

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROMECHANIKY
A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Vliv uzavřeného objemu na elektrickou pevnost
vzduchového izolantu**

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Ing. Mikhail OLKHOVSKIY**
Osobní číslo: **E13B0064P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**
Název tématu: **Vliv uzavřeného objemu na elektrickou pevnost vzduchového izolantu**
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

1. Vypracujte odborný text popisující problematiku elektrické pevnosti plyných izolantů a jejich užití ve vysokonapěťové elektrotechnice.
2. Uskutečňte experimentální měření elektrické pevnosti vzduchu s elektrodami v uzavřeném a otevřeném objemu.
3. Zpracujte získané výsledky, vyhodnoťte, vzájemně porovnejte a interpretujte.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah kvalifikační práce: **30 - 40 stran**

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Petr Martínek, Ph.D.

Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2015**

Termín odevzdání bakalářské práce: **2. června 2016**

Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.

děkan



Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.

vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2015

Abstrakt

Bakalářská práce je zaměřena na problematiku elektrické pevnosti plyných izolantů a praktické měření elektrické pevnosti vzduchového izolantu v uzavřeném a otevřeném objemu.

Klíčová slova

Plynný izolant, elektrická pevnost, ionizace, samostatný výboj, nehomogenní elektrické pole

Abstract

Bachelor thesis is focused on the electric strength gaseous insulators and practical measurement of the electrical insulator strength of the air in a closed and an open volume.

Key words

Gas insulant, electric strength, ionization, self-sustained discharge, non-uniform field

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou 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 bakalářské práce, je legální.

.....
podpis

V Plzni dne 23.5.2016

Mikhail Olkhovskiy

Poděkování

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

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	9
ÚVOD	11
1 ELEKTRICKÉ VLASTNOSTI PLYNNÝCH IZOLANTŮ	12
1.1 POJEM IZOLANT.....	12
1.2 ELEKTRICKÁ VODIVOST PLYNŮ	12
1.3 VOLTAMPÉROVÁ CHARAKTERISTIKA PLYNNÝCH IZOLANTŮ.....	13
1.4 PERMITIVITA PLYNŮ	14
1.5 DIELEKTRICKÉ ZTRÁTY V PLYNECH.....	14
1.6 VÝSTUPNÍ PRÁCE ELEKTRONŮ	15
1.7 POHYBLIVOST IONTŮ A ELEKTRONŮ V PLYNU V ELEKTRICKÉM POLI.....	16
1.8 UŽITÍ PLYNNÝCH IZOLANTŮ.....	16
2 PROBLEMATIKA ELEKTRICKÉ PEVNOSTI PLYNNÝCH IZOLANTŮ.....	18
2.1 POJEM ELEKTRICKÁ PEVNOST	18
2.2 PRŮRAZ PLYNNÉHO IZOLANTU.....	18
2.3 IONIZACE PLYNŮ PŮSOBENÍM VNĚJŠÍCH IONIZAČNÍCH ČINIDEL	18
2.4 NÁRAZOVÁ IONIZACE	19
2.5 FOTOIONIZACE	20
2.6 POVRCHOVÁ IONIZACE.....	21
2.7 REKOMBINACE A ZÁNİK IONIZOVANÝCH ČÁSTIC	21
2.8 TOWNSENDovy IONIZAČNÍ KOEFICIENTY	24
2.9 PASCHENŮV ZÁKON.....	24
2.10 ELEKTRICKÁ PEVNOST PLYNŮ V NEHOMOGENNÍM POLI	26
2.11 ZÁKLADNÍ DRUHY ELEKTRICKÝCH VÝBOJŮ	27
2.12 ČÁSTEČNÉ VÝBOJE	29
3 MĚŘENÍ ELEKTRICKÉ PEVNOSTI VZDUCHU ZA ATMOSFÉRICKÉHO TLAKU S ELEKTRODAMI V UZAVŘENÉM A OTEVŘENÉM OBJEMU.....	30
ZÁVĚR.....	37
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ.....	38
PŘÍLOHY.....	1

Seznam symbolů a zkratk

a	Zrychlení [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$]
d	Vzdálenost [m]
dn	Změna počtu iontů [-]
E.....	Intenzita elektrického pole [$\text{V}\cdot\text{m}^{-1}$]
E_{bd}	Intenzita elektrického pole odpovídající U_{bd} [$\text{V}\cdot\text{m}^{-1}$]
E_{mean}	Střední intenzita elektrického pole [$\text{V}\cdot\text{m}^{-1}$]
E_{max}	Maximální intenzita elektrického pole [$\text{V}\cdot\text{m}^{-1}$]
h	Planckova konstanta [J·s]
I.....	Elektrický proud [A]
M.....	Molární hmotnost [$\text{kg}\cdot\text{mol}^{-1}$]
m	Hmotnost [kg]
m_e	Hmotnost elektronu [kg]
N	Avogadrova konstanta [mol^{-1}]
n_+	Počet kladných iontů [-]
n_-	Počet záporných iontů [-]
p	Tlak [Pa]
q	Náboj [C]
R.....	Molární plynová konstanta [$\text{J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$]
T.....	Absolutní teplota [K]
t.....	Čas [s]
$\text{tg } \delta$	Ztrátový činitel [-]
U	Elektrické napětí [V]
U_{bd}, U_p	Průrazné elektrické napětí [V]
U_{bd0}	Průrazné elektrické napětí při normálních podmínkách [V]
V_a	Napětí anody [V]
V_k	Napětí katody [V]
W_i	Ionizační energie [eV]
α	První ionizační koeficient [-]
β	Ionizační koeficient pro kladné ionty [-]
δ	Poměrná hustota vzduchu [-]
ϵ_r	Relativní permitivita [-]

ϵ_0	Permitivita vakua [$F \cdot m^{-1}$]
γ	Konduktivita [$S \cdot m^{-1}$]
γ	Sekundární ionizační koeficient [-]
η	Schwaigrův faktor, stupeň homogenity elektrického pole [-]
λ	Vlnová délka [m]
λ_{str}	Střední volná dráha [m]
ρ	Objemová hustota náboje [$C \cdot m^{-3}$]
ϑ	Teplota [$^{\circ}C$]
v_e	Rychlost pohybu elektronu [$m \cdot s^{-1}$]
ω	Úhlová frekvence [$rad \cdot s^{-1}$]
SF_6	Hexafluorid síry
VN	Vysoké napětí
VVN	Velmi vysoké napětí
ZVN	Zvláště vysoké napětí
AD	Analogově digitální (převodník)
RAT	Regulační autotransformátor

Úvod

Porozumění mechanismu ionizace a rekombinace v plynech má zásadní význam ve vysokonapěťové elektrotechnice. Informace o procesech probíhajících v plynných izolantech je nezbytná pro stanovení vzduchových mezer v rozvodnách a přenosových linkách. Nevhodně zvolené parametry snižují celkovou spolehlivost a životnost zařízení.

Cílem praktické části práce bylo určení vlivu parametrů prostředí na elektrickou pevnost vzduchového izolantu. Za parametr prostředí byl zvolen stav objemu, ve kterém probíhalo měření. Pro měření byly zvoleny elektrody: kulová, o poloměru 75 mm, a hrotová, o poloměru 0,5 mm. Tlak v obou případech, otevřeného a uzavřeného objemu, byl atmosférický. Vzdálenost mezi elektrodami se měnila od 10 do 90 mm s krokem 10 mm. Na elektrody bylo přiváděno střídavé napětí o frekvenci 50 Hz.

Práce obsahuje tři části: první popisuje elektrické vlastnosti plynných izolantů a jejich užití ve vysokonapěťové elektrotechnice, druhá část se týká teorie vzniku volných nábojů a elektrické pevnosti. Třetí část je věnovaná měření elektrické pevnosti vzduchového izolantu a zhodnocení výsledku tohoto měření.

1 Elektrické vlastnosti plynných izolantů

1.1 Pojem izolant

Všechny materiály a chemické látky dělíme na vodiče, polovodiče a izolanty podle obsahu volných nosičů náboje. Koncentrace a pohyblivost volných nábojů ovlivňují měrnou elektrickou vodivost. V případě dostatečného množství volných nábojů je materiál vodičem. V případě, že materiál volné elektrické náboje neobsahuje, nebo jen v malém množství, je takový materiál izolantem. Ideální izolant neobsahuje žádné volné náboje a jeho měrný elektrický odpor je nekonečně velký. Reálné izolanty obsahují nepatrné množství volných elektrických nábojů, a proto mají určitý měrný elektrický odpor [2].

Ve většině izolantů se při běžných podmínkách vyskytuje iontová vodivost, způsobená pohybem volných iontů, a jen zřídka elektronová vodivost volnými elektrony [4][5].

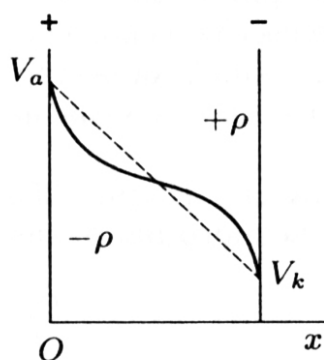
1.2 Elektrická vodivost plynů

Plyny jsou dobrými izolanty za normálních podmínek, protože obsahují převážně neutrální molekuly, a vzdálenost mezi nimi je řádově stokrát větší než jejich rozměry. Elektrická vodivost plynů je nepatrná až do určité hodnoty intenzity elektrického pole, při které v plynu začíná nárazová ionizace [2][5][12].

Elektrický proud v plynu se přenáší pohybem kladných a záporných iontů a elektronů v elektrickém poli. Kladné ionty a elektrony vznikají u plynů ionizací neutrálních molekul. Záporné ionty vznikají spojením volných elektronů s molekulami plynu. Ionizace vzniká působením krátkovlnného elektromagnetického záření nebo při nárazech elektronů a iontů na neutrální molekuly [4][14].

Ve slabém elektrickém poli dochází k ionizaci jen vlivem vnějších faktorů jako rentgenové záření, ultrafialové, kosmické, radioaktivní záření, nebo vlivem vysoké teploty plynu, a vzniká nesamostatná vodivost plynu. Jakmile intenzita elektrického pole překročí určitou hodnotu, vzniká nárazová ionizace, při které se neutrální molekuly rozpadají na kladné ionty a elektrony. Vzniká samostatná vodivost plynu [1][4].

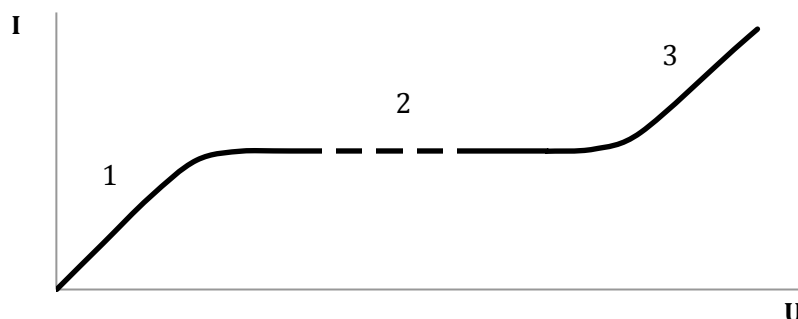
V případě, kdy plynem protéká proud, rozložení intenzity elektrického pole mezi elektrodami má nehomogenní charakter. V blízkosti anody a katody vzniknou objemové náboje. Záporné náboje snižují intenzitu pole v oblasti anody, kladné náboje zvyšují intenzitu elektrického pole v oblasti katody. Na obrázku potenciály anody a katody označeny V_a a V_k , ρ – objemová hustota nábojů. Čárkovaná linie reprezentuje rozložení intenzity bez vlivu objemových nábojů [12].



Obr. 1.1 Změna intenzity mezi elektrodami [12]

1.3 Voltampérová charakteristika plyných izolantů

Z grafu VA charakteristiky plynu na obrázku 1.2 je patrné, že v oblasti číslo jedna platí Ohmův zákon. V oblasti číslo 2 proud nezávisí na napětí a hovoříme o nasyceném proudu. V těchto dvou oblastech je vodivost plynu nesamostatná, v oblasti platnosti Ohmova zákona ionty vznikající účinkem vnějších ionizátorů zanikají rekombinací, koncentrace iontů nezávisí na napětí, a proto je proud úměrný napětí [4][5][12].



Obr. 1.2 Voltampérová charakteristika plynů [12]

V oblasti nasyceného proudu ionty zanikají na elektrodách neutralizací. Koncentrace

iontů je tím nižší, čím je vyšší napětí, proud nezávisí na napětí a měrný odpor stoupá s růstem napětí. Proud je úměrný vzdálenosti mezi elektrodami a s růstem vzdálenosti roste. V oblast 3 probíhá nárazová ionizace [4].

1.4 Permitivita plynů

Relativní permitivita izolantů má praktický význam jako veličina charakterizující jejich chování v elektrickém poli. To jest schopnost se polarizovat. Definujeme relativní permitivitu jako poměr kondenzátoru s uvažovaným dielektrikem a s vakuem [2].

Relativní permitivita plynů je o něco vyšší jednotky, tím větší, čím je větší poloměr molekuly. Polarizace plynů může být elektronová, a to v případě, že molekuly plynu nemají dipólový moment, nebo elektronová a dipólová, jestliže molekuly mají dipólový moment. Změna permitivity plynu souvisí se změnou teploty a tlaku, jako důsledek změny počtů molekul v jednotce objemu [4].

1.5 Dielektrické ztráty v plynech

Za normálních podmínek jsou volnými elektrickými náboji v plynech kladné a záporné ionty a nepatrné množství elektronů. Vázanými náboji jsou v plynech kladně nabitá jádra a elektrony v atomech a molekulách a náboje dipólů.

Volné a vázané náboje se pohybují v elektrickém poli a při jeho změnách, elektrická energie se mění na teplo, jak při stejnosměrném tak při střídavém napětí. Pohyb vázaných nábojů v plynných izolantech prakticky nevyvolá dielektrické ztráty. Výjimkou jsou velmi vysoké frekvence a rezonanční polarizace. Ztráty způsobené dipólovou polarizací v plynech jsou zanedbatelné. Elektronová polarizace je bezztrátová ve všech skupenstvích. Dielektrické ztráty se zvyšují při zvyšování koncentrace volných nábojů při nárazové ionizaci a nazýváme je ionizačními ztrátami [2][4].

Protože polarizační složka dielektrických ztrát v plynech je zanedbatelná, mají praktický význam až do ionizačního napětí jen vodivostní ztráty, nad ionizačním napětím – ztráty vodivostní a ionizační, při velmi vysokých frekvencích – rezonanční ztráty.

Při pouze vodivostních ztrátách platí pro ztrátový činitel vztah:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\gamma}{\omega \cdot \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0} \quad (1.1)$$

kde γ – konduktivita plynu (frekvenčně nezávislá),

ω – úhlová frekvence,

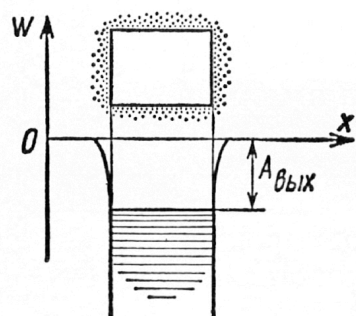
ε_r – relativní permitivita,

ε_0 – permitivita vakua $8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$ [5].

Ztrátový činitel $\operatorname{tg} \delta$ s růstem frekvence se snižuje. Vzrůst $\operatorname{tg} \delta$ s napětím je znakem ionizace, platí to pro samostatný plyn a tuhý izolant obsahující plynové (vzduchové) dutinky [4].

1.6 Výstupní práce elektronů

Volné elektrony v kovu mají možnost opustit kov jen v případě, že získají určitou kinetickou energii. Výstupu elektronů z kovu brání několik příčin. Jedna z nich je ta, že elektron při opuštění povrchu kovu zanechává kladně nabitý iont, a na překonání vzniklé přitažlivé síly je potřebná dodatečná energie. Druhá příčina je v tom, že elektrony během teplového pohybu se oddalují od povrchu kovu a vytvářejí zápornou oblast. Hustota této oblasti rychle klesá s růstem vzdálenosti od povrchu. Pod touto oblastí zůstává vrstva kladně nabitých iontů. Důsledkem je vznik dvojité elektrické vrstvy podobné kondenzátoru, který nemá vnější elektrické pole, ale na překročení této vrstvy je potřebné vykonání práce. Proto energii potřebnou na uvolnění elektronů nazýváme výstupní práce a značíme symbolem A [12][13].



Obr. 1.3 Výstupní práce elektronů [13]

1.7 Pohyblivost iontů a elektronů v plynu v elektrickém poli

Při působení elektrického pole na ionty a elektrony v plynu se superponuje tepelný pohyb s rovnoměrně zrychleným pohybem ve směru, nebo proti směru, elektrického pole. V intervalu mezi srážkami eklekticky nabitých částic s neutrálními vyvolá elektrické pole konstantní zrychlení:

$$a = \frac{qE}{m} \quad (1.2)$$

kde m – hmotnost iontu,
 q – náboj iontu,
 E – intenzita elektrického pole [4].

Pro pohyblivost iontu platí vzorec

$$u = \frac{0,96q\lambda N}{\sqrt{3RTM}} \quad (1.3)$$

kde R – molární plynová konstanta,
 T – absolutní teplota,
 M – molární hmotnost,
 N – Avogadrova konstanta [4].

S růstem hmotnosti molekuly se pohyblivost iontů zmenšuje. Pohyblivost elektronů je přibližně 1000 krát vyšší než pohyblivost iontů [4].

Pro slabé elektrické pole platí, že střední doba mezi dvěma srážkami je stejná jako bez pole. V silných elektrických polích se střední doba mezi dvěma srážkami zkrátí.

1.8 Užití plynných izolantů

Ve vysokonapěťové elektrotechnice se používají takzvané elektronegativní plyny, u kterých je zvýšení průrazného napětí způsobeno snížením pohyblivosti iontů. Jsou to plyny obsahující chlor nebo fluor. Snížení pohyblivosti iontu se vysvětluje zachycováním volných elektronů molekulami plynu [2][3].

V současnosti je ve vysokonapěťové elektrotechnice nejvíce používán hexafluorid síry

SF₆. Na úrovních napětí VVN a ZVN se setkáváme převážně s vakuovými přístroji. Důležitou vlastností plyných izolantů je schopnost jejich regenerace, to vede k rychlému obnovení elektrické pevnosti po průrazu.

Fluorid sírový SF₆ je bez barvy, bez zápachu, nehořlavý, netoxický za normálních podmínek a nekorozivní. Elektrická pevnost je 2,3 krát větší než u dusíku. Má téměř pět krát vyšší hustotu než vzduch. Teplota varu je -63,8 °C, teplota rozkladu je 500 °C. Při rozkladu se uvolňují toxické látky. Je používán jako izolační a chladicí medium, u transformátoru místo oleje, u vypínačů VVN pro schopnost přerušovat oblouk, v zapouzdřených rozvodnách. Vlivem své chemické inertnosti má velmi dlouhou životnost v atmosféře [2][3].

SF₆ se rozkládá také při běžném použití VN zařízení v případě potlačení oblouku, jedovaté zbytky zůstávají uvnitř systému, což znamená, že při jeho rozebírání a recyklaci je nutno přijmout bezpečnostní opatření. Na výrobu plynu SF₆ se vztahuje Kjótský protokol, neboť přispívá ke skleníkovému efektu [16].

Fluorokarby, například C₃F₆, C₄F₈, jsou tepelně stabilnější proti SF₆. Průrazné napětí je přibližně stejné jako u SF₆. Ale při působení elektrického oblouku vylučují elementární uhlík, z toho důvodu nejsou vhodné jako zhasací medium.

Chlorofluorokarby, například CCl₂F₂. Rozkládá se při 750 °C a za přítomnosti vodíku tvoří kyseliny HF a HCl, v elektrickém oblouku vzniká jedovatý fosgen COCl₂ [4].

2 Problematika elektrické pevnosti plynných izolantů

2.1 Pojem elektrická pevnost

Napětí, při kterém nastane průraz, nazýváme průrazným napětím U_{bd} a odpovídající hodnotu intenzity elektrického pole v moment průrazu nazýváme elektrickou pevností E_{bd} izolantu. V případě homogenního elektrického pole je intenzita po celé dráze d stejná, elektrické pevnosti odpovídá vzorec

$$E_{bd} = \frac{U_{bd}}{d} \quad (2.1)$$

V závislosti na druhu působícího napětí rozlišujeme střídavou elektrickou pevnost (50 Hz), impulsní elektrickou pevnost (např. rázová vlna 1,2/50) a stejnosměrnou pevnost. Obvykle platí, že stejnosměrná může být až dvojnásobně větší než střídavá [5].

2.2 Průraz plynného izolantu

Průraz znamená náhlý vzrůst elektrické vodivosti izolantu, čímž izolant ztrácí svoje vlastnosti. V první etapě vzrůstá elektrická vodivost a proud protékající v místě průrazu. V druhé etapě vzniká oblouk a tepelné účinky na izolant a elektrody. Nejdůležitějšími faktory, které mají vliv na elektrickou pevnost, jsou: forma elektrického pole (homogenita), druh napětí, tvar křivky napětí, doba působení napětí [4].

V případě plynného izolantu také používáme termín přeskok, protože plyn má schopnost regenerace, a zhoršení izolačních vlastností je jen dočasné.

2.3 Ionizace plynů působením vnějších ionizačních činidel

Atom představujeme jako kladně nabitě jádro, kolem kterého se pohybují elektrony po drahách s různými poloměry. Atom může být v určitých energetických stavech, s příslušnou vnitřní energií. Pro přechod elektronu na dráhu vzdálenější od jádra musíme dodat budící energii z vnějšího zdroje. Při určitém vzdálení od jádra se elektron stává volným – atom se ionizuje, a dodanou energii nazýváme ionizační energie W_i [4].

Budící energie ionizovaného helia je 40,6 eV, budící energie neionizovaného helia je 19,8 eV, první ionizační potenciál helia je 24,5 V a druhý 54,2 V [4][14].

Při přechodu elektronu na bližší dráhu k jádru se uvolňuje energie, která se rovná rozdílu energií vzbuze­né a normální dráhy $W_1 - W_2$. Frekvence vznikajícího záření je dána rovnicí [4].

$$W_1 - W_2 = h\nu \quad (2.2)$$

kde h – Planckova konstanta,

ν – kmitočet.

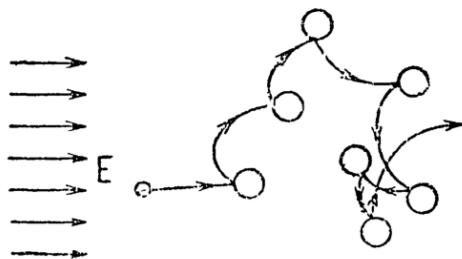
Přechod elektronu ze vzbuze­ného stavu do stavu normálního probíhá většinou samovolně. Životnost většiny vzbuze­ných stavů je malá, řádově 10^{-7} až 10^{-8} s [4][14].

Hladiny, ze kterých elektron nemůže samovolně přejít na nejbližší dráhu k jádru vyzářením získané potenciální energie, nazýváme metastabilními. Přechod z metastabilního stavu do normálního probíhá při působení vnějšího zdroje energie, samovolný přechod je možný, ale málo pravděpodobný [4].

2.4 Nárazová ionizace

Každý plyn za normálních podmínek obsahuje nepatrné množství elektricky nabitých částic. Například vzduch obsahuje v každém kubickém centimetru přibližně 500 dvojic kladných a záporných částic. Bez elektrického pole se nabitě částice pohybují tepelným pohybem jako neutrální molekuly [4].

V elektrickém poli jsou kladně nabitě částice urychlované ve směru pole, záporné – proti směru. Na tepelný pohyb se superponuje rovnoměrně zrychlený pohyb v elektrickém poli a výsledný tvar dráhy částice se skládá z obloučků [1][4].



Obr. 2.1 Dráha pohybu iontů v plynu při působení elektrického pole [14]

Energie, kterou elektrické nabitě částice získávají v elektrickém poli, vyjadřuje rovnice

$$W = Eq\lambda_{str} \quad (2.3)$$

kde E – intenzita elektrického pole,

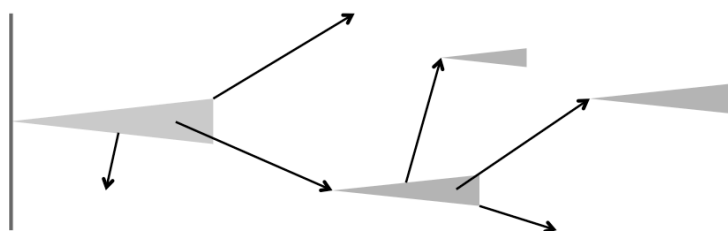
q – náboj,

λ_{str} – střední volná dráha (střední vzdálenost, kterou projde částice bez srážky)

Při pružných srážkách neutrální částice dostává od nabitě kinetickou energii. Při nepružné srážce nastává ionizace neutrální částice. Při nárazové ionizaci hrají hlavní roli elektrony, protože mají větší střední volnou dráhu a získávají větší energii mezi srážkami než ionty. Při ionizaci elektronem je vznikající elektron odpuzován, ale při ionizaci kladným iontem je vznikající elektron k iontu přitahován a může lehko rekombinovat. V případě, že kladný iont narazí na vnější elektron neutrální molekuly, podmínky pro vyražení elektronu jsou nepříznivé, poněvadž při velkém rozdílu hmotností je energie odevzdaná elektronu při nárazu malá. Kladné ionty vyřazují elektrony při dopadu na povrch katody [4][7].

2.5 Fotoionizace

Zánikem vzbuzeného stavu elektronu vzniká záření – fotony, které se šíří rychlostí větší než rychlost částic v lavině způsobené nárazovou ionizací, a ionizují plyn postupnou ionizací. Podmínkou pro fotoionizace je $h\nu \geq W_i$ [1].



Obr. 2.2 Schematické znázornění růstu striméru

Na obrázku 2.2 je schematicky znázorněn růst striméru, který se šíří rychleji než elektronová lavina. Laviny je zobrazeny jako trojúhelníky, dráhy fotonů – šipky. Jednotné laviny v striméru narostou natolik, že se navzájem spojí a vznikne vodivý kanál ionizovaného plynu [4].

Současně se s růstem striméru směrem k anodě začíná formovat kladný strimér směrem ke katodě. Koncentrace kladných iontů je nejvyšší v oblasti anody. Po dosažení určité koncentrace vzniká intenzivní fotoionizace, elektrony vznikající fotoionizace se přitahují kladným prostorovým nábojem k čelní části kladného striméru. V důsledku dopadu kladných iontů na katodu katoda emituje elektrony [4].

2.6 Povrchová ionizace

Při působení na povrch elektrody krátkovlnného záření se z povrchu uvolňují elektrony, a hovoříme o výstupní práci elektronu. Energii můžeme také dodat ve formě tepla. Tento jev je ve značné míře závislý na použitém kovu elektrod [5].

2.7 Rekombinace a zánik ionizovaných částic

Rekombinací nazýváme zánik elektricky nabitých částic při vzájemných srážkách. Iontová rekombinace nastává při srážce kladného iontu se záporným s uvolněním ionizační energie molekuly vzniklé z kladného iontu, a spotřebuje se energie afinity elektronů molekuly vzniklá ze záporného iontu. Elektronová rekombinace – srážka kladného iontu s elektronem. Vzniklá neutrální molekula dostává kinetickou energii původního kladného

iontu a uvolní se energie ve formě záření s frekvencí

$$h\nu = W_i + \frac{m_e v_e^2}{2} \quad (2.4)$$

kde W_i je ionizační energie vzniklé částice, $\frac{m_e v_e^2}{2}$ – kinetická energie elektronu [4].

Čím je vyšší vzájemná rychlost elektricky nabitých částic, tím menší je pravděpodobnost rekombinace, proto pravděpodobnost elektronové rekombinace je menší než iontové [4].

Iontová rekombinace probíhá intenzivněji při vyšší koncentraci iontů. Změna počtu iontů v jednotce objemu dn za čas dt je

$$\frac{dn_+}{dt} = \frac{dn_-}{dt} = -\alpha n_+ n_- \quad (2.5)$$

kde α – činitel rekombinace (pro vzduch je $1,52 \cdot 10^{-12} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) [1],

n_+ , n_- – počet kladných a záporných iontů v jednotce objemu.

Za předpokladu že $n_+ = n_- = n$, po integraci podle času od 0 do t a podle n od počáteční koncentrace n_0 do n dostáváme

$$n = \frac{n_0}{1 + n_0 t \alpha} \quad (2.6)$$

Z toho plyne, že počet iontů v jednotce objemu se zmenší za dobu t z počátečního počtu n_0 na n podle hyperbolického zákona. [1] [4].

Při velké počáteční koncentraci můžeme psát

$$n = \frac{1}{\alpha t} \quad (2.7)$$

Takže koncentrace iontových dvojic nezávisí na velikosti počáteční koncentrace.

Po dosažení stacionárního stavu se počet iontových dvojic vznikajících v jednotce objemu a v jednotce času n_2 rovná počtu zanikajících dvojic iontů $n_1 = \alpha n_0^2$, potom

$$n_0 = \sqrt{\frac{n_1}{\alpha}} \quad (2.8)$$

Za normálních podmínek ve vzduchu vzniká za 1 s v 1 cm³ tři až pět párů iontů ($n_2 = 4$). Činitel rekombinace pro vzduch za normálních podmínek je $\alpha = 1,6 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$. Potom počet iontových dvojic v 1 cm³ [4]

$$n_0 = \sqrt{\frac{4}{1,6 \cdot 10^{-6}}} = 1250 \frac{1}{\text{cm}^3} \quad (2.9)$$

Aby počet iontů poklesl na polovinu počáteční hodnoty, je potřebný čas [4]

$$t = \frac{1}{n_0 \alpha} = \frac{1}{1250 \cdot 1,6 \cdot 10^{-6}} = 500 \text{ s} \quad (2.10)$$

Je vidět že rekombinací zanikají ionty poměrně pomalu. Koeficient rekombinace v plynu za normálních podmínek je řádově $10^{-6} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$ [4].

Při dopadu volného elektronu na anodu se uvolní energie daná součtem kinetické energie elektronu a výstupní práce kovu, která se projeví jako teplo a záření, elektron pokračuje ke kladnému pólu zdroje. Při dopadu kladného iontu na katodu se neutralizuje jedním elektronem katody a vzniklá neutrální molekula se vrací do prostoru mezi elektrodami. Uvolní se energie daná součtem kinetické energie iontu a ionizační energie minus výstupní práce elektronu. Tím také může být způsobeno uvolnění sekundárních elektronů z katody [4][5].

Ionizované částice zanikají i na kovových stěnách objemu, ke kterým se přitahují silami vytvořenými indukovaným nábojem. Na stěnách z izolantu se částice drží tak dlouho, až se objeví v okolí částice s opačným nábojem a nastane jejich rekombinace [4].

2.8 Townsendovy ionizační koeficienty

Ionizační číslo α je počet dvojic nosičů vytvořených elektronem na jednotkové dráze. Ionizační číslo β je počet dvojic nosičů vytvořených kladným iontem na jednotkové dráze. Kladné ionty mají malou pohyblivost pro nárazovou ionizaci, ale způsobí značnou povrchovou ionizaci při dopadu na katodu. Potom ionizační číslo γ udává průměrný počet elektronů vyrážených z povrchu katody při dopadu kladného iontu [5][12].

Počet volných elektronů při nárazové ionizaci roste exponenciálně se vzdáleností (d) od katody, jeden elektron vytvoří lavinu o počtu e^{ad} . Tím pádem výraz $(e^{ad} - 1)$ bude představovat počet kladných iontů vytvořených jedním elektronem emitovaným z katody. Potom výraz $\gamma(e^{ad} - 1)$ je počet elektronů vyražených těmito kladnými ionty z katody [5].

Z toho dostáváme podmínku samostatného výboje, při splnění které výboj probíhá samostatně bez působení vnějších ionizačních činidel:

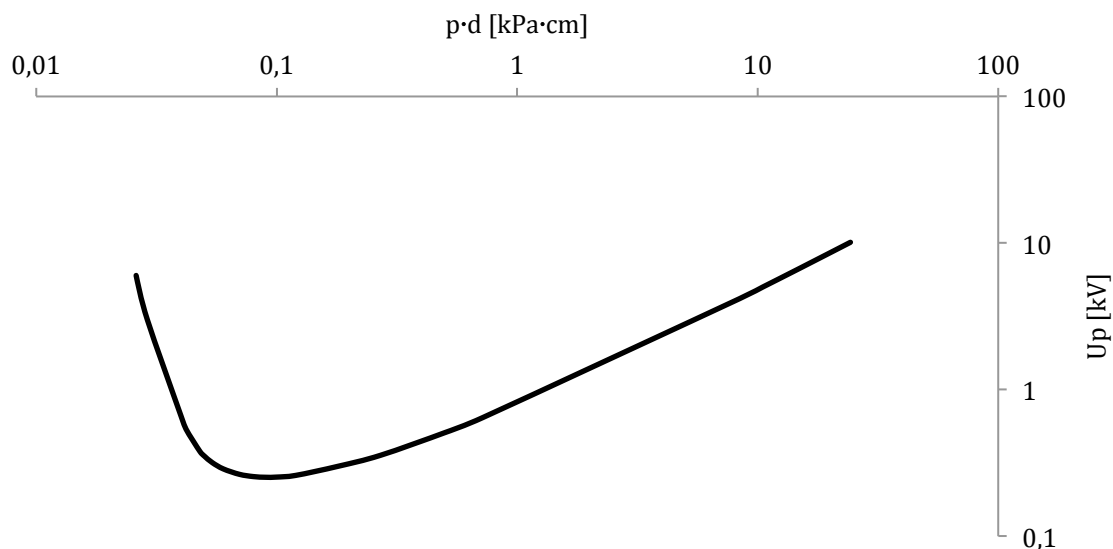
$$\gamma(e^{ad} - 1) = 1 \quad (2.11)$$

Napětí, při kterém vzniká samostatný výboj, nazýváme počátečním napětím výboje. Pro silně nehomogenní pole je to napětí, při kterém vzniká koróna.

2.9 Paschenův zákon

Za normálních podmínek, při atmosférickém tlaku 101,3 kPa a teplotě 20 °C, je elektrická pevnost vzduchu mezi elektrodami (U_p) při vzdálenosti 1 cm přibližně 32 kV_{max}/cm, tj. 22,6 kV/cm (efektivní hodnota). Elektrická pevnost plynu je silně závislá na hustotě plynu. Zvyšováním tlaku se zmenšuje vzdálenost mezi molekulami a zmenšuje se střední volná dráha molekul a elektronů mezi dvěma srážkami, z toho plyne, že pro vznik nárazové ionizaci potřebujeme vyšší intenzitu elektrického pole. Při snižování tlaku se plyn rozpíná a střední volná dráha se zvyšuje, snižuje se elektrická pevnost. Ale po dosažení určité hodnoty U_p se znovu zvyšuje. Vysvětleno je to tím, že počet molekul plynů v jednotce objemu se zmenšuje a klesá pravděpodobnost srážek molekul s elektrony. Jestliže zvětšíme vzdálenost mezi elektrodami k -krát a současně zmenšíme tlak k -krát (nebo naopak), průrazné napětí se nezmění. Tato závislost se nazývá Paschenovým zákonem [1][4].

Při tlacích řádově stovky atmosfér je platnost Paschenova zákona omezena [12].



Obr. 2.3 Průběh závislosti přeskovového napětí ve vzduchu na tlaku a vzdálenosti elektrod (Paschenova křivka)

Minimální hodnota průrazného napětí pro různé plyny je v rozmezí od 280 do 420 V. Pro vzduch je minimální hodnota přibližně 300 V. Bod minima je určen při atmosférickém tlaku na vzdálenosti mezi elektrodami řádově 10^{-2} až 10^{-3} mm, které se málo vyskytují v technické praxi, oblast minima a levá část křivky mají hlavní význam při nízkých tlacích řádově 10 až 100 Pa a méně. Potom nárazová ionizace prakticky není možná, protože většina elektronů projde vzdálenost mezi elektrodami beze srážek [4].

Při malých změnách tlaku a teploty v okolí normálních atmosférických podmínek je průrazné napětí přímo úměrné hustotě plynu [4]:

$$U_{bd} = U_{bd0} \delta \quad (2.12)$$

kde U_{bd} – průrazné napětí pro daný tlak a teplotu,
 U_{bd0} – průrazné napětí při normálních podmínkách,
 δ – poměrná hustota vzduchu.

Poměrná hustota vzduchu se vypočítá podle vzorce [1][4]:

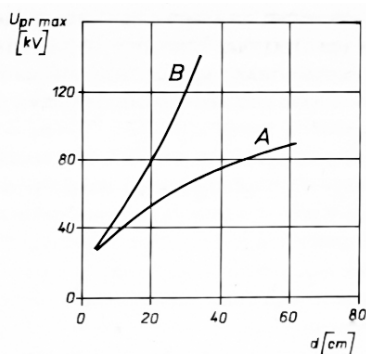
$$\delta = p \cdot 10^{-5} \cdot \frac{273 + 20}{273 + \vartheta} = 293 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{p}{273 + \vartheta} \quad (2.13)$$

kde p – tlak v Pa,
 ϑ - teplota v °C.

2.10 Elektrická pevnost plynů v nehomogenním poli

V nehomogenním poli, v místech, kde intenzita pole přesahuje elektrickou pevnost plynu, vzniká takzvaný částečný výboj – koróna. Koróna při dalším zvyšování napětí přechází na jiskrový výboj a oblouk.

Na obrázku 2.4 jsou hodnoty průrazného napětí a počátečního napětí vzniku koróny pro vzduch. Při malých vzdálenostech jsou hodnoty průrazného a počátečního napětí téměř rovny, při vyšších vzdálenostech koróna vzniká při nižším napětí, než je napětí průrazné. Se zvýšením vzdáleností mezi elektrodami se stupeň homogenity pole zmenšuje [4].



Obr. 2.4 Závislost napětí vzniku koróny (A) a průrazného napětí (B) na vzdálenosti vodičů ve vzduchu (dva paralelní vodiče o průměru 8 mm) [4]

Stupeň homogenity určuje takzvaný Schwaigrův faktor – bezrozměrný koeficient, značí se písmenem η a pohybuje v rozmezí od 0 do 1. Ze vztahu 2.14 je patně že pro $\eta = 1$ pole je homogenní. Větší hodnota η odpovídá efektivnějšímu použití izolačních vlastností dielektrika [17][18].

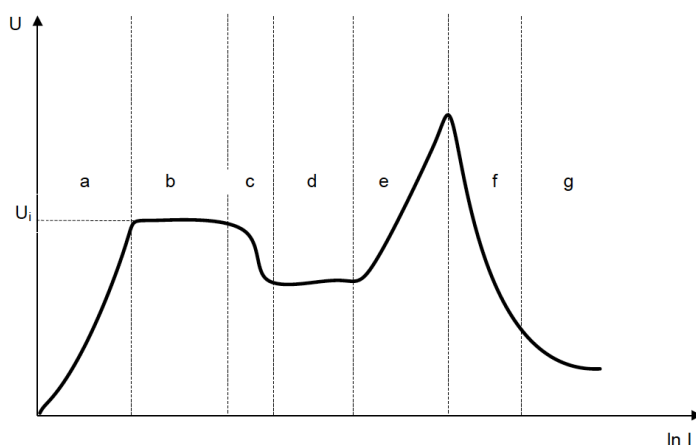
Schwaigrův faktor je definován jako poměr hodnot intenzity elektrického pole v případě homogenního pole a maximální intenzity, která se vyskytuje v daném uspořádání elektrod [17][18]:

$$\eta = \frac{E_{\text{mean}}}{E_{\text{max}}} = \frac{U}{d} \cdot \frac{1}{E_{\text{max}}} \quad (2.14)$$

Protože průrazné napětí souvisí s E_{max} , můžeme vztah 2.14 zapsat ve tvaru $U_{\text{bd}} = E_{\text{max}} \cdot d \cdot \eta$. Tato rovnice znázorňuje význam Schwaigrova koeficientu a je vidět, že nehomogenní pole snižuje průrazné napětí [17].

2.11 Základní druhy elektrických výbojů

Na obrázku část křivky označena **a** znázorňuje *nesamostatný výboj* s velmi malým proudem, způsobeným transportem elektrických nábojů vlivem vnějších ionizačních činidel. V části křivky označenou **b** složka rychlosti nosičů, způsobená elektrickým polem, je větší než rychlost tepelného pohybu a mohou nastat podmínky pro nárazovou ionizaci. Při srážce se nevyzařuje viditelné záření a výboj nazýváme *temným Townsendovým výbojem* [7][11].

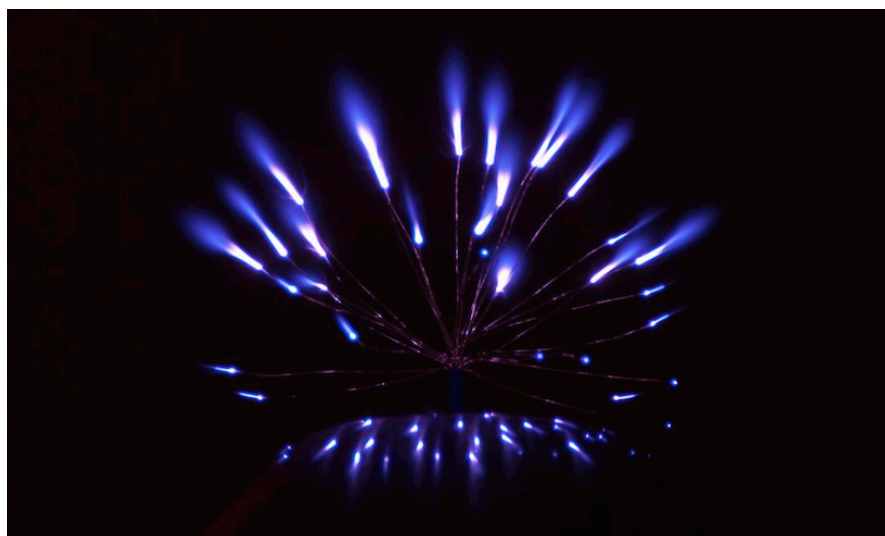


Obr. 2.5 Druhy elektrických výbojů [11]

Dále následuje *neúplný samostatný výboj* (**c**), který nazýváme *koróna*. V oblasti **d** je znázorněn *normální doutnavý výboj*, při němž je energie a hustota proudu nízká, a katoda i plyn zůstávají chladné. Výboj s parametry příslušejícími části **e** křivky nazýváme *anomální elektrický výboj*. Při proudech větších než kiloampéry a silném elektrickém poli nastává *jiskrový výboj* – část křivky **f**. V důsledku vysoké elektrické vodivosti jiskrového kanálu po propojení obou elektrod se snižuje napětí mezi nimi a výboj nazýváme *obloukový výboj* – úsek **g** křivky [7][11].



Obr. 2.6 *Příklad doutnavého výboje*



Obr. 2.7 *Příklad korónového výboje*

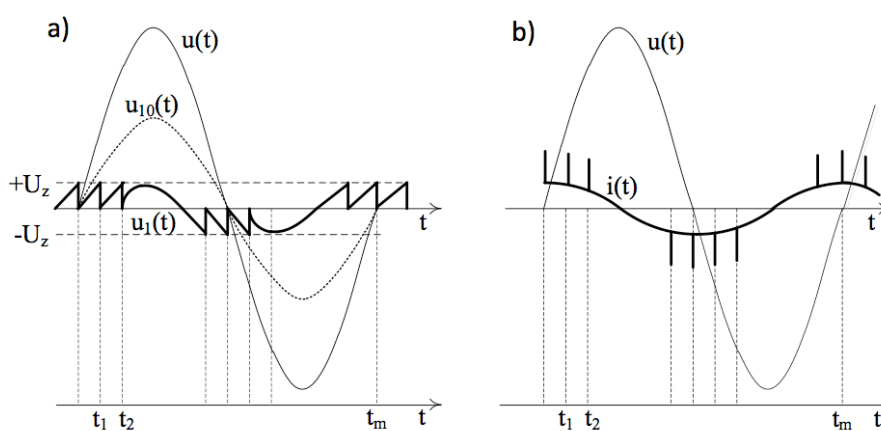


Obr. 2.8 *Příklad obloukového výboje*

2.12 Částečné výboje

Částečné výboje mají lokální charakter a nepřemost'ují vzdálenost mezi elektrodami. Projevují se jako malé a krátké proudové impulsy s dobou trvání kratší než $1 \mu\text{s}$, superponované na průběh kapacitního proudu procházejícího objektem. Podle místa výskytu dělíme částečné výboje na vnější (doutnavý nebo korónový), vnitřní (výboje v plynných dutinkách pevného dielektrika) a povrchové (klouzavý výboj) [11].

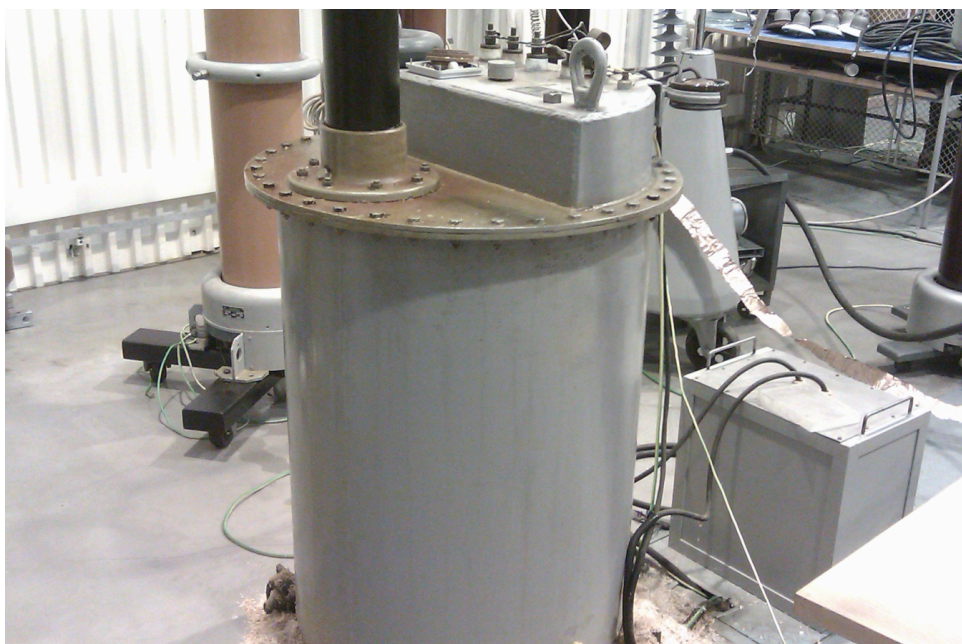
Časový průběh proudu vnitřních částečných výbojů znázorňuje obrázek.



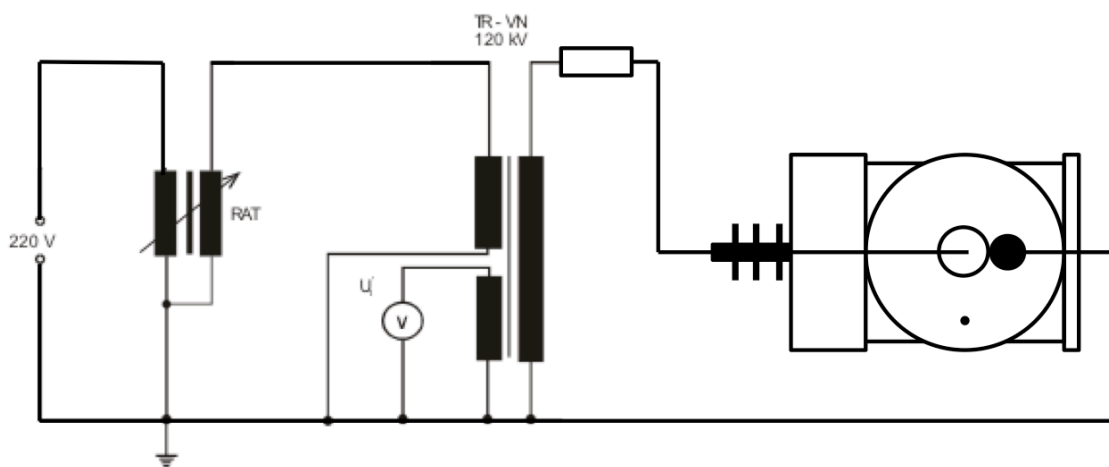
Obr. 2.9 Průběhy napěťových a proudových impulzů částečných výbojů [8]

3 Měření elektrické pevnosti vzduchu za atmosférického tlaku s elektrodami v uzavřeném a otevřeném objemu

Pro praktické měření elektrické pevnosti vzduchu byl použit jednofázový zkušební transformátor ČKD 120 kV, 10 kVA, který byl napájen z regulačního autotransformátoru RAT s motorickým ovládáním. Hodnoty přeskokového napětí byly odečítány z digitálního voltmetru připojeného na měřicí vinutí transformátoru, které má převod 1:1000. Daný voltmetr zobrazuje efektivní hodnoty, proto byl proveden přepoččet na vrcholové hodnoty.

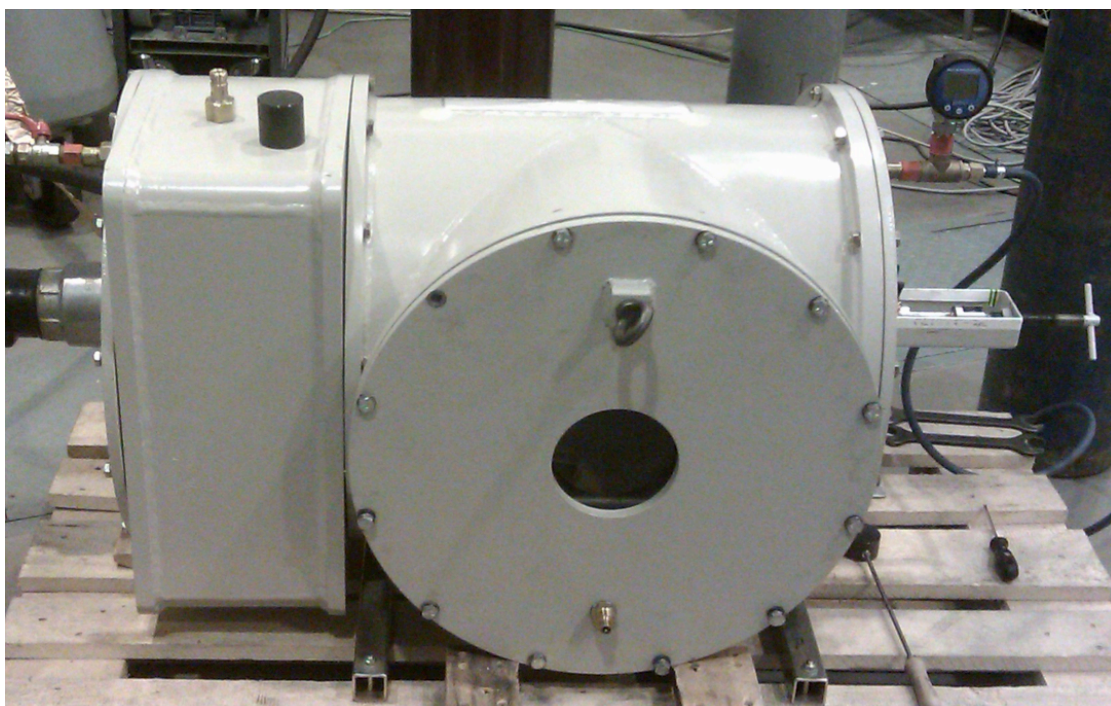


Obr. 3.1 Pohled na zkušební transformátor ČKD 120kV



Obr. 3.2 Schéma zapojení pro měření přeskokového napětí [10]

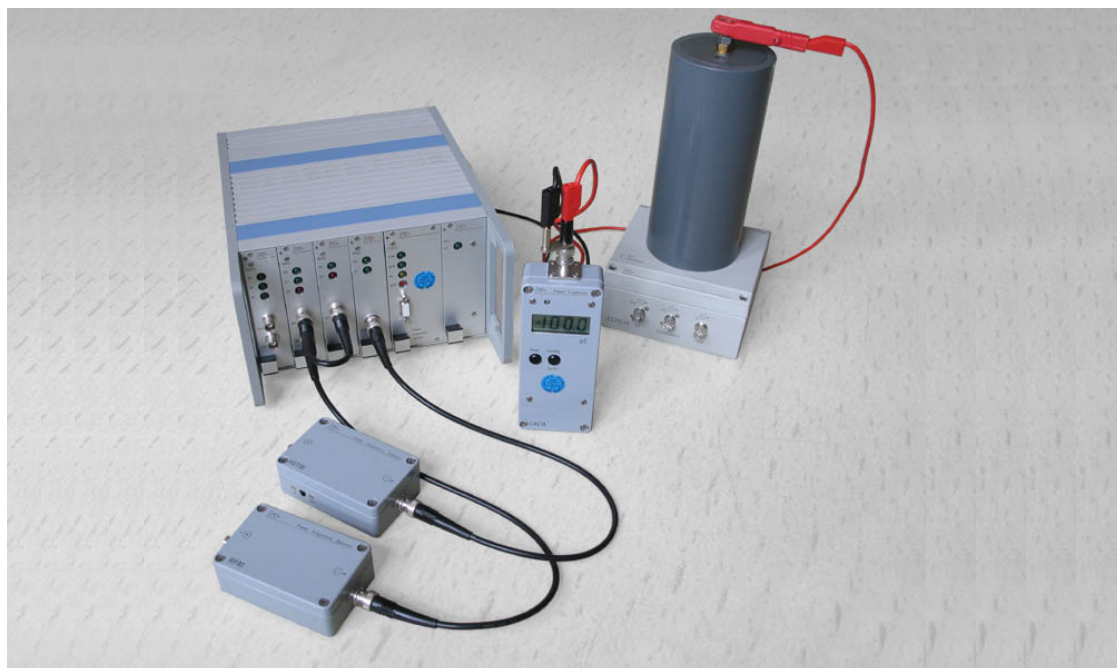
Zvolené elektrody byly umístěny uvnitř kovové nádoby s možností hermetického uzavření. Jedna z elektrod představovala měděnou kouli o poloměru 75 mm, druhá elektroda byla hrotová měděná a měla poloměr 0,5 mm. Pro nastavení požadované vzdálenosti mezi elektrodami byl použit pohyblivý přívod instalovaný na boční straně nádoby. Čelní strana nádoby měla otvor s těsnícím víkem. Při měření přeskokového napětí v uzavřené nádobě byl otvor hermeticky uzavřen, ale tlak uvnitř nádoby zůstal atmosférický.



Obr. 3.3 Pohled na tlakovou nádobu

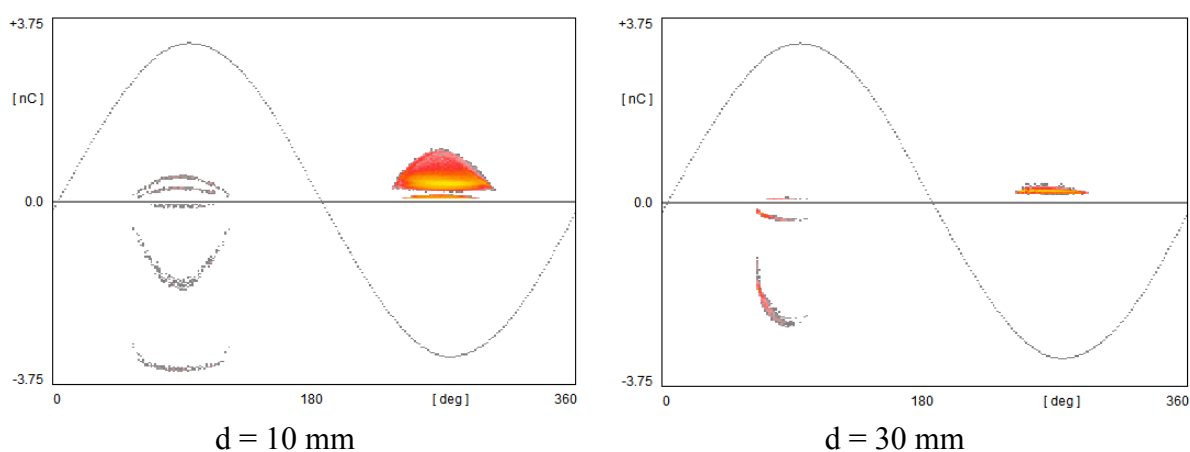
Měření probíhalo v několika etapách. Nejdřív bylo změřeno přeskokové napětí pro vzdálenosti mezi elektrodami od 5 do 90 mm. Pak bylo připojeno zařízení pro měření částečných výbojů a pro uvedené vzdálenosti bylo změřeno počáteční napětí koróny. Bylo takto postupováno z důvodu ochrany měřicího zařízení.

Digitální měřicí systém firmy Power Diagnostix snímá signál částečných výbojů z napěťového děliče 1:250 připojeného paralelně do zkušebnímu objektu. Dělič je tvořen sériovou kombinací vazební kapacity 1 nF a snímací impedancí. Měřený signál je z výstupu snímací impedance převeden přes aktivní předzesilovač na vstup měřicího detektoru. Po úpravě signálu AD převodníkem a softwarovém zpracování jsou signály částečných výbojů rozříděny podle velikosti jednotlivých impulzů, fáze jejich výskytu ve vztahu k fázi zkušebnímu napětí a četnosti výskytu jednotlivých impulzů [6].



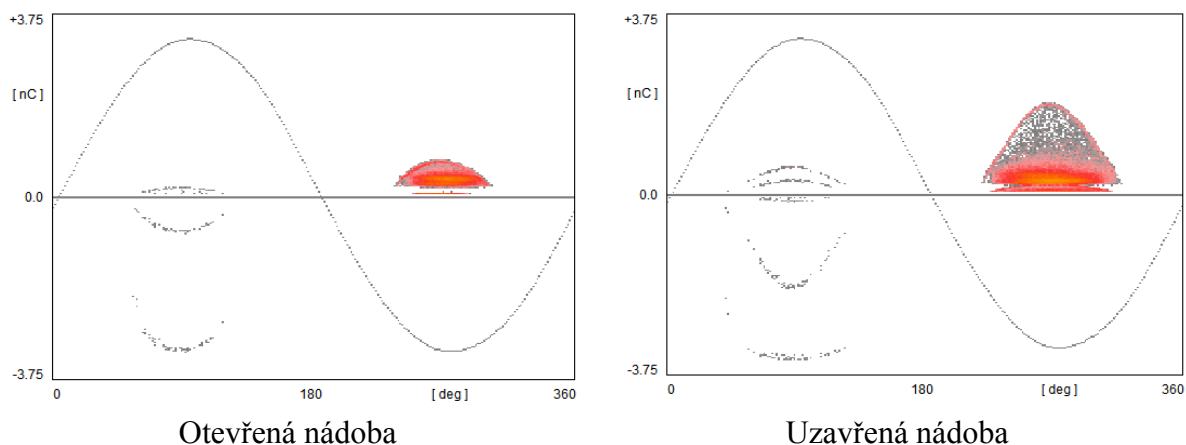
Obr. 3.4 Měřicí systém Power Diagnostix pro měření částečných výbojů [15]

Na obrázku 3.4 jsou uvedeny záznamy částečných výbojů pro vzdálenosti mezi elektrodami 10 a 30 mm, na nichž je vidět, jak se mění charakter výskytu výbojů. Na větší vzdálenosti se objevuje větší počet impulzů v kladné části půlperiody zkušebního napětí oproti vzdálenosti 10 mm a zmenšuje se velikost zdánlivého náboje v záporné části půlperiody.



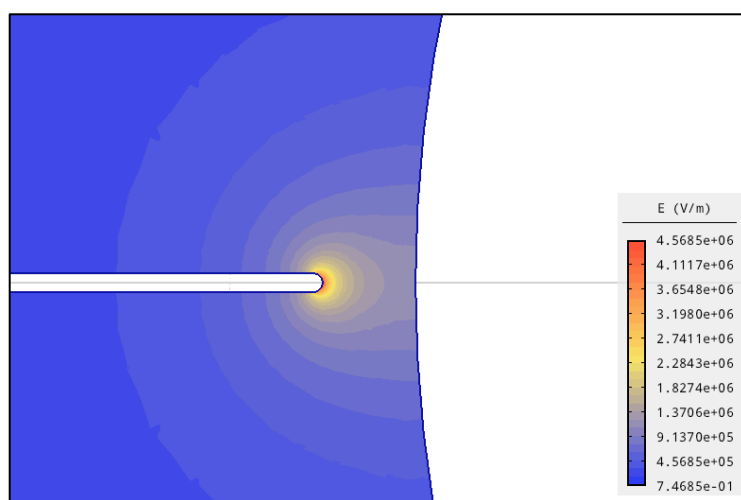
Obr. 3.5 Velikost zdánlivého náboje částečných výbojů v závislosti na fázi zkušebního napětí

Při porovnání naměřených dat pro otevřený a uzavřený objem je patrné, že v případě uzavřeného objemu v záporné části půlperiody byly zaznamenány impulzy s větším zdánlivým nábojem oproti otevřenému objemu. Maximální hodnota zdánlivého náboje pro první případ byla 0,75 nC, pro druhý případ 1,87 nC.



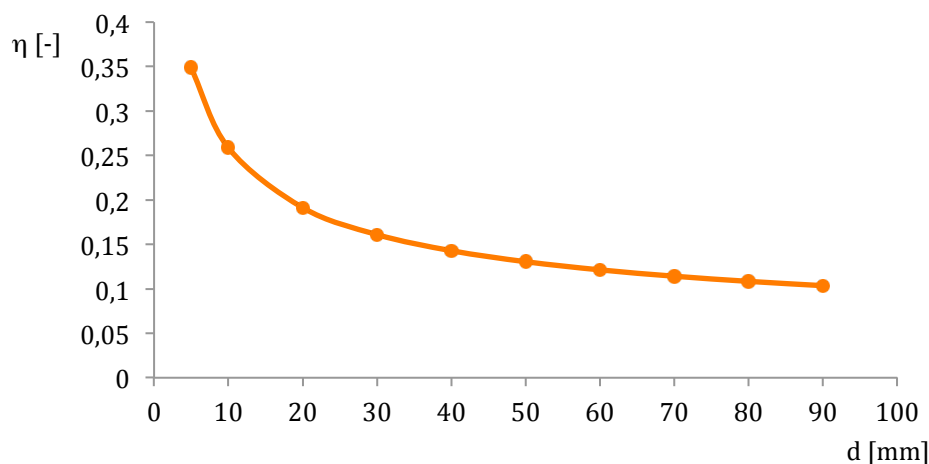
Obr. 3.6 Velikost zdánlivého náboje částečných výbojů v závislosti na fázi zkušebního napětí při vzdálenosti mezi elektrodami 20 mm

V daném měření musíme uvažovat nehomogenní elektrické pole, proto spočteme stupeň homogenity. Podle vzorce 2.14 pro výpočet Schwaigrova koeficientu potřebujeme vědět maximální hodnotu intenzity elektrického pole pro dané uspořádání elektrod. Pro ten účel byl použit program Agros 2D. Na obrázku jsou výsledky modelování. Pro názornost je uvedena jen zvětšená část nasimulované úlohy.



Obr. 3.7 Rozložení intenzity elektrického pole pro elektrody R0,5-R75

Pro každou vzdálenost elektrod byla odečtena maximální intenzita elektrického pole a výsledek výpočtu koeficientu homogenity je uveden na grafu 3.7. Jak je uvedeno v [18], v homogenních polích přeskok nastává bez výskytu částečných výbojů, jinými slovy přeskokové napětí je rovno počátečnímu napětí vzniku částečného výboje.



Obr. 3.8 Schwaigrův faktor pro elektrody R0,5 – R75

Vypočtené hodnoty přeskových napětí a napětí zapálení koróny jsou uvedeny v tabulkách 3.I. a 3.II. Hodnoty jsou přepočítané na normální atmosférické podmínky. Pro vzdálenost 5 mm k přeskoku dochází bez výskytu koróny. Pro vzdálenost mezi elektrodami od 10 do 90 mm koróna vzniká při skoro stejném napětí pro všechny vzdálenosti. Z toho plyne, že pro dané elektrody na vzdálenosti od 10 mm do 90 mm je elektrické pole silně nehomogenní a odpovídá tomu Schwaigrův koeficient $\eta < 0,25$, pro vzdálenost méně než 5 mm je elektrické pole slabě nehomogenní a odpovídá tomu Schwaigrův koeficient $\eta > 0,25$.

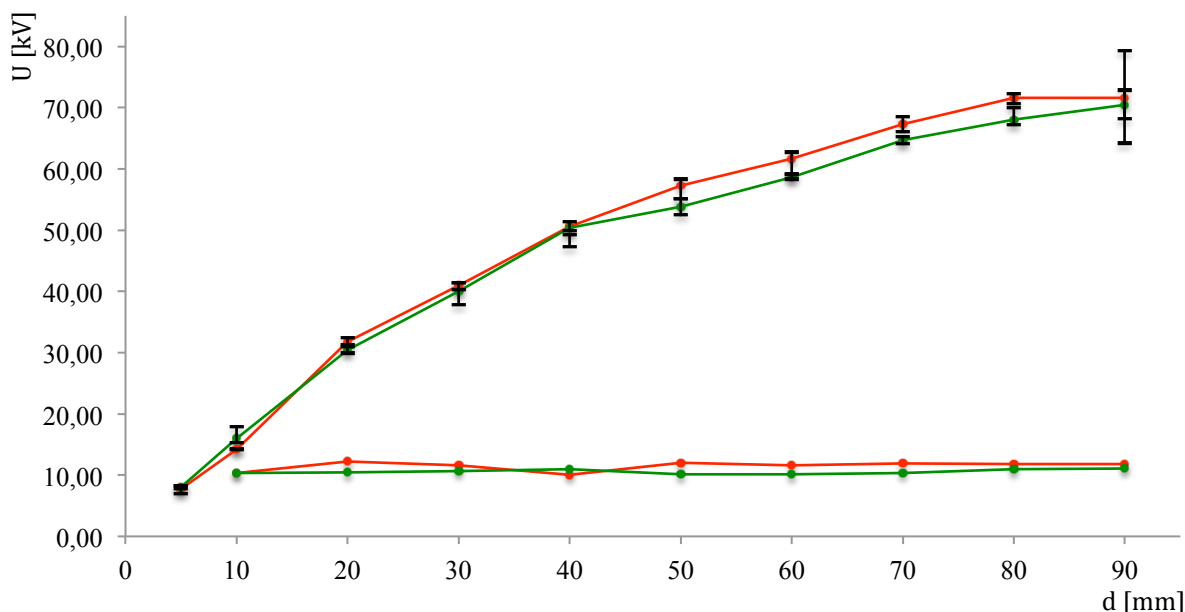
Tab. 3.I Přeskové napětí, počáteční napětí koróny a stupeň nehomogenity pro otevřený objem (elektrody R0,5 – R75)

Vzdálenost mezi elektrodami	Přeskové napětí	Počáteční napětí vzniku koróny	Střední intenzita elektrického pole	Maximální intenzita elektrického pole	Schwaigrův faktor
d [mm]	U_{bd} [kV]	U_{inc} [kV]	E_{mean} [V/m]	E_{max} [V/m]	η [-]
5	8,03	-	1606000	4603600	0,349
10	16,01	10,30	1601000	6191200	0,259
20	30,45	10,45	1522500	7958400	0,191
30	40,08	10,64	1336000	8297300	0,161
40	50,43	10,95	1260750	8822900	0,143
50	53,84	10,12	1076800	8250500	0,131
60	58,68	10,19	978000	8060600	0,121
70	64,72	10,33	924571	8096500	0,114
80	68,09	10,94	851125	7852000	0,108
90	70,42	11,06	782444	7555300	0,104

Tab. 3.II Přeskokové napětí, počáteční napětí koróny a stupeň nehomogenity pro uzavřený objem (elektrody R0,5 – R75)

Vzdálenost mezi elektrodami	Přeskokové napětí	Počáteční napětí vzniku koróny	Střední intenzita elektrického pole	Maximální intenzita elektrického pole	Schwaigrův faktor
d [mm]	U_{bd} [kV]	U_{inc} [kV]	E_{mean} [V/m]	E_{max} [V/m]	η [-]
5	7,69	-	1538000	4408600	0,349
10	14,19	10,30	1419000	5487400	0,259
20	31,75	12,26	1587500	8298100	0,191
30	40,93	11,63	1364333	8473300	0,161
40	50,65	10,06	1266250	8861400	0,143
50	57,30	11,99	1146000	8780700	0,131
60	61,64	11,56	1027333	8467200	0,121
70	67,33	11,95	961857	8423100	0,114
80	71,58	11,80	894750	8254500	0,108
90	71,60	11,80	795556	7681900	0,104

Na grafu 3.5 jsou uvedeny průběhy hodnot přeskokového napětí, je vidět, že se liší pro měření s uzavřenou a otevřenou nádobou. Do vzdálenosti mezi elektrodami 40 mm se hodnoty přeskokového napětí od sebe lišily jen nepatrně, ale od hodnoty 40 do 90 mm bylo přeskokové napětí v uzavřené nádobě vyšší než v otevřené. Což je odlišné od teoretických předpokladů, ze kterých vychází, že v uzavřeném objemu je omezen přítok neionizovaného plynu, a tím pádem ionizované částice, vzniklé v důsledku výbojové činnosti, zůstávají v tomto objemu a způsobují snížení přeskokového napětí.



Obr. 3.9 Přeskokové napětí a počáteční napětí vzniku koróny. Pro uzavřený objem – červené průběhy, pro otevřený objem – zelené průběhy

Ale je nutno brát v úvahu minimální a maximální hodnoty změřených přeskokových napětí v jedné sérii měření pro jednu vzdálenost elektrod. Na grafu jsou tyto hodnoty vyznačeny pro každou vzdálenost černými úseky, a je patrné, že pro některé vzdálenosti rozdíl mezi uzavřeným a otevřeným objemem není statisticky významný. Zajímavé je to, že na úseku grafu od vzdálenosti 40 do vzdálenosti 90 mm je průběh hodnot elektrické pevnosti pro uzavřený objem stále větší než pro otevřený, a stejnou závislost v intervalu 40 – 90 mm kopíruje i průběh hodnot počátečního napětí vzniku koróny.

Závěr

Cílem praktické části bakalářské práce bylo zkoumání výbojové činnosti ve vzduchovém izolantu v případě otevřeného a uzavřeného objemu. Elektrody o poloměru 0,5 mm a 75 mm byly umístěny do kovové nádoby s možností hermetického uzavření, izolační medium – atmosférický vzduch. Jako zdroj napětí byl použit transformátor s maximálním jmenovitým napětím 120 kV.

Pro vzdálenosti mezi elektrodami od 5 do 90 mm bylo změřeno přeskokové napětí a počáteční napětí vzniku koróny. Pro určení stupně homogenity elektrického pole použité elektrodové konfigurace bylo v programu Agros 2D nasimulováno rozložení elektrického pole mezi elektrodami. Vstupní parametry pro simulace: poloměry elektrod, vzdálenosti mezi elektrodami a naměřené přeskokové napětí. Na základě výsledků simulace pole byla zjištěna hodnota maximální intenzity elektrického pole pro každou vzdálenost elektrod a byl vypočten Schwaigrův faktor. Podle hodnoty tohoto faktoru můžeme říci, že pro elektrodu s radiusem zakřivení 0,5 mm je pole prakticky pro všechny vyšetřované vzdálenosti silně nehomogenní, a proto pro každou vzdálenost, kromě přeskokových napětí, byla naměřena zapalovací napětí koróny.

Z naměřených hodnot přeskokových napětí vyplývá, že rozdíl mezi uzavřeným a otevřeným objemem není statisticky významný. Z toho můžeme udělat závěr, že použitý objem nádoby nemá významný vliv na hodnotu přeskokového napětí pro dané poloměry elektrod, pro dané vzdálenosti mezi nimi a použité izolační medium. Pro přesnější posouzení vlivu uzavřeného objemu je třeba provést rozsáhlejší měření i s použitím nádoby menšího objemu. Dále by bylo vhodné použít místo atmosférického vzduchu syntetický vzduch nebo různé směsi N_2 a O_2 , a to jak pro atmosférický tlak, tak i pro vyšší tlaky. V současnosti je důležité, že syntetický vzduch je ekologicky čisté izolační medium, oproti rozšířeně používanému SF_6 , který se podílí na skleníkovém efektu.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] VEVERKA, Antonín. *Technika vysokých napětí*. 3., přeprac. vyd. Praha: SNTL, 1982. 304 s.
- [2] KUČEROVÁ, Eva. *Elektrotechnické materiály*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2002. 174 s. ISBN 80-708-2940-0.
- [3] HASSDENTEUFEL, Josef, KVĚT Karel, a kolektiv. *Elektrotechnické materiály*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1967. 856 s.
- [4] HASSDENTEUFEL, Josef, DUBSKÝ Jan, RAPOŠ Michal, ŠANDERA Josef. *Elektrotechnické materiály*. 2., přeprac. vyd. Praha: SNTL, 1978. 607 s.
- [5] MENTLÍK, Václav. *Dielektrické prvky a systémy*. 1. vyd. Praha: BEN – technická literatura, 2006. 235 s. ISBN 80-730-0189-6.
- [6] MENTLÍK, Václav. *Sborník příspěvků z mezinárodní konference Diagnostika '05*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2005. 231 s. ISBN 80-7043-368-X.
- [7] KUBEŠ, Pavel. *Impulsní silnoproudé výboje a jejich diagnostika*. Praha: ČVUT FEL, 2004. 84 s.
- [8] FABŠIC, Jiří. *Částečné výboje v plynném izolantu*. Plzeň, 2014. Diplomová práce. Západočeská univerzita. Fakulta elektrotechnická. Katedra technologií a měření. Vedoucí práce Petr Martínek.
- [9] VRBKA, Tomáš. *Napětová pevnost plynného dielektrika*. Plzeň, 2015. Bakalářská práce. Západočeská univerzita. Fakulta elektrotechnická. Katedra technologií a měření. Vedoucí práce Eva Müllerová.
- [10] Katedra elektroenergetiky a ekologie: Laboratorní cvičení z techniky vysokého napětí: Měření střídavého napětí. [online]. [cit. 20.04.2016]. Dostupné z: <https://courseware.zcu.cz>
- [11] PIHERA J., MARTÍNEK P., TRNKÁ P., NETOLICKÝ P.. *Analýza signálů pulsů částečných výbojů*. [online]. ElectroScope. Online časopis pro elektrotechniku. Poslední změna 04.07.2008. [Cit. 20.04.2016]. Dostupné z: http://147.228.94.3/images/PDF/Rocnik2008/cislo2_2008/r2c2c1.pdf
- [12] SIVUCHIN, D. V.. *Kurs fyziki. Električestvo*. 5. vyd. Moskva: Fizmatlit, 2006. 656 s.
- [13] JEVGRAFOVA N. N., KAGAN V. L.. *Kurs fyziki dlja podgotovitělnych oddělenij vuzov*. 2., přeprac. vyd. Moskva: Vysšaja škola, 1978. 512 s.
- [14] ENGEL A., STEENBECK M.. *Fizika i těchnika električeskogo razrjada*. Překlad z německého jazyka. Moskva: Objediněnoje naučno-těchničeskoje izdatělstvo NKTP SSSR, 1935. 252 s.
- [15] Katedra elektroenergetiky a ekologie: Laboratoře a specializované pracoviště. [online]. [cit. 20.04.2016]. Dostupné z: <http://www.kee.zcu.cz/laboratore.html>
- [16] MATĚJÍČEK, Lukáš. *Technologie Eaton používané v oblasti vysokého napětí*. [online]. [Cit. 20.04.2016]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/44228.pdf>
- [17] KUFFEL, E., ZAENGL, W. S., KUFFEL, J.. *High loltage engineering: fundamentals*. 2. vyd. Newnes, 2009. 539 s. ISBN 978-0-7506-3634-6.
- [18] ARORA, R., MOSCH, W.. *High voltage and electrical insulation engineering*. IEEE Press, 377 s. ISBN 978-0-470-60961-3.

Přílohy

Příloha A – Vypočtené hodnoty přeskovového napětí a počátečního napětí koróny

Otevřená nádoba					
R0,5-R75 / 0,985 bar / 5 mm / Air / MC2b (24,7 °C)					
U_{bd1}	U_{bd2}	U_{bd3}	U_{bd4}	U_{bd5}	U_{bd}
7,94	8,11	7,83	8,23	8,02	8,03
U_{inc1}	U_{inc2}	U_{inc3}			U_{inc}
-	-	-			-

Otevřená nádoba					
R0,5-R75 / 0,985 bar / 10 mm / Air / MC2b (24,7 °C)					
U_{bd1}	U_{bd2}	U_{bd3}	U_{bd4}	U_{bd5}	U_{bd}
17,84	15,47	15,92	15,52	15,29	16,01
U_{inc1}	U_{inc2}	U_{inc3}			U_{inc}
11,14	10,26	9,49			10,30

Otevřená nádoba					
R0,5-R75 / 0,985 bar / 20 mm / Air / MC2b (24,7 °C)					
U_{bd1}	U_{bd2}	U_{bd3}	U_{bd4}	U_{bd5}	U_{bd}
29,85	30,29	30,97	30,41	30,74	30,45
U_{inc1}	U_{inc2}	U_{inc3}			U_{inc}
10,37	10,36	10,61			10,45

Otevřená nádoba					
R0,5-R75 / 0,985 bar / 30 mm / Air / MC2b (24,7 °C)					
U_{bd1}	U_{bd2}	U_{bd3}	U_{bd4}	U_{bd5}	U_{bd}
41,38	41,41	40,34	39,40	37,86	40,08
U_{inc1}	U_{inc2}	U_{inc3}			U_{inc}
11,08	10,57	10,29			10,64

Otevřená nádoba					
R0,5-R75 / 0,995 bar / 40 mm / Air / MC2b (25,3 °C)					
U_{bd1}	U_{bd2}	U_{bd3}	U_{bd4}	U_{bd5}	U_{bd}
50,41	54,22	54,37	51,73	50,85	50,43
49,24	48,95	48,80	48,36	47,34	
U_{inc1}	U_{inc2}	U_{inc3}			U_{inc}
10,54	11,12	11,18			10,95

Otevřená nádoba					
R0,5-R75 / 0,995 bar / 50 mm / Air / MC2b (25,3 °C)					
U_{bd1}	U_{bd2}	U_{bd3}	U_{bd4}	U_{bd5}	U_{bd}
55,10	54,52	53,93	53,20	52,47	53,84
U_{inc1}	U_{inc2}	U_{inc3}			U_{inc}
10,21	10,05	10,08			10,12

Otevřená nádoba					
R0,5-R75 / 0,995 bar / 60 mm / Air / MC2b (25,3 °C)					
U_{bd1}	U_{bd2}	U_{bd3}	U_{bd4}	U_{bd5}	U_{bd}
59,06	58,62	58,33	58,33	59,06	58,68
U_{inc1}	U_{inc2}	U_{inc3}			U_{inc}
10,17	10,17	10,21			10,19

Otevřená nádoba					
R0,5-R75 / 0,995 bar / 70 mm / Air / MC2b (25,3 °C)					
U_{bd1}	U_{bd2}	U_{bd3}	U_{bd4}	U_{bd5}	U_{bd}
65,07	64,04	65,22	64,63	64,63	64,72
U_{inc1}	U_{inc2}	U_{inc3}			U_{inc}
10,52	10,26	10,21			10,33

Otevřená nádoba					
R0,5-R75 / 0,995 bar / 80 mm / Air / MC2b (25,3 °C)					
U_{bd1}	U_{bd2}	U_{bd3}	U_{bd4}	U_{bd5}	U_{bd}
70,05	67,71	67,27	67,56	67,85	68,09
U_{inc1}	U_{inc2}	U_{inc3}			U_{inc}
11,08	10,52	11,21			10,94

Otevřená nádoba					
R0,5-R75 / 0,995 bar / 90 mm / Air / MC2b (25,3 °C)					
U_{bd1}	U_{bd2}	U_{bd3}	U_{bd4}	U_{bd5}	U_{bd}
68,73	70,93	70,34	72,10	68,44	70,42
69,76	69,46	70,93	69,61	71,96	
72,40	71,52	70,20	70,05	71,37	
72,84	72,10	68,15	68,73	68,88	
U_{inc1}	U_{inc2}	U_{inc3}			U_{inc}
11,18	11,04	10,96			11,06

Uzavřená nádoba					
R0,5-R75 / 0,985 bar / 5 mm / Air / MC2b (24,7 °C)					
U_{bd1}	U_{bd2}	U_{bd3}	U_{bd4}	U_{bd5}	U_{bd}
8,28	6,95	7,95	7,65	7,64	7,69
U_{inc1}	U_{inc2}	U_{inc3}			U_{inc}
-	-	-			-

Uzavřená nádoba					
R0,5-R75 / 0,985 bar / 10 mm / Air / MC2b (24,7 °C)					
U_{bd1}	U_{bd2}	U_{bd3}	U_{bd4}	U_{bd5}	U_{bd}
14,23	14,08	14,30	14,22	14,13	14,19
U_{inc1}	U_{inc2}	U_{inc3}			U_{inc}
10,18	10,06	10,64			10,30

Uzavřená nádoba					
R0,5-R75 / 0,985 bar / 20 mm / Air / MC2b (24,7 °C)					
U_{bd1}	U_{bd2}	U_{bd3}	U_{bd4}	U_{bd5}	U_{bd}
31,28	31,92	31,24	32,45	31,83	31,75
U_{inc1}	U_{inc2}	U_{inc3}			U_{inc}
10,67	12,93	13,18			12,26

Uzavřená nádoba					
R0,5-R75 / 0,985 bar / 30 mm / Air / MC2b (24,7 °C)					
U_{bd1}	U_{bd2}	U_{bd3}	U_{bd4}	U_{bd5}	U_{bd}
41,08	41,36	40,87	40,28	41,02	40,93
U_{inc1}	U_{inc2}	U_{inc3}			U_{inc}
12,22	11,32	11,35			11,63

Uzavřená nádoba					
R0,5-R75 / 0,995 bar / 40 mm / Air / MC2b (25,3 °C)					
U_{bd1}	U_{bd2}	U_{bd3}	U_{bd4}	U_{bd5}	U_{bd}
51,44	50,12	49,83	50,41	51,44	50,65
U_{inc1}	U_{inc2}	U_{inc3}			U_{inc}
9,47	10,17	10,55			10,06

Uzavřená nádoba					
R0,5-R75 / 0,995 bar / 50 mm / Air / MC2b (25,3 °C)					
U_{bd1}	U_{bd2}	U_{bd3}	U_{bd4}	U_{bd5}	U_{bd}
55,25	58,18	58,33	57,74	57,01	57,30
U_{inc1}	U_{inc2}	U_{inc3}			U_{inc}
11,14	11,12	13,70			11,99

Uzavřená nádoba					
R0,5-R75 / 0,995 bar / 60 mm / Air / MC2b (25,3 °C)					
U_{bd1}	U_{bd2}	U_{bd3}	U_{bd4}	U_{bd5}	U_{bd}
62,72	62,72	61,84	59,21	61,70	61,64
U_{inc1}	U_{inc2}	U_{inc3}			U_{inc}
11,09	12,12	11,47			11,56

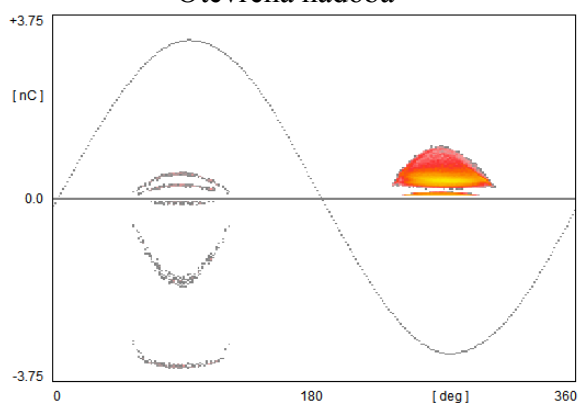
Uzavřená nádoba					
R0,5-R75 / 0,995 bar / 70 mm / Air / MC2b (25,3 °C)					
U_{bd1}	U_{bd2}	U_{bd3}	U_{bd4}	U_{bd5}	U_{bd}
67,41	67,59	68,44	67,12	66,09	67,33
U_{inc1}	U_{inc2}	U_{inc3}			U_{inc}
13,15	11,46	11,24			11,95

Uzavřená nádoba					
R0,5-R75 / 0,995 bar / 80 mm / Air / MC2b (25,3 °C)					
U_{bd1}	U_{bd2}	U_{bd3}	U_{bd4}	U_{bd5}	U_{bd}
70,64	72,10	71,52	71,37	72,25	71,58
U_{inc1}	U_{inc2}	U_{inc3}			U_{inc}
13,12	11,15	11,14			11,80

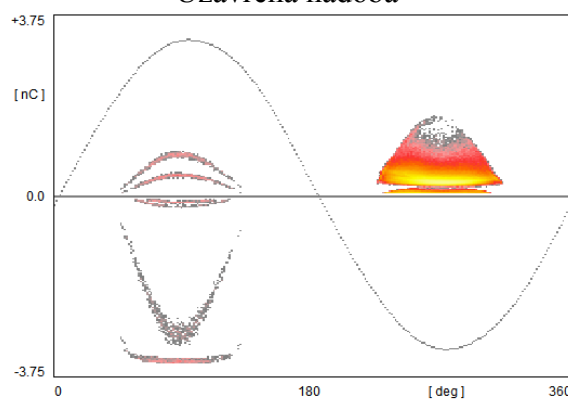
Uzavřená nádoba					
R0,5-R75 / 0,995 bar / 90 mm / Air / MC2b (25,3 °C)					
U_{bd1}	U_{bd2}	U_{bd3}	U_{bd4}	U_{bd5}	U_{bd}
70,93	74,01	72,69	73,57	74,01	71,60
70,34	70,64	73,28	66,83	64,19	
74,45	75,33	73,57	74,15	67,12	
74,15	68,73	65,36	79,28	69,32	
U_{inc1}	U_{inc2}	U_{inc3}			U_{inc}
12,08	12,11	11,21			11,80

Příloha B - Záznamy částečných výbojů

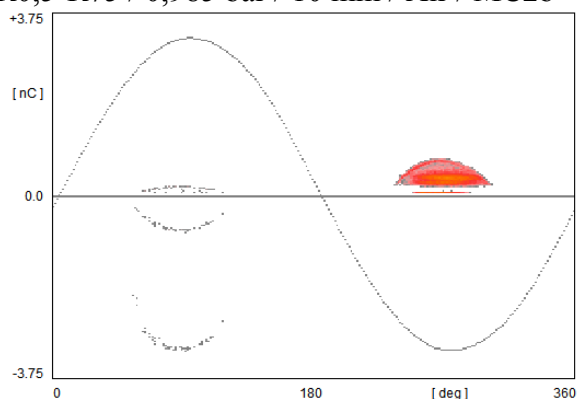
Otevřená nádoba



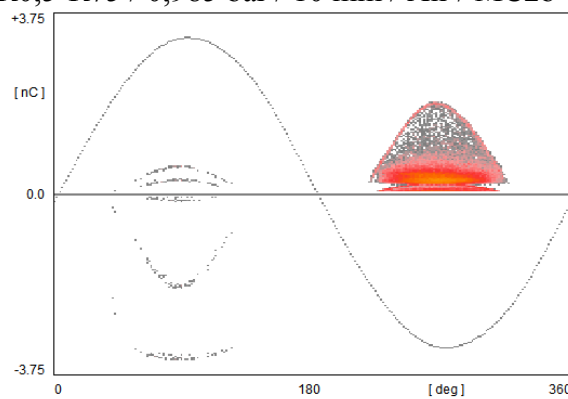
Uzavřená nádoba



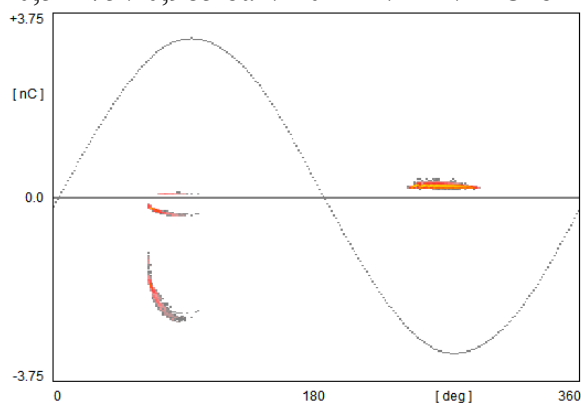
R0,5-R75 / 0,985 bar / 10 mm / Air / MC2b



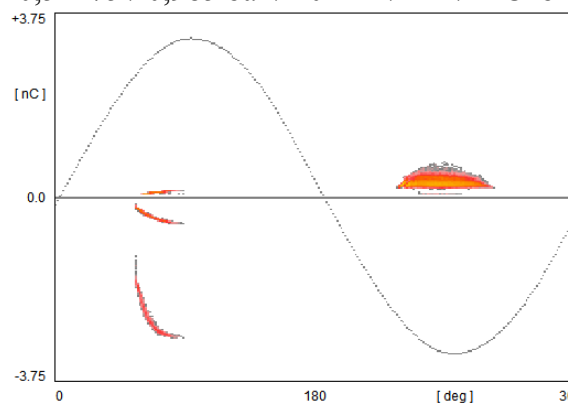
R0,5-R75 / 0,985 bar / 10 mm / Air / MC2b



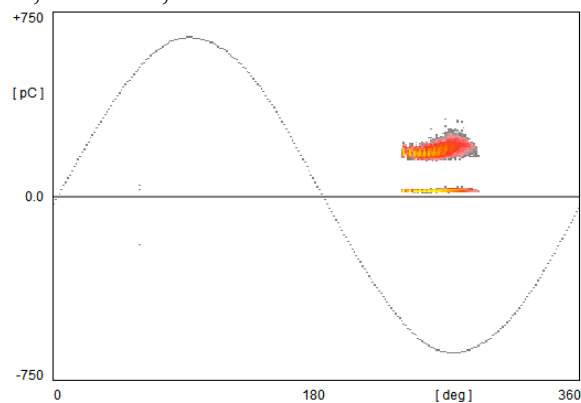
R0,5-R75 / 0,985 bar / 20 mm / Air / MC2b



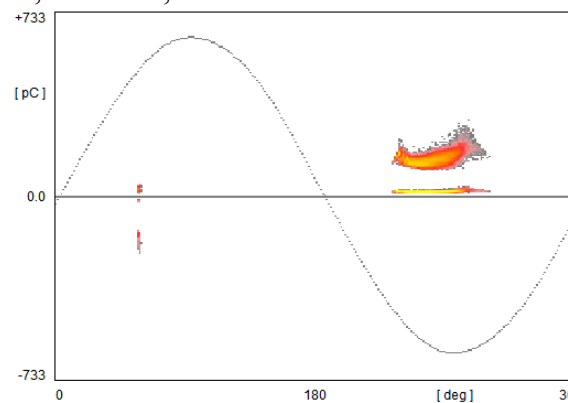
R0,5-R75 / 0,985 bar / 20 mm / Air / MC2b



R0,5-R75 / 0,985 bar / 30 mm / Air / MC2b



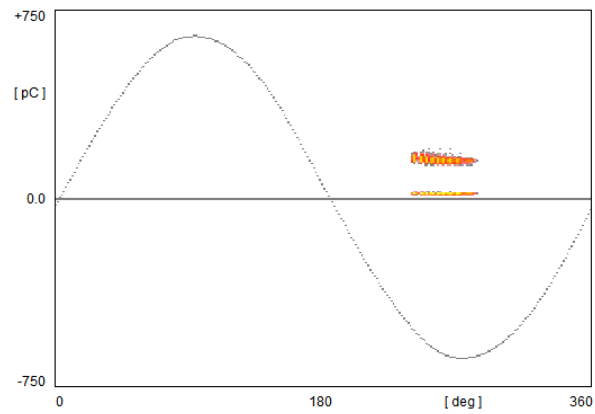
R0,5-R75 / 0,985 bar / 30 mm / Air / MC2b



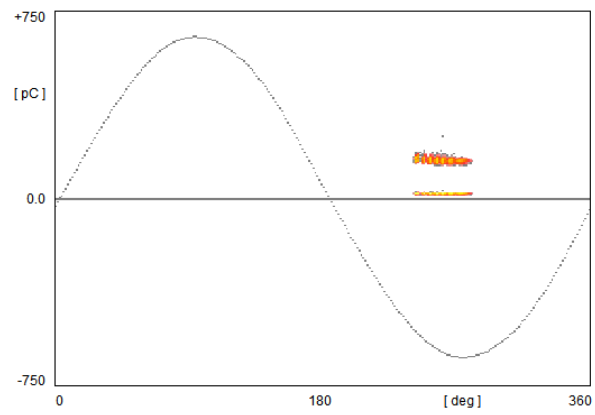
R0,5-R75 / 0,995 bar / 40 mm / Air / MC2b

R0,5-R75 / 40 mm / Air / MC2b

Otevřená nádoba



R0,5-R75 / 0,995 bar / 80 mm / Air / MC2b



R0,5-R75 / 0,995 bar / 90 mm / Air / MC2b