

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vliv nečistot na elektrickou pevnost

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2017/2018

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jiří SIHLOVEC**
Osobní číslo: **E15B0087P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**
Název tématu: **Vliv nečistot na elektrickou pevnost**
Zadávací 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. Popište faktory ovlivňující elektrickou pevnost plynů.
2. Navrhněte experimenty pro zjištění elektrické pevnosti při přítomnosti nečistot mezi elektrodami.
3. Realizujte experimenty a analyzujte dosažené výsledky.

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.

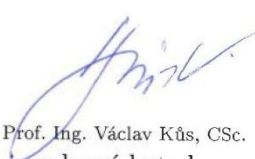
Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Miroslav Hromádka, Ph.D.**
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání bakalářské práce: **10. října 2017**

Termín odevzdání bakalářské práce: **7. června 2018**


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




Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 10. října 2017

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá vlivem různých nečistot, které mohou způsobit pokles elektrické pevnosti na vedení přenášející elektrickou energii. První část práce popisuje teorie k výbojům v plynech. Druhá část práce je zaměřena na návrh experimentů a měření velikosti průrazného/přeskokového napětí výbojů pro různé nečistoty ve vysokonapěťové laboratoři. V poslední části se porovnávají dosažené hodnoty.

Klíčová slova

elektrická pevnost, výboje v plynech, AC napětí, vysokonapěťové zkoušky, nečistoty

Abstract

This bachelor thesis deals with effect of impurities, which can cause decrease of electric strength on electric line. First part of thesis describes theory of discharges in gases. Second part of thesis focuses on choosing experiments and measuring breakdown voltage of discharges for different impurities in high voltage laboratory. Last part of thesis compares measured values between themselves.

Keywords

Electric strength, electric discharge in gases, AC voltage, highvoltage testing, impurities

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 4.6.2018

Jméno příjmení

Poděkování

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

Obsah

OBSAH	8
ÚVOD	9
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
1 VÝBOJE V PLYNECH	12
1.1 ZÁKONITOSTI V PLYNECH.....	12
1.2 ELEKTRICKÁ VODIVOST V PLYNECH.....	13
1.2.1 Fotoionizace.....	14
1.2.2 Povrchová ionizace.....	14
1.2.3 Tepelná ionizace.....	14
1.2.4 Nárazová ionizace.....	15
1.2.5 Deionizace rekombinací.....	16
1.3 NESAMOSTATNÝ VÝBOJ.....	16
1.3.1 Townsendovy výboje.....	16
1.4 SAMOSTATNÝ VÝBOJ.....	19
1.4.1 Podmínka samostatného výboje.....	19
1.4.2 Paschenův zákon.....	20
1.5 ELEKTRICKÁ PEVNOST.....	22
1.5.1 Homogenní a nehomogenní pole.....	23
1.5.2 Koróna.....	24
1.5.3 Atmosférické a jiné vlivy na přeskovkové napětí.....	26
1.6 STREAMER.....	26
1.7 LEADER.....	28
2 MĚŘENÍ ELEKTRICKÉ PEVNOSTI NEČISTOT	28
2.1 POPIS PRACOVNÍHO MÍSTA.....	28
2.2 NÁVRH EXPERIMENTŮ.....	30
2.3 MĚŘENÍ A ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ.....	32
2.3.1 Ptačí trus.....	33
2.3.2 Usazené kapky.....	33
2.3.3 Pavoučí vlákno.....	34
2.3.4 Vegetace.....	35
2.3.5 Odpadky.....	35
3 ZÁVĚR	38
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	1
PŘÍLOHY	1

Úvod

Venkovní vedení by mělo být vždy dimenzováno na bezporuchový provoz. Bohužel jsou zde některé poruchy, kterým nelze předejít. Z tohoto důvodu se vyvinula automatika opětovného zapínání (zkráceně OZ). Pro OZ existují dva typy poruch. Poruchy přechodného charakteru, na které OZ zareaguje odpojením poškozeného úseku a za krátký okamžik ho následně opět připojí. Při poruchách trvalého charakteru zareaguje OZ stejně jako v případě poruchy přechodného charakteru. OZ ji však vypne trvale, jelikož porucha stále trvá. Na venkovním vedení se tvoří poruchy, které jsou energetikům známé, ale jsou tu poruchy, které se tvoří z neznámých příčin. Existuje pouze několik teorií, které nebyly ještě dozajista potvrzeny. K bližšímu pochopení této problematiky se vztahuje teoretický úvod, který zahrnuje pojmy, jako je elektrická pevnost, a faktory, které ji ovlivňují. V praktické části bakalářské práce popisují možné příčiny poruch a navrhuji z nich experimenty. Tyto experimenty spočívají v porovnávání elektrické pevnosti různých „nečistot“ s elektrickou pevností vzduchu. Toto měření se provedlo pomocí kulového jiskřiště, které bylo napájeno střídavým napětím. Hlavním cílem bylo porovnat naměřené hodnoty mezi sebou, nikoliv je porovnávat s referenčními hodnotami. Z tohoto důvodu jsem zanedbával atmosférické podmínky, jelikož pro všechna měření byly stejné. Tyto experimenty by měly pomoci k objasnění příčin poruch. Zároveň by měly sloužit k porovnání vlivu různých „nečistot“ na elektrickou pevnost. Zkoumání poruch všech charakterů je důležité, jelikož můžeme těmto poruchám předejít lepším dimenzováním vedení nebo jinými příslušnými opatřeními. Předcházení těmto poruchám může snížit například náklady na provoz, zlepšit stabilitu a plynulost dodávky elektrické energie.

Seznam symbolů a zkratk

W_I	ionizační energie [$\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}$]
m_e	hmotnost elektronu [kg]
r_e	poloměr kruhové orbitalu atomu [m]
A	neutrální atom (bez znaménka)
A,B	konstanty
AC	střídavý proud
b	atmosférický tlak [kPa]
C	konstanta
C	elektron
c	rychlost světla [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]
d	vzdálenost mezi elektrodami [m]
E	intenzita elektrického pole [$\text{V}\cdot\text{m}^{-1}$]
e	elementární náboj [C]
f	frekvence [Hz]
h	Planckova konstanta [$\text{J}\cdot\text{s}$]
I	elektrický proud [A]
J	[$\text{A}\cdot\text{m}^{-2}$]
k	číslo experimentu
n	látkové množství [mol]
n, n_1, n_0	počet elektronů
OZ	opětovné zapnutí
p	tlak [Pa]
R	molární plynová konstanta [$\text{J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$]
T	teplota [$^{\circ}\text{C}$]
V	objem [m^3]
v_e	rychlost elektronu [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]
z	atomové číslo [-]

α	první ionizační koeficient
γ	sekundární ionizační koeficient
δ	poměrná hustota vzduchu [-]
ϵ	permitivita dielektrika [F·m-1]
ϑ	teplota [°C]
U	elektrické napětí [V]
λ	vlnová délka [m]

1 Výboje v plynech

1.1 Zákonitosti v plynech

V této kapitole bych rád popsal obecné zákony, které platí v plynech a musíme je při měření uvážit. Při nepřítomnosti elektrického nebo magnetického pole se nabitě částice v slabých ionizovaných plynech účastní molekulárních kolizí. Pohybují se podle klasické kinetické teorie plynu. Nejstarší zákon, který stanovili experimentálně Boyle a Mariotte, nám říká, že pro určité množství uzavřeného plynu při konstantní teplotě je součin objemu (V) a tlaku (p) konstanta (1.1).

$$pV = C = \text{const.} \quad (1.1)$$

Ve stejném systému, pokud je tlak konstantní, jsou objemy (V) a (V_0) závislé na jejich absolutních teplotách (T) a (T_0). Tuto zákonitost popsal Gay-Lussac rovnicí.

$$\frac{V}{V_0} = \frac{T}{T_0} \quad (1.2)$$

Podle vzorce (1.2) je konstanta C ve vzorci (1.1) vztažena k teplotě T_0 a objemu V_0 .

$$pV_0 = C_0 \quad (1.3)$$

Následně substituujeme V_0 z rovnice (1.2) a dosadíme do (1.3).

$$pV = \left(\frac{C_0}{T_0}\right) T \quad (1.4)$$

Poměr konstanty a teploty (C_0/T_0) označujeme jako molární plynovou konstantu (R). Dosadíme-li do rovnice (1.4), získáme:

$$pV = RT \quad (1.5)$$

Molární plynová konstanta je rovna $8,314 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$. Pokud n je počet molů, což se dá vyjádřit podílem hmotnosti (m) a molární hmotnosti (M). Obecně rovnice (1.1) nabývá následující podoby [3]:

$$pV = nRT = nC \quad (1.6)$$

1.2 Elektrická vodivost v plynech

Ionty v plynech jsou atomy, molekuly nebo komplexy molekul, ionty nabitě kladně (kationty) a záporně (anionty). Plyn je sám o sobě nevodivý. Průchod proudu nám zajišťují nosiče náboje, což jsou elektrony, kladně a záporně nabitě ionty. Pro vytvoření kationtů je potřeba ionizační práce. Vytvoření aniontů je exotermická reakce, při které se uvolní určité množství energie. Celková energie elektronu neutrální molekuly může být rozdělena na dva typy. Kinetická energie (W_{ke}) závisí na hmotnosti a rychlosti. Popisuje jí následující rovnice:

$$W_{ke} = \frac{1}{2} m_e v_e^2 = \frac{1}{8\pi\epsilon} \cdot \frac{e^2 z}{r_e} \quad (1.7)$$

Potenciální energii (W_{pot}), která závisí na náboji jádra molekuly v Coulombově poli, charakterizuje tento vztah:

$$W_{pot} = -\frac{1}{4\pi\epsilon} \cdot \frac{e^2 z}{r_e} = -2W_{ke} \quad (1.8)$$

,kde m_e je hmotnost elektronu, v_e je rychlost elektronu, ϵ je permitivita dielektrika, z je atomové číslo vyjadřující počet elektronů s negativním elementárním nábojem $e = -1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ a r_e je poloměr kruhového orbitalu atomu.

Celkovou energii elektronu dostaneme součtem těchto dvou energií (1.9).

$$W_{total} = W_{ke} + W_{pot} = \frac{1}{2} W_{pot} \quad (1.9)$$

Vazebná energie elektronu, kterou potřebujeme k uvolnění elektronu z molekuly, v n -té vrstvě od jeho jádra je dána rovnicí:

$$W_{total} = -13.61 \text{ eV} \cdot \frac{z^2}{n^2} = -W_I [\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}] \quad (1.10)$$

Tato energie je známá pod pojmem ionizační energie a její velikost závisí na druhu plynu, který chceme ionizovat. U molekul plynu dochází k mnohonásobné ionizaci, pokud mají více než jeden elektron. K uvolnění dalšího elektronu potřebujeme energii větší než u předchozího. Ionizací známe několik druhů: nárazová ionizace, fotoionizace, tepelná ionizace a povrchová ionizace [1,4].

1.2.1 Fotoionizace

Fotoionizace je možná, pokud při nárazové ionizaci je energie při srážce větší než ionizační energie (W_I). Elektron, který má menší energii než ionizační (W_I), mohou při srážce excitovat molekuly plynu na vyšší energetickou hladinu. Při této podmínce se elektron excituje z nižší energetické hladiny na vyšší. Za 10^{-7} – 10^{-10} s se vrátí z excitovaného stavu do základního stavu a vyzáří kvantum energie v podobě fotonu (hf). Tato energie může ionizovat další molekulu, pokud je její ionizační energie menší nebo rovna energii fotonu. Tento proces lze charakterizovat rovnicí $A + hf \rightarrow A^+ + e$, kde A je neutrální molekula nebo atom a hf je energie fotonu. Pro uskutečnění fotoionizace musí však platit:

$$hf \geq e \cdot U_I \quad (1.11)$$

Z této nerovnice plyne vztah pro vlnovou délku,

$$\lambda \leq \frac{hc}{W_I} [m] \quad (1.12)$$

pokud známe následující vztah:

$$f = \frac{c}{\lambda} [Hz] \quad (1.13)$$

, kde f je frekvence světla, c je rychlost světla a h je Planckova konstanta ($h=6,63 \cdot 10^{-34}$ J·s) [3,4].

1.2.2 Povrchová ionizace

Pomocí povrchové ionizace se uvolňují elektrony z povrchu elektrod za předpokladu, že dodáme výstupní práci. Výstupní práci dodáme elektronu bombardováním povrchu kovu částicemi, ohřevem elektrod, ozářením povrchu krátkovlnným elektromagnetickým vlněním. Tento jev se nazývá fotoelektrický [1].

1.2.3 Tepelná ionizace

K ionizaci dochází u plynů, které se zahřejí na teplotu vyšší než 10 000 K. Molekuly a atomy plynu se začnou pohybovat vysokou rychlostí, což způsobí srážky s ostatními molekulami a atomy. Molekuly excitované vyzářením fotonu také ovlivňují ionizaci. Tepelná ionizace se využívá u elektrického oblouku. Svůj významu plynů má pouze v poslední fázi

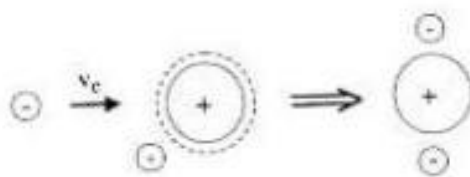
elektrického výboje. Při přeměně velkého množství energie v elektricky vodivém kanálu známém jako leader je možný velký nárůst teploty v jádře leadru [3,4].

1.2.4 Nárázová ionizace

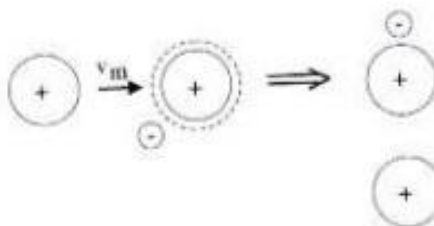
K ionizaci nebo k vytvoření nosičů náboje u neutrálního plynu může dojít, pokud se srazí dostatečně rychlé částice. Tyto částice jsou urychlovány elektrickým polem. Při srážce elektronů s neutrálními molekulami dochází nejčastěji k vytvoření dalších nosičů náboje. Tento proces se nazývá primární proces (α -proces). Sekundární proces (β -proces) probíhá při srážce kationtů s neutrálními molekulami, ale tento proces má pouze malý podíl u ionizace pevných izolačních látek, nikoliv u plynů. U plynů má největší podíl na ionizaci primární proces. Pokud bude kinetická energie elektronu větší nebo rovna ionizační energii molekuly (W_I), vyrazí elektron z neutrální molekuly další elektron a z původně neutrální molekuly se stane kladně nabitý iont [4].

$$\frac{1}{2} m_e v_e^2 \geq W_I \quad (1.14)$$

Nicméně, pouze část elektronů způsobí ionizaci, i když je jejich kinetická energie $\geq W_I$, protože ionizace je závislá na pravděpodobnosti srážek. Množství srážek za centimetr ve směru pole jedním elektronem je dáno koeficientem α . Tento koeficient je známý jako primární ionizační číslo a bylo dáno Johnem Townsendem. Zjistil, že primární číslo α je hodně závislé na velikosti elektrické intenzity (E) [4].



Obr. 1.1 Primární proces (α -proces) [4]

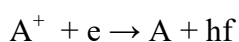


Obr. 1.2 Sekundární proces (β -proces) [4]

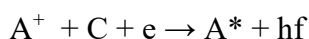
1.2.5 Deionizace rekombinací

Současně s ionizací probíhá rekombinace. Pokud převažuje ionizace nad rekombinací, vodivost tohoto plynu roste, a naopak pokud převažuje rekombinace nad ionizací, vodivost klesá. Rekombinace způsobuje zánik nosičů náboje elektron-díra. Tyto náboje se přitahují a vznikají neutrální molekuly, protože jsou opačně nabitě [6].

Při rekombinaci je potenciální a kinetická energie uvolněna v podobě kvantového záření. Tato reakce může být popsána rovnicí:



Může se také stát, že další částice nebo elektron (C) absorbuje přebytečnou energii, která byla uvolněna během rekombinace. Tento stav můžeme popsat vztahem:

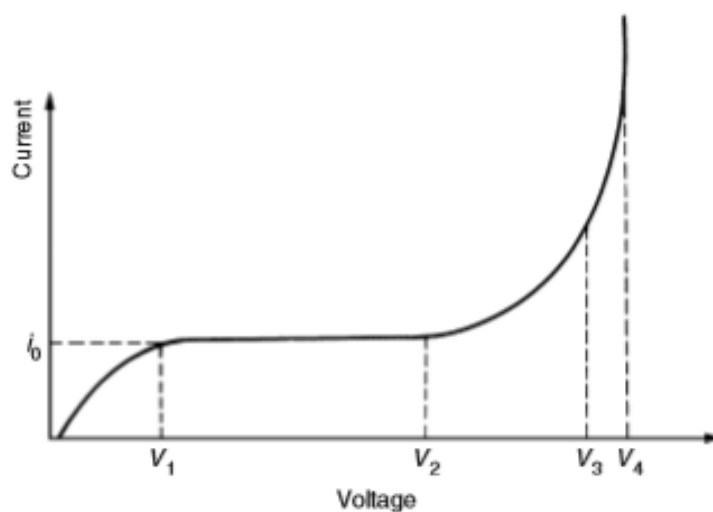


, kde A^* je atom v excitovaném stavu [3].

1.3 Nesamostatný výboj

1.3.1 Townsendovy výboje

Proud mezi deskovými elektrodami v homogenním poli jako první studoval Townsend. Z katody se začnou emitovat elektrony za pomoci vnějšího ionizačního činidla. Proud začne růst do bodu V_1 (Obr. 1.3) přímo úměrně s napětím. Poté zůstane konstantní na hodnotě proudu i_0 do bodu V_2 . Tento proud se rovná saturačnímu proudu. Pokud budeme zvětšovat napětí, proud se bude zvětšovat exponenciálně až do bodu V_4 . Townsend dokázal, že exponenciální zvýšení proudu bylo způsobeno nárazovou ionizací elektronů. Jakmile zvětšíme napětí, elektrony, které opouštějí katodu, jsou zrychlovány, dokud jejich energie není alespoň rovna ionizační práci, a poté způsobí ionizaci s molekuly a atomy plynu. Elektrony předají při srážce svoji kinetickou energii. Tyto výboje jsou nesamostatné, jelikož proud přestane procházet při zamezení působení ionizačního činidla. Zvýšíme-li velikost napětí na V_4 , stanou se z nich samostatné výboje [1,3].



Obr. 1.3 – Závislost stejnosměrného napětí na proudu mezi elektrodami [3]

Kvůli tomuto nárůstu proudu si určil první ionizační koeficient α , který popisuje počet dvojic nosičů vytvořených elektronem za 1cm ve směru pole. Pokud si označíme n jako počet elektronů a x jako vzdálenost od katody ve směru pole. Při nárazové ionizaci se za dráhu dx vytvoří dn dalších elektronů.

$$dn = \alpha n dx \quad (1.15)$$

Po integraci dostaneme:

$$n = n_0 e^{\alpha x} \quad (1.16)$$

Celkové množství elektronů na 1cm^2 anody,

$$n = n_0 e^{\alpha d} \quad (1.17)$$

kde n_0 je množství elektronů produkovaných katodou. Po úpravě dostaneme proud I , který naměříme na anodě,

$$I = I_0 e^{\alpha d} [A] \quad (1.18)$$

kde I_0 je proud, který vznikl emisí elektronů z katody [1,3].

Během elektrického výboje mezi elektrodami jsou potřebné nosiče náboje vytvářeny nejen v plynném dielektriku pomocí primárního procesu (α -procesu), ale také jsou

uvolňovány z povrchu elektrod sekundárním procesem (γ -procesem). Energie získaná elektrony lavinou má za následek vytvoření kladných iontů, fotonů a excitovaných molekul. Tyto kladné ionty, fotony a excitované molekuly způsobují sekundární procesy ionizující plyn. Existují 3 efekty, které zapříčiňují uvolňování elektronů z katody [4].

Efekt pozitivního iontu “ γ_{ion} ”

Kladné ionty, které se tvoří při primárním procesu a nachází se v elektrickém poli, nemají dostatek kinetické energie na ionizování molekul. Mohou však mít dostatek energie na uvolnění elektronů z katody při dopadu [4].

Fotonový efekt “ γ_f ”

Excitované molekuly, které se nacházejí na vyšší energetické úrovni, mohou emitovat fotony při návratu na nižší energetickou úroveň. Tyto fotony ozáří elektrodu a mohou uvolnit elektrony z povrchu elektrody. Tento jev se nazývá fotoemise [4].

Metastabilní efekt “ γ_m ”

Molekuly, které se nachází v metastabilním stavu, mohou difundovat zpět na katodu a při dopadu způsobovat elektronovou emisi [4].

Sekundární procesy nemají velký vliv na ionizaci v plynech při malých tlacích. Mají tedy větší význam u plynů vyšších tlaků. Pokud chceme dopočítat sekundární ionizační číslo, musíme dosadit do rovnice:

$$\gamma = \gamma_{ion} + \gamma_f + \gamma_m \quad (1.19)$$

, kde γ je Townsendův sekundární ionizační koeficient. Tento koeficient označuje průměrné množství vytvořených elektronů pomocí sekundárních emisí na katodě na elektrony vytvořené primárním procesem. Velikost závisí na materiálu elektrod a je funkcí elektrické intenzity na tlaku, což můžeme zapsat jako rovnicí (1.20) [4].

$$\gamma = f\left(\frac{E}{p}\right) \quad (1.20)$$

1.4 Samostatný výboj

1.4.1 Podmínka samostatného výboje

Nejdříve si Townsend myslel, že proud roste v oblasti V_3 – V_4 (Obr. 1.3), z důvodu, že kladné ionty, které se vytvořily při nárazové ionizaci, obdržely dostatečné množství energie, aby vykonaly také nárazovou ionizaci. Proto zavedl pro kladné ionty ionizační číslo β , pro které má stejnou závislost E/p jako u primárního ionizačního koeficientu α . Dále pomocí těchto dvou koeficientů zkoumal kombinovanou ionizaci elektronů a kladných iontů. Ve velkém procentu případů ionizace kladnými ionty je zanedbatelná vůči nárazové ionizaci elektrony a povrchové ionizaci na katodě [1].

Zkusme si analyzovat výboj. Budeme uvažovat pouze nárazovou ionizaci elektrony a povrchovou ionizaci kladnými ionty [1].

Podle definice z knihy Technika vysokého napětí: „Mějme dvě rovinné elektrody ve vzdálenosti d a mezi nimi elektrické pole o intenzitě E v plynu o tlaku p . Při dostatečně velkém poměru E/p probíhá elektronová ionizace. Předpokládejme, že za ustálených poměrů je n_0 elektronů emitováno za sekundu z 1 cm^2 katody vnějším ionizačním činidlem. Počet elektronů dopadajících za sekundu na 1 cm^2 anody označme n . Nechť dále každý kladný iont vyrazí z katody průměrně γ nových elektronů; n_1 budiž počet elektronů uvolněných každou sekundu z 1 cm^2 katody ionizačním činidlem i bombardováním dohromady. Počet kladných iontů, které vznikají v trubici mezi elektrodami o průřezu 1 cm^2 v ustáleném stavu za sekundu, je $n - n_1$.“ Můžeme tedy psát:

$$n_1 = n_0 + \gamma(n - n_1) \quad (1.21)$$

Po úpravě:

$$n_1 = \frac{n_0 + \gamma n}{1 + \gamma} \quad (1.22)$$

Podle rovnice (1.17) a po úpravě dostaneme:

$$n = \frac{n_0 e^{\alpha d}}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)} \quad (1.23)$$

Rovnici (1.23) vynásobíme nábojem elektronu a dostaneme vztah pro proudovou hustotu.

$$J = \frac{J_0 e^{\alpha d}}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)} [A \cdot m^{-2}] \quad (1.24)$$

Tento vztah má smysl, pouze pokud je jmenovatel větší než nula, z toho plyne následující podmínka.

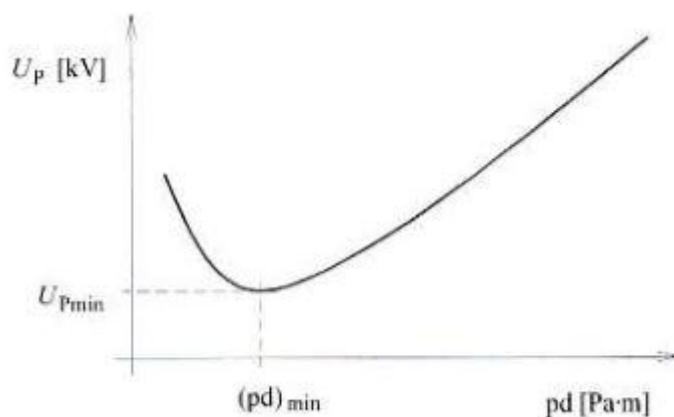
$$\gamma(e^{\alpha d} - 1) = 1 \quad (1.25)$$

Zjistilo se, že zde existují další emisní jevy, které Townsend neuvážil. Nezahrnul fotony vznikající nárazovou ionizací, které způsobují fotoionizaci plynu mezi elektrodami. Tyto a další sekundární procesy jsou započítány v sekundárním ionizačním čísle γ . Pokud zvyšujeme intenzitu elektrického pole, roste nám proudová hustota. Po zamezení působení ionizačního činidla nám přestane proudit elektrický proud mezi elektrodami, tudíž stále máme nesamostatný výboj. Pokud zvýšíme intenzitu elektrického pole dostatečně, docílíme přechodu na samostatný výboj. Tento přechod se stane při splnění podmínky (1.25). Samostatný výboj tedy vznikne, pokud elektron, který opouští katodu, vytvoří určitý počet kladných iontů a ty při dopadu na katodu uvolní přesně jeden elektron [1].

1.4.2 Paschenův zákon

Friedrich Paschen se zabýval velikostí průrazného napětí v plynech. Zjistil, že velikost tohoto napětí závisí na součinu tlaku plynu (p) a vzdálenosti elektrod (d). Paschenův zákon je znázorněn pomocí Paschenovy křivky (*Obr. 1.4*). Tato křivka vychází z předpokladu, že pro celou křivku měníme pouze tlak, nikoliv vzdálenost elektrod mezi sebou. Můžeme vidět, že oblasti s nejnižším tlakem a nejvyšším mají větší průrazné napětí než bod U_{pmin} . V oblastech nízkých tlaků jsou částice daleko od sebe. Elektronů po celou délku dráhy od katody k anodě obvykle nenarazí na žádnou neutrální molekulu plynu. Kvůli tomu se nevytvoří dostatečný počet nosičů náboje k elektrickému průrazu. K vytvoření elektronové laviny je potřeba dodat elektronům větší množství energie v podobě vyššího napětí. Pro oblast vysokých tlaků jsou vzdálenosti mezi částicemi malé. Elektronů nestačí získat potřebnou kinetickou energii z elektrického pole na ionizování neutrálních molekul. Elektronů narazí do molekul příliš brzy a předají jim svoji energii. V této oblasti je také potřeba vyšších napětí k uskutečnění přeskočení. V obou těchto oblastech probíhá ionizace

energeticky nevýhodně oproti bodu U_{pmin} . V tomto bodě probíhá přeskok při nejnižším napětí, tedy spotřebuje nejméně energie [7].



Obr. 1.4 Paschenova křivka [7]

Vzorec pro výpočet přeskokového napětí v homogenním poli si odvodíme z rovnice podmínky samostatného výboje (1.25), kde po úpravě dostaneme následující vzorec.

$$\alpha d = \ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right) \quad (1.26)$$

Pokud víme:

$$\frac{\alpha}{p} = A e^{-\frac{Bp}{E}} \quad (1.27)$$

Předpokládáme, že ionizační číslo γ je konstantní a $E = \frac{U}{d}$. Po dosazení do rovnice (1.26) za α z rovnice (1.27) dostáváme:

$$A p d e^{-\frac{Bpd}{U}} = \ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right) \quad (1.28)$$

Po úpravě dostáváme vzorec pro přeskokové napětí

$$U_p = \frac{Bpd}{\ln\left(\frac{Apd}{\ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)}\right)} [V] \quad (1.29)$$

, kde A a B jsou konstanty, které se mění podle druhu plynu a velikosti teploty [1].

1.5 Elektrická pevnost

Elektrická pevnost je veličina, která popisuje velikost napětí na tloušťku izolantu, při kterém proběhne průraz. Používá se k dimenzování zařízení. Výboj je charakteristický dvěma stádii. Nejdříve klesne velikost odporu izolantu, čímž vzroste procházející proud. Následně se projeví degradační účinky, které se liší druhem skupenství a výkonem zdroje. Tyto účinky má na svědomí elektrický oblouk. Výboj rozlišujeme na přeskok a na průraz. Průraz je charakteristický úbytkem napětí, přírůstkem elektrického proudu a vysokou teplotou. Objevuje se u pevných látek, kde způsobuje trvalé degradační účinky. Tyto účinky se projevují ztrátou izolačních schopností izolantu. Rozsah poškození izolantu je závislý na množství dodané energie. Přeskok je také charakteristický úbytkem napětí a přírůstkem elektrického proudu. Na rozdíl od průrazu k němu dochází v kapalném a plynném skupenství. Dochází pouze k dočasné degradaci izolantu, protože se plyny a kapaliny umí regenerovat. Elektrická pevnost je tedy dána nejmenším napětím, které zapříčiní přeskok nebo průraz izolantu. Velikost potřebného napětí ovlivňuje tlak, teplota, druh a rozměry izolantu, doba namáhání a další faktory [5,7].

$$E_p = \frac{U_p}{d} [V \cdot m^{-1}] \quad (1.30)$$

Elektrickou pevnost materiálu nebo průrazné napětí určíme podle druhu koróny. Podle uspořádání elektrod rozlišujeme 3 typy korón: Streamer korónu, Leader korónu a Star korónu [4].

Star koróna se vyskytuje na velmi ostrých elektrodách (jehla, okraje). Lavinová ionizace nemá dostatečné množství energie z důvodu prudkého poklesu intenzity elektrického pole. Produkuje zvukový signál, jehož elektromagnetické rušení může dosáhnout až 500 MHz [4].

Streamer koróna se vyskytuje u hladších a větších elektrod (tyč, koule), které nejsou tak ostré. Lavinová ionizace obdrží dostatečné množství energie. Tato koróna je doprovázena zvukem připomínající chvění. Elektromagnetické rušení dosahuje až 40MHz [4].

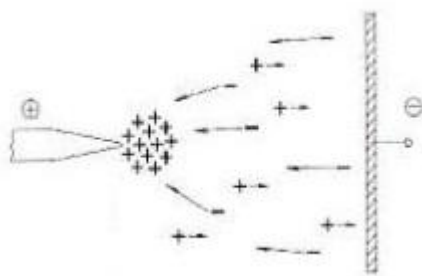
Leader koróna se vyskytuje u kulatých, tyčových nebo plochých elektrod od 1m, u kterých zvětšujeme vzdálenost a napětí mezi nimi. Trajektorie výbojů se zužují. Výboje tvoří jasně stupňovitou strukturu s větvemi. Na konci každé větve Streamer koróna

produkuje částice náboje z důvodu velké vodivosti. Tento jev je doprovázen zvukem praskotu a elektromagnetické rušení může dosahovat až 1GHz [4].

1.5.1 Homogenní a nehomogenní pole

V homogenním poli výboj nastává náhle při dosažení kritické hodnoty intenzity elektrického pole. Intenzita elektrického pole je v celém prostoru pole konstantní. Výboj mezi elektrodami tedy nastane, pokud zvýšíme hodnotu průrazného napětí na kritickou [2].

V nehomogenním poli se intenzita elektrického pole mění podél výboje. V místech s velkou intenzitou elektrického pole, která vznikají přiložením velkého napětí, se objevuje částečný výboj známý též jako koróna. Nehomogenní pole vzniká u specifických uspořádání elektrod, například hrot-deska. Pokud změním polaritu elektrod, můžeme pozorovat znatelný rozdíl mezi hodnotami průrazných napětí ve stejnosměrném poli. Uvažujme-li, že hrot je kladná elektroda a deska je záporná elektroda. Zvyšováním napětí vytvoříme částečný elektrický výboj u hrotu, kde máme největší intenzitu elektrického pole. Elektrony, které vychází z katody a šíří se směrem k anodě, vytváří pomocí nárazové ionizace kladně nabitě ionty a volné elektrony. Velké množství těchto kladných iontů za sebou u hrotu zanechává elektrony. Kladné ionty vytváří kladný prostorový náboj (Obr. 1.5), který má vliv na elektrické pole. To má za následek dva různé stavy [7].



Obr. 1.5 Prostorový náboj hrot-deska [7]

Dojde ke zmenšení intenzity elektrického pole blízko hrotu, protože se prakticky zvětší jeho malý poloměr. Zmenšením vzdálenosti mezi elektrodami se potenciál anody přiblížil ke katodě a tím vzrostla elektrická intenzita elektrického pole. Pokud převažuje zmenšení intenzity elektrického pole blízko hrotu, vznikají zde trsové výboje, které přechází v korónu. Při zvyšování napětí se zmenšuje vzdálenost elektrod, zvětšuje se hodnota intenzity elektrického pole a zmenšuje se velikost průrazného napětí. Naopak při

obracení polarit elektrod se opět vytvoří kladné ionty a volné elektrony pomocí nárazové ionizace. Kladný prostorový náboj se také bude nacházet v blízkosti hrotu, to samé platí pro korónu. Avšak potenciál záporného hrotu se nepřenáší blíž ke kladné elektrodě, což způsobuje větší průrazné napětí následkem snížení intenzity elektrického pole. Velikosti průrazných napětí těchto konfigurací se liší o 10–100% [7].

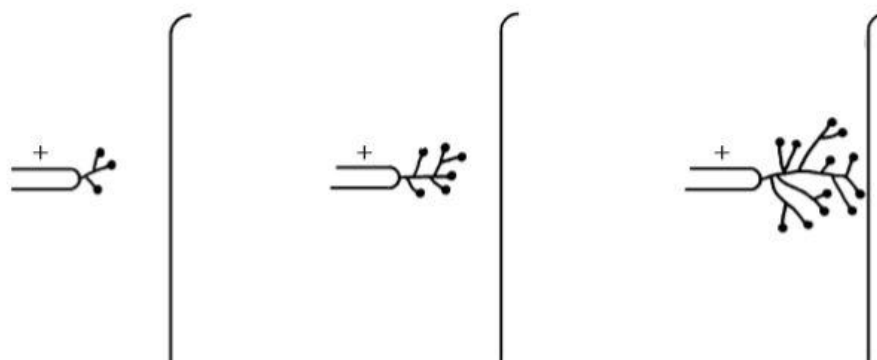
1.5.2 Koróna

V nehomogenním poli se u dostatečně vzdálených, zakřivených elektrod projeví světelné a slyšitelné známky výboje, který nastane dlouho před úplným přeskokem. Tento výboj, který je samostatný a neúplný, se nazývá koróna. O počátečním napětí koróny se můžeme bavit pouze v případě, že máme elektrody s dokonale hladkými povrchy bez nečistot. Zvyšováním napětí nám začne protékat větší proud a objeví se nám slabě svítící oblast kolem elektrody, která je doprovázena zvukovými efekty v podobě šumění a praskání. Při dalším zvyšování napětí nám výboj přechází v trsový a jiskrový. Pokud se na povrchu elektrody nacházejí nečistoty, vznikají zde nestabilní výboje, které produkují přerušované proudy. Počáteční napětí koróny v tomto případě tedy nemůžeme přesně určit [1,3].

Koróna je velice důležitá ve vysokonapěťové technice. Při přenosu elektrické energie je zodpovědná za ztráty na přenosových vedeních a zhoršení izolace vodičů. Korónu využíváme u zařízení pro rychlý tisk a elektrických odlučovačů. Elektrický odlučovač slouží k odstranění kapalných a pevných částic ze vzduchu [3].

Kladná koróna

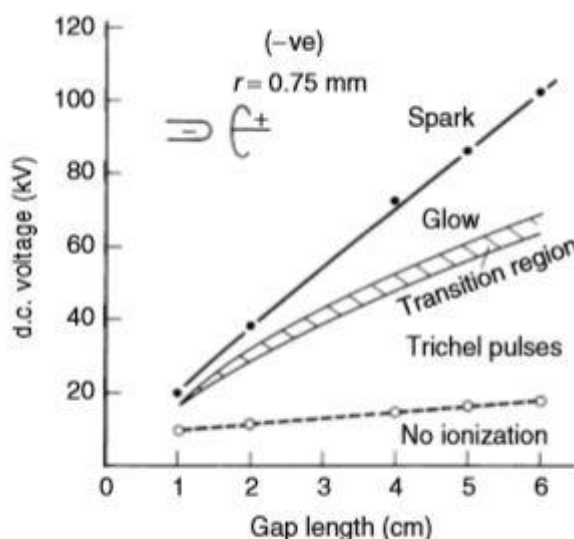
Nejlepší uspořádání elektrod pro dosažení velkého namáhání a hustého náboje je hrot-deska nebo tyč-deska. U velikosti impulzního napětí těsně nad hranicí vzniku ionizace je obtížné sledovat výboj z důvodu přechodného vývoje ionizace. K porozumění různým stádiím výboje nám slouží fotografické techniky, které nám umožňují vysokorychlostní pořizování fotografií. Výsledky ukázaly, že pokud přiložíme impulzní napětí na hrotovou elektrodu, vznikne nám rozvětvený výboj, který se nazývá streamer. Zvýšíme-li napětí, zvětší se nám délka a počet větví streameru (*Obr. 1.6*). Velké množství větví se nikdy nepřekříží. Jejich rychlost klesá, pokud proráží místo, kde je malé působení elektrického pole. Přechod streameru na konečný průraz je komplexní. Bylo vyvinuto několik modelů na vysvětlení tohoto přechodu [3].



Obr. 1.6 Rozvětvení streameru při zvyšujícím impulzním napětí [3]

Záporná koróna

Při negativní polaritě uspořádání elektrod bod-deska a překročení počátečního napětí nám proud plyne ve velmi pravidelných pulzech. Tento proud nám udává povahu a pravidelnost pulzů, se kterou se opakují. Tyto pulzy byly studovány a pojmenovány po Trichelovi. Počáteční napětí je téměř nezávislé na vzdálenosti elektrod a je přibližně stejně velké jako u streamerů pro stejné uspořádání a kladné napětí. Frekvence pulzů je závislá na poloměru katody, vzdálenosti elektrod, tlaku. Velikost frekvence vzrůstá s napětím [3].



Obr. 1.8 Frekvence Trichelových pulzů závislá napětí pro různé vzdálenosti elektrod [3]

Na obrázku (Obr. 1.8) můžeme vidět, že nejnižší přímka nám udává počáteční napětí pro vznik Trichelových pulzů, které nejsou závislé na velikosti vzdálenosti elektrod. Pro změnu režimu impulsu na stálý doutnavý výboj musíme rapidně zvýšit napětí. Tento

přechod není přesně daný, a proto je zobrazen na (Obr. 1.8) jako široká oblast. Při dalším zvyšování napětí nám zůstává doutnavý výboj až do uskutečnění přeskoků. Pro zápornou polaritu oproti kladné platí, že potřebujeme výrazně větší přeskokové napětí. Toto však neplatí pro nízké tlaky [3].

1.5.3 Atmosférické a jiné vlivy na přeskokové napětí

Velikost přeskokového napětí ovlivňují určité podmínky a okolnosti. Pokles tohoto napětí může způsobit například vlhký prach na elektrodách, který způsobuje u elektrod s velkým poloměrem křivosti přeskok mezi hroty. Přibližně stejný vliv na toto napětí má navlhlý vzduch a kapky usazené na elektrodách. Běžný déšť nemá moc velký vliv. V případě homogenního pole má vliv na velikost přeskokového napětí součin tlaku a vzdálenosti elektrod. Tato zákonitost byla popsána Paschenem a platí pouze pro elektrody s malým doskokem. Materiál elektrod zde hraje také patřičnou roli. V nehomogenním poli přeskokové napětí klesá do určité hodnoty a při dalším zvyšování naopak roste. V tomto případě materiál elektrod nemá vliv na přeskokové napětí. Přeskokové napětí závisí na atmosférických podmínkách, které jsou při provedení měření. K reprodukování výsledků se musí naměřená napětí přepočítávat na normální atmosférické poměry. Tyto poměry jsou dány: 101,3 kPa, teplota 20 °C a absolutní vlhkost 11 g/m³. Z tohoto důvodu se udává korekční činitel (k_h), který je závislý na poměrné hustotě vzduchu (δ). Poměrná hustota vzduchu je dána vztahem

$$\delta = \frac{b}{101,3} \cdot \frac{273 + 20}{273 + \vartheta} = 2,89 \frac{b}{273 + \vartheta} [-] \quad (1.31)$$

, kde b [kPa] je atmosférický tlak a ϑ [°C] je teplota [1].

1.6 Streamer

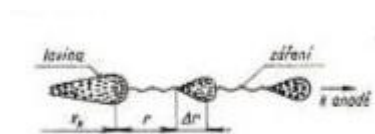
V homogenním poli výboj vznikne u vzdálených elektrod za atmosférického tlaku za velmi krátkou dobu (10^{-7} s). Toto nemohla vysvětlit teorie elektrického výboje, protože rychlost kladných iontů činí 10^5 cm/s. To znamená, že žádný kladný iont nepřekonal vzdálenost mezi elektrodami před vznikem jiskry. Kvůli danému jevu byl stanovený nový mechanismus. Jeden elektron, který způsobuje elektronovou lavinu, vytvoří dostatečný prostorový náboj a ten přejde v kanálový výboj. Šíření elektronové laviny studovali různí vědci prováděním experimentů ve Wilsonově mlžné komoře. Z experimentů zjistili, že

náboj elektronů v čele laviny roste podle zákona $e^{\alpha x}$, kde x je vzdálenost čela laviny od katody. V čele laviny se nachází nejvíce kladných iontů. Difuze elektronů způsobuje rozšíření pohybující se laviny elektronů. Pokud zvětšíme dostatečně poměr E/p a lavina probíhá na takovou vzdálenost x , že αx nabývá hodnoty 18–20, vyrazí z čela laviny výbojový kanál k anodě i katodě. Tento výboj se šíří asi desetkrát větší rychlostí než lavina. Stalo se tomu tak, protože v tomto místě intenzita superponovaného elektrického pole prostorového náboje elektronů v čele laviny dosáhla velikosti intenzity vnějšího homogenního pole. Tento výboj se jmenuje streamer podle charakteristického namodralého světélkování. Zvýšením napětí se místo vzniku streameru posouvá blíže směrem ke katodě. Ve vzduchu podmínka samostatného náboje (1.29) podle Townsenda platí do hodnoty součinu tlaku a vzdálenosti elektrod $pd = 1333,2$ kPa/cm. Při překročení napětí, které plyne z této podmínky, se vyvine kanálový výboj [1].



Obr. 1.7 Lavina [1]

Streamer vznikne při kritické velikosti prostorového náboje. Při přechodu lavina-streamer se v homogenním poli rozvíjí výboj již bez pomoci ionizačního činidla. Prostorová hustota elektronů i kladných iontů je v první fázi rozvoje laviny malá. Při nárůstu této hustoty náboje elektronů a kladných iontů deformují homogenní elektrické pole. Následek této deformace je růst spádu napětí před čelem laviny a týlu. V čele laviny se objevuje fotoionizace. V oblastech s velkým spádem napětí prudce narůstá intenzita ionizace. Mezi těmito oblastmi klesá intenzita elektrického pole a vytváří se zde plazma [1].



Obr. 1.8 Rozvoj streameru [1]

Nyní si vyložíme teoreticky rozvoj streameru. Lavina urazí vzdálenost x_k . Při překročení kritické hodnoty hustoty elektronů a ultrafialového záření v čele laviny vzniká fotoionizací elektron vzdálený r od čela laviny. Tento elektron vznikl působením

elektrického pole a začne se pohybovat směrem k anodě a nárazovou ionizací tvoří svou lavinu. Ionizační číslo je závislé na velikosti intenzity elektrického pole. Z tohoto důvodu je velikost prostorového náboje stejně velká jako u první laviny, přestože platí: $\Delta r < x_k$. Vzdálenost mezi čelem prvotní a sekundární laviny se plní elektrony z prvotní laviny a kladnými ionty ze sekundární laviny. Tato oblast obsahuje přibližně stejný počet elektronů a kladných iontů. Označujeme jí jako plazma a je velmi dobře vodivá. Sekundární lavina produkuje fotóny, které rozšiřují kanál až do dosažení anody. Poslední fáze vývoje výboje je vytvoření dalšího kanálu směrem ke katodě rychlostí 10^8 cm/s. [1]

1.7 Leader

V nehomogenním poli u velkých vzdáleností (desítky centimetrů a víc) dosahuje streamer velikosti desítek centimetrů a teploty okolo 3000 °C, která způsobuje tepelnou ionizaci. Teplota není po celé délce streameru stejná. Na začátku streameru je nízká intenzita elektrického pole. Na konci streameru je tato intenzita vysoká, což vede k rozvětvení a prodlužování původního streameru. Teplota se s průtokem elektronů zvyšuje. V nehomogenním poli se takto vytváří tepelně ionizovaný kanál zvaný leader. Při přiblížení leaderu k elektrodě opačné polarity dochází v nepřemostěné oblasti ke zvýšení intenzity elektrického pole. Pokud se leader šíří ke katodě, tak z ní vytahuje elektrony k neutralizaci náboje a tím zvyšuje elektrický proud. Pro vznik kanálového výboje v nehomogenním poli vzduchu platí následující rovnice podle Meeka

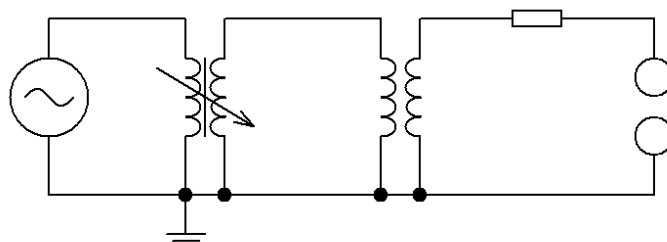
$$\ln \alpha_x + \int_0^x a dx = g(x) \quad (1.32)$$

, kde x je kritická délka elektronové laviny v okamžiku, kdy se přetváří streamer, α je Townsendovo ionizační číslo, α_x je hodnota ionizačního čísla v čele laviny a $g(x)$ je neznámá funkce x [1].

2 Měření elektrické pevnosti nečistot

2.1 Popis pracoviště

Měření probíhalo ve vysokonapěťové laboratoři Fakulty strojní Západočeské univerzity Univerzitní 2762/22 v Plzni. Laboratoř je velmi dobře vybavena pro různé druhy experimentů a slouží pro výukové, vědecké i komerční účely.



Obr. 2.1 Schéma zapojení

Obvod pro měření elektrické pevnosti byl zapojen dle schématu (Obr. 2.1). Pro měření byl použit transformátor pro střídavé napětí MICAFIL CTI 150 PA. Tento transformátor může dosáhnout hodnoty až 150kV a pracuje při 50 Hz. Napětí se reguluje pomocí autotransformátoru, který je připojen k elektrické síti. K transformátoru je připojena sériová kombinace odporu o velikosti 10 k Ω a kulového jiskřiště. Jako měřicí přístroj pro určení velikosti přeskokového/průrazného napětí byl použit voltmetr, který je již součástí obvodu transformátoru. Všechny prvky obvodu byly připojeny na společnou zem. Vzdálenost mezi elektrodami kulového jiskřiště byla nastavena 18,5 mm. Tato vzdálenost byla pro všechna měření stejná. Pro každý zvolený experiment bylo měření několikrát opakováno, aby se zvýšila přesnost a důvěryhodnost dosažených výsledků. Atmosférické podmínky se nebraly v potaz, jelikož nám šlo o porovnání hodnot různých experimentů mezi sebou, nikoliv změřit přesnou hodnotu přeskokového napětí při atmosférických podmínkách.



Obr. 2.2 Zapojení měření – transformátor (vpravo) a kulové jiskřiště (vlevo)

2.2 Návrh experimentů

S různými materiály se mění elektrická pevnost. Průraz/přeskok nastane v případě, že se elektrická pevnost sníží na kritickou úroveň. V této části budu popisovat příčiny, které snižují elektrickou pevnost mezi vodiči vedení a elektrickou pevnost izolátorů. Bohužel se v laboratoři nemohly simulovat všechny možné příčiny vzniku přeskočků/průrazů nebo snížení elektrické pevnosti. Experimenty se provedly pouze pro nejpravděpodobnější případy, které se daly zrealizovat v prostorách laboratoře.

I. Ptačí říše

Jednou z příčin poruch na vedení jsou energetiky oblíbení ptáci. Ptactvo je velmi početná říše, která ráda usedá, polétává a kálí na všechno, co se jim namane, což můžeme vidět na (Obr. 2.3). Ptáci rádi dosedají na stožáry a na vodiče venkovního vedení, kde svým trusem snižují elektrickou pevnost. Mohou způsobit zemní spojení v případě izolátorů na stožárech nebo v případě vodičů mezifázový zkrat. Dále je možné, že při dosedu nebo odletu ze stožáru venkovního vedení vytvoří vodivou cestu svými těly. Můžeme se tedy bavit o potenciálním mezifázovém zkratu. Pro snížení počtu poruch se na stožáry venkovního vedení montují zábrany nebo místa pro bezpečný dosed.



Obr. 2.3 Hejno ptáků na venkovním vedení [8]

II. Voda

Pro padající kapky vody, vlhký vzduch nebo usazené kapky vody platí, že nezpůsobují poruchu, ale snižují elektrickou pevnost mezi vodiči a elektrickou pevnost izolátorů.

Padající kapky vody a vlhký vzduch mezi vodiči mají menší vliv na elektrickou pevnost než usazené kapky na vodičích venkovního vedení. Voda může velmi přispět ke zmenšení elektrické pevnosti.

III. Pavoučí vlákno

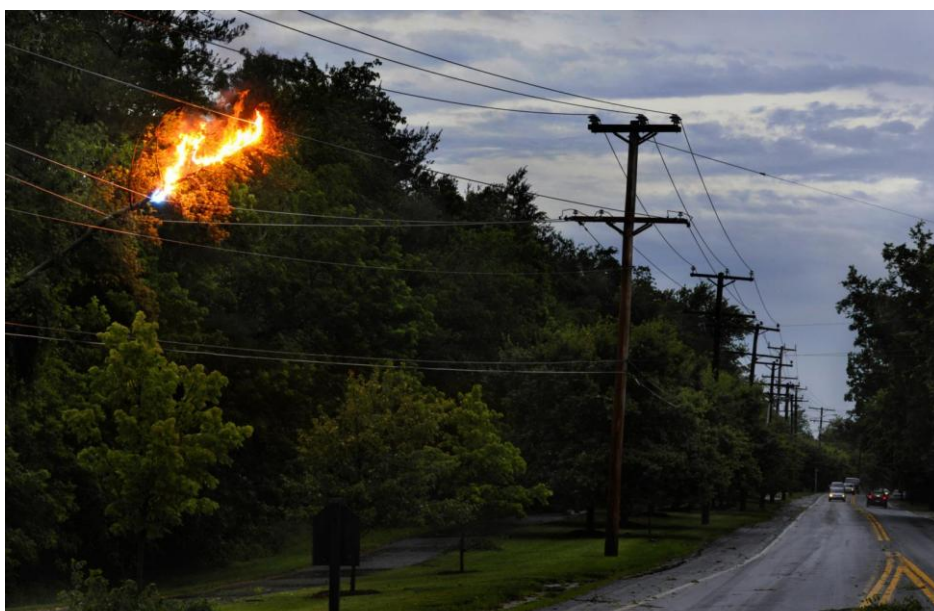
Pavučina není obecně vodič, ale může vytvořit vodivou cestu. Pokud se zachytí vlákna pavučiny na izolátoru nebo mezi vodiči venkovního vedení, mohou se na nich zachytit kapky vody při dešti nebo při vodních srážkách v podobě rosy (*Obr. 2.4*). Za těchto podmínek mohou vytvořit velmi dobrý přechod pro průchod proudu.



Obr. 2.4 Pavučina s rosou [9]

IV. Vegetace

Pro život člověka nezbytná, ale pro přenos energie je někdy na obtíž. Existují předpisy na vzdálenost venkovního vedení od stromových uskupení, ale ty se pořád rozrůstají a tyto vzdálenosti se mohou časem porušit. Zemní spojení nebo mezifázový zkrat tedy mohou nastat. Zemní spojení může nastat, pokud se například stéblo trávy nebo list vznese a přichytí na izolátor. Příklad mezifázového zkratu může nastat při spadnutí stromu nebo větve na vodiče vedení, tak jak je tomu na (*Obr. 2.5*). Spadlá větev nebo strom může samozřejmě taky způsobit zemní spojení u izolátoru.



Obr. 2.5 Spadlá větev na venkovním vedení [10]

V. Odpadky

Člověk je tvor, který zasahuje do všeho a zanechává za sebou spoušť. Bavíme se o odpadcích, které lidi odhazují všude okolo. Při tomto experimentu se testovala elektrická pevnost igelitového sáčku a papíru. Igelitový sáček i papír je lehký a vítr je může potenciálně unášet po okolí. Igelitový sáček se může přichytit na boku izolátoru nebo na jednom nebo vícero fázových vodičů venkovního vedení a způsobí pokles elektrické pevnosti.

2.3 Měření a zhodnocení výsledků

Pro všechna měření je výstupní veličina průrazné/přeskokové napětí daného případu. Obrázky jednotlivých experimentů jsou k nahlédnutí v příloze. První měření jsme provedli pro vzduch, kde vycházely hodnoty mezi 37,4–38,8 kV, jak můžeme vidět v *Tab 2.1*. Pro lepší přehled budeme zbylé měření porovnávat s aritmetickým průměrem těchto hodnot, který se rovná 38 kV. Toto měření je velice zásadní, protože slouží k porovnání s ostatními výsledky.

Tab 2.1 Hodnoty přeskokových napětí pro vzduch

k [-]	1	2	3	4	5	6
U_p [kV]	37,4	37	37,3	39,3	39,8	38,8



Obr. 2.6 Uspořádání elektrod pro všechny experimenty

2.3.1 Ptačí trus

Pomocí dostupných prostředků byla snaha reprodukovat ptačí trus pomocí látky o podobné konzistenci. Pro tento experiment byl použit bílý jogurt, který pro demonstraci postačil. Toto měření bylo provedeno pro dva různé případy. Nejdříve se provedl experiment, kde se nanasl jogurt na jednu elektrodu a poté na obě elektrody. Při aplikování „ptačího trusu“ pouze na jednu elektrodu se přeskokové napětí snížilo přibližně o 5–10 kV, jak můžeme vidět v Tab. 2.2. Pro případ aplikování „ptačího trusu“ na obě elektrody se nám průrazné napětí snížilo přibližně o 12–18 kV.

Tab. 2.2 Hodnoty přeskokových napětí při aplikování „ptačího trusu“ na jednu elektrodu

k [-]	1	2	3	4	5
U_p [kV]	29,7	35	31,3	33,2	33

Tab.2.3 Hodnoty přeskokových napětí při aplikování „ptačího trusu“ na obě elektrody

k [-]	1	2	3	4	5	6	7
U_p [kV]	26	25,8	19,1	20,2	21,2	20,4	20,4

2.3.2 Usazené kapky

V laboratoři se ze všech možností „vody“ provedl experiment usazených kapek. Měřila se elektrická pevnost vzduchu při navlhčení elektrod kulového jiskřiště kapkami vody. Toto měření se provedlo pro dva různé případy. V prvním případě se navlhčily obě

elektrody a v druhém pouze jedna elektroda. Mezi výboji se dodržovaly intervaly přibližně 30 s. V *Tab 2.2* můžeme vidět, že se nám přeskokové napětí pro obě navlhčené elektrody snížilo v průměru o 10 kV. V případě navlhčené jedné elektrody *Tab 2.3* se můžeme bavit přibližně o polovině hodnoty, tedy 5 kV. Zvyšování přeskokového napětí mohlo být způsobeno neopětovným navlhčením elektrody mezi výboji. Dosažení nižší hodnoty přeskokového napětí může být samozřejmě dosaženo do určité hodnoty větším navlhčením elektrod.

Tab. 2.4 Hodnoty přeskokových napětí pro navlhčené elektrody

k [-]	1	2	3	4	5	6
U_p [kV]	25,4	25,3	29,3	29,1	30,2	30,8

Tab. 2.5 Hodnoty přeskokových napětí pro navlhčenou elektrodu

k [-]	1	2	3	4	5
U_p [kV]	32,5	33,7	34,3	35,3	35,6

2.3.3 Pavoučí vlákno

V tomto experimentu se měřila elektrická pevnost pavoučího vlákna. Toto měření se provedlo pro dva různé případy. Nejdříve se měřilo se suchým pavoučím vláknem a poté se provedlo měření s navlhčeným pavoučím vláknem. Jak víme, pavoučí vlákno je za normálního stavu izolant. Měření se však provedlo, aby se porovnal přesný rozdíl velikostí průrazného napětí mezi nimi. Suchá pavučina se umístila mezi elektrody až na výboj o velikosti průrazného napětí 35,6 kV, kde se pavučina umístila pouze na jednu elektrodu. Z měření se potvrdilo, že průrazné napětí suchého pavoučího vlákna je téměř shodné s přeskokovým napětím vzduchu. Pouze v případě pavučiny umístěné na jedné elektrodě se hodnota průrazného napětí snížila o několik kilovolt. Hodnoty průrazného napětí *Tab. 2.7* navlhčeného pavoučího vlákna se snížily až na třetinu oproti hodnotě přeskokového napětí vzduchu, ale jejich hodnota průrazného napětí stoupala s každým dalším výbojem. To bylo nejspíše způsobeno neopakovaným navlhčováním pavoučího vlákna. Můžeme tedy do jisté míry říci, že čím více navlhčíme pavoučí vlákno, tím menší bude velikost přeskokového napětí.

Tab. 2.6 Hodnoty průrazných napětí pro suché pavoučí vlákno

k [-]	1	2	3	4	5
U_p [kV]	37,9	35,6	39,2	39,8	40,3

Tab. 2.7 Hodnoty průrazných napětí pro vlhkou pavučinu

k [-]	1	2	3	4	5	6
U_p [kV]	12	10,6	17,8	22,5	26,4	32,3

2.3.4 Vegetace

Pro poruchy způsobené vegetací se měřilo průrazné napětí vlhkého listu a vlhkého stébka trávy. Stéblo trávy může do jisté míry také reprezentovat spadlou větev na venkovním vedení. Pro případ vlhkého stébka umístěného mezi elektrodami se velikost průrazného napětí pohybovala okolo 15 kV, přičemž od 5 kV jsme mohli pozorovat a slyšet malé výboje. Pro vlhký list umístěný mezi elektrodami bylo naměřené průrazné napětí 3–8 kV, jak můžeme vidět v Tab. 2.9. Při výboji se držel elektrický oblouk a nevzrůstalo napětí z důvodu růstu proudu. Naměřené napětí je podstatně nižší než u stébka trávy, protože list zabíral větší plochu než stéblo trávy.

Tab. 2.8 Hodnoty průrazných napětí pro vlhké stéblo trávy

k [-]	1	2
U_p [kV]	13,8	17,3

Tab. 2.9 Hodnoty průrazných napětí pro vlhký list

k [-]	1	2
U_p [kV]	8,4	3

2.3.5 Odpadky

Pro tento experiment se provedlo měření elektrické pevnosti dvou možných případů odpadků. Provedly se variace měření pro papír a igelitový pytlík. Pro oba případy se měřilo ve vlhkém a suchém stavu pro umístění mezi elektrodami a na jedné elektrodě.

Velikost průrazného napětí pro suchý papír mezi elektrodami se pohybovala okolo 18 kV, je tedy poloviční oproti přeskokovému napětí vzduchu, jak můžeme vidět v Tab. 2.10. Po vložení vlhkého papíru mezi elektrodami vznikl výboj při průrazném napětí 3 kV a elektrický oblouk začal procházet skrz papír. Při pokusu o navýšení napětí autotransfornátorem se zvýšil pouze proud. Dále následovalo měření suchého papíru

přípevněného na jedné elektrodě, který téměř nezmenšil elektrickou pevnost viz *Tab. 2.12*. Jako poslední se testoval navlhčený papír, který byl přípevněn na jednu elektrodu. První hodnota dosáhla velikosti 21,7 kV a při dalších výbojích hodnoty klesaly. Toto bylo způsobeno neopakovaným navlhčováním papíru, jelikož před posledním výbojem tento papír byl znovu navlhčen a průrazné napětí opět kleslo téměř na první hodnotu.

Tab. 2.10 Hodnoty průrazných napětí pro suchý papír mezi elektrodami

k [-]	1	2	3	4	5	6
U_p [kV]	17,2	17,6	16,6	19,7	19,8	17,5

Tab. 2.11 Hodnoty průrazných napětí pro vlhký papír mezi elektrodami

k [-]	1	2
U_p [kV]	3	3

Tab. 2.12 Hodnoty průrazných napětí pro suchý papír na jedné elektrodě

k [-]	1	2	3	4	5
U_p [kV]	32	35,4	31,8	35,6	35,5

Tab. 2.13 Hodnoty průrazných napětí pro mokřý papír na jedné elektrodě

k [-]	1	2	3	4	5	6
U_p [kV]	21,7	22,9	23,6	23,9	24,8	22,7

Poslední sada měření byla pro igelitový pytlík. Nejdříve byla snaha změřit igelitový pytlík umístěný mezi elektrodami, ale v tomto případě působilo elektrostatické pole a pytlík svojí silou odsunulo z prostoru mezi elektrodami ještě před vznikem výboje. Jako další se testoval igelitový pytlík, který byl přilepený mezi elektrody pomocí vody. Zde máme nejdříve vysoké hodnoty dosahující 30 kV a poté se snížily až na 18 kV. Toto se pravděpodobně stalo kvůli zuhelnatělým zbytkům, které vznikly po výboji a následně zlepšily vodivost mezi elektrodami. Pro případ igelitového pytlíku, který byl navlhčen vodou, se hodnoty pohybovaly podobně jako u předchozího experimentu kolem 18 kV. Hodnoty pro igelitový pytlík přichycený na jedné elektrodě se pohybovaly na podobné úrovni jako u vzduchu, tedy 37 kV. Poslední experiment, který proběhl v laboratoři, byl navlhčený igelitový pytlík přípevněný na jednu elektrodu. Hodnoty byly různé, a to nejspíše z důvodu, že výboj pokaždé proběhl v jiném místě pytlíku.

Tab. 2.14 Hodnoty průrazných napětí pro igelitový pytlík přilepený mezi elektrody vodou

k [-]	1	2	3	4	5
U_p [kV]	30	29,7	18	17,9	18,3

Tab. 2.15 Hodnoty průrazných napětí pro vlhký igelitový pytlík mezi elektrodami

k [-]	1	2	3	4	5
U_p [kV]	16,8	18,1	18,2	16,9	17,8

Tab. 2.16 Hodnoty průrazných napětí pro suchý igelitový pytlík na jedné elektrodě

k [-]	1	2	3	4	5
U_p [kV]	36,2	38,7	37,3	37	35,8

Tab. 2.17 Hodnoty průrazných napětí pro vlhký igelitový pytlík na jedné elektrodě

k [-]	1	2	3	4	5	6	7
U_p [kV]	19,2	19,9	17,3	22	26,3	27,8	19

3 Závěr

Tato bakalářská práce zkoumá potenciální příčiny poklesu elektrické pevnosti zaměřující se pro případy, které by se mohly stát na venkovním vedení. První část bakalářské práce se zabývá teoretickou stránkou zkoumané problematiky. Nejdříve pojednává o základních zákonech, které platí v plynech. V dalších bodech teoretické části se věnuji výbojům a elektrické pevnosti.

V praktické části se nejdříve zabývám návrhem experimentů, které by mohly potenciálně snížit elektrickou pevnost na venkovním vedení. Uvažuji zde pouze nejpravděpodobnější příčiny snížení elektrické pevnosti na venkovním vedení a z nich jsem vybral pouze ty, které se daly simulovat v prostorách laboratoře. Experimenty jsem rozdělil do pěti skupin podle nečistot. Provedly se variace měření pro určité experimenty.

Nejdříve se měřila elektrická pevnost vzduchu. Tato hodnota sloužila jako referenční pro následující experimenty. Bylo naměřeno přeskové napětí 38 kV. Následovalo měření všech již zmíněných experimentů. Nejmenší hodnota průrazného napětí dosahovala 3 kV pro vlhký list a pro vlhký papír mezi elektrodami, jelikož nám voda vytvořila vhodné přemostění pro elektrický proud. Největší hodnoty přeskového napětí byly naměřeny pro suché pavoučí vlákno, suchý papír připevněný na jedné elektrodě a suchý igelitový pytlík připevněný na jedné elektrodě. Tyto hodnoty byly téměř totožné s přeskovým napětím vzduchu. Hodnoty přeskového napětí pavoučího vlákna po navlhčení klesly téměř na čtvrtinu původní hodnoty, což nám jasně ukazuje, že voda na pavoučím vlákně vytvoří velmi dobrý přechod pro průchod elektrického proudu. Podobných výsledků jsem dosáhl při navlhčení igelitového pytlíku, kde průrazné napětí kleslo téměř na polovinu své původní velikosti.

Z měření bylo patrné, že největší vliv na velikost elektrickou pevnost má voda. Usazené kapky vytváří vodivou cestu pro elektrický proud. Samozřejmě dále platí, že čím více nečistot se sejde najednou, tím větší vliv mohou mít na elektrickou pevnost.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] VEVERKA, A., , *Technika vysokého napětí*. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, ALFA - Vydavatelství technické a ekonomické literatury, 1978.
- [2] *Courseware - Technika vysokého napětí: materiály ke cvičení* [online]. [cit. 2018-05-30]. Dostupné z: <https://courseware.zcu.cz/portal/studium/courseware/kee/tvn/cviceni/index.html>
- [3] ZAENGL, W. S., KUFFEL, J., KUFFEL, E. *High voltage engineering* [online]. 2nd ed. Butterworth-Heinemann, 2000 [cited 15 March 2018]. Available from: <http://www.mv.helsinki.fi/tpaulin/Text/hveng.pdf>.
- [4] ARORA, R., MOSCH, W. *High voltage and electrical insulation engineering*.
- [5] HELLER, B., VEVERKA, A. *Elektrická pevnost*. Praha: Nakladatelství Československá akademie věd, 1957.
- [6] KUSAL, J. Plyny, vákuum a polovodiče. [online]. 2003 [cited 2018-03-18]. Available from <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/elektrina/2-3.htm>
- [7] MENTLÍK, V. *Dielektrické prvky a systémy*. 1st ed. Praha: Nakladatelství BEN - technická literatura, 2006.
- [8] *Ptačí hejno* [online]. In: . [cit. 2018-04-23]. Dostupné z: <https://www.novinky.cz/vase-zpravy/kralovehradecky-kraj/nachod/541-6202-ptaci-zpusobili-nekolik-vyboju-a-odpojili-pastviste-od-elektricke-energie.html>
- [9] *Pavučina s rosou* [online]. In: . [cit. 2018-04-23]. Dostupné z: <http://hanaska.blog.cz/0704/pavuciny>
- [10] *Spadlá větev na venkovním vedení* [online]. In: . [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: http://en.kechina.com/?post_type=product&p=1636

Přílohy

Příloha A – Měření elektrické pevnosti vzduchu s „ptačím trusem“ na jedné elektrodě



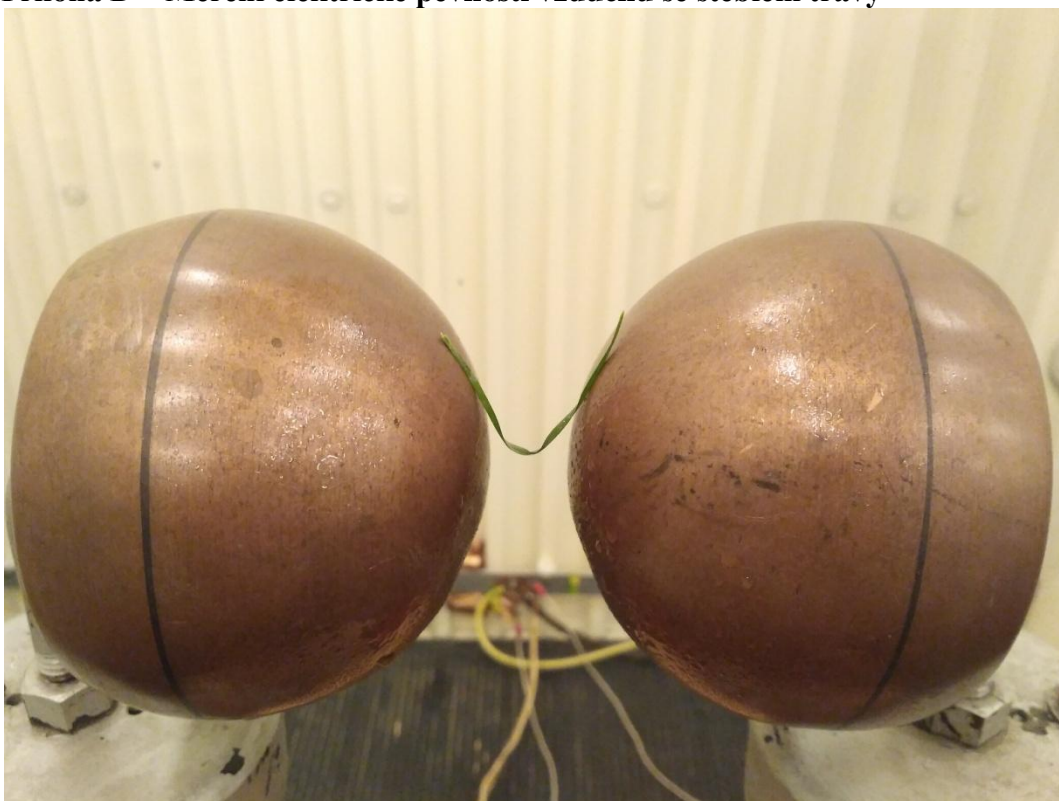
Příloha B – Měření elektrické pevnosti vzduchu s navlhčenými elektrodami



Příloha C – Měření elektrické pevnosti vzduchu s vlhkou pavučinou



Příloha D – Měření elektrické pevnosti vzduchu se stéblem trávy



Příloha E – Měření elektrické pevnosti vzduchu s listem



Příloha F – Měření elektrické pevnosti vzduchu s vlhkým papírem mezi elektrodami



Příloha G – Měření elektrické pevnosti vzduchu s vlhkým igelitovým sáčkem na jedné elektrodě

