

České vysoké učení technické v Praze  
Fakulta elektrotechnická

katedra elektroenergetiky

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Jiří Zárybnický**

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Obor: Elektroenergetika

Název tématu: **Přeskokové charakteristiky izolátorů při umělém znečištění**

Pokyny pro vypracování:

- 1) Popis a konstrukce izolátorů pro venkovní vedení vysokého napětí.
- 2) Návrh vysokonapěťového zkušebního obvodu a metodiky pro umělé znečištění izolátorů.
- 3) Stanovení přeskokových charakteristik izolátorového závěsu pro různé stupně znečištění.

Seznam odborné literatury:

- [1] Kuffel, E., Zaengl, W. S.: High Voltage Engineering Fundamentals, Second Edition, Butterworth-Heinemann, 2000
- [2] Farzaneh, M., Chisholm, W. A.: Insulators for icing and polluted environments, Oxford, Wiley-Blackwell, 2009

Vedoucí: Ing. Radek Procházka, Ph.D.

Platnost zadání: do konce letního semestru 2015/2016

L.S.

Ing. Jan Švec Ph.D.  
vedoucí katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.  
děkan

V Praze dne 1. 4. 2015

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

---

Fakulta elektrotechnická  
Katedra elektroenergetiky

**Přeskokové charakteristiky izolátorů při umělém  
znečištění**

**Flashover performance of artificially polluted  
insulators**

Diplomová práce

Studijní program: Elektroenergetika

Studijní obor: Elektrotechnika, energetika a management

Vedoucí práce: Ing. Radek Procházka, Ph.D.

**Jiří Zárybnický**

---

**Praha 2015**

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze, dne 9. května 2015

.....

Podpis

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval vedoucímu mé diplomové práce Ing. Radkovi Procházkovi, Ph.D. za vstřícný přístup, rady a čas, který mi během vypracování této práce věnoval. Dále děkuji panu Janu Kvasničkovi za pomoc při sestavování měřicího obvodu a při měření přeskových charakteristik.

## **Abstrakt**

Tato diplomová práce se zabývá problematikou vlivu znečištění na povrchu izolátoru na jeho výkon. První část je zaměřena na obecný popis, rozdělení izolátorů používaných pro venkovní vedení vysokého napětí a na oblast znečištění izolátorů. V praktické části byl navržen zkušební postup pro měření přeskokových charakteristik izolátorů při znečištění a aplikován na porcelánový a kompozitní izolátor.

## **Klíčová slova**

Izolátory, znečištění, přeskok

## **Abstract**

This thesis deals with the impact of pollution on the performance of insulators. The first part is focused on general description and division of insulators used for medium voltage overhead power-lines and the area of contamination of insulators. In the practical part was introduced test procedure for measuring of flashover performance of insulators and applied to porcelain and composite insulator.

## **Keywords**

Insulators, pollution, flashover

## Seznam zkratek

BM	kartáčová metoda
ČVUT	České vysoké učení technické
FEL	Fakulta elektrotechnická
DM	metoda namáčení
EPDM	etylen-propylen-diene monomer
EPM	etylen-propylen monomer
ESDD	ekvivalentní hustota nánosu soli
GFC	pryskyřici pojené skelné vlákno
NSDD	hustota nánosu nerozpustné složky
PTFE	polytetrafluoretylen
RTV	vulkanizace při pokojové teplotě
SDD	hustota nánosu soli
SES	ekvivalentní salinita stanoviště
SIR	silikonový kaučuk
SM	metoda rozprašování

# Obsah

1	Úvod .....	8
2	Teoretická část.....	9
2.1	Popis a konstrukce izolátorů pro venkovní vedení vysokého napětí .....	9
2.2	Znečištění izolátorů .....	16
2.2.1	Klasifikace znečištění izolátorů .....	16
2.2.2	Klasifikace prostředí dle znečištění.....	17
2.2.3	Zkoušky při umělém znečištění.....	20
2.2.4	Způsoby zamezení přeskoku na znečištěném izolátoru .....	22
2.3	Přeskok na znečištěném izolátoru .....	24
2.3.1	Mechanismus přeskoku v plynech .....	24
2.3.2	Mechanismus přeskoku na znečištěném izolátoru .....	25
2.3.3	Studie přeskoku na znečištěném izolátoru.....	26
3	Praktická část.....	32
3.1	Výpočet činitele tvaru .....	33
3.2	Zkušební obvod .....	36
3.3	Postup měření .....	38
4	Zpracování výsledků měření a jejich vyhodnocení.....	39
4.1	Výsledky měření .....	39
4.2	Atmosférická korekce.....	40
4.3	Vyhodnocení.....	41
5	Závěr .....	43
6	Seznam použité literatury .....	44

# 1 Úvod

Izolátory hrají důležitou roli v přenosu a distribuci elektrické energie a mají velký vliv na spolehlivost provozu venkovního vedení vysokého napětí. Zde jsou vystaveny mechanickému namáhání, přepětím v síti (spínacím a atmosférickým po úderu blesku), ale také působení atmosférických podmínek. Znečištění povrchu izolátoru může způsobit jeho nerovnoměrné napěťové namáhání, což v extrémních případech vede k přeskoku přes izolátor a výpadku.

Ve snaze snížit náklady na izolaci se zachováním vysoké spolehlivosti byla provedena řada studií, zabývajících se faktory ovlivňujícími velikost přeskokového napětí u znečištěných izolátorů a na jejich základě vytvořena řada matematických modelů. V těchto studiích byly použity různé metody testování.

Cílem této práce je popsat problematiku konstrukce izolátorů pro venkovní vedení vysokého napětí. Navržení vysokonapěťového zkušebního obvodu a metodiky pro umělé znečištění izolátorů a stanovení přeskokových charakteristik izolátorového závěsu pro různé stupně znečištění.



## 2 Teoretická část

### 2.1 Popis a konstrukce izolátorů pro venkovní vedení vysokého napětí

Izolátor je elektrotechnická součástka, používaná pro přenos elektrické energie. Umísťuje se mezi živý vodič a uzemněnou konstrukci a slouží k mechanickému uchycení vodičů a k zabránění vzniku přeskoků. Jsou tedy namáhán mechanicky a elektricky. [12]

Elektrické namáhání je vyvoláno elektrickým polem. To může způsobit přeskok, průraz nebo za nepříznivých podmínek vznik vodivých cest na izolátoru. Mechanické namáhání je vyvoláno vahou vodiče připevněného k izolátoru nebo změnami teplot. Izolátory musí čelit i dalším vlivům, které na ně působí, jako jsou vlhkost, déšť, sníh, námraza, prach, trus a různé exhaláty. [21]

Izolátory pro venkovní vedení vysokého napětí můžeme rozdělit podle různých kritérií:

- Podle izolační cesty

**typ A** – neprůrazné.

Izolátory typu A mají nejkratší průraznou dráhu v pevném izolačním materiálu delší, než je polovina přeskokové vzdálenosti vzduchem mimo izolační těleso.

**typ B** – průrazné.

Izolátory typu B mají nejkratší průraznou dráhu v pevném izolačním materiálu kratší, než je polovina přeskokové vzdálenosti vzduchem mimo izolační těleso. [5]

- Podle provedení

**Podpěrné**

Podpěrné izolátory se používají zejména pro napětí do 35 kV. Pro vyšší napětí je jejich použití neekonomické. Menší se vyrábějí plné, větší mohou být duté naplněné suchým plynem a hermeticky uzavřeny. [15]

## **Závěsné**

Závěsné izolátory mohou být kotevní nebo nosné. Sestavují se do řetězců a to jednoduchých, dvojitých, nebo mohou být zavěšeny ve tvaru V. Jejich klady, oproti podpěrným izolátorům, jsou vyrovnávání tahů v sousedních polích, odlehčování konzoly od krouticích momentů a stožáru při přetržení vodiče. Nevýhody jsou náročnější montáž a potřeba vyšší instalační výšky. [21]

- Podle konstrukčních materiálů

### **Porcelánové izolátory**

Porcelán se jako materiál pro konstrukci izolátorů využívá již od roku 1849. [11] Bývá tvořen přibližně z 50% jílem, z 25% křemenem nebo oxidem hlinitým a z 25% živcem. [14]

Porcelánové izolátory mají vysokou pevnost v tahu a v tlaku, chemickou odolnost, stabilitu za vysokých teplot a téměř nepodléhají erozi způsobené svodovým proudem. Jejich nevýhodou je křehkost, obtížnost odhalování poškození a vysoká hydrofilita a pórovitost povrchu, což má za následek snadné znečišťování povrchu izolátoru z okolního prostředí. Povrch porcelánových izolátorů se k zamezení usazování nečistot glazuje. [6, 18]

### **Skleněné izolátory**

Izolátorové sklo se typicky skládá z křemene (57%), vápence (9%), dolomitu (11%) a uhličitanu sodného (14%). [14]

Skleněné izolátory se používají pro vedení vysokého napětí. Pro použití s vyšším napětím se sklo vytvrzuje - zahřeje se na teplotu kolem 100 °C a poté se v proudu stlačeného vzduchu prudce ochladí. [18] Výhodou skla, jako materiálu pro izolátory, jsou vysoká dielektrická pevnost a dobrá pevnost v tlaku. Naproti tomu skleněné izolátory bývají terčem vandalů a podléhají erozi způsobené svodovým proudem. [20]

## **Kompozitní izolátory**

Jako kompozitní označujeme izolátory složené z více než jednoho materiálu. Materiály používané pro konstrukci kompozitních izolátorů mohou být etylenpropylenový kaučuk (EPM a EPDM), silikonový kaučuk (SIR), takzvané „kaučukové slitiny“ (ty se skládají z EPDM a SIR) nebo polytetrafluoretylen (PTFE nebo Teflon) spolu s jádrem z pryskyřicí pojeného skelného vlákna (GFC).

Tato kombinace zajišťuje vysokou pevnost izolátoru v tahu, tlaku i ohybu a zároveň dobré izolační vlastnosti viz tabulka 1, kde jsou srovnány vybrané vlastnosti izolátorových materiálů. [14] Oproti keramickým izolátorům nevydrží vysoké teploty (již při 300 až 500 °C se rozkládají) a nejsou tak odolné vůči vlivům prostředí. Na druhou stranu mají mnoho výhod. Jejich povrch má hydrofobní charakter, díky čemuž lépe odolávají znečištění. Zatímco například u EPDM může být hydrofobní vrstva vlivem prostředí (UV záření, znečištění) trvale znehodnocena, některé materiály, jako je SIR, si jsou v případě její narušení schopny svou hydrofobicitu časem samy obnovit. Oproti keramickým a skleněným izolátorům jsou velmi lehké (v závislosti na konstrukci mohou být lehčí až o 90 %), odolné vůči vandalismu a mají nižší výrobní cenu. [6]

Vlastnost	Glazovaný porcelán	Vytvrzené sklo	Polymer	GFC
Hustota [g/cm <sup>3</sup> ]	2,3 – 3,9	2,5	0,9 – 2,5	2,1 – 2,2
Pevnost v tahu [MPa]	30 – 100	100 – 120	20 – 35	1300 – 1600
Pevnost v tlaku [MPa]	240 – 820	210 – 300	80 – 170	700 – 750
Tepelná vodivost [W/(m*K)]	1 – 4	1	0,17 – 0,9	0,2 – 1,2
Koeficient tepelné roztažnosti [10 <sup>-6</sup> /K]*	3,5 – 9,1	8 – 9,5	45 – 200	7,5 – 20
Relativní permitivita [-]**	5 – 7,5	7,3	2,3 – 5,5	2,5 – 6,5
Ztrátový činitel [*10 <sup>-3</sup> ]**	20 - 40	15 - 50	0,1 - 5	5 - 20
Dielektrická pevnost [kV/mm]	10 – 20	>25	>25	3 – 20
Rezistivita [Ω*cm]	10 <sup>11</sup> – 10 <sup>13</sup>	10 <sup>12</sup>	10 <sup>15</sup> – 10 <sup>17</sup>	10 <sup>11</sup> – 10 <sup>14</sup>

tabulka 1: Vybrané vlastnosti izolátorových materiálů [14]

\* 20 -100 °C

\*\* 50 -60 Hz

- Podle designu

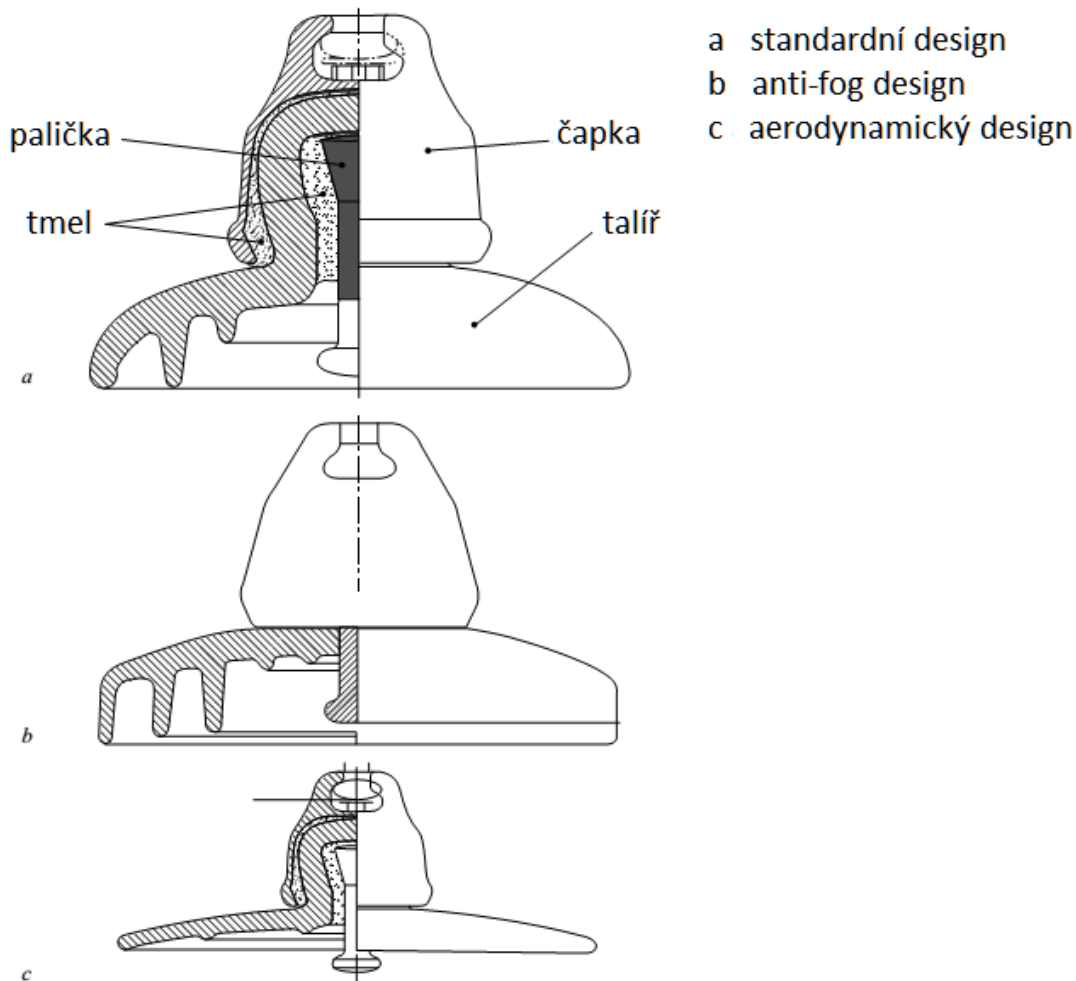
### Talířové izolátory

Talířové izolátory se vyrábí z porcelánu nebo ze skla. Skládají se z kovové čapky s dutinou – pánvičkou zatmelené v porcelánovém dříku s talířem, tvořícím vlastní izolaci. Talíř má ze spodní strany žebrování. To slouží k prodloužení povrchové cesty izolátoru. Z vnitřní strany dříku je natmelena kovová palička (obrázek 1 a). Palička se zasouvá do pánvičky dalšího izolátoru, kde se zajišťuje závlačkou. Tím lze

jednotlivé segmenty spojovat do řetězce požadované délky. Talířové izolátoru jsou typu B. [15,21]

Talířové izolátory vynikají svou pevností v tahu, ta je daná kónickým tvarem paliček, vložených do tmelu, který je pevně spojuje s čapkami. Kovové části mají schopnost omezit šíření kořenu oblouku. Jsou ale zároveň slabinou těchto izolátorů - výrazně zvyšují jejich hmotnost, jsou náchylné ke korozi a zvyšují elektrické namáhání izolačního materiálu. Talířové izolátory jsou dále náchylné k elektrickému průrazu, přičemž v případě porcelánu je ke zjištění tohoto poškození nutné pravidelné měření, což zvyšuje náklady na údržbu. U skleněných izolátorů ho lze odhalit pouhou vizuální kontrolou. [9, 12]

Pro nadměrně znečištěná prostředí se používají izolátory se zvýšenou povrchovou cestou označovány jako anti-fog neboli mlhové, které jsou využívány v pobřežních a industriálních oblastech. (obrázek 1 b) Dále se designují s aerodynamickým profilem znesnadňujícím usazování polutantů. Ty bývají instalovány například v pouštních oblastech. (obrázek 1 c) [9]

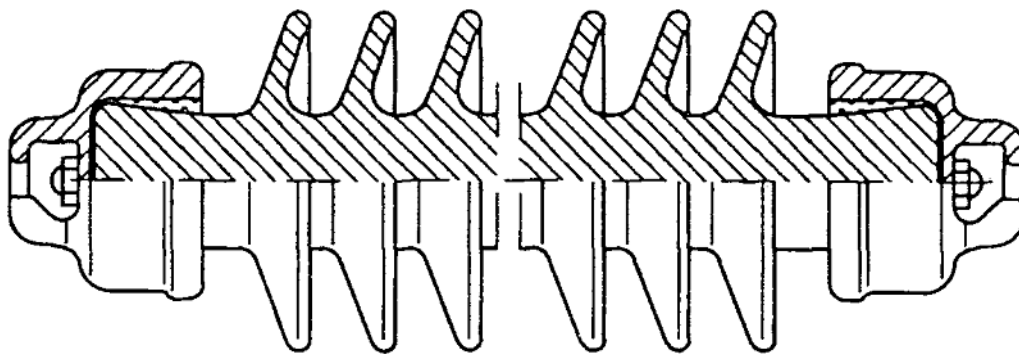


obrázek 1: Příklad konstrukce talířových izolátorů [9]

### Porcelánové tyčové izolátory

Tyčové izolátory jsou vyráběny v provedení se stříškami (obrázek 2), nebo tvaru šroubovice (spirálové izolátory). Spirálové provedení prodlužuje dráhu svodového proudu a ten je tak omezen. Pro dosažení požadované délky se tyčové izolátory spojují do řetězců. [15]

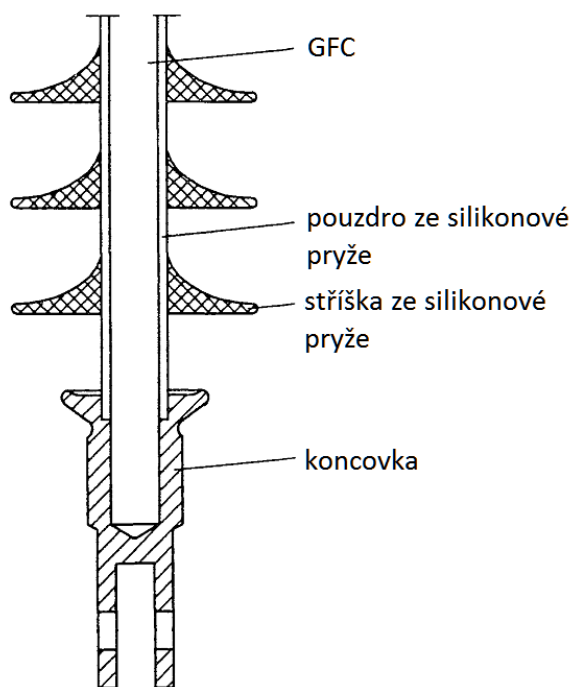
Díky absenci kovových vodivých částí mohou být oproti talířovým izolátorům kratší a lehčí. Zároveň je na nich rovnoměrněji rozloženo napětí a netrpí elektrickými průrazy – typ A. Jsou ale více náchylné na poškození, při kterém může dojít k pádu vodiče, a jejich výroba je dražší. [15]



obrázek 2: Tyčový izolátor [12]

### Kompozitní tyčové izolátory

Tyčový kompozitní izolátor je tvořen jádrem tvořeným pryskyřicí pojeným vytvrzeným skelným vláknem (GFC). Na povrchu jádra je pro ochranu před vnějšími vlivy navulkanizován plášť se stříškami z polymerického materiálu. Na koncích izolátoru jsou umístěny kovové armatury. Díky jednoduchosti výroby lze parametry keramických izolátorů lehce přizpůsobovat požadavkům jednotlivých projektů. [14]



obrázek 3: Příklad konstrukce kompozitního tyčového izolátoru [20]

## 2.2 Znečištění izolátorů

Nutnost dimenzovat izolaci venkovního vedení se projevuje zejména u vyšších napětí. Z tabulky 2 lze vyčíst, že zatímco u nižších napětí nejvíce ovlivňuje design izolátoru mechanická odolnost, u napětí nad 765 kV hraje roli v podobě použitých izolátorů znečištění.

U [kV]	Převažující faktor
0-4	Mechanická odolnost
4-34,5	Korona a přepětí
69-220	Atmosférické a spínací přepětí
345-765	Spínací přepětí a znečištění
765-1500	Znečištění

tabulka 2: Faktory ovlivňující design izolátorů [8]

Při navrhování izolace se ovšem nelze spoléhat pouze na toto základní rozdělení. Velmi totiž záleží na stupni znečištění jeho složení a okolních podmínkách.

### 2.2.1 Klasifikace znečištění izolátorů

Znečištění dělíme z hlediska fáze, ve které se usazuje na izolátorech, na dva typy:

- **Typ A**

Znečištění typu A se na izolátorech usazuje v pevné fázi a se skládá ze dvou složek. Rozpustné, která se po navlhnutí stává vodivou, a nerozpustné. Ta tvoří tmelící vrstvu pro rozpustnou složku.

Rozpustná (aktivní) složka se dále dělí na vodivé znečištění (to obsahuje vodivé kovové částičky a je tedy vodivé i bez navlhnutí), vysoko rozpustné soli (např. NaCl, MgCl, NaSO<sub>4</sub>), nízko rozpustné soli (např. sádra, popílek) a kyseliny (např. SO<sub>2</sub>, SO<sub>3</sub>, NOX). Úroveň znečištění aktivní složkou se charakterizuje hodnotami ekvivalentní hustoty nánosu soli ESDD (mg/cm<sup>2</sup>). ESDD se zjistí tak, že se z části izolátoru sejme vrstva znečištění. Ta musí být vysušena, aby nedošlo k ovlivnění výsledku měření.



Sejmutá vrstva se rozředí v demineralizované vodě a změří se objemová vodivost, která je přepočtena na referenční teplotu 20 °C. Z té se vypočte salinita a následně ekvivalentní hustota nánosu soli, dle následujících vztahů: [4,10]

$$\sigma_{20} = \sigma_{\theta} * (1 - b * (\theta - 20)) \quad (3.1)$$

$\sigma_{\theta}$  – naměřená objemová vodivost [S/m]

$\sigma_{20}$  – objemová vodivost přepočtená na 20 °C [S/m]

$\theta$  – teplota měřeného roztoku [°C]

b – konstanta závisající na teplotě [-]

$$ESDD = (5,7 * \sigma_{20})^{1,03} * \frac{V}{A} \quad (3.2)$$

V – objem suspenze [cm<sup>3</sup>]

A – plocha izolátoru, ze kterého byla sejmuta vrstva znečištění [cm<sup>2</sup>]

Nerozpustná (inertní) složka může být hydrofilní (např. kaolín, jíl) nebo hydrofobní (např. silikonová maziva, olej). Úroveň znečištění aktivní složkou se charakterizuje hustotou nánosu nerozpustné složky NSDD (mg/cm<sup>2</sup>). [10]

- **Typ B**

Jako typ B označujeme znečištění, které se na izolátor usazuje ve formě tekutého elektrolytu s nízkým nebo žádným obsahem nerozpustné složky. Jeho zdroje mohou být slaná voda, vodivá mlha, kyselá dešť nebo zemědělské postřiky. Úroveň znečištění izolátoru polutanty typu B se vyjadřuje povrchovou vodivostí (μS) [10]

### **2.2.2 Klasifikace prostředí dle znečištění**

Prostředí dělíme dle druhu a závažnosti znečištění. V praxi se na jednom místě může vyskytovat i více níže uvedených typů.

- **Pouštní typ**

Jedná se oblasti s velmi suchým, prašným a větrným podnebím, ve kterých se střídají vysoké teploty přes den s nízkými nočními teplotami. Vrstva znečištění je zpravidla typu A a skládá se z nízko rozpustných solí v kombinaci s velkým podílem inertní složky tvořené pískem. V kombinaci s nízkou intenzitou srážek zde samočištění není moc účinné.

- **Průmyslový typ**

Tyto oblasti se nachází v těsné blízkosti zdrojů průmyslového znečištění (např. uhelné elektrárny, rafinerie) nebo prachu (např. cementárny a lomy). Vrstva znečištění obsahuje obvykle vyšší podíl inertní složky. Úroveň samočištění se liší dle konkrétního zdroje znečištění.

- **Přímořský typ**

Oblasti, ve kterých se z moře uvolňují do atmosféry soli Sodíku, Chlóru, Manganu a Draslíku. V závislosti na podmínkách se můžou vyskytovat až 50 km do vnitrozemí. Znečišťování zde může probíhat velmi rychle. Zároveň zde ale vzhledem k tomu, že polutanty jsou většinou vysoko rozpustné soli, dobře funguje samočištění. [6,10]

- **Zemědělský typ**

Místa se zvýšenou zemědělskou aktivitou. Polutanty jsou vysoko a nízko rozpustné soli jako chemické postřiky, výkaly a soli obsažené v půdě. Ve střední až velké míře je zde zastoupena inertní složka ve formě prachu a plev. Úroveň samočištění může být vysoká v závislosti na konkrétním zdroji znečištění. [6,10]

Dále lze prostředí dělit dle úrovně znečištění. Úroveň znečištění prostředí se pro znečištění typu A stanovuje na základě měření ESDD/NSDD na referenčním izolátoru. Pro typ B se určuje dle SES - ekvivalentní salinity stanoviště ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ). Jsou definovány celkem 4 úrovně znečištění, podle kterých se doporučuje minimální povrchová cesta izolátorů. [6,10,13]

- **Malé**

ESDD  $\leq 0,06 \text{ mg/cm}^2$ , SES 20-40  $\text{kg/m}^3$ , povrchová cesta 16 mm/kV

- oblasti bez průmyslu a s nízkou koncentrací zástavby
- oblasti s nízkou hustotou průmyslu a zástavby, které jsou často vystaveny větrům a deštům
- zemědělské oblasti
- horské oblasti
- oblasti vzdálené od moře minimálně 20 až 20 km a nesmí být vystaveny mořským větrům

- **Střední**

ESDD 0,06-0,20  $\text{mg/cm}^2$ , SES 40-80  $\text{kg/m}^3$ , povrchová cesta 20 mm/kV

- oblasti s průmyslem neprodukujícím znečišťující kouř a s průměrnou koncentrací zástavby
- oblasti s vysokou hustotou průmyslu a zástavby, které jsou často vystaveny větru a deštům
- oblasti vystavené mořským větrům, ale vzdálené od pobřeží alespoň několik kilometrů

- **Silné**

ESDD 0,20-0,60  $\text{mg/cm}^2$ , SES 80-160  $\text{kg/m}^3$ , povrchová cesta 25 mm/kV

- oblasti s vysokou hustotou průmyslu a předměstí velkých měst s vysokým počtem tepláren produkujících znečištění
- oblasti v blízkosti moře nebo vystavené silným mořským větrům

- **Velmi silné**

ESDD  $> 0,60 \text{ mg/cm}^2$ , SES 100-200  $\text{kg/m}^3$ , povrchová cesta 31 mm/kV

- oblasti většinou malého rozsahu, s výskytem vodivého prachu a kouře produkujícího zvláště tlusté vodivé nánosy
- oblasti většinou malého rozsahu, velmi blízko moře vystavené ostříku mořskou vodou nebo velmi silným větrům vanoucím od moře

- pouštní oblasti s velmi občasnými srážkami, vystavené silným větrům nesoucím písek a sůl a pravidelně podléhající kondenzaci

### 2.2.3 Zkoušky při umělém znečištění

Cílem umělého znečišťování izolátorů je simulovat reálné podmínky, ve kterých se izolátor může vyskytovat. Dvě základní metody jsou popsány v normě ČSN EN 60507. Jedná se o metodu solné mlhy a pevné vrstvy. [6]

- **Metoda solné mlhy**

Metoda solné mlhy simuluje vliv znečištění typu B. Izolátor je očištěn a zavěšen v pracovní poloze v uzavřené komoře, kam se vhání aerosol s obsahem NaCl. Objemová vodivost aerosolu se volí v rozmezí od 4300  $\mu\text{S}/\text{cm}$  do 200 000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . V normě je definován počet, rozmístění a tvar trysek, rozprašujících aerosol. Při použití této metody je nutný před přípravný proces. Na izolátor je přiloženo napětí, které je každých pět minut zvyšováno o 10%, dokud nedojde k přeskoku. Následuje další test, kdy je napětí rychle zvýšeno na 90 % přeskokového napětí a je dále v pětiminutových intervalech o 5 % zvyšováno, dokud opět nedojde k přeskoku. Poté je izolátor vyčištěn a konečně podroben testům výdržného napětí.

- **Metoda pevné vrstvy**

Při této metodě je vrstva znečištění nanášena přímo na izolátor ve formě suspenze. Suspenze je rozprašováním, poléváním nebo ponořením nanesena na čistý izolátor a nechá se zaschnout. V této fázi má vrstva znečištění veliký odpor a neprochází prakticky žádný svodový proud. Do testovací komory je přivedena mlha, izolátor je navlhčen a vodivost vrstvy znečištění roste. Při testování je tedy napodobováno znečištění typu A. Jako aktivní složka je používána kuchyňská sůl komerční kvality. Norma udává dvě doporučená složení suspenzí. Jako inertní složku je možné použít křemelinu nebo kaolín. Složení suspenze s křemelinou je následující:

- 100 g křemeliny,
- 10 g oxidu křemičitého,
- 1000 g čisté vody,

- vhodné množství NaCl pro dosažení vodivosti od 2100  $\mu\text{S}/\text{cm}$  do 24 000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

Suspenze s kaolínem je složena z:

- 40 g kaolínu,
- 1 000 g čisté vody,
- vhodného množství NaCl pro dosažení vodivosti od 10 000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  do 160 000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

Vlhčení se obvykle zahajuje až po přiložení napětí, ale izolátor lze začít vlhčit i před jeho přiložením. V případě vlhčení před přiložením napětí se po jeho zahájení čeká 20 až 40 minut, dokud nedosáhne vodivost vrstvy znečištění maxima. Poté je na izolátor 15 minut nebo do přeskoku přiloženo napětí.

Vzhledem k potřebě uzpůsobit zkoušky tak, aby lépe reprezentovaly místní podmínky, a ke snaze snížit náklady na ně, byly vyvinuty i další zkušební postupy. [6]

- **Metoda s přirozeně znečišťovaným izolátorem**

Tuto metodu je možno používat v prostředí, kde dochází k rychlému nanášení znečištění s malým nebo žádným efektem samočištění. Izolátor je vystaven přírodnímu znečištění, vlhčení během měření je prováděno uměle. Metoda je náročná na odhad doby expozice izolátoru a náchylná na změny počasí.

- **Metoda kapalného znečištění**

Na izolátor je nanesena suspenze složená z vody, křídly, metyl celulózy nebo kaolínu a vhodného množství NaCl. Zkušební napětí je na izolátor přiloženo ihned po okapání suspenze, takže není potřeba dalšího vlhčení.

- **Cyklická metoda**

Při této metodě je izolátor, na který je přiloženo napětí, postupně vystavován různým fázím procesu znečišťování. Nejprve je na izolátor nanesena vrstva směsy NaCl a kaolínu. Dále je izolátor vystaven mlze. Poté dešti. A nakonec je pomocí ventilátoru vysušen. Celý cyklus se opakuje, dokud nedojde k přeskoku. Měří se počet cyklů vedoucí k přeskoku.

- **Metoda suché vrstvy soli**

Metoda simuluje akumulaci znečištění na kompozitních izolátorech v přímořských oblastech. Na izolátor je přiloženo napětí a vlhké částičky soli jsou foukané přes izolátor proudem vzduchu o rychlosti 4-7 m/s. Poté je izolátor navlhčen a je provedena zkouška výdržným napětím.

## **2.2.4 Způsoby zamezení přeskoků na znečištěném izolátoru**

Pro zamezení nebo zmenšení pravděpodobnosti přeskoků v důsledku znečištění se u keramických izolátorů používají následující metody:

- **Použití izolátoru s optimalizovaným tvarem**

V závislosti na podmínkách prostředí se volí profil, průměr a vzdálenost stříšek, délka povrchové cesty izolátoru atd. Obecně se volí takový tvar stříšek, který umožňuje co možná nejmenší usazování znečištění a zároveň podporuje samočištění větrem a deštěm. [13]

- **Přidávání příslušenství**

Pro prodloužení povrchové cesty izolátoru se používají přídavné stříšky nebo prodlužovače povrchové cesty. Jako ochrana před poruchou způsobenou ptačími exkrementy se používají ostré kovové hroty, které zabraňují ptákům, aby se na izolátoru usadili, nebo stříšky, montované na vrch izolátoru, přímo zachycující exkrementy. Na koncovky izolátorů se ještě přidávají ochranné armatury ve tvaru kruhu nebo háků. Jejich účelem je zrovnoměrnění rozložení napětí na izolátoru a zamezení jeho poškození při vzniku oblouku. [6]

- **Pravidelné čištění**

Čištění povrchu izolátorů se provádí proudem tlakové vody nebo kukuřičných a CO<sub>2</sub> pelet. Čištění vodou je nejlevnější, ale kukuřičné nebo CO<sub>2</sub> pelety jsou mnohem účinnější při čištění obtížně odstranitelného znečištění. Čištění se provádí manuálně nebo automatickými systémy ze země, případně z helikoptéry. [13]

- **Povlakování mazivy**

Tato metoda se používá v oblastech s velkým znečištěním. Izolátory se povlakuji silikonovými (drahé, vydrží kolem jednoho roku) nebo uhlovodíkovými mazivy (levné, vydrží až 10 let). Tím získají hydrofobní povrch. Kontaminanty, které se na povrchu izolátoru usadí, jsou navíc zapouzdřeny do povlakové vrstvy. Vrstvu maziva je nutno pravidelně obměňovat. Pokud není výměna provedena včas, může dojít k poškození izolátoru výboji pod povrchem ochranné vrstvy. Nanášení i odstranění povlaku je většinou prováděno ručně. Tyto procesy jsou pomalé a vyžadují vypnutí obvodu. [9,13]

- **RTV povlakování**

Povlakování RTV silikonem (silikonový kaučuk vulkanizovaný za pokojové teploty) získá povrch izolátoru hydrofobní charakter. Povlak má dlouhou životnost, která závisí na jeho složení, tloušťce a úrovni znečištění, a k jeho nanesení nemusí být odpojován obvod. Velmi rychle degraduje vlivem elektrických výbojů. [13]

- **Odporová glazura**

Na povrch izolátoru je nanesena vrstva (nejčastěji oxid cínu), která zvýší svodový proud tekoucí přes izolátor za normálních pracovních podmínek přibližně na 1 mA. To má za efekt zrovnornění rozložení napětí na izolátoru a jeho zahřívání. Zahřátím je zabraňováno kondenzaci vody na povrchu izolátoru a také je zrychlen proces vysoušení. Díky rovnoměrnému elektrickému poli je zmenšena pravděpodobnost přeskočení vlivem vzniku suchých pásů. Izolátorům s odporovou glazurou se ve vlhkých podmínkách prodlužuje životnost až čtyřikrát. [9,13]

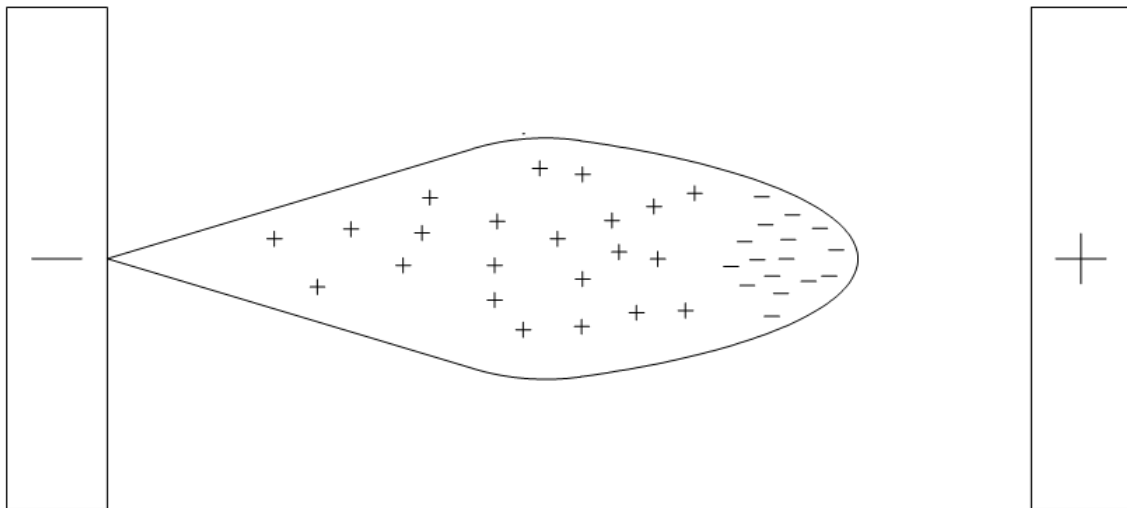
- **Nahrazení kompozitním izolátorem**

Porcelánové a skleněné izolátory mohou být nahrazeny kompozitními. Kompozitní izolátory díky svému hydrofobnímu povrchu lépe odolávají znečištění. [13]

## 2.3 Přeskok na znečištěném izolátoru

### 2.3.1 Mechanismus přeskoku v plynech

Elektrický přeskok v plynech je popsán irským fyzikem Towsendem [15]. Proces začíná ionizací plynu vnějším zdrojem. Vyskytuje-li se plyn v elektrickém poli  $E$ , pak jsou uvolněné elektrony v něm obsaženy urychlovány ke kladné elektrodě - anodě. Elektrony narážejí do molekul plynu a vytvářejí další volné elektrony a iony. Výboj se stává samostatným. Proces se opakuje, až se vytvoří elektronová lavina, na jejímž čele jsou elektrony a v týlu kladné iony. (obrázek 4) Lavina rychle postupuje k anodě. Vlivem rekombinačních procesů v lavině navíc dochází k fotoionizaci dalších molekul, tvorbě nových lavin a k urychlení celého procesu. Dochází prudkému nárůstu proudu a posléze k přeskoku. Dle Paschkeova zákona je přeskokové napětí funkcí součinu tlaku a velikosti mezery mezi elektrodami při konstantní teplotě.



obrázek 4: Rozložení nosičů nábojů v lavině [15]

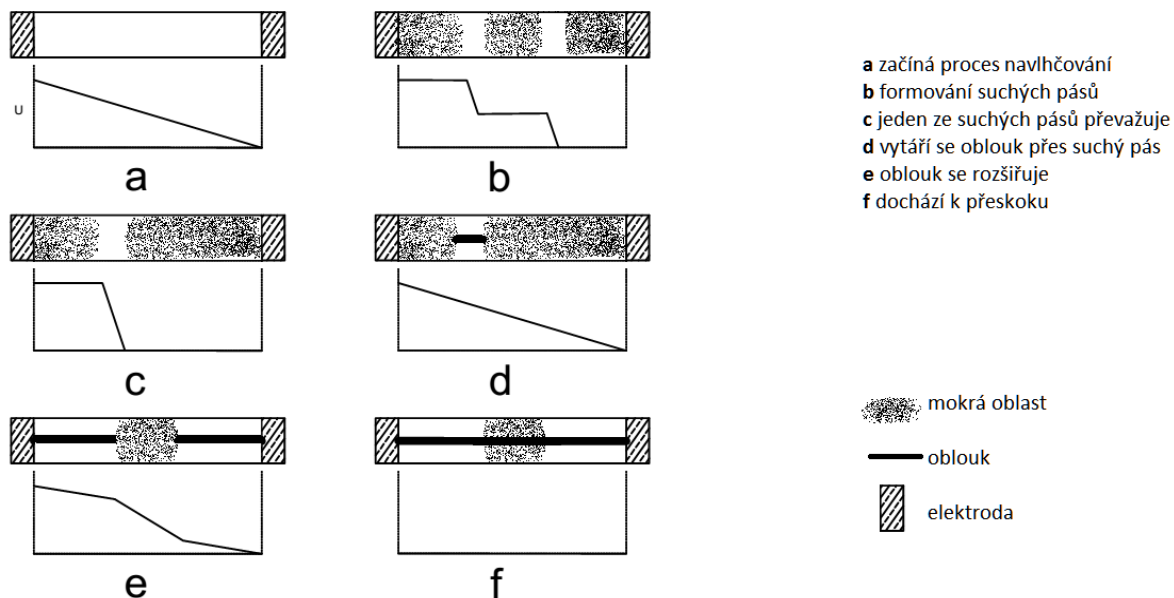
Výše popsaný mechanismus platí pro homogenní elektrické pole. V případě pole nehomogenního dochází při počátečním napětí, nižším než je napětí přeskokové, ke vzniku samostatných výbojů, které ale nepřeklenou celou vzdálenost mezi elektrodami. Počáteční napětí silně závisí na tvaru elektrod. Ten má vliv na rozložení



intenzity elektrického pole. Výboje vznikají právě v místech s nejvyšší intenzitou elektrického pole. Se vzrůstajícím napětím dochází opět k přeskoku. Přeskokové napětí je ale nižší než v případě homogenního pole. Princip přeskoku na čistém izolátoru je prakticky totožný s přeskokem ve vzduchové mezeře.

### **2.3.2 Mechanismus přeskoku na znečištěném izolátoru**

Předpokladem je suchý izolátor pokryt za sucha nevodivou vrstvou znečištění. Tento stav nemá závažný vliv na funkčnost izolátoru. Pokud dojde k navlhnutí této vrstvy - například za deště, který ji ale může i smýt, absorpcí vzdušné vlhkosti (nastává v případě, že teplota izolátoru je stejná jako teplota okolního vzduchu a při relativní vlhkosti > 75 %), nebo její kondenzací (nastává většinou při úsvitu, teplota izolátoru musí být nižší než teplota okolního vzduchu), dojde k zvýšení její vodivosti a tím i k nárůstu svodového proudu. Svodový proud způsobuje zahřívání, přičemž dochází k odpařování vody a vzniku oblastí označovaných jako suché pásy. Ty se na izolátorech formují v nejužších částech – je zde nejvyšší proudová hustota. V oblasti suchých pásů se opět snižuje vodivost a zvyšuje se intenzita elektrického pole. Pokud se vytvoří více suchých pásů (obrázek 5 b), z pravidla během několika sekund jeden převládne (obrázek 5 c) a objeví se na něm prakticky celé napětí mezi vodičem a zemí. Je pravděpodobné, že dojde k přemostění tohoto suchého pásu obloukem (obrázek 5 d). Proud je omezen nízkou vodivostí vrstvy znečištění, ale i tak je jeho vznik doprovázen hlasitým zvukovým efektem a emisí ultrafialového záření. V místě kořenů oblouku dochází opět vlivem vysoké proudové hustoty k vypařování vody a rozšiřování suchého pásu a oblouku (obrázek 5 e). Pokud je napětí v této fázi skokově zvýšeno, dochází zpravidla k úplnému přeskoku (obrázek 5 f), zatímco při postupném zvyšování se pouze rozšiřuje suchý pás. Pokud dojde k přeskoku, oblouk se v případě střídavého napětí uhasí během průchodu nulou, ale v další půlperiodě může dojít k jeho opětovnému zapálení. [19]



obrázek 5: Rozložení napětí na znečištěném pásku při jednotlivých fázích přeskoku [19]

### 2.3.3 Studie přeskoku na znečištěném izolátoru

Pro popis přeskoku na znečištěných izolátorech vznikla řada teoretických a experimentálních modelů vedoucích k pochopení tohoto jevu a ke zlepšení designu izolátorů.

Tyto modely vycházejí z Ayrtonovy rovnice pro napětí elektrického oblouku z osmdesátých let devatenáctého století (3.3). [9]

$$U = a + b * x + \frac{c+d*x}{I} \quad (3.3)$$

Kde konstanta  $a$  reprezentuje úbytek napětí v místě styku oblouku s povrchem, konstanta  $b*x$  úbytek napětí na oblouku délky  $x$  a  $(c+d*x)/I$  je inverzní charakteristika oblouku. Vztah platí pouze pro oblouky do délky 15 mm. Aby vztah platil i pro delší oblouky, pozměnil ho Nottingham [9] přidáním konstantního exponentu  $n$ :

$$U = a + b * x + \frac{c+d*x}{I^n} \quad (3.4)$$

Pro oblouky dostatečné délky může být zanedbán úbytek napětí na kořenech oblouku a pro malé proudy i úbytek napětí na oblouku. Čímž dostáváme rovnici:

$$U = \frac{x \cdot N}{I^n} \quad (3.5)$$

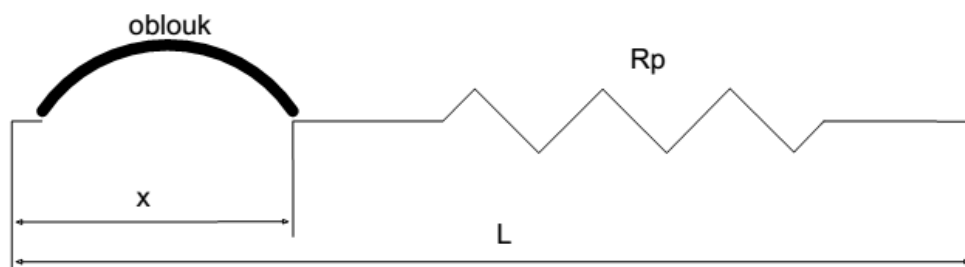
Kde N a n jsou konstanty a x délka oblouku v cm. Hodnoty těchto konstant byly zjišťovány v řadě studií, přičemž výsledky se v závislosti na zkušebních podmínkách a metodách více či méně liší. Vybrané zjištěné závislosti jsou uvedeny v tabulce 3.

Autor	Rok	Rovnice oblouku	Poznámka
Steinmetz	1906	$U = \frac{x \cdot 51}{I^{0,5}}$	
Nottingham	1923	$U = \frac{x \cdot K}{I^{0,67}}$	K záleží na kontaktním materiálu
Ackermann	1928	$U = \frac{x \cdot 98}{I^{0,33}}$	
Eaton/Tretjak a kol.	1931	$U = \frac{x \cdot 56}{I^{0,33}}$	
Browne	1955	$U = \frac{x \cdot K}{I}$	K je konstanta
Reider	1967	$U = \frac{x \cdot 45,5}{I^{0,55}}$	

tabulka 3: Vybrané publikované V-A rovnice pro oblouk přes vzduchovou mezeru\* [17]

\*U [V], I [A], x [cm]

Prvním, kdo vytvořil kvantitativní teorii přeskočků při znečištění pro keramické izolátory, byl v roce 1958 německý vědec Obenaus [16]. Ten ve svém modelu uvažoval jediný elektrický oblouk, reprezentující množství částečných výbojů podél celého izolátoru o délce L, v sérii s mokrou znečištěnou vrstvou reprezentovanou odporem  $R_p$  (obrázek 6).



obrázek 6: Grafické znázornění Obenausova modelu [9]

Pomocí tohoto jednoduchého modelu byla odvozena následující rovnice pro napětí přiložené na izolátor: [1, 2]

$$U = U_{arc} + R_p * I \quad (3.6)$$

Pro napětí oblouku zjistil Obenaus vztah:

$$U_{arc} = \frac{x * 102}{I^{0,7}} \quad (3.7)$$

K přeskoce může dojít, pouze pokud oblouk překlene celou délku izolátoru, tedy musí platit:  $x = L$ . Po dosazení do rovnice 3.6 dostaneme vztah:

$$U = \frac{x * 102}{I^{0,7}} + R_p * I \quad (3.8)$$

Tento model byl vytvořen pouze pro stejnosměrné napětí a uvažuje následující zjednodušující předpoklady:

- Mokrý vrstva má fixní odpor
- Elektrické pole je homogenní

Model Neumarkera [19] vychází z Obenausova s rozdílem, že místo předpokladu fixního odporu znečištěné vrstvy uvažuje homogenní odpor vztažený na jednotku délky  $r_p$ .  $R_p$  se následně vypočte jako

$$R_p = r_p * (L - x) \quad (3.9)$$

Dosažením tohoto výrazu do Obenausova modelu se změní rovnice pro napětí na izolátoru:

$$U = \frac{x * N}{I^n} + r_p * (L - x) * I \quad (3.10)$$

Neumarker dále odvodil kritický proud  $I_c$  a délku  $x_c$ , při kterých může dojít k přeskoku:

$$I_c = \left( \frac{N * x}{r_p} \right)^{\frac{1}{n+1}} \quad (3.11)$$

a

$$x_c = \frac{L}{n+1} \quad (3.12)$$

Pro kritické napětí  $U_c$  dostáváme výraz:

$$U_c = N^{\frac{1}{n+1}} * r_p^{\frac{1}{n+1}} * L \quad (3.13)$$

Dalším, kdo zpřesnil Obenausův model, byl francouzský vědec Claverie [2]. Ten ho rozšiřuje i pro střídavé napětí. Uvažuje opět oblouk v sérii se znečištěnou vrstvou reprezentovanou odporem  $R_p$ . Dále přidává kritérium, určené na základě experimentů, pro minimální napětí  $U_{cx}$ , při kterém dojde po průchodu proudem nulou k znovu zapálení oblouku:

$$U_{cx} = \frac{940 * x}{I^{0,5}} \quad (3.14)$$

Pro napětí oblouku byl experimentálně zjištěn vztah:

$$U_{arc} = \frac{100 * x}{I^{0,5}} \quad (3.15)$$

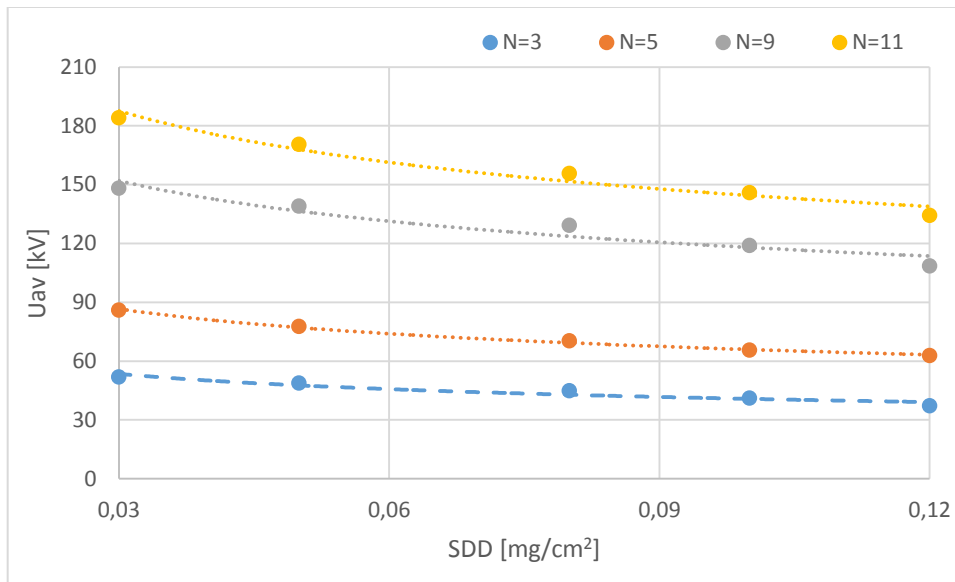
Vybrané závislosti napětí a proudu pro oblouk přes mokrý nebo znečištěný povrch, zjištěny v dalších studiích, jsou uvedeny v tabulce 4. Stejně jako u oblouku přes vzduchovou mezeru lze u zjištěných konstant pozorovat velké rozdíly v závislosti na zkušebních podmínkách a metodách. Zvláště ve výzkumu Ghoshe a Chatterjeea [9] je patrná závislost parametrů oblouku na materiálu vrstvy znečištění.

Autor	Rok	Rovnice oblouku	Poznámka
Alston a Zoledziowski	1963	$U = \frac{x * 63}{I^{0,76}}$	Oblouk přes znečištěnou vrstvu
Claveire a Porchein	1973	$U = \frac{x * 101}{I^{0,5}}$	Oblouk přes znečištěnou vrstvu
Guan a Zhang	1990	$U = \frac{x * 138}{I^{0,69}}$	Oblouk přes znečištěnou vrstvu
Ghosh a Chatterjee	1995	$U = \frac{x * 270}{I^{0,66}}$	Oblouk přes roztok FeCl <sub>3</sub>
Ghosh a Chatterjee	1995	$U = \frac{x * 360}{I^{0,59}}$	Oblouk přes roztok NaCl
Ghosh a Chatterjee	1995	$U = \frac{x * 451}{I^{0,49}}$	Oblouk přes roztok CuSO <sub>4</sub>
Ghosh a Chatterjee	1995	$U = \frac{x * 462}{I^{0,42}}$	Oblouk přes roztok CaCl <sub>2</sub>

tabulka 4: Vybrané publikované V-A rovnice pro oblouk v přes mokrý nebo znečištěný povrch\* [9]

\*U [V], I [A], x [cm]

Studii šíření oblouku během venkovní zkoušky střídavým napětím při umělém znečištění provedli Zhang a kol. [23]. Zkoušky byly prováděny na porcelánovém talířovém závěsu o různém počtu izolátorů a založeny na metodě pevné vrstvy. Naměřené průběhy přeskokového napětí v závislosti na SSD a počtu izolátorů jsou zobrazeny na obrázku 7.



obrázek 7: Přeskokové charakteristiky naměřené Zhangem a kol. [23]

Z naměřených charakteristik odvodil matematické vyjádření závislosti  $U_{av}$  na SDD (salt deposit density)

$$U_{av} = 0,8 * N * (SDD)^{-0,22} \quad (3.16)$$

Kde N je počet izolátorů v řetězci. Přeskokové napětí je tedy lineárně závislé na délce izolátorového řetězce

Vliv metody nanášení znečištění na velikost přeskokového napětí studovali Dong a kol. ve své práci nanášeli vrstvu znečištění na kompozitní izolátor pomocí kartáče (BM), ponořením (DM) a stříkáním rozprašovačem (SM). Zjistili, že vliv použité metody se liší v závislosti na geometrii izolátoru a na stupni znečištění. Nicméně metoda nanášení pomocí kartáče se kvůli velkému rozptylu měřeného přeskokového napětí jeví jako nejméně vhodná. [1]

### 3 Praktická část

V praktické části byla řešena problematika vlivu intenzity znečištění izolátoru na hodnotě přeskokového napětí. Měření bylo prováděno pro dva závěsné izolátory. První byl řetězec tvořený šesti porcelánovými talířovými izolátory (obrázek 8 a) a druhý kompozitní tyčový izolátor s pouzdem a navulkanizovanými vystřídánými stříškami ze silikonového kaučuku - SIR (obrázek 8 b). Naměřené parametry izolátorů jsou uvedeny v tabulce 5.



obrázek 8: Zkoušené izolátory. a) porcelánový b) kompozitní



<b>Izolační materiál</b>	porcelán	SIR
<b>Provedení</b>	talířový	tyčový
<b>Povrchová cesta [mm]</b>	1676	2424
<b>Délka [mm]</b>	1008	1000
<b>Průměr stříšek [mm]</b>	286	132/172
<b>Činitel tvaru [-]</b>	3.7	12
<b>Ochranné armatury</b>	rohy	kruhy

tabulka 5: Parametry zkoušených izolátorů

### 3.1 Výpočet činitele tvaru

Jedním z parametrů popisujících konstrukci izolátoru je činitel tvaru. Pro umožnění budoucího porovnání s výsledky této práce byl vypočítán pro oba zkoušené izolátory. Činitel tvaru je dán rozměry izolátoru a stříšek a lze ho použít k výpočtu povrchové vodivosti izolátoru podle vzorce [11]

$$\gamma_s = F * G \quad (4.1)$$

$\gamma_s$  jednotková vodivost vrstvy [ $\mu S$ ]

F činitel tvaru [-]

G celková vodivost vrstvy znečištění [ $\mu S$ ]

Činitel tvaru se vypočte následovně

$$F = \int_0^L \frac{1}{\pi * D(l)} dl \quad (4.2)$$

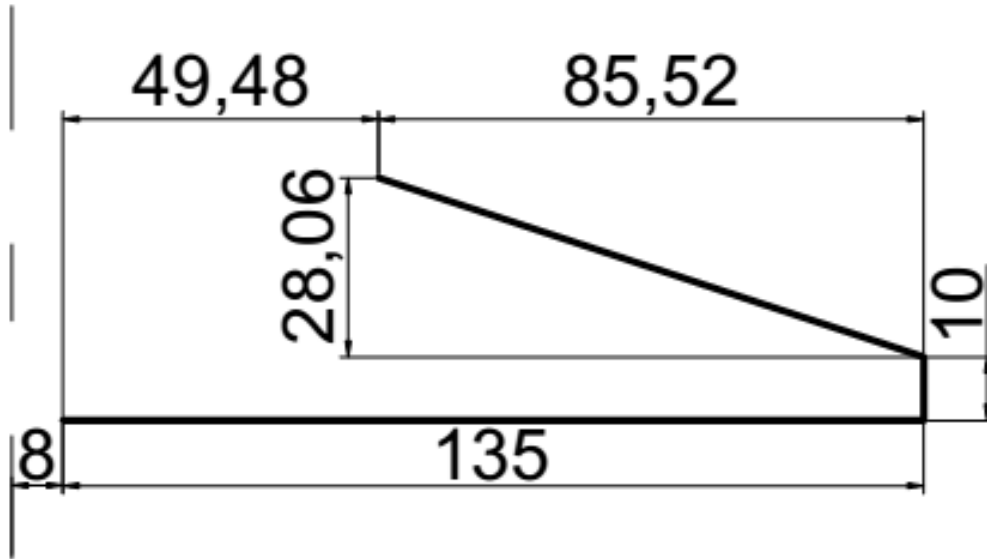
D průměr izolátoru v daném místě [mm]

L povrchová cesta [mm]

Pro výpočet činitele tvaru byly změřeny rozměry zkoušených izolátorů a následně vytvořeny zjednodušené modely pro opakující se úseky. Model pro porcelánový izolátor je zobrazen na obrázku 9 a model pro kompozitní izolátor je zobrazen na obrázku 10. Při výpočtu byly nejprve vypočteny dílčí činitele tvaru pro jednotlivé rovné úseky modelů,

ty byly následně sečteny a vynásobeny počtem opakujících se částí celého izolátoru. Výsledné hodnoty činitele tvaru pro oba izolátory jsou uvedeny v tabulce 5.

- **Výpočet pro porcelánový izolátor**



obrázek 9: model kompozitního izolátoru (rozměry jsou uvedeny v mm)

$$0 \leq L < 90$$

$$F_1 = \int_0^{90} \frac{1}{\pi \cdot (16 + 98,96 + 2 \cdot 0,95 \cdot l)} dl = 0,15 \quad (4.3)$$

$$90 \leq L < 100$$

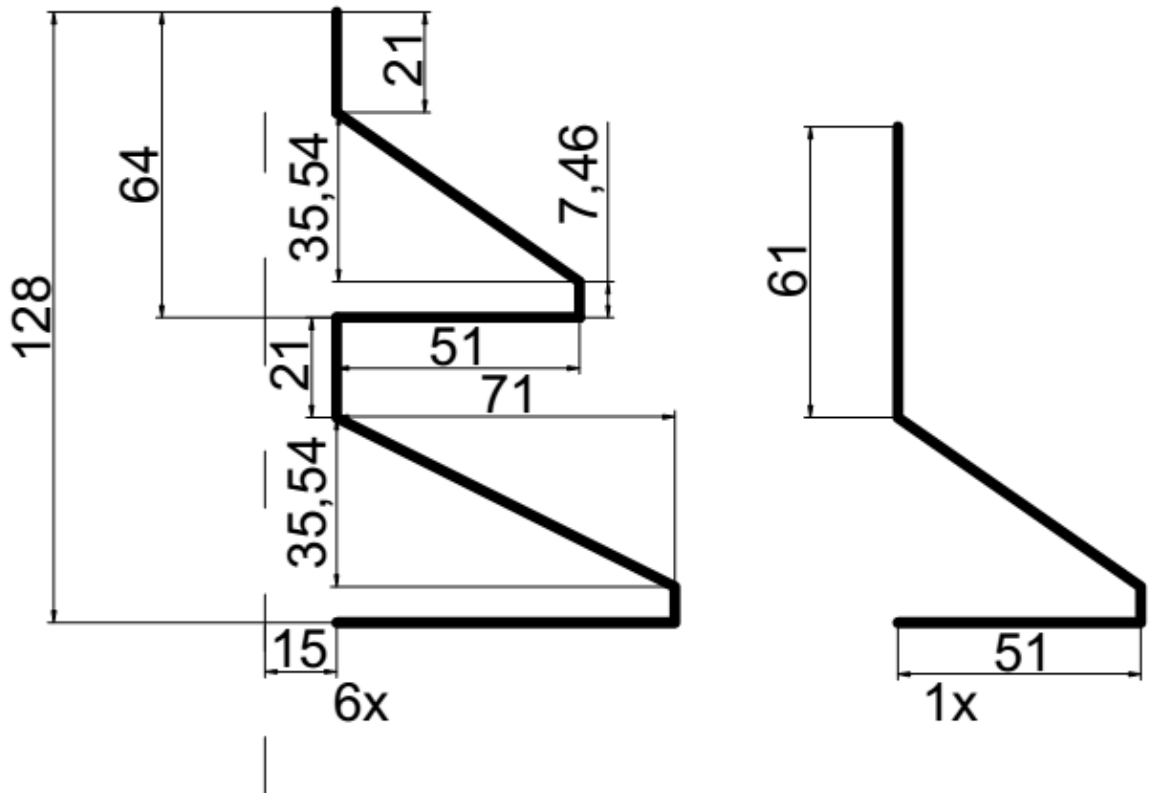
$$F_2 = \int_{90}^{100} \frac{1}{\pi \cdot (16 + 270)} dl = 0,01 \quad (4.4)$$

$$100 \leq L < 235$$

$$F_3 = \int_{100}^{235} \frac{1}{\pi \cdot (16 + 2 \cdot (135 - l + 100))} dl = 0,46 \quad (4.6)$$

$$F = 6 * \sum_{i=1}^3 f f_i = 3.74 \quad (4.6)$$

- Výpočet pro kompozitní izolátor



obrázek 10: Model kompozitního izolátoru (rozměry jsou uvedeny v mm)

$$0 \leq L < 21$$

$$F_1 = \int_0^{21} \frac{1}{\pi \cdot 30} dl = 0,22 \quad (4.7)$$

$$21 \leq L < 83,18$$

$$F_2 = \int_{21}^{83,18} \frac{1}{\pi \cdot (30 + 2 \cdot 0,82 \cdot (l - 21))} dl = 0,28 \quad (4.8)$$

$$83,18 \leq L < 90,64$$

$$F_3 = \int_{83,18}^{90,64} \frac{1}{\pi \cdot (30 + 2 \cdot 51)} dl = 0,02 \quad (4.9)$$

$$90,64 \leq L < 141,64$$

$$F_4 = \int_{90,64}^{141,64} \frac{1}{\pi \cdot (30 + 2 \cdot (51 - l + 90,64))} dl = 0,24 \quad (4.10)$$

$$141,64 \leq L < 162,64$$

$$F_5 = \int_{141,64}^{162,64} \frac{1}{\pi \cdot 30} dl = 0,22 \quad (4.11)$$

$$162,64 \leq L < 242,04$$

$$F_6 = \int_{162,64}^{242,04} \frac{1}{\pi \cdot (30 + 2 \cdot (0,89 \cdot (l - 162,64)))} dl = 0,31 \quad (4.12)$$

$$242,04 \leq L < 249,50$$

$$F_7 = \int_{242,04}^{249,50} \frac{1}{\pi \cdot (30 + 2 \cdot 71)} dl = 0,01 \quad (4.13)$$

$$249,50 \leq L < 320,50$$

$$F_8 = \int_{249,50}^{320,50} \frac{1}{\pi \cdot (30 + 2 \cdot (71 - l + 249,50))} dl = 0,28 \quad (4.14)$$

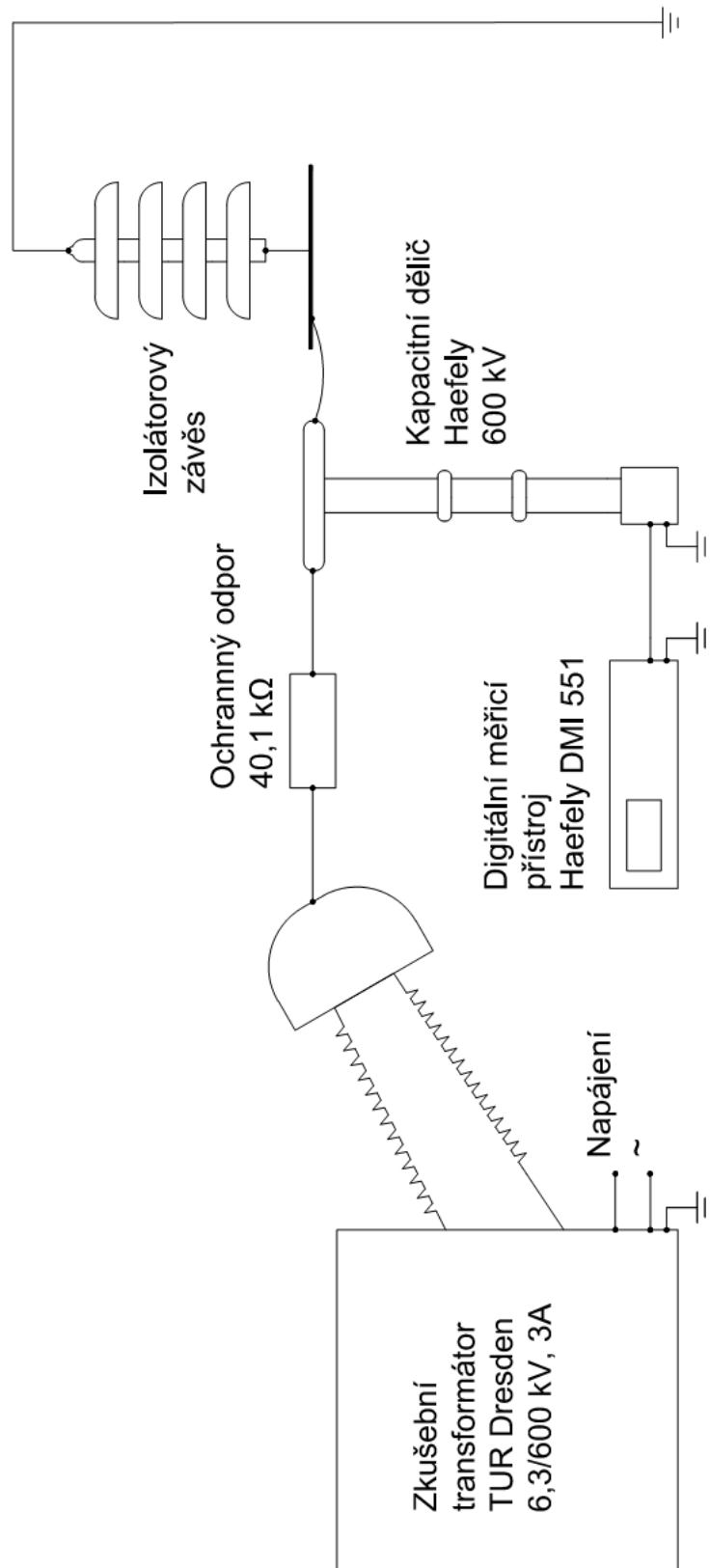
$$F_9 = \int_0^{61} \frac{1}{\pi \cdot 30} dl = 0,6 \quad (4.15)$$

$$F = 7 \cdot \sum_{i=1}^8 ff_i + 1 \cdot (ff_9 + ff_2 + ff_3 + ff_4) = 11.95 \quad (4.16)$$

### 3.2 Zkušební obvod

Měření probíhalo v laboratoři vysokých napětí na ČVUT FEL. Schéma zapojení zkušební obvodu je znázorněno na obrázku 11.

- Obvod byl napájen pomocí zkušební transformátoru TUR Dresden 6,3/600 kV, 3 A.
- Do obvodu byl zapojen ochranný odpor. Pro porcelánový izolátor byl použit odpor o velikosti 40,1 kΩ. V případě kompozitního izolátoru byly kvůli vyššímu přeskokovému napětí zapojeny dva 40,1 kΩ odpory v sérii.
- Izolátor byl zavěšen ve svislé poloze s jeho horní koncovou armaturou připojenou k zemi. Napětí bylo přivedeno na tyč simulující vodič připojený na spodní koncovou armaturu izolátoru.
- Napětí bylo měřeno pomocí digitálního měřicího přístroje Haefely DMI 551, na který bylo přiváděno napětí koaxiálním kabelem z kapacitního děliče Haefely 600 kV.



obrázek 11: Schéma zkušebního obvodu

### 3.3 Postup měření

Byl vypracován následující postup měření přeskových charakteristik skládající se z přípravy roztoku požadované vodivosti, jeho aplikace na izolátor a samotného měření přeskového napětí. Měření bylo prováděno nejprve na suchém čistém izolátoru, a následně i pro všechny stupně znečištění uvedené v tabulce 6. Vlhčení izolátoru bylo vzhledem k nemožnosti vlhčení během měření provedeno pouze před jeho zahájením a to pomocí ručního rozprašovače. Navržená metoda simuluje vliv znečištění typu B, které neobsahuje žádné nerozpustné složky.

- **Příprava roztoku**

Do nádoby s destilovanou vodou bylo vsypáno přiměřené množství NaCl komerční kvality a roztok byl pečlivě promíchán. Poté byla změřena jeho vodivost. Postup byl opakován, dokud nebylo dosaženo požadované úrovně vodivosti s přesností  $\pm 15 \mu\text{S/cm}$ . Takto byly postupně připraveny roztoky o vodivosti dle tabulky 6. Hodnoty vodivosti roztoku byly voleny s ohledem na normu ČSN EN 60060-1, kde je v kapitole 4.4.1 uvedena doporučená vodivost vody při zkouškách za deště  $100 \mu\text{S/cm}$ . [4]. Vodivost roztoku byla měřena přístrojem JENWAY 4510 conductivity meter, který automaticky přepočítává vodivost v závislosti na teplotě měřené kapaliny.

$\sigma [\mu\text{S/cm}]$				
100	200	300	400	500

tabulka 6: Hodnoty vodivosti roztoku

- **Aplikace roztoku**

Izolátor byl pečlivě očištěn pomocí hadru namočeného v destilované vodě. Připravený roztok s požadovanou vodivostí byl umístěn do ručního rozprašovače a rovnoměrně nanesen na izolátor.

- **Měření přeskového napětí**

Ihned po nanesení roztoku bylo na izolátor přiloženo napětí, které bylo plynule zvyšováno, dokud nedošlo k přeskoku. Měření bylo pro každou hodnotu vodivosti třikrát opakováno.

## 4 Zpracování výsledků měření a jejich vyhodnocení

### 4.1 Výsledky měření

V tabulce 7 jsou zobrazeny naměřené hodnoty napětí, při kterých došlo k přeskoku na izolátoru.

Úroveň znečištění [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ]	-	100	200	300	400	500
<b>Porcelánový izolátor</b>						
U 1 [kV]	292,7	218	207,9	200,6	176,9	167,5
U 2 [kV]	291,2	210,8	212,6	197,4	174,8	164,6
U 3 [kV]	292	213,8	215,1	194,7	176,2	158,1
U <sub>p</sub> [kV]	292,3	214,2	211,9	197,6	176	163,4
<b>Kompozitní izolátor</b>						
U 1 [kV]	394,2	384,7	384,6	385,2	387,7	387,7
U 2 [kV]	393,8	389,1	391,2	391	389,5	390,6
U 3 [kV]	395,8	389,7	387,1	389,1	385,9	384,5
U <sub>p</sub> [kV]	394,6	387,8	387,6	388,4	387,7	387,6

tabulka 7: Naměřené hodnoty a průměrné napětí při přeskoku

U<sub>p</sub> bylo vypočteno jako aritmetický průměr naměřených přeskových napětí při dané hodnotě znečištění. V rovnici 5.1 je uveden příklad jeho výpočtu pro suchý čistý porcelánový izolátor.

$$U_p = \frac{1}{n} \sum_1^n U_i = \frac{1}{3} * (292,7 + 291,2 + 292) * 10^3 = 292,3 \text{ kV} \quad (5.1)$$

## 4.2 Atmosférická korekce

Přepočet na referenční atmosféru byl proveden dle normy ČSN EN 60060-1. [4] Parametry referenční atmosféry a hodnoty naměřené během zkoušek jsou uvedeny v tabulce 8.

	Referenční atmosféra	Naměřené hodnoty
Teplota [°C]	20	20,6
Absolutní tlak [hPa]	1013	989,2
Absolutní vlhkost [g/m <sup>3</sup> ]	11	7,3

tabulka 8: Referenční a naměřené parametry atmosféry

Měřená napětí jsou korigována na referenční atmosférické podmínky dělením činitelem  $K_t$

$$U_0 = \frac{U}{K_t} \quad (5.2)$$

Korekční činitel se dále skládá z korekčního činitele na hustotu vzduchu a korekčního činitele na vlhkost vzduchu a vypočte se dle vzorce 5.3. Jeho velikost závisí na tlaku, teplotě, napětí průrazného výboje a minimální dráze výboje. Přesný popis výpočtu korekčních činitelů, podle kterého bylo postupováno, je uveden v normě ČSN EN 60060-1.

$$K_t = K_1 * K_2 \quad (5.3)$$

V tabulce 9 jsou uvedeny vypočítané hodnoty korekčního činitele, upravené hodnoty přeskokového napětí a pro porovnatelnost obou izolátorů i intenzita elektrického pole.

$$E_0 = \frac{U_0}{L} \quad (5.4)$$



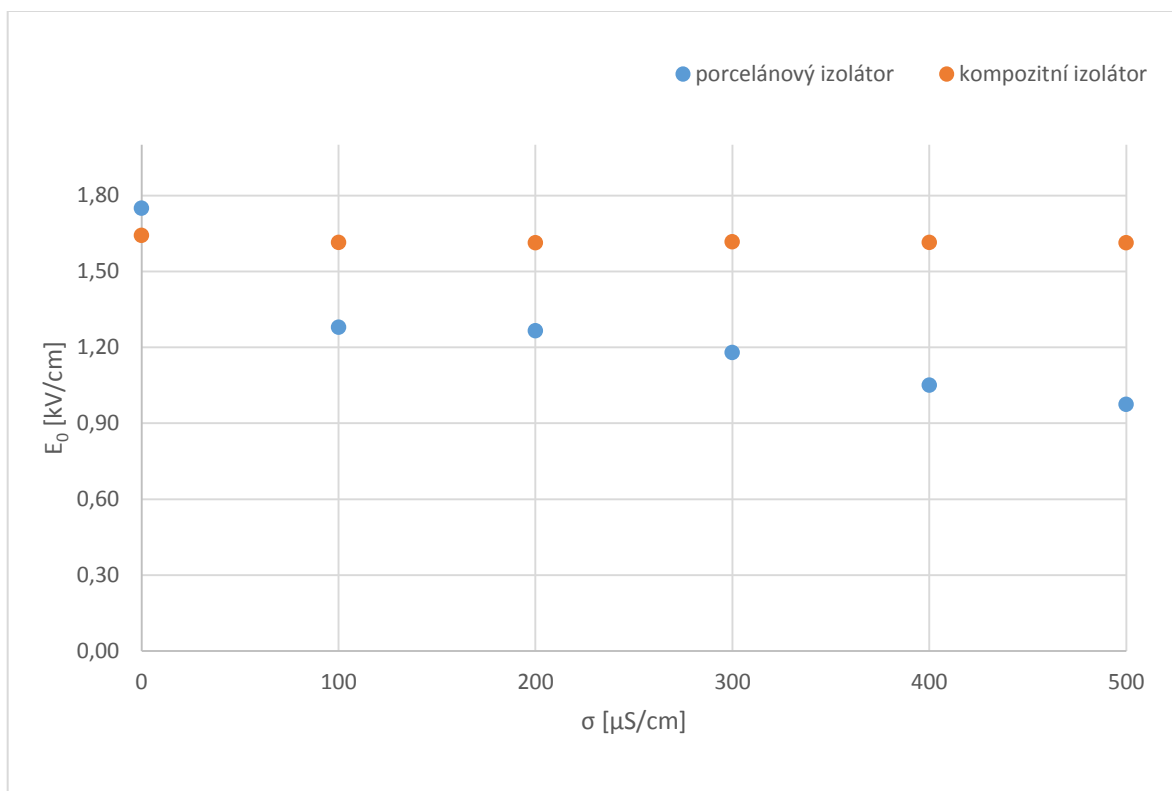
Úroveň znečištění [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ]	-	100	200	300	400	500
<b>Porcelánový izolátor</b>						
U [kV]	292,3	214,2	211,9	197,6	176	163,4
$K_t$ [-]	0,997	0,999	0,999	1	1	1
$U_0$ [kV]	293,2	214,3	212	197,6	176	163,4
$E_0$ [kV/cm]	1,75	1,28	1,26	1,18	1,05	0,97
<b>Kompozitní izolátor</b>						
U [kV]	394,6	387,8	387,6	388,4	387,7	387,6
$K_t$ [-]	0,992	0,992	0,992	0,992	0,992	0,992
$U_0$ [kV]	397,8	391	390,8	391,6	390,9	390,8
$E_0$ [kV/cm]	1,64	1,61	1,61	1,62	1,61	1,61

tabulka 9: Přepočet napětí pro referenční atmosféru - porcelánový izolátor

### 4.3 Vyhodnocení

Při měření přeskokových napětí suchých čistých izolátorů se ukázala nevýhoda porcelánového izolátoru. Přes prakticky totožnou délku obou zkoušených izolátorů na něm dochází k přeskoku na při napětí o 102,3 kV nižším než na kompozitním. To je dáno konstrukcí talířových izolátorů, které mají krátkou povrchovou cestou na jednotku délky. Zatímco kompozitní izolátor má povrchovou cestu dlouhou 2424 mm, porcelánový pouze 1676 mm. Při přepočtu na jednotku povrchové cesty jsou hodnoty vyrovnané a pro porcelánový izolátor vychází dokonce lépe než pro kompozitní.

Přeskokové charakteristiky měřených izolátorů při umělém znečištění jsou zobrazeny v následujícím grafu (obrázek 12). Pro porcelánový izolátor můžeme s rostoucí vodivostí aplikovaného roztoku  $\sigma$  pozorovat snižující se elektrickou pevnost  $E_0$ .



obrázek: 12 Přeskokové charakteristiky izolátorů při různých stupních znečištění

Tato závislost koresponduje s průběhy naměřenými Zhangem a kol. [23] uvedenými v kapitole 3.3.3, který pro měření použil velmi podobnou metodu. U kompozitního izolátoru nebyla zjištěna žádná závislost přeskokového napětí na vodivosti aplikovaného roztoku. To může být dáno hydrofobicitou jeho povrchu, kdy jsou od sebe jednotlivé kapičky roztoku odděleny a nevzniká tedy vodivá cesta, která by iniciovala vznik suchých pásů. Tento výsledek se neshoduje ostatními studii na toto téma. Navržená metoda tedy není vhodná pro testování kompozitních izolátorů. Jako klíčovou vidím absenci inertní složky v nanášeném roztoku, která by pomohla vytvořit spojitou vodivou vrstvu na izolátoru.

## 5 Závěr

Jedním z cílů této práce bylo popsat problematiku konstrukce izolátorů pro venkovní vedení vysokého napětí. Dále byl navržen vysokonapěťový zkušební obvod a metodika pro umělé znečištění izolátorů. Pomocí navržené metodiky byly stanoveny přeskokové charakteristiky pro různé stupně znečištění pro porcelánový a kompozitní izolátorový závěs.

Pro měření byly vybrány dva izolátory. Porcelánový talířový izolátorový závěs, skládající se z šesti izolátorů, a kompozitní tyčový izolátor. Navržený zkušební postup byl odvozen z metody pevné vrstvy, kdy byl izolátor ručně pomocí rozprašovače znečištěn roztokem destilované vody a kuchyňské soli. Na izolátor bylo poté přivedeno napětí a to bylo plynule zvyšováno až do přeskoku. Tento postup byl volen s ohledem na dispozice laboratoře vysokých napětí na ČVUT FEL, kde měření probíhalo.

U porcelánového izolátoru byla zjištěna závislost přeskokového napětí na vodivosti naneseného roztoku. Z 293,2 kV u suchého a čistého izolátoru kleslo přeskokové napětí po nanesení roztoku o vodivosti 100  $\mu\text{S}/\text{cm}$  na 214,3 kV a po nanesení roztoku o vodivosti 500  $\mu\text{S}/\text{cm}$  na 163,4 kV, což je oproti hodnotě za sucha pokles o 44 %. Znečištění tedy může výrazně ovlivnit spolehlivost tohoto izolátoru.

Při měření na kompozitním izolátoru bylo za sucha vlivem jeho delší povrchové cesty dosaženo přeskokového napětí 397,8 kV. Po aplikaci roztoku o vodivosti 100  $\mu\text{S}/\text{cm}$  sice toto napětí kleslo na 391 kV, s rostoucí vodivostí aplikovaného roztoku se již ale prakticky nesnižovalo. Tento jev byl nejspíše způsoben hydrofobním povrchem izolátoru. Navržená metodika se tedy jeví jako nevhodná pro měření přeskokových charakteristik kompozitních izolátorů.

## 6 Seznam použité literatury

- [1] BINGBING DONG, XINGLIANG JIANG, JIANLIN HU, LICHUN SHU a CAIXIN SUN. 2012. *Effects of artificial polluting methods on AC flashover voltage of composite insulators. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 19(2): 714-722. DOI: 10.1109/TDEI.2012.6180267. ISSN 1070-9878. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6180267>*
- [2] CLAVERIE, P., *Predetermination of the Behaviour of Polluted Insulators*, IEEE Trans. PAS, Vol. 90, N°. 4, pp. 1902-1908, Juillet, 1971
- [3] ČSN 34 8031. *Zkoušky vysokonapěťových izolátorů pro střídavé napětí při umělém znečištění. 1994. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.*
- [4] ČSN EN 60060-1. *Technika zkoušek vysokým napětím - Část 1: Obecné definice a požadavky na zkoušky. 2011. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.*
- [5] ČSN IEC 383-1. *Izolátory pro venkovní vedení se jmenovitým napětím nad 1000 V. Část 1: Keramické nebo skleněné izolátory pro soustavy se střídavým napětím. Definice, zkušební metody a přejímací kritéria. Praha: Český normalizační institut, 1996.*
- [6] FARZANEH, M a William Alexander CHISHOLM. *Insulators for icing and polluted environments*. Hoboken, NJ: J. Wiley, c2009, xxvi, 680 p. ISBN 04-702-8234-7.
- [7] FECKO, Josef, Ján ŽIARAN a Ladislav VARGA. *Elektrické siete: Vonkajšie silové vedenia*. Bratislava: SVŠT, 1990. ISBN 9788022702881.
- [8] GROUP, IEEE. 1971. *A Survey of The Problem of Insulator Contamination in The United States and Canada-Part I: treaties and international agreements registered or filed and recorded with the Secretariat of the United Nations. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. PAS-90(6): 2577-2585. DOI:*

10.1109/TPAS.1971.292908. ISSN 0018-9510. Dostupné z:  
<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4074638>

- [9] HADDAD, A a D WARNE. *Advances in high voltage engineering*. London: Institution of Electrical Engineers, c2004, xx, 647 p. ISBN 08-529-6158-8.
- [10] IEC/TS 60815-1. *Selection and dimensioning of high-voltage insulators intended for use in polluted conditions. Definitions, information and general principles*. 2008.
- [11] *IEEE Standard. Techniques for High-Voltage Testing*. New York: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1995.
- [12] KIESSLING, Friedrich. *Overhead power lines: planning, design, construction*. New York: Springer, 2003, xxviii, 759 p. ISBN 35-400-0297-9.
- [13] KUFFEL, E, W ZAENGL a J KUFFEL. *High voltage engineering: fundamentals*. 2nd ed. Boston: Butterworth-Heinemann, 2000, xiii, 239 p. ISBN 07-506-3634-3.
- [14] LOOMS, J. *Insulators for high voltages*. London: Peter Peregrinus on behalf of the Institution of Electrical Engineers, c1988, x, 276 p. ISBN 08-634-1116-9.
- [15] MACH, Veleoslav. *Technika vysokého napětí*. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, Fakulta elektrotechniky a informatiky, 2001, 110 s. ISBN 80-707-8879-8.
- [16] MEGRICHE, Nabila Dhahbi. *Modélisation dynamique des décharges sur les surfaces d'isolateurs pollués sous différentes formes de tension: élaboration d'un critère analytique de propagation*. Lyon, 1998. Ecole Centrale de Lyon.
- [17] PEELO, David Francis. *Current interruption using high voltage air-break disconnectors*. Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven, 2004. ISBN 90-386-1533-7.
- [18] RAJPUT, R. K. *Power system engineering*. New Delhi: Laxmi Publications, 2006. ISBN 8170089166.

- [19] *Review of models which predict the flashover voltage of polluted insulators.* Ottawa: National Library of Canada = Bibliothèque nationale du Canada, 1998. ISBN 06-122-3449-5.
- [20] RIZK, Farouk A a Giao N TRINH. *High voltage engineering.* Boca Raton: CRC Press, 2014, xxviii, 773 pages. ISBN 9781466513761-.
- [21] VERNER, Josef. *Elektrické stanice a vedení.* 2. vyd. Brno: VUT, 1989, 157 s. ISBN 80-214-1007-8.
- [22] VEVERKA, Antonín. *Technika vysokých napětí.* Praha: SNTL, 1966.
- [23] ZHANG, Zhijin, Lichun SHU, Qin HU, Ze XIANG, Xingliang JIANG a Jianlin HU. 2014. *AC pollution flashover performance and flashover process of glass insulators at high altitude site. IET Generation, Transmission.* 8(3): -. DOI: 10.1049/iet-gtd.2013.0328. ISSN 1751-8687. Dostupné také z: <http://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/iet-gtd.2013.0328>