzniklé prostorové náboje modifikují elektrické pole a dochází ke vzniku výboje. Zmenšení intenzity pole v oblasti kolem hrotu způsobené kladným prostorovým nábojem vede k uhasínání výboje. Poté, co se kladný náboj vzdálí od hrotu, může nastat další výboj. Stejně jako u záporné korony, rozlišujeme několik druhů kladné korony: Pulzní korona, počáteční strimér, kladná korona a průrazný strimér. [2,6,11, 13]



Obr. 6: Kladná korona. Převzato z [13]

### 1.1.3 Částečné výboje v kapalném dielektriku

V případě vyššího pole vzrůstá v dielektriku počet injektovaných elektronů z katody a zvyšuje se jejich kinetická energie, což je způsobeno Schottkyho efektem. Přiložením ještě vyššího pole podpoříme tunelování elektronů potenciálovou bariérou. Kov emituje elektrony, které mají vyšší kinetickou energii než molekuly dielektrika. Tyto elektrony mohou způsobit 3 druhy interakcí: termální expanzi, porušení vazby při energii elektronů větší než 3 eV a nárazovou ionizaci pro energii větší než 6 eV. Při vyšší intenzitě pole se zvyšuje pravděpodobnost porušení vazby a nárazová ionizace. Termální expanze se stává efektivnější, což vede k lokálnímu odpařování kapaliny. Expanzí plynu dochází k poklesu vnitřního tlaku. V souladu s Paschenovým zákonem, při překročení kritického minima tlaku, nastane lokální výboj. Dále viz 2.9. [2]

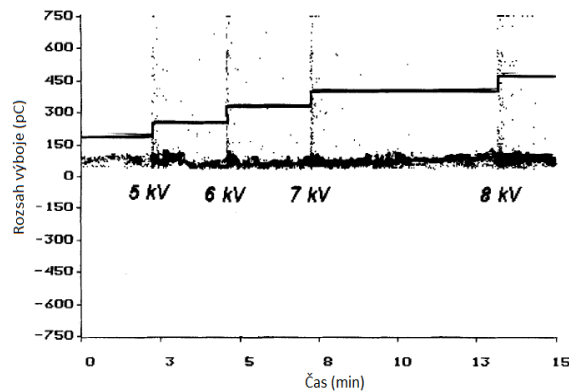
## 2. Charakteristické parametry a chování výbojů při stejnosměrném napětí

### 2.1 Četnost částečných výbojů

Po uhašení částečného výboje dojde k opětovnému zapálení po uplynutí časovém intervalu  $\Delta t$ , který je součtem zotavovacího času  $t_R$  a časové prodlevy čekání na volný elektron  $t_L$ . Četnost částečných výbojů  $n$  lze vyjádřit jako jeho převrácenou hodnotu (rovnice 2.1). V praxi se uvažuje zapalovací napětí jako hodnota, při níž je četnost výbojů vyšší než jeden výboj za minutu.

$$n = \frac{1}{\Delta t} \quad (2.1)$$

V porovnání četnosti částečných výbojů při AC a DC napětí dochází vlivem časové konstanty  $\tau$  (rovnice 1.2), která je v případě AC napětí o několik řádů vyšší, k vyššímu výskytu výbojů při AC než při DC napětí stejné amplitudy. Z toho vyplývá, že ke zvýšení četností výbojů při DC napětí dochází při polarizaci nebo depolarizaci dielektrika a při zapínání nebo vypínání napětí. [8]



Obr. 7: Četnost výbojů při zvyšování napětí. Převzato z [8]

Během polarizace dielektrika po přiložení napětí dochází k nárůstu jeho vodivosti, což se projevuje přítomností vodivostního proudu. S rostoucím napětím se zvyšuje i četnost výbojů, což je patrné z obrázku *Obr. 7*. Závislost mezi vodivostí dielektrika a četností výbojů byla experimentálně dokázána. [3, 8,12,]

## 2.2 Vliv polarizace dielektrika na částečné výboje

Rozložení elektrického pole v dielektriku při DC napětí je dáno provozními podmínkami dielektrického systému. Po přiložení napětí má pole kapacitní charakter, pouze po skončení polarizačního procesu je odporově rozloženo.

Rozložení elektrického pole v izolantu v průběhu testování:

### Kapacitní fáze

V této fázi je napětí a elektrické pole v dielektriku rozloženo v závislosti na jeho permitivitě. Změny v napětí mohou být chápány jako nabíjení a vybíjení kapacity. V případě vzduchové dutinky v dielektriku můžeme četnost výbojů vyjádřit jako:

$$n \approx \frac{C_a du}{C_c dt u_{pr}} \frac{1}{u_{pr}} \quad (2.2)$$

Kdy  $C_a$  je kapacita izolantu,  $C_c$  kapacita dutinky,  $\frac{du}{dt}$  je dosažené napětí a  $u_{br}$  je průrazné napětí. Jako je kapacita a průrazné napětí závislé na geometrii a materiálu dielektrického systému, tak je četnost výbojů závislá na míře nárůstu napětí.

### Přechodová fáze

Během přechodové fáze dochází k postupné změně z kapacitního na ohmické rozložení elektrického pole. Dochází k poklesu vodivostního proudu přes dielektrikum až do okamžiku, dokud není dosažena odporová fáze.

### Odporová fáze

V průběhu odporové fáze je pole definováno vodivostí a proudem procházejícím izolačním materiálem. Výsledné rozložení pole uvnitř izolačního materiálu je velmi odlišné od střídavého pole v důsledku závislosti vodivosti na teplotě a vlhkosti. V důsledku vysokého izolačního odporu dochází ke vzniku prostorového náboje uvnitř izolantu. V ustáleném stavu tento prostorový náboj napomáhá snížit elektrické namáhání v dutinkách. Avšak v případě výboje dochází k hromadění velkého množství náboje v okolí dutinky.

Pokud se bude přiložené napětí postupně zvyšovat, bude se zvyšovat i napětí na dutince, dokud nedojde k průrazu. Avšak pokud bude míra nárůstu napětí nízká, může se přiložené napětí zvyšovat až do nekonečna bez dosažení výboje.

### Relaxační fáze

Přiložené napětí je postupně snižováno a testované zařízení je případně uzemněno. Během této fáze klesá četnost výbojů. Kvůli vysoké rezistivitě dielektrika dochází ke tvoření prostorového náboje.

Po odstranění napětí a depolarizaci dielektrika dochází k částečným výbojům opačné polarity s vysokou četností. Tento jev je důsledkem vybíjení dielektrika a můžeme být posílen reverzací přiloženého napětí. [8, 12]

## 2.3 Vliv teploty

V porovnání se střídavým napětím teplota a teplotní nárůst v dielektriku a dutince má velký vliv na chování částečných výbojů. Odpor dielektrika a dutinky je silně ovlivněn teplotou, a tak dochází i ke změnám jeho vodivosti. Četnost výbojů je ovlivněná nárůstem vodivosti dielektrika, tedy při zvýšení vodivosti o dva řády dojde k podobnému nárůstu četnosti výbojů. Zvyšování teploty také způsobuje redistribuci elektrického pole v dielektriku. [8]

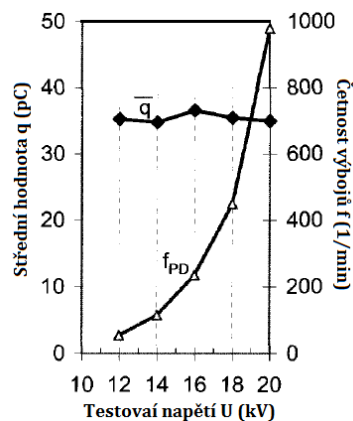
## 2.4 Rozsah parametrů výboje

Stejně jako četnost částečných výbojů při AC napětí je vyšší než při DC, tak i velikost výboje při AC je větší než při DC. Parametry výboje jsou značně závislé na intenzitě elektrického pole v dutince v okamžiku, kdy dochází ke vzniku výboje. Přepětí, při kterém výboj vzniká, má přímý vliv na amplitudu výboje. [8]

## 2.5 Vnitřní výboje

### Vliv testovacího napětí

Do té doby, dokud převládají výboje Towsendova typu nad strimérama, nedohází při zvyšování testovacího napětí k nárůstu velikosti výboj, ale zvyšuje se četnost výbojů Obr. 8.



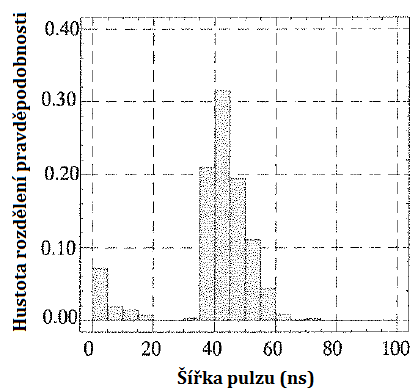
Obr. 8: Velikost výboje a četnost výbojů jako funkce testovacího napětí. Převzato z [1]

Podobně jako u korony, snížení velikosti  $t_L$  je příčinou nezávislosti velikosti výboje na velikosti testovacího napětí. V případě vnitřních výbojů dochází navíc i ke snížení zotavovací doby  $t_R$ .

### Vliv doby testování

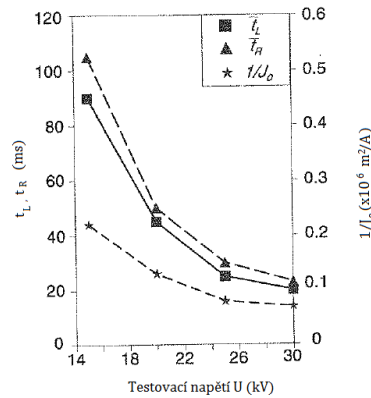
Po přiložení napětí klesá četnost výbojů až do okamžiku dosažení ustáleného stavu, což je způsobeno vodivostním proudem tekoucím skrz izolant. Velké hodnoty vodivostního proudu v ustáleném stavu způsobují vyšší četnost výbojů než nižší hodnoty.

Stejně jako při střídavém napětí můžeme při prodloužení testovacího času pozorovat při vyšších hodnotách DC napětí přechod od strimérů k výbojům Towsendova typu. Tento jev byl testován pro napětí 20 kV po dobu 25 hodin. Na obrázku *Obr. 9* je vidět pokles hustoty pravděpodobnosti strimérů.



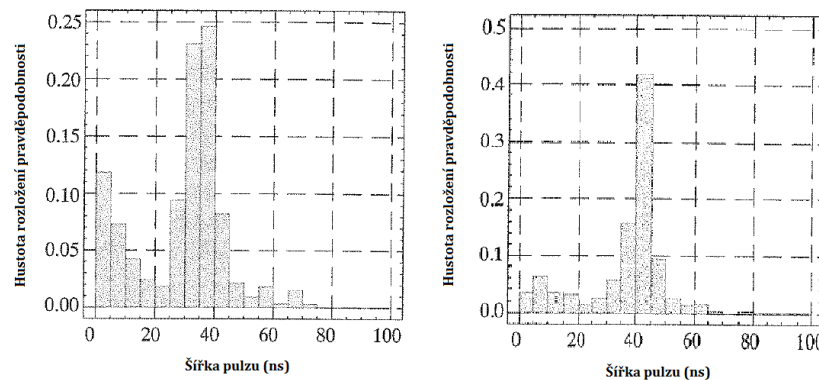
*Obr. 9: Histogram šířky pulzu při testovacím napětí 20 kV po 24h testování. Převzato z [ 2]*

Přechod ze striméru na výboj Towsendova typu může mít dvě vysvětlení. Za prvé vytvoření vrstvy oxidačních produktů vede ke zvýšené produkci volných elektronů potřebných pro vznik výboje. Z toho vyplývá zkrácení časové prodlevy  $t_L$  a pokles přepětí  $\Delta U$ . Druhá možnost výkladu je zvyšující se vodivost povrchu dutinky. Čím je vodivost větší, tím je menší povrchový odpor, což způsobuje pokles strmosti nárůstu napětí. Zkracuje se  $t_L$  a klesá  $\Delta U$ .

Obr. 10: Závislost  $t_L$  a  $t_R$  na testovacím napětí. Převzato z [2]

### Vliv izolačního materiálu

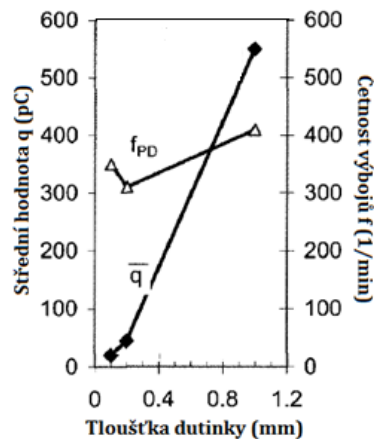
Navzdory rozdílnosti četnosti výbojů způsobené odlišnou časovou konstantou  $\tau$ , hustota pravděpodobnosti výskytu výbojů Townsendova typu a strimérů je stejná pro odlišné materiály  
Obr. 11. Vyšší četnost byla pozorována pro výboje Townsendova typu.



Obr. 11: Histogram šířky pulzu pro 2 různé druhy izolačního materiálu. Převzato z [2]

### Vliv velikosti dutinky

Největší vliv na chování vnitřních částečných výbojů mají rozměry dutinky a fakt, jestli je dutinka ohraničená izolantem nebo elektrodou.



Obr. 12: Velikost výboje a četnost výbojů jako funkce tloušťky dutinky. Převzato z [1]

Zvětšováním tloušťky dutinky dochází ke zvyšování velikosti náboje  $q$  Obr. 12, a to z důvodu přechodu výbojů Towsendova typu na striméry. Se zvětšující se velikostí dutinky je efekt zvyšující se pravděpodobnost výskytu strimérů silnější než snižování intenzity elektrického pole v dutince. Energie, uvolněná výbojovou aktivitou se zvyšuje s velikostí dutinky a důsledkem toho se snižuje povrchová rezistance dutinky a zvyšuje se tak emise volných elektronů. Tento jev přispívá k přímému zmenšování  $t_L$ .

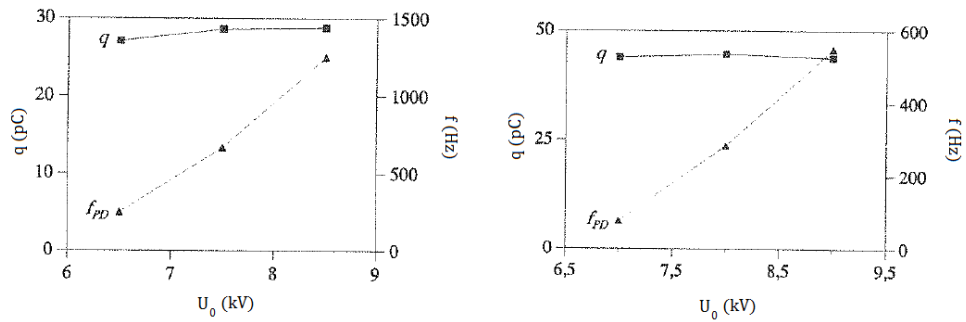
Zvětšování šířky dutinky také zvyšuje pravděpodobnost výskytu vícenásobných výbojů. Četnost výbojů je jen lehce ovlivněna šířkou dutinky. [1, 2]

## 2.6 Korona

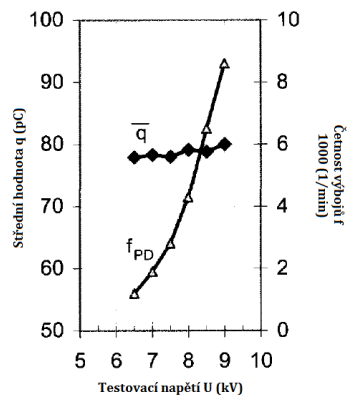
### Vliv testovacího napětí

Se zvyšujícím se testovacím napětím se zvyšuje četnost výskytu výboje což je způsobeno kratší časovou prodlevou čekání na volný elektron. Velikost výboje zůstává konstantní. Vliv na velikost výboje má hlavně polarita přiloženého napětí. Velikost výboje je menší pro zápornou koronu než pro kladnou koronu Obr. 13, jelikož uspořádání se záporným hrotem má vyšší elektrickou pevnost.





Obr. 13: Velikost výboje a četnost výbojů v závislosti na testovacím napětí. Záporná korona (vlevo) a kladná korona (vpravo). Převzato z [2]



Obr. 14: Střední hodnota velikosti výboje a četnost výbojů v závislosti na testovacím napětí. Převzato z [1]

### Vliv doby testování

Výsledný průběh závislosti naměřených veličin není ovlivněn dobou trvání testu, protože produkty výboje jsou vzduchem unášeny pryč z místa výboje.

### Vliv parametrů modelového uspořádání

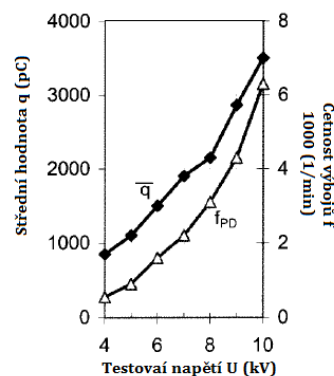
Zvětšením průřezu hrotu elektrody se elektrické pole stává více homogenní a zvyšuje se pravděpodobnost vzniku vícenásobného defektu. V případě zmenšení průřezu hrotu elektrody dochází ke zvyšování počátečního napětí korony a velikosti výboje.

Na velikost počátečního napětí korony má také vliv stav povrchu elektrod. Nečistoty a nerovnosti, které na elektrodě vznikají působením výboje, se stávají ohnisky malých předběžných nestabilních výbojů. Vlivem těchto výbojů dochází k toku malých přerušovaných proudů, které lze špatně detekovat. Z tohoto důvodu nelze přesně stanovit zapalovací napětí korony. [1, 2, 14]

## 2.7 Povrchové výboje

### Závislost na testovacím napětí

Četnost výbojů a velikost výboje jsou přímo úměrné testovacímu napětí *Obr. 15*. Čím je větší testovací napětí, tím je i větší oblast výboje. To vede k více možným drahám výboje a ke zvýšení četnosti výbojů. Zvětšení objemu výboje pak způsobí zvětšení velikosti výboje. Výsledná závislost je citlivá na změnu vlastností materiálu a geometrii objektu.



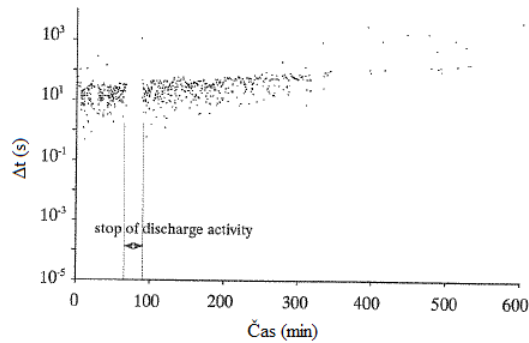
*Obr. 15: Střední hodnota velikosti výboje a četnost výbojů v závislosti na testovacím napětí. Převzato z [1]*

### Vliv izolačního materiálu

Proces nabíjení a vybíjení je ovlivněn materiálem izolantu stejně tak jako okolním prostředím, které se zapojuje do procesu výboje. Z tohoto důvodu je chování povrchových výbojů velice nepredikovatelné.

### Vliv doby testování

Charakteristická časová závislost je způsobena procesem nabíjení. Z důvodu vzniku výboje dochází k časovému nabíjení na rozhraní mezi vzduchem a izolantem. Intenzita pole klesá, což způsobuje postupné uhasínání výboje. Někdy může dojít dokonce k pozastavení výbojové činnosti na určitý časový okamžik. [1,2]

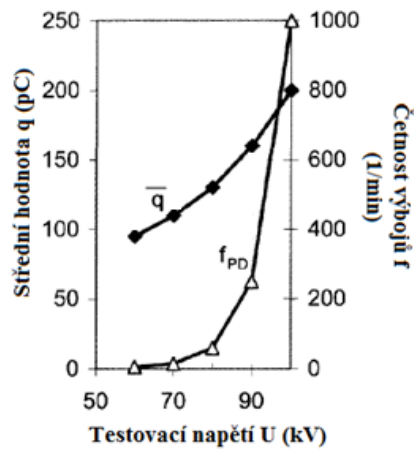


Obr. 16: Čas mezi následujícími výboji. Převzato z [2]

## 2.8 Výboje v oleji

### Vliv testovacího napětí

Při zvyšování testovacího napětí roste jak četnost výbojů, tak hodnota velikosti výboje. Z obrázku *Obr. 17* je zřejmé, že nárůst četnosti výbojů je větší než nárůst  $q$ .



Obr. 17: Střední hodnota velikosti výboje a četnost výbojů v závislosti na testovacím napětí. Převzato z [1]

### Vliv doby testování

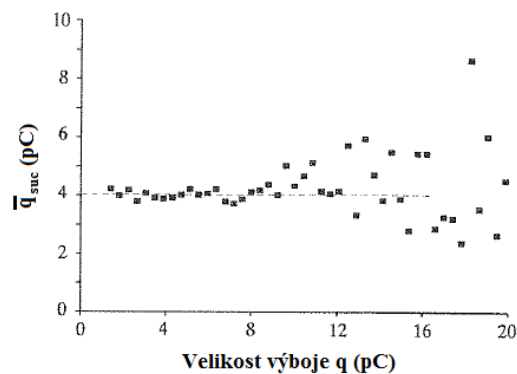
Výsledná závislost není ovlivněna dobou trvání, protože pevné produkty výboje jsou odnášeny prouděním oleje a následně jsou v oleji rozpuštěny. [1, 2]

## 2.9 Paměťový efekt

Pokud je velikost výboje a zapalovací napětí výboje ovlivněno předchozím výbojem, mluvíme o paměťovém efektu. Přítomnost paměťového efektu zapříčiňuje závislost mezi  $q$  a  $q_{pre}$  nebo  $q$  a  $\overline{\Delta t}_{pre}$ . V tomto případě pak může být chování výboje zcela odlišné.

### Vnitřní výboje

Experimentálně bylo ověřeno, že velikost výboje  $q$  není závislá na předešlém výboji ani neovlivňuje následující.



Obr. 18: Časový interval do následujícího výboje jako funkce velikosti výboje. Převzato z [2]

Střední hodnota velikosti následujícího výboje není závislá na velikosti předchozího výboje a je rovna střední hodnotě všech výbojů.

### Korona

Výsledná závislost pro koronu není ovlivněna historií výbojů. To znamená, že neexistuje souvislost s následujícím výbojem. Velikost výboje a čas mezi jednotlivými výboji je stanovena vyzařováním pozadí, průrazným napětím plynu a velikostí testovacího napětí.

### Povrchové výboje

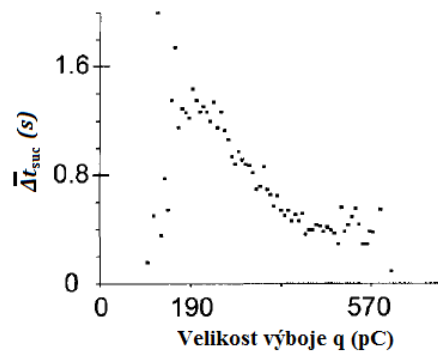
Po vzniku výboje dohází k pohlcení elektronů na rozhraní vzduchu a pevného izolantu. V průběhu času se tyto elektrony mohou rozptýlit hlouběji do pevného materiálu ( což závisí

na vodivosti plynu i pevného dielektrika). Z toho důvodu může dojít ke stabilizaci vytvořeného náboje.

V porovnání s ostatními typy výbojů je rozložení elektrického pole lokálně závislé na vzdálenosti od elektrody, rovnosti povrchu, vodivosti atd. V kombinaci s polem uloženého náboje dochází k silnému zkreslení výsledného pole podél povrchu pevného izolantu. Proto nemá povrchový výboj hlavní směr, ve kterém se šíří. Čím je velikost výboje větší, tím větší je oblast, do které se uložený náboj rozšíří. To znamená, že následující výboj je menší.

### Výboje v oleji

Výboje v oleji vznikají díky přítomným nečistotám, které snižují elektrickou pevnost dielektrika. Přiložením elektrického pole dochází k pohybu částic směrem k více namáhaným oblastem. V okamžiku kdy tyto nečistoty dorazí do této lokace, vznikají v oleji bubliny z důvodu jeho lokálního vypařování. A pokud jsou splněny nutné podmínky, v bublině začnou vznikat výboje. Výsledkem může být buď rozdělení bubliny na několik dalších, nebo v případě vyššího pole vznik plynových kanálků v oleji. Toto chování je analogické k výbojům Towsendova typu (bublina) a strimérům (kanálek).



Obr. 19: Časová prodleva mezi následujícími výboji. Převzato z [1]

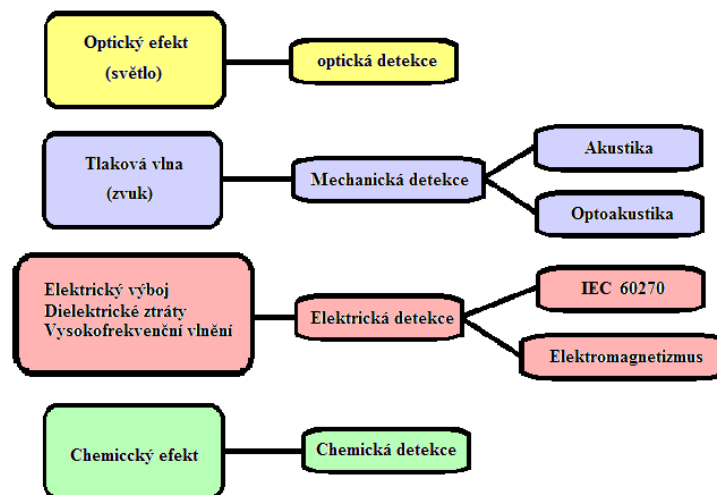
Plynový kanálek obsahuje molekuly ionizovaného oleje, jejichž vodivost je mnohem větší než okolního oleje. Aby kanálek přetrval je nezbytné jeho spojení s elektrodou. Díky tomuto propojení se může kanálek znovu nabíjet v průběhu času. Na konci kanálku, který dosáhl oblasti s nižší intenzitou pole, se akumuluje náboj až do doby vzniku výboje. Nárůst kanálku se zastaví ze dvou důvodů: Kanálek se přesune z oblasti s vysokou intenzitou pole a dojde

k absorpci plynu olejem. Nebo proto, že čím je kanálek delší tím je delší jeho nabíjecí doba. Časová závislost je tedy negativně ovlivněna velikostí výboje.

V případě dělení bublin prasknutí původní bubliny zatlačí nově vzniklé bubliny ven z oblasti vyšší intenzity pole. Nové bubliny jsou menší než předešlá, a tak jejich průrazné napětí je také menší. Pro vznik dalšího výboje je nutné, aby se bublina dostala zpět do oblasti s vyšší intenzitou. Tedy čím je nižší velikost výboje, tím je delší časová prodleva následujícími výboji. [1]

### 3. Měření částečných výbojů při stejnosměrném napětí

K detekci částečných výbojů při stejnosměrném napětí se nejčastěji využívá elektrická metoda měření. V praxi se ale také můžeme setkat s optickou, mechanickou nebo chemickou metodou měření *Obr. 20*.



Obr. 20: Detekce částečných výbojů

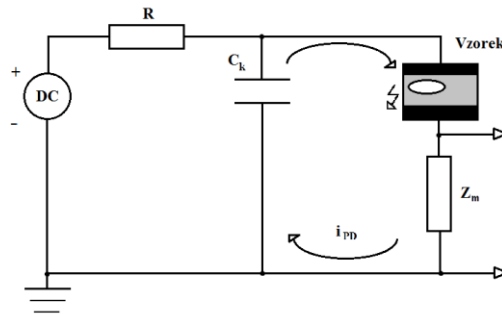
#### 3.1 Elektrická detekce částečných výbojů

Elektrická detekce výbojů využívá posuvného proudu  $i_{pd}$  vyvolaného přeskupením náboje v izolantu, který způsobuje průtok proudu skrz svorky testovaného objektu.

## Klasická detekce

Při klasické detekci dochází k integraci posuvného proudu  $i_{pd}$  za čas trvání výboje.

Výsledná veličina je označována jako velikost výboje  $q$  udávaná v pC. Základní schéma zapojení je uvedeno na obrázku *Obr. 21*.



*Obr. 21: Měřící obvod. Převzato z [2]*

Při stejnosměrném napětí se všechny částečné výboje uvnitř testovaného objektu vyznačují stejnou polaritou proudu. Oproti tomu pro výboje, ke kterým dochází mimo testovaný vzorek, je typická opačná proudová polarita. Této okolnosti se využívá při potlačování externího rušení. [2]

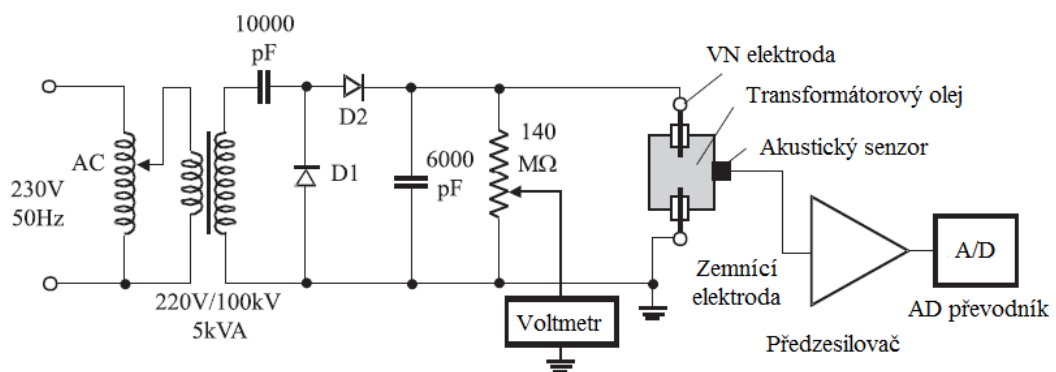
## 3.2 Akustická detekce částečných výbojů

Přítomnost určitého defektu ve struktuře izolantu při provozním napětí může způsobit lokální zvýšení elektrického pole v blízkosti defektu, které vyvolá vznik částečných výbojů. Díky odchylkám od rovnovážného stavu dochází k uvolnění určitého množství energie prostřednictvím výbuchu nebo pulzní vlny. Tato energie může být detekována snímačem připevněným na sledovaném objektu. Popsaný proces nazýváme akustická emise a detekovaný signál akustický signál. Akustická detekce v porovnání s metodami využívajícími indukční vazbu je imunní vůči elektromagnetické interferenci.

Akustický signál je nestacionární signál s neznámou amplitudou a dobou vzniku výboje. Snímací senzor je piezoelektrický převodník, který konvertuje akustický signál na elektrický. Generovaný signál má frekvenční spektrum několik MHz.

### Experiment

Experimentální měření bylo provedeno na modelovém uspořádání hrot-deska umístěném do komory z měkké oceli naplněné transformátorovým olejem *Obr. 10*. Konfigurace hrot deska byla využita pro simulaci částečných výbojů. Na modelové uspořádání bylo přivedeno stejnosměrné napětí 15 kV s rychlostí nárůstu 500 V/s. Snímací senzor byl připevněn na stěnu komory pomocí silikonového lepidla. Signál šířící se olejem při výbojové činnosti narážel do stěn komory a tak část jeho energie byla pomocí senzoru přenesena a následně převedena na elektrický signál. Výsledný elektrický signál musí být zesílen v předzesilovači na požadovanou hodnotu.



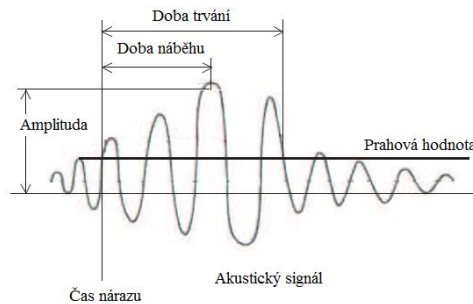
*Obr. 22: Měřicí obvod pro akustickou detekci. Převzato z [16]*

Amplituda je nejvyšší napěťová hodnota dosažená akustickou vlnou. Tento parametr je důležitý pro identifikaci elektro-akustického dění. Amplituda akustické emise je obvykle udávána v dB, kdy 1  $\mu\text{V}$  představuje 0 dB, 10  $\mu\text{V}$  je 20 dB atd. Amplituda elektro-akustického signálu závisí na velikosti částečného výboje a místě vzniku výboje v izolantu.

Náběžná doba je definovaná jako doba, kdy velikost signálu přesáhne prahovou hodnotu až do okamžiku dosažení maximální hodnoty. Doba trvání výboje je doba od překročení intenzity signálu prahové hodnoty do jeho opětovného poklesu pod prahovou hodnotu. Energie signálu je rovna obsahu plochy pod křivkou signálu za dobu trvání výboje.

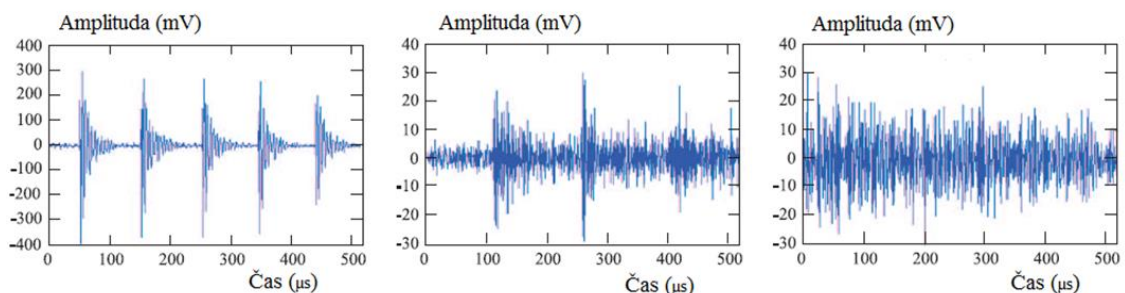


Nejčastější je měření energie signálu, jelikož její velikost je závislá na amplitudě signálu, době trvání a je nezávislá na nastavení prahové hodnoty. Objem energie se mění s časem a závisí na intenzitě částečného výboje. Četnost výbojů je dána jako hodnota, kolikrát byla překročena prahová hodnota.



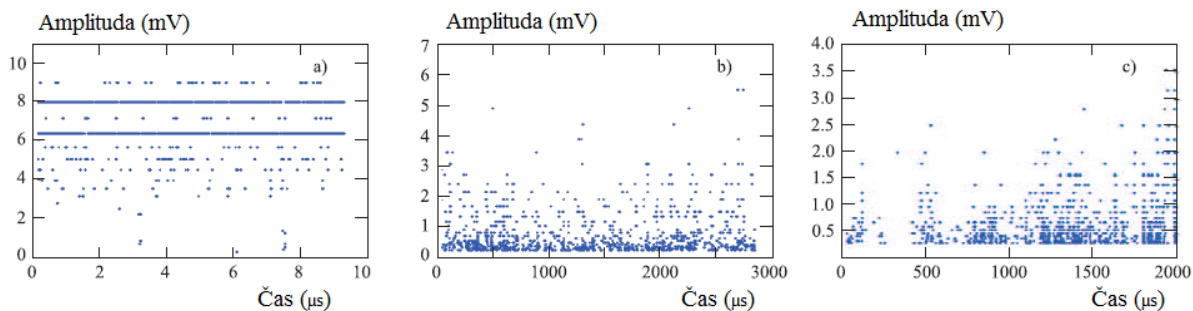
Obr. 23: Průběh akustického signálu. Převzato z [16]

Akustická emise generována částečnými výboji v médiu se může lišit projevem od souvislého signálu až do pulzního signálu. Tvar signálu je závislý na zdroji, prostoru šíření signálu a typu senzoru. Obvykle má vlna způsobená částečným výbojem v izolačním médiu kulovitý tvar, rychle se rozptýlí a její hladina akustického tlaku je nepřímo úměrná vzdálenosti. Na obrázku Obr. 24 je Fourierova transformace průběhu typického akustického signálu.

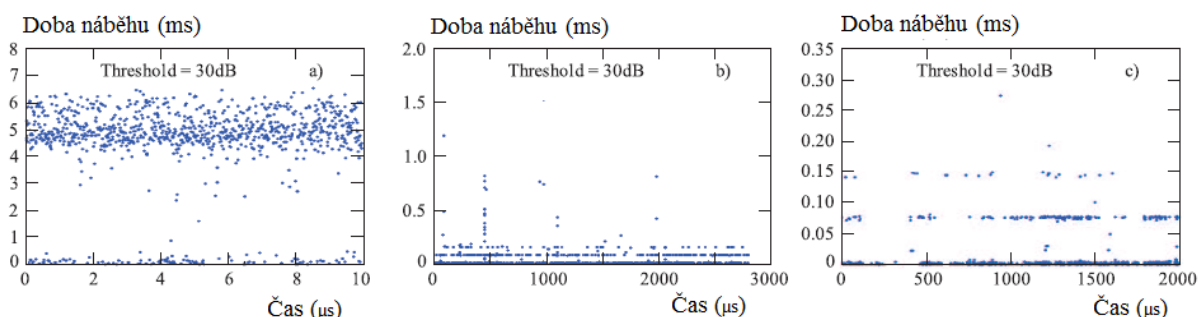


Obr. 24: FFT typického akustického signálu výboje v transformátorovém oleji při napětí 15 kV. AC (vlevo), DC+ (uprostřed) a DC- (vpravo). Převzato z [16]

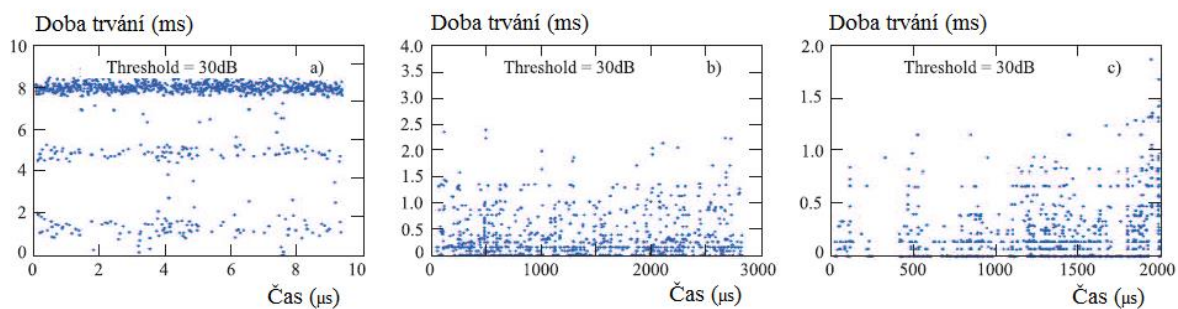
Na obrázku Obr. 25 je závislost amplitudy akustického výboje na čase. Můžeme pozorovat, že bez ohledu na přiložené napětí intenzita akustického signálu se mění s časem. Při srovnání výsledků měření velikosti amplitudy vidíme, že amplituda akustického signálu je pro střídavé napětí vyšší.



Obr. 25: Velikost amplitudy akustického signálu v závislosti na čase. AC (vlevo), DC+ (uprostřed) a DC- (vpravo). Převzato z [16]



Obr. 26: Doba náběhu akustického signálu v závislosti na čase. AC (vlevo), DC+ (uprostřed) a DC- (vpravo). Převzato z [16]



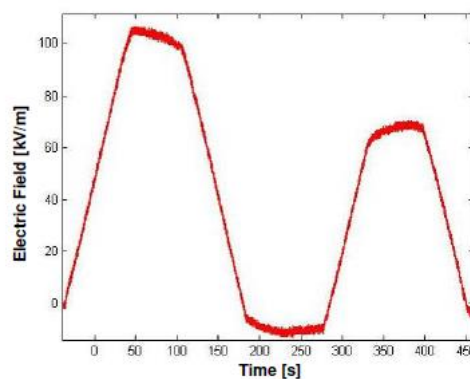
Obr. 27 Doba trvání akustického signálu v závislosti na čase. AC (vlevo), DC+ (uprostřed) a DC- (vpravo). Převzato z [16]

Na obrázku Obr. 26 a Obr. 27 jsou závislosti doby náběhu a doby trvání na čase. Při porovnání výsledků měření pro kladné a záporné stejnosměrné napětí zjistíme, že pro kladné napětí je doba náběhu a doba trvání akustického signálu delší.

Při stejnosměrném napětí, kdy na vysokonapěťovou elektrodu je přivedeno kladné napětí, se volné elektrony rychle pohybují směrem k vysokonapěťové oblasti a zanechávají za sebou pozitivní ionty, které se šíří do okolí. Vysoká rychlost elektronů a schopnost pohybu kladných iontů způsobují strmý čelní pulz. Pokud by byla vysokonapěťová elektroda záporná, elektrony pohybující se v médiu a kladné ionty by se pohybovaly rychleji k oblasti vysokého napětí, a způsobily by mnohem strmější pulz než při kladném napětí. To znamená, že záporný výbojový pulz má menší amplitudu s daleko kratší dobou náběhu a dobou trvání. [16]

### 3.3 Optická detekce částečných výbojů

V případě vzniku výboje dochází k emisi IR nebo UV elektromagnetických, případně akustických vln. Vizuální a akustický způsob měření je schopen detekovat pouze výboje v pokročilém stádiu. Naopak metody detekce elektrického pole podél izolantů umožňují odhalit přítomnost částečných výbojů už v prvotní fázi. K tomuto účelu se využívají speciální optické sondy založené na principu elektro-optického krystalu. Tyto sondy nemají vliv na měřené pole a mají lineární odezvu na elektrické pole. Jejich použití je ale omezeno jen na výboje v otevřeném prostoru jako je korona nebo případně povrchový výboj.

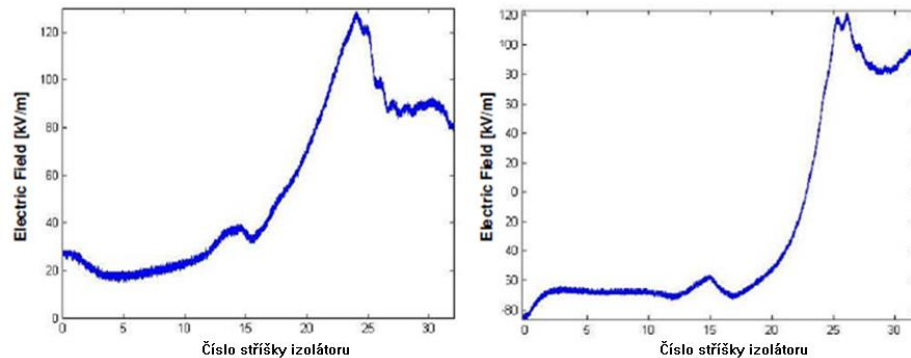


Obr. 28: Měření napěťové rampy. Převzato z [characterization of PD in transformer oil insulation under .....]

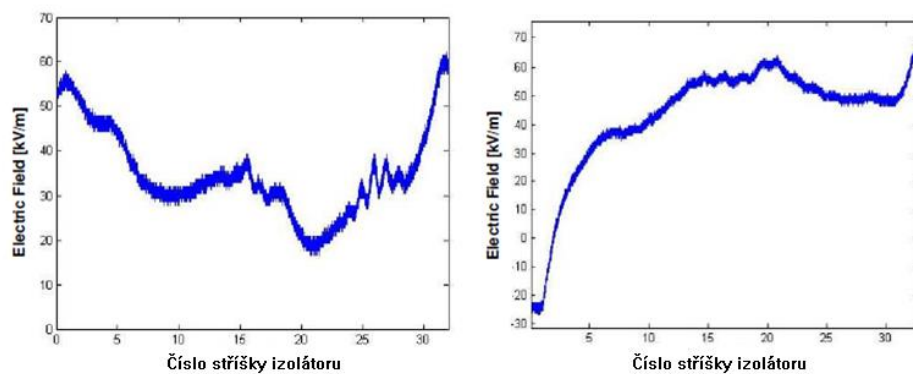
Experimentální měření bylo provedeno na čtyřech izolátorech: tři izolátory se známým defektem s různou polohou a jeden bez defektu. Při analýze rozdílů mezi profily pole bylo možné určit polohu vnitřního výboje. V první sérii testů byl testován výkon senzoru přiložením stejnosměrného napětí rampového charakteru. Na obrázku Obr. 28 je vyneseno

průběh elektrického pole v čase při napětí: první rampa z 0 na 130 kV, druhá ze 130 na 0 kV, třetí z 0 na 90 kV a čtvrtá z 90 na 0 kV.

Obrázek *Obr. 29* znázorňuje výsledky obdržené při měření intenzity elektrického pole v a) axiálním a b) radiálním směru pro izolátor s defektem. Na obrázku *Obr. 30* jsou pro porovnání výsledky z měření intenzit elektrického pole na izolátoru bez defektu. [10]



*Obr. 29: Intenzita elektrického pole v axiálním (vlevo) a) radiálním směru (vpravo) pro izolátor s defektem. Převzato z [10]*

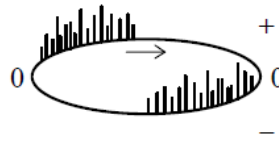


*Obr. 30: Intenzita elektrického pole v axiálním (vlevo) a) radiálním směru (vpravo) pro izolátor bez defektu. Převzato z [10]*

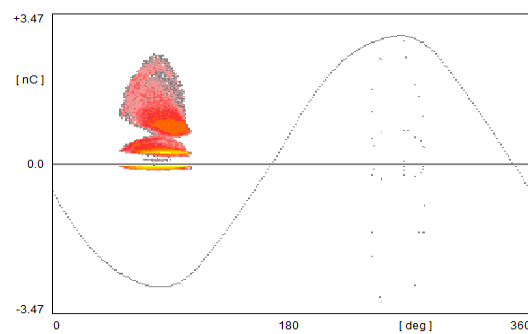
## 4. Vyhodnocování částečných výbojů při stejnosměrném napětí

U částečných výbojů při střídavém napětí se provádí vyhodnocování podle umístění jednotlivých výbojů na křivce napájecího napětí, to znamená podle fázového úhlu  $\Phi$

částečných výbojů. Jako slovník modelových částečných výbojů se využívají Lissajousovy obrazce nebo digitální výstupy z měřicích softwarů. [7]

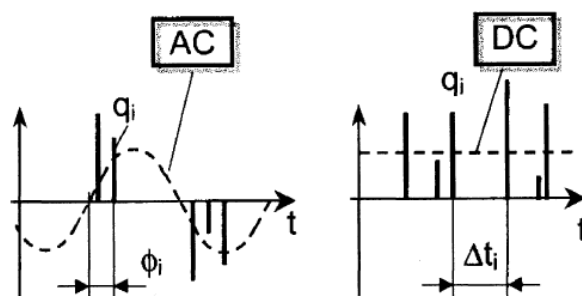


Obr. 31: Lissajousův obrazec pro stejnosměrný vnitřní výboj při střídavém napětí.



Obr. 32: Digitální výstup z měření částečných výbojů při stejnosměrném napětí pro uspořádání hrot deska.

V případě částečných výbojů při stejnosměrném napětí nedošlo ke standardizování jejich vyhodnocování. Při detekci výbojů můžeme měřit tři základní veličiny: velikost výboje  $q$ , čas vzniku výboje  $t$  a okamžité napětí na testovaném objektu  $U_{(t)}$ . [2, 3]



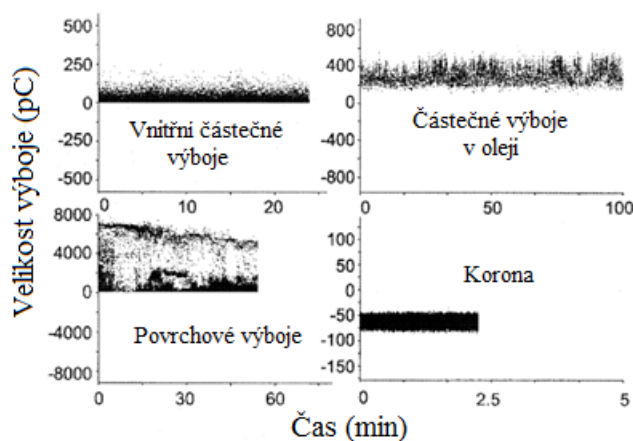
Obr. 33: Základní parametry částečných výbojů při střídavém a stejnosměrném napětí. Převzato z [8]

## 4.1 Grafická prezentace částečných výbojů při stejnosměrném napětí

Data získaná z měření částečných výbojů můžeme graficky zobrazovat mnoha způsoby. Reprezentování dat závisí na zvážení, zda se jedná o základní prezentaci výsledků, či se jedná o rozsáhlou analýzu určenou pro klasifikaci typu výboje.

### Velikost výboje jako funkce času: $q(t)$

Grafické vyjádření  $q(t)$  je nejjednodušší a nejčastěji používaný způsob reprezentace. Na obrázku *Obr. 34* je grafické znázornění pro 4 modelové typy výbojů: vnitřní výboj, výboj v oleji, povrchový výboj a korona.

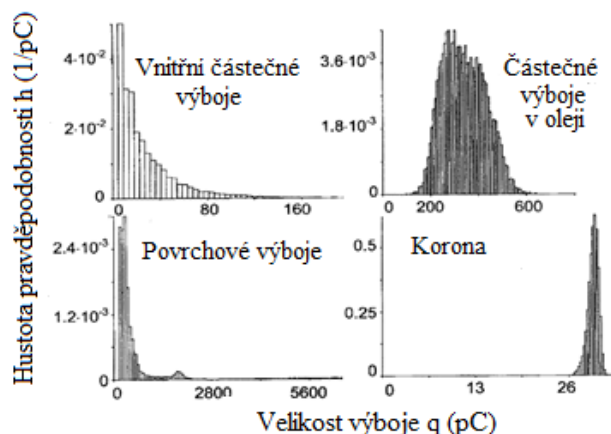


*Obr. 34: Graf závislosti velikosti výboje  $q$  na čase pro různé druhy částečných výbojů. Převzato z [8]*

Z obrázku je vidět, že velikost vnitřních výbojů se koncentruje v oblasti nižších hodnot. Výbojová aktivita v oleji je charakteristická kolísáním v čase a širokým rozptylem velikosti výbojů. Z obrázku je také patrné nestabilní chování povrchových výbojů a naopak lineární průběh korony, pro niž jsou typické výboje v záporné části grafu. [1,8]

### Hustota rozdělení pravděpodobnosti velikosti výboje $H(q)$

Histogram amplitud částečných výbojů je často používaný způsob reprezentace dat. Na obrázku *Obr. 35* je grafické zobrazení hustoty rozložení pravděpodobnosti modelových defektů.

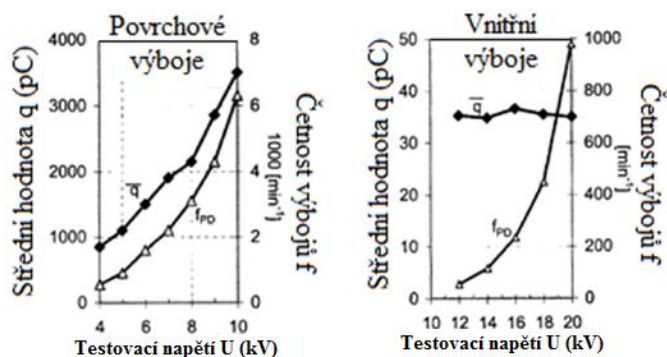


Obr. 35: Histogram částečných výbojů. Převzato z [8]

Pro vnitřní výboje pravděpodobnost výskytu exponenciálně klesá s velikostí výboje. Výboje v oleji představují histogram symetrický okolo specifické velikosti výboje. Pro povrchové výboje pravděpodobnost výskytu výboje klesá exponenciálně s velikostí výboje. Ale na rozdíl od vnitřních výbojů můžeme pozorovat lokální maxima v závislosti. Korona se vyznačuje symetrickým rozložením kolem specifické hodnoty velikosti výboje, ale v porovnání s výboji v oleji je její graf velice úzký. [1,8]

#### Velikost výboje a četnost výbojů jako funkce testovacího napětí

Další relativně jednoduchý způsob, jak reprezentovat data, je grafické zobrazení velikosti výboje, respektive četnosti výbojů v závislosti na testovacím napětí. Výsledné grafy pro vnitřní a povrchové výboje jsou zobrazeny na obrázku Obr. 36.



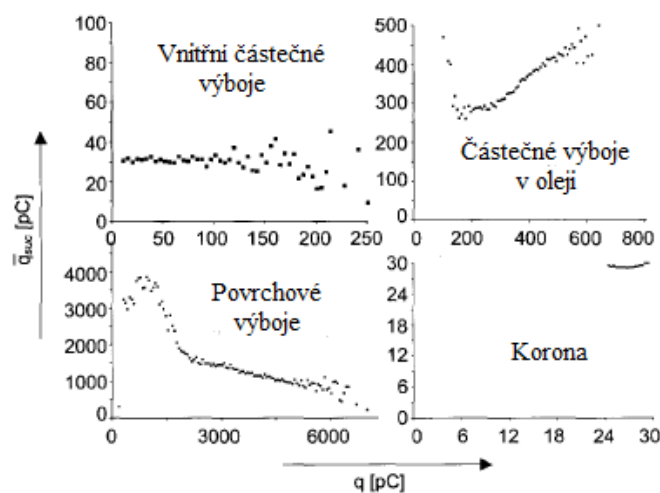
Obr. 36: Velikost výboje a četnost výbojů v závislosti jako funkce testovacího napětí. Převzato z [8]



Jelikož je objem výboje omezen velikostí dutinky, velikost výboje je silně ovlivněna rozsahem napětí v dutince. Naopak povrchový výboj vykazuje závislost velikosti výbojové oblasti na testovacím napětí. [8]

### Vztah mezi velikostí výboje a průměrnou velikostí předešlého a následujícího výboje

Graf závislosti mezi velikostí výboje a průměrnou velikostí následujícího výboje  $q - \bar{q}_{suc}$  je zobrazen na obrázku Obr. 37. Hodnota  $\bar{q}_{suc}$  byla stanovena zprůměrováním všech výbojů, které následovaly po výboji  $q$ . Pro vnitřní výboj je  $\bar{q}_{suc}$  nezávislé na  $q$ , což značí téměř přímkový průběh grafu. To samé platí pro koronu, která se vyznačuje minimální oblastí velikosti výboje. Pro výboje v oleji platí přímá úměrnost  $\bar{q}_{suc}$  a  $q$ . Povrchové výboje se naopak vyznačují nepřímou úměrností  $\bar{q}_{suc}$  a  $q$ . [1,8]



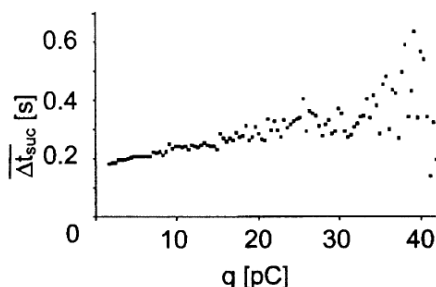
Obr. 37: Graf závislosti velikosti výboje na průměrné velikosti následujícího pro různé druhy částečných výbojů. Převzato z [8]

### Vztah mezi velikostí výboje a průměrným časovým intervalem předešlého a následujícího výboje

V případě vnitřních výbojů lze vyvodit přímý vztah mezi průměrným časovým intervalem předešlého  $\bar{\Delta t}_{suc}$  a následujícího výboje  $\bar{\Delta t}_{pre}$  a velikostí výboje  $q$ . Aby tato závislost platila, budeme předpokládat, že výboj vyplňuje celý objem dutinky, a je tedy Townsendova typu. Na obrázku Obr. 38 je znázorněna závislost  $\bar{\Delta t}_{suc} - q$  pro případ vnitřního výboje. Z grafu je



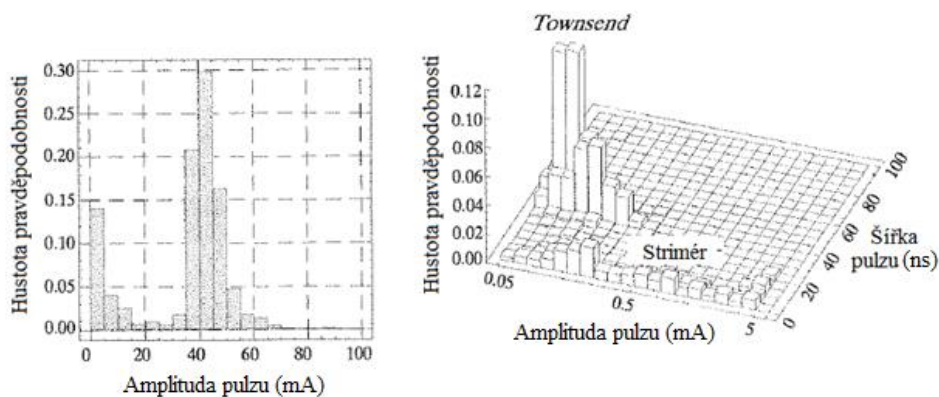
vidět, že pro vyšší hodnoty výboje už tato závislost (téměř) neplatí. Tento jev je možné odůvodnit tím, že výboje s vyšší amplitudou jsou především striméry. [8]



Obr. 38: Průměrný časový interval do následujícího výboje v dutince. Převzato z [8]

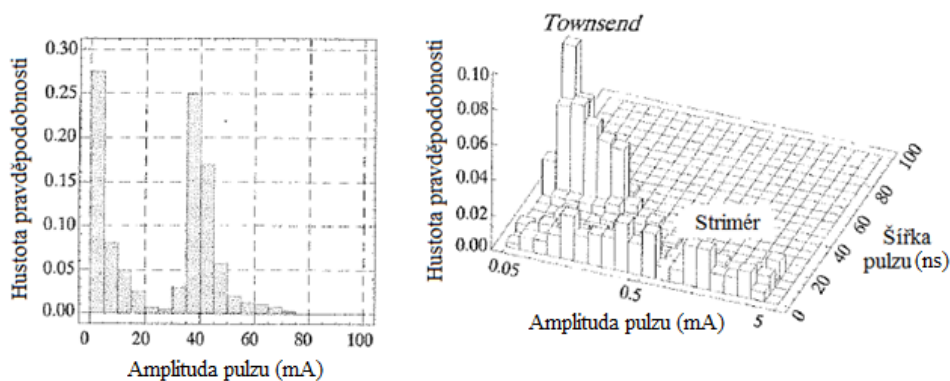
### 3D histogram

Další způsob vyhodnocování částečných výbojů při stejnosměrném napětí je interpretace založená na trojdimenzionálním výbojovém histogramu. I u tohoto typu histogramu se objevuje charakteristické uspořádání pro jednotlivé druhy defektu.



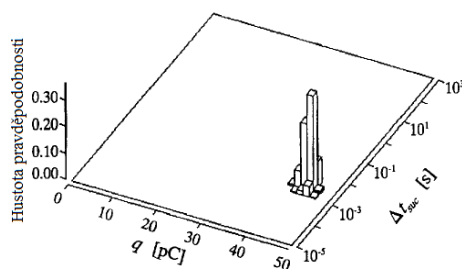
Obr. 40: Histogram šířky a výšky pulzu vnitřního výboje při testovacím napětí 15 kV. Převzato z [2]

Na obrázku Obr. 40 a Obr. 41 jsou zobrazeny histogramy pro vnitřní výboje při různé velikosti testovacího napětí. První maximum představuje strimér a zvyšuje se s velikostí testovacího napětí. Projevuje se menší šířkou pulzu než výboj Townsenda typu (druhé maximum). Toto chování se vysvětluje tím, že vyšší testovací napětí vede k rychlejšímu nárůstu napětí na dutince, takže přepětí  $\Delta U$  je také vyšší. Zvýšené přepětí vede ke zvýšení pravděpodobnosti výskytu výboje typu strimér.



Obr. 41: Histogram šířky a výšky pulzu vnitřního výboje při testovacím napětí 20 kV. Převzato z [2]

Korona se vyznačuje velice úzkou oblastí histogramu Obr. 42. Velikost výboje a doba mezi následujícími výboji je téměř konstantní při konstantní velikosti testovacího napětí. [2,3]

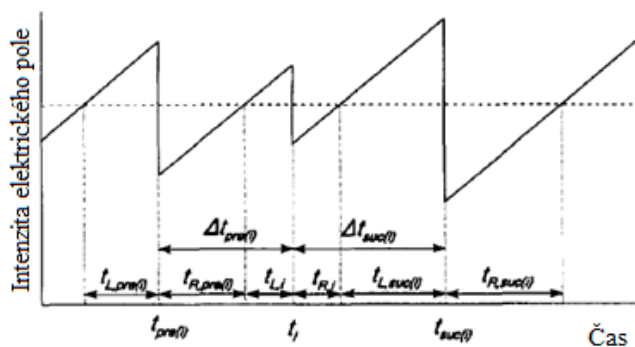


Obr. 42: Histogram korony ve vzduchu při testovacím napětí 8 kV. Převzato z [3]

## 4.2 Time lag/recovery model

Time lag/recovery model je metoda klasifikace částečných výbojů, která je určena pro vyhodnocování chování výbojů, vznikajících pouze v jednom místě testovaného objektu. Avšak použití tohoto modelu je omezeno pouze na několik speciálních případů a není vhodný pro klasifikaci výbojů v praxi. Tento model je výhradně určen pro výzkum vlastností částečných výbojů při statistickém měření.

Výboj, který vznikl v čase  $t_L$ , má časovou prodlevu  $t_{Li}$  a dobu zotavení  $t_{Ri}$ . Doba vzniku předcházejícího výboje je značena  $t_{pre(i)}$  a následujícího výboje  $t_{suc(i)}$ . Čas mezi předešlým a stávajícím výbojem je  $\Delta t_{pre(i)}$  a analogicky pro následující výboj  $\Delta t_{suc(i)}$ . Dále je předpokládáno, že velikost výboje není závislá na předchozím výboji.



Obr. 43: Časové označení výbojů. Převzato z [3]

Průměrná časová prodleva  $t_l$  následujících n náhodně vybraných výbojů:

$$\bar{t}_L = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n t_{L,suc(i)} \quad (4.1)$$

Analogicky průměrná doba zotavení  $t_R$  předcházejících n náhodně vybraných výbojů:

$$\bar{t}_R = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n t_{R,pre(i)} \quad (4.2)$$

Časový interval od předešlého výboje je součtem časové prodlevy a doby zotavení předešlého výboje:

$$\Delta t_{pre(i)} = t_{R,pre(i)} + t_{L,i} \quad (4.3)$$

Podobně časový interval do následujícího výboje je součtem zotavovacího času a časové prodlevy následujícího výboje:

$$\Delta t_{suc(i)} = t_{R,i} + t_{L,suc(i)} \quad (4.4)$$

Z toho analogicky můžeme určit průměrný časový interval pro předchozí výboj:

$$\bar{\Delta t}_{pre} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (t_{R,pre(i)} + t_{L,i}) \quad (4.5)$$

A pro  $n$  výbojů se stejnou velikostí výboje můžeme psát:

$$\overline{\Delta t}_{pre}(q) = t_L(q) + \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n t_{R,pre(i)} \quad (4.6)$$

Po zjednodušení rovnice (4.2) a (4.6) dostaneme novou rovnici:

$$\overline{\Delta t}_{pre}(q) = t_L(q) + \bar{t}_R \quad (4.7)$$

A analogicky průměrný časový interval do následujícího výboje:

$$\overline{\Delta t}_{suc}(q) = t_R(q) + \bar{t}_L \quad (4.8)$$

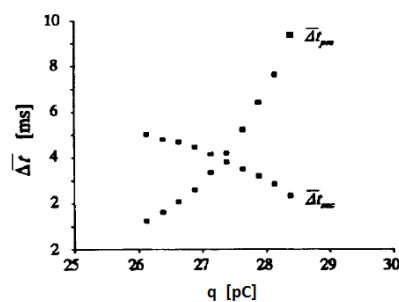
V modelu je tedy předpokládán průměrný časový interval mezi výboji, který je různý pro předchozí a následující výboj, a stejná velikost po sobě jdoucích výbojů.

#### 4.2.1 Experimentální ověření metody

Tento model byl experimentálně ověřován pro koronu a vnitřní výboje. Vypočítané hodnoty byly zobrazovány v  $q - \overline{\Delta t}_{suc}$  a  $q - \overline{\Delta t}_{pre}$  grafech.

##### Záporná korona:

Z rovnice 4.7 a obrázku *Obr. 32* vyplývá, že zvětšení velikosti výboje bylo způsobeno prodloužením času  $t_L$ . Takové chování odpovídá předpokladu. Prodloužením časové prodlevy  $t_L$  dochází k zapálení výboje při vyšší intenzitě pole. Dochází tedy k výbojům větší velikosti, jelikož pro uhašení výbojového procesu je nutný větší objem prostorového náboje.



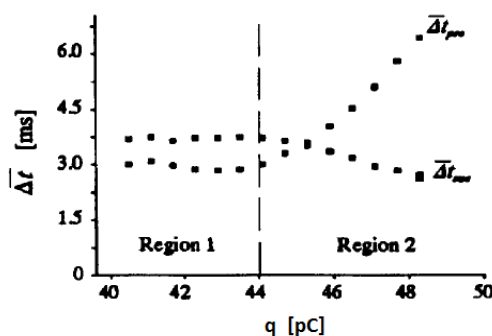
Obr. 44: Výsledky měření na modelovém uspořádání se záporným hrotem při napětí 6,5 kV. Převzato z [3]

Rovnice 4.8 a obrázek *Obr. 44* vedou k závěru, že zvětšení velikosti výboje způsobuje zkrácení zotavovacího času. Tento jev je vysvětlován pomocí dvou odlišných teorií. Za prvé, snížením velikosti prostorového náboje generovaného předešlým výbojem. V průběhu času pole mizí, a tak dochází k opětovnému zvýšení intenzity pole. Vyšší velikost výboje souvisí s větším prostorovým nábojem, což způsobuje prodloužení zotavovacího času. Za druhé, zvětšení ionizačního koeficientu v objemu plynu, kde vzniká výboj. Zvýšený ionizační koeficient způsobuje pokles minimální intenzity pole potřebné ke vzniku výboje.

#### Kladná korona:

V případě kladné korony nejsou výsledky experimentu tak jednoznačné jako u záporné korony. Na obrázku *Obr. 45* můžeme naměřené hodnoty rozdělit do dvou oblastí. V první oblasti, výboje menší než 44 pC,  $\overline{\Delta t}_{pre}$  a  $\overline{\Delta t}_{suc}$  nejsou funkcí velikosti výboje. Pokud vyjdeme z rovnice 4.7 a 4.8, dojdeme ke dvěma závěrům. Za prvé, zotavovací čas není funkcí velikosti výboje, což je vysvětlováno stejně jako v případě záporné korony. Zadruhé, časová prodleva  $t_L$  není stanovena velikostí výboje. V tomto případě je nutné provést ještě další měření.

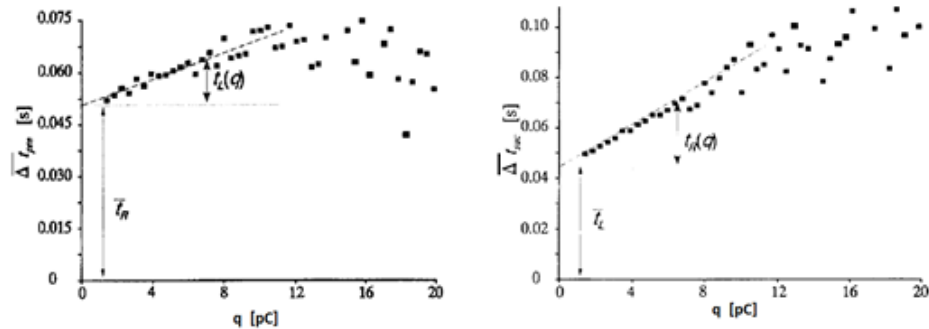
V druhé oblasti, pro výboj větší než 44 pC,  $\overline{\Delta t}_{pre}$  se zvětšuje s rostoucí velikostí výboje  $q$ , zatímco  $\overline{\Delta t}_{suc}$  klesá. Vysvětlení může být podobné jako v případě záporné korony. Závislost  $t_R$  na  $q$  je dána snížením velikosti prostorového náboje a zvýšením ionizačního efektu.



*Obr. 45: Výsledky měření na modelovém uspořádání s kladným hrotem při napětí 8 kV. Převzato z [3]*

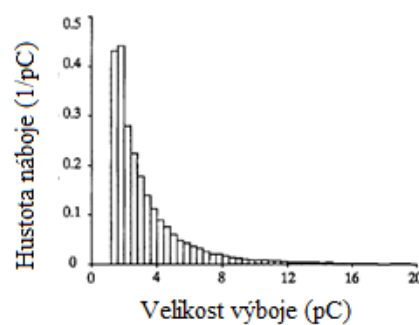
Vnitřní částečné výboje:

Time lag/recovery model může být dobře využit, pokud dochází k výboji v celém objemu dutinky. Tento předpoklad je splněn pro výboje Towsendova typu.



Obr. 46: Střední velikost předešlých (vlevo) a následujících (vpravo) výbojů jako funkce velikosti výboje pro velikost napětí 20 kV. Převzato z [3]

Střední hodnota velikosti následujícího výboje nezávisí na velikosti současného výboje, což splňuje jeden z předpokladů, na kterých je založen time lag/recovery model. Pro malé hodnoty výbojů můžeme Obr. 46 pozorovat téměř lineární závislost mezi  $q$ ,  $\overline{\Delta t}_{pre}$  a  $\overline{\Delta t}_{suc}$ . Pro vyšší velikost výboje dochází k většímu rozptylu hodnot, což je způsobeno malo hustotou pravděpodobnosti, a tedy nízkým počtem výbojů za nabíjecí interval Obr. 47.

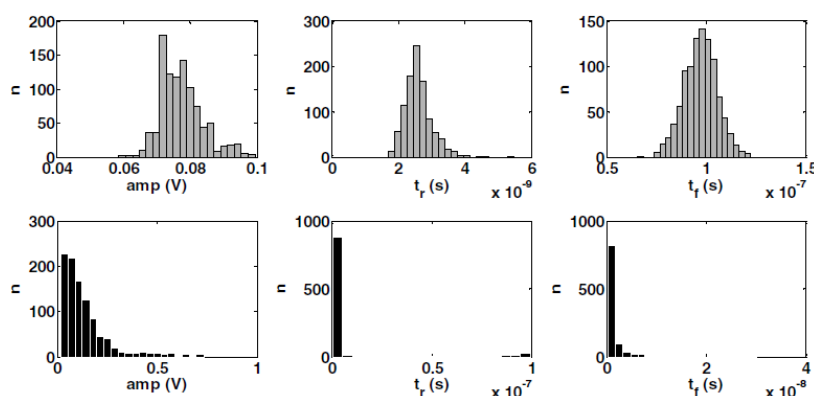


Obr. 47: Histogram velikosti výboje při napětí 20 kV. Převzato z [3]

Rozptyl také může být způsoben tím, že vyhodnocovací model je určen pro výboje Towsendova typu, ale pro vyšší hodnoty výboje je spíše charakteristický výboj typu strimér. [3]

### 4.3 Statistická analýza

V některých případech není dostatečná analýza jednoho pulzu, ale provádí se statistická analýza pro vysoký počet po sobě jdoucích pulzů. Naměřená data jsou analyzována na základě tří parametrů: velikosti výboje, doby náběhu (čela)  $t_r$  a doby týlu  $t_f$ . Na obrázku *Obr. 48* je zobrazena četnost rozložení pro měření ve vzduchu a oleji.



*Obr. 48: Četnost rozložení měření částečných výbojů v závislosti na amplitudě (vlevo), doby náběhu (uprostřed), doby týlu (vpravo) pro měření ve vzduchu (šedá) a oleji (černá). Převzato z [5]*

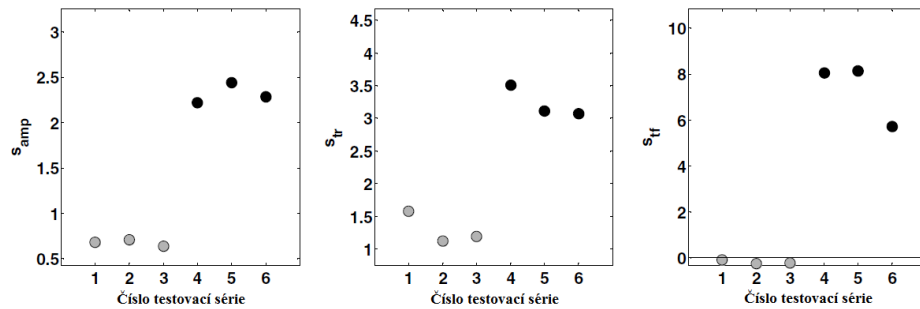
Aby bylo možné porovnat naměřená rozdělení matematicky, využívá se několika klíčových ukazatelů pro popis tvaru histogramu.

#### Šikmost

Šikmost popisuje asymetrii rozložení s ohledem na průměrnou hodnotu. Je dána:

$$S = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3}{\left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right)^{3/2}} \quad (4.10)$$

Záporná hodnota šikmosti indikuje rozdělení směrem doleva od průměru, kladná hodnota směrem doprava od průměru. Šikmost normálního rozdělení se rovná nule.



Obr. 49: Šikmost frekvenčního rozložení amplitudy (vlevo), doby náběhu (uprostřed) a doby týlu (vpravo). Tři testovací série pro výboje ve vzduchu (šedá) a v oleji (černá). Převzato z [5]

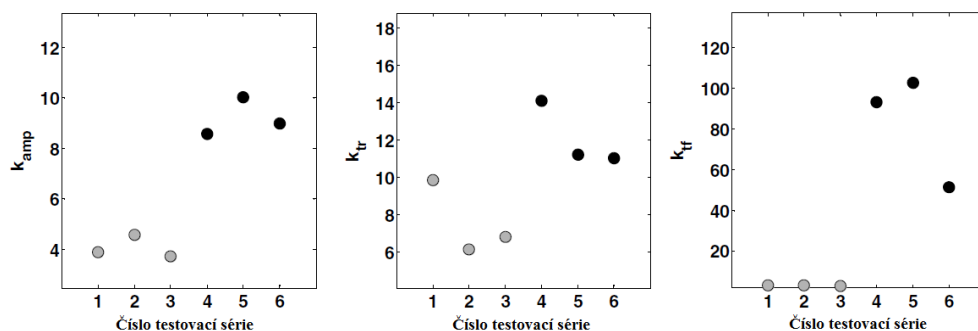
Na obrázku obr. 49 jsou uvedena šikmost naměřených parametrů pro výboje ve vzduchu a oleji. Hodnota šikmost parametrů výbojů ve vzduchu se pohybuje v okolí nuly. Zatímco šikmost výbojů v oleji dosahuje relativně vysokých kladných hodnot. [3,5]

### Špičatost:

Špičatost označuje strmost pravděpodobnostního rozložení a je definována rovnicí 4.11.

$$k = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^4}{\left( \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \right)^2} \quad (4.11)$$

Špičatost normálního rozložení je  $k = 3$ . Rozložení se špičatostí  $k < 3$  je relativně rovnoměrné. V případě, že  $k > 3$  rozložení je strmé. Špičatost normálního rozložení je  $k = 3$ .



Obr. 50: Špičatost frekvenčního rozložení amplitudy (vlevo), doby náběhu (uprostřed) a doby týlu (vpravo). Tři testovací série pro výboje ve vzduchu (šedá) a v oleji (černá). Převzato z [5]

Výsledky z měření částečných výbojů Obr. 50 ukazují, že špičatost parametrů výbojů v oleji je několikrát vyšší než u výbojů ve vzduchu. [3,5]



## Maxima

Maxima rozlišují mezi rozložením s jedním maximem a rozložením s několika maximy.

## Asymetrie

Asymetrie je kvocient vyjadřující úroveň předešlé a následující části  $H_{qmax}(\Delta t)$  a  $H_{qn}(\Delta t)$  rozložení.

## CC

Faktor křížové korelace (CC) udává rozdíl mezi předešlou a následující částí  $H_{qmax}(\Delta t)$  a  $H_{qn}(\Delta t)$  rozložení. [1, 8, 9]

## **4.4 Metoda klouzavého průměru**

Metoda klouzavého průměru se dá v principu chápat jako průměrná velikost energie částečného výboje v určitém časovém okamžiku. Tato metoda se používá pro chápání charakteristických variací v čase. Vytvořením průměrné hodnoty energie částečného výboje na každé úrovni, která se mění s příspěvkem nových dat, dochází k vyhlazování charakteristické variace, takže se časem redukuje výkyvy. Výsledek směřuje k variaci energie částečných výbojů za dobu analýzy.

Existuje několik druhů metod klouzavého průměru. Například jednoduchá metoda klouzavého průměru, metoda exponenciálně klouzavého průměru, metoda časové řady klouzavého průměru atd.

### Jednoduchá metoda klouzavého průměru

Bylo vybráno  $k$  bodů k nalezení klouzavého průměru pomocí vzorce 4.9, kde  $X_i$  je nově vypočítaný klouzavý průměr odpovídající  $Y_N$  výchozím datům. Tato metoda se například

používá pro vyhodnocování dat při akustickém měření částečných výbojů při stejnosměrném napětí

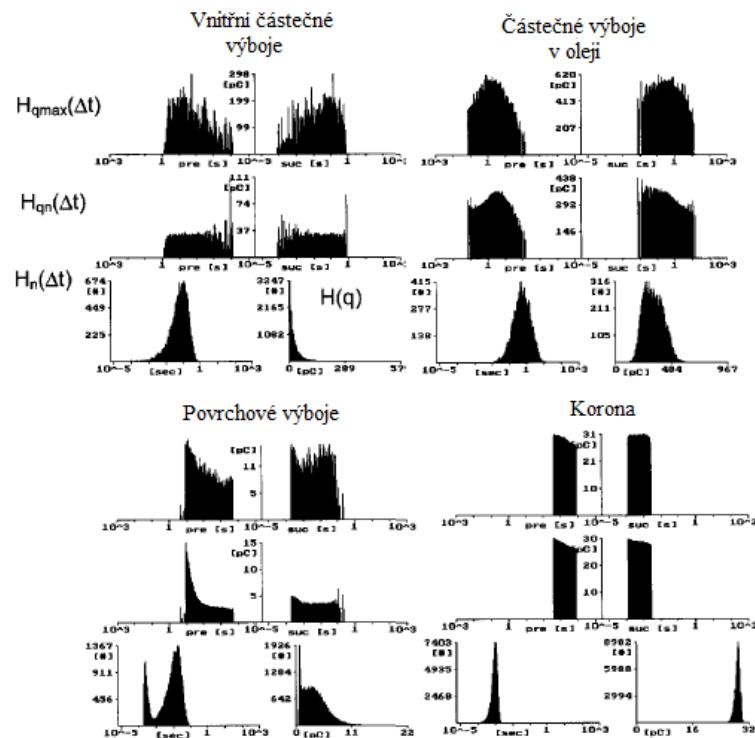
$$X_i = \frac{\sum_{N-i}^{N-i+k}}{k} \quad (4.9)$$

[16]

## 4.5 Databáze pro klasifikaci výbojů

Databáze obsahující fingerprinty velkého množství známých defektů a jsou vytvářeny z důvodu klasifikace částečných výbojů. Parametry získané z měření známých defektů jsou použity pro vytvoření rozdělení pravděpodobnosti *Obr. 51*.

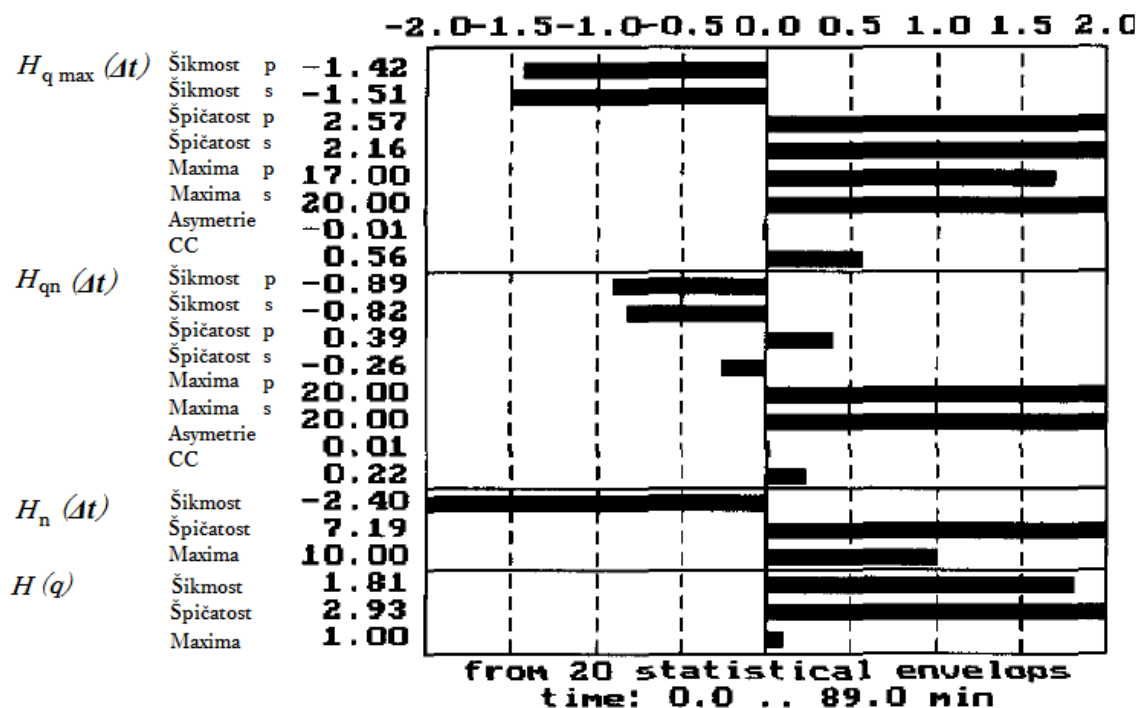
- $H_{q \max}(\Delta t_{pre})$  a  $H_{q \max}(\Delta t_{suc})$  reprezentují maximální velikost výboje jako funkci časového intervalu  $\Delta t$  mezi výboji
- $H_{q n}(\Delta t_{pre})$  a  $H_{q n}(\Delta t_{suc})$  představují průměrnou velikost výboje jako funkci  $\Delta t_{pre}$  nebo  $\Delta t_{suc}$
- $H(q)$ , histogram velikosti výboje
- $H_n(\Delta t)$ , což představuje hustotu rozdělení pravděpodobnosti časového intervalu mezi jednotlivými výboji



Obr. 51: Hustota rozdělení pravděpodobnosti čtyř druhů výbojů použítá pro vybudování databáze pro klasifikaci výbojů.  
Převzato z [8]

Každé rozdělení má charakteristický tvar, který závisí na druhu defektu izolantu. Tvar rozdělení může být popsán množinou 22 statistických parametrů. Fingerpint s uvedenými parametry je na obrázku Obr. 52.

Pro klasifikaci neznámého zdroje výbojů se porovná fingerprint neznámého defektu s fingerprinty obsaženými v databázi. Pro ověření klasifikačního procesu bylo provedeno zpětné testování databáze. Optimální klasifikační proces by nastal v momentě, kdy by byly všechny proměřované defekty určeny správně. Pokud by některé defekty byly určeny špatně, vyřadí se z databáze. [1, 8, 9]



Obr. 52: Fingerprint zdroje výbojů. Převzato z [1]

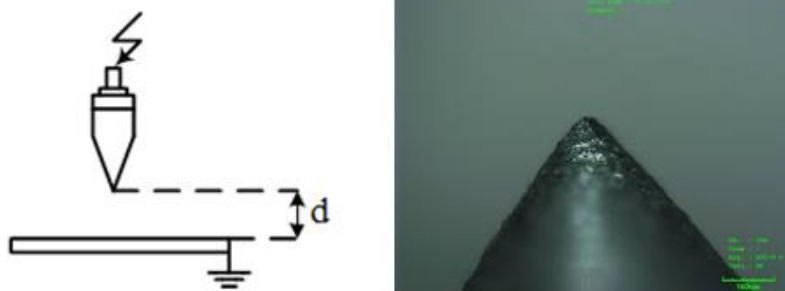
## 4.6 Vícenásobný defekt

Způsob analýzy, který byl dosud popsán, je určen pro prezentaci jediného defektu v testovaném objektu. Se vzrůstajícím počtem částečných výbojů ve vzorku se analýza výsledků stává mnohem komplexnější. V případě více defektů můžeme od sebe rozlišit více výbojů stejného typu nebo více zdrojů různých typů výbojů. Zdroje výbojové činnosti mohou být od sebe správně rozeznány, pokud mají stejné počáteční napětí, stejnou velikost výboje a stejný tvar rozložení. Pokud mají zdroje stejného typu různé velikosti výboje, mohou být od sebe odlišeny mírným zvyšováním testovacího napětí. Pokud jde o různé zdroje, může být provedena identifikace, pokud se zcela nepřekrývají histogramy částečných výbojů. V tomto případě mohou být zdroje všech výbojů analyzována separovaně. [8]

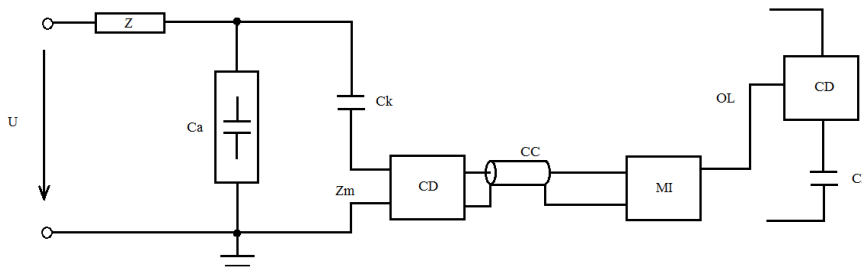
## 5. Vlastní měření

### 5.1 Měření vzniku výboje

Měření částečných výbojů bylo provedeno pro modelové uspořádání hrot-deska *Obr. 53*. Byl použit základní měřící obvod *Obr. 54* s vysokonapětovým zdrojem s maximálním napětím 135 kV. Obvod byl sestaven z vazební kapacity  $C_k = 1000\text{pF} \pm 10\%$ , snímací impedance  $Z_m = 50\Omega$  a analyzátoru částečných výbojů PD SMART.



*Obr. 53: Modelové uspořádání hrot deska (vlevo) a mikroskopický snímek hrotu (vpravo).  
Převzat z [4]*



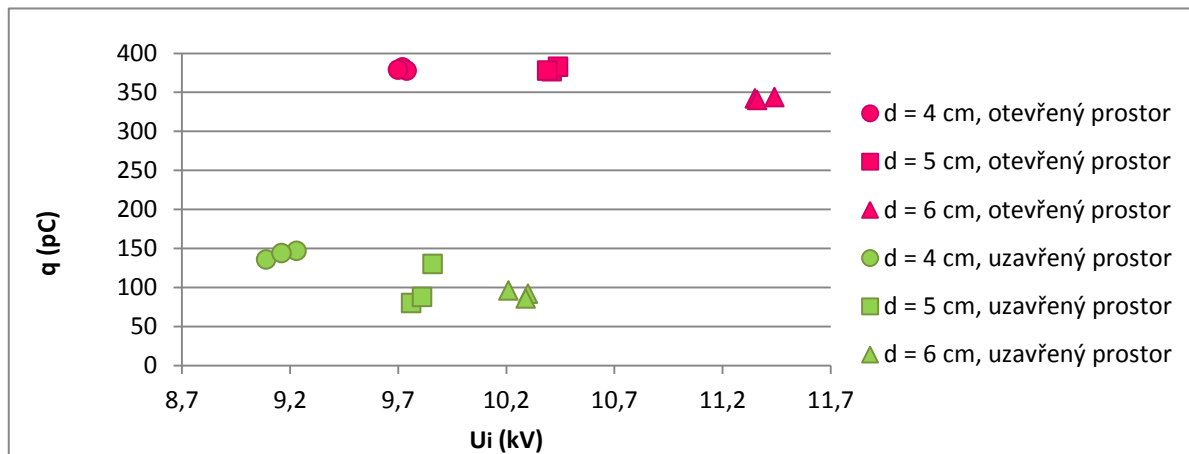
*Obr. 54: Měřící obvod. Převzato z [7]*

Na vstupní svorky bylo přiloženo střídavé a stejnosměrné napětí nejprve záporné, poté kladné polarity. Napětí bylo zvyšováno od 0 do okamžiku vzniku výboje a bylo naměřeno zapalovací napětí  $U_i$ . Následně bylo napětí snižováno do doby zániku výboje a byla tak naměřena hodnota zhašecího napětí  $U_e$ . Měření bylo opakováno třikrát v intervalu mezi prvním a druhým měřením 10 min a mezi druhým a prvním 30 min.

*Tab. 1: Časové rozložení měření*

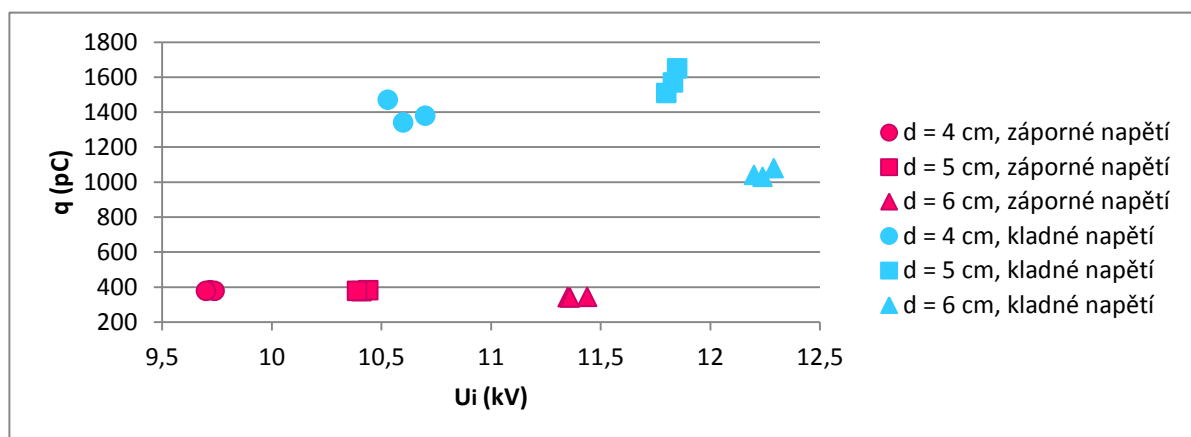
	AC,DC -, DC+
1.	Počáteční podmínky
2.	$t = + 10 \text{ min}$
3.	$t = + 30 \text{ min}$

Měření bylo provedeno pro 3 vzdálenosti hrotu od desky:  $d = 4, 5$  a  $6$  cm. Dále bylo měřeno uspořádání hrot-deska s bariérou o tloušťce  $0,285$  mm ze slídového kompozitu při konstantní vzdálenosti. Obě měření byla provedena pro otevřený a uzavřený prostor.



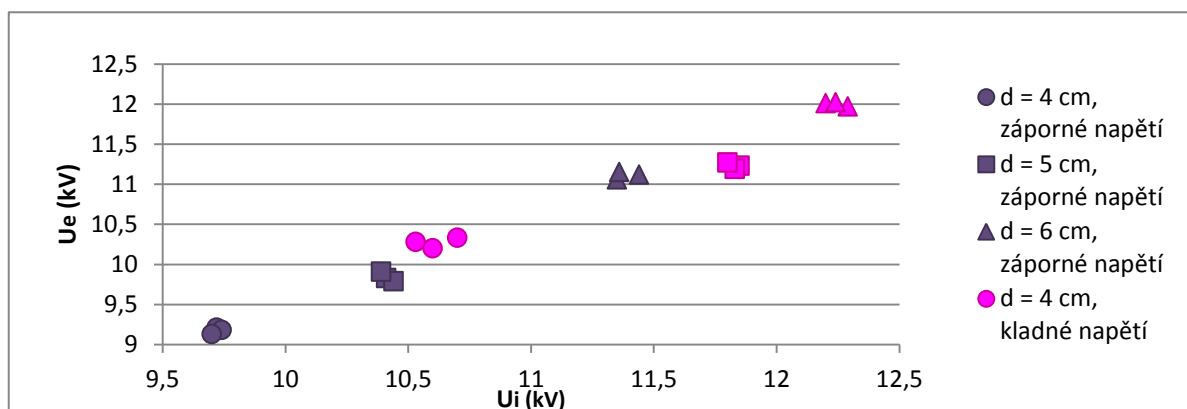
Obr. 55: Závislost  $q$  ( $U_i$ ) pro různé vzdálenosti hrot-deska v otevřeném a uzavřeném prostoru při DC-

Na obrázku Obr. 55 je vynesena závislost velikosti výboje na zapalovacím napětí korony pro 3 vzdálenosti hrot-deska v otevřeném a uzavřeném prostoru. Protože s rostoucí vzdáleností elektrod klesá velikost intenzity elektrického pole dochází k přeskupování prostorového náboje, zmenšuje se i velikost výbojů a zvyšuje se zápalné napětí. Velikost výbojů v otevřeném prostoru je značně větší než pro uzavřený prostor. Tento jev je způsoben tím, že vzniklý ozon a prostorový náboj se nemůžou v uzavřeném prostoru rozptýlit. Dochází tak ke zmenšení velikosti výboje a zápalného napětí.



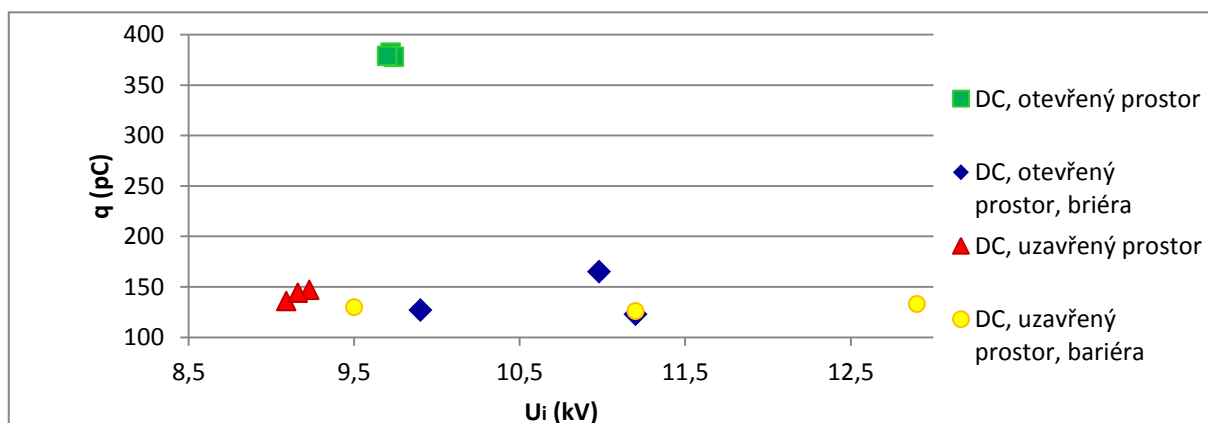
Obr.56: Závislost  $q$  ( $U_i$ ) pro různé vzdálenosti hrot-deska při DC- a DC+

Jelikož uspořádání se záporným hrotem má vyšší elektrickou pevnost, velikost výboje je menší než pro kladný hrot *Obr. 56*.



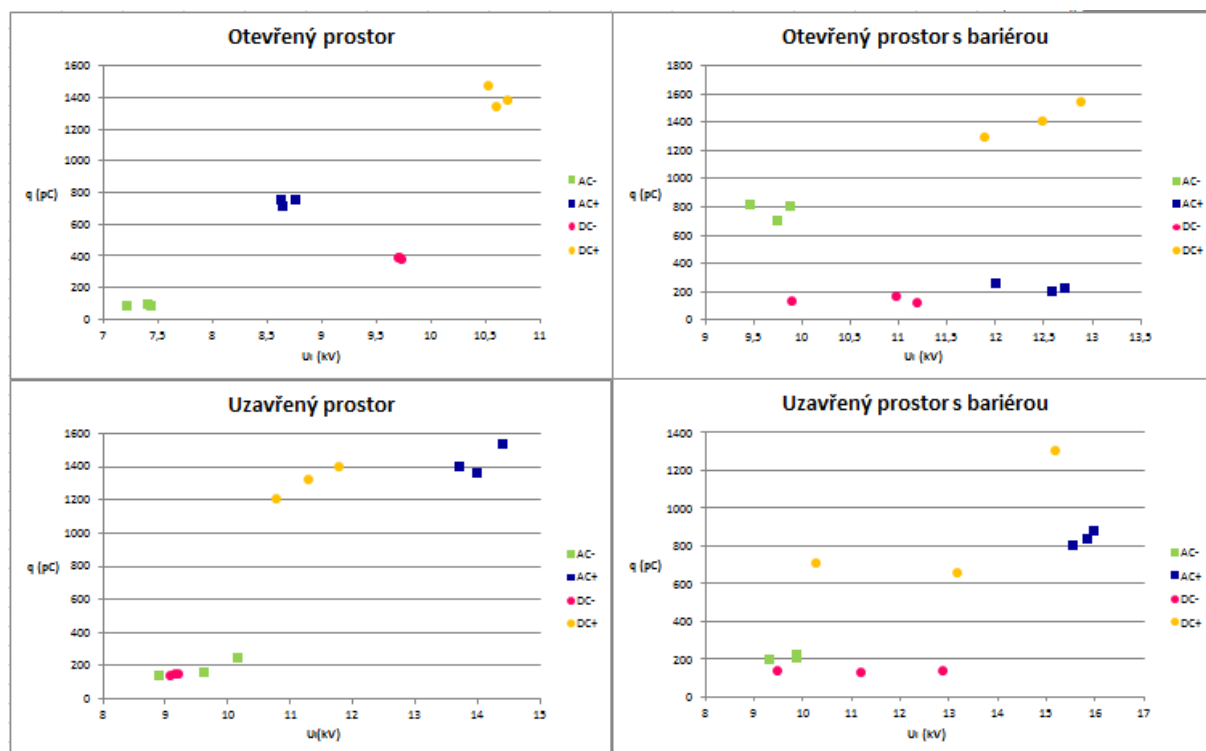
*Obr. 57: Závislost zhášecího napětí na zapalovacím pro DC- a DC+*

Obrázek *Obr. 57* znázorňuje závislost zhášecího napětí na zapalovacím. Čím větší je zapalovací napětí, tím je vyšší zhášecí napětí.



*Obr. 58: Závislost  $q$  ( $U_i$ ) pro modelové uspořádání hrot-deska a hrot-deska s bariérou v otevřeném a uzavřeném prostoru dří DC-*

Na obrázku *Obr. 58* je zobrazena závislost velikosti výboje na zapalovacím napětí pro uspořádání hrot-deska v otevřeném a uzavřeném prostoru a hrot-deska s bariérou v otevřeném a uzavřeném prostoru. Napěťový interval mezi jednotlivými výboji je větší pro model s bariérou, protože výboj je silněji ovlivněn prostorovým nábojem vznikajícím v okolí desky. Díky prostorovému náboji dochází ke zmenšování intenzity pole v oblasti hrotu, a tak se zvyšuje zapalovací napětí. Největší výboje vznikají v otevřeném prostoru.



Obr. 59: Závislost  $q(U_i)$  pro uspořádání hrot-deska v otevřeném a uzavřeném prostoru a hrot-deska s bariérou v otevřeném a uzavřeném prostoru při AC-, AC+, DC- a DC+.

Velikost výboje v otevřeném prostoru byla největší pro stejnosměrné napětí kladné polaritě. Amplituda korony při stejnosměrném napětí byla vždy větší pro danou polaritu než při střídavém napětí. To může být způsobeno dobou najíždění napětí, která je pro stejnosměrné napětí delší. Strmost nárůstu střídavého napětí je větší, proto došlo k zapálení výboje při menším napětí. Velikost výboje byla vždy větší pro kladnou polaritu výboje.

Pro modelové uspořádání v uzavřeném prostoru měla největší amplitudu výboje korona při kladném střídavém napětí a naopak nejmenší při záporném stejnosměrném napětí. Opět platilo, že větší velikost výboje byla dosažena při kladné polaritě napětí. Výboje při stejnosměrném napětí jsou zde více ovlivněny prostorovým nábojem, který se nemůže rozptýlit. Při střídavém napětí se prostorový náboj vybíjí reverzací napětí

Výboje na modelové uspořádání s bariérou v otevřeném prostoru měli největší velikost při záporné polaritě střídavého napětí. Naopak nejmenší velikost výbojů byla pro záporné stejnosměrné napětí. Velký interval mezi jednotlivými zapalovacími napětími při stejnosměrném napětí byl způsoben prostorovým nábojem, který vznikl na bariéře.



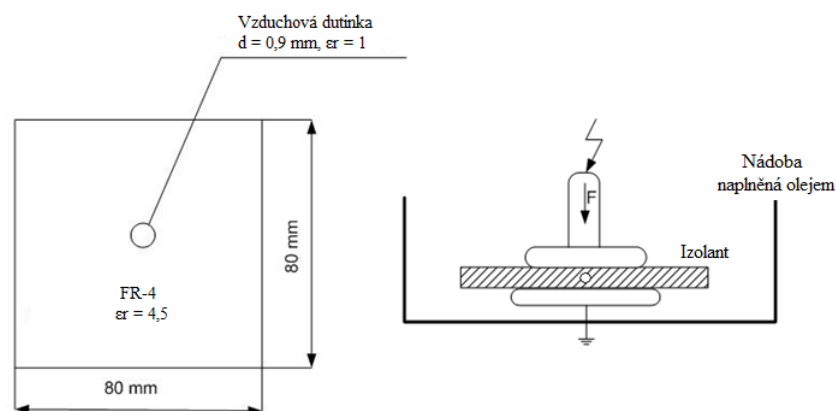
Tento jev byl umocněn tím, že byl model umístěn do uzavřeného prostoru. Rozdíl velikostí zapalovacího napětí mezi jednotlivými výboji ještě zvětšil.

## 5.2 Časoběrné měření výbojů

Pro časoběrné měření částečných výbojů byl použit stejný obvod jako při prvním měření *Obr. 54*. Funkci zdroj plnil transformátor s napětím 200 kV pro AC a 135 kV pro DC. V obvodu byla dále zapojena vazební kapacita  $C_k = 1000 \text{ pF} \pm 10\%$ , snímací impedance  $Z=50\Omega$  a analyzátor částečných výbojů PD SMART (Double Lemke).

Měření bylo provedeno při střídavém a stejnosměrném napětí záporné a kladné polarity. Doba trvání měření byla charakteristická pro každý model a polaritu. Výboje při stejnosměrném napětí byly měřeny při testovacím napětí  $U = 40 \text{ kV}$ . Korona při střídavém napětí byla testována pro  $U = 6 \text{ kV}$  a vnitřní výboje pro  $U = 10 \text{ kV}$  střídavého napětí.

Částečné výboje byly měřeny na modelu ze sklolaminátových epoxidových listů o rozměru 80x80 mm a celkové tloušťce 1,8 mm. Dutinka byla vytvořena v jednom z listů a její parametry byly mikroskopicky změřeny. Horní elektroda s kruhovým průřezem  $d = 50 \text{ mm}$  byla přitlačena na izolační materiál. Spodní elektroda měla kruhový průřez  $d = 75 \text{ mm}$ . Celý objekt byl vložen do transformátorového oleje, aby se zabránilo vzniku povrchových výbojů *Obr. 61*.



*Obr. 61: Dutinka v izolačním materiálu (vlevo) a modelové uspořádání pro měření vnitřních výbojů. Zdroj katedra*

Měření korony bylo provedeno na modelovém uspořádání hrot-deska. Tloušťka jehly měla 67  $\mu\text{m}$ . Změny tvaru jehly před a po měření, byly způsobené výbojovou aktivitou Obr. 62. Deska o tloušťce 0,6 mm byla umístěna do vzdálenosti 14 mm.

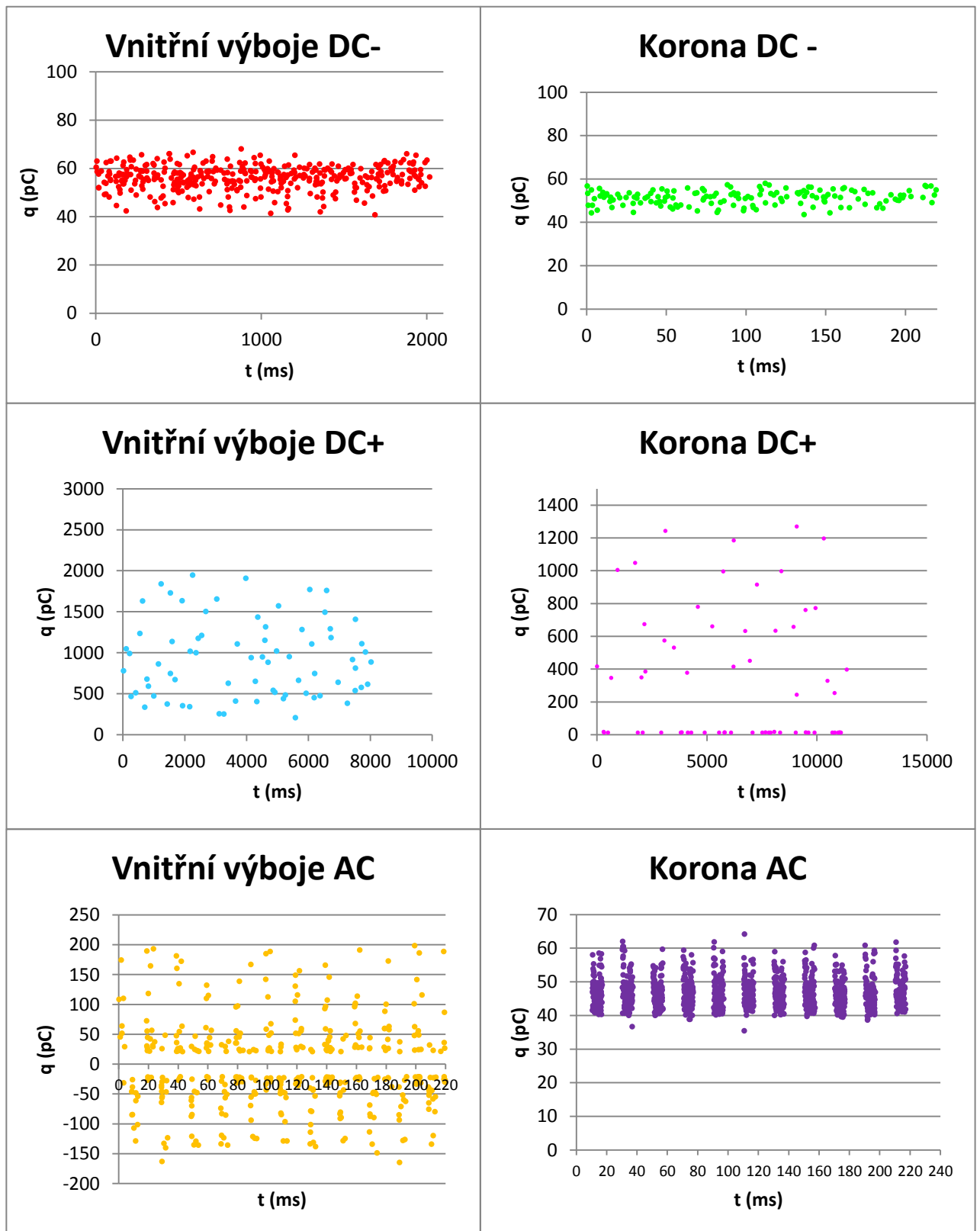


Obr. 62: Mikroskopický snímek jehly před (vlevo) a po měření (vpravo). Zdroj katedra

### Velikost výboje jako funkce času: $q(t)$

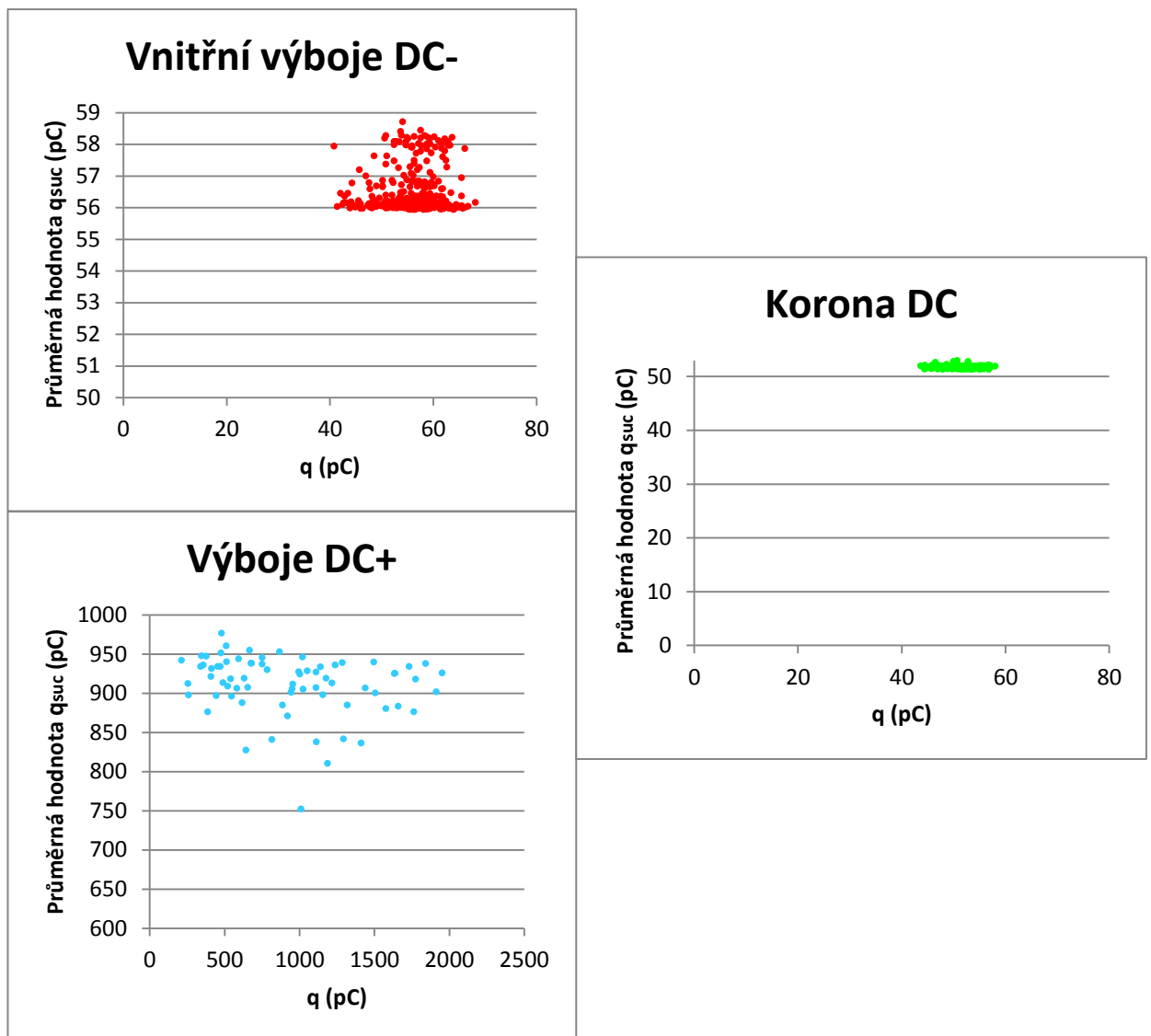
Na obrázku Obr. 63 je závislost velikosti výboje na čase pro vnitřní výboje a koronu. Amplituda vnitřních výbojů i korony při stejnosměrném napětí se pohybuje v oblasti nižších hodnot. Rozptyl velikostí výbojů je pro koronu menší než pro vnitřní výboje. Rozptyl amplitudy korony i vnitřních výboje je větší pro kladnou polaritu napětí. Velikost výbojů není časově závislá.

K vnitřním výbojům při střídavém napětí dochází při záporné i kladné polaritě a jejich velikost má větší rozptyl než korona při střídavém napětí. Korona při střídavém napětí vzniká jen v záporné půlvlně.



Obr. 63: Závislost  $q(t)$  pro vnitřní výboje a koronu při DC-, DC+ a AC

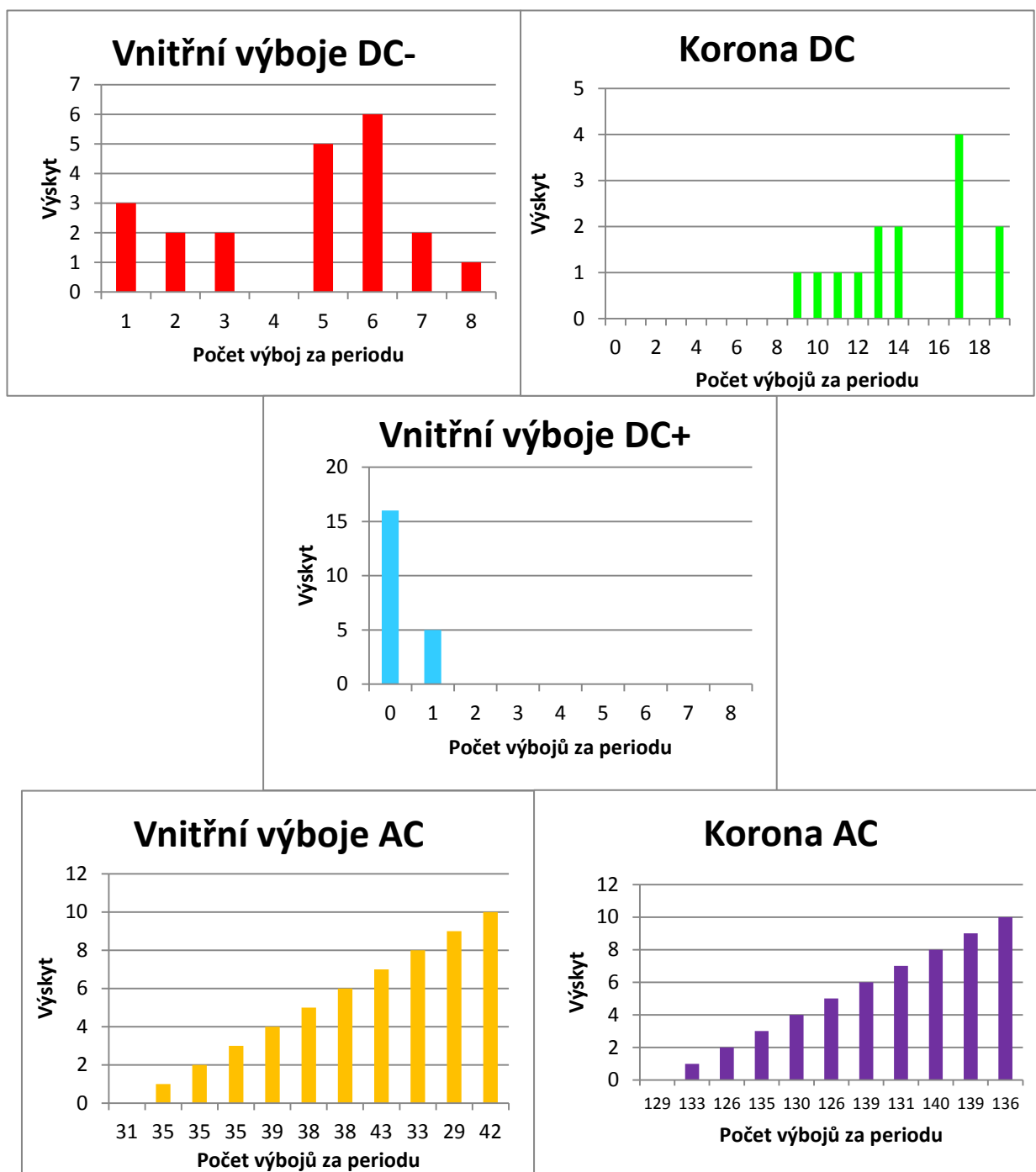
## Vztah mezi velikostí výboje a průměrnou velikostí následujícího výbojů

Obr. 64: Závislost  $q$  ( $q_{suc}$ ) pro vnitřní výboje a koronu při DC.

Grafy pro vnitřní výboje nevykazují žádnou zřetelnou závislost  $q(q_{suc})$ . Tato metoda je určena pouze pro vyhodnocování výbojů Townsendova typu. Jelikož změřené výboje jsou typu strimér, nemůžeme tuto klasifikační metodu využít.

V případě korony je  $q_{suc}$  nezávislé na  $q$ , protože prostorový náboj se může rozptýlit do okolí a neovlivňuje tak následující výboj. Oblast závislosti má minimální velikost, protože rozptýlené velikosti amplitud výboje je velice malý.

Počet výbojů za periodu

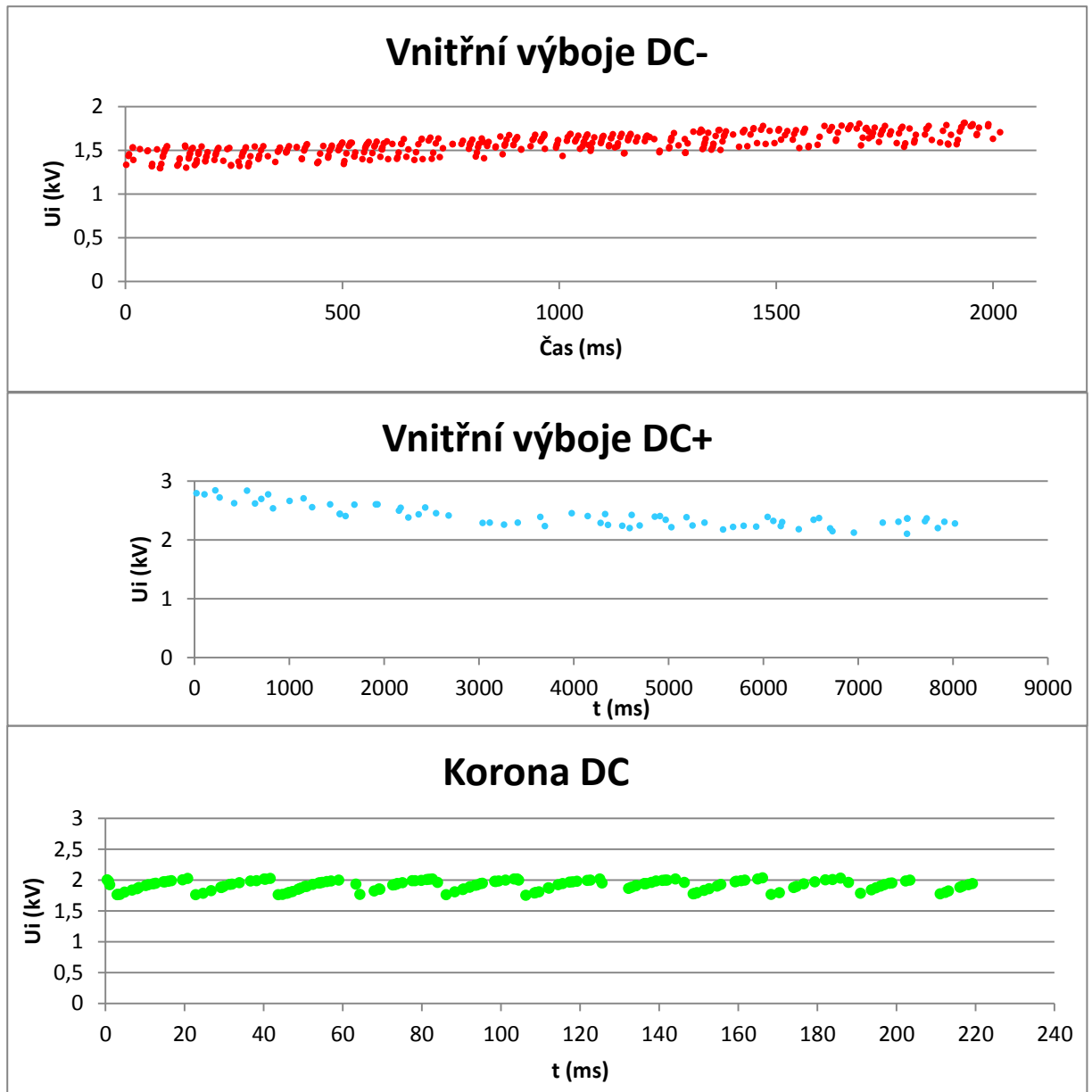


Obr. 64: Četnost výbojů pro koronu a vnitřní výboje při DC a AC

Graf četnosti výbojů je sestaven pro stejnosměrné napětí tak, že jako jedna perioda se považuje 20 ms. Tento postup byl zvolen z důvodu porovnání četnosti výbojů za periodu při AC a DC. Na osu x je vynesena počet výbojů za periodu. A na osu y výskyt. Ten uvádí, pro kolik period se daná četnost opakovala.

Při porovnání počtu výbojů za periodu pro korunu a vnitřní výboje, je pro AC i DC vždy větší četnost výbojů korony. Pro střídavé napětí platilo, že čím byl počet výbojů za periodu vyšší, tím častěji se opakoval. Obecně platí, že četnost výbojů je větší pro AC než pro DC.

Zapalovací napětí jako funkce času:  $q(t)$



Obr.65: Závislost zapalovacího napětí na čase při DC a AC

Zapalovací napětí vnitřních výbojů při záporném stejnosměrném napětí s časem narůstá. Naproti tomu pro kladné stejnosměrné napětí s časem klesá. Zapalovací napětí korony má pulzní charakter.

## Závěr

Úkolem této práce bylo přinést přehled o současném stavu poznatků v problematice měření, analýzy a interpretace výbojů při stejnosměrném a střídavém napětí. Výzkum výbojů při stejnosměrném napětí je stále v počátku a teprve se hledají metody vyhodnocování. Některé metody využívají analogické postupy jako při klasifikaci výbojů při střídavém namáhání s tím, že fázový úhel je nahrazen dobou vzniku výboje. V jiných případech se měří délka trvání impulzu a časový interval mezi následujícími výboji. Další výzkumy se věnují hledání souvislostí mezi současným, předešlým a následujícím výbojem. Často se také využívá statistická interpretace dat.

V první části práce je uvedena teorie mechanismu vzniku částečných výbojů při stejnosměrném napětí. Další část se věnuje charakteristickým parametrům a chování částečných výbojů při stejnosměrném namáhání. Třetí část popisuje způsoby měření a čtvrtá uvádí způsoby vyhodnocování naměřených dat při DC napětí. Poslední část je věnována vlastnímu měření částečných výbojů při AC a DC a jejich interpretaci. Praktická část uvádí měření vzniku výboje korony a časosběrné měření vnitřních výbojů a korony.

Při měření vzniku korony bylo použito modelové uspořádání hrot-deska pro tři vzdálenosti a hrot-deska s bariérou v otevřeném a uzavřeném prostoru. Měření bylo třikrát opakováno s různým časovým odstupem pro všechna uspořádání. Výsledné grafy porovnávají vliv bariéry a uzavření oblasti modelu pro DC a AC obou polarit.

Čím více se zvětšovala vzdálenost hrotu deska, tím větší bylo zapalovací napětí, jelikož došlo k přeskupení prostorového náboje. Protože uspořádání hrot-deska má větší elektrickou pevnost při záporné hrotu, byla velikost výboje pro DC- menší než pro DC+. Použitím bariéry docházelo k modifikaci prostorového náboje, což způsobilo větší interval mezi jednotlivými zapalovacími napětími. V případě uzavřeného modelu se nemohl prostorový náboj rozptýlit do okolí, a tak docházelo ke zmenšení amplitudy. Stejně jako v případě bariéry, došlo ke zvětšování intervalu zápalného napětí mezi jednotlivými výboji.

Časosběrné měření bylo provedeno při konstantní velikosti kladného a záporného stejnosměrného napětí a při střídavém napětí. Nejprve byla naměřená data vynesena v závislosti velikosti výboje na čase. Rozdíl mezi vnitřními výboji a korunou při



stejnoseměrném napětí byl ve velikosti rozptylu amplitudy. Korona se vyznačovala užší oblastí než vnitřní výboje. Při porovnání kladné a záporné polarity byl pozorován v případě obou druhů výboje větší rozptyl pro kladné napětí. Vnitřní výboje při střídavém napětí vznikaly při kladné i záporné polaritě a vyznačovaly se největším rozptylem amplitudy. Korona vznikala jen při záporné polaritě střídavého napětí.

Metoda grafické interpretace velikosti následujícího výboje v závislosti na velikosti současného výboje nemohla být využita pro vnitřní výboje, protože je určena jen pro výboje Towsendova typu. Graf korony měl charakter úzké oblasti a nebyl závislý na velikosti současného výboje.

Další způsob interpretace sledoval četnost výbojů za periodu (20 ms). Největší četnost výbojů byla změřena pro střídavé napětí. V porovnání korony a vnitřních výbojů měla vždy větší četnost výbojů korona.

Velice zajímavý průběh měla závislost zapalovacího napětí na čase. Pro vnitřní výboje při DC- zápalné napětí rostlo s časem, oproti tomu při DC+ klesalo. Závislost korony měla pulzní charakter

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] BEYER, J a J.J SMIT. *Space charge and partial discharge phenomena in hvdc devices* [online]. [cit. 2014-12-07]. Dostupné z: <http://repository.tudelft.nl/view/ir/uuid%3A42a102a2-f50e-4f07-912a-0d94de0c7c76/>
- [2] FROMM, *Partial discharge and breakdown testing at high DC voltage*. ISBN 90-407-1155-0.
- [3] FROMM, U. *Interpretation of partial discharges at dc voltages*. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation [online]. 2(5): 761-770 [cit. 2015-03-14]. DOI: 10.1109/94.469972. ISSN 10709878. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=469972>
- [4] HALLER, R, J PIHERA, M SVOBODA a P MRÁZ. 2014. *PD behaviour at AC and DC voltage*. Plzeň
- [5] KLUETER, T., J. WULFF a F. JENAU. 2013. *Measurement and statistical analysis of Partial Discharges at DC voltage*. 2013 48th International Universities' Power Engineering Conference (UPEC) [online]. IEEE, : 1-5 [cit. 2015-04-01]. DOI: 10.1109/UPEC.2013.6714912. ISBN 978-1-4799-3254-2. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6714912>
- [6] LAURENC, Jiří. *Návod na cvičení EMC: Měření elektrické pevnosti vzduchu v silně nehomogenním poli*. Vliv polarity; vliv bariéry [online]. In: [cit. 2015-02-03]. Dostupné z: <http://home.zcu.cz/~laurenc/tvn.php>
- [7] MENTLÍK, Václav. 2008. *Diagnostika elektrických zařízení*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 439 s. ISBN 978-80-7300-232-9.
- [8] MORSHUIS, P.H.F. a J.J. SMIT. 2005. *Partial discharges at dc voltage: their mechanism, detection and analysis*. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation [online]. 12(2): 328-340 [cit. 2014-09]. DOI: 10.1109/TDEI.2005.1430401. ISSN 1070-9878. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1430401>
- [9] MORSHUIS, P. a G. HOOGENRAAD. 1996. *Partial discharge diagnostics for DC equipment*. Conference Record of the 1996 IEEE International Symposium on Electrical Insulation [online]. IEEE, : 407-410 [cit. 2015-02-23]. DOI: 10.1109/ELINSL.1996.549367. ISBN 0-7803-3531-7. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=549367>
- [10] PIROVANO, G, U PERINI, F BARBERIS, R BRATOVICH a BARBERIS. 2013. *An innovative electro-optic sensor for AC and DC electric fields detection: Experimental results*. Korea. Zdroj katedra KAE
- [11] SLÁDEK, K. 2011. *Diagnostika pasivních vrstev pro křemíkové solární články*. Brno
- [12] STUCKENHOLZ, C, P LEQUITTE, M GAMLIN a R CONNELL. 2011. *PD requirements for testing HV DC equipment and their impact on HV DC test equipment*. Německo. Zdroj: Katedra KAE
- [13] SWANSON, A.G a I.R JANDRELL. 2011. *Investigation into HVDC corona: Discussion and initial modelling results*. Německo. Zdroj: katedra KAE
- [14] VEVERKA, Antonín. *Technika vysokých napětí*. 3. přepracované vyd. Praha: SNTL spolu s n. p. Alfa, 1982. 304 s.

- [15] XIAOHUA LI, GUANGNING WU, XUEQIN ZHANG a SHANSHAN BIAN. 2007. *Partial discharge pulse shape detection and analysis under DC condition*. 2007 Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing Expo [online]. IEEE: 48-51 [cit. 2015-01-10]. DOI: 10.1109/EEIC.2007.4562586. ISBN 978-1-4244-0446-9. Dostupné z:  
<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4562586>
- [16] Journal of electrical engineering: Elektrotechnický časopis [online]. 1995-. Bratislava: Elektrotechnická fakulta STU, sv. [cit. 2015-17-10]. ISBN 1335-3632. ISSN 1335-3632.
- [17] IEC 60 270“High-voltage test techniques –Partial discharge measurements“

