

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Elektrická pevnost izolátorů v sítích VN

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2018/2019

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

Jméno a příjmení: **Daniel ROKŮSEK**

Osobní číslo: **E16B0049P**

Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**

Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**

Název tématu: **Elektrická pevnost izolátorů v sítích VN**

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 vysokonapěťové výboje na povrchu pevných izolantů.
2. Popište, jak může u venkovních vysokonapěťových vedení dojít ke snížení elektrické pevnosti.
3. Pokuste se napodobit popsané okolnosti v laboratorních podmínkách a otestujte elektrickou pevnost.
4. Zhodnoťte dosažené výsledky.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

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

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

Seznam odborné literatury:

1. **VEVERKA, Antonín. Technika vysokých napětí: Celost. vysokošk. učebnice. 1. vyd. Praha: SNTL, 1966. 277, [1] s. Řada elektrotechn. literatury.**

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

Datum zadání bakalářské práce: **5. října 2018**

Termín odevzdání bakalářské práce: **13. června 2019**


Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan




Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 5. října 2018

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá elektrickou pevností izolátorů a zaměřuje se zejména na vlivy působící na izolátor v provozu. Tato práce zároveň popisuje způsob, jakým vznikají na povrchu izolátoru výboje. Třetí kapitola potom obsahuje informace z měření elektrické pevnosti izolátoru při několika různých deterioračních vlivech.

Klíčová slova

Elektrická pevnost, izolátor, výbojová činnost, výstavba výboje, znečištění, částečné výboje

Abstract

The bachelor thesis deals with the electrical strength of insulators and focuses mainly on the weakening impacts on the insulator in operation. At the same time, this work describes the way in which discharges are formed on the surface of the insulator. The third chapter contains information from the electrical strength measuring of the insulator at several different deterioration effects.

Key words

Electrical strength, insulator, discharge, discharge formation, pollution, partial discharges

Prohlášení

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

.....

podpis

V Plzni dne 6.6.2019

Daniel Rokůsek

Poděkování

Tímto bych rád od srdce poděkoval vedoucímu práce Ing. Miroslavu Hromádkovi, Ph. D. za kolegiální přístup při měření, vlídnost v jeho odborných odpovědích, jimiž reagoval na spoustu mých otázek a obecně za velice přínosnou a radostnou spolupráci. Jsem vděčný za všechny nové zkušenosti, které mi bakalářská práce přinesla a bylo velice užitečné jí věnovat čas. Děkuji také své rodině za všechnu podporu a pevné nervy.

OBSAH

ÚVOD	9
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
1 ELEKTRICKÁ PEVNOST IZOLÁTORU	11
1.1 VENKOVNÍ IZOLÁTORŮ NA VEDENÍCH VN.....	11
1.1.1 Keramické izolátory.....	11
1.1.2 Nekeramické izolátory	12
1.2 ZNEČIŠTĚNÍ IZOLÁTORU	13
1.2.1 Kontaminované prostředí	13
1.2.2 Ranní efekt.....	15
1.2.3 Elektromagnetická bouře.....	15
1.2.4 Vlivy vegetace	17
1.2.5 Další dopady na EP.....	17
1.2.6 Měření znečištění izolátoru.....	18
2 VÝSTAVBA VÝBOJE NA POVRCHU IZOLÁTORU	19
2.1 VÝBOJE V PLYNU	19
2.1.1 Částečný výboj.....	20
2.1.2 Strimér.....	22
2.1.3 Townsendovy výboje.....	22
2.1.4 Koróna.....	24
2.1.5 Polaritní jev.....	25
2.2 VÝBOJOVÁ ČINNOST NA POVRCHU	25
I. Elektrické pole kolmé na povrch.....	26
II. Elektrické pole rovnoběžné s povrchem.....	26
III. Tangenciálně namáhané izolační systémy.....	27
2.2.1 Elektrické stromečky a vodivé cesty.....	27
3 TEST ELEKTRICKÉ PEVNOSTI V LABORATOŘI.....	28
3.1 METODIKA MĚŘENÍ V LABORATOŘI.....	28
3.1.1 Popis měřicího vybavení.....	28
3.1.2 Způsob měření	29
3.2 MĚŘENÍ ELEKTRICKÉ PEVNOSTI.....	30
3.2.1 Zaprášený suchý izolátor.....	30
3.2.2 Aplikace vody na zaprášený izolátor	31
3.2.3 Čistý izolátor	34
3.2.4 Aplikace vody na čistý izolátor	35
3.2.5 Osychání povrchu.....	37
3.2.6 Pavučiny klenoucí se po povrchu.....	38
3.2.7 Pokrytí sněhem	40
3.2.8 Vliv mokrého listí.....	41
3.2.9 Poletující odpad – lidský faktor.....	43
4 ZÁVĚR.....	48
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ.....	49
PŘÍLOHY	1

Úvod

Izolátory se staly nedílnou součástí všech elektrických sítí a jejich správné fungování je nezbytné pro stabilní distribuci energie po vysokonapětových vedeních. Tato bakalářská práce se zabývá elektrickou pevností izolátorů v sítích vysokého napětí. Izolátor je ve svém pracovním prostředí vystaven tvrdým atmosférickým vlivům a znečištění, které jeho efektivnost značně omezují a mohou být příčinou takzvaného ranního efektu. Důsledek těchto podmínek na elektrickou pevnost lze těžko odhadnout, protože znečišťující faktory jsou rozmanité a mohou se různě kombinovat. Součástí práce je i kapitola zabývající se různorodou výbojovou činností, která na povrchu izolátoru vystavenému elektrickému poli vzniká.

Cílem bakalářské práce je popsat důsledky vnějších vlivů na elektrickou pevnost izolátorů či vznik ranního efektu a posoudit je na základě získaných informací z laboratorních zkoušek.

Seznam symbolů a zkratek

VN	Vysoké napětí (kV)
EP	Elektrická pevnost (kV/mm)
kV	Kilovolt
ČV.....	Částečné výboje
ESDD.....	Ekvivalent nanesené soli (mg/cm ²)
γ	Konduktivita ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
S.....	Plocha (m ²)
J.....	Plošný proud (A/m ²)
tg δ	Ztrátový činitel (-)
UV	Ultrafialové
PVC	Polyvinylchlorid
ms	Milisekunda
U	Napětí (V)
I.....	Proud (A)
HR.....	Magnetická indukce (nT)
mg	Miligram
NaCl.....	Chlorid sodný

1 Elektrická pevnost izolátoru

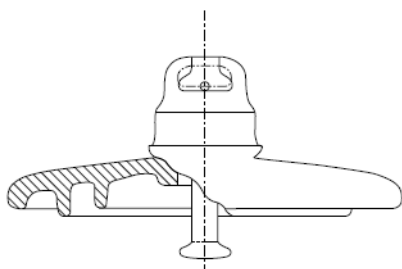
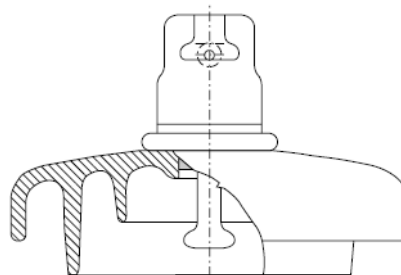
Elektrická pevnost je podíl průrazného napětí k tloušťce dielektrika mezi elektrodami. V této kapitole popíše problematiku elektrické pevnosti venkovního izolátoru v pracovním prostředí.

1.1 Venkovní izolátory na vedeních VN

Anorganické pevné materiály, z nichž jsou izolátory vyrobeny, jsou velmi odolné atmosférickým podmínkám, mají velikou tepelnou a chemickou odolnost a oproti ostatním izolačním materiálům jsou mechanicky pevné. Izolátory, vyrobené z anorganických materiálů jako je porcelán, technická keramika, či slída, tak mohou být použity tam, kde budou silně elektricky, tepelně a chemicky namáhány. Venkovní keramické izolátory jsou během výroby ponořeny do glazurové lázně a vzniklý sklovitý povrch, necitlivý vůči chemickým defektům, izolátorům dodává skvělou povětrnostní odolnost.

1.1.1 Keramické izolátory

V historii byly keramické izolátory poprvé používány jako komponenty v telegrafních sítích už v druhé polovině 19. století. Jsou vyrobeny z keramických materiálů, které obsahují porcelán a sklo. Porcelán se používá zejména na výrobu závěsných tyčových izolátorů, na duté, či pevné jádrové sloupky, nebo na výrobu porcelánových pouzder a závěsných talířových izolátorů, které lze v energetice najít i s čistě skleněným talířem. Dnes se tyto skleněné izolátory vyrábějí přednostně z tepelně tvrzeného skla, které zamezuje tvoření prasklinek. Tyto typy izolátorů, jak lze očekávat z jejich letité historie, představují v současné době zdaleka většinu používaných zařízení. Konstrukční a výrobní procesy se trvale zlepšují, v potaz přicházejí nové alternativy i z hlediska provozu v kontaminovaných prostředích, což je jedna z hlavních zkoumaných problémových situací. Výsledkem jsou spolehlivé izolátory s dlouhodobou životností. Izolátory vyrobené z těchto materiálů jsou odolné působícímu tlaku a mají inertní povrch, který má vysokou odolnost proti povrchovým výbojům [2].

**Obrázek 1: Závěsný talířový izolátor [2]****Obrázek 2: Závěsný mlhový izolátor [2]**

Mlhový izolátor je vhodný do silně kontaminovaných prostředí. Žebra jsou prodloužená a vzdálenost pro výstavbu výboje je delší, než u klasického talířového izolátoru, to snižuje vliv znečištění. S izolátory „talířového typu“ se lze seznámit ještě v kulové a aerodynamické samočisticí podobě, kde žebra buď úplně, nebo z větší části chybí a izolátory jsou tak zbavovány nečistot především prouděním vzduchu a hodí se tak spíše do suchých prostředí, jako jsou pouštní oblasti.

1.1.2 Nekeramické izolátory

Izolátory z polymerních či nekeramických materiálů se poprvé objevily v roce 1959. Tyto izolátory vyrobené z epoxidu s sebou přinášely problémy jako degradace UV zářením a erozí, ale zase se snížila jejich hmotnost o 90% v porovnání s keramickými izolátory. Zároveň jeví vysokou odolnost proti rázovému zatížení vlivem poškození vodičů nebo hardwaru na sousedních konstrukcích. Dnes se jako materiál pro výrobu nekeramických izolátorů používá uhlovodík a silikonový elastomer. Izolátory z těchto materiálů na rozdíl od starších designů odolávají degradaci a karbonizaci vlivem důsledku UV záření. Klíčovou vlastností z hlediska kontaminace je povrchová hydrofobita. Hydrofobie je schopnost povrchu izolátoru odpuzovat nanesenou vodu. Díky této charakteristické vlastnosti nanesená voda tvoří individuální kapičky, čímž se povrchová rezistivita neovlivní tolik, jako kdyby byl povrch smáčený komplexně a neutvoří se tak cesty pro tok proudu [2].

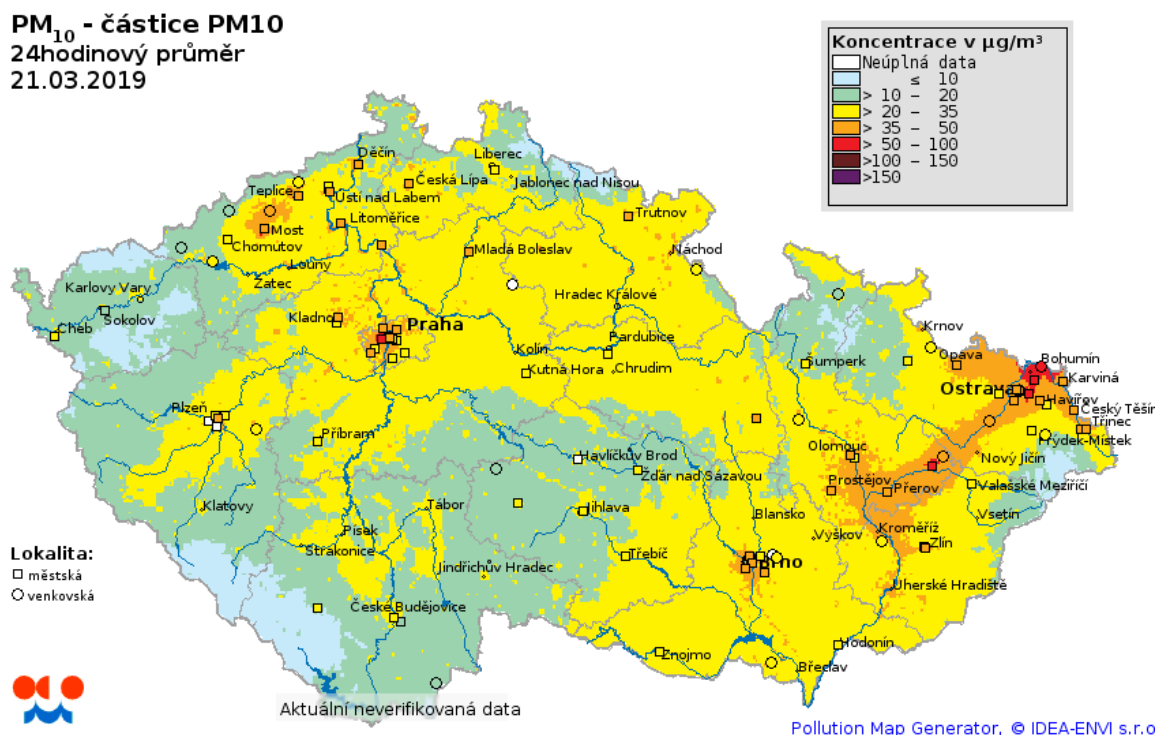
1.2 Znečištění izolátoru

V této podkapitole se budu zabývat znečištěním a poškozením izolátoru různými vlivy. Je nutno podotknout, že přeskoky, ač jsou po povrchu, mají negativní vliv na glazuru izolátoru. Glazura se těmito přeskoky poškozuje, čímž se povrch stává stále hrubším. Takto degradovaný povrch pak snáze zachytává nečistoty a riziko dalšího přeskoku tak vzrůstá.

1.2.1 Kontaminované prostředí

Atmosférický vzduch je nejdostupnější izolační médium, přirozeně obklopující všechny venkovní izolátory. Výhoda tohoto plynného izolantu je i výhodou plynných izolačních materiálů obecně a to je jejich schopnost jednotně zaplnit přístupné dutiny a jejich okamžité zotavení izolačních vlastností po výbojové činnosti. Elektrická pevnost plynů je řádově menší v porovnání s například kapalnými izolačními médii. Pouze stlačený fluorid sírový, čili SF₆, konkuruje svými izolačními vlastnostmi kapalným dielektrikům.

Pojmem aerosol označuji disperzní plynné prostředí, obsahující kapalný nebo pevný disperzní podíl, tvořící disperzní systém. Izolátor ve venkovním prostředí po dobu své funkce čelí vlivům disperzního prostředí s kapalným podílem, s podílem všelijakého prachu, sněhu a jiných pevných látek. Vlhkost, vzniklá vlivem smáčení či zvýšené relativní vlhkosti vzduchu nad 80%, povrchovou rezistivitu izolátoru silně snižuje a tedy hrozba přeskoků vysoko-napěťového výboje vlivem znečištění izolátoru stoupá. Přesto, pokud jde o vliv na elektrickou izolaci, zkušenosti s provozem střídavých systémů ukazují, že déšť není pro izolátory nijak obzvlášť silným environmentálním stresem. Větší problém nastává u venkovních izolátorů navržených s malou stříškovou vzdáleností, za silných dešťových srážek např. 10 mm / min a vodivosti vody 1000 μS / cm, pak mohou být doporučeny zkoušky za deště a navrženy zmírňující opatření, zahrnující přijetí izolátorů s větší stříškovou vzdáleností. Současným ohrožením je znečištění životního prostředí a jeho vliv na spolehlivost izolace elektrizační soustavy. Povrchová kontaminace v důsledku usazování solí nebo jiných znečišťujících látek může způsobit nepředvídatelný přeskok výboje. Na základě řady těchto nepředvídatelných událostí vyvolaných znečištěním například na 10 hodin vypadl proud v celé Sardínii v roce 2001. Z hlediska emisního znečištění v ovzduší nedávné studie ukázaly, že mezi úrovní znečištění usazeného na povrchu izolátoru a koncentrací prachu v atmosféře existuje silná korelace [1][3].



Obrázek 3: Mapa znečištění ovzduší v ČR [15]

Proces znečištění na izolátorech lze popsat na dvou povětrnostních situacích:

1. Delší období sucha a nízké vlhkosti

Období odpovědné za hromadění znečišťujících látek na exponovaném povrchu izolátoru. Dobrým příkladem je vítr zvedající materiál (sůl, prach) dříve usazený na zemi, či poletující pyl na přelomu jara a léta [3].

2. Období vysoké vlhkosti

Následné období vysoké vlhkosti spojené např. s mlhou, ranním efektem, lehkým deštěm nebo noční rosou. Důsledkem jsou zvlhčené znečištěné povrchy, které tak mají lepší vodivost a může tak docházet k přeskokům.

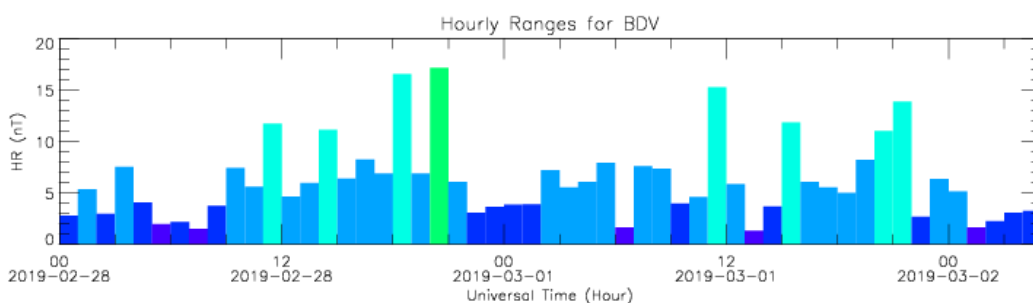
Dalším procesem znečištění týkající se zejména přímořských oblastí je mořský aerosol tvořený spojením vlnobití a větru z moře, který nanáší sůl na povrch izolátoru [3].

1.2.2 Ranní efekt

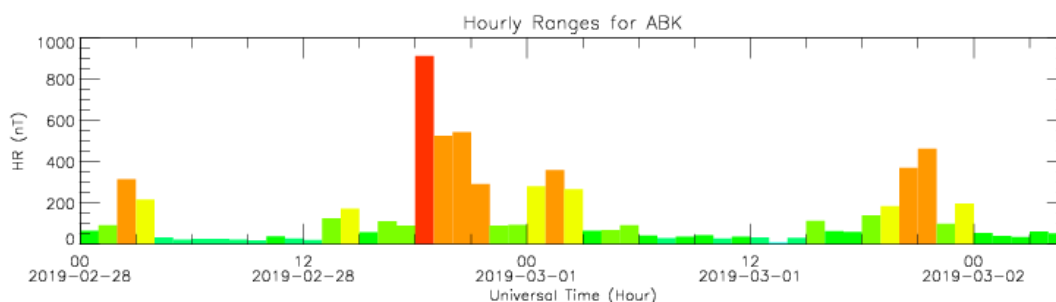
Ranní efekt je v energetice takové označení pro zvýšený počet poruch za úsvitu. V této části dne záhadně docházelo ke zvýšené poruchovosti v distribučních sítích. Dalo by se predikovat, že je to takové spojení vlivu srážející se rosy na povrchu izolátoru, pavoučích vláken, které mimochodem s rosou oslabují elektrickou pevnost ve značném měřítku a promáčeného prachu tvořícího tzv. „blátíčko“. Ranní jev je ale otázkou komplexnější a velice otevřenou a mohou v ní hrát svou roli i ty nejpodivnější vlivy. Jedním z takových vlivů mohou být kolonie hmyzu.

1.2.3 Elektromagnetická bouře

Elektromagnetická bouře, neboli geomagnetická, vzniká vzájemným působením takzvaných slunečních větrů s magnetickým polem země. Tyto sluneční větry jsou příčinou slunečních aktivit, při nichž jsou elektricky nabitě částice vymrštěvány meziplanetárním prostorem. K těmto nárazovým vlnám dochází několikrát za den a to i během klidného geomagnetického pole. Takové běžné magnetické interakce se pohybují v desítkách nT (nanotesla). O geomagnetické bouři lze hovořit, pokud tyto variace dosáhnou až stovek nT.



Obrázek 4: Záznam mag. variací z observatoře v Budkově poblíž Prachatic [16]



Obrázek 5: Záznam mag. variací z observatoře Abisko ve Švédsku [17]

Pro představu o závažnosti a rozsahu takových bouří v technických systémech, bych rád uvedl, že magnetické bouře mohou způsobit škody v kabelové telekomunikaci, utvářet ruchy v radiokomunikacích, jaksi napadnout satelitní komunikaci a ohrozit tak datový přenos navigačních systémů, ba i poznamenat letový provoz. Níže popsané indukované proudy urychlují korozi ropovodných potrubí, klamou signalizační zařízení na železniční soustavě a v nejextrémnějších případech dokonce mohou destabilizovat elektrickou soustavu, způsobit blackout a zmatek tak, jako ho způsobila v roce 1859 Carringtonova super erupce nebo devítihodinový blackout v Québecu v Kanadě roku 1989.

Elektromagnetické rozruchy způsobené solární aktivitou, mohou utvořit geomagnetické indukované proudy ve vysokonapěťových soustavách. Tyto proudy jsou známé pod zkratkou GIC (z anglického geomagnetically induced currents). GIC se projevují stejnosměrně a mají tvrdý dopad zejména v jádrech transformátorů, kde způsobují větší hysterézní ztráty a ztráty vířivými proudy, ale je třeba také poznamenat, že elektrické pole indukované magnetickými variacemi, se hlasitě projevuje v celé elektrifikační soustavě proudy v řádech desítek až stovek ampér.

Může tedy být elektrická pevnost izolátoru nějak ovlivněna ionizací okolního vzduchu vlivem geomagnetických bouří? Toky energetických elektronů v rovníkové ionosféře jsou vždy zanedbatelné, v důsledku trvalého účinného rozptylu elektronů a ztráty energie vlivem rekombinace s neutrálními částicemi atmosféry. Tato oblast se nazývá „zakázaná oblast“ a při silných geomagnetických bouřích v rovníkové oblasti se může stát, že některé elektrony prostoupí zakázanou oblastí. Tyto zakázané energetické elektrony (z anglického FEE - forbidden energetic electrons) z vnitřního radiačního pásu (>1300km nad zemí), občas dosáhly vrchní ionosféry a zvýšily tak ionizaci ve výškách 300-600km. Z těchto výsledků dlouholetých analýz a měření ze satelitních stanic lze usuzovat, že není-li vedení umístěno ve výšce 300km nad zemí, nemohou být izolátory ovlivněny ionizací vzduchu přímo vlivem geomagnetických bouří. Tento jev si lze objasnit při ionizaci vzduchu vlivem přeskoků, nebo hoření elektrických oblouků, kdy se vzduch okolo izolátorů rychle zotaví (deionizuje) vlivem rekombinace s neutrálními atomy. Faktem ale je, že vlivem vzniklého vírového pole, při výraznějších magnetických variacích, vzniká rozdíl potenciálů až 10V/km, důsledkem čehož jsou vedení namáhána, jak jsem již výše zmínil, relativně vysokými proudy wattového charakteru [4][5][6].

1.2.4 Vlivy vegetace

Prvním takovým znečištěním v této kategorii by mohla být biologická kontaminace. Plíseň, zejména ve velmi vlhkých prostředích, kde dochází k trvalému smáčení, může snížit účinnost izolace. Narozdíl od znečištění prachem, kde dochází ke kontaminaci zejména svrchní části stříšky, plíseň se může objevit ve značné míře z obou stran izolátoru, z vrchní i spodní strany a efektivnost izolace tak kriticky klesne. Plíseň je diskutabilním problémem jak v tropických oblastech, kvůli výše zmíněné vysoké vlhkosti, tak v určitém měřítku i u nás. Abych připomenul drobnou poznámku v úvodu, že degradační vlivy se mohou různě kombinovat, tak jako u prachu a vody, i zde dochází k zajímavým procesům, jako by příroda zkrátka nechtěla aby izolátor fungoval správně. Na povrchu izolátoru, jak kompozitového tak keramického, se totiž mohou usadit mikroorganismy, což hrozí obzvláště při vysokých teplotách a hodnotách vlhkosti. Tyto usazené mikroorganismy se následně živí poletujícím pylem, který se nanáší i na povrch izolátoru. Takže krom toho, že pyl vlastně sám o sobě znečišťuje povrch, tak ještě podporuje růst mechu a plísní. Těmito rozrůstajícími se zvlhčenými koloniemi bakterií, napadající mimochodem i hydrofobní povrchy silikonových izolátorů, pak protékají vysoké svodové proudy [7].

Mezi další vlivy vegetace patří například pavučiny, vlivy zvěře, kvůli které jsou dokonce v některých oblastech na živých částech krytky. Ve většině tropických zemích kupříkladu bojují se zvědavými opicemi, které dokonce krytky sundávají a dochází tak k poruchám velmi často [8].

1.2.5 Další dopady na EP

Někdy se bohužel projeví na izolátorech i pracovní podmínky v blízkosti obydlených prostředí, kde izolátory dostávají tvrdou ránu, ať už vlivem vandalismu, nebo zaviněním cizích produktů. Někdy nezáleží na tom, jakému znečištění izolátor čelí, vandalismus bohužel poznamenává i elektrizační soustavu. V tomto případě se projevují silikonové izolátory velmi výhodně, oproti keramickým. Keramické izolátory jsou křehké a zkrátka je průstřel, či dobrá trefa kamenem fatálně poškodí. Silikonové izolátory vydrží v zejména tomto hledisku více, protože jsou pružné a ani průstřel nijak zvlášť elektrickou pevnost neovlivní.

Keramické izolátory se i navzdory své vysoké pevnosti mohou přetížit a explodovat, zejména pokud se jedná o vypínače v keramickém pouzdře v rozvodnách, které jsou natlakované plynem. Zde už se nedá o elektrické pevnosti diskutovat, letící několika kilogramové střepy poničí i ostatní zařízení v rozsahu až 20 metrů.

1.2.6 Měření znečištění izolátoru

Při měření znečištění se závažnost kontaminace porovnává s ekvivalentem v podobě hustoty nanesené soli. Na základě získaných hodnot se poté rozdělují oblasti, v kterých je závažnost kontaminace vysoká, či nízká a pomáhá při určování rozměrů izolátoru.

Měření kontaminace metodou ekvivalentního množství nanesené soli probíhá po odstavení izolátoru z provozu následovně:

- Čistý hadřík se ponoří do destilované vody a následně se změří konduktivita roztoku.
- Čistým hadříkem se následně setřou nečistoty z celého povrchu izolátoru.
- Látka je následně opláchnuta v destilované vodě, roztok se přeměří a změny konduktivity se zaznamenají.
- Roztok odebereme do odměrné baňky.
- Roztok se zředí s destilovanou vodou v objemu 0.5 nebo 1 litr.
- Konduktivita destilovaného roztoku se změří při dvou různých teplotách a interpolací se následně odvodí konduktivita při 20°C.
- Ekvivalentní množství nanesené soli se vypočítá jako

$$ESDD = \frac{0.42}{S} \cdot (\gamma_{20^{\circ}C})^{1.039} \quad (1.1)$$

ESDD - equivalent salt (NaCl) deposit density

Kde S je plocha izolátoru v cm² a γ konduktivita roztoku při 20°C.

Maximální ekvivalentní hodnota u lehce znečištěných izolátorů je (0.06 mg/cm²), což je hodnota v šetrných oblastech, kde nejsou továrny a kde se nachází málo domácností s emisními zdroji tepla, v oblasti minimálně 10km od moře. Oblasti středního znečištění (0.20 mg/cm²), jsou v okolí továren neprodukujících příliš mnoho kouře obsahujícího

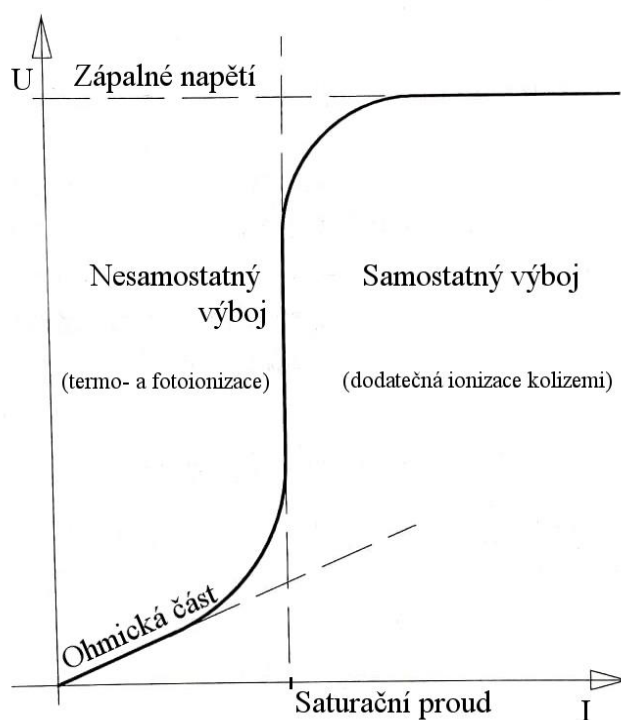
mikročástice, v prostředí průměrně osídleném domácnostmi s emisními zdroji tepla a prostředí vystaveném větru od moře, ale ne příliš blízko k pobřeží. Silné znečištění a velmi silné znečištění ($\geq 0.60 \text{ mg/cm}^2$) pak hrozí v relativně malých oblastech v podobě mokrého prachu v blízkosti ekologicky náročných továren, nebo u pobřeží, kde jsou izolátory vystaveny disperznímu podílu solí z moře ve větru. Nejvíce znečištěné izolátory lze nalézt v pouštních oblastech [2].

2 Výstavba výboje na povrchu izolátoru

Předmětem této bakalářské práce je zejména výstavba výboje na povrchu izolátoru. V první kapitole jsme si zdůraznili, že elektrická pevnost izolátoru není konstantní a že je v provozu tohoto významného prvku elektrifikační soustavy ovlivňována. V druhé kapitole se zaměříme na výboje, které na povrchu izolátoru vznikají.

2.1 Výboje v plynu

V porovnání s ostatními izolujícími materiály, jsou plyny v elektrických polích malé intenzity velmi vhodná dielektrika. Lze od nich očekávat malé ztráty, nízkou konduktivitu



Obrázek 6: Samostatný a nesamostatný výboj [1]

a téměř frekvenčně nezávislou relativní permitivitu $\epsilon_r \approx 1$. Plyny bohužel mají mnohem menší elektrickou pevnost než kapalně či pevně substance.

Vystavením specifickému zatížení, v plynu započne výbojový proces, charakteristický nelineárním vztahem mezi proudem a napětím.

$$J_{sat} \approx 10^{-18} \frac{A}{cm^2} \quad (1.2)$$

Pokud není gradient potenciálu mezi elektrodami příliš vysoký, volné elektrony letící mezielektrodovým prostorem nemají dostatečnou energii na to, aby ionizovaly atomy plynu a aby mohl procházet proud, substance by musela být ionizována jiným vlivem. Takový výboj je nesamostatný.

Pokud je ale gradient potenciálu mezi elektrodami dostatečně veliký, urychlené elektrony naráží do atomů a ionizují je. To má za důsledek, že si výboj utváří vlastní ionizovaný prostor pro život. Takovému výboji se říká samostatný a rozdíl potenciálů při výboji se říká zápalné napětí [1].

2.1.1 Částečný výboj

Částečný výboj je lokální elektrický výboj v rámci izolačního systému, který nepřemostí celé dielektrikum, ale existuje jen na jeho části. Tento výboj se týká různých substancí izolantů. Může být utvořen v kapalině, plynu i pevném izolačním systému v případech velmi nerovnoměrného elektrického pole. Jelikož nerovnoměrnosti pole jsou dány fyzickým stavem povrchu dielektrika (viz. 2.2), vznik částečných výbojů a jejich parametry tedy záleží také na stavu izolátoru. „Částečný výboj“ je široký pojem, neboť obsahuje skupinu úkazů, které při výbojové činnosti mohou nastat, jako například; koróna v plynných dielektrikách, povrchové výboje v tzv. „sendvičových“ dielektrikách, vnitřní výboje v dutinách a puklinách pevných a kapalných izolátorů. Pro korektní smýšlení o částečných výbojích, IEC (International Electrotechnical Commission) definuje částečné výboje takto:

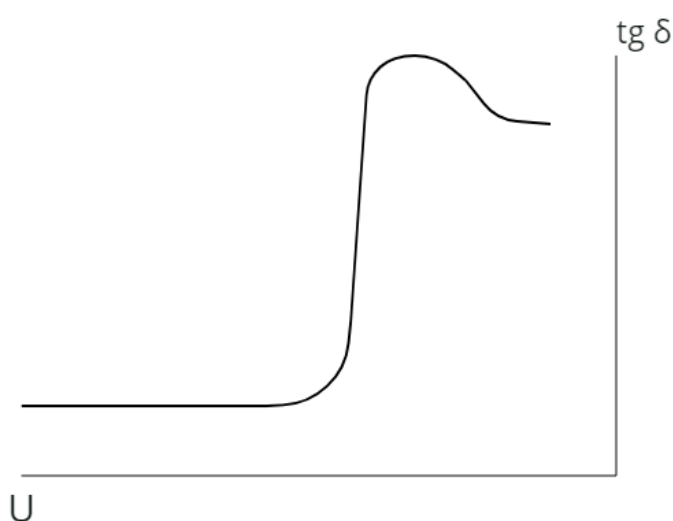
Částečný výboj je lokální elektrický výboj, který překlene prostor mezi vodiči pouze částečně a může nastat přilehlý k vodiči, ale také nemusí.

Tato definice je doložena ještě dvěma poznámkami.

Poznámka 1 – ČV jsou v hlavním případě důsledek elektrického namáhání koncentrovaného v nějakém místě v izolátoru nebo na jeho povrchu. Nejčastěji se tyto výboje projevují jako pulzy o trvání mnohem kratším než jedna mikrosekunda. Ve více rozvinutých případech dochází i k částečným výbojům tzv. bez-pulzním, které se vyskytují v plynných dielektrikách a měřicí ústrojí je nezaznamená.

Poznámka 2 – „Koróna“ je typ ČV, který nastává kolem elektrod v plynném médiu, vzdálených od pevného nebo kapalného izolantu.

Význam ČV se projevuje na životnosti izolátoru. Veškerá výbojová aktivita působí na povrch deterioračně, neboť vysokoenergetické elektrony či urychlené ionty dopadají na povrch, čímž způsobují mnoho typů chemických přeměn. Nicméně je zřetelné, že míra deteriorace se odvíjí i od použitého materiálu, například koróna ve vzduchu na nadzemním vedení má vliv na životnost prakticky nulový. Tato problematika je stále předmětem výzkumů, sleduje se vliv ČV na životnost specifických materiálů, existují různé specifické techniky měření, z nichž nejstarší a nejjednodušší metoda spočívá ve sledování akustického projevu výbojů, zvaného „sršení“. Výbojová kvantita během určitého časového intervalu je velmi závislá na typu přiloženého napětí. Jak popíši později, nejvíce částečných výbojů lze očekávat u střídavého napětí.



Obrázek 7: Ionizační koleno závislosti ztrátového činitele na napětí

Energie částečných výbojů také ovlivňuje závislost napětí a ztrátového činitele $\text{tg } \delta$. Ztrátový činitel by se téměř neměl v závislosti na napětí měnit. Je tomu tak, dokud se ale neobjeví v systému výboje.

Tyto výboje způsobí na křivce takzvané „ionizační koleno“. Při amplitudě vzniká opačný potenciál působící proti potenciálu, který vyvolal výboje a snižuje ho. Nicméně i při značném počtu částečných výbojů se tento vliv zanedbává, při porovnání se ztrátami vzniklými polarizačním procesem [1][2][10].

2.1.2 Strimér

Výboje se v plynech uskutečňují kvůli strimérovým mechanismům, které započnou korónou a vyústí až ve strimérový lídr. Okamžik před přeskokem se může utvořit plasma dodáním energie plynu, tepelné energie, či elektrické. Tento druh výbojové činnosti se používá v několika aplikacích, jako odstraňování znečištění, kontaminantů, oxidů z organických sloučenin, nebo jako zdroj pro výrobu ozonu. Kladné striméry potřebují zdroj elektronů, aby se mohly propagovat prostředím. Elektrony mohou být získány fotoionizací ze zdrojové elektrody, nebo se již v prostoru mohou nacházet díky ionizaci ultrafialovým kosmickým zářením jako volné elektrony, nebo elektrony vázané na kyslík. Představu o výstavbě elektronové laviny strimérového mechanismu si lze dobře osvojit na problematice Townsendových výbojů [11][12].

2.1.3 Townsendovy výboje

ČV vyskytující se v mezerách mohou mít různé formy: rychle, nebo pomalu v čase narůstající výboje typu jiskra, bezvýbojové záření a výboje typu pseudozáře. Tyto formy výbojů jsou katodově emitující výboje, tedy v podstatě Townsendovy výboje. [9].

Dodáním energie, přibližně 3 až 5 elektronvoltů, podle materiálu, z kterého je elektroda vyrobena, se uvolní primární elektron pro zahájení tzv. „elektronové laviny“. Existuje několik způsobů, kterými můžeme energii dodat a díky které budou primární elektrony uvolněny, tedy například: fotoelektrickou emisí, tedy UV radiací nebo elektrickým polem způsobujícím iontovou kolizi, lze je uvolnit i termoionickou emisí tím, že systém ohřejeme na vysokou teplotu a tak podobně. Po uvolnění je primární elektron unášen pouze libovolnými tepelnými variacemi. Takový elektron je pomalý a kolize s molekulami plynu nezpůsobují ionizaci. Ionizace nebude uskutečněna, dokud bude kinetická energie primárního elektronu menší, než je energie ionizační. Mezi kolidováním s molekulami je

elektron urychlován elektrickým polem a hromadí se jeho kinetická energie, což způsobuje tzv. „elektronový drift“ ve směru elektrického pole. Díky zákonu zachování hybnosti, tento elektron vážící necelých 10^{-32} kg neztratí vlivem kolizi s těžšími molekulami nijak větší část své energie. Nicméně, kinetická energie postupně přeroste ionizační energii a ionizující kolize se tak mohou uskutečnit. Ionizující kolize generují další elektrony, které jsou následně urychleny polem a takto utváří řetěz dalších nových reakcí, vedoucí k uvolnění nových volných elektronů. Tímto postupem utváření volných nosičů náboje, se utvoří elektronová lavina. Díky těmto ionizačním procesům se generují zároveň elektrony i pomalejší pozitivní ionty. Kladně nabitě ionty proudí směrem k záporně nabitě elektrodě, ke katodě, kde se emitují sekundární elektrony. Společně s ionizačními procesy, zde existují ještě procesy rekombinace, které jsou doprovázeny emisemi světelného kvanta, fotonů, které navíc také mohou uvolnit další sekundární elektrony z katody fotoionizací. Sekundární elektrony tedy mohou být uvolněny díky různým zpětnovazebním vlivům rozpoutané elektronové laviny. Tyto elektrony se jeví jako primární elektrony pro založení nové elektronové laviny.

Budeme-li se zakládat na tomto konceptu, lze formulovat podmínky zapálení takto:

Samotný primární elektron, který byl uvolněný z katody nějakou externí ionizací, musí vyrobít sekundární elektron pomocí procesu elektronové laviny a vytvořit zpětnou vazbu tak, aby byl emitován alespoň jeden nový primární elektron pro další lavinu. To by se dalo shrnout na podmínku, že každá lavina utvoří aspoň jednu další lavinu. Takovým způsobem se utvoří vodivý kanál mezi elektrodami a napětí mezi nimi se přeruší. Pokud množství sekundárních elektronů, tedy nových primárních, je příliš malé, proces zahyne, nenastane žádný vývoj vodivého kanálu a napětí setrvá.

V matematickém modelu podmínek zapálení zavádíme Townsendův první ionizační koeficient α , který vyjadřuje počet elektronů na jednotku délky vytvořených jedním elektronem [1].

Při elektronové lavině, nárůst ΔN počtu elektronů N na vzdálenosti dx je

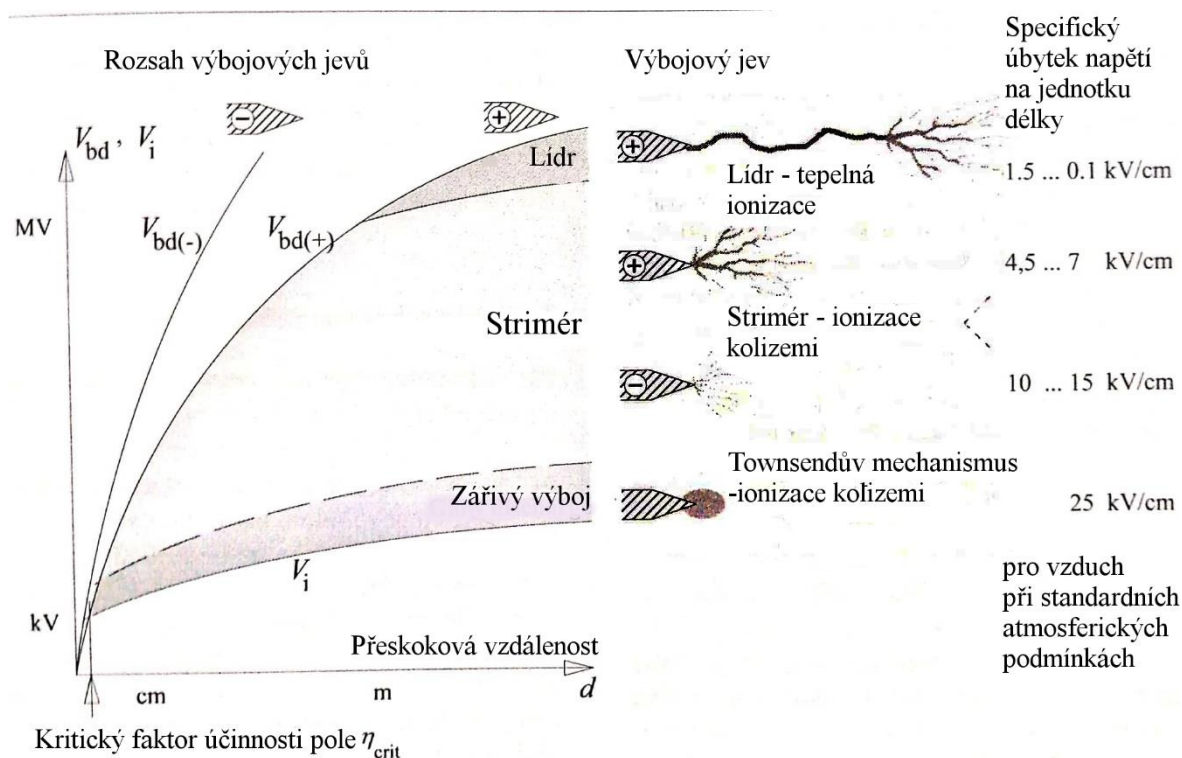
$$dN = N \cdot \alpha \cdot dx \quad (1.3)$$

Zavedením N_1 primárních elektronů a předpokladem konstantního α ve stejnorodém poli dostaneme integraci

$$\ln\left(\frac{N}{N_1}\right) = \alpha \cdot x \quad (1.4)$$

Následně získáváme exponenciálně rostoucí elektronovou lavinu [1]

$$N = N_1 \cdot e^{\alpha \cdot x} \quad (1.5)$$



Obrázek 8: Rozsah výbojových jevů pro hrotovou elektrodu při atmosférických podmínkách [1]; V_{bd} – Průrazné napětí; V_i – Zápálné napětí

2.1.4 Koróna

Kompozitní a keramické izolátory mají v elektroenergetice široké uplatnění, zejména díky jejich snadné instalaci, malému svodovému proudu ve vlhkém stavu, v případě kompozitů lehké váze a hydrofobnímu povrchu. Bohužel za určitých podmínek, které jsem uvedl v první kapitole, tedy povětrnostních, mechanického poškození nebo například kvůli chybějícímu ochrannému protikorónovému kroužku, se může objevit korónový výboj, když lokální elektrické pole dosáhne přibližně 24 kV / cm. Koróna může vést k poškození pouzdra izolátoru, popraskání jádra, stárnutí a jiným problémům. [13]

Je-li elektrické pole rovnoměrné, gradientní nárůst napětí v mezeře nacházející se v elektrickém poli způsobí v dané mezeře přeskok jiskrového výboje, bez žádných předběžných výbojů. Ovšem na druhou stranu, je-li elektrické pole silně nerovnoměrné, myšleno nehomogenní, nárůst napětí nejdříve způsobí výboj v plynu tam, kde je intenzita

elektrického pole nejsilnější, jmenovitě v místech na povrchu, kde se nachází ostré hrany nebo kde se elektroda ohýbá, kupříkladu na rozhraní stříšky, vzduchu a elektrody. Tomuto typu výboje se říká koróna a lze ji pozorovat ve formě namodralé záře doprovázené již zmíněným akustickým vjemem známým jako sršení. Kromě deterioračních efektů na izolátor, má koróna i rušivý defekt v oblasti radiokomunikace, neboť se chová jako sekvence proudových impulzů o vysoké frekvenci. Pokud je elektrické pole nerovnoměrné pouze slabě, v místech největší intenzity dochází k efektivnímu ionizování, které může časem vyústit v ideální podmínky pro výstavbu Townsendovo výboje. [14]

Zápalné napětí korónových výbojů je trochu nižší pro zápornou polaritu, než pro polaritu kladnou. Tomuto efektu se říká polaritní jev.

2.1.5 Polaritní jev

V nerovnoměrném poli je velký rozdíl mezi zápalným napětím koróny a přeskokovým napětím, jenž obě znamenitě závisí na polaritě. Pro záporně nabitou hrotovou elektrodu, předvýbojové (korónové) napětí je srovnatelně malé, ale k přeskoku dochází pouze při vysokých napětích. Pro hrotovou elektrodu nabitou kladně, předvýbojové napětí je srovnatelně vysoké, neboť laviny musí začít až v objemu plynu před elektrodou, protože u elektrody je pole velmi slabé, ale k přeskoku dochází při relativně malém napětí. Příčina této anomálie je přítomnost kladného prostorového náboje poblíž hrotové elektrody. [1]

2.2 Výbojová činnost na povrchu

Zde je vhodné si specifikovat, co je povrchem myšleno. Vícevrstvá (sendvičová) dielektrika obsahující plynná dielektrika, mají rozhraní která jsou známa jako „povrchy“. Ve vysoko-napětřovém inženýrství jsou povrchy charakterizovány těmito třemi okolnostmi:

- Objevují se v široké škále izolátorů, průchodek a izolátorových plášťů, u koncovek vysokonapětřových kabelů.
- Mají velice slabou dielektrickou pevnost.
- Povrchové výboje jsou relativně silné a mají velice erozivní efekt.

Znečištění, které se akumuluje na povrchu vysoko-napětřových izolátorů a podobných typů zařízení, způsobuje omezení izolujících vlastností, neboť přítomnost kontaminujících látek a zvýšená vlhkost tvoří vodivé cesty, které jsou zdrojem částečných výbojů.

Předmětem posouzení výbojové činnosti na elektrickém zařízení jsou kritické vlastnosti jako počet, amplituda a intenzita částečných výbojů.

Výskyt částečných výbojů může bezprostředně postihnout stabilitu elektrické napájecí sítě, či omezit její správné fungování a v nejhorším případě způsobit její odstavení. Z těchto důvodů jsou povrchové výboje jedním z hlavních překážek při designu a provozování vysoko-napěťových zařízení [1].

Pojďme si rozlišit jednotlivé situace elektrického pole a povrchu izolátoru, z hlediska jejich vzájemného rozpoložení.

I. Elektrické pole kolmé na povrch

Při elektrickém poli kolmém na povrch izolátoru, jsou i částečné výboje v plynu k tomuto rozhraní kolmé. Výboje v takto orientovaném poli se nedají nazvat povrchovými výboji v pravém slova smyslu. Nicméně, v prasklinách, mezírkách a dutinkách v takovém ústrojí vznikají částečné výboje vlivem elektrické indukce. Tento efekt se vyskytuje u vícevrstevných dielektrik s rozdílnou permitivitou. Dielektrikum s nižší permitivitou je namáháno účinky elektrického pole více, než dielektrikum s vyšší permitivitou. Tomuto jevu se říká elektrická indukce lze jej pozorovat u poškozených izolátorů, vyskytujících se v takto situovaném elektrickém poli.

II. Elektrické pole rovnoběžné s povrchem

Pole rovnoběžné s povrchem izolátoru, by teoreticky nemělo být tímto povrchem ovlivněno. Elektrická pevnost takového ústrojí je ale menší v porovnání se situací, kde by disponoval pouze plyn, protože nesrovnalosti povrchu zakřivují mikroskopické pole a jsou uvolňovány slabě vázané nosiče náboje. Těmito nesrovnalostmi povrchu jsou i nečistoty, kontaminace povrchu a vlhkost. V tomto rovnoběžném uspořádání jsou rovnoběžné k povrchu i částečné výboje a obvykle jsou zapáleny v místě rozhraní elektrody, izolujícího materiálu a plynu.

Pokud se v praxi setkáme s ústrojím, které je nutné navrhnout v tomto rovnoběžném uspořádání, budeme muset počítat s dostatečně velkými přeskokovými vzdálenostmi zejména u venkovních izolátorů.

III. Tangenciálně namáhané izolační systémy

Výdržné napětí tangenciálního povrchu je velmi malé, vysoká elektrická pevnost dielektrika tak bude částečně omezena. Z tohoto důvodu jsou stříšky z izolujícího materiálu konstruovány tak, aby sahaly daleko od okraje elektrody, kde je intenzita pole relativně nízká. Prakticky ale nedosáhneme na povrchu izolátoru rovnoměrného pole, jelikož rozhraní elektrody a izolačního materiálu je elektrickým polem namáháno nejvíce a vznikají zde částečné proudy. Tyto částečné proudy se tvoří již při nízkém napětí, pokud toto napětí budeme zvyšovat, zapálíme tím výboj klenoucí celý povrch a dojde k úplnému přeskoku mezi elektrodami [1].

2.2.1 Elektrické stromečky a vodivé cesty

Snadno vyrobitelné, lehké izolátory z PVC se skvělými dielektrickými vlastnostmi, se v široké míře používají v energetice. Jejich život je ale vážně ovlivněn degradačními procesy. Když se na tomto pevném dielektriku, vystaveném dlouhodobé zátěži v elektrickém poli, vyskytne výboj, běžně se na něm objevují dva typy viditelných stop.

Jsou to:

- Přítomnost vodivých cest napříč povrchem izolátoru.
- Mechanismus, kde svodový proud procházející po vodivé cestě utvoří formaci jiskry.

Šíření kanálů jiskry, se také říká „tracking“ a stromovitému tvaru vodivých cestiček se říká „treeing“. Tracking je výstavba spojitých vodivých cest napříč povrchem izolátoru, způsobená hlavně vlivem povrchové eroze aplikovaným napětím. V provozu je izolátor vystaven vlhkosti, vlivem které se zvýší vodivost, což má za důsledek tvorbu vodivých cest. Představte si izolátor, který má vlivem vlhkosti na povrchu vodivý film a má dvě elektrody. Přiložením napětí, filmem začne procházet proud, způsobující tvorbu tepla a povrch se začne vysušovat. Vodivý film se začne separovat vlivem vysušování a tím se objeví jiskření, které poškozuje povrch izolátoru. Je to kumulativní proces a k selhání izolace dojde tehdy, kdy uhlíkové cesty překlenou vzdálenost mezi elektrodami. Z hlediska znečištění, toto stromečkování způsobuje erozi povrchu, následkem čehož se stává povrch hrubší a náchylnější na usazování nečistot [14].

3 Test elektrické pevnosti v laboratoři

V této kapitole zhodnotím výsledky z laboratoře, v které jsme se pokusili simulovat nejběžnější ale i méně obvyklé vlivy na elektrickou pevnost izolátoru. Závěsný talířový izolátor se jeví jako ideální vzorek pro toto měření. Jeho přeskokové napětí není příliš vysoké, jeho povrch je pro testování EP pohodlně malý, oproti podpěrným izolátorům. Talířový izolátor má svodovou vzdálenost 165 mm a nitřovou vzdálenost 142 mm.

3.1 Metodika měření v laboratoři

Měření probíhalo v laboratoři UL 140 na fakultě strojní na střídavém zkoušecím ústrojí.

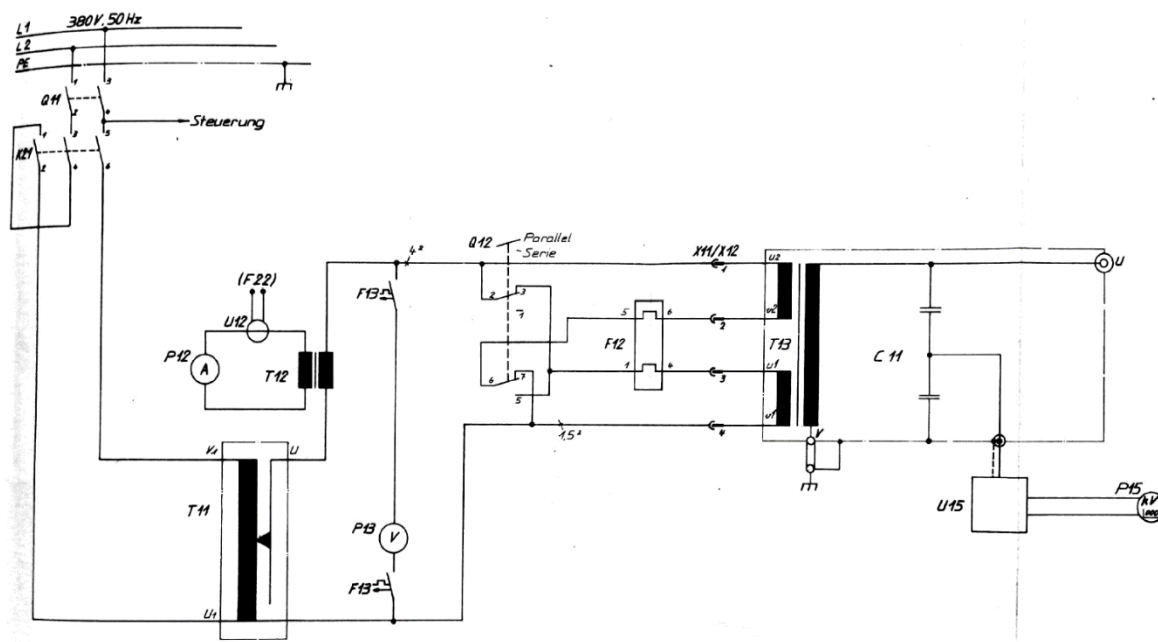
Parametry prostředí byly:

- Teplota vzduchu: 24 °C
- Atmosférický tlak: 97.28 kPa
- Relativní vlhkost: 31,8 %

3.1.1 Popis měřícího vybavení

Vysokonapěťové zkoušecí zařízení Tettex AG Instruments A 26 ' 396. Měřící ústrojí sestává z ovládacího pultu a vysokonapěťového transformátoru. Ovládací pult obsahuje následující prvky: Hlavní vypínač, hlavní stykač, rotační variabilní transformátor s ručním pohonem, paralelní spínač pro spínání primárního vinutí transformátoru, zkratový rychlovypínač, kilovoltmetr, ampérmetr, tlačítka a signální světla pro ovládání.

Vysokonapěťový transformátor je konstruován jako olejový transformátor s uzavřeným železným jádrem, impregnovaný olejem ve vakuu. Jeden pól je plně izolován, druhý je uzemněn. Jmenovitý výkon transformátoru je 10 kVA. Primární napětí je sdružené síťové 400V. Na sekundáru se pak může objevit napětí až 150 kV, nebo lze přepnout na 75 kV. Střída 50%.



Obrázek 9: Schéma zapojení měřícího ústrojí [18]

3.1.2 Způsob měření

Izolátor zavěšen za uzemněnou konstrukci vodivým pásem, tím má na svou čapku (elektrodu nad talířem) připojenou zem. Jeho palička (spodní elektroda, úchyt pro následný izolátor) je připojena na elektrodu vysokonapětového transformátoru. Při přivedení napětí se objeví mezi elektrodami nerovnoměrné elektrické pole, které je klíčové pro smysl měření elektrické pevnosti izolátoru. S narůstajícím napětím se projevují částečné výboje, což způsobuje kolísání napětí. Tyto částečné výboje ionizují vzduch kolem izolátoru a tím se může ovlivnit přeskokové napětí samotného úplného přeskoku. Najíždět napětím lineárně je tedy velice obtížné, neboť i efekt různých znečištění je předem nevypočitatelný, napětí kolísá pokaždé jinak, ionizace je také různorodá. Proto se elektrická pevnost dielektrik a zařízení určuje na základě statistiky. Jelikož elektrická pevnost je závislá na době přiložení napětí a výboje u našeho vzorku přeskakují po různých drahách, elektrická pevnost vztažená na mm by byla nepřesná a nebylo by možné ji porovnávat. Při simulaci nějaké povrchové podmínky tedy změříme 3 hodnoty a pokud přeskokové napětí bude pro všechny 3 výboje podobné, aritmetickým průměrem těchto tří hodnot lze získat vypovídající hodnotu přeskokového napětí.

Pro bezpečné zkoušení je laboratoř vybavena uzemněnou klecí, která odděluje vysokonapětovou část od ovládacího pultu. Před vstoupením do prostoru VN je nutné

odpojit transformátor od napájecího zdroje a zkratovací tyčí vybit do země přebytečný možný náboj ze sekundáru transformátoru.

3.2 Měření elektrické pevnosti

Zde se dostáváme k samotnému měření EP. To je rozděleno podle znečištění povrchu izolátoru. Pro všechny měření jsme použili ten samý vzorek, který jsme vybrali v laboratoři. Rozhodl jsem se uvést jednotlivé případy přesně tak, jak jsme je po sobě měřili v laboratoři. Proto, abychom si je mohli pohodlně porovnat, uvedu již v tomto odstavci hodnotu přeskokového napětí čistého a suchého povrchu. Přeskoková hodnota suchého a čistého izolátoru byla v průměru 59,73 kV.

3.2.1 Zaprášený suchý izolátor

Nánosy prachu na izolátoru jsou velice běžným úkazem. Lze si všimnout spousta izolátorů v provozu i vyřazených, na kterých je stopa, či vrstva nanesených nečistot. V laboratoři několik takových nějaký čas leží, takže vskutku nemusíme pro zaprášený izolátor daleko.

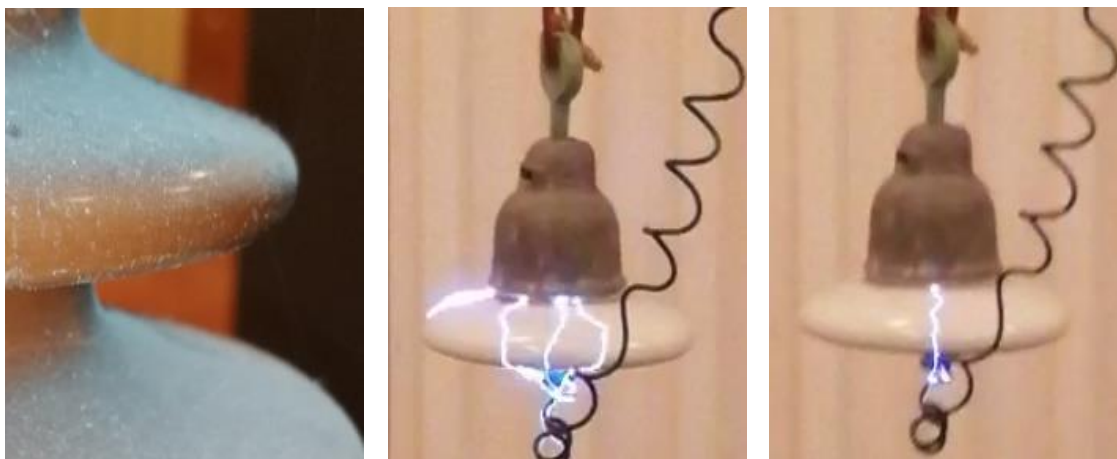
Při navyšování napětí se začal ozývat projev částečných výbojů sršením. Postupně se hlasitost s napětím přímo úměrně zvyšovala, až se při cca 40 kV objevily viditelné mikrovýboje na místech, kde je elektrické pole velice intenzivní a to na rozhraní elektrody a talíře. Je velice pravděpodobné, že v tomto bodě, kde se objevil drobný záblesk, je nejspíše pevná partikule prachu na prstenci uzemněné elektrody. Toho samého místa se ve finále uchytil i výboj přeskokový, při 60,4 kilovoltech, který spustil zkratový rychlovypínač v ovládacím pultu.

Před samotným úplným přeskokem ale došlo ještě k rozmanitému předvýboji, který připomíná Townsendův výboj. Je velice zřejmé, že okolí talíře izolátoru již bylo tak dobře ionizované, že se objevila řada primárních elektronů v různých místech, které vedly k rozpoutání výbojové činnosti v měřítku jako na obrázku 11. Je na první pohled vidět, že se výboje dostaly až k čapce, dokonce si hledaly cestu i na napájecím vodiči, ale k vybavení zkratového rychlovypínače nevedly. Vypínač zareagoval až při druhém výboji, ke kterému došlo 300ms poté. Proč? Vzduch je přeci více ionizovaný při předvýboji, čímž má menší

odpor a může procházet větší proud, který je klíčový pro spuštění elektromagnetické spouště vypínače. Myslím si, že je to vypínací schopností vypínače, který někdy prostě nevypne, co my považujeme za zkrat (stejně jako mají VN vypínače danou tuto schopnost v %). Z fotek je zřejmé, že výboje přeskakovaly přímo mezi okrajem talíře a koncem paličky.

Zaprášený Izolátor		
Pokus	Napětí [kV]	Průměr [kV]
1	54,4	53,30
2	51,4	
3	54,1	

Tabulka 1: Zaprášený a suchý povrch - kilovolty při přeskoku



Obrázek 10: Zaprášený izolátor, předvýboj, přeskok

3.2.2 Aplikace vody na zaprášený izolátor

Stojící voda na nehydrofobním povrchu keramického izolátoru nemůže dělat dobrotu. Voda se na takovém izolátoru může chovat jako spojitý film či kapičky, pokrývající celý povrch, nebo jen jeho část. Faktorem míry, jakou bude povrch izolátoru namočen, je například sklon deště, jeho intenzita a doba trvání, nebo obecně procento relativní vlhkosti. Nejčastějšími variantami namočení je svrchní a celistvé. Svrchní namočení lze očekávat při slabé přeháňce. Celistvé smáčení potom při ranních hodinách vlivem ranní rosy, nebo při silném dešti, který tříštěním kapek o pevný povrch zasáhne i spodní části izolátorů. V oblastech vysokých vlhkostí se lze setkat s talířovým izolátorem mlhového typu, který je na znečištění lépe připravený protaženými „sukýnkami“ talíře.

3.2.2.1 Zaprášený povrch, shora namočený

Na povrch zaprášeného izolátoru jsme rovnoměrně nanесли vodu rozprašovačem. Voda je na čapce a svrchní straně talíře. Vody jsme nenanesli příliš, zde se jedná opravdu spíše o orosení, nevznikají velké kapky a nestékají po hraně izolátoru. Přidáváním napětí se v tomto případě kromě pachu ozonu a zvuku sršení neobjevují žádné viditelné částečné výboje ani předvýboje. To bude velice zřejmě způsobeno malými kapičkami vody, které pomáhají částečným výbojům se „plazit“ po povrchu. Mezi těmito korálky, které tvoří v podstatě uzly, dochází ke krátkým přeskokům, vlivem elektrické indukce v elektrickém poli. Kdybychom tedy měli v místnosti tmu, zřejmě bychom si částečných výbojů na povrchu všimli jako nafialovělého záření. Myslím si, že silnější výboje přeskakovaly na spodní straně talíře, kde byl izolátor suchý, nejspíše poblíž paličky na rozhraní. Výboj vedoucí k poruše se klenul po zadní straně izolátoru. Takže na fotografii lze vidět jen jeho část. Přeskoková hodnota se kvůli takovému znečištění snížila oproti čistému suchému izolátoru více jak třetinu, na 36 kV. Oproti izolátoru pokrytým suchým prachem se průměrná hodnota snížila o 17,22 kV.



Obrázek 11: Orosený povrch talíře

Směs voda+prach vrchní povrch		
Pokus	Napětí [kV]	Průměr [kV]
1	36,4	36,08
2	35,7	
3	36,14	

Tabulka 2: Zaprášený povrch, mokrá shora - kilovolyty při přeskoku

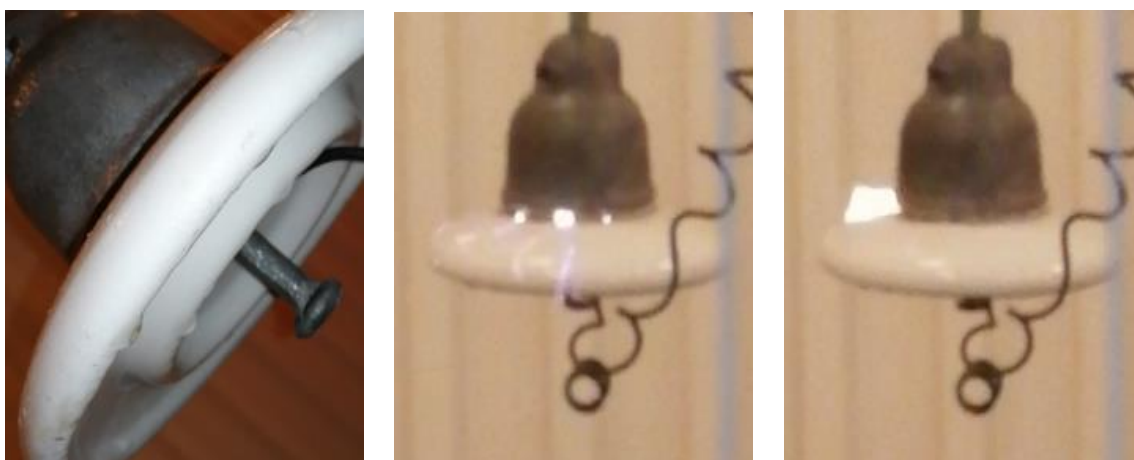
3.2.2.2 Zaprášený povrch, namočený celistvě

Cílem této zkoušky bylo napodobit dešťové období, které následovalo po období sucha, kdy vítr obrací prach z cest, či prašných plání a nanáší jej na izolátor a déšť následně pokropí izolátor. Část smyvateľného prachu se tímto procesem z povrchu odstraní, ale nečistoty, které jsou nesmyvatelné, vytvoří v kombinaci s vodou tzv. „blátíčko“.

Nanesením vody rozprašovačem, se nám podařilo vytvořit disperzní systém prachu a vody. Voda se na povrchu drží díky prachu lépe, ale část vody stéká a tvoří kapky vody, které se drží na okraji talíře. Další kapky se vytvořily na vnitřním kroužku. Vzorek jsme připojili ke střídavému napětí a postupně jsme navýšili až na 16 kV, kdy začal po povrchu procházet viditelný proud. Od tohoto bodu se částečné výboje plazily po několika cestách. Prach se totiž přidáním vody spojil a vytvořil místy vodivé trasy větší koncentrace, jak jsme si všimli po ukončení prvního pokusu. Po těchto trasách opakovaně přeskakovaly částečné výboje, dokud při 26 kV nedošlo k přeskoku. Kvůli ČV během měření velmi kolísalo napětí, vzniklé výboje totiž mají opačné napětí, které působí proti napětí přiloženému. Důležité je, že částečné výboje povrch vysouší a každý následující pokus již není proveden při stejných podmínkách, průměrná přeskoková hodnota je tedy v tomto případě nevyhovující. Přeskokové napětí postupně vzrůstá a elektrická pevnost je konečně při třetím pokusu stejná jako u suchého zaprášeného izolátoru. Pro ověření jsme se rozhodli opakovat měření ještě jednou opětovným rozprašením vody. Přeskok nastal při 27 kV. Měření tedy dopadlo zcela jednoznačně. Na povrchu izolátoru jsme po měření našli stopy uhlíku, vzniklé nejspíše opalem prachu. Nejvíce jich bylo v oblasti elektrod, kde dochází nejčastěji k ČV. Opal si lze prohlédnout v příloze. Mezi přeskokovými hodnotami celistvě namočeného izolátoru a izolátoru namočeného částečně existuje zajímavá anomálie, kterou lze najít v podkapitole 3.2.5.

Směs voda+prach spodní povrch		
Pokus	Napětí [kV]	Průměr [kV]
1	26	37,33
2	32	
3	54	
Opětné navlhčení		
Pokus	Napětí [kV]	
1	27	

Tabulka 3: Zaprášený, mokrý izolátor - kilovolty při přeskoku



Obrázek 12: Kapky vody, částečné výboje vysušují povrch, přeskok

3.2.3 Čistý izolátor

Abychom mohli vůbec spekulovat o změnách elektrické pevnosti ve znečištěných stavech, musíme změřit přeskovou hodnotu čistého izolátoru. Proto jsme talířový izolátor důkladně vyčistili, zbavili prachu a usazených nečistot a nechali oschnout. Rád bych na začátek zdůraznil jednu takovou připomínku pro účel správného pochopení a to, že čistým izolátorem je myšlen v této práci takový povrchový stav, kdy je izolátor ořtený od prachu a jeho povrch není cíleně znečišťován ničím jiným, než následně vodou. Mohlo by se totiž říci, že když je izolátor mokrý, tak že už není čistý, což by z hlediska kontaminace povrchu dávalo smysl. S přihlédnutím na výsledky přeskových napětí si lze všimnout, že hodnota napětí klesá, což je způsobeno krátkým časovým intervalem mezi zkouškami. Izolátor se totiž kvůli výbojové činnosti na povrchu ohřeje, což zapříčiňuje termoionizaci plynu. Po zkoušce jsme tuto teplotu pocítili na pohmat, povrch byl zkrátka jen lehce ohřátý. Při tomto ohřátí se přeskové napětí snížilo skoro o 1 kV. V provozu tedy lze očekávat, že když na

izolátor praží slunce, vzniklá různorodá ionizace dokáže elektrickou pevnost silně ovlivnit. Navyšování napětí v tomto případě probíhalo hladce, neboť se neobjevily na povrchu žádné silnější výboje. Kromě slyšitelné koróny se tedy neobjevily až do přeskoku žádné předvýboje. Zde by se dalo uvést elektrickou pevnost z průměrné přeskové hodnoty. Pro výpočet jsem použil svodovou vzdálenost 165 mm, protože se výboj přimyká k povrchu.

	kV/mm	kV/cm	kV/palec	kV/m
EP	0,36	3,62	9,41	362,00

Tabulka 4: Elektrická pevnost čistého a suchého izolátoru

Čistý izolátor, suchý		
Pokus	Napětí [kV]	Průměr [kV]
1	60,4	59,73
2	59,7	
3	59,1	

Tabulka 5: Čistý a suchý izolátor - kilovolty při přeskoku



Obrázek 13: Přeskok po suchém a čistém povrchu

3.2.4 Aplikace vody na čistý izolátor

Touto zkouškou si ověříme izolátory, které se nachází v oblastech, kde se příliš často nepráší, nepoletuje pyl, kde není přílišná relativní vlhkost způsobující plísň, zkrátka kde je jejich povrch vystaven zejména občasným dešťům.

3.2.4.1 Čistý povrch, mokrá shora

Na čistý povrch jsme nanесли vodu, opět jsme začali jen lehkým pokropením na horní stranu talíře. Zde se ozývaly hlasitější výboje na mnohem kratším časovém intervalu než u suchého izolátoru. Celková doba jednoho pokusu měření mokrého povrchu byla asi o 10 sekund kratší než u povrchu suchého. Přeskový výboj se objevil v průměru při 41,57 kV, což je o 18,17 kV méně, než u povrchu suchého. Pokles hodnoty přeskočků u 3. pokusu nejspíš bude důsledkem ohřátého povrchu nebo pomalejším najížděním napětí, tedy lepší ionizací. Výboj v tomto případě byl velice podobný tomu na suchém povrchu, akorát přeskočil na jiném místě.

Čistý, mokrá shora		
Pokus	Napětí [kV]	Průměr [kV]
1	42,1	41,57
2	42,1	
3	40,5	

Tabulka 6: Čistý izolátor, mokrá shora - kilovolty při přeskočků



Obrázek 14: Přeskok po vlhkém povrchu

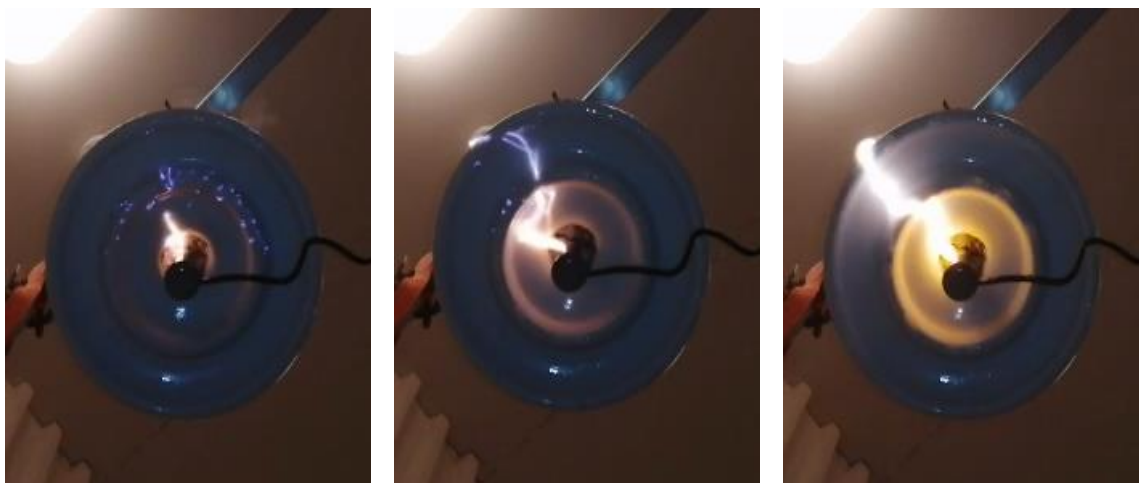
3.2.4.2 Čistý povrch, namočený celistvě

Na důkladně namočeném izolátoru se opět shromažďují kapičky vody na sukýnkách talíře. Navyšováním napětí se začala voda viditelně odpařovat, což vedlo k sušení a ohřevu povrchu. V tomto případě je vliv osychání velice názorný, neboť jsme izolátor snímali zespoda, abychom mohli posoudit vliv vody i na rozhraní paličky a talíře. Zde se při prvním

pokusu objevilo spoustu částečných výbojů hlavně na okrajích, stříškách a rozhraních, zkrátka tam, kde je izolátor zakřivený. Při druhém pokusu se ČV objevilo méně a při vyšších hodnotách napětí. V případě pokusu třetího, se již na vysušeném povrchu žádné drobné viditelné částečné výboje neobjevily, ale přeskočily dva delší výboje po kapkách vody v místě, kde následně došlo k přeskoku. Na fotografiích si lze všimnout 3 stavů, prvním stavem jsou částečné výboje, přeskakující po záhybech a ionizující okolí izolátoru, druhá fotografie zobrazuje výstavbu přeskokového výboje, tato fotografie byla pořízena o 30 ms dříve než fotografie třetí, na které je zobrazený přeskok. Po měření jsme povrch zkontrolovali a pozorovali jsme, že jedna strana, kde přeskakovaly výboje, byla skutečně teplá a suchá a druhá strana byla mokrá a studená. Zde hrají svou roli i nesouměrnosti izolátoru, což jsou důsledky výrobních tolerancí a nebo byla glazura na jedné straně více opotřebovaná vlivem eroze, vznikající výbojovou činností.

Čistý, mokrý z obou stran		
Pokus	Napětí [kV]	Průměr [kV]
1	27,2	31,53
2	32,3	
3	35,1	

Tabulka 7: Čistý izolátor, celistvě namočený - kilovolty při přeskoku



Obrázek 15: Částečné výboje na sukýnce, výstavba výboje, přeskok po kapkách vody

3.2.5 Osychání povrchu

Zahleděním se do výsledků, si lze povšimnout, že u celistvě namočeného izolátoru, ať už čistého či zaprášeného, dochází k efektivnímu osychání povrchu vlivem výbojové činnosti,

čímž se, dá se říci, obnovuje izolační schopnost izolátoru. U povrchů, které jsou namočený jen částečně, hodnoty přeskočků nevzrůstají, ba dokonce mírně klesají. Zde je důležité přihlídnout na počáteční parametry před měřením, abychom mohli zvážit, čím je tento jev způsoben. Zaprášený povrch můžeme ze řešení vyloučit, neboť fenomén se týká i povrchu čistého. Zkouška se ale zabývala v podstatě orosením a druhá zase deštěm, což si myslím, že je jádrem úkazu. Při orosení se výbojová činnost týká větší části povrchu a to víceméně rovnoměrně, neboť kapičky vody jsou rozloženy nahodile, jsou malé a při jejich spojení ještě nemusí dojít ke stékání. V případě většího namočení, může dojít k tomu, že se kapky spojí a vytvoří cesty svodovým proudům, které následně tekou soustředěně a déle, menší částí povrchu. Těmito proudy a následným výbojem, dochází k efektivnímu vysoušení povrchu. Proud si při následujícím pokusu musí najít novou cestu, která má menší vodivost než ta první a k tomu potřebuje větší hodnotu napětí. Lze na to pohlédnout také tak, že lépe namočeným izolátorem protéká větší svodový proud, který u povrchu „polosmáčeného“ není takový, aby stihl povrch vysušit během 20 sekund měřicího času.

3.2.6 Pavučiny klenoucí se po povrchu

Tento vliv na elektrickou pevnost by se dal zařadit mezi vegetační vlivy a také jako součást ranního efektu. Pavučin je v krajině opravdu široká škála a lze si jich povšimnout zejména ráno, kdy se na nich vytvoří korálky vody. Tyto pavučiny se na izolátor nanosí zejména kvůli členovcům, kteří tak využijí stříšky vysoko umístěných izolátorů jako ideální útočiště, nebo je na izolátor nanese vítr. Pavučiny samy o sobě jsou velkou neznámou a není tedy jiná možnost jak zjistit jejich vliv na elektrifikační soustavu, než si je simulovat v laboratoři.

3.2.6.1 Pavučiny na suchém povrchu

Izolátor jsme po měření opět očistili a vyrazili jsme na lov pavučin. Vymetli jsme zádveři laboratoře a pár pěkných pavučin jsme nanosili na povrch izolátoru tak, aby se spojily s oběma elektrodami a aby se co nejméně potrhaly, což byla hodinářská práce. Takto znečištěný izolátor jsme prozatím nijak nenamáčeli. Při najíždění napětím se jedna pavučina kvůli koruně opálila a upadla na zem. Druhá pavučina se přimkla k povrchu a došlo po ní k předvýboji, který ji také dočista spálil. K přeskočků došlo na opačné straně při napětí 60 kV. Měření jsme opakovali v různých rozpoloženích pavučin a dosáhli stejných výsledků, z čehož si lze udělat závěr, že pavučiny elektrickou pevnost suchého izolátoru nijak neovlivňují.

Suchý izolátor + pavučiny		
Pokus	Napětí [kV]	Průměr [kV]
1	60	60,70
2	60,7	
3	61,4	

Tabulka 8: Suchý izolátor, pokrytý pavučinami - kilovolty při přeskočení

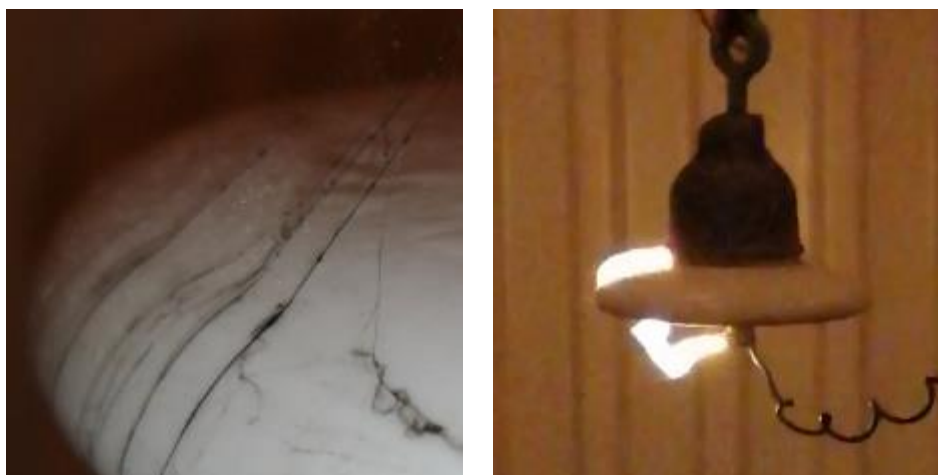
3.2.6.2 Mokrý pavučiny na mokřém povrchu

Izolátor jsme očistili a nanесли nové pavučiny, které se nám povedlo umístit opět tak, že se klenuly od elektrody k elektrodě. Rozprášením vody z obou stran vznikl mokřý film na povrchu izolátoru a korálky vody na pavučině. V prvním pokusu docházelo k výbojům po pavučině u paličky, které pavučinu ale nepřetrhly. Přeskok se po pavučině klenul, ale pouze částečně. Zkrátil si po ní cestu na spodní straně talíře a poté pokračoval po povrchu svrchní strany. V následujícím pokusu už to pavučina nevydržela a na spodní straně se opálila, důsledkem čehož přeskočení nijak nepomohla a hodnota zápalného napětí není nijak příliš odlišná od hodnot u čistého mokřého izolátoru. Rozhodli jsme nanést více pavučin a co nejvíce je rozplést po povrchu, aby to připomínalo aspoň trochu pavoučí síť. V následných dvou pokusech jsme získali dvě hodnoty, přičemž v prvním došlo k přeskočení při 28,7 kV a pavučiny se přilepily a v druhém pokusu výboj přskočil při 30,5 kV konečně po pavučině, která se vypárla. Toto jsou velice nízké hodnoty, nicméně si myslím, že kdybychom s měřením pokračovali, izolující schopnosti by se obnovily, stejně jako tomu bylo u čistého izolátoru. Pavučiny by se přepálily nebo spadly, povrch se vysušil. To ale záleží na úhlu pohledu, prakticky je přeskok v elektrických sítích porucha. Přepálí-li se pavučina při prvním přeskočení, automatika opětného zapnutí uvede síť opět do provozu. V první řadě musí být izolátor dimenzovaný tak, aby k přeskokům vlivem těchto příčin nedocházelo.

Mokřý izolátor + pavučiny (mokřé)

Pokus	Napětí [kV]	Průměr [kV]
1	38,7	39,05
2	39,4	
Více pavučin		
Pokus	Napětí [kV]	Průměr [kV]
1	28,7	29,60
2	30,5	

Tabulka 9: Mokrě pavučiny a povrch - kilovolty při přeskoku



Obrázek 16: Mokrě pavučiny, přeskok po pavučině (z vrchu přilepené)

3.2.7 Pokrytí sněhem

Přesto, že se sníh na povrchu izolátoru již neobjevuje v České republice tak často, místo v našich zkouškách mu právoplatně patří. Sníh totiž může být pro izolátor velice nebezpečný, zejména nachází-li se v okolí domácností a průmyslových oblastí, kde se vyskytují emisní zdroje vylučující spaliny, které sníh kontaminují uhlíkem, solemi, které zlepšují vodivou vlastnost sněhu. Z toho plyne, že měření tohoto pevného skupenství vody na povrchu izolátoru, je samo o sobě velice rozmanité a bylo by potřeba mu věnovat mnohem více prostoru v této práci. S pocitem štěstí, že byly zrovna vhodné atmosférické podmínky pro tento test, jsme sníh odebrali na akademické půdě, hned u východu zkušební haly. Tato oblast Plzně, je průmyslem políbená, nic méně sníh byl čerstvý a mimo veřejnou komunikaci, takže lze očekávat ty vyšší hodnoty zápalného napětí, ze široké škály možných variant kondice sněhu. Hodnoty se tedy nejspíše nebudou lišit od izolátoru mokrého shora.

Částečné výboje se opět na povrchu projevily ohřevem, důsledkem čehož sníh roztál a stihl sklouznout dříve než došlo k výboji. Izolátor si tedy se sněhem poradil dobře. Přidáním více sněhu co nejbližší k horní elektrodě se povedlo odstranit problém s klouzáním sněhu, což vedlo k tomu, že výboj přeskočil sněhem. Na fotografii je vidět předvýboj, který čistě náhodou přeskočil na padající sníh, o 60 ms později došlo k úplnému přeskoku. Elektrickou pevnost tohoto talířového izolátoru, sněhové přeháňky ovlivní velice podobně, jako by tomu bylo u dešťů. Myslím si ale, že v případě tyčových izolátorů se může sníh projevovat na EP vlivněji, pokud se dostane do prostoru mezi stříškami, což hrozí spíše u kompozitových izolátorů, kde jsou stříšky často kolmé k ose tyče.

Izolátor pokrytý sněhem		
Pokus	Napětí [kV]	Průměr [kV]
1	44,5	43,50
2	42,5	

Tabulka 10: Sníh na povrchu izolátoru - kilovolty při přeskoku



Obrázek 17: Výboj na padajícím sněhu

3.2.8 Vliv mokrého listí

Listí se v prostoru kolem venkovních izolátorů často hojně prosazuje, zejména při větrných dnech v podzimním období. Dešťové přeháňky pak listům umožňují lépe se přichytávat na povrchy, ale tato schopnost není až tak radikální, v porovnání se suchým stavem, jak se může

na první dojem zdát. V laboratoři jsme tento vliv vegetace vyzkoušeli. Nasbírali jsme dubové a lipové listy, opět v blízkosti zkušební haly, které jsme navlhčili společně s povrchem našeho vzorku. Výhoda listů v našem případě je, že celkem dobře drží svůj tvar i když je namočené a bylo potřeba se snažit, aby listů dobře přilnulo k povrchu a nesklouzlo. Zde se skvěle projeví glazura a oblý povrch. Myslím si, že listy čerstvé jsou pružnější, neboť obsahují vodu a na povrchu by se držely lépe, ale čerstvé listy opadávají velmi zřídka. My jsme ale suché listy nakonec rozložili různými způsoby po povrchu a to i tak, aby například lipové listy přesahovaly okraj stříšky a druhým koncem, kde je stopka, se dotýkal čapky.

Takto pokrytý izolátor opět podstoupil testu a výsledkem byl jeden přeskový výboj, po sršivém nástupu zápalného napětí. Tento výboj přeskočil na zadní straně po lipovém listu a takto jsme změřili tři pokusy. Následně jsme přišli s nápadem nechat na povrchu jenom dubový list a přesunuli ho pro další pokusy na více viditelné místo, abychom si mohli udělat lepší představu o tom, co se na povrchu děje. Výboj bohužel tvrdohlavě přeskočil na svém oblíbeném místě, kde během celého našeho měření přeskočil asi nejčastěji a nijak se neobtěžoval zvolit si svou cestu po pracně nalepeném dubovém listu. Nicméně, elektrická pevnost se odebráním většího počtu lupenů určitě zvýšila, neboť hodnoty přeskoků se přibližně o 3 kilovoly liší. Poslední pokus vedl k přeskoku po listu, protože jsme ho přemístili na místo, kde přeskočil výboj v posledním pokusu. List byl po přeskoku opálený, což by mohlo ponechat na povrchu stopy uhlíku a dotknout se tak elektrické pevnosti ještě hruběji. V závěru lze ale konstatovat, zejména s přihlédnutím na získané hodnoty a informace, že listy na elektrickou pevnost nehrají krizovou roli. V tomto vlivu dominuje zejména vlhkost, což potvrzuje zřetelnou korespondenci hodnot s čistým mokřým povrchem.

Mokré listí		
Pokus	Napětí [kV]	Průměr [kV]
1	41,4	42,37
2	41,7	
3	40,2	
4	44,4	
5	43,4	
6	43,1	

Tabulka 11: Mokré listí - kilovoly při přeskoku



Obrázek 18: Podzimní izolátor, přeskok po dubovém listu

3.2.9 Poletující odpad – lidský faktor

V této podkapitole otestujeme vliv odpadků, které vítr nanesl na izolátor. Jedná se o běžné předměty o malé hmotnosti, jsou to například mikrotenové sáčky, či obyčejný kancelářský papír.

3.2.9.1 Mikrotenový sáček

Při dimenzování izolátoru se předpokládají různé znečišťující vlivy a to zejména environmentální, sáček který kompletně obklopí celý talíř by tedy mohl být opravdu specifickým problémem, na který izolátor připraven nebude. Izolátor jsme tedy obalili mikrotenovým sáčkem, který se dá sehnat v každém supermarketu, přesunuli jsme se k pultu a připojili jsme vysokonapěťový transformátor ke zdroji napětí. Zkouška probíhala obvykle s tím rozdílem, že nyní bylo sršení koróny velice hlasité, neboť docházelo k výbojům mezi sáčkem a povrchem izolátoru, dokonce i ozón byl nyní mnohem silněji cítit. Při prvním pokusu došlo ke dvěma výbojům, mezi které se vešlo několik milisekund a tyto výboje vedly k zapůsobení ochrany a transformátor se odpojil. Další pokus vedl k přeskoku na jiném místě, při následném zpracování výsledků jsem si na záběrech všiml, že výboj byl rozdělen do 3 jisker, které paralelně ve stejnou chvíli přeskočili z různých míst na čapce, výboj byl také velice hlasitý a záblesk dosud nejsilnější. Přeskok sáček zapálil a ten ještě chvíli po odpojení napětí hořel. První poznatek, který jsme při pohledu na sáček získali bylo to, že zůstal po měření nabitý, přilepený na izolátor. Nelze ale říci, že nějak ovlivnil elektrickou pevnost, což je dobře pro izolátor.

Mikrotenový sáček - suchý		
Pokus	Napětí [kV]	Průměr [kV]
1	60	60,73
2	60,8	
3	61,4	

Tabulka 12: Mikrotenový sáček, suchý - kilovolyty při přeskoku



Obrázek 19: Izolátor obklopený sáčkem, přeskok po povrchu, zapálení sáčku

Pojďme zkusit mikrotenový sáček namočit, společně s povrchem izolátoru a pokusme se dosáhnout zajímavějších výsledků.

3.2.9.2 Aplikace vody na mikrotenový sáček

Nový mikrotenový sáček jsme společně s povrchem izolátoru namočili. V několika místech sáček dokonale přilnul k izolátoru i k čapce. Sršení bylo při dosažení zápalného napětí koróny méně hlasité, nicméně bylo slyšet, že výbojů přeskakuje více než v případě suchého sáčku. První pokus přinesl dva předvýboje na různých místech a hlavní výboj se klenul po zadní straně. Sáček byl propálen v místě nejlepšího přilnutí. Výsledkem pokusu v porovnání se suchým sáčkem byl pokles o cca 12 kilovolt. Další pokus vedl k poklesu přeskokového napětí a třetí taktéž. Všimli jsme si, že propálená místa mají za důsledek tvorbu vodivých uhlíkových cestiček a opálenin, které budou nejspíše důvodem poklesu elektrické pevnosti.

Mikrotenový sáček - mokrý		
Pokus	Napětí [kV]	Průměr [kV]
1	48,2	45,20
2	45,3	
3	42,1	

Tabulka 13: Mikrotenový sáček, mokrý - kilovolty při přeskočení



Obrázek 20: Propálení v místě největšího přilnutí

3.2.9.3 Mokrý papír

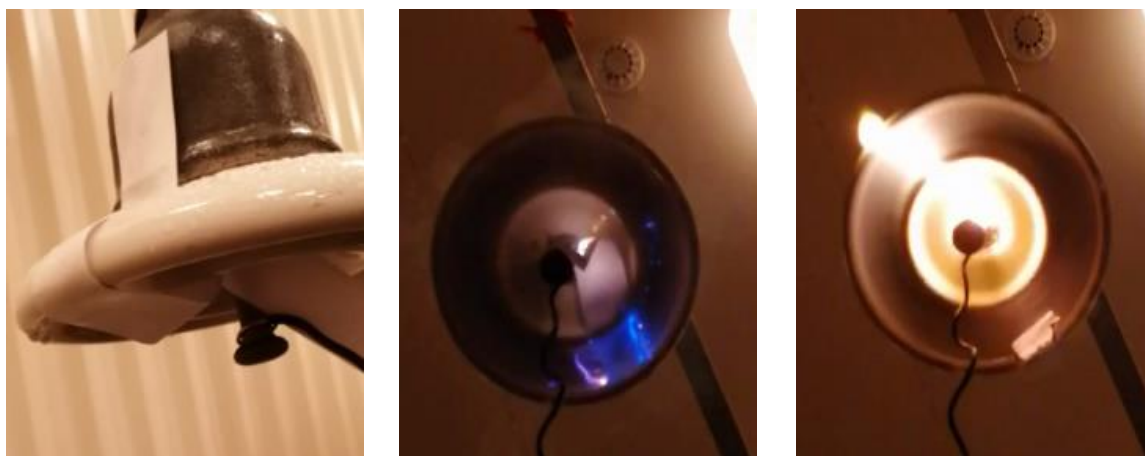
Posledním vlivem, který jsme simulovali v laboratoři byl proužek papíru, který se kvůli větru a dešti nalepil na povrch izolátoru. Testovali jsme dva případy. První případ, že se papírek nalepil tak šikovně, že spojil obě elektrody. Druhým případem bylo nalepení na svrchní stranu izolátoru. Papír skvěle absorbuje vodu, takže lze očekávat nejnižší hodnoty přeskočení, co jsme zatím měřili. Proužek papíru byl asi 5 centimetrů široký, důkladně namočený, dotýkal se velkou částí svrchní elektrody a o paličku se spíše opíral.

Všechny pokusy, kde se papírek dotýkal obou elektrod vedly k tomu, že papírem začal protékat viditelný proud, už při poměrně nízkém napětí. V druhém pokusu tomu bylo už při 5 kilovoltech. První pokus byl totiž zatím takový seznamovací, hned při začátku měření se totiž ozval zvuk pálení papíru, což nás trošku zmátlo a pokračování s najížděním napětí vedlo k tomu, že při 21 kilovoltech začal procházet papírkem vysoký zkratový proud, který ho rychle přepálil a tím jsme první pokus ukončili ručně. Myslím si, že vzplanutí papírku je pouze otázka času. Při druhém pokusu se projevil svodový proud jak jsem již zmínil při 5 kilovoltech a to viditelným odpařováním vody z papíru. 10 kilovoltů přivedlo papírek do stavu vzplanutí a při 12 kilovoltech začalo napětí kolísat, kvůli elektrickému oblouku, který

odpojil transformátor od sítě. Třetí pokus přinesl fotografie zespoda, na kterých je mimochodem vidět i požární hlásič, který jsme naštěstí kupodivu nespustili. Na druhé fotografii si lze všimnout, že papír se vznítí na místech, kde vzniká nejvíce částečných výbojů. Třetí pokus přinesl výsledek 20 kV, při kterém skutečně došlo k přeskoku, ne přes přepálený papír, ale na oblíbené straně.

Mokrý papír, čapka-palička		
Pokus	Napětí [kV]	Průměr [kV]
1	21	17,67
2	12	
3	20	

Tabulka 14: Mokrý papír spojující čapku a paličku - kilovolty při zkratu či přeskoku



Obrázek 21: Umístění papírku, zapálení v místě vzniku ČV, přeskok

Namočený proužek papíru nalepený pouze na svrchní stranu přinesl hodnoty podobné přeskoku po čistém izolátoru, mokrém shora. K přeskokům nyní docházelo v místech, kde byl proužek papíru nalepený. K přepálení papírku nedošlo, ale docházelo k jeho vysušení, což má taky za následek zvýšení hodnoty přeskokového napětí.

Mokrý papír, čapka-sukýnka		
Pokus	Napětí [kV]	Průměr [kV]
1	37,8	38,73
2	37,3	
3	41,1	

Tabulka 15: Mokrý papír na horní straně talíře - kilovolty při zkratu či přeskoku

Souhrnná tabulka přeskokových napětí				
	1. pokus	2. pokus	3. pokus	Průměr
Zaprášený Izolátor	54,4	51,4	54,1	53,30
Směs voda+prach vrchní povrch	36,4	35,7	36,14	36,08
Směs voda+prach spodní povrch	26	32	54	37,33
Opětné navlhčení	27			
Čistý izolátor, suchý	60,4	59,7	59,1	59,73
Čistý, mokrá shora	42,1	42,1	40,5	41,57
Čistý, mokrá z obou stran	27,2	32,3	35,1	31,53
Suchý izolátor + pavučiny	60	60,7	61,4	60,70
Mokrá izolátor + pavučiny (mokrý)	38,7	39,4		39,05
Více pavučin	28,7	30,5		29,60
Izolátor pokrytý sněhem	44,5	42,5		43,50
Mikrotenový sáček - suchý	60	60,8	61,4	60,73
Mikrotenový sáček - mokrá	48,2	45,3	42,1	45,20
Mokrý listí (6 pokusů)	41,4	41,7	40,2	42,37
	44,4	43,4	43,1	
Mokrý papír, čapka-palička	21	12	20	17,67
Mokrý papír, čapka-sukýnka	37,8	37,3	41,1	38,73

Tabulka 16: Přeskoková napětí při všech měřených vlivech

4 Závěr

Předmětem této bakalářské práce byla zejména elektrická pevnost izolátoru, jejíž zranitelnost jsem popsal a vyzkoušel v laboratoři. Izolátory jsou velice podstatné a citlivé místo v elektrizační soustavě, je tedy vhodné při jejich dimenzování investovat více peněz na správných místech a omezit tak intenzitu poruch na časové ose. Je pravdou, že matematika je mocný nástroj na spoustu úloh, ale bohužel, jak jsme si osvojili, elektrická pevnost je vázána mnoha různými vlivy, které není možné pro výpočet zanedbat, proto ji vždy raději odhadujeme na základě zkušeností či statistických informací.

Věřím, že jevy popsané v teoretické části korespondují s jevy naměřenými, což je zřejmé, protože popsaná teorie silně vychází z praktických zkušeností. Při měření se nám několikrát stalo, že k přeskoku došlo na jiné straně izolátoru, než na které by jsme to chtěli a čekali, což akorát vypovídá o více vlivech na EP, působící ve stejnou chvíli. Tyto přeskoky mohla způsobit nerovnoměrnost povrchu, nebo eroze, která je produktem časté výbojové činnosti. Dalším faktorem, který je všudypřítomný je ionizace, která má spoustu tváří a jednou z nich je například ionizace, co vzniká díky částečným výbojům. Hraje roli tedy i doba přiloženého napětí, které částečné výboje živí a přispívá tak také k vlivné ionizaci ohřevem.

Co se samotných výsledků týče, nejsilněji se na přeskokovém napětí podepsal mokřý papír, tedy lidský faktor, který je mezi ostatními nejméně předvídatelný. Lze ale očekávat tvrdé rány i od běžných enviromentálních jevů jako je směs vody a prachu či dokonce pavučiny, jež snížily zápalné napětí přeskokového výboje více než o 30%. V našem případě ale nelze pokaždé říci, že o stejné procento byla snížena i elektrická pevnost, protože výboj si našel pokaždé jinou cestu a nelze ho vztáhnout na nitřovou nebo svodovou vzdálenost elektrod. U měřeného vzorku by se dala hodnotit glazura jako velice přínosná na místech, kde není mikroskopicky poškozena erozí, protože se u ní objevil v několika případech samočistící efekt, který způsobil sesun sněhu, nebo urychlil stékání vody či nedovolil přilnout listům a pavučinám.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] KÜCHLER, Andreas. High Voltage Engineering. GERMANY: Springer Vieweg, 2018. 650 s. ISBN 978-3-642-11992-7.
- [2] KUFFEL, E., W.S. ZAENGL a J. KUFFEL. High Voltage Engineering: Fundamentals. 2nd. Velká Británie: Butterworth-Heinemann, 2000. 539 s. ISBN 0 7506 3634 3.
- [3] INMR: Impact of Climate Change on Power Systems & Electrical Insulation: Experience in Italy [online]. 2019, (February 23) [cit. 2019-04-06]. Dostupné z: <http://www.inmr.com/impact-climate-change-power-systems-electrical-insulation-experience-italy/>.
- [4] MAYER, Daniel. The Effect of Geomagnetic Storms on the Electrification System. BANKS, Victoria P. Cyclonic and geomagnetic storms: predicting factors, formation, and environmental impacts. New York: Nova Publishers, [2015]. ISBN 978-1-63482-360-9.
- [5] SUVOROVA, A & HUANG, C.-M & TSAI, L.-C & DMITRIEV, ALEXEI & RATOVSKY, K.G.. (2015). Long-duration positive ionospheric storm during the December 2006 geomagnetic storm: Ionizing effect of forbidden electrons. *Advances in Space Research*. 56. 10.1016/j.asr.2015.06.001.
- [6] Elektro: odborný časopis pro elektrotechniku [online]. Praha: FCC Public, 2016, 26(8-9) [cit. 2019-04-04]. ISSN 1210-0889. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/flipviewer/Elektro/2016/08/Elektro_08_2016/info/Elektro_08_2016.pdf
- [7] INMR: When Hollow Core Insulators Become a Home for Mold [online]. 2018 (March 24) [cit. 2019-04-06]. Dostupné z: <http://www.inmr.com/hollow-core-insulators-home-mold/>
- [8] INMR: Tropical Paradise, Yes but Not for Overhead Distribution [online]. 2018, (December 15) [cit. 2019-04-06]. Dostupné z: <http://www.inmr.com/tropical-paradise-yes-overhead-distribution-2/2/>
- [9] BARTNIKAS, R. Partial Discharges: Their Mechanism, Detection and Measurement [online]. 5.10.2002, , 46 [cit. 2019-04-19]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1038663>
- [10] ARORA, Ravindra a Wolfgang MOSCH. High Voltage And Electrical Insulation Engineering. Hoboken, New Jersey: John Wiley. ISBN 978-0-470-94790-6.
- [11] NIJDAM, S., G. WORMEESTER, E. M. van VELDHUIZEN a U EBERT. Probing background ionization: Positive streamers with varying pulse repetition rate and with a radioactive admixture [online]. , 30 [cit. 2019-04-21].
- [12] SAMIR, A. Positive streamer in gases. HULTMAN, L.G. a P. EKLUND. VACUUM [online]. Volume 156. Elsevier, 2018, Physical approach from low to high energies [cit. 2019-04-21]. ISBN 0042-207X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2018.07.051>
- [13] WANG, S, F LV a Y LIU. Estimation of discharge magnitude of composite insulator surface corona discharge based on ultraviolet imaging method [online]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, August 2014., , 1697-1704 [cit. 2019-04-23]. DOI: 10.1109/TDEI.2014.004358. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6877997&isnumber=6877964>
- [14] NAIDU, M. S. a V KAMARAJU. High Voltage Engineering. Third edition. New Delhi: Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, 2004. ISBN 0-07-049464-9.

Zdroje obrázků

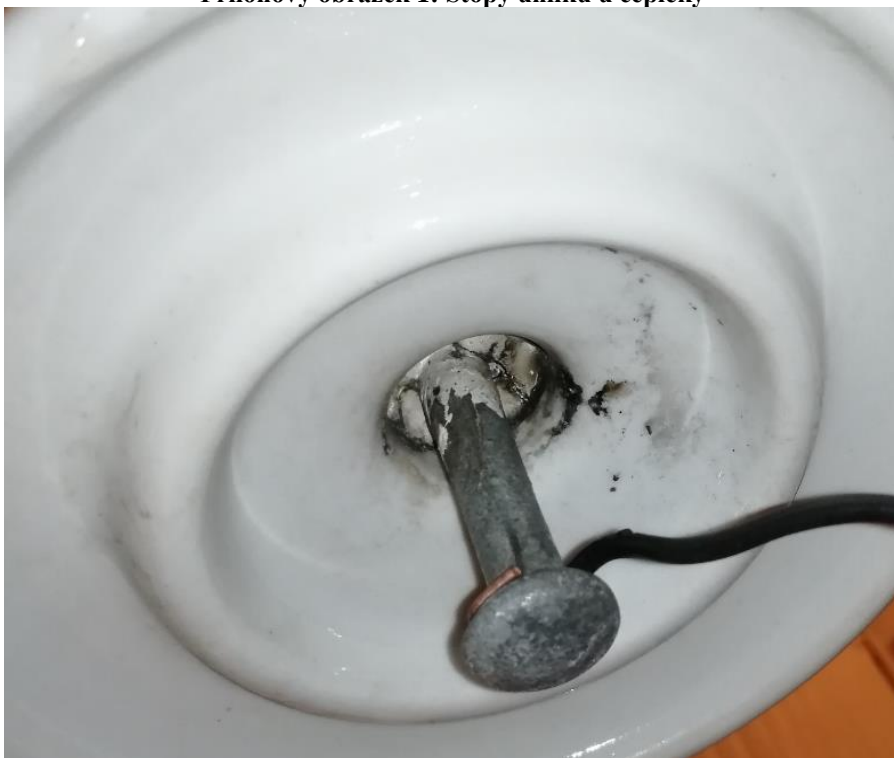
- [15] ČHMÚ. Český hydrometeorologický ústav [online]. [cit. 1.4.2019]. Dostupný na WWW:
<http://prasu.chmi.cz:8080/IskoPollutionMapView/faces/viewMapImages.xhtml>
- [16] BUDKOV, Observatoř. INTERMAGNET [online]. [cit. 1.4.2019]. Dostupný na WWW: <http://www.intermagnet.org/activitymap/activitymap-eng.php>
- [17] ABISKO, Observatoř. INTERMAGNET [online]. [cit. 1.4.2019]. Dostupný na WWW: <http://www.intermagnet.org/activitymap/activitymap-eng>
- [18] Tettex AG Instruments: Hochspannungs - Prüfanlage A 26'396 KOVO prag. Zürich.

Přílohy

Aplikace vody na zaprášený izolátor - Zaprášený povrch, namočený celistvě



Přílohový obrázek 1: Stopy uhlíku u čepičky



Přílohový obrázek 2: Stopy uhlíku u paličky