

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**  
**FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**Katedra technologií a měření**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Částečné výboje v plynném izolantu**

**Vedoucí diplomové práce: Ing. Petr Martínek, Ph.D.**

**Autor: Bc. Jiří Fabšic**

**2014**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2013/2014

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jiří FABŠIC**  
Osobní číslo: **E12N0006P**  
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**  
Název tématu: **Částečné výboje v plynném izolantu**  
Zadávací katedra: **Katedra technologií a měření**

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

1. Teoreticky zpracujte problematiku popisující jev částečných výbojů.
2. Teoreticky zpracujte problematiku plynných izolantů.
3. Proveďte experimentální měření částečných výbojů na elektrodovém uspořádání umístěném v uzavřeném a otevřeném objemu.
4. Výsledky experimentálních měření zpracujte a vyhodnoťte. Na základě takto získaných výsledků formulujte závěry, hypotézy.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. Veverka, A.: Technika vysokých napětí. SNTL 1982.
2. IEEE Xplore Digital Library - <http://ieeexplore.ieee.org>
3. König, D., Rao, Y.: Partial Discharges in Electrical Power Apparatus. Berlin, 1993.
4. Manuál digitálního měřicího systému firmy Power Diagnostix

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Petr Martínek, Ph.D.

Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání diplomové práce: 14. října 2013

Termín odevzdání diplomové práce: 12. května 2014

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



  
Doc. Ing. Vlastimil Škočil, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2013

## **Abstrakt**

Diplomová práce se zabývá experimentálním měřením částečných výbojů při střídavém napájení přiloženém na zkoušeném objektu. Testům bylo podrobena několik druhů elektrodových uspořádání. Autor popisuje experimentálně naměřené výsledky nejprve na modelovém uspořádání hrot-miska, dále se diskutuje vliv materiálu na vznik částečných výbojů. Poslední část textu je věnována vlivu otevřeného a uzavřeného objemu měřicí nádoby při různých tlacích. Naměřené hodnoty a záznamy byly pořízeny digitálním měřicím přístrojem pro měření částečných výbojů. Výsledky jsou podnětem pro další zkoumání v tomto odvětví vysokonapěťové techniky.

## **Klíčová slova**

Částečný výboj, elektrická pevnost, kalibrace, kapacitní model, korónový výboj, nehomogenní pole, plynné dielektrikum, zdánlivý náboj.

**Abstract**

This thesis is dealing with experimental measurements of partial discharges during AC power attached to a test object. Several electrode arrangements were tested. At first author describes experimentally measured results of model arrangement point – bowl, effect of material in relation to formation of partial discharges is further discussed. Last part of thesis is focused on effect of open and closed volume of measuring container during various pressure. Measured values and records were made by digital measuring device for measuring of partial discharges. Results are stimulus for further exploration in this area of high voltage equipment.

**Key words**

Apparent charge, calibration, capacitive model, corona discharge, electric strength, gaseous dielectric, inhomogeneous field, partial discharge

## Prohlášení

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

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

.....

podpis

V Plzni dne 28.4.2014

Jiří Fabšic

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Petru Martínkovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

## Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>8</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>10</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>12</b>
<b>1 TEORIE ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ</b> .....	<b>13</b>
1.1 VYMEZENÍ TERMÍNU ČÁSTEČNÉHO VÝBOJE .....	14
1.2 VNITŘNÍ A POVRCHOVÉ ČÁSTEČNÉ VÝBOJE .....	14
1.3 VNĚJŠÍ ČÁSTEČNÉ VÝBOJE .....	18
1.3.1 <i>Townsendovy (nesamostatné) výboje</i> .....	20
1.3.2 <i>Korónové výboje</i> .....	21
1.3.3 <i>Trsový výboj a sršení</i> .....	22
1.4 JISKROVÝ VÝBOJ A PŘESKOKOVÉ NAPĚTÍ.....	23
1.5 VELIČINY CHARAKTERIZUJÍ ČÁSTEČNÉ VÝBOJE .....	24
1.5.1 <i>Veličiny jednotlivých impulzů</i> .....	24
1.5.2 <i>Veličiny integrované</i> .....	25
1.5.3 <i>Důležité napěťové hodnoty vztahované k částečným výbojům</i> .....	27
<b>2 TEORIE PLYNNÝCH IZOLANTŮ</b> .....	<b>28</b>
2.1 ELEKTRICKÁ VODIVOST PLYNNÝCH IZOLANTŮ .....	28
2.1.1 <i>Schopnost pohybu elektrického náboje v plynech</i> .....	30
2.1.2 <i>Charakteristiky plyných izolantů</i> .....	32
2.2 DIELEKTRICKÉ ZTRÁTY V PLYNECH.....	33
2.3 ELEKTRICKÁ PEVNOST .....	35
2.3.1 <i>Elektrická pevnost plyných izolantů</i> .....	37
2.3.2 <i>Výboje ve značně nehomogenním poli</i> .....	39
2.3.3 <i>Vliv polarity na elektrickou pevnost vzduchu</i> .....	40
<b>3 MĚŘENÍ ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ SE ZAMĚŘENÍM NA JEV KORÓNY</b> .....	<b>42</b>
3.1 POPIS MĚŘICÍHO SYSTÉMU POWER DIAGNOSTIX.....	43
3.1.1 <i>Celky systému Power Diagnostix</i> .....	44
3.1.2 <i>Důležité parametry pro nastavení měřicího systému Power Diagnostix</i> .....	47
3.2 ELEKTRODOVÁ USPOŘÁDÁNÍ POUŽITÁ PŘI MĚŘENÍCH .....	48
3.3 MĚŘENÍ PŘESKOKOVÉHO NAPĚTÍ .....	49
3.3.1 <i>Zapojení pro měření do přeskočů</i> .....	49
3.3.2 <i>Změřené hodnoty přeskočových napětí</i> .....	51
3.4 MĚŘENÍ ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ .....	53
3.4.1 <i>Zapojení pro měření částečných výbojů</i> .....	54
3.4.2 <i>Problematika kalibrace měřicího obvodu pro měření částečných výbojů</i> .....	54
3.4.3 <i>Typické průběhy koróny, měření na modelu pro korónové výboje</i> .....	55
3.4.4 <i>Měření na elektrodovém uspořádání koule-koule (Ø 20 mm)</i> .....	60
<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>66</b>



**SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ .....69****PŘÍLOHY: .....1**

<i>Příloha A – Tabulky z měření do přeskočů .....</i>	<i>1</i>
<i>Příloha B – Záznamy částečných výbojů na pozadí laboratoře VVN po kalibraci.....</i>	<i>2</i>
<i>Příloha C – Záznamy ČV modelu koróny, porovnání napětí: na hrotu / na misce.....</i>	<i>3</i>
<i>Příloha D – Fotodokumentace instalovaných Al elektrod v měřicí nádobě .....</i>	<i>6</i>
<i>Příloha F – Záznamy ČV kulových elektrod Ø 20 Cu – Ø 20 Cu.....</i>	<i>8</i>

## Seznam symbolů a zkratek

$\bar{a}$ [ $ms^{-1}$ ]	Zrychlení
A/D	Analogově/digitální
Al	Hliník
C[F]	Kapacita
$c$	Rychlost tepelného pohybu částice
Cu	Měď
ČSN	Česká technická norma
ČV	Částečný výboj
D	Střední kvadratický součet
$d$	Vzdálenost, tloušťka materiálu
E[N]	Intenzita vnějšího elektrického pole
$E_k$	Kritická hodnota elektrické intenzity
$E_p$	Elektrická pevnost materiálu
EN	Evropská norma
ES	Elektrizační soustava
$f$	Síla
$h$	Planckova konstanta
I[A]	Elektrický proud
KEE	Katedry Elektroenergetiky a Ekologie
KJ	Kulové jiskřiště
$k$	Boltzmannova konstanta
LLD[%]	Spouštěcí prahová úroveň
$l_s$ [m]	Střední volná dráha částice
$m$ [kg]	Hmotnost
$n$	Počet, četnost
NQS[A]	Střední proud částečných výbojů
PC	Osobní počítač
$P_{z,ss}$	Dielektrické ztráty ve stejnosměrném elektrickém poli
Q[C]	Náboj
$q$	Zdánlivý náboj
$q_{čv}$	Skutečný náboj částečného výboje

$R_i[\Omega]$	Izolační odpor dielektrika
$T$	Oblast, interval
$T[s]$	Měřicí čas
$t_i$	Okamžitý čas
$U_p[kV]$	Přeskokové napětí, elektrická pevnost
$U_Z[kV]$	Zapalovací napětí částečných výbojů
$U_e[kV]$	Zhášecí napětí částečných výbojů
$u_i(t)$	Okamžité napětí
V-A	Volt - ampérová
VN	Vysoké napětí
VVN	Velmi vysoké napětí
$\nu [Hz]$	Frekvence záření
$W_i [J]$	Ionizační energie
$\Delta q_i$	Částečný výboj vybitý v dutince izolantu
$\phi_i$	Fázový úhel
$\rho[\Omega \cdot m]$	Rezistivita
$\gamma[S \cdot m^{-1}]$	Konduktivita
$\tau$	Okamžitá rychlost molekuly
$tg \delta$	Ztrátový činitel
$\varepsilon' [F m^{-1}]$	Permitivita
$\omega [rad]$	Úhlová rychlost

## Úvod

V technice vysokého napětí je potřebné, aby všechna zařízení pracovala dle předpokladů a aby nedocházelo k náhlým a nečekaným poruchám. Zvyšují se nároky na bezpečnost, bezporuchovost i životnost. Pro splnění těchto požadavků je třeba moderních diagnostických metod. Pomocí moderních měřicích systémů, lze nejen zjistit vzniklou závadu, ale také jí detekovat. Nejkritičtější místem objektů bývá izolační systém. Na základě sledování změn struktury objektů je možné citlivě, nedestruktivním způsobem, zjistit postižené místo. V této části izolačního systému vznikají děje, díky kterým je možná jejich lokalizace. Výskyty jsou doprovázeny různými druhy energií (energie elektrická, tepelná, mechanická a akustická energie). Jedna nebo více forem výše vyjmenovaných projevů pak bývá základem pro jejich diagnostiku.

Diagnostické systémy jsou tedy používány při návrhu zařízení ve výzkumných odděleních, při výstupní kontrole zařízení, při přejímacích kontrolách a v neposlední řadě při samotném provozu. Jelikož je odstávka těchto zařízení většinou velmi nákladná a mnohdy i nemožná, stává se tedy diagnostika přímou součástí zařízení. Jedná se o on-line metody, kdy je zařízení trvale sledováno.

Hlavním cílem předkládané diplomové práce je pomocí moderních měřicích metod prozkoumat aktivitu dějů částečných výbojů na elektrodových uspořádáních v plynném izolantu. Teoretická část shrnuje problematiku děje částečných výbojů. Obsah diplomové práce je především zaměřen na částečné výboje v plynném izolantu; v navazující části je teoreticky zpracována problematika plynných izolantů. Praktická část textu se zabývá experimentálnímu měření na různých druzích elektrodového uspořádání v otevřeném a uzavřeném objemu. Na základě těchto měření jsou formulovány závěry a hypotézy, které jsou podpořeny teoretickým výkladem.

Závěr práce se zaměřuje na shrnutí a porovnání změřených výsledků experimentálního měření. V úplném závěru práce jsou diskutovány návrhy na další možná měření, která by mohlo prohloubit poznání v oblasti částečných výbojů.

## 1 Teorie částečných výbojů

Elektrické výboje, které se vyskytují v izolaci, na jejím rozhraní či v prostoru mezi rozdílnými potenciály a zcela nepřeklenou vzdálenost mezi elektrodami, nazýváme výboji částečnými.

Výsledkem tohoto projevu částečných výbojů je u pevných dielektrik degradace izolačních materiálů. K degradaci dochází v plynových dutinkách. Dutinky ve vysokonapětovém zařízení vznikají při výrobě, samotným působením vnitřních výbojů, při velkém lokálním elektrickém namáhání nebo nevhodným vlivem okolního prostředí. Po dosažení zapalovacího napětí částečných výbojů lze v těchto plynových dutinkách zaznamenat lavinové nebo jiskrové výboje.[1][2]

Výbojová činnost u kapalných dielektrik je odvětvím vysokonapětové techniky, která není dosud ve všech směrech uspokojivě vysvětlena a závisí na řadě faktorů. Nelze je s přesností změřit či odhadnout. Mezi tyto činitele patří druh a příměs kapalného média (obsah vody a rozpuštěných plynů), míra znečištění elektrod spolu s jejich tvarem, rozložení elektrického pole podél elektrodového uspořádání, druh a velikost napětí, teplota apod. Během praktických testů a zkoušek jsou děje přeskoků a částečných výbojů v kapalinách velmi nahodilé a výsledky občasné i protichůdné. Obecně lze však o kapalinách používaných v technice vysokého napětí říci, že mají vyšší elektrickou pevnost než plynné izolanty. Výboj se nejčastěji začne rozvíjet z místa největší koncentrace nečistot (plynové bublinky a pevné částice). Existuje několik hypotéz vývoje výbojů a přeskoků v kapalinách; každá z teorií zkoumá tento děj z pohledu různých podmínek, které přeskok a výboje značně ovlivňují.[3]

U plyných dielektrik je jev částečného výboje vyvolán ionizací okolního prostředí v závislosti na vnějších podmínkách (tlaku, teplotě, izolačním médiu atd.). Tento jev vzniká především na velmi zakřivených elektrodách či hranách rozdílných potenciálů. Čím je pole mezi rozdílnými potenciály více homogenní, tím je pravděpodobnost vzniku neúplného výboje nižší. Výskyty jsou doprovázeny různými druhy energií, jako jsou například energie elektrická, tepelná, mechanická, akustická energie atd. Jedna nebo více forem výše vyjmenovaných projevů částečných výbojů pak bývá základem pro jejich diagnostiku. Existují částečné výboje samostatné a nesamostatné. Nesamostatné projevy v plynech jsou vyvolány ionizačním činidlem, po ustání jeho působení výboje zanikají. Hlavním parametrem samostatného výboje je přiložené napětí. Vlastnostem plyných izolantů je v této práci věnována kapitola č. 0 zabývající se teorií plyných izolantů.[1][3][4]

## 1.1 Vymezení termínu částečného výboje

Napětově namáhaná izolace může v terminologii techniky vysokého napětí zaznamenat neúplný (částečný) průraz, tedy překlenutí pouze části izolace. Část namáhané izolace tak ztrácí svou elektrickou pevnost. Zbytek izolačního média však napětově namáhání vydrží. Částečný průraz namáhané izolace znamená, že v dielektriku jsou přítomny částečné výboje. Naopak úplný přeskok umožní spojení (přemostění) elektrod pomocí nízkoodporového výboje v celé délce vzdálenosti elektrod. Spojení může být buďto jiskrové nebo obloukové. Průraz lze dělit na destruktivní i nedestruktivní. Záleží na skupenství použité izolace mezi elektrodami a schopnosti regenerace dielektrika.[4][5]

Dle normy ČSN EN 60270 [5] je definice částečného výboje následující: „Částečný výboj (ČV) (partial discharge (PD)) je lokalizovaný elektrický výboj, který pouze částečně přemostuje izolaci mezi vodiči a který se může nebo nemusí objevit v okolí vodiče. Částečné výboje jsou obvykle důsledkem koncentrace lokálního namáhání v izolaci nebo na povrchu izolace. Obecně se takové výboje objevují jako impulzy s dobou trvání mnohem menší než 1 $\mu$ s.“ Impulz částečného výboje (partial discharge pulse) se objevuje ve zkoušeném objektu při překročení jeho zapalovacího napětí. Je výsledkem částečného výboje proudového nebo napětového charakteru. Impulzy je možné měřit některou z detekčních metod pro částečné výboje dle zaměření na fyzikální vlastnosti zkoumaného projevu.

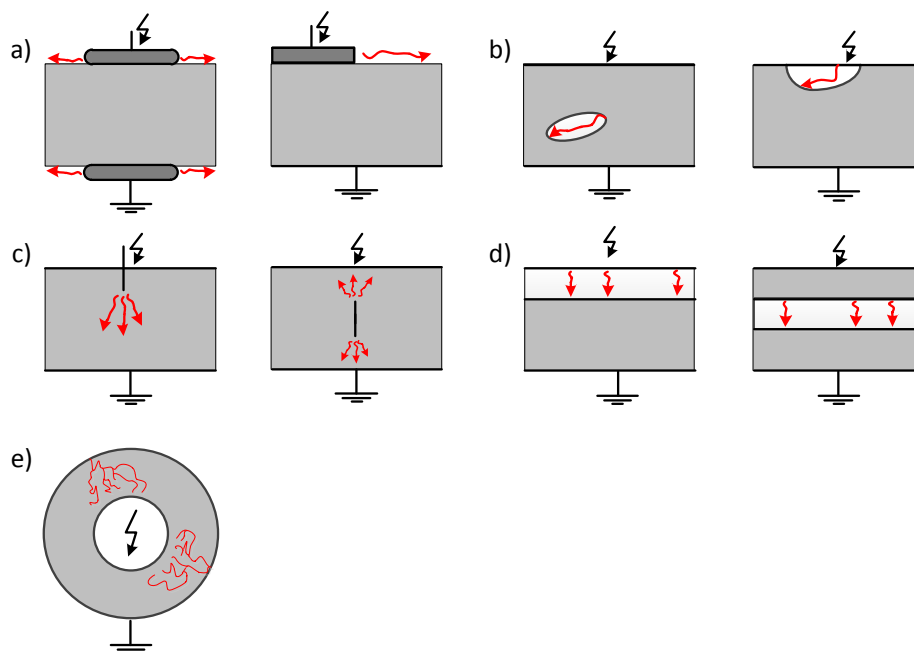
Aktivita částečných výbojů může probíhat v dutině izolantu, nebo vycházet přímo z jedné z elektrod (platí především pro částečné výboje na elektrodovém uspořádání, kdy je dielektrikum plynného skupenství)[3].

Základní dělení částečných výbojů je následující[3]:

- Vnější (externí) částečné výboje
- Vnitřní (interní) částečné výboje
- Povrchové (klouzavé) částečné výboje

## 1.2 Vnitřní a povrchové částečné výboje

Vnitřní a povrchové částečné výboje lze snadno modelovat na příkladech typických elektrodových uspořádání, které jsou znázorněny na *Obr. 1.1*. V těchto případech vznikají částečné výboje přímo na elektrodách nebo v nehomogenitách uvnitř struktury izolačního materiálu. Vnitřní a povrchové částečné výboje lze tedy dělit na různé modelové konfigurace dle *Obr. 1.1* takto:



Obr. 1.1 Elektrodotová uspořádání pro částečné výboje [6]

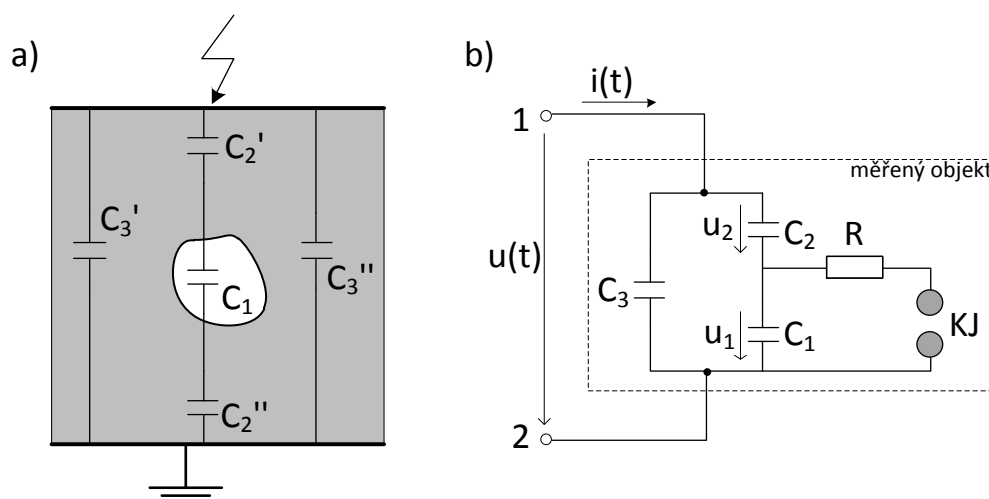
Jednotlivé typy výbojů vyobrazených výše lze popsat a pojmenovat a rozdělit do skupin následovně [2][6]:

- a) **povrchové a klouzavé výboje** – výboje se objevují na hranách elektrod a jsou orientovány souběžně s nimi. Při zvyšování zkušební nebo provozního napětí je dosaženo takové úrovně, kdy četnost výbojů je tak velká, že nelze detekčními přístroji rozeznat jednotlivé pulzy od sebe. Nárůst výbojů v dielektriku je úměrný zvyšování přiloženého napětí.
- b) **výboje v plynných dutinkách** – vnitřní dutinky jsou vytvořeny při tvarování či lití např. epoxidové pryskyřice. Povrchové dutinky typicky vznikají částečným odtržením elektrody od izolační vrstvy. Výboje tohoto typu se projevují v dielektriku řádově se stejně velkou četností i velikostí jednotlivých impulzů, ve fázi jsou umístěné jak v kladné tak i v záporné půlplně zkušební napětí. Po dosažení zapalovacího napětí dochází k strmému nárůstu výbojové činnosti. Při následném zvyšování napětí není již závislost výbojů na tomto napětí příliš vázána.
- c) **výboje na jehlovém uspořádání elektrod** – jehlové uspořádání v pevném či kapalném dielektriku způsobuje lokální namáhání, zvýšení intenzity elektrického pole a tím i podnět pro vznik částečných výbojů.
- d) **výboje na delaminované izolaci (též vrstvená izolace)** – vzniklá štěrbina

(mezera) mezi elektrodou a pevným izolantem (či mezera uvnitř izolantu) způsobí díky nehomogenitě materiálu částečné výboje. Ty v poměru k případu *Obr. 1.1-b* (výboje v plynných dutinkách) dosahují vzhledem k charakteru nehomogenity většího zdánlivého náboje  $q$  a zároveň i větší četnosti impulzů  $n$ . Při zvyšování napětí lze v dielektriku pozorovat i zvyšování výbojové činnosti do okamžiku kdy už není možné jednotlivé výboje od sebe vzájemně rozlišit.

- e) **trvalé interní stromečkové výboje (neboli treeing)** – nehomogenita izolace způsobuje trvalou výbojovou činnost; bývá způsobena nevratnou poruchou funkce izolačního materiálu.

Pomocí jednoduchého modelu lze ukázat mechanismus částečných výbojů. Náhradní schéma částečných výbojů je znázorněno na *Obr. 1.2*. Jeho levá část, *Obr. 1.2-a*), znázorňuje pevný izolant s vnitřní nehomogenitou (plynovou dutinkou) a na *Obr. 1.2-b*) je zjednodušené náhradní schéma situace.[3][7]



*Obr. 1.2 Trojkapacitní model; náhradní schéma vnitřního částečného výboje[7]*

Kapacita plynové dutinky je znázorněna symbolem  $C_1$ . Symbol  $C_2$  pak značí kapacitu ostatní části „zdravého“ dielektrika v sérii s kapacitou dutinky (sériové uspořádání kapacit  $C_2'$  a  $C_2''$ ).  $C_3$  v tomto případě značí kapacitu zbytku izolantu (paralelní uspořádání  $C_3'$  a  $C_3''$ ). V náhradním schématu je obsaženo kulové jiskřiště ( $KJ$ ), které je paralelně připojeno ke kondenzátoru  $C_1$ . Činnost kulového jiskřiště v tomto případě symbolizuje přeskok v plynové dutince po překročení prahového napětí její elektrické pevnosti. Součástka označená  $R$  v náhradním schématu vyznačuje odpor výbojového kanálku po přeskoku na kulovém jiskřišti. Děj částečného výboje (jednoho přeskoku) proběhne v prostorových poměrech

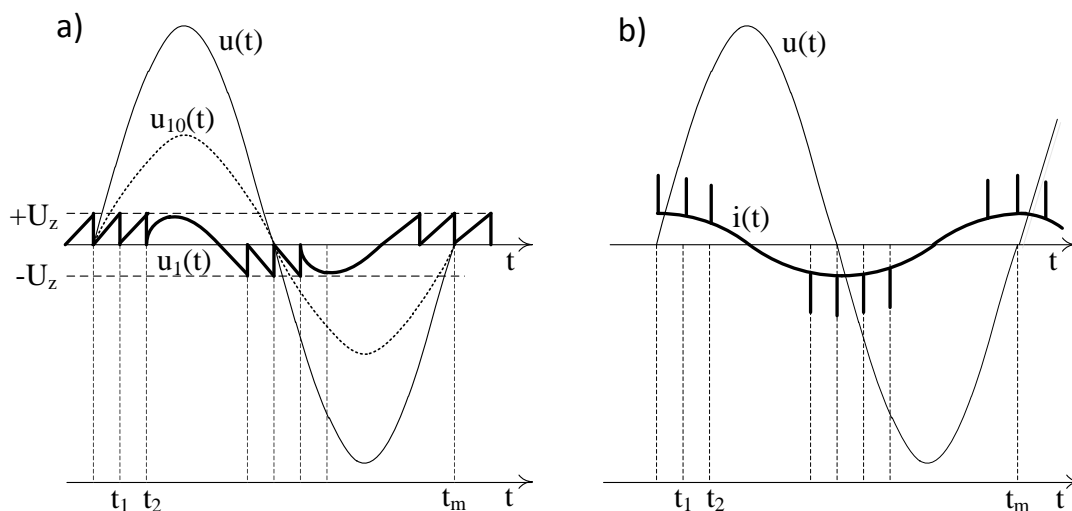


skutečné dutinky izolace v řádu jednotek *ns*. Po přiložení střídavého napětí  $u(t)$  na svorky 1 a 2 zkoušeného objektu je průběh napětí  $u_{10}(t)$  na kondenzátoru  $C_1$  dán vztahem[3]:

$$u_{10}(t) = \frac{C_2}{C_1 + C_2} u(t) \quad (1)$$

za předpokladu, že na kulovém jiskřišti (KJ) nedojde k přeskoku.[4][7]

Časové průběhy jsou na *Obr. 1.3-a*), kde je znázorněno sinusové napětí  $u(t)$  a fiktivní napětí  $u_{10}(t)$  na dutince v případě, že nedochází k přeskoku. Pokud napětí v dutince dosáhne velikosti rovné zapalovacímu napětí  $U_z$  (částečných výbojů) dutinky, dojde k jejímu lokálnímu průrazu. Průběh napětí  $u_1(t)$  je znázorněn také na *Obr. 1.3-a*). Musí zde platit jistá zjednodušení (předpoklady zjednodušeného modelu); dutinka má zapalovací napětí bez polaritního efektu a napětí v dutince v okamžiku po přeskoku je rovno nule. Při opakování dějů částečných výbojů v dutince izolantu se na kapacitní proud  $i(t)$ , který protéká obvodem, superponují impulsy taktéž proudového charakteru. Časový průběh proudu vnitřních částečných výbojů je znázorněn na *Obr. 1.3-b*).[4][7]



*Obr. 1.3 Průběhy napěťových a proudových impulsů částečných výbojů v závislosti na čase[7]*

Ze zkoumání chování trojkapacitního modelu (tedy modelu částečných výbojů v dutince izolantu) vyplývají následující závěry[4][7]:

- při částečných výbojích mají proudové impulsy v různých periodách různé polarity
- s velikostí napájecího (zkušební) napětí počet výbojů vzrůstá, avšak jejich amplituda zůstává přibližně stejná
- Nelze srovnávat náboj  $\Delta q_i$  (částečný výboj vybitý v dutince izolantu) se zdánlivým

nábojem  $q$  (hodnota impulzu změřeného na svorkách vzorku), protože náboj vybitý v dutince je

$$\Delta q_1 = (C_1 + C_2)U_z, \quad (2)$$

v porovnání s nábojem zdánlivým  $q$  změřeným na svorkách vzorku

$$q = C_2 U_z. \quad (3)$$

Za těchto okolností je výboj vybitý v dutince

$$\Delta q_1 = q \frac{(C_1 + C_2)}{C_2} U_z = q \left( 1 + \frac{C_1}{C_2} \right). \quad (4)$$

V případě neznámého poměru  $C_1 / C_2$  (při složitějších izolačních uspořádáních) není možné změřit konkrétní hodnotu náboje v dutince. Zdánlivý náboj na svorkách měřeného objektu nám tedy dává pouze relativní hodnotu náboje vybitého v dutince. Při měření detekčními přístroji, a tedy i při vyhodnocování těchto měření (pokud je hlavním ukazatelem výbojové činnosti zdánlivý náboj), je nutné vždy výsledky pouze porovnávat. Jde pouze o relativní (fiktivní) hodnotu náboje daného uspořádání.[7]

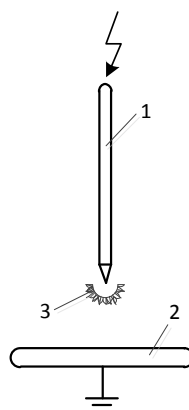
Předchozí úvahy byly provedeny za zjednodušených okolností. Při reálném pohledu na částečné výboje musíme počítat s následujícím [4]:

- zapalovací napětí  $U_z$  pro dutinku v izolaci není u obou polarit stejná, tedy  $|+U_z| \neq |-U_z|$  a jejich polarita se může měnit (především při prvním zapálení výboje v sérii)
- napětí, které zbyde v dutince po výboji není nulové, podle polarit se napětí mění průrazem plynného dielektrika (nejen v dutinkách plynu) vznikají další jevy například Townsendovy výboje, tlaková závislost výbojové činnosti v plynech (Paschenův zákon), polaritní efekty atd.

### 1.3 Vnější částečné výboje

Jev vnějších částečných výbojů se vyskytuje především na hranách nebo na elektrodách s malým poloměrem zakřivení. Typické uspořádání elektrod pro měření částečných výbojů je hrot- deska; tedy silně nehomogenní elektrické pole v plynném prostředí – nejčastěji přímo ve vzduchu při atmosférickém tlaku. Toto uspořádání znázorňuje *Obr. 1.4*, kdy hrot (1) je pod napětím a desková elektroda (2) je uzemněná. Částečné výboje (3) se objevují na koncích velmi zakřivených elektrod či hran (v tomto případě hrotová elektroda pod napětím). Nejvýraznější podíl projevů částečných výbojů tohoto uspořádání má za následek koróna.

Koróna je zjednodušeně definována jako symetrické seskupení pulzů okolo vrcholu napěťové křivky. Pulzy jsou detekčním přístrojem zaznamenány pouze v jedné půlvině napájecího napětí, fázový úhel mezi jednotlivými pulzy je řádově stejný a jejich amplituda se s ohledem na rostoucí napětí nijak výrazně nemění (mění se pouze četnost výskytu jednotlivých pulzů). Předchozí tvrzení má platnost ovšem v případě že mez zkušební (či provozní) napětí prokazatelně přesáhla práh pro zapálení korónového výboje.[2]



Obr 1.4 Elektrodotové uspořádání silně nehomogenního elektrického pole[1]

Těsně na hraně zapalovacího napětí koróny se amplituda částečných výbojů liší od stavu již trvale zapáleného výboje. Četnost výbojů za jednotku času je nižší, avšak amplituda výbojů je několikanásobná. Při zpětném snižování napětí na uspořádání hrot - deska (pokud nedošlo k přeskoku) je napěťová závislost totožná jako při předchozím zvyšování. Zhášecí napětí je hodnota napětí, kdy při snižování potenciálu na zapálených elektrodách dojde k přerušení výbojové činnosti. Tato hodnota je za stejných okolních podmínek rovna napětím zapalovacím.[4]

V případě připojeného napětí na hrotu (deska je uzemněna) jsou částečné výboje superponovány do záporné půlvině střídavého harmonického napětí. V opačném případě (kdy hrot je uzemněn) jsou pulzy přítomné v kladné půlvině.[8]

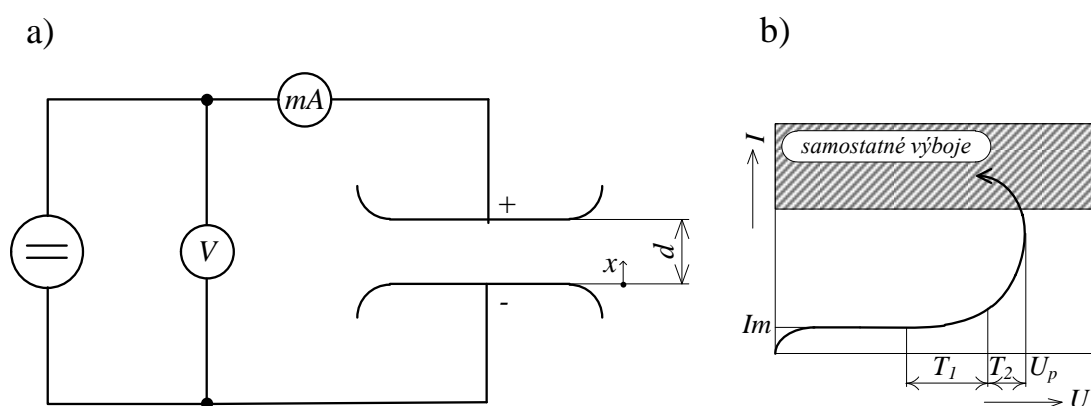
V měřicích obvodech se mohou vyskytovat částečné výboje, které jsou způsobeny nedokonalým spojením měřicích komponentů či mohou být obsaženy přímo v testovaném objektu. Pro přesnost měření je třeba takovými částečným výbojům předcházet, aby nezkreslovaly celé měření. Vyznačují se jako symetricky rozložený šum v oblasti napěťových nul napájecího napětí. Výboje se projevují s téměř konstantní velikostí amplitud kromě oblastí, které jsou blízko amplitudám zkušební napětí. V těchto hodnotách klesají k nule. Superpozice sousedních pulzů zapříčiní, že vlivem zvyšujícího napětí roste také (pomalým tempem) velikost amplitud těchto parazitních výbojů. Při určitém napětí mohou tyto výboje

zcela ustát a už se nemusí objevit.[4][7]

Další typické uspořádání pro demonstraci vzniku externích částečných výbojů je koaxiální rozložení.[4]

### 1.3.1 Townsendovy (nesamostatné) výboje

Zapojení rovinných elektrod je znázorněno na *obr 1.5-a*). V okolí elektrod je plynné prostředí (vzduch). Elektrické pole mezi elektrodami je homogenní. Následující popis townsendových výbojů všeobecně platí pro vyšší napětí, než je napětí nasyceného proudu. Prvním předpokladem pro výstavbu townsendových výbojů je, že z katod emitují elektrony. To se děje pomocí účinků ionizačního činidla, čili ozářením povrchu elektrody.[1]



Obr. 1.5 Schéma zapojení rovinných elektrod a voltampérová charakteristika v homogenním elektrickém poli [1]

Obrázek 1.5-b) znázorňuje voltampérovou závislost výbojového proudu na přiloženém stejnosměrném napětí. Zvyšujeme-li napětí, roste v malé míře i proud. To platí pro oblast  $T_1$ . V úseku  $T_2$  se proud zvyšuje rychleji při postupném nárůstu napětí. Výboje v oblastech  $T_1$  a  $T_2$  se nazývají Townsendovy. „Složka rychlosti nosičů, způsobená elektrickým polem, je zde oproti tepelné rychlosti velká a nosič nabývá dostatečné kinetické energie, aby nárazem na neutrální molekulu z ní uvolnil elektron. Townsend předpokládal, že pomalé zvětšování proudu v oblasti  $T_1$  nastane tehdy, když volné elektrony v plynu získávají v elektrickém poli dostatek energie pro nárazovou ionizaci a rychlé zvětšování proudu v oblasti  $T_2$  Townsend vysvětlil tím, že kladné ionty, vytvořené při srážkách elektronů s neutrálními částicemi, získávají dosti velkou energii, aby došlo k přídavné ionizaci na katodě.[1]“ Když přestane působit ionizační činidlo, proud v oblastech  $T_1$  a  $T_2$  zmizí; jedná se tedy o nesamostatné výboje. Jev vzniká při nízkých tlacích a malé hustotě proudu. Samostatný výboj vznikne ve chvíli, kdy hodnota napětí překročí hodnotu kritickou  $U_p$ . Rychle se zvětší i protékající proud.

### 1.3.2 Korónové výboje

Jak již bylo řečeno, koróna je projev částečného výboje vznikající na velkých zakřiveních či hranách poměrně vzdálených elektrod ve vzduchu či jiných plynech. Intenzita elektrického pole na těchto elektrodách dosáhne dostatečných hodnot pro vznik neúplného samostatného výboje. Výboj je omezen na úzký prostorový obor kolem elektrod. Při dosažení zapalovacího napětí koróny se elektrody obklopí slabě svítící vrstvou. Neviditelné oblasti světelného projevu vysílají jen ultrafialové záření.[1]

Pro vznik, průběh a měření koróny má rozhodující vliv stav povrchu elektrod. Nečisté elektrody, drobné výčnělky či nerovnosti na elektrodách se stávají prvotními ohnisky vzniku malých předběžných, nestabilních výbojů. Proudové impulzy těchto zárodků částečných výbojů jsou přerušované a velmi malé. Přesné stanovení prahového zapalovacího napětí koróny je při těchto podmínkách těžké. Počáteční napětí zapálení lze s jistotou stanovit právě za podmínek velmi hladkých povrchů elektrod, při optimálním tvaru pole, druhu a hustoty plynu. Pokud se dále zvyšuje napětí, náhle se zvětší i proud a světelnost vrstvy; výboj plynule přechází v trsový a jiskrový výboj. Koróna při stejnosměrném napětí může vznikat jak na kladné tak i na záporné elektrodě; mechanismus výstavby je však rozdílný (za stejných podmínek a při srovnatelné intenzitě elektrického pole na povrchu elektrod). Ze záporné elektrody a její slabě svítící vrstvy vstupují elektrony do vnějšího prostoru a rychle tvoří záporné ionty. Kladné ionty putují k elektrodě kde dochází k jejich neutralizaci. Při kladném napětí přiloženém na elektrodu přecházejí kladné ionty do vnějšího prostoru; elektrony pak vstupují do vodiče.[1][7][9]

Od korónujícího vodiče se pohybuje prostorový náboj směrem k opačnému potenciálu. Při ustálení poměru na uspořádání je prostorový náboj postupně doplňován z ionizované vrstvy a tím může vznikat proud koróny. [1]

#### Ultrakoróna

Jev ultrakoróny je patrný mezi drátem a koulí. Pokus byl prováděn p. Uhligem za normálních atmosférických podmínek ve vzduchu. Pro drát natažený podél koule se hodnota přeskového napětí pohybuje podstatně výše než v případě, kdy drát je v uspořádání jako hrot proti téže kouli (při stejném doskoku). Vznik jevu ultrakoróny je limitován průměrem drátu; ten nesmí překročit několik milimetrů. Přeskok se v těchto uspořádáních vyvíjí z trusů při nízkém napětí přeskoku (korónující elektroda je drát).[1]

Ultrakoróna je zvláštním druhem koróny. Jev vzniká pouze za předpokladu, že drátek je pod kladným konstantním potenciálem. Při střídavém napětí se ultrakoróna vyvine v kladné

polaritě (půlvlně) přivedené na drát. Účinek ultrakoróny (pro střídavé napětí) zabrání časnému přeskoku; potlačí vznik trsových výbojů. Přeskok se odehraje v záporné půlvlně, vyvine se z klasické koróny. Ultrakorónu lze využít u zařízení zvláště vysokých střídavých napětí pro zvýšení elektrické pevnosti uspořádání.[1]

### Koróna ve vysokonapěťové technice

Korónové částečné výboje jsou v některých aplikacích vysokonapěťové techniky žádoucím jevem, v jiných naopak představují značné ztráty elektrické energie. Mohou být i zdrojem rušení rozhlasu, televizního vysílání či vysokofrekvenční telefonie. Využití koróny v technice vysokých napětí je následující[1][10]:

- **Elektrické odlučovače** se využívají k odlučování částic kapalného či plynného skupenství ze vzduchu (uhelný a cementový prach, popílek, olejové mlhy apod.). Dále k odloučení plynů vnějšího ovzduší nebo uzavřených prostor, kde je nutné zabránit znečištění ovzduší. Typický elektrický odlučovač má dva druhy elektrod; na sběracích elektrodách dle principu funkce nemá docházet k výbojům, naopak na elektrodách VN ano. Elektrody VN jsou většinou z drátů. Princip elektrických odlučovačů je detailně popsán v literatuře [1]. Základní dělení elektrických odlučovačů je:
  - trubkové
  - komorové (deskové)
  - speciální

Velké elektrické ztráty jsou způsobeny částečnými výboji v elektrizační soustavě:

- **Koróna na vodičích dálkových vedení** je při běžném provozu *ES* nepřijatelná. Způsobuje neúměrné ztráty na vedení a je zdrojem vysokofrekvenčního rušení. U přenosových soustav napětí nad *80 kV* je nutné dbát na volbu průměru vodičů a dimenzovat vzdálenosti jednotlivých vodičů v soustavě.
- **Koróna ve vzduchových mezerách průchodek a bleskojistek** má na tyto části soustavy nepříznivý vliv. Při výboji se tvoří ozón a kysličník dusíku; spolu s vlhkostí tvoří kyseliny, které snižují životnost těchto prvků.

### 1.3.3 Trsový výboj a sršení

Trsový výboj vzniká u elektrod s divergentním elektrickým polem především na hrotech, dále u koulí a válců. Hlavním parametrem pro vznik tohoto jevu je poměr doskoku a poloměru zakřivení elektrod. U hladkých elektrod je spouštěčem trsového částečného výboje prach a nečistoty vyskytující se v okolí elektrody, avšak nehomogenita elektrod nesmí být

příliš veliká. Trsový výboj je počátkem jiskrového částečného výboje pro případy elektrod vzdálených přes 100 mm.[1]

Základem pro vznik trsového výboje je klidný svítící samostatný výboj. Při překročení mezního napětí pro zapalování tohoto typu vysokonapětového jevu se tvoří neklidné paprsky; ty končí ve vzduchu nebo na povrchu izolantů. Výboj je tvořen jednotlivými rozvětvenými paprsky. Efekt je doprovázen zvukovými a světelnými jevy. Jev je způsoben nárazovou ionizací a rekombinací. V případě, že nedojde k přeskoku a napětí stále zvyšujeme, trsové výboje se začnou objevovat častěji a s větší intenzitou až do té doby, než se jev ustálí. Pak lze mluvit o sršení.[1]

Voltampérová charakteristika je v případě jiskrového výboje pozitivní; při zvýšeném proudu se zvyšuje i napětí, ovšem jen nepatrně. Napětí jiskry je hodnota, při které částečné výboje mezi elektrodami přechází z trsového na výboj jiskrový.[1]

#### 1.4 Jiskrový výboj a přeskokové napětí

Jiskrový výboj je v homogenním poli vystaven přímo bez předvýbojů (v případě, že dosáhne napětí pro vznik samostatného výboje). U polí nehomogenních se nejdříve vytvoří trsový výboj který přejde v jiskru. Při testování objektů s přiloženým střídavým nebo stejnosměrným napětím, které právě stačí k přeskoku mezi elektrodami, může být doba vystavení jiskry statického přeskoku libovolně dlouhá. Statický přeskok oproti rázovému nastává vždy při nižší hladině napětí. Jiskrový výboj vždy potřebuje určitý čas k výstavbě.[1]

U jiskrových výbojů od přiložení napětí do přeskoku uplyne nějaký čas. Tento časový interval se obecně nazývá doba zpoždění výboje. Zpoždění lze rozdělit do dvou fází:

- Statická doba zpoždění
- Doba výstavby výboje

Během statického zpoždění je již napětí přiložené na zkoušeném objektu. Mezi elektrodami v tuto chvíli ještě nemusí být žádný elektron. V případě, že se elektrony již v prostoru vyskytují, nemusí ionizace jimi vyvolaná nutně vést k přeskoku. Statické zpoždění je takové, kdy doba výstavby jiskry je mnohonásobně delší než nezbytný časový interval potřebný pro přeskok.[11]

Přeskokové napětí je mezní hodnota hladiny napětí, kde mezi dvěma potenciály dojde k přeskoku. Vytvoří se tedy nízkoodporové spojení skrze nebo okolo dielektrika.

Doba výstavby jiskry je časový úsek potřebný pro výstavbu výboje od okamžiku, kdy je k dispozici počáteční množství elektronů. Čím větší jsou vzdálenosti mezi elektrodami je elektrické pole je homogennější, tím je doba výstavby jiskry delší.

## 1.5 Veličiny charakterizují částečné výboje

K sledování a měření částečných výbojů je důležité předem definovat jednotlivé parametry. Pomocí nich pak lze hodnotit aktivity částečných výbojů. V případě měření a diagnostiky částečných výbojů existuje několik charakteristických parametrů; ty lze dělit do základních skupin pro přehlednost. Všechny parametry, které se pro tento účel používají, jsou kompletně vyjmenovány a popsány v normě ČSN EN 60270 (viz zdroj [5]).

Pro měření částečných výbojů na stejném elektrickém uspořádání (kromě testovaných objektů) lze použít parametry srovnávací. V těchto případech můžeme sledovat trend výbojové činnosti u jednotlivých druhů testovaných uspořádání. Nemusíme v těchto případech znát absolutní hodnoty. Jak bude popsáno v práci dále, absolutní hodnoty např. velikost náboje  $Q$  nelze snadno získat. Pro porovnávání bude použito zdánlivého náboje  $q$ .

Pro určování druhu výbojů nám napomáhá monitoring výskytu výbojů vzhledem k jejich umístění k fázovému úhlu napájecího napětí. Lepší elektrické diagnostické systémy (např. Power diagnostix) popsány v *kap. 3.1*, umožní záznam částečných výbojů vztažených právě k fázovému úhlu napájecího napětí. Parametry měřicích metod a systémů budou více popsány v následujících odstavcích.

### 1.5.1 Veličiny jednotlivých impulzů

#### Zdánlivý náboj $q$

Jedná se o základní diagnostický parametr pro vyhodnocování míry částečných výbojů. Zdánlivý náboj  $q$  impulzu částečného výboje je dle normy [5] je unipolární náboj pozorovaný ve velmi krátkém časovém intervalu. Náboj je detekován mezi svorkami zkoušeného objektu v normou předepsaném zkušebním obvodu. Tento náboj by měl dosahovat na měřicím přístroji tak velkou výchylku, jakou by způsobil náboj vlastního proudového impulzu částečného výboje. Nutno podotknout, že zdánlivý náboj  $q$  se přímo nerovná skutečnému náboji  $q_{cv}$ . Náboj  $q_{cv}$  je reálně přenesený částečný náboj, který nelze s přesností kvantifikovat.[4][2][5]

Označení zdánlivého náboje je  $q$  (ve starší literatuře se můžeme setkat s označením  $q_{max}$ ), jednotky pro zdánlivý náboj se udávají v Kolumbech [C]. S přihlédnutím k velikosti zdánlivého náboje se vžilo užívat menší jednotky a to pikocoulomby [ $pC$ ].

Při měřeních a zkouškách VN se obvykle sleduje především tento parametr v závislosti na čase. Nastavení měřicích parametrů systémů (časová konstanta měření, spodní hranice detekce náboje  $q$  atd.) se mění v závislosti na účelu měření.[4][5]



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

Veličina tohoto parametru částečných výbojů je dána vztahem:

$$\phi_i = 360(t_i / T), \quad (5)$$

kde  $t_i$  značí okamžitou dobu, kde se vyskytuje částečný výboj od předešlého kladného průchodu napětí nulou a  $T$  je symbol pro dobu (periodu) tohoto napětí. Fázový úhel  $\phi_i$  je vyjádřen stupni [°] či radiány [rad]. [4][5]

**Četnost impulzů  $n$** 

Četnost impulzů  $n$  lze definovat jako poměr mezi celkovým počtem impulzů  $CV$  (částečných výbojů), které jsou zaznamenány v námi vybraném časovém intervalu a po dobu trvání tohoto intervalu. [5] Jednotky této poměrné veličiny jsou [ $s^{-1}$ ]. V praxi se užívá jen suma  $n$  pulzů, které svou hodnotou zdánlivého náboje přesáhnou určitou mezní hodnotu. Měření pak nebudou ovlivňovat ty, které jsou způsobeny vlivem rušení či jevu, který zrovna není přímo zkoumán. Měří se tedy pouze počet pulzů v určitém intervalu mezních hodnot. [4][5]

**1.5.2 Veličiny integrované**

Degradace izolací je způsobena opakováním jevů nejen částečných výbojů. Proto se zavádí veličiny integrované, kdy časový interval  $T$  je podstatně delší než časový okamžik zkoumání jedné periody napěťového cyklu. V praxi se používají doby delší než 60 sekund především kvůli výpovědní hodnotě. [5]

**Střední proud částečných výbojů  $I$  (NQS)**

Jedná se o integrální veličinu  $I$ , která je stanovena jako součet absolutních hodnot zdánlivých nábojů. Součet nábojů je sledován po určitý časový interval  $T_{ref}$ . Pro zjištění střední hodnoty je tento součet následně vydělen délkou tohoto intervalu. [4]:

$$I = \frac{1}{T_{ref}} \sum_{i=1}^m |q_i|, \quad (6)$$

V rovnici 6 symbol  $m$  značí celkový počet výbojů za časový interval  $T_{ref}$ . Střední proud částečných výbojů má jednotky [ $C \cdot s^{-1}$ ] nebo [ $A$ ]. Pro případ, že mají všechny zdánlivé výboje  $q$  stejnou velikost, dojde k následujícímu zjednodušení:

$$I = nq, \quad (7)$$

kde  $n$  značí četnost výbojové činnosti. [4]

### Součtový náboj $Q$

Jedná se o náboj, který je dosažen součtem absolutních hodnot jednotlivých zdánlivých nábojů  $q$ , během stanoveného časového intervalu. Interval může být jedna perioda napájecího napětí (typický měřicí interval) či jakákoliv jiná časová konstanta. Hodnota součtového náboje  $Q$  se udává v  $[C]$  resp. v  $[pC]$ . V dnešní době se od tohoto parametru upouští, nahrazuje se středním proudem částečných výbojů.[5]

### Střední kvadratický součet $D$

Udává součet druhých mocnin hodnot jednotlivých zdánlivých nábojů  $q_i$  za časový interval  $T_{ref}$ . Střední kvadratický součet lze měřit přímo či vypočítat z naměřených hodnot  $q_i$  podle vztahu:

$$D = \frac{1}{T_{ref}} \sum_{i=1}^m q_i^2, \quad (8)$$

kde  $m$  je počet výbojů za určený časový referenční interval  $T_{ref}$ . Při výbojové činnosti impulzů se stejnou velikostí jejich amplitudy lze zjednodušit vztah na:

$$D = nq^2, \quad (9)$$

kde  $n$  znázorňuje četnost částečných výbojů. Parametr není při diagnostice primárně používán, lze ho řadit mezi doplňkové. Je obvykle vyjádřen v jednotkách  $[C^2/s]$ . [5]

### Výkon částečných výbojů $P$

Parametr udává střední výkon impulzu, který se vyskytuje na svorkách zkoušence. Výkon je stanoven z hodnot zdánlivého výboje  $q_i$  při zvoleném referenčním časovém intervalu  $T_{ref}$ . Jednotky veličiny jsou  $[W]$ , resp.  $[mW]$  vzhledem k velikosti vyskytujícího se náboje. Hodnotu výkonu je možné zjistit přímo měřicí metodou nebo výpočtem z již naměřených hodnot zdánlivého náboje  $q_i$  spolu s hodnotami přiloženého napětí na měřeném objektu  $u_i$  pomocí vztahu:

$$P = \frac{1}{T_{ref}} \sum_{i=1}^m q_i u_i, \quad (10)$$

kde  $m$  je symbol pro počet výbojů vztahujícím se k časovému intervalu  $T_{ref}$ . V případě výkonu záleží na polaritě pulzu, musí se tedy při výpočtu brát ohled na znaménka jednotlivých hodnot. Parametr výkonu se používá pouze jako doplňkový, lze pomocí něj hodnotit intenzitu výbojové činnosti.[5]

### 1.5.3 Důležité napěťové hodnoty vztahované k částečným výbojům

V rámci názvosloví pro částečné výboje se dle normy ustálily určité hodnoty a jejich pojmenování. Následující hladiny napětí pro měření, pozorování a vyhodnocování výbojů jsou zvláště významné.[4]

#### Zkušební napětí částečných výbojů

Zkušební napětí je definováno jako napětí, při kterém by na testovaném objektu nemělo docházet k výbojové činnosti překračující normou předepsanou velikost. Předepsaná hodnota je maximální hodnota sledovaného parametru zkoušence (obvykle parametru  $q$ ). Při těchto zkouškách je zkoumaný objekt vystaven trvalému působení zkušebnímu napětí.

#### Zapalovací napětí částečných výbojů $U_i$

Zapalovací napětí je nejnižší prahovou hodnotou napětí. Postupným plynulým zvyšováním potenciálu na zkoušeném objektu zpozorujeme první náznaky vzniku (zapálení) výbojů. Udává se ve voltech, popř. v kilovoltech. V každém měření (i v laboratorních podmínkách) zaznamenáme na pozadí šum. Částečné výboje způsobené tímto typem rušení nemohou být v rámci měření považovány za zapalovací napětí částečného výboje.

#### Zhášecí napětí částečných výbojů $U_e$

Zhášecí napětí je přiložené napětí na zkoušeném objektu ve chvíli, kdy dochází k postupnému snižování napětí z hodnot, kde již byla pozorována trvalá výbojová činnost a tato činnost ustane. Jedná se tedy o nejnižší přiložené napětí, při kterém se amplituda (úroveň) veličiny impulzu výboje dostane pod normou předepsanou hodnotu (nebo na hodnotu částečných výbojů šumu pozadí).

## 2 Teorie plynných izolantů

Plyny jsou materiály s nejmenší hustotou látky. Nemají stálý tvar ani objem. Molekuly jsou v plynných látkách velice vzdáleny, jejich atomové orbitály se nepřekrývají a tím pádem netvoří pevné vazby. Interakce mezi jednotlivými molekulami jsou slabé; jejich pohyb je chaotický. Ke střetům a vzájemnému působení částic dochází jen ve chvílích jejich přiblížení.[12]

Krajním případem pro popis dějů v plynných izolantech je ideální plyn. V ideálním plynu se uvažuje, že molekuly mají zanedbatelnou velikost a neinteragují mezi sebou (kromě srážek, tedy velmi těsných průletů). V teorii ideálního plynu je velikost energie zapříčiněna pouze kinetickou energií, potenciální (interakční) vazby jsou zde nulové. V ideálním plynu je tedy jeho celková energie závislá pouze na teplotě. U reálných plynů nelze přesně dosáhnout vlastností plynů ideálních, avšak chování skutečných plynů se příliš neliší, zejména v oblasti s nižším tlakem a teplotami. Velmi podobné vlastnosti mezi ideálními plyny a plyny reálnými lze pozorovat u lehkých látek jako např. vodík a hélium.[12][13]

Plyny se vyznačují nejnižší permitivitou, dielektrickými ztrátami a malou vodivostí. Jejich vlastnosti jsou stálé, mají schopnost regenerace a nepodléhají stárnutí.[14]

V elektrotechnice mají plyny široké použití. Nejčastěji se využívají jako izolanty, mohou se ale využívat pro vedení elektrického proudu, jako náplň ve světelných výbojkách, pro snižování odpařování žhavých drátů, odvádění tepla nebo např. jako ochranné atmosféry při manipulaci a zpracování kovů.[15]

### 2.1 Elektrická vodivost plynných izolantů

Z hlediska elektroizolační techniky je nutné používat takové materiály, které neobsahují volné nosiče elektrického náboje a další znečištění či jiné nežádoucí příměsi. Nelze dosáhnout vlastností ideálního izolantu; každý technický izolant má určitou nežádoucí nenulovou elektrickou vodivost.[11][14]

Pro srovnávání a hodnocení kvality a použitelnosti materiálů se z hlediska vlastnosti elektrické vodivosti používá fyzikální veličiny:

- Měrného elektrického odporu (rezistivita  $\rho[\Omega \cdot m]$ )
- Měrné elektrické vodivosti (konduktivita  $\gamma[S \cdot m^{-1}]$ )

Fyzikální veličiny jsou měrné; odpor či vodivost jsou přepočítány na jednotku objemu. Měrné veličiny umožní vzájemné srovnávání jednotlivých druhů materiálů.

Výše uvedené veličiny jsou vzájemně ve vztahu:

$$\gamma = \frac{1}{\rho}. \quad (11)$$

Plyny se řadí mezi výborné izolanty, zejména ve slabých elektrických polích a při nízkých teplotách. V plynných izolantech je obecně malá koncentrace volných nosičů elektrického náboje. Elektricky nabitě částice tedy vznikají především v případě působení ionizačních činidel elektrického původu, kosmického či radioaktivního záření. Vlivem činidel dochází k uvolnění jednoho či více elektronů; vznikají volné nosiče náboje, dochází tedy k ionizaci plynu. Působením elektrického pole se mohou nabitě částice, elektrony a ionty pohybovat v plynném médiu prakticky volně.[3]

Aby došlo k samotné ionizaci, musí atom plynu pohltit dostatečně velké množství tzv. ionizační energie.

### Nárazová ionizace

K ionizaci neutrální částice dochází vlivem srážky s elektronem nebo iontem, který získal potřebnou dostatečnou kinetickou energii díky působení elektrického pole, vlivem vysoké teploty či působením jiného ionizačního činidla. Srážka je zde chápána jako těsný průlet dvou či více částic, při které dochází k interakci jejich polí a vychýlení z jejich původní dráhy. Podmínkou pro ionizaci neutrální částice je, že ionizační energie  $W_i$  [J] musí být větší či rovna polovině hmotnosti ionizující částice  $m$  [kg] vynásobené rychlostí ionizující částice  $v^2$  [ $m \cdot s^{-1}$ ], tedy:

$$W_i \geq \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2. \quad (12)$$

Nárazová ionizace může být také způsobena rychlými  $\alpha$  a  $\beta$  částicemi. Ve vzduchu je hlavním ionizačním činidlem plyn radon; ten se rozpadá a ve svém okolí podporuje jako činidlo vznik procesů nárazové ionizace.[1][3]

### Fotoionizace

K fotoionizaci neutrální částice dochází pohlcením fotonu prostřednictvím gama, Rentgenova a kosmického záření za splnění podmínky:

$$W_i \geq h \cdot \nu \quad (13)$$

kde  $W_i$  [J] je ionizační energie,  $h$  ( $h = 6,6256 \cdot 10^{-34} J \cdot s$ ) je Planckova konstanta a  $\nu$  [Hz] je frekvence záření.[1][3]

## Povrchová ionizace

Při této ionizaci dochází k přímému uvolňování elektronů z elektrod. Energie nutná k uvolnění elektricky nabitých částic je dodávána formou tepelné energie nebo jako některý z druhů krátkovlnného záření, které působí na povrchu elektrod. Mechanismus povrchové ionizace je specifický. Proud, který protéká mezi elektrodami je závislý na použitém materiálu elektrod.[3]

O nesamostatné elektrické vodivosti v plynných izolantech lze obecně mluvit v případě, že plynný izolant je vystaven slabému elektrickému poli. K nesamostatnému výboji dochází pouze tehdy, je-li přítomno některé z ionizačních činidel. Pro silná elektrická pole obecně platí, že dochází k samostatné elektrické vodivosti plynu. Ta je způsobena nárazovou ionizací vlivem částic, které jsou dostatečně urychleny. Tato problematika úzce souvisí s dalšími vlastnostmi plynných izolantů – elektrickou pevností popsanou v *kap 2.3*. [3]

Koeficient generace  $g$  je parametr, který udává změny koncentrace volných nosičů náboje v plynu. Je definován jako počet vznikajících párů elektronů a kladných iontů v jednotce objemu za jednotku času. Kromě vzniku volných nosičů elektrického náboje dochází také i k jejich zániku. Zánik je vysvětlen jevem neutralizace částice a rekombinací.[3]

Jev neutralizace vzniká tak, že nosiče elektrického náboje dopadají na elektrodu s opačným potenciálem, podle druhu nosiče odevzdají nebo přijmou náboje a vracejí se do prostoru jako neutrální atomy. Elektrické náboje, které prochází rozhraním dielektrikum - elektroda jsou nositeli zjistitelného elektrického proudu ve vnějším obvodu.[1][3]

Rekombinace vzniká v případě interakce dvou částic s nábojem o opačné polaritě. Obecně se zpravidla jedná o rozmanité procesy; elektronová nebo iontová rekombinace, rekombinace při srážce tří částic apod. Rekombinace je jev probíhající současně s ionizací. Jev rekombinace je detailně popsán v literatuře [3].

### 2.1.1 Schopnost pohybu elektrického náboje v plynech

Vlastnost elektrické vodivosti plynu není závislá pouze na četnosti (koncentraci) volných nosičů náboje, ale i na jejich schopnosti pohybu v izolantu. Pohyblivost je funkcí intenzity  $\vec{E}$  vnějšího elektrického pole a velikosti náboje  $q$  volného nosiče náboje[16]:

$$\vec{f} = q \cdot \vec{E}, \quad (14)$$

kdy síla  $\vec{f}$  udělí volnému nosiči náboje zrychlení:

$$\vec{a} = \frac{\vec{f}}{m} = \frac{q \cdot \vec{E}}{m}, \quad (15)$$

kde  $\vec{a}$  [ $\text{ms}^{-1}$ ] reprezentuje zrychlení volného nosiče náboje,  $\vec{f}$  je síla vyvinutá na nosič náboje, nacházející se v elektrickém poli mající intenzitu  $\vec{E}$  [ $N$ ],  $m$  je zástupný symbol pro hmotnost a pomocí  $q$  je značen elektrický náboj daného volného nosiče.[3][16]

Vzájemné střety částic plynu jsou způsobeny jejich tepelným pohybem. Tepelný pohyb je chaotický a neřízený. Všechny elementární částice okolo nás (elektrony, protony, neutrony, atomy i molekuly) tento pohyb vykonávají. Tento jev nelze snadno pozorovat. Experimentálně je možné zachytit tyto pohyby z makroskopického hlediska a sledovat např. postupné ohřívání a s tím související i dilataci materiálu vlivem tohoto pohybu. Volné nosiče elektrického náboje jsou také součástí těchto srážek při tepelném pohybu. Při těsném průletu volného nosiče kolem neutrální částice odevzdává veškerou svojí kinetickou energii. Ve směru intenzity pole volný nosič dosáhne své největší rychlosti právě těsně před srážkou s jinou částicí plynu. Okamžitá rychlost  $\vec{v}$  v okamžiku před srážkou je určena zrychlením  $\vec{a}$ , které získal pomocí přiloženého elektrického pole. Okamžitá rychlost záleží také na době, která uplynula mezi dvěma srážkami. Tato doba se značí  $\tau$  a rychlost je vyjádřena jako[1]:

$$\vec{v} = \vec{a} \cdot \tau = \frac{q \cdot \vec{E}}{m} \cdot \tau, \quad (16)$$

Pro slabá elektrická pole lze provést zjednodušení. Složka rychlosti je pro tato slabé pole  $\vec{E}$  podstatně menší, než složka rychlosti tepelného pohybu. Časový okamžik mezi srážkami dvou částic plynu je dán rychlostí tepelného pohybu částic:

$$\tau = \frac{l_s}{c}, \quad (17)$$

kde  $l_s$  [ $m$ ] určuje střední volnou dráhu částice, která je vázána na svůj vlastní tepelný pohyb, symbolem  $c$  [ $\text{ms}^{-1}$ ] je pak označena rychlost nosiče náboje způsobená jejím tepelným pohybem.

Střední volnou dráhu  $l_s$  lze odvodit z teorie kinetických fyzikálních vlastností plynu[14]:

$$l_s = \frac{1}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot n_1 \cdot D^2}. \quad (18)$$

V případě rovnice 18  $n_1$  znázorňuje počet molekul v určitém objemu [ $\text{m}^{-3}$ ], dále pak  $D$  je průměr molekuly [m]. Rychlost tepelného pohybu částice  $c$  je závislá na Boltzmannově konstantě  $k$ , teplotě  $T$  a hmotnosti částice  $m$ [3]:

$$c = \sqrt{\frac{3 \cdot k \cdot T}{m}}. \quad (19)$$

Pohyblivost volných nosičů náboje lze definovat rovnicí, pomocí tzv. střední rychlosti částice  $\bar{v}$ . Její velikost se určuje z okamžité rychlosti[3]:

$$\bar{v} = \frac{q \cdot |\vec{E}| \cdot l_s}{2 \cdot \sqrt{3 \cdot k \cdot T \cdot m}}. \quad (20)$$

Pohyblivost volného náboje se značí  $b$ . Závisí na poměru výše uvedené střední rychlosti volného nosiče  $\bar{v}$  a intenzity elektrického pole  $|\vec{E}|$ , která na něj v danou chvíli působí. Po dosazení a provedení základních elementárních úprav dostáváme vzorec pro pohyblivost volných nosičů v plynných izolantech[3]:

$$b = \frac{q \cdot |\vec{E}| \cdot l_s}{2 \cdot \sqrt{3 \cdot k \cdot T \cdot m}} \cdot \frac{1}{|\vec{E}|} = \frac{q \cdot l_s}{2 \cdot \sqrt{3 \cdot k \cdot T \cdot m}} \quad (21)$$

### 2.1.2 Charakteristiky plynných izolantů

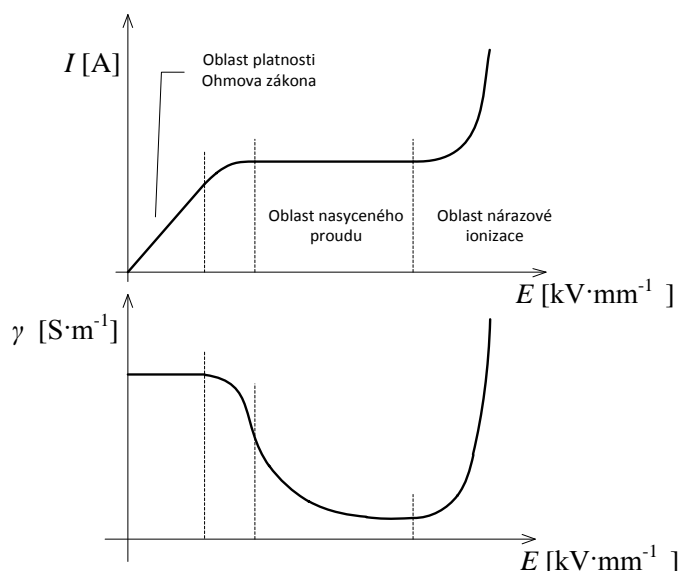
Základní vyobrazení, kterým lze graficky popsat děje nejen v oblasti plynných dielektrik je tzv. voltampérová charakteristika. Tu lze popsat jako závislost dvou veličin. Jednou z nich je proud a druhá je intenzita působícího elektrického pole. Vyjdeme z modelového případu, kdy uvažujeme deskové uspořádání elektrod, jejich plocha je  $S$ , vzdálenost mezi nimi je  $d$  a izolační médium je např. vzduch. Připojením stejnosměrného napětí na elektrody začne protékat obvodem elektrický proud. Závislost tohoto proudu na napětí (tedy na intenzitě pole) je znázorněno na *Obr. 2.1*. Průběh charakteristiky je dán počtem a poměrem nově vznikajících a zanikajících nosičů elektrického náboje.

První částí V-A charakteristiky je velmi nízká intenzita elektrického pole. Nosiče el. náboje získávají jen velmi malou rychlost a díky tomu je schopnost rekombinace veliká. V první části platí Ohmův zákon a závislost je lineární.[3]

V druhé části charakteristiky je plynné dielektrikum vystaveno vyšším hodnotám



intenzity elektrického pole. Volné nosiče se urychlují, tím klesá i pravděpodobnost jejich rekombinace. Neutralizace nosičů na povrchu elektrod se stává významným dějem. Proudová hustota není závislá na velikosti přiloženého napětí, resp. na intenzitě elektrického pole. Lze tedy mluvit o tzv. oblasti nasyceného proudu. Tuto část charakteristiky lze pro vzduch vymežit rozsahem intenzit elektrického pole od  $0,7 \cdot 10^{-6}$  do  $1 \text{ [kV}\cdot\text{mm}^{-1}]$ .



Obr. 2.1 Voltampérová charakteristika v plynech a konduktivita plynných izolantů v závislosti na napětí [3]

Ve spodní části Obr. 2.1 je znázorněna charakteristika napěťové závislosti na konduktivitě plynného izolantu. V oblasti platnosti Ohmova zákona se konduktivita s rostoucím napětím nemění. Přestoupí-li intenzita pole ve v-a charakteristice do oblasti nasyceného proudu, začne konduktivita spolu se zvyšujícím se napětím hyperbolicky klesat. V těchto dvou oblastech v rámci konduktivity lze mluvit o nesamostatné vodivosti.[3]

Překročením kritické hodnoty elektrické intenzity  $E_k$  kdy ve vzduchu  $E_k = 1 \text{ kV}\cdot\text{mm}^{-1}$  začne probíhat nárazová ionizace. Dojde k exponenciálnímu zvětšení proudové hustoty vzhledem k postupnému zvyšování napětí. Překročením této kritické hodnoty se plyn (vzduch) dostává do fáze samostatné vodivosti. Ztrácí tak svou izolační schopnost, tedy i elektrickou pevnost.[17]

## 2.2 Dielektrické ztráty v plynech

Dielektrické ztráty existují při stejnosměrném i střídavém napětí nezávisle na tvaru napěťové křivky. Pro stejnosměrné napětí je určující vodivostní proud; průchodem tohoto proudu skrze dielektrikum vznikají Jouleovy ztráty. Velikost ztrát je úměrná velikosti procházejícího vodivostního proudu. Dielektrické ztráty ve stejnosměrném elektrickém poli

popisuje rovnice 22:

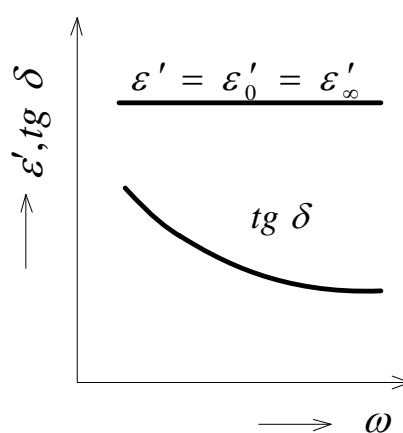
$$P_{Z_{ss}} = R_i \cdot I^2 = \frac{U^2}{R_i}, \quad (22)$$

kde  $R_i$  je izolační odpor dielektrika [ $\Omega$ ], symbol  $U$  znázorňuje přiložené stejnosměrné napětí na vzorku a  $I$  proud procházející dielektrikem (jedná se o ustálenou hodnotu proudu).[3]

Plyny, jak již bylo uvedeno, vynikají svými izolačními vlastnostmi, zejména při nižších napětích. Vykazují obecně malé dielektrické ztráty. To platí ve chvíli, kdy nedochází k ionizaci plynu. V případě probíhajících ionizačních dějů se ztráty výrazným způsobem zvyšují. Dielektrické ztráty jsou u plynů způsobeny pouze jejich vodivostí, která je u plynných izolantů nepatrná. Polarizační ztráty jsou u plynů zanedbatelné (to platí i pro případ tzv. polárních plynů). Ztrátový činitel je pro plynné izolanty řádově  $10^{-8}$  (při frekvenci 50 Hz). Plynná dielektrika jsou užívána u zařízení, u kterých není konstruktér limitován malým prostorem. S rostoucí frekvencí u plynných dielektrik hyperbolicky klesá závislost ztrátového činitele na frekvenci samotné. V případě, že se v dielektriku neberou v úvahu polarizační ztráty (jsou zanedbatelné) a uvažuje se pouze se ztrátami vodivostními, lze ztrátový činitel  $tg \delta$  vypočítat jako[3]:

$$tg \delta = \frac{\gamma}{\omega \cdot \epsilon' \cdot \epsilon_0}, \quad (23)$$

kde  $\gamma$  značí konduktivitu plynu na frekvenci nezávislou. Na Obr. 2.2 je znázorněna kmitočtová závislost permitivity a  $tg \delta$ .[15]



Obr. 2.2 Frekvenční závislost permitivity a ztrátového činitele[15]

Ztrátový činitel plynů je teplotně závislý na dané relativní permitivitě a konduktivitě plynů samotných. Pro měření těchto průběhů musí být brán zřetel na podmínku konstantního

tlaku, popř. konstantního objemu plynného izolantu.[17]

Ztrátový činitel je také závislý na velikosti přiloženého napětí. Je zde vazba mezi velikostí přiloženého napětí a konduktivitou daného plynu. Pro oblasti, kde lze uplatnit Ohmův zákon, je ztrátový činitel na napětí nezávislý. V části charakteristik nasyceného proudu lze sledovat hyperbolický pokles hodnoty ztrátového činitele; naopak při nárazové ionizaci exponenciálně roste. Napěťová závislost ztrátového činitele je výraznější v případech, kdy pevný izolant obsahuje drobné plynem vyplněné dutinky. Dojde k rozležení intenzity elektrického pole na pevném izolantu a plynových dutinek v nepřímém poměru jejich permitivit. Ionizační ztráty v tomto případě budou výraznější. Pokud namáhání pevného izolantu (tedy i plyné dutinky) překročí určitou mez, vzniknou v prostoru plyné dutinky částečné výboje. Dutinka ztratí izolační schopnost a celkově se zvýší vodivostní ztráty, tedy i ztráty dielektrické.[3][15]

### 2.3 Elektrická pevnost

Elektrická pevnost je základní vlastností všech dielektrických prvků vzhledem k jejich účelu použití. Úkolem dielektrika je vzájemné oddělení míst s rozdílným elektrickým potenciálem. Elektrická pevnost je základní parametr pro návrh a konstrukci elektrických zařízení. Tento parametr má velkou výpovědní hodnotu o materiálu z hlediska dimenzování izolace vysokonapěťových zařízení. Elektrická pevnost je závislá na skupenství elektroizolačního média a jeho vlastnostech, na okolních podmínkách a na velikosti přiloženého elektrického pole. Po přiložení lokální intenzity, tedy napětí na zkoušený či v provozu aktivní objekt a překročí-li tato intenzita kritickou mez, dojde k velkému nárůstu koncentrace a zvýšení pohyblivosti volných nosičů elektrického náboje. Značně poklesne rezistivita materiálu. Náhle se zvýší konduktivita a izolační schopnost media prudce poklesne. V poslední fázi dojde k překlenutí míst s rozdílnými potenciály dokonale vodivou nízkoodporovou cestou. Tento proces lze nazvat úplným výbojem, při kterém protékající proud dosahuje značných hodnot. Velikost proudu je omezena pouze impedancí napájecího zdroje a přívodu k elektrodám popř. svorkám zkoušence či provozovaného zařízení.[1][3]

První stádium jevu je nárůst konduktivity a samotný přeskok, tedy výboj. Ve druhé fázi se po odeznění samotného výboje uplatní procesy, které v drtivé většině případů z praxe mají neblahé, nežádoucí a výrazné degradační účinky. Degradace je zapříčiněna eventuálním hořením elektrického oblouku v prostoru mezi rozdílnými potenciály v případě překročení elektrické pevnosti izolačního materiálu. Při jevu se uplatní vysoké teploty, ionizační procesy a intenzivní záření.[3][15]

Překročením elektrické pevnosti lze v závislosti na skupenství daného materiálu mluvit o přeskoku či průrazu.

Průraz je děj, který probíhá v pevných izolantech. Děj je spojen s nárůstem proudu, poklesem napětí na elektrodách a trvalým zhoršením izolačních vlastností proraženého materiálu.

O přeskoku lze mluvit u izolací plynných a kapalných skupenství. Jako u průrazu dochází taktéž k nárůstu proudu a poklesu napětí, avšak zhoršení izolační vlastností média je pouze dočasné. Plyny a kapaliny mají schopnost regenerace. Za přeskok se považuje i výboj vzniklý na rozhraní pevný izolant s kapalným či plynným dielektrikem.

Kritická hodnota přeskoku (průrazu), při které dojde k přemostění, se nazývá  $U_p$ . Hodnota závisí na mnoha faktorech; především na druhu a rozměrech izolantu, tvaru elektrického pole, časovém průběhu namáhání. Výrazně se projeví i doba přiloženého napětí na izolantu. Závisí i na okolních podmínkách (teplota, tlak, vlhkost, znečištění, vlhkost, chemické jevy). Při přiloženém střídavém napětí lze udávat elektrickou pevnost v efektivních či vrcholových hodnotách.

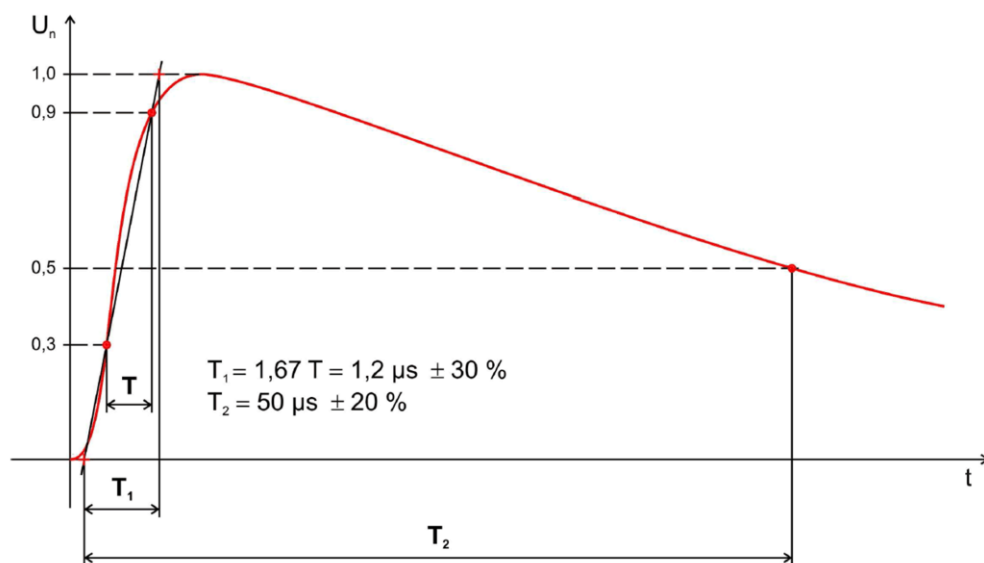
V případě, že se elektrická pevnost  $U_p$  [kV] lineárně přepočítá na tloušťku izolace  $d$  [mm] pro místo průrazu či přeskoku, získáme elektrickou pevnost materiálu  $E_p$ :

$$E_p = \frac{U_p}{d}, \quad (24)$$

Pro homogenní elektrická pole představuje elektrická pevnost intenzitu elektrického pole, při níž dochází k průrazu resp. přeskoku. U nehomogenních polí je situace složitější. Ke srovnávání materiálů dle elektrické pevnosti můžeme přistoupit pouze tehdy, kdy je zaručeno, že naměřené výsledky byly pořízeny za totožných podmínek. Podmínky, které vyhoví srovnávání materiálů pro nehomogenní a silně nehomogenní pole, lze zajistit jen velmi obtížně. Elektrická pevnost závisí na mnoha vlivech. Činiteli samotného média jsou tloušťka, struktura a homogenita materiálu, nečistoty či nežádoucí příměsi. Dále jsou podstatné vnější vlivy jako vlhkost, tvar elektrického pole a jeho frekvence, teplota samotného izolantu i okolí. Přesto, že jsou vlivy i izolační materiály zkoumány již poměrně dlouhou dobu, vlivy činitelů nejsou dosud ve všech případech uspokojivě popsány a vysvětleny.[1][3]

Elektrická pevnost je závislá také na délce a druhu přiloženého napětí. Lze tedy mluvit o namáhání střídavém, stejnosměrném a impulzním. Střídavá elektrická pevnost je měřena většinou při frekvenci zkušebního napětí 50 Hz. Stejnosměrná elektrická pevnost je parametr zkoušeného objektu, kdy izolant je schopen udržet si své izolační vlastnosti při určité hodnotě

přiloženého stejnosměrného napětí. Ve většině případů platí, že stejnosměrná elektrická pevnost je až dvojnásobně větší než střídavá. Impulzní elektrickou pevnost zjišťujeme především přiložením rázového impulsu (rázovým napětím). Nejčastěji se pro testování používá vysokoenergetický jednosměrný impuls napětí nebo proudu se strmým čelem a dlouhým týlem. Tvar rázové vlny jednoho z normalizovaných impulsů je tedy např.  $1,2/50$ . Jak je znázorněno na Obr. 2.3 doba čela vlny trvá  $1,2 \mu\text{s}$  a pokles je pozvolnější; doba týlu vlny trvá  $50 \mu\text{s}$ . [3][18]



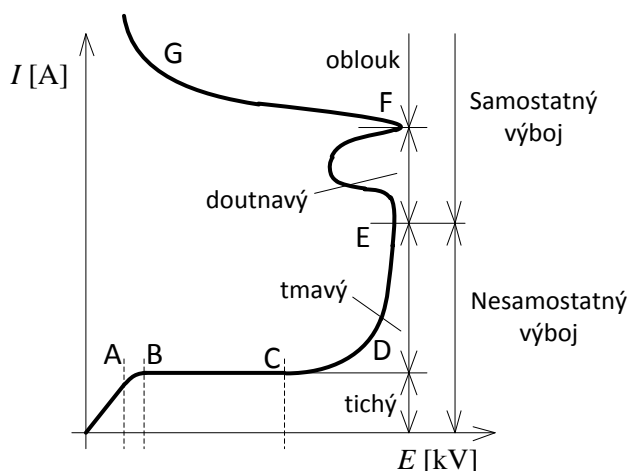
Obr. 2.3 Normalizovaný atmosferický napěťový impuls[18]

### 2.3.1 Elektrická pevnost plynných izolantů

Vlastnost elektrické pevnosti plynných izolantů vychází z kapitoly o elektrické vodivosti. Obr. 2.1 ukazuje voltampérovou charakteristiku. Ta je pouze v mezích nesamostatného výboje. Naopak Obr. 2.4 níže znázorňuje kompletní V-A charakteristiku závislosti proudu na napětí i pro samostatnou výbojovou činnost, tedy doutnavý projev i oblouk či přeskok.

Nesamostatný výboj je na obrázku naznačen rozmezím A-E. Pro svůj vznik potřebují vnější ionizační činidlo. V případě, že ustane působit vnější podpora výboje, nesamostatný výboj zanikne. Oblast C-E lze popsat Townsendovou teorií. Tato teorie lze bezesporu uplatnit v prvním úseku křivky. Lavinovitě zde přibývá koncentrace elektronů. Každý nový elektron, který vzniká, přispívá a podporuje další nárazovou ionizaci. Lavinový proces nezpůsobuje nestability plynného izolantu a nedochází tak při tomto nesamostatném výboji k přeskoku mezi elektrodami. V druhé části, rozmezí D-E, již dochází k rozporu mezi teorií a praktickým experimentálním měřením. Prudký nárůst proudu je přičítán kladným iontům mezi

elektrodami. Působením vnějšího pole kladné ionty putují ke katodě a vyvolávají emisi elektronů na jejím povrchu.[3]



2.4 Celková v-a charakteristika plynného izolantu do přeskoku[3]

Počáteční napětí výboje se nazývá významná hodnota daného uspořádání, při které z nesamostatného výboje vzniká samostatný. U homogenních polí se přeskokové napětí rovná počátečnímu napětí výboje. Přeskok přichází právě ve chvíli, kdy je dosaženo mezní hodnoty. Pro nehomogenní pole se za počáteční napětí samostatného výboje považuje okamžik, kdy bude přítomna koróna. Po překročení jejího zapalovacího napětí již není třeba ionizačního činidla. V závislosti na okolních podmínkách může koróna při určitém napětí zapalovat a vzápětí se zhášet. S ohledem na čas se prostor mezi elektrodami může ionizovat a může dojít k přeskoku i bez zvýšení napětí. Samostatné výboje E - G z Obr. 2.4 jsou tedy spuštěny jedním zdrojem. Napětí na svorkách musí být právě takové, aby stačilo na zapálení samostatného výboje. Vytvoří se a uvedou tak do pohybu volné nosiče náboje – základ pro doutnavý výboj a následný přeskok.[2]

V plynech mohou být přítomny i ionty záporné. Vznikají tím, že neutrální molekuly plynů zachytávají elektrony. Inertní plyny a dusík mají tu vlastnost, že vůbec netvoří záporné ionty. V kyslíku ale i ve vzduchu se tvoří jen záporných iontů jen velmi málo. Naopak elektronegativní plyny jsou schopny zachytit největší množství elektronů. Neutrální částice zrekombinují do záporných iontů. Známým zástupcem elektronegativních plynů je SF<sub>6</sub>. Zachycené elektrony se již nemohou účastnit ionizačního procesu a záporné ionty mají malou pohyblivost. Při použití elektronegativního plynu jako izolačního média je tedy při stejném uspořádání elektrod a stejných vnějších podmínkách nutno zvýšit přiložené napětí aby došlo k přeskoku např. oproti elektrodám obklopených vzduchovou izolací.

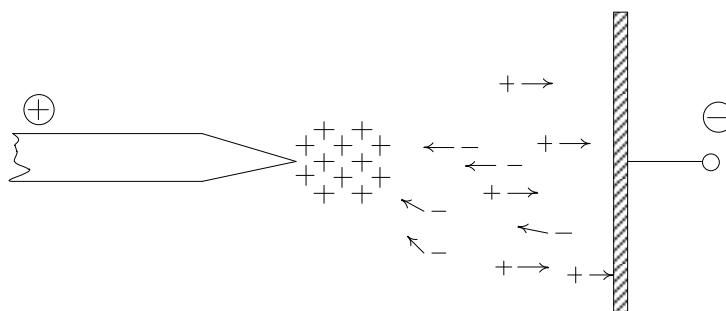
Plyny používané jako izolanty v elektrotechnice charakterizuje zejména ukazatel tzv. poměrná elektrická pevnost. Jedná se o elektrickou pevnost vztaženou ke vzduchu při stejném tlaku, vzdálenosti, tvaru elektroda a vůbec všech podmínkách které již byli v práci uvedeny. Tab. 1 uvádí tyto relativní hodnoty některých významných plynných izolantů[14]:

Tab. 1 Elektrická pevnost vybraných plynných dielektrik[14]

Plyn	Chemický vzorec	Relativní elektrická pevnost
Vzduch	směs	1
Dusík	N <sub>2</sub>	1
Vodík	H <sub>2</sub>	0,6
Kysličník uhlíčitý	CO <sub>2</sub>	0,9
Hexafluóretan	C <sub>2</sub> F <sub>6</sub>	1,5 - 1,8
Hexafluorid síry	SF <sub>6</sub>	2,3 - 2,5

### 2.3.2 Výboje ve značně nehomogenním poli

Silně nehomogenní pole lze dobře demonstrovat na elektrodovém uspořádání hrot - deska ve vzduchu. Obrázek 2.5 znázorňuje rozložení prostorového náboje na tomto uspořádání. V těchto polích se vyskytuje koróna, která je již popsána v kapitole částečných výbojů. V místech, kde je elektrické pole příliš slabé na to, aby vytvořilo lavinu, dochází pouze k částečným výbojové činnosti. Výboj přiléhá k elektrodám a je charakterizovaný slabě svítící vrstvou s akustickým šumem či praskáním. Situace se mění v případě, že se okolí vlivem trvání koróny ionizuje a dojde k přeskoku v rámci teorie strimérů a lídrů nebo se skokově zvýší intenzita elektrického pole na mez pro výstavbu jiskry popřípadě oblouku vedoucího k přeskoku.[3][9]



2.5 Rozložení prostorového náboje v silně nehomogenním poli[1]

Pro pochopení dějů v nehomogenním poli je nutné znát teorii strimérů a lídrů. Pojem strimér je v literatuře [1] vysvětlen následovně: „Z pokusů vyplynulo, že při dostatečně velkém poměru  $E/p$ , když lavina proběhla takovou vzdáleností  $x$ , že  $\alpha x$  nabylo hodnoty 18 až 20, vyzrazil do čela laviny výbojový kanál k anodě a ke katodě a šířil se asi desetkrát větší

rychlostí než původní lavina. Stalo se to v místě, v němž intenzita superponovaného elektrického pole prostorového náboje elektronů v čele laviny dosáhla intenzity vnějšího homogenního pole.“ Kanál směřující ke katodě vyzařoval namodralé světélkování (pozorovatelné ve tmě). Podle tohoto charakteristického světélkování se jev nazývá „streamer“; přejaté pojmenování je strimér. Během děje při zvyšování napětí se místo, kde lavina přecházející ve strimér, posouvá směrem ke katodě.[1]

Délka a teplota striméru je závislá na vzdálenosti elektrod. Jeho teplota je přibližně 3000 °C. Teplota podél striméru není stejná. Na začátku striméru se uplatní malá intenzita pole. To zapříčiní, že na jeho konci je intenzita největší. Toto rozložení podpoří vytváření nových strimerů a dojde k prodloužení původního kanálu. Spolu s tímto jevem se zvyšuje teplota vlivem průtoku elektronů. Vzniká tedy silně ionizovaný kanálový výboj zvaný líder. Od kladné elektrody putuje líder souvisle, z elektrody se zápornou polaritou v jednotlivých skocích.[1]

### 2.3.3 Vliv polarity na elektrickou pevnost vzduchu

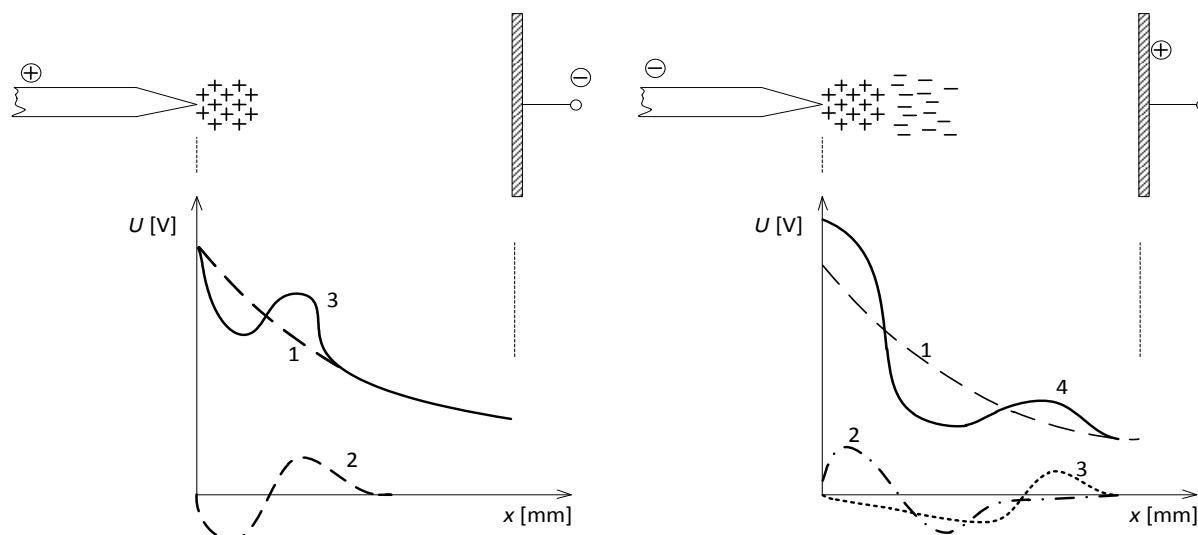
Vliv polarity je uplatněn v případě nehomogenního pole. Intenzita elektrického pole není podél doskoku stejná jako v případě pole homogenního. Vliv polarity lze demonstrovat na příkladu uspořádání elektrod hrot - deska s plynným dielektrickým prostředím. Největší intenzita pole je soustředěna v okolí ostrých hran a výčnělků (v tomto případě hrotová elektroda) a směrem k desce tato intenzita klesá. Při zvyšování napětí na jiskřišti dochází k ionizaci ve vzduchu, v první fázi v omezeném prostoru v okolí hrotu je překročeno počáteční napětí zapálení koróny. Při dalším zvýšení napětí dojde k ionizaci na celé délce doskoku a dochází k přeskoku jiskry mezi elektrodami.[8]

Koróna se v homogenním poli nevyskytuje, naráz se dosáhne kritické intenzity pro výstavbu jiskrového výboje a rovnou dochází k přeskoku mezi elektrodami.

Vliv polarity je možné demonstrovat na elektrodových uspořádáních hrot-deska, kdy v prvním případě je hrot pod kladným napětím a deska má zápornou polaritu. Hlavní předpoklad že takovéto napětí na elektrodách je dostatečně velké, aby začalo docházet k nárazové ionizaci. V této fázi se objeví několik volných elektronů, které putují směrem k hrotu formou lavin. Volné elektrony mají několikanásobně větší rychlost než kladné ionty vlivem své vyšší hmoty. V blízkosti hrotu se tak objeví kladný objemový náboj. Na Obr. Obr. 2.6 je patrné rozložení intenzit elektrického pole. Křivka intenzity el. pole označená jako (1) je způsobená vnějším zdrojem, intenzita objemového náboje (2) a výsledná křivka intenzity (3). Tento nakumulovaný kladný objemový náboj snižuje intenzity v oblasti okolí hrotu,



naopak po celém zbytku prostoru mezi elektrodami je patrné zvýšení této intenzity. Díky zmenšení intenzity v oblasti hrotu je zabráněno vzniku dalších lavin a výboj uhasíná. Teprve až v případě, že se objemový kladný náboj více přiblíží směrem k záporné desce, obnovují se podmínky k vzniku dalších výbojů. Proud korónou a má pulzní charakter.[8]



Obr. 2.6 Vliv polarity na rozložení prostorového náboje[8]

Jiný mechanismus výstavby náboje lze pozorovat na obrázku při uspořádání záporný hrot - kladná deska. Rozložení intenzity elektrického pole je až do doby vzniku ionizace stejné. Laviny elektronů, jako v předchozím případě, vznikají při stejném napětí. Jejich směr pohybu je však opačný, pohybují se od hrotu směrem k desce. Pohyb elektronů oproti kladným iontům je rychlejší. Zanechávají za sebou kladný prostorový náboj (kladné ionty). Svou rychlostí a pohybem elektrony opustí oblast velké intenzity elektrického pole a postupně tak ztrácí svojí rychlost. Většina z nich je zachycena neutrálními molekulami. Dochází ke vzniku těžkých záporných iontů, tedy záporného objemového náboje. Výsledný objemový náboj má při uspořádání s hrotem pod kladným napětím složitější strukturu. Prostorový náboj kladných iontů, obklopující záporný hrot zapříčiní značné zvýšení intenzity tohoto prostoru. Ionizace způsobí velký nárůst nábojů v okolí ostře zakřivené elektrody; koróna se projeví velmi intenzivně. Zvyšuje se i koncentrace záporných iontů; tím zároveň i klesá intenzita v okolí hrotu a výboje ustávají. K obnovení podmínek ionizace dochází až s dostatečným přiblížením záporného prostorového náboje směrem k desce. I v tomto případě má výboj korónou ve vzduchové izolaci pulzní charakter.[8]

Uspořádání se „záporným hrotem“ brání jeho objemový náboj rozvinutí v jiskru podél celého doskoku a zvyšuje tím průrazné napětí uspořádání. Hodnota přeskokových napětí je vyšší než v případě hrotu s přiloženým kladným napětím.[8]

### 3 Měření částečných výbojů se zaměřením na jev koróny

Praktickou částí práce experimentální měření částečných výbojů jak v otevřeném tak v uzavřeném objemu (nádobě) při přiloženém střídavém napětí o průmyslovém kmitočtu 50 Hz. V teoretické části práce již bylo popsáno, kde a za jakých okolností neúplné výboje vznikají. Práce měřením zjišťuje na jakých elektrodách, za jakých vnějších podmínek a jak intenzivní částečné výboje jsou. Práce potvrzuje fyzikální principy již popsané a poukazuje na jevy zjištěné při experimentálním měření.

Práce byla zadána ve v souvislosti s probíhajícím výzkumem, který již několik let katedra *KEE* provádí pro mezinárodní elektrotechnickou společnost.[19] Práce byla zadána z podmětu již naměřených dat a dává si za cíl prozkoumání těchto jevů; dává případné návrhy k dalšímu rozvoji a výzkumu v odvětví měření částečných výbojů. Nádoba, která je nedílnou součástí pro měření částečných výbojů, je v laboratoři pouze jedna, nemůže tedy probíhat více měření tohoto rázu najednou.

Všechna měření potřebná k zpracování práce probíhala po dobu deseti dnů v laboratořích Katedry Elektroenergetiky a Ekologie Západočeské univerzity v Plzni. Všechno vybavení potřebné pro samotné experimenty bylo přestěhováno do malé laboratoře částečných výbojů.

Obecně platí, že se částečné výboje v plynném izolantu objevují na velmi zakřivených elektrodách při tlaku blízkých atmosférickému. Intenzita elektrického pole je podél takto uspořádaných elektrod (např. hrot – kulová elektroda) nerovnoměrně rozložena; při přiložení střídavého napětí na elektrodové uspořádání se maximální intenzita elektrického pole objeví v okolí hrotové elektrody a postupně ke kulové elektrodě se intenzita pole snižuje. Je tedy zřetelné, že maximální výbojová činnost může být zaznamenána měřicím přístrojem právě v silně nehomogenním poli.

Výsledky této práce potvrdily, že v homogenních elektrických polích se částečné výboje nevyskytují nebo jsou jen velmi malé a trvají příliš krátký časový okamžik. Dalším případem, kdy jev částečných výbojů přestává být patrný, je při elektrodové uspořádání v uzavřené nádobě za vyšších tlaků (např. při 1,5 násobku tlaku atmosférického). Experimentálním měřením v laboratoři jsem se tedy pokoušel najít hranici jednotlivých uspořádání elektrod, kde ještě má smysl měřit a pozorovat jev částečných výbojů a při jakých podmínkách jev částečného výboje ustává. Rozmezí napětí mezi hodnotou zapálení výboje a přeskokem je u některých uspořádání velmi malé.

V uzavřené nádobě jsou poměry jiné než v nádobě s otevřeným víkem. Regenerace plynu a deionizace vzduchu probíhá pomaleji, dále pak nedochází k cirkulaci a výměně vzduchu v nádobě. To má za následek dřívější přeskok mezi elektrodami.

Hodnoty napětí uvedené v práci jsou přepočteny z efektivních na vrcholové (měřič napětí v laboratoři VVN zobrazuje efektivní hodnoty). V grafech a tabulkách jsou proto hodnoty napětí zvoleny se zdánlivě nelogickými hodnotami; přepočet na vrcholové hodnoty je nutný a běžně se používá v technické praxi.

Pro záznam bylo použito měřicího systému od firmy Power Diagnostix. Jelikož je přístroj náchylný na přepětové elektrické signály, bylo nutné nejprve provést měření na elektrodových uspořádání až do fáze úplného přeskoku.

### 3.1 Popis měřicího systému Power Diagnostix

Výbojovou činnost zkoumaného izolantu doprovází mnoho fyzikálních dějů elektrické a neelektrické povahy. Nejčastěji se sledují proudové elektrické impulzy, ale dále také vysokofrekvenční elektromagnetická pole jimi generovaná, lze detekovat vznik chemických zplodin výboje, světelné záření ve spektru ultrafialovém i viditelném, tepelný ohřev izolantu i okolí nebo např. zvukové projevy v pásmu slyšitelném a ultrazvukovém.[2][6]



Obr 3.1 Digitální měřicí systém pro záznam částečných výbojů společnosti Power Diagnostix[6]

Digitální měřicí systémy se řadí mezi nejmodernější a nejpoužívanější metody pro vyhodnocování aktivity částečných výbojů. Mezi ně lze řadit i digitální měřicí systém společnosti Power Diagnostix (Obr 3.1), který byl použit na experimentální měření na elektrodových uspořádání. Skrze uživatelské grafické rozhraní moderních digitálních měřicích

celků („virtuální zařízení“) lze snadno nastavit, ovládat, monitorovat a zaznamenávat výbojovou činnost ve zkoušeném objektu. [6][17]

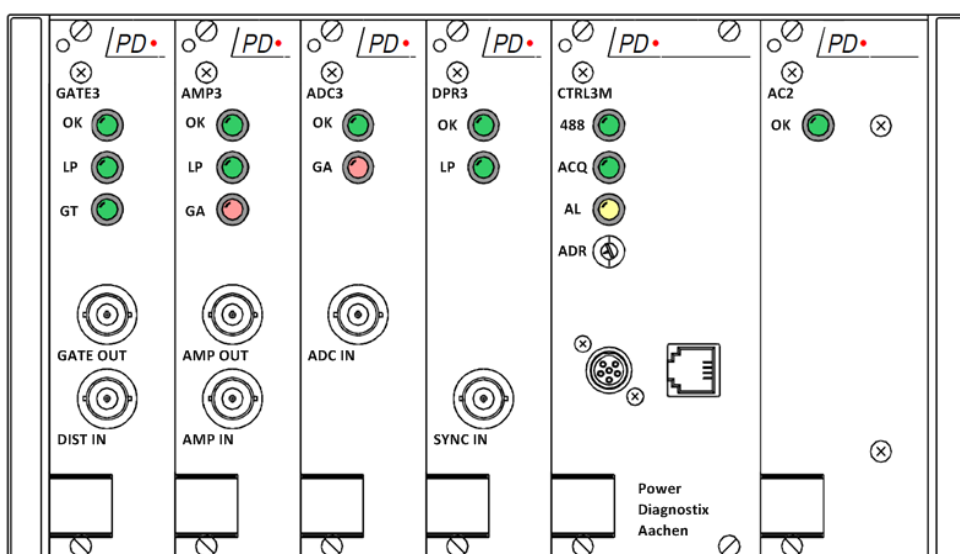
Vyhodnocování systémem Power Diagnostix probíhá pomocí *A/D* převodu přímých elektrických signálů. Tyto metody zaznamenávají na měřeném objektu proudové impulzy, které provázejí vznik částečných výbojů. Měřený analogový elektrický signál je získán pomocí snímací impedance, proběhne jeho zesílení a pak převod do digitální podoby. V binární podobě jsou signály rozříděny a zařazeny do grafického vyobrazení dle velikosti jednotlivých pulzů, fáze výskytu vůči zkušebnímu napětí a dle jejich četnosti. Tyto vlastnosti výbojů lze sledovat souhrnně či zobrazit jednotlivé výbojové projevy zvlášť. Ovládací software může být nainstalován na jakémkoliv běžném osobním počítači. Výhodou digitálního záznamu je uchovávání naměřených dat, možnosti pokročilé práce s nimi a jejich vyhodnocení.[6]

### 3.1.1 Celky systému Power Diagnostix

Sestava částí měřicího systému se skládá z digitálního měřicího detektoru, aktivních předzesilovačů RPA1 a HST1, vazební jednotky a generátoru kalibračních pulzů. Jednotlivé části a jejich funkce v měřicím obvodu jsou popsány dále v práci.

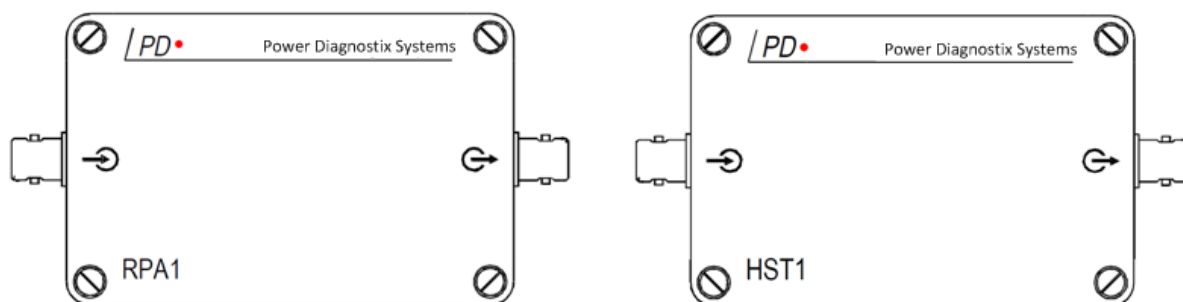
#### Digitální měřicí detektor výbojů

Hlavní částí celého systému je analogově-digitální detektor částečných výbojů. Je zkonstruován na základě modulárního konceptu; jeho jednotky se dají mezi sebou propojovat a vzájemně spolupracují. Znázornění čelního panelu a je na *Obr. 3.2*.



Obr. 3.2 Čelní kontrolní panel detektoru částečných výbojů[6]

První modul přístroje je označený jako AC2 (popis zprava do leva). Je to segment detektoru sloužící pro napájení. Vedle něho je řídicí modul CTRL3; komunikuje s počítačem pomocí GPIB rozhraní či sériového rozhraní. Logické obvody referenční časové a fázové základny, vícekanálovou paměť a obvody k měření přiloženého zkušebnímu napětí jsou součástí bloku přístroje s pojmenováním DPR3. Hlavní vstupní jednotkou pro měřený signál je segment APM3; je hlavním zesilovacím modulem. APM3 má volitelnou úroveň zisku i možnost výběru pásmového filtru. Jedná se o širokopásmový měřicí systém. Modul je v zapojení napájen ještě předzesilovačem RPA1 (viz tato kapitola níže). Analogově digitální převod je uskutečněn v ADC3 části detektoru. Před měřením je důležité vhodně nastavit tento převodník; má vliv na měřené výsledky a jejich vyhodnocování. Obvod umístěný v modulu GATE3 (hradicí modul) zabraňuje zkreslování záznamu výbojové činnosti okolním rušením. Pro účely experimentálního měření v laboratoři k tomu určené je tento modul nepotřebný a lze jej vyřadit z měřicího systému.[6][17]



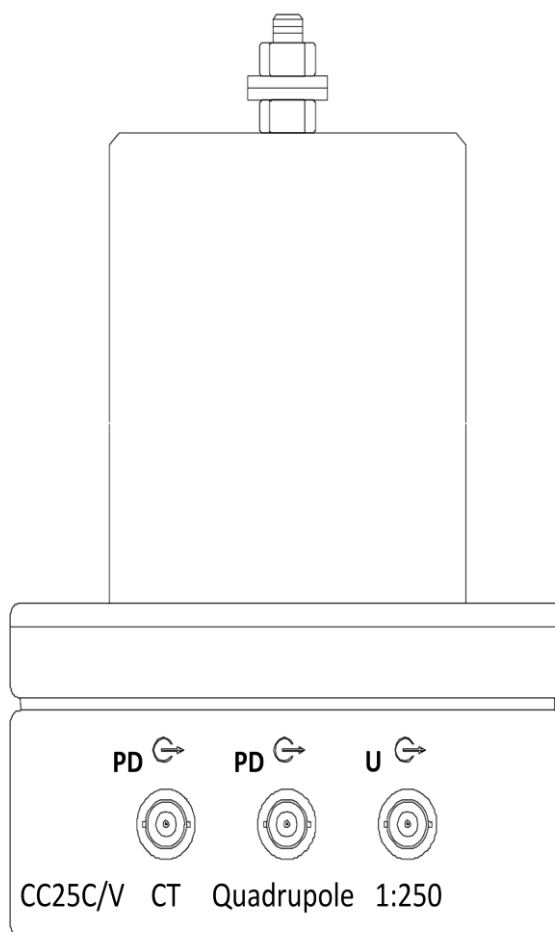
Obr. 3.3 Předzesilovače RPA1 a HST1 s aktivní činností [6]

Předzesilovač RPA1 (Obr. 3.3) impedančně přizpůsobuje cestu požadovaného signálu, zamezuje zatížení snímací impedance. Šířka pásma tohoto předzesilovače je větší než šířka pásma samotného vstupu AMP3. Druhým předzesilovačem sestavy systému Power Diagnostix je HST1 (taktéž na Obr. 3.3). Jako externí aktivní předzesilovač přivádí obraz napětí z kapacitního děliče. Signál je brán z nízkonapěťové strany z měřicí impedance a je přiváděn do synchronizačního vstupu (SYNC IN) modulu DPR3. Kapacitní zátěž je v poměru k hodnotám kapacitního děliče zanedbatelná, nedojde tedy k žádnému zkreslení.[17]

### Vazební jednotka

Signál, který se vyskytuje v obvodovém uspořádání pro měření částečných výbojů je snímán pomocí vazební jednotky CC25C/V (Obr. 3.4). Základními částmi jednotky je vazební kapacita  $C_k = 1 \text{ nF}$  a snímací impedance. Vazební kapacita a snímací impedance

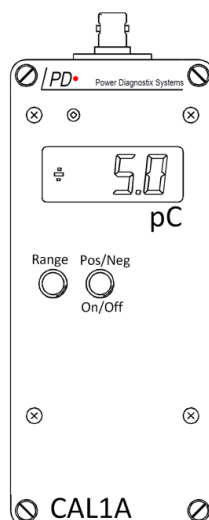
jsou sériově spojeny. Tvoří zároveň kapacitní napěťový dělič v poměru 1:250. K účelu filtrování nežádoucích proudů je v měřicí impedanci zapojena indukčnost. Přímo z měřicí impedance vychází požadovaný signál vypovídající o aktivitě výbojové činnosti.[17]



Obr. 3.4 Vazební jednotky CC25C/V[6]

### Generátor kalibračních pulzů

Kalibrátor je znázorněn na Obr. 3.5, slouží k nastavení programové části systému. Obdélníkové pulzy se přivádí na kalibrační kondenzátor; jsou synchronizovány pomocí fotocitlivé diody. Generátor kalibračních pulzů je schopen vyrobit náboj o velikosti 1, 2, 5, 10, 20 a 100 pC volitelné polarity. Při měření byla použita kalibrace vždy nejprve v řádu jednotek pC na kalibraci pozadí výbojové činnosti laboratoře, dále bylo používáno kalibrační hodnoty +100 pC jako největší možné hodnoty náboje (vždy s kladnou polaritou). Volba hodnoty kalibračního pulzu závisí na předpokládané hodnotě výbojů, které mají být změřeny bez zbytečné odchylky.[6]



Obr. 3.5 Generátor kalibračních pulzů CAL1A[6]

### 3.1.2 Důležité parametry pro nastavení měřicího systému Power Diagnostix

Před měřením je nutné celý systém nastavit. Tuto část je dobré nepodcenit a předem se seznámit se všemi parametry, které lze pomocí uživatelského rozhraní měnit. Tato variabilita dává uživateli značné možnosti v oblasti zkoumání částečných výbojů. Naopak při opomenutí a nesprávné volbě parametrů mohou být výsledky z měření nepoužitelné pro jejich zpracování a následné vyhodnocení.[17][6]

Důležité je správně zvolit hodnoty předzesilovače a hlavního zesilovače. Kombinaci je nutné zvolit tak, aby výsledný signál byl zesílen do té míry, aby bylo možné vysledovat charakter výbojů v grafické podobě na záznamu. Při velkém zesílení dojde i k zesílení vstupního šumu, tedy nežádoucího rušení. Výrobce proto vypracoval vhodné kombinace nastavení obou zesilovačů, aby nedocházelo k nepřesnostem v měření.[6][17]

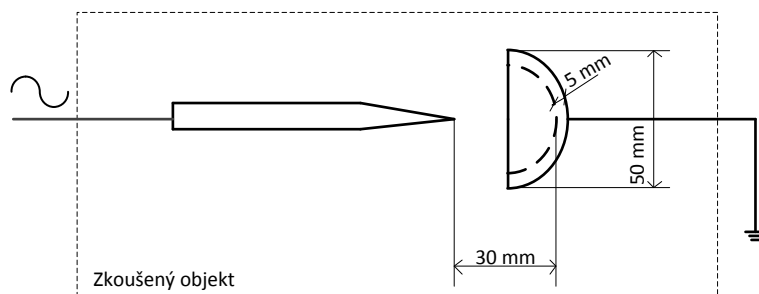
Další volitelnou hodnotou je tzv. mrtvá doba („Dead Time“). Mrtvá doba je časový úsek vyhrazený pro zpracování jednoho impulsu částečného výboje. Takto zaznamenaný impuls je pak převáděn z analogové do digitální podoby. Velikost mrtvé doby by měla být volena co nejmenší; aby došlo k záznamům všech jednotlivých pulzů, avšak dostatečně velká, aby se předešlo mnohačetným záznamům pulzu jediného[17].

Spouštěcí prahová úroveň („Low Level Discrimination“ neboli *LLD*) je spínací hodnotou pro záznam výbojů při určité úrovni velikosti pulzů. Tato diskriminace pulzů probíhá u kladných ale i u záporných nerozdílně. Pokud je *LLD* vhodně zvoleno, snižuje pak celkovou mrtvou dobu. Tato úroveň se zadává v procentech a vypočítává se vždy z rozsahu (rozsah je dán nastavení kombinace předzesilovače a zesilovače) aktuálně měřeného.

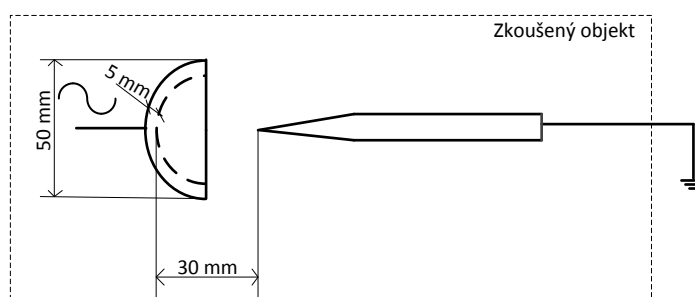
Možností nastavení je mnohem více, avšak pro tato měření plně postačilo brát v úvahu parametry, které byly zmíněné v této kapitole. Další parametry jsou uvedeny v literatuře [6].

### 3.2 Elektrodotová uspořádání použitá při měřeních

Koróna je druhem částečných výbojů, má specifický tvar charakteristik. První měření si dávalo za cíl zmapovat vývoj v celém intervalu od hladiny zapálení ČV do hladiny napětí těsně před přeskokem. Záznamy byly pořízeny na modelu koróny. Při jedné sérii experimentálního měření bylo napětí přiloženo na hrotovou elektrodu (Obr. 3.6). Další záznamy byly získány na stejném elektrodotovém uspořádání, nýbrž napětí bylo přiváděno na miskovou elektrodu (Obr. 3.7). Pořízené záznamy jsou v příloze C. Toto uspořádání je v odhledu teorie elektrického pole považováno za silně nehomogenní.



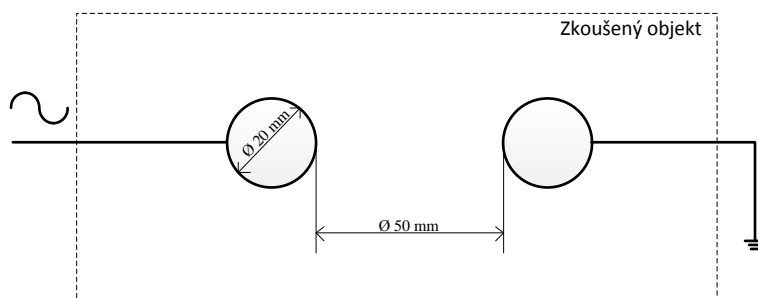
Obr. 3.6 Schematické znázornění elektrod hrot-miska; pohled z půdorysu



3.7 Schematické znázornění miska-hrot; pohled z půdorysu

Druhým typem elektrod byly elektrody kulové. Zkoušený objekt sestával z dvou kulových elektrod. Jelikož bylo předmětem práce sledovat vliv materiálu na vznik ČV, byly naměřeny hodnoty nejprve elektrod hliníkových, následně měděných a v poslední řadě elektrod vyrobených z nerezové oceli. Všechny zkušební elektrody mají stejný průměr; schéma rozložení kulových elektrod je znázorněno na Obr. 3.8. Z hlediska homogenity pole nelze toto elektrodotové uspořádání zařadit jako silně nehomogenní či homogenní. Elektrody byly umístěny uvnitř nádoby určené pro vysokonapěťové testy.





Obr. 3.8 Schéma kulových elektrod

### 3.3 Měření přeskokového napětí

Práce si klade za cíl měření a vyhodnocení částečných výbojů na různých druzích elektrodových uspořádání a při změnách některých parametrů (např. při otevřené a uzavřené nádobě). Částečné výboje jsou zaznamenávány postupně při zvyšování napětí až do prahové hodnoty.

Přesto, že měření do přeskoku není cílem této práce, bylo nutné zjistit při jakých napětích u zvolených elektrodových uspořádání a daných podmínek s tím souvisejících k přeskoku dochází. Digitální přístroj určený k měření částečných výbojů je citlivé zařízení, které není dobré přetěžovat. Dle výrobce (manuál Power Diagnostix [6]) přístroj pro tato citlivá měření vydrží vysokoenergetický signál spojený s přeskokem a pomocí ochrany zabrání zničení, avšak je lepší se přeskokům při měření  $\dot{C}V$  vyhnout.

#### 3.3.1 Zapojení pro měření do přeskoku

Obvod pro měření do přeskoku je znázorněn na obrázku *Obr 3.10* a skládá se z vysokonapěťové bezvýbojového zdroje, ochranného odporu a samotného zkušebnímu objektu.

Bezvýbojový vysokonapěťový zdroj střídavého zkušebnímu napětí pracuje v rozmezí hodnot  $150$  ( $188$ )  $kV$ ,  $10$   $kVa$  při frekvenci  $50$   $Hz$ . Zdroj napětí obsahuje autotransformátor spolupracující s vysokonapěťovým transformátorem (*Obr 3.9*). Tento zdroj nevykazuje žádnou výbojovou činnost; neruší tedy citlivá měření  $\dot{C}V$ .

Zdroj byl použit pro měření přeskokových napětí i pro testy v rámci zkoumání částečných výbojů.



Obr 3.9 Vysokonapěťový zdroj zkušebního napětí[17]

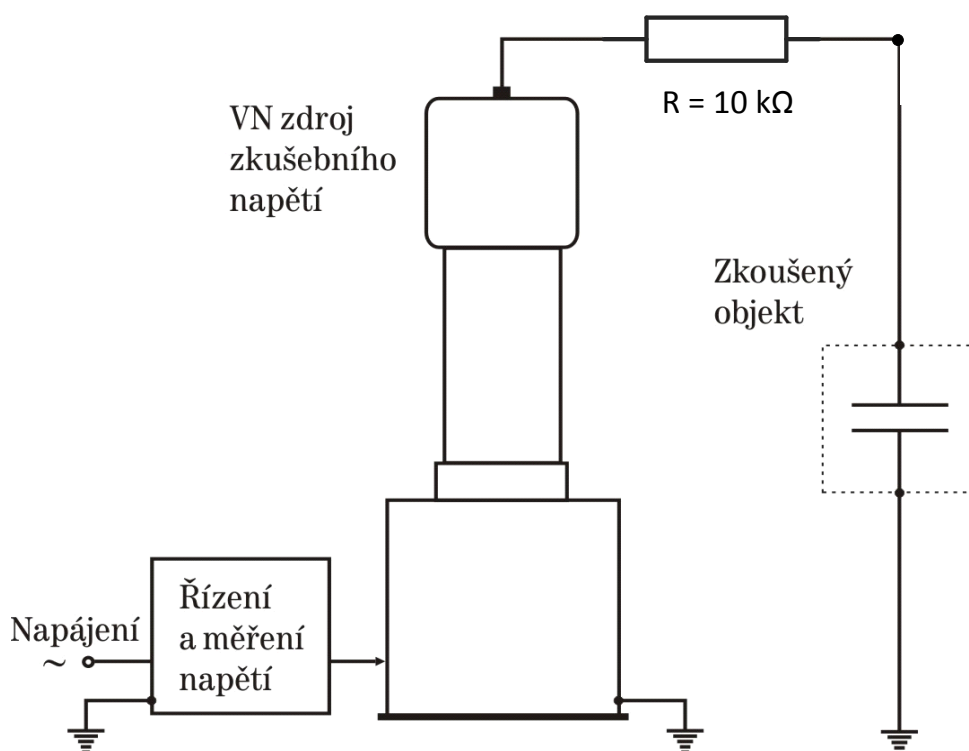
### Zkoušený objekt

Zkoušený objekt ve schématu zapojení *Obr 3.10* představuje železná nádoba (kromě měření modelu koróny; ten je měřen bez nádoby). Střídavé, stejnosměrné či rázové impulzy jsou přiváděny dovnitř nádoby (*příloha D*) skrze VVN průchodku. Elektrody byly ve všech případech měření přeskokového napětí umístěny uvnitř nádoby pomocí závitů. Jedna z elektrod instalovaných v této nádobě (uzemněná elektroda) je připojena na pohyblivém přívodu; tak lze mezi elektrodami nastavit požadovanou vzdálenost.

V čelní straně nádoby je montážní otvor pro změnu a uchycení elektrod. Otvor lze uzavřít těsnícím víkem pro případy měření v uzavřené nádobě. Pomocí vývěvy lze také z nádoby odčerpat vzduch či vytvořit tlak dle požadavků na měření. Nádobu je možné napustit kalibračním plynem.

Atmosferický vzduch je tvořen nejen dusíkem (78,09 % z objemu) a kyslíkem, (20,95% z objemu) ale i dalšími příměsmi jako například argon, oxid uhličitý, neon, helium a další objemově méně zastoupené prvky. V laboratořích používá katedra pro sjednocování podmínek měření dvousložkový kalibrační plyn. Vlastnosti tohoto plynu jsou blízké vzduchu. Jeho složení je 95/5 (95 % N / 5 % O).[20]

Po instalaci elektrod do nádoby a připojení všech komponentů dle *Obr 3.10* můžeme přistoupit k samotnému měření. Laboratoř VVN, ve kterých byla měření provedena, nejsou vybaveny automatickým „najižděním“ napětí na požadovanou hodnotu. Aby byly podmínky při následných měřeních co nejvíce stejné, je třeba zvyšovat napětí konstantně a plynule. Příliš rychlým nárůstem napětí vzniká rušení od regulace, které přímo ovlivňují měřené výsledky.



Obr. 3.10 Obvod pro měření přeskového napětí

Nejprve se zvyšuje intenzita elektrického pole do doby viditelných či slyšitelných projevů částečných výbojů. Někdy je těžké určit přesnou hodnotu zapalovacího napětí. Tato hodnota se zaznamená (pokud tedy částečné výboje vůbec nastanou). Dále se napětí zvyšuje až do přeskoku, přičemž je nutné sledovat ukazatel s hodnotou efektivního napětí na měřicím panelu. Po dosažení přeskoku byla zaznamenána napětí, při kterých k nim došlo. Aby měření mělo výpovědní hodnotu, bylo potřeba udělat na každém uspořádání minimálně 15 přeskoků. Výsledná hodnota se pak zprůměruje či jinak statisticky vyhodnotí.

### 3.3.2 Změřené hodnoty přeskových napětí

Prvním měřením se zjišťovaly hodnoty, při kterých dochází k přeskoku. I když toto měření elektrické pevnosti není hlavním cílem diplomové práce, bylo nutné tyto měření provést. Podmínkou měření samotných částečných výbojů na analogově/digitálním měřicím přístroji je zabránění většině přeskoků, které mohou nastat.

Prvním elektrodové uspořádání, které bylo do obvodu připojeno jako zkoušený objekt byl hrot („pod napětím“) - miska (uzemněna) které je na Obr. 3.6. Tyto elektrody nebyly instalovány uvnitř nádoby. Elektrody jsou již připevněny na konstrukčně-izolačním materiálu.

Hodnoty napětí, kdy došlo k přeskoku, jsou uvedeny v příloze A-Tab.-a). Parametry měření přeskokového napětí jsou uvedeny v Tab. 2.

Tab. 2 Parametry měření přeskokového napětí; Hrot-miska

Elektrody [mm]	Tlak [kPa]	Vzdálenost elektrod [mm]	Doba mezi měřeními přeskoků [s]
Hrot - miska	97,3	30	60

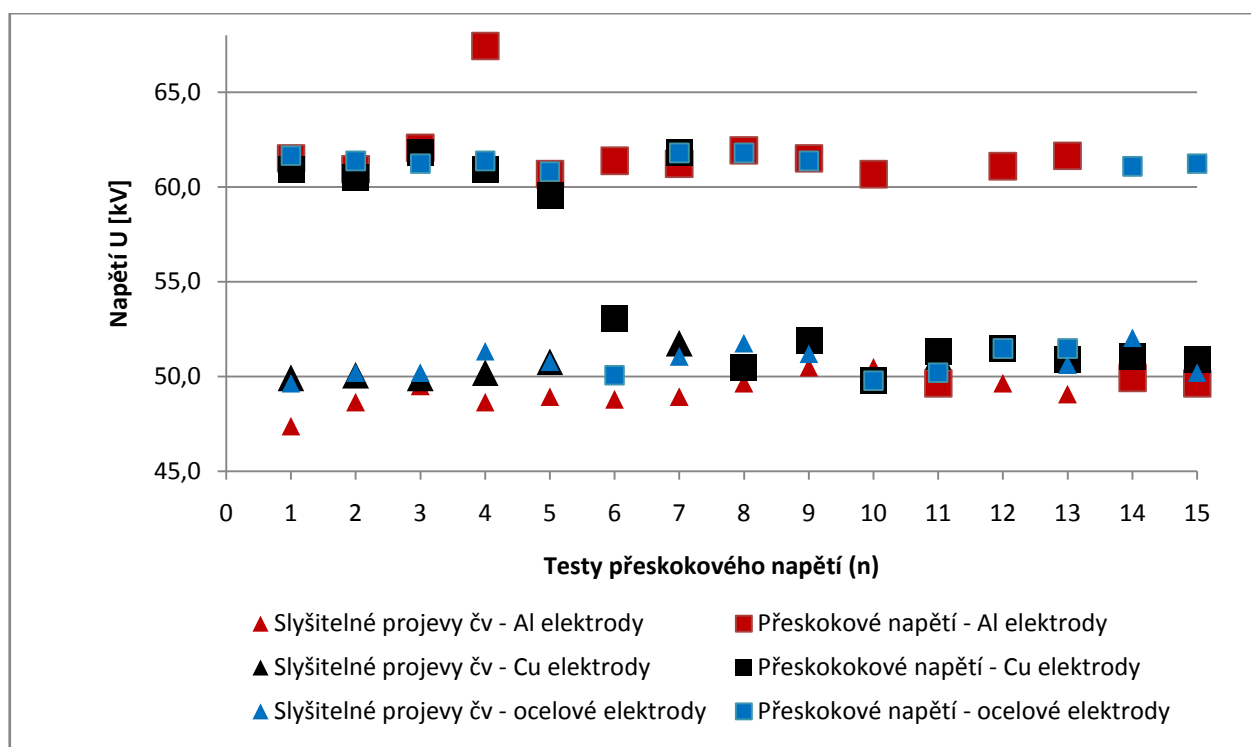
Další měření již proběhla v nádobě určené k vysokonapěťovým testům. Zkouškám byly podrobeny elektrody znázorněné na Obr. 3.6 v kap. 3.2. Tabulka b) naměřených hodnot je taktéž v příloze A. Při měření se sledovali dvě významné hladiny napětí; slyšitelné zapalovací napětí částečných výbojů a přeskokové napětí  $U_p$  byly v průběhu měření odečítány z digitálního měřicího voltmetru efektivních hodnot. Hodnoty zapalovacího napětí byly zaznamenány v tu chvíli, kdy došlo slyšitelnému projevu výbojů uvnitř nádoby; nelze tedy říci, že se jedná přímo o zapalovací napětí  $U_z$ . V tabulce Tab. 3 jsou uvedeny parametry, při kterých byly hodnoty pořízeny.

Tab. 3 Parametry měření přeskokového napětí; Koule - koule

Elektrody [mm]	Nádoba	Tlak [kPa]	Vzdálenost elektrod [mm]	Doba mezi měřeními přeskoků [s]
Ø 20 - Ø 20	otevřená	97,3	50	60

Hodnoty byly převedeny na napětí vrcholová. Grafické znázornění zapalovacích napětí a přeskoků je na Obr. 3.11.

Z grafické závislosti je patrné, že u hliníkových elektrod dochází k zapálení výbojů nejdříve ze všech zkoumaných elektrod různých materiálů. To je způsobeno s největší pravděpodobností jejich hrubším povrchem. K přeskoku dochází naopak (z hlediska ostatních materiálů při stejných měřicích podmínkách) v průměru při vyšších napětích. Elektrická pevnost hliníkových kulových elektrod je největší, ač jsou částečné výboje zapáleny dříve než u ostatních materiálů. Je pravděpodobné, že částečné (především korónové) výboje tedy zvyšují elektrickou pevnost. Rozdíl napětí mezi slyšitelným zapálením výboje a přeskokem je v průměru u Al elektrod nejvyšší z testovaných materiálů viz příloha A. Při testu (č. 11, 14, 15) přeskokového napětí došlo k samotnému přeskoku jiskry mezi elektrodami při výrazně nižším napětí. Tento děj bude pravděpodobně způsoben ionizací v prostoru nádoby z předchozích měření (testy č. 1-9) přesto, že čas mezi měřeními byl zvolen  $t = 60$  s. Pro měření částečných výbojů v následující kapitole bude brán zřetel vždy na hodnoty přeskokových napětí testů č. 1-5 aby byly proměřeny všechny napěťové hladiny výskytu ČV.



Obr. 3.11 Grafická závislost zapalovacího napětí a hodnot napětí při přeskoku

U měděných a ocelových elektrod byly stejné podmínky k měření, avšak při testech č. 6 – 15 docházelo častěji k přeskokům dříve (cca o 10 kV) než se předpokládalo.

Pro další výzkum těchto dějů bych doporučil zvýšit dobu mezi jednotlivými testy, je možné, že by tento jev, kdy dochází k přeskoku při nižších napětích, nenastával.

### 3.4 Měření částečných výbojů

Při měření částečných výbojů bylo pořízeno více než 200 záznamů. Měření byla koncipována tak, aby rozšířila poznatky získané výzkumem.

Všechna měřicí zařízení použitá k měření byla již kalibrována, proto postačí pouze kalibrace měřicího systému (kap. 3.4.2)

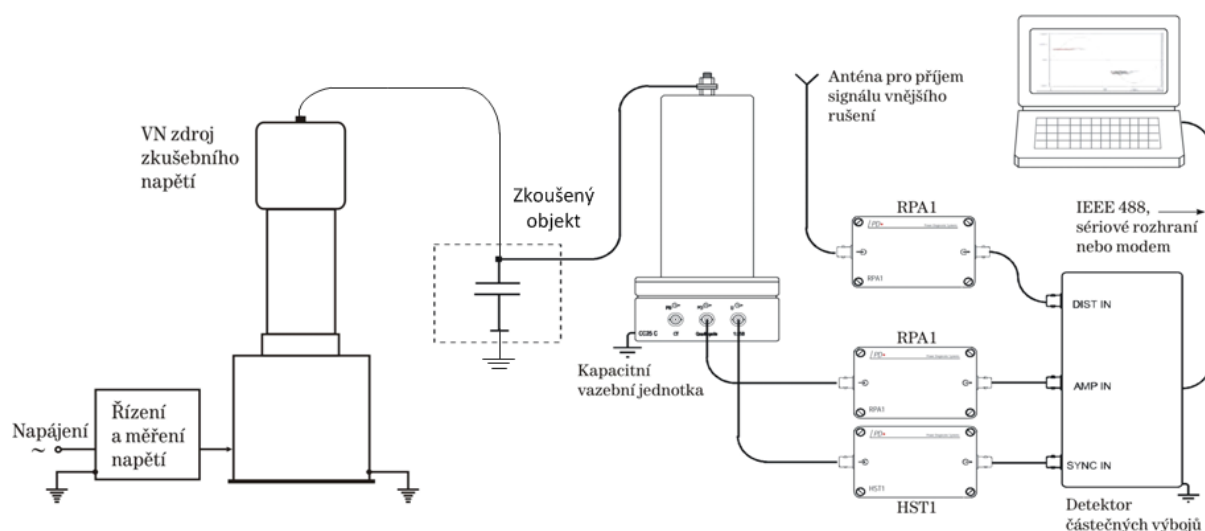
Po měření přeskokových napětí (kap. 3.3) následovalo měření částečných výbojů na modelu koróny. Již před samotným měřením se předpokládalo, že na tomto modelu bude koróna intenzivní. Měření poskytlo komplexnější představu o tak složitém a ne příliš prozkoumaném ději, kterým koróna je.

Typičtějším elektrodovým uspořádáním, více se blížícím praxi, jsou dvě stejně velké kulové elektrody o průměru 20 mm (Obr. 3.8). V této další části měření byl zkoumán vliv materiálu elektrod (Al, Cu a nerezová ocel) na vznik a chování koróny v otevřené nádobě, kdy jako izolant byl použit vzduch. Měřením se ukázalo, že nejsilnější koróna (dle parametru  $NQS$ ) vzniká na hliníkových a měděných elektrodách; pro další testování byly vybrány

hliníkové elektrody. Elektrody se zavřely do nádoby, nádoba se vyprázdnila pomocí vývěvy a její objem byl napuštěn kalibračním plynem (95 % dusík / 5 % kyslík) na hodnotu 150 kPa. Po změření záznamů při výše uvedeném tlaku se vždy plyn z nádoby částečně upustil a proběhlo další měření. Poslední záznamy pořízené s kalibračním plynem byly za stejného tlaku, jako je tlak atmosferický. Tlak v nádobě byl měřen digitálním měřicím přístrojem.

### 3.4.1 Zapojení pro měření částečných výbojů

Schéma zapojení k měření částečných výbojů je znázorněno na Obr. 3.12. Vlevo je vidět zdroj zkušební napětí spolu se zkoušeným objektem (popsány v kapitole 3.3.1), dále pak kapacitní vazební jednotka propojená přes předzesilovače do detektoru částečných výbojů (jednotlivé části popsány v kapitole 3.1.1). Pomocí rozhraní IEEE 488 pak analogově/digitální detektor komunikuje s počítačem.[17]



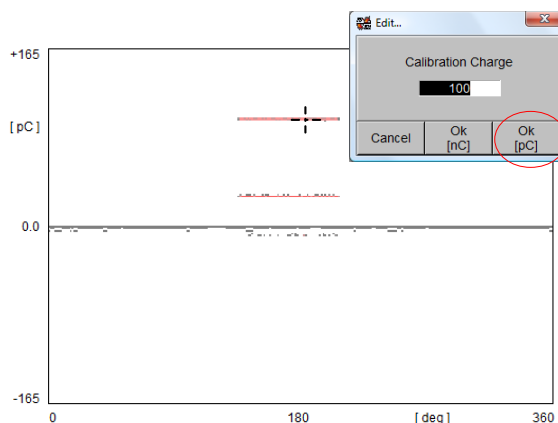
Obr 3.12 Schéma zapojení pro měření částečných výbojů[17]

### 3.4.2 Problematika kalibrace měřicího obvodu pro měření částečných výbojů

Kalibrací měřicího obvodu provádíme na obvodu bez napětí. Na vstup kapacitní vazební jednotky připojíme jeden vývod generátoru kalibračních pulzů a druhý připojíme na společné uzemnění celého obvodu. Jak již bylo zmíněno, přístroj určený ke kalibraci je schopen generovat pulzy velikosti 1, 2, 5, 10, 20 a 10 pC *kladné* i záporné polarity. Pro všechna měření bylo výhodné použít kalibrační pulz o velikost +100 pC; všechny sledované výboje byly ve velikosti 100 či více pC. Velikost kalibračních pulzů by měla být volena ve stejné velikosti, v jaké se přibližně budou pohybovat následné naměřené impulzy.

Po připojení a volbě +100 pC bylo zahájeno měření na PC po dobu minimálně 10 s bez napětí. Amplitudě zobrazeného kalibračního pulzu byla přiřazena předem známá

velikost. Před každou sérií měření je nutné provést kalibraci. Pulz přivedený na vazební jednotku překmitne, to vysvětluje nižší čáru na záznamu, která se nebere v potaz.



Obr. 3.13 Kalibrace měřicího systému

### Měření částečných výbojů pozadí laboratoře

Průběhy částečných výbojů na pozadí laboratoře po kalibraci jsou znázorněny na záznamech v příloze B. Z obrázků je patrné, že maximální naměřená velikost  $\check{C}V$  je 2 pC. Jak je vidět z Obr B - 3 i při napětí 78 kV je velikost impulzů částečných výbojů do hodnoty 2 pC. Pro všechna měření je hranice LLD nastavena na 2 % z rozsahu, tyto pulzy se na výsledném záznamu vůbec neprojeví.

### 3.4.3 Typické průběhy koróny, měření na modelu pro korónové výboje

Model, na kterém proběhla část měření, je na Obr. 3.14. Konstrukčním a zároveň izolačním materiálem modelu je pertinax v podobě U profilu. Na jeho bočních stranách jsou uchyceny měděné elektrody hrot a miska. Vzdálenost se nastavuje hrotovou elektrodou, která má na obvodu svého těla závit. Hrot lze po volbě vzdálenosti aretovat, aby nedocházelo k jeho posunutí vůči misce.



Obr. 3.14 Model pro měření korónových výbojů

Měření probíhalo tak, že nejprve byla nastavena vzdálenost mezi elektrodami. Ode dna misky ke špičce hrotu bylo nastaveno  $d = 3 \text{ cm}$ . Tato vzdálenost se při měření s tímto elektrodovým uspořádáním již neměnila. Jednotlivé záznamy byly měřeny po dobu 30 sekund v otevřeném objemu. Měření na modelu koróny proběhly během jednoho dne, není tedy nutná korekce teploty a tlaku pro následné srovnávání záznamů.

V rámci delšího času vůči periodě zkušebního napětí laboratorního zdroje (což lze při době měření  $t = 30 \text{ s}$  říci) si lze celou situaci přestavit tak, že např. 2 sekundy na elektrodě pod napětím bude kladná polarita a posléze 2 sekundy záporná polarita a polarity se tak nepřetržitě během měřicího času střídají. Tato úvaha je pouze teoretická. Tím se uplatní oba mechanismy vzniku objemového prostorového náboje viz kapitola 2.3.3. Výsledný objemový náboj má tak velmi složitou strukturu.

U tohoto uspořádání elektrod se předpokládá tvorba objemového náboje a projev koróny v oblasti hrotu. Nelze ale vyloučit, že bude vliv koróny uplatněn na miskové elektrodě vzhledem k jejímu tvaru jejich oblých konců.

### Testy s přiloženým napětím na hrotu a uzemněnou miskou

Pro první sérii testů bylo přivedeno střídavé napětí na hrotovou elektrodu a misková elektroda byla uzemněna. Již z předchozích měření je zřejmé, že k přeskokům dochází při napětí  $U_p = 28,9 \text{ kV}$ ; maximální hodnota, při které je možné měřit částečné výboje byla stanovena na  $25,5 \text{ kV}$ . Naměřené hodnoty jsou znázorněny v

Tab. 4.

Tabulka níže udává vrcholová napětí, kterým byl model částečných výbojů vystaven. Vzhledem k napětí byl zaznamenán počet (četnost) všech impulzů a počet impulzů přesahujících hodnotu  $6 \text{ pC}$  (odfiltrovány méně významné výboje nízkého náboje). Software Power Diagnostix dále umožňuje zjistit zvláště počet kladných a záporných částečných výbojů. Střední proud částečných výbojů je integrovanou veličinou, která je charakterizována jedinou hodnotou, a to velikostí středního proudu částečných výbojů. Dává komplexní představu o intenzitě výbojů v rámci jednoho změřeného záznamu. Rozsah měřicí osy je dán kombinací nastavení předzesilovače a hlavního zesilovače před samotným vstupem signálu do A/D převodníku. V rámci demonstrace tvarů změřených výbojů (příloha C – levá strana) bylo nutné hodnoty kombinace zesilovačů měnit dle předpokládané hodnoty měřeného náboje částečných výbojů. Z tohoto rozsahu se pak pomocí nastavené hodnoty  $LLD$  (v procentech) vypočte prahová hodnota, od které (platí pro obě polarity nerozdílně) budou částečné výboje



zaznamenávají. Při nastavení  $LLD = 2\%$  pro rozsah  $\pm 132\text{ pC}$  je prahová úroveň  $2,6\text{ pC}$ . Z grafického vyjádření

Tab. 4 na Obr. 3.15 je patrné, že pro srovnání z hlediska počtu záznamů ČV je možné použít jen ty hodnoty, které byly pořízeny měřením právě při stejném rozsahu měřicí osy (a tedy i při stejném nastavení hodnoty  $LLD$ ). Hodnota  $LLD$  nebyla při měření měněna záměrně; důležitým ukazatelem je taktéž významnost impulzů; měříme-li na rozsahu  $6,61\text{ nC}$ , díky  $LLD = 2\%$  získáme četnost pouze těch, které jsou větší nebo rovny hodnotě  $66\text{ pC}$ .

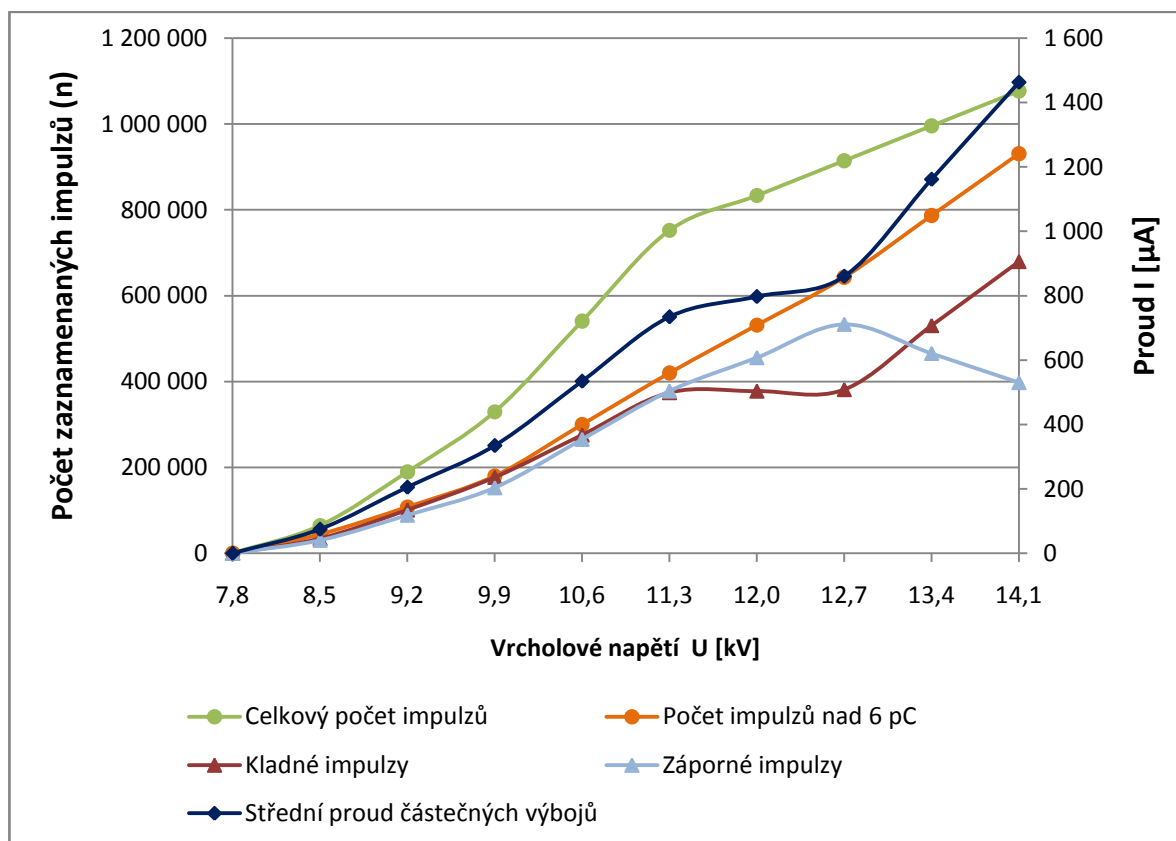
Tab. 4 Hodnoty parametrů částečných výbojů; napětí přivedeno na hrot; miska uzemněna

Napětí [kV]	Celkový počet impulzů (n)	Počet impulzů nad 6 pC (n)	Kladné impulzy (n)	Záporné impulzy (n)	Střední proud částečných výbojů I [ $\mu\text{A}$ ]	Rozsah měřicí osy velikosti náboje [pC]	Přepočtená hodnota prahové úrovně $LLD = 2\%$ [pC]
7,8	0	0	0	0	0	132	2,6
8,5	64 465	44 056	34 207	30 258	75	132	2,6
9,2	189 629	107 779	100 880	88 749	205	132	2,6
9,9	329 556	180 018	176 890	152 666	335	132	2,6
10,6	540 914	299 950	275 534	265 380	534	132	2,6
11,3	752 272	419 882	374 178	378 094	734	132	2,6
12,0	833 541	531 489	377 742	455 800	797	132	2,6
12,7	914 810	643 095	381 305	533 505	860	132	2,6
13,4	996 066	787 017	530 398	465 668	1 162	132	2,6
14,1	1 077 322	930 939	679 491	397 831	1 463	132	2,6
17,0	1 149 589	1 149 589	896 222	253 367	2 613	661	13,2
18,4	874 928	874 928	873 377	1 551	2 153	3 300	66,0
19,8	474 980	474 980	464 369	10 611	1 651	330	6,6
22,6	36 344	36 344	12 684	23 660	1 786	6 610	132,2
25,5	83 298	83 298	30 290	53 008	4 476	6 610	132,2

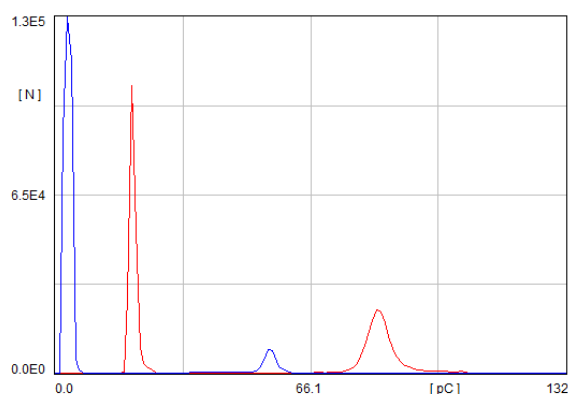
Trend celkového počtu impulzů a hodnot středního proudu částečných výbojů je zachycen na Obr. 3.15. Z grafu je vidět stoupající tendence celkového počtu výbojů v závislosti na napětí. Pokud se zaměříme na počet impulzů o velikosti zdánlivého náboje  $6\text{ pC}$  a vyšší, dostáváme hladkou křivku reprezentující nárůst četnosti.

Z křivky středního proudu částečných výbojů (hodnota  $NQS$ ) a křivek kladných a záporných impulzů je patrné kolísání při záznamech pořízených v různých napěťových hladinách, jak je popsáno v kapitole 2.3.3 zaměřené na vliv polarit v silně nehomogenním poli. V případě uspořádání, kdy na hrot je přivedeno napětí je trend křivky středního proudu částečných výbojů provázán s křivkou četnosti kladných impulzů. Dále je patrné, že v první fázi zvyšování napětí, je počet kladných i záporných impulzů stejný. Při zvyšování napětí nad hodnotu  $12\text{ kV}$  počet záporných stále stoupá (kladné nepřibývají) a hodnota  $NQS$  je v grafu

vyjádřena méně strmou křivkou. Jev je zapříčiněn tím, že kladné impulzy, nabývají vyšších hodnot zdánlivého náboje  $q$ , a tudíž způsobují i nárůst hodnoty  $NQS$ . Situace je znázorněna na Obr 3.16, kdy na ose  $x$  je velikost zdánlivého náboje a na ose  $y$  pak jejich četnost. Červená křivka zobrazuje kladné pulzy, modrá pak záporné.



Obr. 3.15 Závislost počtu výbojů a hodnoty středního proudu částečných výbojů na napětí – situace misky hrotu „pod napětím“



Obr. 3.16 Závislost počtu výbojů na velikosti zdánlivého náboje;  $U = 12$  kV; hrot pod napětím - deska

### Testy s přiloženým napětím na misce a uzemněným hrotem

V druhé části měření bylo přiloženo střídavé napětí na miskovou elektrodu.

Přeskokové napětí bylo pro toto uspořádání stejné jako v předchozím případě. Všechny podmínky ostatní podmínky, kromě prohozeného napájení elektrodového uspořádání byli stejné. Popis jednotlivých sloupců *Tab. 5* naměřených dat je uveden v této kapitole v textu této kapitoly výše. Kromě posledních dvou záznamů z této tabulky jsou všechny pořízeny při stejném rozsahu osy  $y$ , proto i graf na *Obr. 3.17* obsáhl většinu napěťových hladin.

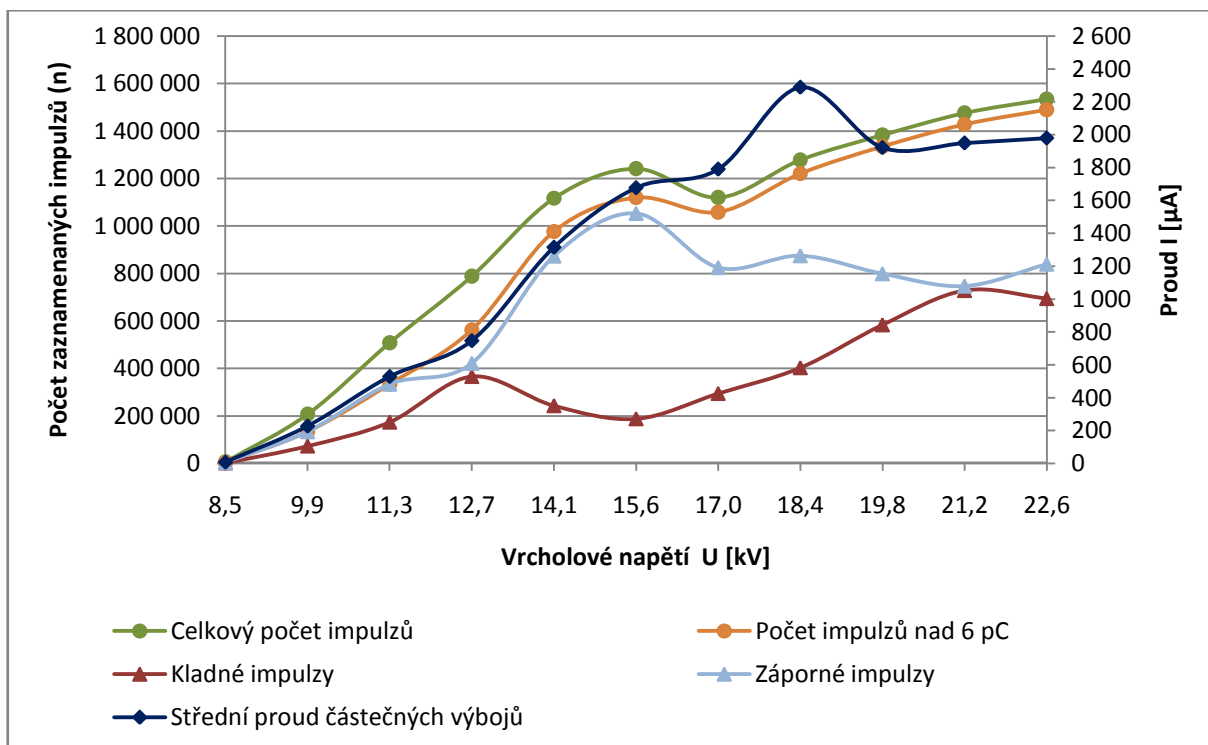
*Tab. 5* Hodnoty parametrů částečných výbojů; napětí přivedeno na misku; hrotu zemněn

Napětí [kV]	Celkový počet impulzů (n)	Počet impulzů nad 6 pC (n)	Kladné impulzy (n)	Záporné impulzy (n)	Střední proud částečných výbojů I [ $\mu$ A]	Rozsah osy velikosti náboje [pC]	Přepočtená hodnota prahové úrovně LLD = 2 % [pC]
8,5	6 725	4 138	2 587	4 138	8	132	2,6
9,9	207 563	133 827	73 741	133 822	227	132	2,6
11,3	508 569	334 242	174 539	334 030	529	132	2,6
12,7	788 758	562 625	366 917	421 841	747	132	2,6
14,1	1 117 042	977 042	243 834	873 208	1 315	132	2,6
15,6	1 241 660	1 119 887	188 688	1 052 972	1 877	132	2,6
17,0	1 120 181	1 059 117	295 275	824 906	1 790	132	2,6
18,4	1 278 563	1 221 355	403 763	874 800	2 288	132	2,6
19,8	1 383 488	1 335 438	584 469	799 019	1 921	132	2,6
21,2	1 476 093	1 428 628	729 073	747 020	1 949	132	2,6
22,6	1 534 717	1 490 462	695 387	839 330	1 979	132	2,6
24,0	3 070	3 070	2 021	1 049	149	6 610	132,2
25,5	41 869	41 869	25 782	16 087	2 417	6 610	132,2

Poměry při změně napájených elektrod jsou podobné. Dle *Obr. 3.17* lze pozorovat, že trend křivky, znázorňující střední proud částečných výbojů, je pro změnu provázán s křivkou záporných impulzů. Tento jev je vysvětlen tím, že záporné impulzy dosahovaly větších hodnot zdánlivého náboje  $q$ . Úkaz lze pozorovat i v příloze C – pravá strana. I když celkový počet impulzů v hodnotě  $U = 17$  kV klesá, hodnota NQS však pozvolněji stoupá. Při tomto napětí se sice tedy četnost impulzů snížila, avšak hodnota jednotlivých impulzů zdánlivého náboje roste.

V příloze je vidět, v jaké půlplně zkušebního napětí vznikají částečné výboje. Ač se jedná o záznamy měření z modelového uspořádání pro zkoumání korónového výboje, nelze obecně říci, že koróna vychází pouze z míst okolí hrotu. V případě nižších napětí přiváděných na hrot (miska uzemněna) jsou výboje nižších zdánlivých nábojů (do 150 pC) zaznamenány při záporné půlplně zkušebního napětí. Při hodnotě zkušebního napětí 20 kV přibývají záznamy částečných výbojů o hodnotách zdánlivého náboje (do velikosti 3,3 nC), avšak

v kladné půlvině zkušebního napětí. Opačný mechanismus je pozorovatelný při uspořádání misky „pod napětím“. Pro pochopení tohoto jevu by bylo vhodné další zkoumání a série měření. Měření na elektrodové uspořádání hrot – deska (deska o rozměrech několikanásobně větších než je vzdálenost elektrod). Tím by bylo možné zjistit pouze výboje, tvořící se na hrotové elektrodě (v případě hladké, čisté deskové elektrody).



Obr. 3.17 Závislost počtu výbojů a hodnoty středního proudu částečných výbojů na napětí - situace misky "pod napětím"

### 3.4.4 Měření na elektrodovém uspořádání koule-koule (Ø 20 mm)

U elektrod typu koule - koule nelze předem předvídat, na jaké z nich se objeví korónový výboj; záleží tak na vnějších podmínkách, které ovlivňují fyzikální děje. Při této sérii měření byl prvotně zkoumán vliv povrchu materiálu na vznik částečných výbojů.



Obr 3.18 Kulové elektrody použité při měření (Cu, nerezová ocel, Al)

U elektrod záleží především na stylu jejich opracování a na struktuře jejich materiálu. Pro měření byly použity kulové elektrody o průměru 20 mm; materiál měď, nerezová ocel a hliník znázorněných na *Obr 3.18*.

Z tabulek měření do přeskočků byly zjištěny hodnoty maximálního napětí, které je možno přiložit. Korekce teploty a tlaku nebylo nutné provádět, jelikož přiložená napětí nebyla příliš vysoká a hodnoty by nezaznamenaly po přepočtu významných změn. Dále vzdálenost mezi elektrodami byla poměrně malá a dle norem (literatura [5][21]) není ke korekci potřeba přistupovat. Podmínky měření tedy byly vždy stejné; shrnuje je *Tab. 6*. V rámci měření se měnily pouze elektrody a napětí.

*Tab. 6 Parametry měření ČV- otevřená nádoba*

Kalibrace [pC]	Elektrody [mm]	Čas měření [s]	Nádoba	Tlak [kPa]	Vzdálenost elektrod [mm]	Doba mezi měřeními [s]
+100	Ø 20 – Ø 20	300 s	otevřená	98,2	50	60

### Elektrodové uspořádání Al Ø 20 - Al Ø 20 v otevřeném objemu

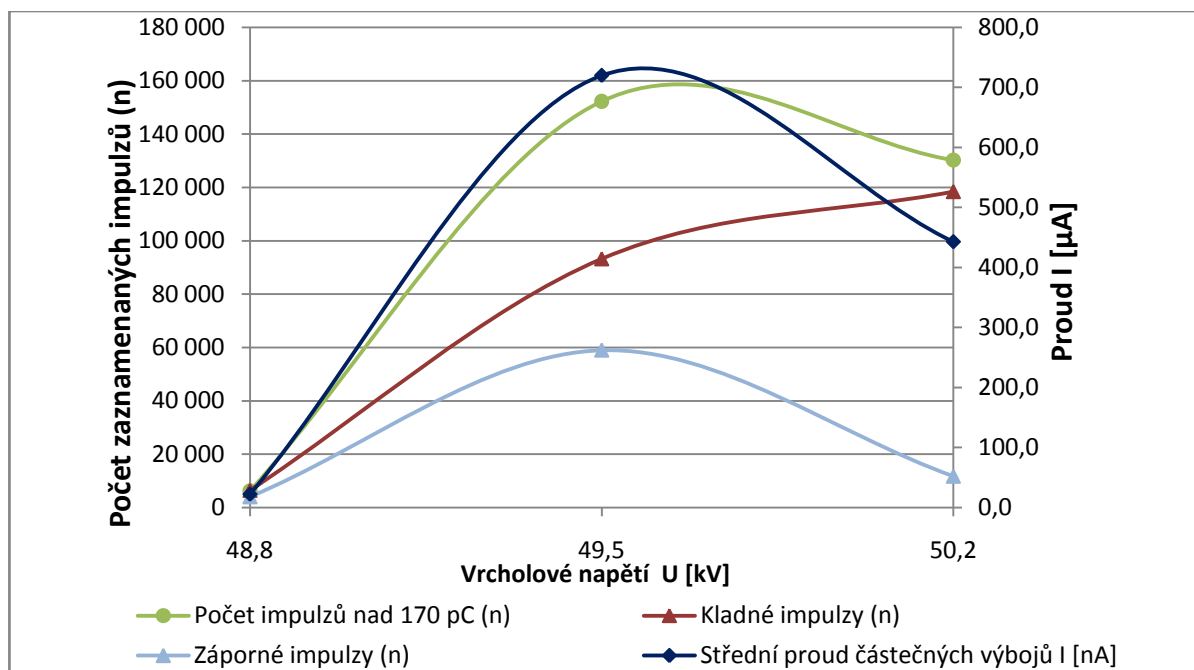
Nádoba a nainstalované elektrody v nádobě pro měření výbojů jsou zaznamenány v *příloze D*. Při době měření  $t = 300$  s budou poměry jiné než v případě 30s intervalu záznamu. Na uspořádání bylo změřeno záznamy při napětích uvedených v *Tab. 7*.

*Tab. 7 Hodnoty parametrů částečných výbojů; Ø 20 Al – Ø 20 Al*

Napětí [kV]	Celkový počet impulzů (n)	Počet impulzů nad 170 pC (n)	Kladné impulzy (n)	Záporné impulzy (n)	Střední proud částečných výbojů I [nA]	Rozsah osy velikosti náboje [pC]	Přepočtená hodnota prahové úrovně LLD = 2 % [pC]
48,1	37	0	4	33	0	850	17
48,8	10 597	6 243	6 485	4 112	22,4	4 110	82
49,5	152 264	152 254	93 242	59 022	719,9	8 500	170
50,2	130 220	130 218	118 424	11 796	442,9	8 500	170

Pro lepší představu o počtu částečných výbojů na uspořádání je na *Obr 3.19* znázorněna celá situace graficky. V grafu jsou zobrazeny pouze hodnoty odpovídající třem hladinám přiloženého napětí; při nižších napětích nedocházelo k zapálení koróny a u vyšších napětí se dokonce během měřicí doby vyskytly přeskočky. Hodnoty *NQS* zde kopírují trend celkového počtu částečných výbojů a také křivka *NQS* odpovídá tvaru křivky počtu záporných impulzů.

Grafické znázornění všech čtyř napěťových hladin je vyobrazeno v příloze E. Obrázky lze srovnávat pouze s vědomím, že rozsah na ose y je v některých případech rozdílný. V počátku zapálení výbojů při napětí 48,1 kV (příloha E) lze pozorovat výskyt 33 záporných a 4 kladných impulzů. Koróna byla zachycena v počátku výstavby náboje.



Obr. 3.19 Závislost počtu výbojů a hodnoty středního proudu částečných výbojů na napětí(Al)

Hodnota  $NQS$  v grafu na Obr. 3.19 nejprve prudce roste a pak, při napětí těsně před přeskokem začne klesat. Hodnota klesá kvůli snížení hodnot zdánlivého náboje jednotlivých impulzů změřených detektorem. Ač záporné impulzy zprvu tvoří většinu z intenzity korónového výboje, k přeskoku pravděpodobně dojde za přispění kladných impulzů.

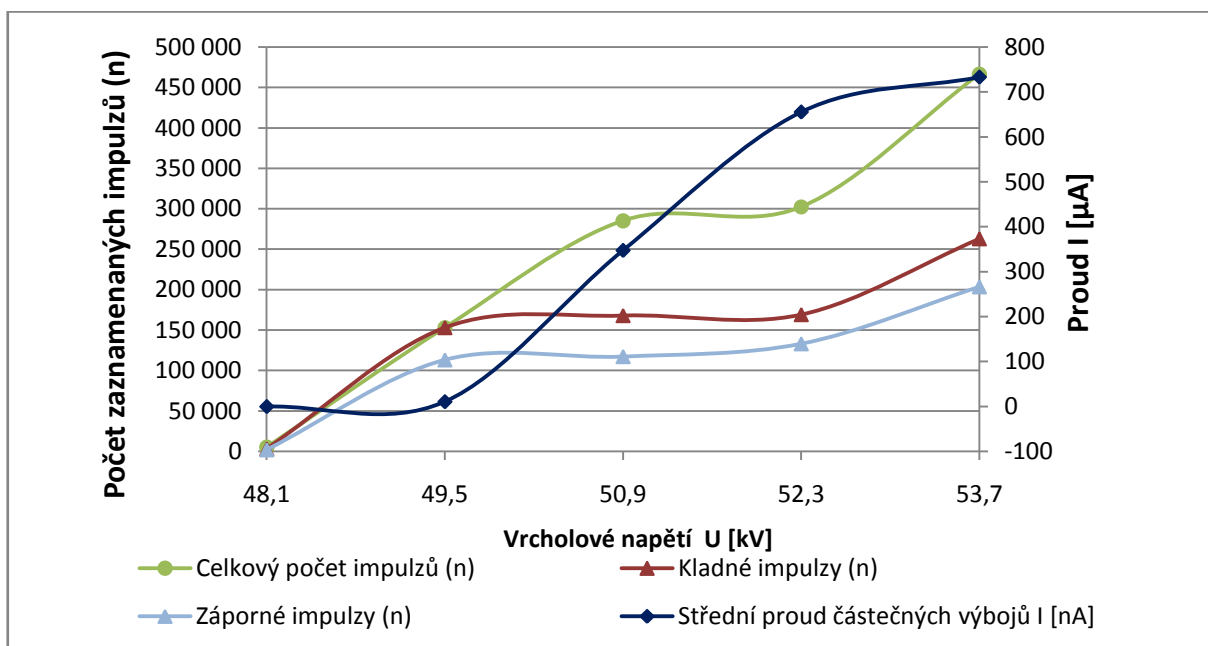
### Elektrodové uspořádání Cu Ø 20 – Al Ø Cu

Měděné elektrody jsou oproti hliníkovým těžší. Jejich povrch je hladší než u Al elektrod. Elektrické pole by tak mělo být mezi elektrodami nepatrně homogennější. Parametry měření zůstaly stejné, shrnuje je Tab. 6.

Změřené hodnoty vyjadřuje Tab. 8 a grafická závislost (Obr. 3.20). Na obrázku výše je vidět téměř lineární závislost křivky středního proudu částečných výbojů v závislosti na napětí mezi hladinami napětí 49,5 a 52,3 kV. Zároveň v tomto intervalu nedochází k výrazné změně počtu impulzů kladných ani záporných.

U měděných elektrod bylo možné zaznamenat částečné výboje v širším rozmezí napětí než u hliníkových elektrod. U měření přeskokových napětí (kapitola 3.3) byla situace opačná. Výrazný vliv zde má zřejmě měřicí čas.

U měděných elektrod byla velikost největších impulzů při napětové hladině těsně před přeskokem řádově o polovinu menší, než tomu tak bylo u elektrod hliníkových při stejném měřicím času. To vyplývá z charakteru jejich povrchů. Dále pak celkový počet impulzů byl u měděných elektrod těsně před hranicí přeskoku pro měřicí čas  $t = 300$  s trojnásobný oproti kulovým elektrodám vyrobeným z hliníku. Zajímavé však je, že hodnota středního proudu částečných výbojů byla pro oba případy srovnatelná (příloha E).



Obr 3.20 Závislost počtu výbojů a hodnoty středního proudu částečných výbojů na napětí (Cu)

Tab. 8 Hodnoty parametrů částečných výbojů; Ø 20 Cu – Ø 20 Cu

Napětí [kV]	Celkový počet impulzů (n)	Počet impulzů nad 100 pC (n)	Kladné impulzy (n)	Záporné impulzy (n)	Střední proud částečných výbojů I [nA]	Rozsah osy velikosti náboje [pC]	Přepočtená hodnota prahové úrovně LLD = 2 % [pC]
48,1	1	0	0	1	0	2 130	43
49,5	5 281	3 827	3 257	2 024	11	4 250	85
50,9	153 208	113 236	153 208	113 236	348	4 250	85
52,3	285 431	202 781	168 112	117 319	656	4 250	85
53,7	302 492	236 942	169 321	133 171	733	4 250	85
55,2	466 748	367 271	263 133	203 615	1160	4 250	85

### Elektrodové uspořádání nerezová ocel Ø 20 – nerezová ocel Ø 20

Elektrody z nerezové oceli byly proměřeny stejně jako hliníkové a měděné. Pravděpodobně povrch těchto elektrod nedovolil naměřit mnoho záznamů, proto pouze pro úplnost dokládám tabulku změřených hodnot jednotlivých parametrů. Jistý trend je možné

pozorovat, nelze však z toho vyvodit patřičné závěry jako v předchozích případech. Jedná se o měření při dvou hladinách napětí, které jsou svými hodnotami blízko u sebe.

Vznikl tak podnět pro další zkoumání na těchto elektrodách. Pro další měření bych doporučil používat nové a čisté elektrody, které nebudou mít na svém povrchu nerovnosti. Je možné, že rozdíl mezi velmi hladkým povrchem a nerovnostmi na něm může způsobovat snížení elektrické pevnosti při měřicích časech  $t = 300$  s. Byly zaznamenány následující hodnoty:

Tab. 9 Hodnoty parametrů částečných výbojů; Ø 20 nerezová ocel – Ø 20 nerezová ocel

Napětí [kV]	Celkový počet impulzů (n)	Kladné impulzy (n)	Záporné impulzy (n)	Střední proud částečných výbojů I [nA]	Rozsah osy velikosti náboje [nC]	Přepočtená hodnota prahové úrovně LLD = 2 % [pC]
49,5	35 421	21892	13529	78	4 110	82
50,9	81 673	46914	34759	185	4 110	82

### Elektrodové uspořádání Al Ø 20 - Al Ø 20 v uzavřeném objemu

Hliníkové elektrody byly podrobeny dalším testům. Záznamy byly pořízeny za stejných podmínek jako při předchozím měření kulových hliníkových elektrod, avšak v uzavřeném objemu. Parametry jsou shrnuty v Tab. 10. Z nádoby byl po uzavření těsnícím víkem odčerpán vzduch. Dále byla nádoba napuštěna kalibračním vzduchem (95 % dusík a 5 % kyslík z jeho objemu).

Tab. 10 Parametry měření č.v. – uzavřená nádoba

Kalibrace [pC]	Elektrody [mm]	Čas měření [s]	Nádoba	Tlak [kPa]	Vzdálenost elektrod [mm]	Doba mezi měřeními [s]
+100	Ø Al 20 - Ø 20 Al	300 s	uzavřená	88,2	50	60

Měření potvrdilo předpoklady popsané v teoretické práci, že při vyšších tlacích dochází k částečným výbojům v menší míře či vůbec. V případě zavřené nádoby, která je napuštěna kalibračním plynem a tlak plynu je srovnatelný s okolním atmosférickým tlakem, dochází také k jistým změnám. Vlivem toho, že není možná cirkulace vzduchu, probíhá deionizace pomaleji. Při tomto měření bylo obtížné odhalit prahová napětí zapálení koróny a napětí přeskoků. Pro tato měření nebylo přeskokové napětí při různých tlacích zjišťováno, mechanismy jsou v uzavřené nádobě méně čitelné. Při některých záznamech výbojů došlo i k přeskokům. Při budoucím měření v rámci sledování částečných výbojů v uzavřeném objemu bych doporučil snížit dobu měření například na  $t = 30$  s, aby bylo možné změřit více záznamů pro následná srovnávání a vyhodnocení.



Tab. 11 Hodnoty parametrů částečných výbojů; Ø 20 Al – Ø 20 Al – uzavřený objem

Napětí [kV]	Tlak [kPa]	Celkový počet impulzů (n)	Počet impulzů nad 43 pC (n)	Kladné impulzy (n)	Záporné impulzy (n)	Střední proud částečných výbojů I [pA]	Rozsah osy velikosti náboje [pC]	Přepočtená hodnota prahové úrovně LLD = 2 % [pC]
48,1	96,8	96	7	19	77	5,623	425	9
60,8	125	21	21	0	21	5,645	2130	43
70,7	150	92	64	27	65	21,680	1650	33

Bylo pořízeno jen velmi málo záznamů kvůli charakteru chování elektrodového uspořádání v uzavřené nádobě, avšak výsledky tabulky jsou shrnuty v následném textu.

Záznamy byly pořízeny těsně za zjištěným zapalovacím napětím a zároveň těsně před hodnotou přeskočků. Pro každou hladinu tlaku byla snaha pořídit alespoň jeden záznam, kde během měření nedojde k přeskočků.

U zvolených kulových elektrod nelze považovat pole, které je mezi nimi vytvořeno, za silně nehomogenní. Dle hodnot v Tab. 11 je možné tvrdit, že jev částečných výbojů korónového typu vymizel. To platí pro uzavřený objem při atmosférickém tlaku, o to více pak pro nádobu napuštěnou kalibračním plynem tlaků vyšších.

Mezi hodnotami je poměrně velký rozdíl napětíových hladin při kterých docházelo k výbojům. Zvýšení tlaku o 25 kPa významně zvýší elektrickou pevnost uspořádání. Hodnota středního proudu částečných výbojů je velmi malá ve všech případech změřených záznamů.

Nelze však říci, že při zavřeném víku nádoby se korónové výboje netvoří. Pomocným měřením bylo zjištěno, že v rámci silně nehomogenního pole vzniká koróna v uzavřeném objemu i při vyšších tlacích. Počet impulzů i hodnota  $NQS$  však dosahuje mnohem menších hodnot než ve srovnání s víkem otevřeným.

## Závěr

Předkládaná práce se zabývala měřením hodnot přeskokových napětí a měřením částečných výbojů na elektrodách, kdy izolačním médiem byl nejprve vzduch a následně kalibrační plyn. Záznamy částečných výbojů byly provedeny na základě analogových elektrických impulzů získaných z vazební kapacity. Při měřeních bylo použito analogově/digitálního měřicího přístroje od firmy Power Diagnostix.

Pro získání záznamů, které jsou typické pro korónové výboje bylo použito modelového uspořádání hrot – miska. Všechny záznamy byly pořízeny během měřicího časového intervalu  $t = 300$  s a za stejných měřicích podmínek. Tato měření byla srovnána pro případy, kdy byl napájen hrot (miska uzemněna) a naopak. Na uspořádáních dochází k přeskoku ve stejné napěťové hladině u obou případů. Mechanismus výstavby náboje je však odlišný.

U elektrod, kdy byl „hrot pod napětím“ se výboje začaly tvořit v záporné půlvlně zkušebního napětí (v rozmezí hodnot 8 – 18 kV) přiloženého zkušebního napětí. Záznamy byly pořízeny během měřicího časového intervalu  $t = 30$  s. Četnost kladných impulzů byla v tomto intervalu o něco málo vyšší než záporných (kromě hodnot hladiny napětí zkušebního napětí 12 a 17,2 kV) dle tabulek dokládaných k měření. Kladné impulzy nabývaly však vyšších hodnot zdánlivého náboje  $q$  a tím byl ovlivněn i trend křivky středního proudu částečných výbojů. Při hladině zkušebního napětí těsně před přeskokem došlo k velkému nárůstu hodnoty  $NQS$  za přispění především impulzů záporné polarity o velikosti zdánlivého náboje do 3,6 nC.

Při elektrodách miska – hrot (miska „pod napětím“) byla situace výstavby náboje mezi elektrodami odlišná. Při nižších hladinách převládají četnosti impulzů záporného zdánlivého náboje a ty také dosahují nejvyšších hodnot  $q$ . Vyskytují se v oblasti kladné půlvlny zkušebního napětí. V hladině napětí těsně před přeskokem došlo k nárůstu (na rozdíl od druhého elektrodového uspořádání) částečných výbojů kladné polarity právě v záporné půlvlně zkušebního napětí.

Jelikož koróna vzniká vždy v místech největšího zakřivení, lze pomocí těchto záznamů zjišťovat, na jaké elektrodě k výbojům dochází (např. při měření na uspořádání, kdy jsou proti sobě nainstalovány stejné elektrody). Měření a následná vyhodnocení prokázaly, že ač dochází k přeskokovému napětí u obou uspořádání při stejném zkušebním napětí, je mechanismus výstavby prostorového náboje mezi elektrodami odlišný.

Dále bylo v práci přistoupeno k měření na kulových elektrodách různých materiálů v nádobě při otevřeném objemu. Měření přeskokových napětí z předchozího výzkumu provedeného na katedře bylo podnětem ke zpracování práce. U různých druhů materiálu elektrod (provedení hliník, měď a nerezová ocel) docházelo k přeskokům v rozdílných hladinách zkušebního střídavého napětí (rozdíl až 10 kV). Tento jev byl s největší pravděpodobností způsoben ionizací v prostoru otevřené nádoby. Doporučením pro další zkoumání tohoto úkazu by bylo zvýšit dobu mezi jednotlivým měřením hodnot do přeskoku a vyloučit tak vliv ionizace z předchozích přeskoků. Prokázalo se však, že samotný materiál má poměrně velký vliv na děje částečných výbojů. Měření byly podrobeny kulové elektrody stejné velikosti. Měřicí čas byl  $t = 300$  s. Nad hranou zapalovacího napětí těchto uspořádání byly zjištěny nejdříve impulzy záporného zdánlivého náboje při kladné půlplně zkušebního napětí, další záznamy pak vykazovaly v záporné půlplně impulzy kladné polarity.

U hliníkových elektrod bylo možné změřit jen několik záznamů z hlediska charakteru jejich povrchu. Byly zaznamenány (oproti ostatním materiálům elektrod) i impulzy, které dosahovaly hodnot zdánlivého náboje až 8 nC při zkušebním střídavém napětím 49,5 kV. Při následném zvýšení napětí hodnota  $NQS$  klesla ze 720 na 443 nA; poklesla tak logicky i hodnota četnosti celkového počtu výbojů. Tento jev nebyl např. u měděných elektrod patrný. Tento pokles nastal těsně před hodnotou přeskokového napětí. Při času, po který byly elektrody vystavovány zkušebnímu napětí, se nepotvrdil předpoklad nejvyšší elektrické pevnosti v ohledu předcházejícího měření do přeskoku.

U měděných elektrod bylo možné získat záznamy v širším rozmezí hodnot měřicího napětí. Maximální hodnoty impulzů zdánlivých nábojů nepřesahovaly hodnotu 4 pC. K zapálení částečných výbojů došlo při stejné hodnotě přiloženého napětí jako u Al elektrod. Mezi hladinami napětí 49,5 a 52,5 kV je patrný téměř lineární nárůst hodnot  $NQS$ . Přesto, že počty výbojů těsně před přeskokovým napětím rostou, hodnota  $NQS$  se ustálila. To je způsobeno tím, že ač se četnost zvyšuje, začíná se snižovat velikost jednotlivých výbojů ve smyslu velikosti zaznamenaných impulzů. Počet impulzů před přeskokem je trojnásobkem četnosti pulzů oproti uspořádání hliníkových elektrod.

Posledním měření v otevřeném objemu nádoby byly zjišťovány částečné výboje elektrod z nerezové oceli. Charakter povrchu elektrod umožnil naměření pouze dvou záznamů, kdy měřicí napětí byly od sebe vzdáleny 1,9 kV. Nebylo možné tedy vysledovat trend jako u předchozích 2 druhů materiálu. Pro další experimenty měření částečných výbojů s nerezovou ocelí bych doporučil pořídit elektrody nové a měření na nich opakovat.

V rámci práce byl zkoumán i vliv otevřené a uzavřené nádoby. Pro tyto testy byly vybrány hliníkové elektrody. Ostatní podmínky měření byly totožné. Při měření v uzavřené nádobě a dále při zvýšení tlaku, byl ověřen teoretický předpoklad uvedený v práci; při vyšších tlacích se zvýší elektrická pevnost uspořádání, výrazným způsobem se sníží počet částečných výbojů a rozdíl mezi hodnotou zapálení částečných výbojů a hodnotou samotného přeskoku je velmi malý. Elektrická pevnost se snížila jen tehdy, byla-li nádoba uzavřena a hodnota tlaku odpovídala atmosférickému. Pak nedocházelo k postupné deionizaci a cirkulaci vzduchu a došlo k přeskoku při nižším napětí než v případě otevřené nádoby. Naopak při zvýšení tlaku na  $p = 125 \text{ kPa}$  došlo pouze k 21 zaznamenaným přeskokům a hodnota  $NQS$  nepřesáhla  $6 \text{ pA}$ . Zvýšením tlaku plynného izolantu lze tedy podstatně ovlivnit nejen elektrickou pevnost celého uspořádání, ale je možné i snížit počet částečných výbojů na minimální hodnotu.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] VEVERKA, Antonín. *Technika vysokých napětí*. 3. přepr. vyd. Praha: SNTL, 1982, 301 s.
- [2] MENTLÍK, Václav, Josef PIHERA, Radek POLANSKÝ, Pavel PROSR a Pavel TRNKA. *Diagnostika elektrických zařízení*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2008, 439 s. ISBN 978-80-7300-232-9.
- [3] MENTLÍK, Václav. *Dielektrické prvky a systémy*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2006, 235 s. ISBN 80-730-0189-6.
- [4] ZÁLIŠ, Karel. *Částečné výboje v izolačních systémech elektrických strojů*. 1. vyd. Praha: Academia, 2005, 135 s. Česká matice technická (Academia). ISBN 80-200-1358-X.
- [5] ČSN EN 60270. *Technika zkoušek vysokým napětím: Měření částečných výbojů*. Praha: Český normalizační institut, 2001.
- [6] *DIGITAL PARTIAL DISCHARGE RECORDING: User manual*. Aachen-Germany.
- [7] KÖNIG, Dieter a Y NARAYANA RAO. *Partial discharges in electrical power apparatus*. Berlin: VDE-Verlag, c1993, 316 p. ISBN 38-007-1760-3.
- [8] RUSŇÁK, Štěpán a Vladislav VEBR. *Laboratorní měření v technice vysokého napětí*. Plzeň: Ediční středisko, 1972.
- [9] MALIK, N, A AL-ARAINY a M QURESHI. *Electrical insulation in power systems*. New York: Marcel Dekker, c1998, xii, 394 p. ISBN 08-247-0106-2.
- [10] MENTLÍK, Václav. *Spolehlivostní aspekty elektrotechnologie*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2011, 118 s. ISBN 978-80-7300-412-5.
- [11] BEATY, H. *Electrical engineering materials reference guide*. New York: McGraw-Hill, c1990, 1 v. (various pagings). ISBN 00-700-4196-2.
- [12] LIPTÁK, Jan a Josef SEDLÁČEK. *Úvod do elektrotechnických materiálů*. Praha: ČVUT, 2008.
- [13] ŠVEC, Josef. *Elektrotechnologie: materiály, technologie a výroba v elektronice a elektrotechnice*. 4., rozš. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2005, 314 s. ISBN 978-80-7300-190-2.
- [14] ARTBAUER, Ján, Juraj ŠEDOVIČ a Vladimír ADAMEC. *Izolanty a izolácie*. 1. vyd. Bratislava: Alfa, 1969, 619 s.
- [15] HASSDENTEUFELA, Josef a Karla KVĚTA. *Elektro-technické materiály*. Praha: SNTL, 1967.

- [16] Tepelný pohyb. [online]. [cit. 2014-01-31]. Dostupné z: <http://kf-lin.elf.stuba.sk/KrempaskyFyzika/14.pdf>
- [17] MARTÍNEK, Petr. *Teoretická a experimentální analýza částečných výbojů v dielektriku elektrických strojů*. Plzeň, 2005. Disertační práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnologická,.
- [18] LAURENC, Jiří. *Rázový impulz: "surge"* [online]. Plzeň [cit. 2014-02-12]. Dostupné z: <http://home.zcu.cz/~laurenc/download/emc-surge.pdf>. Západočeská fakulta.
- [20] *Maximální přesnost pro měřitelný úspěch: Směsy plynů od Linde Gas* [online]. [cit. 2014-04-02]. Dostupné z: [http://www.lindegas.cz/internet.lg.lg.cze/cs/images/Kalibra%C4%8Dn%C3%AD%20plyny79\\_86192.pdf](http://www.lindegas.cz/internet.lg.lg.cze/cs/images/Kalibra%C4%8Dn%C3%AD%20plyny79_86192.pdf)
- [21] Katedra elektroenergetiky a ekologie: Laboratoře a specializované pracoviště. [online]. [cit. 2014-05-01]. Dostupné z: <http://www.kee.zcu.cz/laboratore.html>

## Přílohy:

## Příloha A – Tabulky z měření do přeskoku

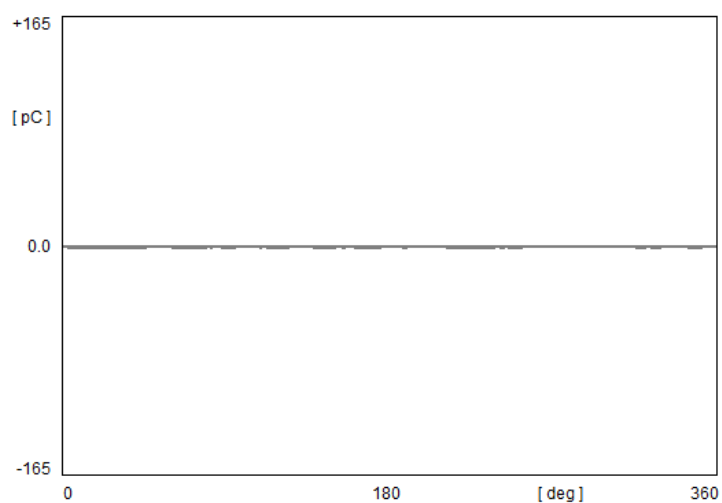
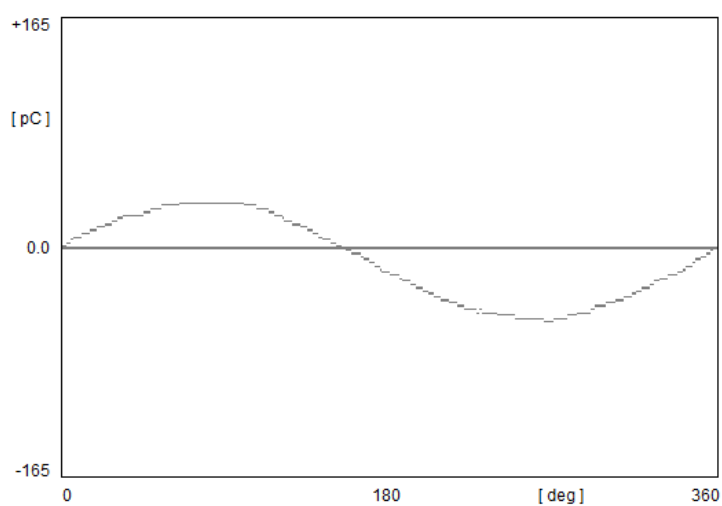
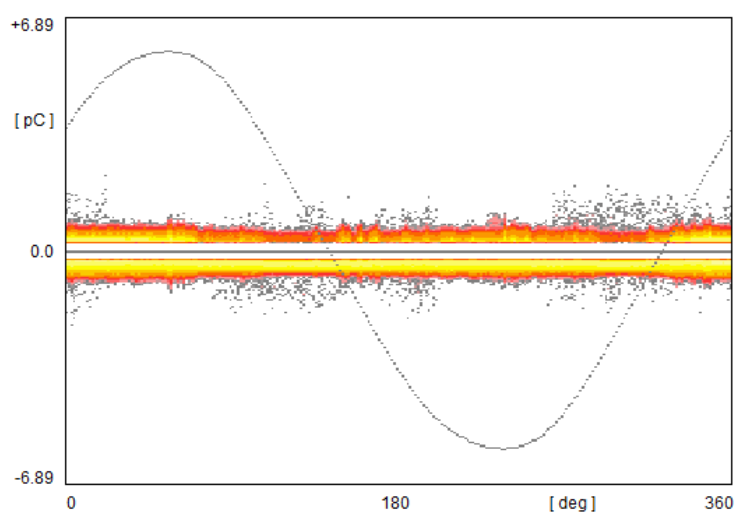
a) měření do přeskoku na kulových elektrodách; b) měření do přeskoku hrot - miska

a)

Testy do přeskoku		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	Průměr
Ø 20 Al - Ø 20 Al	Zapálení korony $U_z$ [kV]	47,4	48,6	49,5	48,6	48,9	48,8	48,9	49,6	50,5	50,5	-	49,6	49,1	-	-	49,18
	Přeskok $U_p$ [kV]	61,5	61,0	62,1	67,5	60,7	61,4	61,2	61,9	61,5	60,7	49,6	61,1	61,7	49,9	49,6	59,43
Ø 20 Cu - Ø 20 Cu	Zapálení korony $U_z$ [kV]	49,9	50,1	49,9	50,2	50,8	-	51,8	-	-	-	51,1	-	-	-	-	50,53
	Přeskok $U_p$ [kV]	61,0	60,5	61,8	61,0	59,5	53,0	61,8	50,5	51,9	49,8	51,3	51,5	50,9	51,1	50,9	55,10
Ø 20 nerezová ocel - Ø 20 nerezová ocel	Zapálení korony $U_z$ [kV]	49,6	50,2	50,2	51,3	50,8	-	51,1	51,8	51,2	-	-	-	50,6	52,0	50,2	50,82
	Přeskok $U_p$ [kV]	61,7	61,4	61,2	61,4	60,8	50,1	61,8	61,8	61,4	49,8	50,2	51,5	51,5	61,1	61,2	57,78

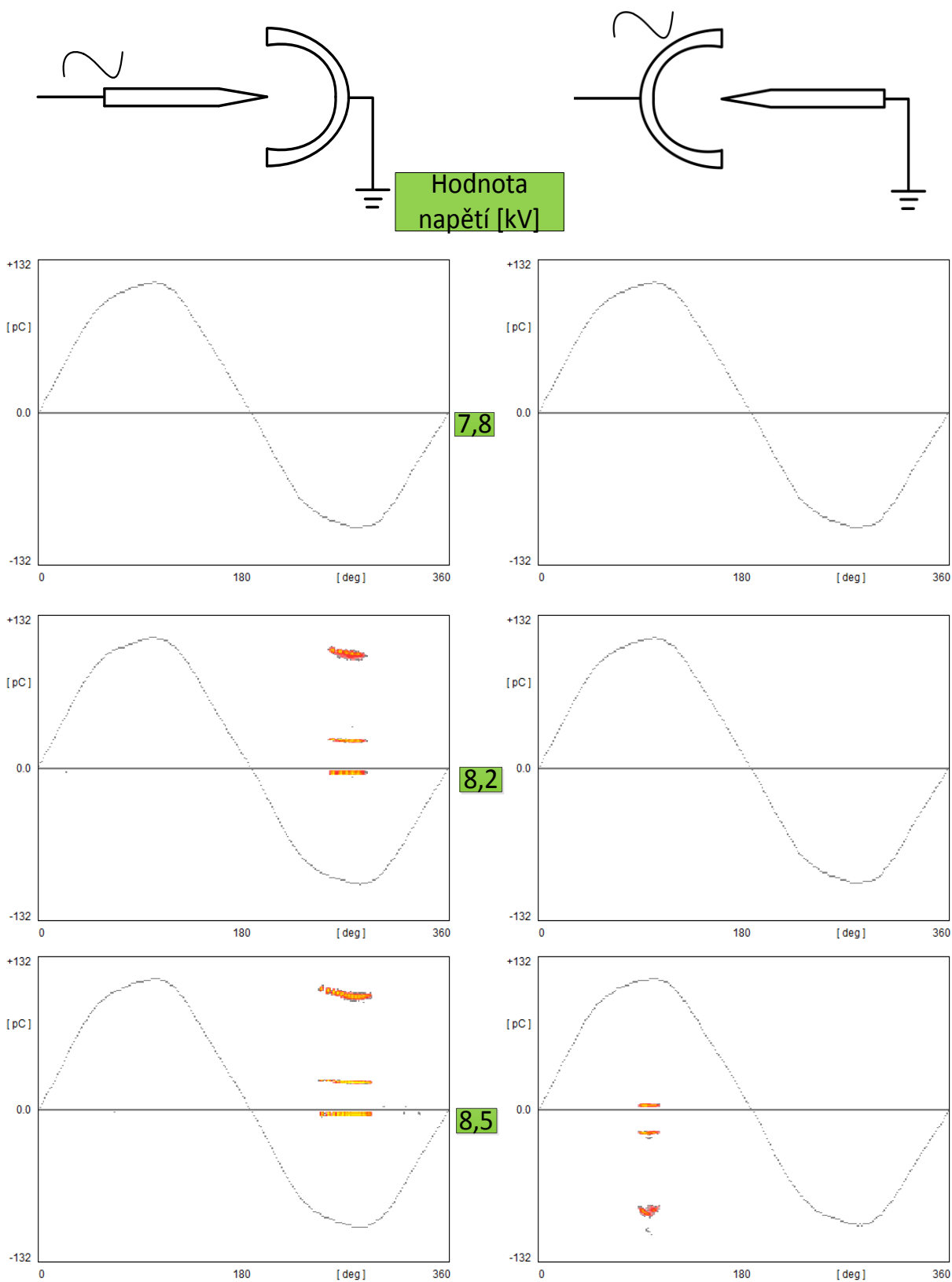
b)

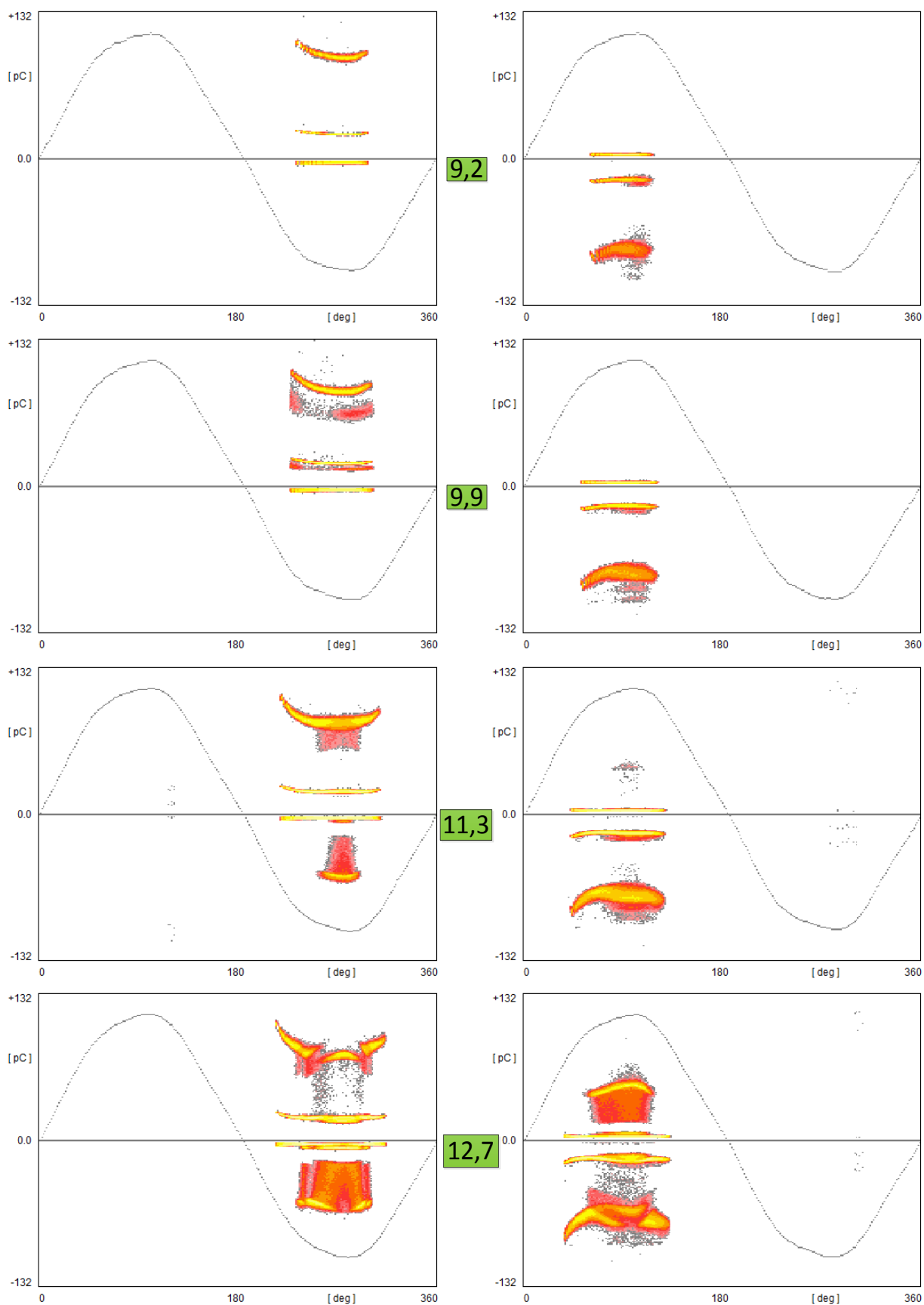
Testy do přeskoku		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	Průměr
Hrot - miska	Zapálení korony $U_z$ [kV]	7,6	7,8	7,6	7,6	7,7	7,7	7,7	7,9	7,8	8	7,6	7,9	7,8	7,8	7,9	7,8
	Přeskok $U_p$ [kV]	29,2	28,7	29,5	29,2	28,7	28,7	29,1	28,6	29,2	28,7	28,7	28,7	28,7	29,2	28,5	28,4

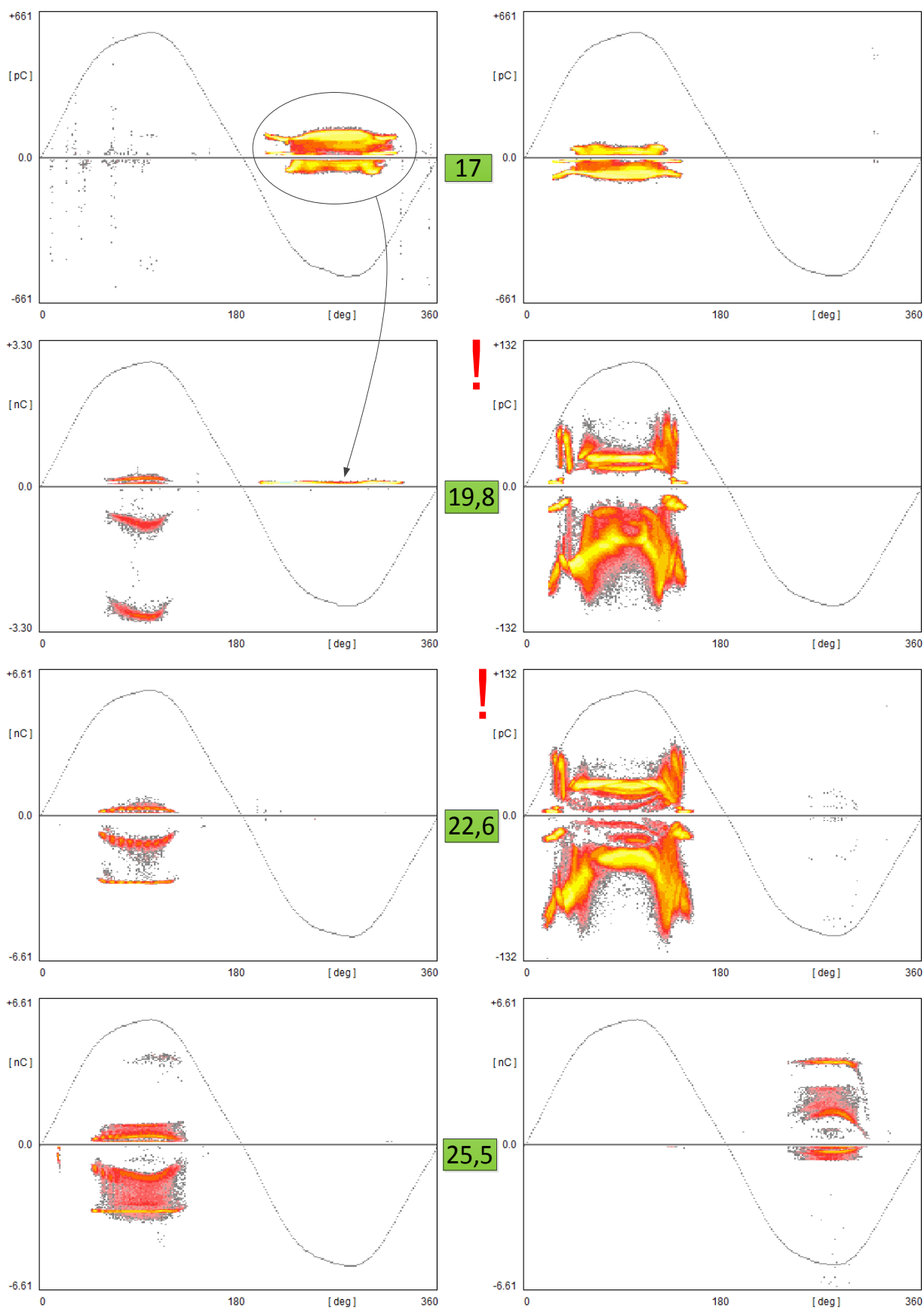
**Příloha B – Záznamy částečných výbojů na pozadí laboratoře VVN po kalibraci***Obr B - 1 Naměřené částečné výboje na pozadí laboratoře bez přiloženého**Obr B - 2 Záznam ČV při zapnutém zdroji bez měřeného vzorku**Obr B - 3 Záznam ČV při napětí 77,8 kV bez měřeného vzorku*



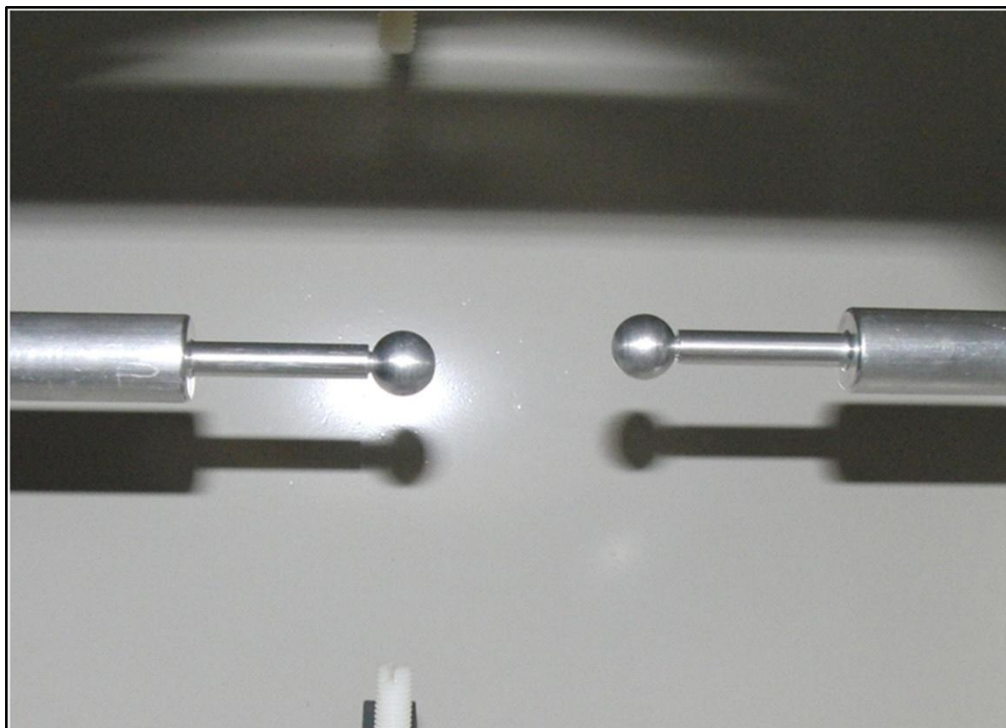
**Příloha C – Záznamy ČV na modelu koróny, porovnání napětí: na hrotu / na misce**



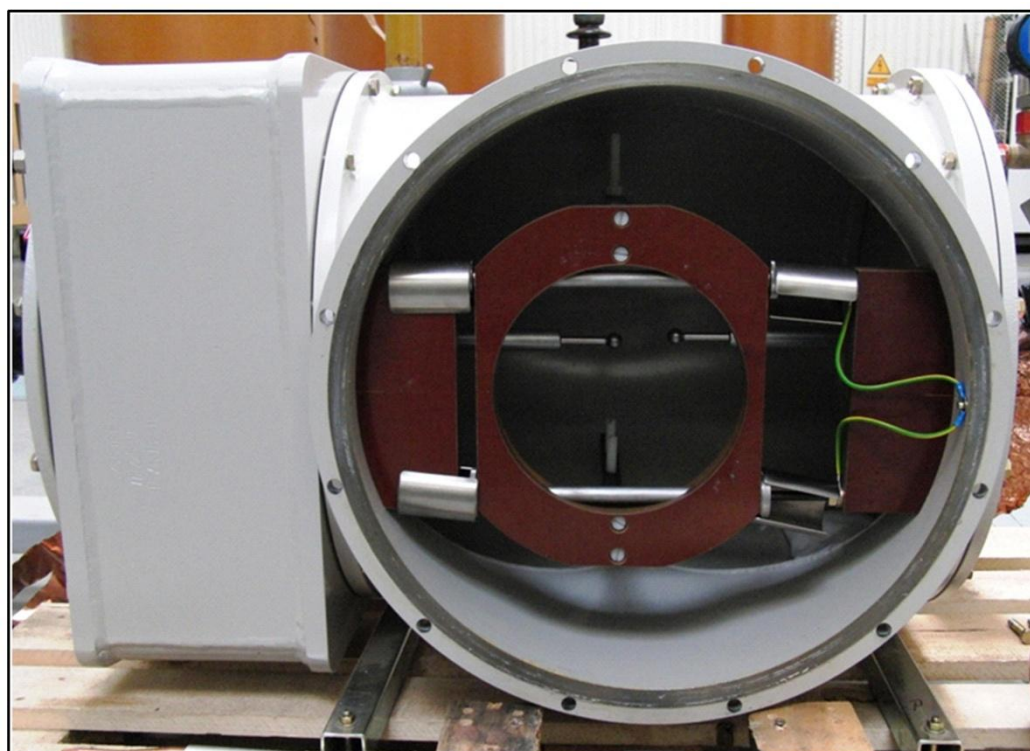




**Příloha D – Fotodokumentace instalovaných Al elektrod v měřicí nádobě**

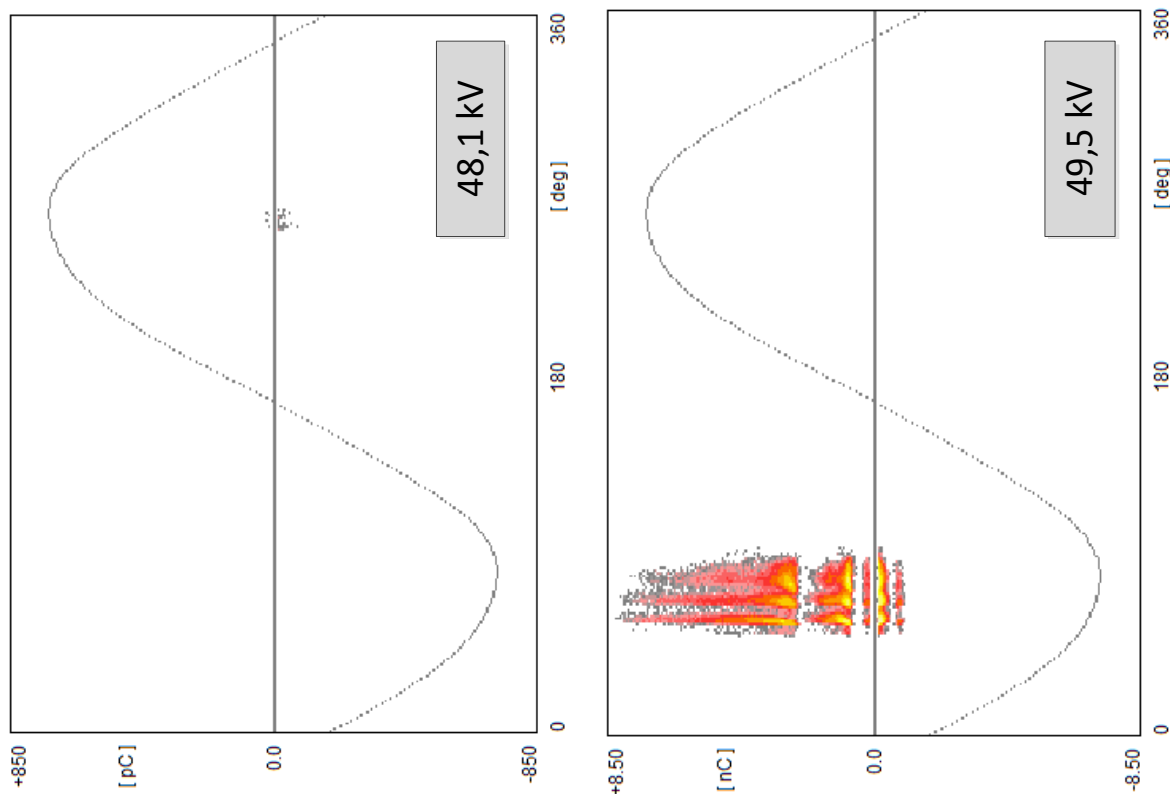
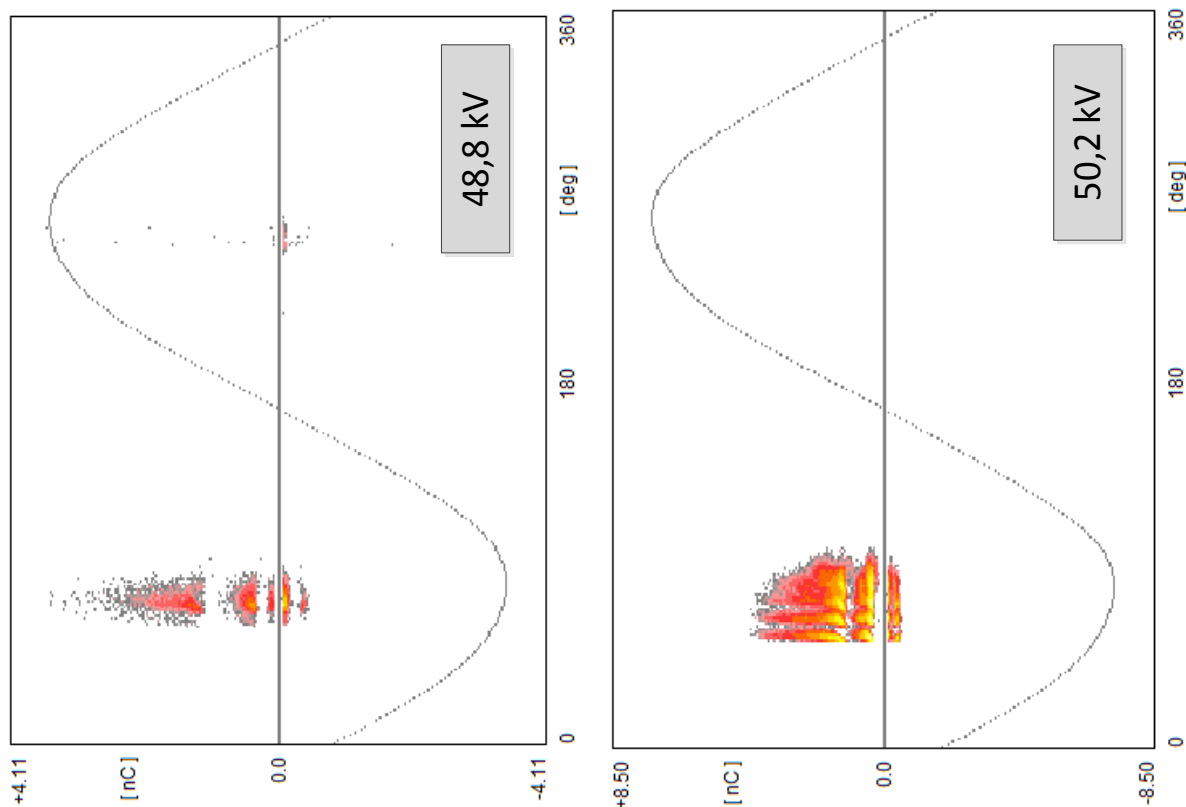


Instalované hliníkové elektrody



Nádoba na měření výbojů s otevřeným víkem

**Příloha E – Záznamy ČV kulových elektrod Ø 20 Al – Ø 20 Al**



Příloha F – Záznamy ČV kulových elektrod  $\varnothing 20$  Cu –  $\varnothing 20$  Cu