

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE**

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Elektrická pevnost syntetického vzduchu  
v nehomogenním poli**

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

**ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**  
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Michal NEDVĚD**  
Osobní číslo: **E17N0086P**  
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Elektroenergetika**  
Název tématu: **Elektrická pevnost syntetického vzduchu v nehomogenním poli**  
Zadávací katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

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

1. Vypracujte odborný teoretický text na téma elektrická pevnost plyných izolantů.
2. Vypracujte odborný text ve vhodném rozsahu popisující metodiky vysokonapěťových zkoušek elektrické pevnosti.
3. Vyhodnoňte experimentálně získaná data elektrické pevnosti syntetického vzduchu pro zvolené elektrodové konfigurace (typ elektromagnetického pole).
4. Formulujte poznatky získané na základě experimentálních testů.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího  
Rozsah kvalifikační práce: 40 - 60 stran  
Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická  
Seznam odborné literatury:

1. ČSN EN 60060-1

Technika zkoušek vysokým napětím - Část 1: Obecné definice a požadavky na zkoušky


2. Wolfgang Hauschild, Eberhard Lemke: High-Volt Tests and Measuring Techniques, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2014

Vedoucí diplomové práce: Ing. Petr Martínek, Ph.D.  
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání diplomové práce: 5. října 2018  
Termín odevzdání diplomové práce: 30. května 2019

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



  
Doc. Ing. Karel Nobš, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 5. října 2018

## **Abstrakt**

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na elektrickou pevnost syntetického vzduchu při působení impulzního napětového namáhání v nehomogenním poli. Práce je rozdělena do tří kapitol. První část práce je zaměřena na elektrické vlastnosti plyných dielektrik. V druhé části jsou popsány tři druhy vysokonapětových zkoušek, kdy v praktické části využíváme metodu více hladinami. V praktické části práce je provedeno měření elektrické pevnosti syntetického vzduchu. Výsledkem měření je porovnání elektrické pevnosti syntetického vzduchu v závislosti na tlaku plynu, tvaru elektrod, vzdálenosti elektrod a polaritě napětí. Praktická část je zakončena porovnáním syntetického vzduchu od vzduchu atmosférického.

## **Klíčová slova**

Plynná dielektrika, elektrická pevnost, nehomogenní pole, metoda více hladinami, impulzní napětí

## **Abstract**

This diploma thesis is focused on electrical strength of synthetic air under the influence of impulse voltage stress in non-homogeneous field. The thesis is divided into three chapters. The first part is aimed on electrical properties of gaseous dielectrics. In the second part there are three types of high-voltage tests, where in the practical part we use the multi level test method. In the practical part of the thesis, the measurement of electrical strength of synthetic air is performed. The result of the measurement is a comparison of the electrical strength of the synthetic air depending on a gas pressure, electrode shape, electrode distance and voltage polarity. The practical part is concluded by comparing the synthetic air to atmospheric air.

## **Key words**

Gaseous dielectric, dielectric strength, non-homogeneous field, multi level test method, impulse voltage

## Prohlášení

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

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

.....  
podpis

V Plzni dne 27.5.2019

Michal Nedvěd

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Petru Martinkovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce, které mi pomohlo k vypracování diplomové práce.

# Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>8</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>10</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>11</b>
<b>1 IZOLANT</b> .....	<b>12</b>
1.1 PLYNNÉ IZOLANTY .....	12
1.1.1 Vzduch .....	13
1.1.2 Fluorid sírový .....	14
1.1.3 Syntetický plyn .....	14
1.2 VLASTNOSTI PLYNNÝCH IZOLANTŮ .....	15
1.2.1 Polarizace dielektrika .....	15
1.2.2 Elektrická vodivost plynů .....	17
1.2.3 Dielektrické ztráty v plynech .....	20
1.2.4 Voltampérová charakteristika plyných izolantů .....	20
1.2.5 Permittivita plynů .....	23
1.3 ELEKTRICKÁ PEVNOST .....	23
1.3.1 Elektrická pevnost plynů .....	24
1.3.2 Průraz plyného izolantu .....	25
1.3.3 Paschenův zákon .....	25
1.3.4 Částečné výboje .....	26
1.3.5 Druhy částečných výbojů .....	28
1.4 NEHOMOGENNÍ POLE .....	29
1.4.1 Stupeň nehomogenity .....	29
1.4.2 Přeskokové napětí v slabě nehomogenním poli .....	30
1.4.3 Trskový výboj .....	31
1.4.4 Jiskrový výboj .....	32
1.4.5 Líder .....	32
1.4.6 Koróna .....	34
<b>2 ZKOUŠKY PRŮRAZNÝM VÝBOJEM</b> .....	<b>38</b>
2.1 TŘÍDA 1: ZKOUŠKY VÍCE HLADINAMI .....	38
2.2 TŘÍDA 2: ZKOUŠKY METODOU NAHORU-DOLŮ .....	39
2.3 TŘÍDA 3: ZKOUŠKY POSTUPNÝM NAMÁHÁNÍM .....	41
<b>3 PRAKTICKÉ MĚŘENÍ</b> .....	<b>43</b>
3.1 MĚŘICÍ PRACOVNÍSTĚ .....	43
3.2 SCHÉMA ZAPOJENÍ .....	48
3.3 POSTUP MĚŘENÍ .....	48
3.4 VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ .....	49
3.4.1 Vliv vzdálenosti elektrod .....	49
3.4.2 Vliv velikosti tlaku .....	52
3.4.3 Vliv tvaru elektrod .....	54
3.4.4 Vliv polarity napětí .....	58
3.4.5 Vliv použitého plynu .....	59
<b>4 SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ</b> .....	<b>64</b>
<b>5 PŘÍLOHY</b> .....	<b>1</b>
PŘÍLOHA A .....	1
PŘÍLOHA B .....	4
PŘÍLOHA C .....	13
PŘÍLOHA D .....	21



PŘÍLOHA E ..... 24

## Úvod

Elektrická zařízení se skládají ze dvou hlavních částí. Z vodivých materiálů pro přenos elektrické energie a z dielektrik, která slouží k oddělení částí s odlišným potenciálem. Mezi nejjednodušší a nejvíce používaná dielektrika patří plyn. Nejstarší dielektrikum v energetice je vzduch, který má bohužel nižší elektrickou pevnost. I když má vzduch nižší elektrickou pevnost má řadu výhod jako je snadná dostupnost, což znamená že i cena je nízká. Mezi nejdůležitější vlastnost, že vzduch nemá žádný negativní vliv na životní prostředí na rozdíl od SF6. Práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část.

První polovina teoretické části slouží k seznámení čtenáře s vlastnostmi plyných dielektrik. Mezi nejzákladnější, a tedy nejdůležitější vlastnost patří elektrická pevnost. Musíme také znát, v jakém prostředí se zařízení nachází. Druhá polovina teoretické části vede k popisu vysokonapěťových zkoušek elektrické pevnosti. V elektrické síti vznikají vlivem spínacích procesů a blesků přepětí, která mají impulzní charakter. I když se jedná o krátkodobý děj, může být velice nebezpečný díky své velké amplitudě, což bylo součástí zkoumání v praktické části.

Praktická část je zaměřena na zkoumání elektrické pevnosti v nehomogenním poli při impulzním namáhání, pro srovnání i poli homogenním. Cílem diplomové práce je zjistit, jak se mění elektrická pevnost v závislosti na vzdálenosti elektrod, na použitém plynu, tlaku použitého plynu, polaritě napětí a tvaru použitých elektrod. Nakonec jsou naměřená data statisticky vyhodnocena a navzájem mezi sebou porovnána.

## Seznam symbolů a zkratek

p.....	tlak
V.....	objem
V <sub>vn</sub> .....	velmi vysoké napětí
V <sub>n</sub> .....	vysoké napětí
μs.....	mikrosekundy
kPa.....	kilopascal
kV.....	kilovolt
mm.....	milimetr
S.....	siemens
Hz.....	herz
J.....	joule
I.....	proud
A .....	ampér
γ .....	konduktivita
°C.....	stupeň celsia

# 1 Izolant

Obecně je každý izolant dielektrikum, ale obráceně to neplatí. Izolant bereme jako látku, která neobsahuje žádné nosiče náboje, a tedy nevede elektrický proud. Látka může být pevného, kapalného i plynného skupenství. Izolant, který neobsahuje žádné nosiče náboje, považujeme za ideální, ale skutečné izolanty obsahují určité množství volných nosičů náboje. Tyto náboje považujeme za zbylé části z výroby, nečistoty nebo náboje, které vznikají postupem času za určitých podmínek při působení různých vlivů. Mezi tyto vlivy patří například záření, teplota a absorpce vody. [1]

Izolant můžeme nazývat obecně jako látku sloužící k zábraně průchodu proudu nebo k odizolování dvou elektrických prvků o různém potenciálu. Aby se materiál choval jako izolant, musí mít určité vlastnosti: elektrickou pevnost, elektrickou vodivost, relativní permeabilitu a ztrátový činitel. [2]

## 1.1 Plynné izolanty

Plynné izolanty mají oproti kapalným a pevným nižší elektrickou pevnost. Přesto patří mezi důležité izolanty z důvodu jejich regenerace molekul, kdy se elektrická pevnost po průrazu rychle obnovuje. Tuto vlastnost nazýváme zotavení. Dále mají plyny oproti ostatním izolantům nižší relativní permitivitu, dielektrické ztráty prakticky nezávislé na frekvenci, a nakonec nabývají velmi nízké hodnoty konduktivity. [2, 3]

Plyny oproti ostatním hmotám nedrží stálý tvar, ani stálý objem a podle Boyle-Mariotova zákona (1.1.1), kdy platí, že součin tlaku a objemu při stálé teplotě je stálý.

$$p * V = \textit{konstanta} \quad (1.1.1)$$

Při různé teplotě jsou změny tlaku a objemu vyjádřeny buď rozpínavostí, nebo roztažností. [4]

$$p = p_0 * (1 + \gamma\vartheta) \quad (1.1.2)$$

$$V = V_0 * (1 + \gamma\vartheta) \quad (1.1.3)$$

Plyny jako izolanty se nejběžněji používají v místech, kde nedochází k velkému elektrickému namáhání, není potřeba velká kapacita a kde se požadují mále dielektrické ztráty. Využívají se plyny, které jsou stálé a nevybušné, protože zvyšováním elektrického

pole může dojít k výboji v použitém plynu. V elektrotechnice patří mezi nejčastěji využívané plyny vzduch a fluorid sírový (SF<sub>6</sub>). [3]

### 1.1.1 Vzduch

Vzduch jako izolant je pro techniku vysokého napětí velmi významný. Mezi největší výhody vzduchu patří dostupnost a ekonomická výhodnost. Používá se pro přenos elektrické energie, dále u transformátoru a kondenzátoru. U venkovních vedení slouží jako izolant mezi jednotlivými fázemi a zemí. Vlastnosti vzduchu při teplotě 20 °C atmosférickém tlaku 100 kPa:

- Relativní permitivita  $\epsilon_r$  [-] 1,000594
- Konduktivita  $\sigma$  [S·m<sup>-1</sup>]  $10^{-14}$
- Ztrátový čísel  $\text{tg } \delta$  [-]  $10^{-6}$
- Elektrická pevnost  $E_p$  [kV/mm]

Vzduch se skládá z velkého množství plynů. U atmosférického vzduchu je největším zástupcem ze 78 % objemu dusík následovaný 21 % kyslíku. Z jednou nevýhod vzduchu je právě kyslík, protože kyslík může začít oxidovat, což vyvolá negativní vliv na vysokonapěťové zařízení. Ionizační vlastnosti vzduchu jsou ovlivněny vlhkostí. Abychom měli dobré izolační vlastnosti, musíme hodnotu vlhkosti držet na hodnotě 50 %.

Ve skutečnosti musíme počítat i s nehomogenním polem, ve kterém se jeho elektrická pevnost mění. Elektrická pevnost v nehomogenním poli je 1 kV/mm. [1, 2, 3, 4]

Tab. 1 Složení vzduchu (převzato z [2])

Plynná složka	Chemická značka	Obsah složky podle objemu [%]
Dusík	N <sub>2</sub>	78,09
Kyslík	O <sub>2</sub>	20,95
Argon	Ar	0,93
Oxid uhličitý	CO <sub>2</sub>	0,03
Neon	Ne	$1,8 \cdot 10^{-3}$
Metan	CH <sub>4</sub>	$2 \cdot 10^{-4}$
Krypton	Kr	$1 \cdot 10^{-4}$
Helium	He	$5,24 \cdot 10^{-5}$
Vodík	H <sub>2</sub>	$5 \cdot 10^{-5}$
Xenon	Xe	$8 \cdot 10^{-6}$

### 1.1.2 Fluorid sírový

Fluorid sírový je označován jako SF<sub>6</sub>. Jedná se o plyn patřící do skupiny elektronegativních plynů, jelikož obsahuje fluor a chlor, což má za následek snížení pohyblivosti nosičů náboje, a to vede ke zvýšení jejich elektrické pevnosti. Čistý nepoužitý plyn SF<sub>6</sub> se vyznačuje jednotlivými vlastnostmi:

- Bezbarvý
- Nehořlavý
- Bez zápachu
- Bez chuti
- Vynikající schopnost zhášení oblouku
- Při pokojové teplotě stálý
- Chemická neaktivnost s ostatními látkami

Je možné bez nepříznivých účinků vdechovat směs 20 % kyslíku a 80 % čistého SF<sub>6</sub>. Plyn SF<sub>6</sub> není jedovatý, ale z hlediska vlivu na člověka je dusivý, a to může ve větší koncentraci způsobit kašel, otok plic, ale může dojít i k poškození nervové soustavy. Díky své hmotnosti se plyn drží v dolních prostorách, proto jsou v rozvodnách odvětrávací ventilátory při zemi. Jeho nevýhodou je, že přispívá ke skleníkovému efektu a má tedy vliv na globální oteplování. Pro srovnání s CO<sub>2</sub> má 23 000krát větší vliv na globální oteplování než CO<sub>2</sub>. [2, 5, 6]

Plyn SF<sub>6</sub> se v elektroenergetickém průmyslu používá, jako izolační a chladicí medium transformátoru v zapouzdřených rozvodnách. Díky své schopnosti se zhášení oblouku využívá i u vypínačů vvn. Dále se často používá díky velké elektrické pevnosti. Náklady na pořízení rozvaděče s plynem SF<sub>6</sub> a bez SF<sub>6</sub> jsou téměř podobné, jediný rozdíl je, že provozní náklady jsou větší, to z důvodu kladení většího důrazu na bezpečnost proti úniku. [2, 5]

### 1.1.3 Syntetický plyn

Syntetický vzduch se odlišuje od klasického atmosférického vzduchu tím, že je zbaven vzácných plynů. Mezi tyto vzácné plyny patří například xenon a argon. To znamená, že je složen pouze z kyslíku a dusíku. Nejpoužívanější kombinací je 80 % dusíku a 20 % kyslíku. Největší výhodou od SF<sub>6</sub> je, že se nepodílí na tvorbě skleníkových plynů. Jedná se o náhradu SF<sub>6</sub>.

## 1.2 Vlastnosti plynných izolantů

### 1.2.1 Polarizace dielektrika

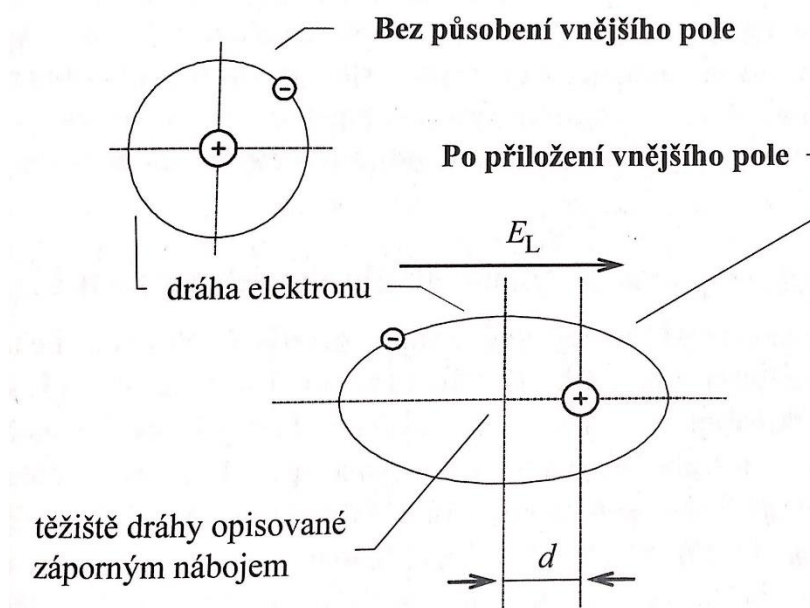
Polarizace byla objevena v roce 1758 Johannem Carl Wilckem. Jedná se o děj, který nastává vložением dielektrika do elektrického pole. Polarizace se mohou od sebe lišit, jsou totiž závislé na struktuře a stavbě použitého dielektrika. Polarizace se dělí do dvou základních skupin na polarizaci s působením vnějšího elektrického pole a bez působení vnějšího elektrického pole. V této práci budou zmiňovány pouze polarizace způsobené vnějším elektrickým polem.

Pokud látka obsahuje permanentní dipólové momenty, způsobí vnější elektrické pole pouze jejich souhlasnou orientaci s daným elektrickým polem. Obsahuje-li dielektrická látka permanentní dipólový moment, jedná se tak o látku polární. Mezi polární látky patří například oxid dusný. Ve druhém případě, kdy látka neobsahuje permanentní dipólové momenty, se vyvolá v látce po vložení do elektrického pole vzájemné posunutí nábojových středů záporných a kladných nábojů. Tento jev zapříčiní vznik nových indukovaných dipólových momentů, ale pokud přestane působit elektrické pole, dochází k zániku indukovaných dipólových momentů a nosiče náboje se vrátí na svá původní místa. Tyto látky nazýváme polární. Plynná dielektrika patřící mezi nepolární látky jsou fluorid sírový, kyslík, dusík a vodík.

Mezi nejčastější polarizace u plynných dielektrik řadíme elektronovou a iontovou.

- **Elektronová polarizace**

Jedná se o polarizaci, kdy nedochází ke ztrátě energie. Pokud nedochází k působení vnějšího elektrického pole na atom, těžiště kladného a záporného náboje se nachází v jednom bodě. To znamená, že atom nemá dipólový moment a není tedy polarizován. Pokud se atom nachází v elektrickém poli, působí na kladný náboj jádra a záporný náboj elektronového obalu elektrostatické síly v opačném směru. Tyto síly vyvolají deformaci tvaru elektronového obalu, protože elektrony se posunou vůči jádru, díky své určité volnosti. Tato deformace souvisí s posunem těžiště záporného náboje o vzdálenost  $d$  od těžiště kladného náboje. Posun o vzdálenost  $d$  vidíme na Obr. 1 a je udávána rovnováhou síly způsobené elektrickým polem a silami, díky kterým jsou elektrony vázány k jádru.



Obr. 1 Schéma elektronové polarizace na modelu atomu vodíku (převzato z [6])

Největší posun nastane u valenčních elektronů, protože jsou k jádru nejslaběji vázány. Posunutím těžišť získá atom indukovaný dipólový moment. Velikost indukovaného dipólového momentu závisí na velikosti lokálního pole a na polarizovatelnosti látky. Vzdálenost, na které dochází k posunutí těžišť není větší, než je rozměr atomu. Vlivem malé vzdálenosti posunu, dochází k vysoké rychlosti ustálení (řádově od  $10^{-16}$  do  $10^{-13}$ ). Elektronová polarizace není frekvenčně ani tepelně závislá, protože polarizace probíhá uvnitř atomu a není ovlivněna jejich tepelným pohybem. [6]

### • Iontová polarizace

Jak už vyplývá z názvu, hlavní roli u této polarizace budou mít ionty, což jsou stavební prvky iontových krystalů. Iontová polarizace se od elektronové odlišuje tím, že u ní existují určité dipólové momenty i bez přítomnosti vnějšího elektrického pole. Je to dáno strukturou dielektrika, které je tvořeno iontovými krystaly. Začne-li působit na látku vnější elektrické pole, dojde k pružnému posunutí iontů. Jedná se o posunutí pružné, jelikož jsou ionty v uzlech krystalové mřížky vázány silně. Pružný posun je vyvolán změnou velikosti jednotlivých dipólů i změnou jejich směru. Doba ustálení iontové polarizace se pohybuje v rozmezích od  $10^{-13}$  do  $10^{-12}$ . Jedná se opět o polarizaci bezetrátovou, která je frekvenčně nezávislá. [6]



## 1.2.2 Elektrická vodivost plynů

Můžeme říci, že plyny mají dobré izolační vlastnosti, zejména ve slabých elektrických polích a při nízkých teplotách. To má za příčinu malý obsah volných nosičů nábojů. Ve směs jsou převážně tvořeny neutrálními molekulami, jejichž vzdálenost mezi nimi je stokrát větší než jejich rozměr. Nosiče náboje vznikají ionizací, radioaktivním zářením Země a kosmickým zářením.

Ionizace nastává při pohlcení dostatečného množství ionizační energie, při které dochází k uvolnění záporných elektronů a na místo toho zůstávají kladné kationty. Vodivost plynu rozdělujeme na samostatnou a nesamostatnou. Samostatná vodivost nastává v silných elektrických polích, úzce souvisí s problematikou elektrické pevnosti a dochází k nárazové ionizaci vlivem vlastního zdroje napětí. Nesamostatná vodivost vzniká na rozdíl od samostatné ve slabých elektrických polích a potřebuje pro svůj vznik vnější ionizační činidlo. [1, 3, 6]

- **Nárazová ionizace**

Princip nárazové ionizace spočívá v pohybu volného elektronu mezi elektrodami, který se vlivem elektrického pole nebo vysoké teploty urychluje směrem k anodě. Získá volný elektron dostatečnou kinetickou energii, dojde ke srážce tohoto elektronu a neutrální částice. Tento jev nemůžeme chápat jako tvrdý mechanický náraz částic, ale jako interakci silových polí těchto dvou částic a vzájemnému vychýlení jejich původních drah. Energie elektronu pohybující se v elektrickém poli závisí na intenzitě tohoto pole a na dráze mezi dvěma srážkami. Aby došlo ke srážce, a tedy i k ionizaci, musí být splněna podmínka, která říká, že kinetická energie ionizující částice musí být větší nebo rovna ionizační energii částice ionizované, a je dána vztahem:

$$\frac{1}{2} * m * v^2 \geq W_i \quad (1.2.1)$$

kde:	$W_i$	- ionizační energie [W]
	$m$	- hmotnost ionizující částice [kg]
	$v$	- rychlost ionizující částice [m.s-1]

Dojde-li ke splnění této podmínky vytváří nárazová ionizace kladný iont a další elektron. Kladný iont se přitahuje ke katodě a oba elektrony mohou ionizovat další molekuly

plynu. Kdyby nebyla splněna podmínka a kinetická energie elektronu by nebyla větší než ionizační energie, došlo by k nabuzení molekuly a k ionizaci by došlo až po nárazu dalšího elektronu. Tento proces nazýváme postupná ionizace. Využívá se na místech, kde je velká hustota elektronů.

Mezi další způsoby vyvolání ionizace, patří rychlé  $\alpha$  a  $\beta$  částice. Dále ionizace vzniká v okolí rozpadajícího radonu. Plyn radon patří mezi hlavní ionizační činitele v atmosférickém vzduchu. [1, 7, 8, 9]

### • Fotoionizace

Jedná se o proces, kdy probíhá pohlcení fotonů neutrálním atomem nebo iontem. Principem fotoionizace spočívá v tom, že nabuzený atom vyzařuje velké množství energie, které může ionizovat jiný atom, jehož ionizační práce je menší než energie vyzářeného fotonu. Kinetická energie fotonu je dána součinem Planckovy konstanty a frekvencí, kterou získáme poměrem rychlosti světla ku vlnové délce. Jako u nárazové ionizaci, tak i u fotoionizaci musí být splněna daná podmínka:

$$\hbar * f \geq W_i \quad (1.2.2)$$

kde:	$\hbar$	- Planckova konstanta $\hbar = 6,625 \cdot 10^{-34}$ (J·s)
	$f$	- frekvence záření (Hz) $f=c/\lambda$ ( $c$ – rychlost světla; $\lambda$ – vlnová délka)
	$W_i$	- ionizační práce neutrálních částic plynu (eV)

Z rovnice (1.2.2) potom můžeme vyjádřit, při jaké vlnové délce může nastat ionizace.

$$\lambda \leq \frac{\hbar * c}{W_i} \quad (1.2.3)$$

kde:	$\lambda$	- vlnová délka (m)
	$c$	- rychlost světla $c = 3 \cdot 10^8$ (m/s)

Stejně jako u nárazové ionizace může dojít k nesplnění podmínky a tím nastat postupná ionizace. Fotoionizace je u výbojů plynu sekundární proces. Ve vzduchu se podílí na vzniku fotoionizace rentgenové a kosmické záření, dále i gama záření. [7, 8]

## • Tepelná ionizace

Jak si můžeme všimnout z názvu, jedná se o ionizaci vzniklou na základě vysokých teplot. Patří mezi speciální typ ionizace. Princip tepelné ionizace spočívá v tom, že při vysokých teplotách se částice plynu pohybují rychleji, a tím může docházet ke srážkám. Mohou zde nastat tři případy [7, 8]:

- Ionizace při srážkách mezi molekulami plynu, které mají velkou kinetickou energii
- Fotoionizace tepelným zářením plynu
- Ionizace při srážce molekul plynu s elektrony, které vznikly při předešlých jevech

## • Povrchová ionizace

Třetí mechanismus se nazývá povrchová ionizace, kdy dochází k uvolňování elektronů z povrchu elektrod. Princip závisí na uvolňování elektronu z povrchu elektrody pomocí výstupní práce. Mezi výstupní práci patří ohřívání elektrody, bombardování kovu částicemi s dostatečnou energií, působení silného vnějšího elektrického pole a fotoelektrický jev (ozařováním povrchu krátkovlnným zářením). Jedná o specifický mechanismus, protože vodivost nezávisí na použitém plynu, ale je závislá na použitém kovu elektrod. [6, 7]

## • Koncentrace nosičů náboje

Změny koncentrace volných nosičů náboje, vznikající při ionizaci se popisují podle koeficientu generace  $g$ . Tento koeficient je definovaný jako počet vznikajících párů volných nosičů náboje v jednotce za jednotku času a je popsán rovnicí:

$$dN = g * dV * dt \quad (1.2.4)$$

Tato rovnice říká, že v  $dN$  párů volných nosičů náboje vznikne za určitý čas  $dt$  v elementárním objemu plynu  $dV$ .

Princip ionizace spočíval na zvyšování počtu volných nosičů náboje, ale zároveň musí v plynu kromě zvyšování docházet i k snižování. Snižování počtu volných nosičů náboje způsobují dva mechanismy, které nazýváme rekombinace a neutralizace.

Neutralizace funguje na principu dopadu volného nosiče náboje na elektrodu opačné polarity, kde elektrodě odevzdá svůj náboj. Dále se potom vrací jako atom elektricky neutrální.

Princip rekombinace je založen na srážce dvou částic s opačnou orientací, při kterém dochází ke vzniku neutrálního atomu nebo molekuly. Pravděpodobnost vzniku rekombinace mezi dvěma opačně nabitými částicemi je větší, čím jsou rekombinující částice déle v bezprostřední blízkosti.[6]

### 1.2.3 Dielektrické ztráty v plynech

Plyny patří mezi výborné, téměř ideální izolanty, protože mají velmi mále dielektrické ztráty. Kdyby došlo k ionizaci plynu, ztráty by okamžitě vzrostly. Ztrátový činitel při frekvenci 50 Hz má hodnotu řádově  $10^{-8}$ . Ztrátový činitel je závislý na frekvenci a při nárůstu frekvence dochází ke zmenšení ztrátového činitele. Jestliže budeme uvažovat pouze vodivostní ztráty, pak můžeme ztrátový činitel určit ze vztahu.

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\gamma}{\omega * \varepsilon' * \varepsilon_0} \quad (1.2.5)$$

kde:	$\gamma$	- konduktivita plynu
	$\varepsilon'$	- reálná část komplexní permitivity
	$\varepsilon_0$	- permitivita vakua ( $8,854 \cdot 10^{-12}$ F·m-1)

Tepelná závislost je dána teplotní závislostí jejich konduktivity a relativní permitivity, přičemž musí být dodržena podmínka konstantního tlaku nebo konstantního objemu plynného izolantu. Dále závislost na napětí je dána napěťovou závislostí konduktivity na přiloženém napětí. Napětí ovlivňuje ztrátový činitel v každé oblasti rozdílně. V oblasti Ohmova zákona je ztrátový činitel nezávislý na napětí. V oblasti nasyceného proudu klesá a v oblasti nárazové ionizace exponenciálně roste. [6]

### 1.2.4 Voltampérová charakteristika plynných izolantů

Voltampérová charakteristika patří mezi základní ukazatele elektrické vodivosti plynných izolantů. Můžeme říci, že se jedná o závislost proudu na intenzitě elektrického pole. Z rovnice (1.2.6) pro rovnováhu mezi vznikajícími a zanikajícími nosiči elektrického náboje lze zjistit průběh VA charakteristiky. [1, 6]

$$g * S * d = r * n_+ * n_- * S * d + n'_+ + n'_- \quad (1.2.6)$$

- kde:
- d - vzdálenost elektrod
  - S - plocha elektrod
  - r - koeficient rekombinace
  - $n'_+, n'_-$  - kladné (záporné) náboje, které se neutralizují na elektrodách
  - $n_+, n_-$  - koncentrace kladných (záporných) iontů
  - g - koeficient generace nosičů náboje

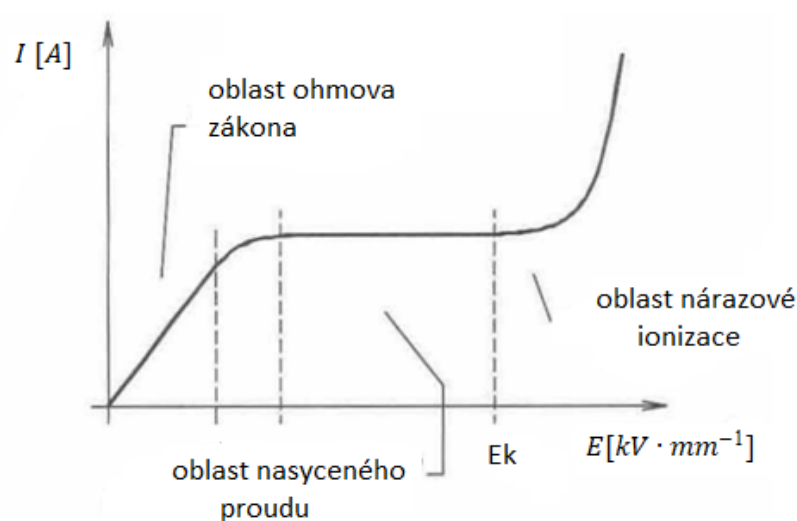
Proud I dostaneme ze vztahu:

$$I = q * (n'_+ + n'_-) \quad (1.2.7)$$

Budeme-li předpokládat, že  $n_+ = n_- = n$ , můžeme zavést absolutní hodnotu proudové hustoty J, kterou zjistíme z poměru proudu ku ploše elektrod.

$$g = r * n^2 + \frac{J}{q * d} \quad (1.2.8)$$

- kde:
- n - počet nosičů
  - q - náboj iontů



Obr. 2 Voltampérová charakteristika plyných izolantů (převzato z [6])

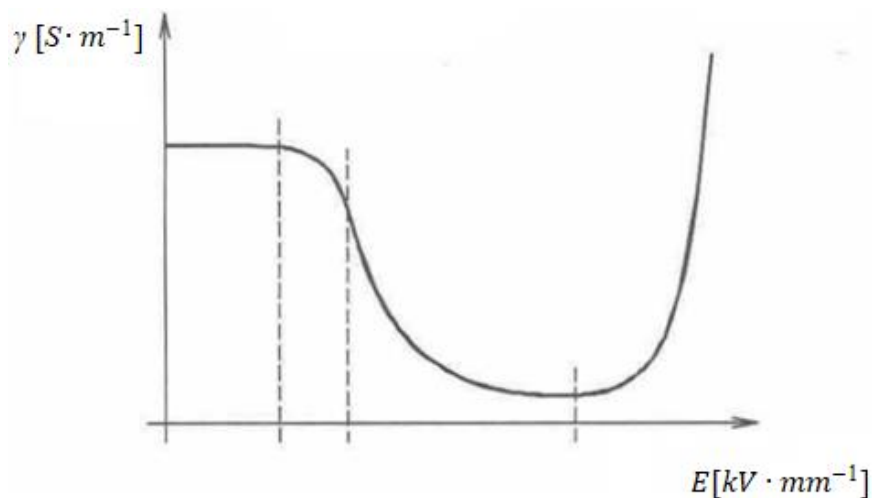
Na Obr. 2 vidíme, že se nám graf rozděluje do tří oblastí. Pro první oblast platí Ohmův zákon. Z důvodu malé intenzity elektrického pole, mají nosiče náboje malou rychlost a tím je velká pravděpodobnost rekombinace. Z toho vyplývá, že je zcela nemožné, aby se elektrony dostali k elektrodě. Proto v rovnici (1.2.9) můžeme zanedbat neutralizaci na elektrodách a přepsat rovnici do tvaru:

$$g = r * n^2 \quad (1.2.9)$$

V oblasti dvě hovoříme jako o nasyceném proudu, jehož velikost se nemění se zvětšující hodnotou intenzity elektrického pole. Se zvětšující intenzitou dochází ke zvětšení rychlosti náboje. Následkem je pokles pravděpodobnosti rekombinace, ale zároveň se nám zvětšuje význam neutralizace. Tento stav nastane, když nosič proběhne mezi elektrodami za tak krátký čas, než je čas potřebný k rekombinaci, proto můžeme zanedbat členy odpovídající rekombinaci a dostáváme rovnici ve tvaru:

$$g = \frac{J}{q * d} \quad (1.2.10)$$

Ve třetí oblasti dochází k překročení intenzity elektrického pole kritickou hodnotu. Začíná probíhat nárazová ionizace, což nám způsobí exponenciální nárůst proudové hustoty se zvětšující se intenzitou. Po překročení kritické hodnoty plynu dochází ke ztrátě elektroizolační schopnosti. [6]



Obr. 3 Napěťová závislost konduktivity plyných izolantů (převzato z [6])

### 1.2.5 Permittivita plynů

Relativní permittivita slouží k popisu chování izolantů v elektrickém poli. To je schopnost polarizovat. Rozdílem od polarizace je, že se permittivita dá měřit. Permittivitu definujeme jako poměr kapacity kondenzátoru s uvažovaným dielektrikem a vakuem. [2]

$$\varepsilon_r = \frac{C}{C_0} \quad (1.2.11)$$

Vlivem velké vzdálenosti mezi molekulami mají plyny velmi malou hustotu, což má za následek malou permittivitu, a ještě menší polarizaci. Podle dipólového momentu můžeme říci, jestli se jedná o polarizaci elektronovou nebo elektronovou a dipólovou. O elektronovou polarizaci se jedná pouze bez dipólového momentu. Změna permittivity je také ovlivněna. Velikost permittivity může být větší, když bude větší poloměr molekuly. Velikost permittivity je také ovlivněna změnou teploty a tlaku. Změna tlaku a teploty je způsobena změnou koncentrace molekul v jednotce plynu. [3]

### 1.3 Elektrická pevnost

Jedná se o nejdůležitější vlastnost a zcela charakterizující určitý elektroizolační prvek. Mezi hlavní úkoly patří vzájemné oddělení míst s různým elektrickým potenciálem. Izolant si drží v elektrickém poli svoji elektrickou pevnost do určité hodnoty intenzity elektrického pole. Po překročení této hodnoty, kterou nazýváme kritickou mezí, dochází k velkému nárůstu volných nosičů nábojů a ke zrychlení jejich pohyblivosti. Následně nastává snížení rezistivity materiálu a velkému nárůstu konduktivity. Nakonec jsou místa s různým potenciálem spojena vodivou cestou a může mezi nimi téct proud. Tento proud dosahuje velkých hodnot, jelikož je omezen pouze impedancí zdroje napětí a přívodů na elektrodách. [6]

Charakter elektrické pevnosti rozlišujeme podle daného skupenství, jestli se jedná o pevný, kapalný nebo plynný izolant. Podle skupenství také rozlišujeme, zda jde o přeskok nebo o průraz. O průrazu mluvíme, pokud dojde k výboji u pevných izolantů. Pokud má zdroj dostatečně velký výkon, dojde k průrazu, který je charakterizován velkým proudem. Tento průraz se projevuje jasnou svítící ohnivou cestou mezi elektrodami a způsobuje ztrátu izolačních schopností. Následně o přeskoku mluvíme, když dojde k výboji u kapalných a plynných izolantů. Pevné izolanty se od plynných a kapalných izolantů liší ztrátou izolační

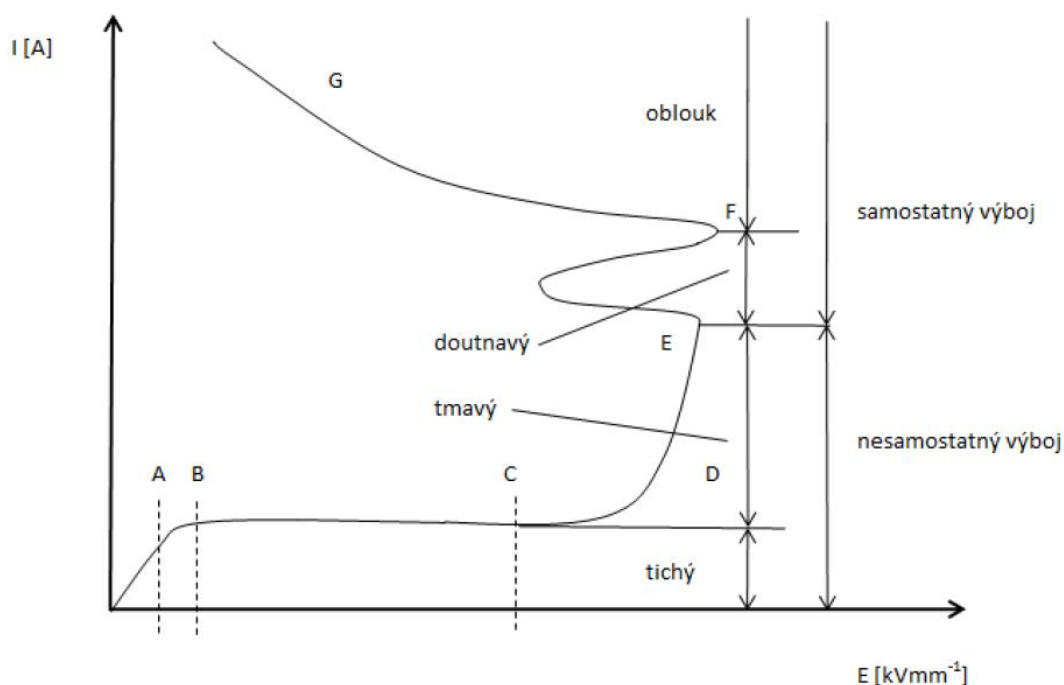
schopnosti, jelikož u pevných izolantů je ztráta trvalá, ale u plynných a kapalných izolantů jen dočasná. To je způsobeno regenerací materiálu.

Elektrickou pevnost značíme  $E_p$  a je definována jako podíl průrazného napětí, při kterém dochází k průrazu a tloušťky materiálu v místě průrazu. [2,6,8,9]

$$E_p = \frac{U_p}{d} \quad (1.3.1)$$

### 1.3.1 Elektrická pevnost plynů

Elektrický proud je v elektrickém poli omezen až do určitého napětí počtem nosičů náboje, která se v něm nachází. Dojde-li k zvětšení počtu nábojů, dojde k nárůstu proudu. Tento jev je způsoben výbojem. Na *Obr. 4* můžeme vidět dva základní typy výbojů, které rozdělujeme dle vzniku na samostatné a nesamostatné výboje. Nesamostatné výboje pro svůj vznik potřebují ionizační činitele. Mezi ionizační činitele patří zdroj záření nebo externí zdroj elektronů (termoemisioní katoda). Pokud přestanou působit pomocné zdroje, dojde k zániku nesamostatného výboje. Samostatné výboje mají jediný zdroj, a to zdroj elektrického napětí mezi elektrodami. Elektrické napětí slouží k dosažení velké intenzity elektrického pole, což způsobí vznik volných nosičů náboje a dále i jejich pohyb.



Obr. 4 Úplná VA charakteristika plynného izolantu (převzato z [6])



Teorii o nesamostatných výbojů se zabýval irský fyzik John Edward Sealy Townsend. Předpoklad teorie je deskový kondenzátor s plynným dielektrikem. Dále předpokládáme homogenní časově neproměnné pole. Výboje vznikají při malých tlacích a při malé hustotě proudu. Zvyšujeme-li postupně napětí zvyšuje se nám i proud, který způsobí nesamostatný výboj, tento výboj můžeme nazvat také Townsendův výboj. Zvýšíme-li napětí až do překonání kritické hodnoty, potom nám vznikne samostatný výboj. [6,13]

### 1.3.2 Průraz plynného izolantu

Při průrazu dojde k velkému nárůstu elektrické vodivosti a izolant ztrácí své izolační vlastnosti. Průraz má dvě etapy. V první etapě dojde k náhlému nárůstu elektrické vodivosti a zvýšení protékajícího proudu v místě průrazu. Do druhé etapy patří všechny děje, které nastanou následkem průchodu velkého elektrického proudu. Vzniká zde silný oblouk, který svými tepelnými účinky ovlivňuje izolant a elektrody. Mezi nejdůležitější vlastnosti, které ovlivňují elektrickou pevnost patří druh elektrického pole (homogenita), teplota izolačního materiálu, druh napětí, tvar křivky napětí a doba působení napětí.

Průraz u plynných izolantů vzniká nárazovou ionizací a fotoionizací. V homogenním poli vzniká okamžitě a v nehomogenním poli ho předchází koróna. [3]

### 1.3.3 Paschenův zákon

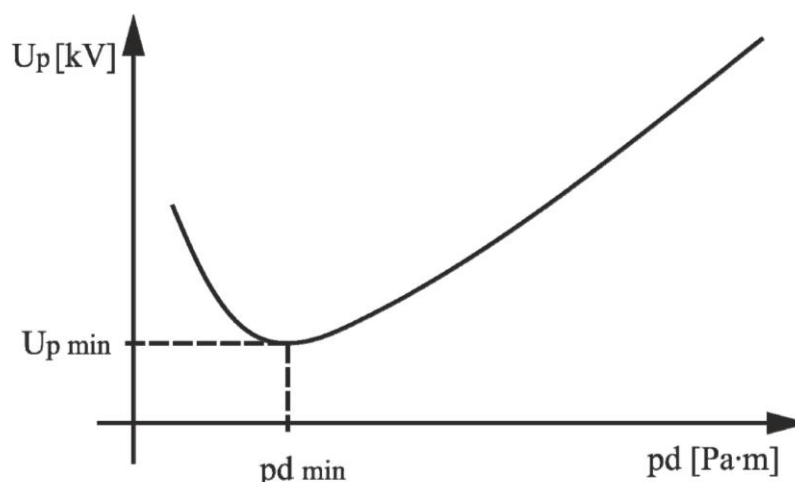
Paschenův zákon nám říká, že velikost přeskokového napětí v plynu silně závisí na jeho tlaku. Dále říká, že přeskokové napětí za stálé teploty je funkcí součinu tlaku plynu a vzdálenosti elektrod. Paschenův zákon je dán funkcí:

$$U_p = f(p * d) \quad (1.3.2)$$

kde:	$U_p$	- přeskokové napětí
	$p$	- tlak
	$d$	- vzdálenost mezi elektrodami

Paschenův zákon je graficky znázorněn pomocí Paschenovy křivky. Jak si můžeme všimnout na *Obr. 5*, křivka se skládá ze dvou částí. Levá část prudce klesá a pravá mírně stoupá. Spojnice těchto částí nám udává minimální hodnotu průrazného napětí pro různé plyny. Minimální hodnota průrazného napětí se pohybuje v rozmezí od 280 do 420 V (např.

vzduch = 330 V) a také se jedná o energeticky optimální oblast pro vytvoření a udržení výboje v plynu.



Obr. 5 Paschenova křivka (převzato z [6])

Pro vysvětlení Paschenovy křivky předpokládáme konstantní vzdálenost elektrod a měníme pouze tlaky. Při menších hodnotách tlaku (10 až 100 Pa) jsou volné dráhy částic velké. Vzhledem k tomu nemůže dojít k nárazové ionizaci, protože uvolněný elektron z katody dojde k anodě beze srážek (levá část křivky). Pokud bychom chtěli za tohoto stavu způsobit ionizaci museli bychom přivést dostatečně velké napětí, což je energeticky dost nevýhodné. Naopak při zvyšování tlaku se zmenšuje délka mezi molekulami i střední volná dráha molekul, tím se zvětšuje pravděpodobnost nárazu volného elektronu s molekulou. Pokud se elektrony sráží s molekulami příliš brzy, kdy ještě nezískali postačující kinetickou energii pro ionizaci. Znovu je zapotřebí pro vytvoření a udržení výboje dostatečně velké napětí a, jak už bylo řečeno u menších tlaků, to je energeticky nevýhodné. [6]

#### 1.3.4 Částečné výboje

Částečné výboje jsou zvláštním druhem elektrických výbojů. Oproti klasickému výboji, kde dochází k průrazu dielektrika v celé délce mezi elektrodami, u částečného (neúplného) výboje vniká průraz pouze v části dielektrika. To způsobí, že část izolace ztrácí svoji elektrickou pevnost, ale zbylá část má stále postačující elektrickou pevnost. Vlivem toho nedochází k propojení elektrod a zařízení může dále pokračovat ve své činnosti.

Norma ČSN EN 60270 definuje částečný výboj jako lokální výboj, který částečně přemostňuje izolaci mezi vodiči a který se může ale nemusí vytvořit v blízkosti vodiče. Důsledkem vzniku částečného výboje je výskyt lokálního elektrického namáhání jak

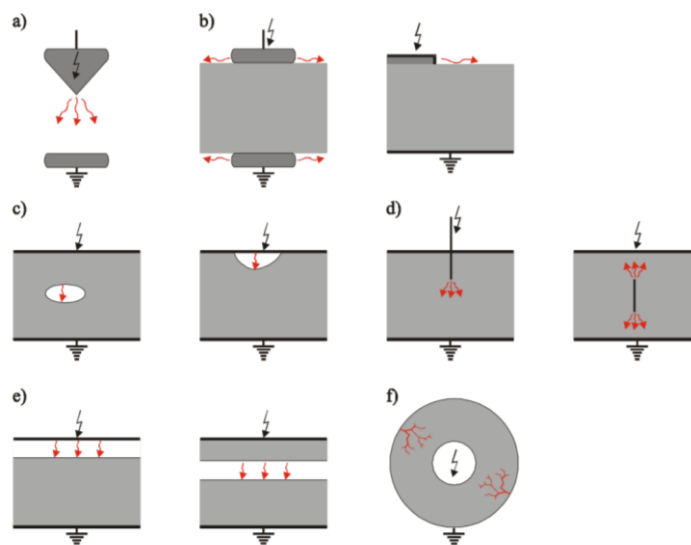
v izolaci, tak i také na jejím povrchu. Objevují se jako impulzy. Tyto impulzy trvají méně než 1  $\mu$ s a jsou doprovázeny vznikem zvuku, tepla, světla a chemickými reakci. I když se jedná o malé výboje, mají velmi negativní vliv na izolaci. Je to z důvodu, že způsobují degradaci a erozi izolace. Vlivem toho dochází ke zhoršení vlastností izolace, a tedy i ke zkrácení její životnosti a spolehlivosti. Postižená část izolace se během výboje může dále rozšiřovat až do úplného zničení izolace. [11,12]

Částečné výboje nejčastěji vznikají ve vysokonapěťových izolačních systémech. Výboje vznikají v malých plynových dutinkách, které se v izolaci objeví při nedokonalé výrobě izolace. Ani použitím nejlepší technologie nelze zabránit vzniku dutinek. Dutinky také mohou vznikat při velkém lokálním elektrickém namáhání. S rostoucím napětím na izolaci se v plynových dutinkách vytváří lavinové nebo drobné jiskrové výboje. Odolnost dutinky závisí na rozměru a druhu použitého plynu. [9]

Částečné výboje rozdělujeme do tří skupin podle místa výskytu [9]:

- vnější částečné výboje (externí) – výboje v plynech v okolí elektrod malých poloměrů nebo zakřivení, patří sem zejména doutnavé nebo korónové výboje;
- vnitřní částečné výboje (interní) – výboje v plynech, obklopené pevným či kapalným dielektrikem, patří sem například výboje v plyných dutinkách v pevném dielektriku;
- povrchové částečné výboje – objevují se v okolí elektrod na rozhraní plynného a pevného dielektrika, jsou nazývané také jako výboje klouzavé a obvykle se vyskytují u točivých strojů na výstupu vinutí z drážky.

### 1.3.5 Druhy částečných výbojů



Obr. 6 Typická uspořádání elektrod pro částečné výboje (převzato z [13])

Na Obr. 6 vidíme jednotlivé typy výbojů, které rozdělujeme do následujících skupin [14]:

- uspořádání elektrod hrot – deska** – uspořádání typické pro vznik korónových výbojů;
- vidíme povrchové a klouzavé výboje** – výboje vznikají na hranách elektrod a jsou s nimi i souběžně orientovány. Při zvyšování napětí je četnost výbojů natolik velká, že nelze přístroji rozeznat jednotlivé pulzy od sebe. Vznikají na kabelových koncovkách a na povrchových kontaktech. Výboje toho typu se mohou rozšiřovat i mimo původní povrch, kde výboje začaly vznikat;
- výboje v plynných dutinkách** – jak už bylo řečeno, dutinky vznikají hned při výrobě izolantu, například při tvarování nebo lití epoxidové pryskyřice. Dutinky bývají obvykle vyplněné plynem, ale mohou být vyplněné i kapalinou. Po přiložení zapalovacího napětí dojde ke strmému nárůstu výbojové činnosti. Četnost výbojů není závislá na dalším navýšení napětí;
- výboje vzniklé na jehlovém uspořádání elektrod** – jehlové uspořádání elektrod vyvolá lokální namáhání u kapalného a plynného dielektrika a zvýšení intenzity elektrického pole na špičce elektrody, což v konečném případě vede ke vzniku částečných výbojů;
- výboje na vrstvené izolaci** – vzniká mezera mezi elektrodou a pevným dielektrikem nebo mezera uvnitř izolantu. Vzniklá mezera společně

s nehomogenitou materiálu způsobí částečné výboje. Na rozdíl od výbojů v plynných dutinkách dosahují větší četnosti impulzů;

f) trvalé interní stromečkové výboje – výboje vyvolané vadou izolace.

## 1.4 Nehomogenní pole

V této podkapitole se zabýváme nehomogenním polem. V praxi se mnohem častěji setkáváme s nehomogenním polem než s polem homogenním. Pro rozlišení homogenního a nehomogenního pole slouží tzv. stupeň nehomogenity.

V nehomogenním poli musíme při výstavby přeskokového výboje uvažovat dva druhy napětí. Zapalovací napětí  $U$  neboli počáteční a přeskokové napětí  $U_p$ . První zmiňované napětí souvisí se vznikem samostatného výboje u elektrod. Elektrody jsou malého poloměru, a tím nedojde k přeskoku na celé vzdálenosti mezi elektrodami. Druhé napětí, které se vytvořilo před výbojem. Velikost přeskokového napětí je ovlivněna prostorovým nábojem a vzdáleností elektrod. U homogenního pole a slabě nehomogenního se tato napětí rovnají.

### 1.4.1 Stupeň nehomogenity

Stupeň nehomogenity udává o jak silně nehomogenní pole se jedná. Stupeň nehomogenity se určuje pomocí Schwaigrova faktoru  $\eta$ , který byl zaveden v roce 1922. Jedná se o poměr průměrné intenzity ku maximální intenzitě elektrického pole.

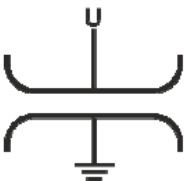
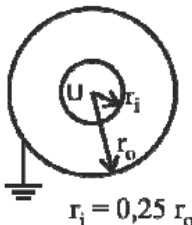
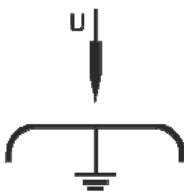
$$\eta = \frac{E_{mean}}{E_{max}} = \frac{U}{d * E_{max}} \quad (1.4.1)$$

kde:	$E_{mean}$	- průměrná hodnota intenzity elektrického pole
	$E_{max}$	- maximální hodnota intenzity elektrického pole
	$U$	- vrcholová hodnota rozdílu potenciálu mezi elektrodami
	$d$	- vzdálenost elektrod

Hodnota stupně nehomogenity se pohybuje v rozmezí 0 až 1. Je-li hodnota  $\eta = 1$ , jedná se tak o homogenní pole, ale je-li hodnota nižší, znamená to, že je pole nehomogenní, a čím více je nižší, tím více je pole nehomogenní. Existuje mezní hodnota, která označuje přechod mezi silně a slabě nehomogenním polem. Tato hodnota je u každého dielektrika jiná, jelikož závisí nejen na chování dielektrika, ale i na fyzikálních podmínkách (teplota, tlak). [15,16]

Podle stupně nehomogenity se určuje typ elektrického pole, které se v systému elektrod s dielektrikem dělí na:

- **Homogenní pole**
  - stupeň homogenity  $\eta = 1$
  - před přeskokem nejsou žádné výboje
  - počáteční napětí  $U_0$  se rovná přeskokovému napětí  $U_p$
- **Slabě nehomogenní pole**
  - stupeň homogenity  $\eta \geq 0,25$
  - před přeskokem nejsou žádné výboje
  - počáteční napětí  $U_0$  se rovná přeskokovému napětí  $U_p$
- **Silně nehomogenní pole**
  - stupeň homogenity  $\eta \ll 0,01$
  - před přeskokem jsou výboje
  - počáteční napětí  $U_0$  je výrazně menší než přeskokové napětí  $U_p$

Klasifikace pole	Homogenní	Slabě nehomogenní	Silně nehomogenní
Elektrodové uspořádání	Paralelní desky 	Koncentrické válce 	Hrot - deska 
$\eta$	1	$\leq 0,25$	$\ll 0,01$

Obr. 7 Klasifikace a typické uspořádání elektrických polí (převzato z [15])

#### 1.4.2 Přeskokové napětí v slabě nehomogenním poli

V nehomogenním poli rozlišujeme počáteční napětí  $U_0$ , které zapříčiní vznik prvního samostatného výboje. Tento výboj je obvykle jen částečný a nerozšiřuje se dál do prostoru mezi elektrodami. Mezi důležité veličiny patří také přeskokové napětí, jinak zvané napětí

jiskry  $U_p$ , které je větší než počáteční napětí. Na rozdíl od nehomogenního platí v homogenním vztah:

$$U_0 = U_p \quad (1.4.2)$$

V silně nehomogenním poli je určení počátečního napětí velice náročné oproti homogennímu poli. Tento proces je složitější, protože v tomto poli se uplatňují prostorové náboje a přeskokové napětí závisí na polaritě elektrod. U slabě nehomogenního pole je tento vliv polaritě elektrod malý. Dále můžeme vyjádřit vztah pro nehomogenní pole:

$$\ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right) = \int_0^d \alpha dx \quad (1.4.3)$$

V nehomogenním poli je formulován zákon podobnosti výbojů, popisující přeskokové napětí, tak že při konstantní teplotě je přeskokové napětí v geometricky podobných uspořádáních stejné, mění-li se tlak v obráceném poměru s geometrickými rozměry. [7]

### 1.4.3 Trskový výboj

Jedná se o výboj, který vzniká v nehomogenních polích, jež jsou silně divergentní. Výboj vzniká předně na hrotech elektrod a je vyvolán překročením určité minimální vzdálenosti. Na rozdíl od kulových a válcových elektrod, kde výboj vzniká tehdy, je-li poměr doskoku a poloměru zakřivení větší než daná hodnota.

Ke vzniku výboje dochází zvýšením napětí mezi elektrodami nad kritickou hodnotu. Velikost kritického napětí se liší podle uspořádání elektrod. Tento výboj se projevuje neklidnými svítícími paprsky, který můžeme snadno zpozorovat. Paprsky tvoří rozvětvený trs modře svítící doprovázený praskotem, končící ve vzduchu nebo na povrchu izolantů. Tvar trsových výbojů je ovlivněn polaritou napětí a probíhá v něm silná nárazová ionizace a rekombinace. Doba trvání je proměnná (rychle se objevují a zase mizí), ale dojde-li k ustálení, mluvíme o tzv. sršení.

Voltampérová charakteristika výboje udává, že s rostoucím proudem roste napětí velmi málo. [7]

#### 1.4.4 Jiskrový výboj

Jiskrový výboj vzniká v homogenním nebo skoro homogenním poli nebo mezi čistými elektrodami. K jiskrovému výboji dochází, jakmile přiložené napětí překročí počáteční napětí samostatného výboje. V nehomogenním poli vzniká výboj z trsového výboje.

Můžeme odlišit dva druhy přeskoku. Nejprve mluvíme o statickém přeskoku, kde velikost přiloženého střídavého nebo stejnosměrného napětí stačí na přeskok a doba od přiložení napětí do přeskoku může být libovolně dlouhá. V druhém případě se jedná o rázový přeskok, kde přiložená hodnota napětí (rázového napětí) musí být pro vznik jiskry jeho maximální hodnota tím vyšší, čím strmější je rázové napětí. Pokud maximální hodnota nestačí na přeskok v čele rázu, ale dojde na přeskok v tylu, nastane jiskra tím rychleji, čím vyšší je maximální hodnota a čím je pokles napětí v tylu pozvolnější. Na rozdíl od statického přeskoku vzniká rázový přeskok při vyšším napětí.

Na elektrody přivedeme takové napětí, aby vedlo ke vzniku přeskoku. Pro vytvoření jiskrového výboje je zapotřebí určitá doba. Časový interval od přiložení napětí do vzniku přeskoku je doba, kterou nazýváme doba zpožděného výboje. Tato doba se skládá ze dvou částí, ze statické doby zpoždění a z doby výstavby jiskry.

Statická doba zpoždění souvisí s tím, že po přiložení napětí se nemusí vyskytovat mezi elektrodami žádný elektron. Pokud se zde ale vyskytuje, neznamená to, že ionizace vyvolaná elektronem měla vést k přeskoku. Statická doba zpoždění lze měřit, pokud je doba výstavby výboje kratší než statická doba zpoždění. Tato situace nastává zpravidla při malém doskoku jiskřišť a při ne zcela vysokých napětích. I při dodržení stejných podmínek se tato doba velmi mění. Střední hodnota závisí na tvaru katody, na stavu povrchu, na materiálu katody, na druhu a intenzitě ultra krátkovlnného záření v jejím okolí a na tom, o jakou hodnotu převyší přiložené napětí statické přeskokové napětí. Statická doba zpoždění hraje velký význam v praxi u malých jiskřišť s poměrně homogenním polem.

Doba výstavby jiskry je doba, za kterou dojde k vytvoření výboje od okamžiku, kdy jsou na místě počáteční elektrony. Tato doba má statický charakter, což se projevuje zvláště při dlouhých doskocích v nehomogenním poli. [7]

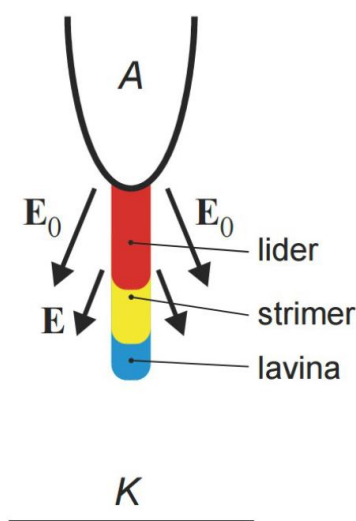
#### 1.4.5 Líder

Vzniká v silně nehomogenním poli ve vzduchu při velkých vzdálenostech elektrod. Tato vzdálenost je několik desítek centimetrů a více. Při této vzdálenosti je délka striméru taktéž desítky centimetrů a průměrná teplota se pohybuje okolo 3000 °C. Vlivem této teploty



dochází k tepelné ionizaci vzduchu. Na začátku striméru je teplota dvakrát větší než v polovině striméru. A oproti teplotě je intenzita elektrického pole na začátku malá a postupně se zvyšuje. Na konci striméru bude intenzita elektrického pole největší, což způsobuje postupné vytváření nových strimérů a prodlužování původního kanálu se současným zvyšováním teploty. Tímto způsobem vzniká v nehomogenním poli zvaný líder. Líder má malou podélnou intenzitu elektrického pole, ale čím více se konec líderu přibližuje k elektrodě opačné polarity, tím více se jeho intenzita zvyšuje.

Šíří-li se líder od kladné elektrody, dochází k absorpci elektronů ze záporné elektrody. To způsobuje neutralizace kladných nábojů v líderu, což vede k rychlému nárůstu proudu. Rozdíl šíření od kladné nebo od záporné elektrody se rozlišuje tak, že šíření od kladné elektrody je souvislé a od záporné je šíření ve skocích a může se šířit od obou elektrod současně. [7]



Obr. 8 Průběh lídrového výboje (převzato z [17])

V čele líderu se šíří strimér, na který se napojují boční striméry a laviny. V místě, kde dojde ke spojení líderu a elektrod dojde k vytvoření vysokého potenciálového rozdílu. Následkem bude prudký nárůst proudu, při kterém dojde k uvolnění velkého množství tepla (Joulova tepla). Tento jev dále zapříčiní silnou ionizaci ve vodivém kanále a jeho okolí, což způsobí velký nárůst vodivosti. Potenciálový rozdíl s uvolněním velkého množství energie, který nezůstává na jednom místě, ale přesouvá se směrem k druhé elektrodě. [17]

### 1.4.6 Koróna

Jedná se o neúplný samostatný výboj, omezen na úzkou oblast kolem elektrod. Je to takový typ výboje, jehož vznik zapříčiní ztrátu elektrické energie, ale na druhou stranu vede k tlumení přepětí, které při vzniku koróny vzniká.

Pro vznik tohoto výboje musí být dostatečná vzdálenost mezi elektrodami. Dále musí být elektrody zakřivené, aby vzniklo nehomogenní pole. Dochází-li v prostředí ke zvyšování tlaku vzduchu nebo jiného plynu mezi elektrodami, začne s rostoucím napětím růst intenzita elektrického pole až do své kritické hodnoty, což způsobí ionizaci vzduchu. Dojde-li k výboji, elektrody se obalí slabě svítící vrstvou a tato slabá vrstva vysílá ultrafialové záření. Vznikající korónový výboj vede k rozkladu plynů, které se kolem výboje nacházejí, ale i ke generování ozónu. Tento jev nastává většinou u stejnosměrného napětí, ale může vznikat i při vysokofrekvenčních výbojích.



Obr. 9 Koróna kolem hrotu (převzato z [18])

Na počáteční stav koróny má zásadní vliv stav povrchu elektrod. Malé nečistoty i nerovnosti povrchu zapříčiní předběžné (místní) nestabilní výboje. U těchto výbojů jsou proudy velice malé, proto stanovení napětí, při kterém koróna vzniká, je velice obtížné. O počátečním napětí, při němž vzniká koróna, lze mluvit za daných podmínek pouze u velmi hladkých a čistých elektrod.

Při zvyšování napětí dochází k velkému nárůstu proudu, současně se elektrody obklopí svítící vrstvou doplněné o charakteristické šumění a praskání. Zvyšujeme-li dále napětí, dochází k přechodu na trsový a jiskrový výboj. [7,19]

Koróna u elektrod důležitých tvarů:

- **Venkovní vedení, drát a deska**

Je-li průměr vodičů vůči vzdálenosti dvou rovnoběžných vodičů malý, pak intenzita elektrického pole nezávisí na vzdálenosti drátů, a také na tom, zda jsou obě elektrody dráty. Intenzita elektrického pole závisí na průměru drátu. K bezpečnému vzniku koróny dojde platí-li vztah:

$$\frac{a}{r} \geq 25 \quad (1.4.4)$$

Korónu musíme omezovat, protože na venkovním vedení zapříčiní ztráty elektrické energie. Způsobuje i poruchy v rozhlasu, televizi a vysokofrekvenční technice. Z tohoto důvodů je koróna na venkovním vedení nežádoucí. Při koróně dojde ke vzniku ozonu a oxidu dusíku, který společně s vlhkostí tvoří kyseliny. Kyseliny nepříznivě naleptávají porcelánový povrch a koróna je tedy nepřijatelná ani ve vzduchových mezerách pod porcelánovými tělesy průchodek. U venkovních vedení vn a vvn se pro omezení koróny používají svazkové vodiče.

- **Dvě koule**

Koróna zde vzniká pouze u elektrod malých průměrů, i když se téměř okamžitě vyvine v trsový výboj nebo v přeskok.

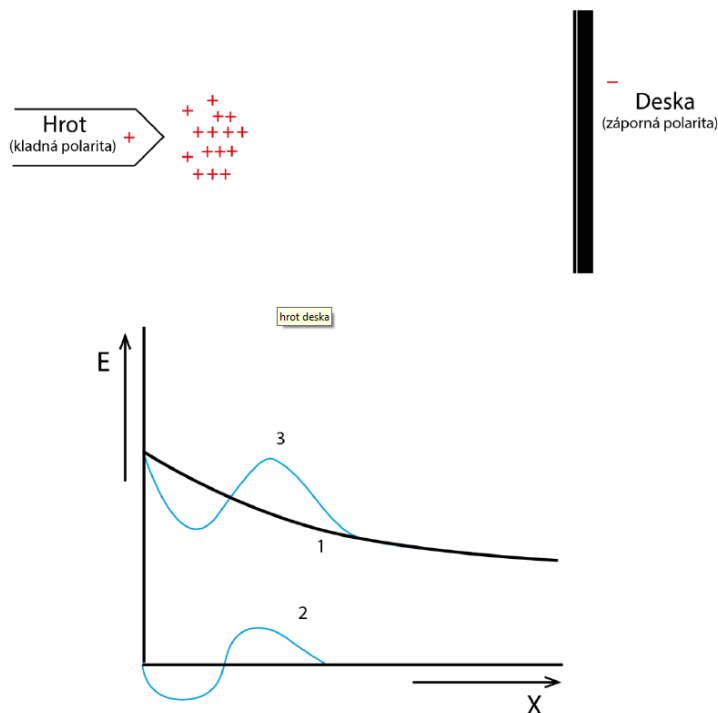
- **Dva hroty**

Koróna vzniká při docela malém napětí. Při stálém zvyšování napětí u doskoku 6 cm dochází k přechodu v jiskru. Při větší vzdálenosti přechází opět ve výboj trsový. [4]

Dva druhy koróny:

- **Anodová koróna (kladná)**

Vycházíme z předpokladu, že elektrody jsou ve tvaru hrotu proti desce. Na hrot musí být přivedena kladná polarita a na desku záporná polarita napětí, jak si můžeme všimnout na *Obr. 10*.



Obr. 10 Rozložení intenzity elektrického pole v případě záporný hrot – kladná deska (převzato z [16]).

Po přivedení napětí vzniká intenzita elektrického pole, která způsobí nárazovou ionizaci. Po vytvoření volných elektronů vzniká několik lavin elektronů ve směru ke hrotu. Mezi hrotem a deskou vznikají kladné ionty způsobené excitací elektronů. Tyto ionty jsou těžší oproti elektronům a z toho důvodu je jejich pohyb k desce pomalý. Rozdílné rychlosti nosičů náboje vyvolají v blízkosti hrotu kladný objemový náboj.

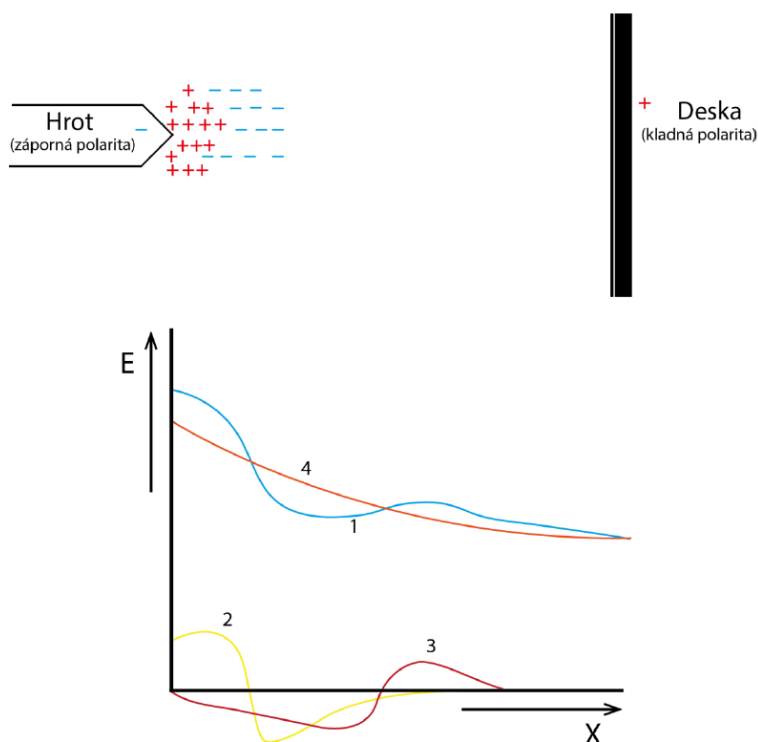
Na Obr. 10 vidíme graf rozložení intenzity elektrického pole v prostoru mezi elektrodami. První křivka nám ukazuje intenzitu elektrického pole způsobené vnějším zdrojem. Křivka dvě nám ukazuje intenzitu způsobenou objemovým nábojem a křivka tři je výsledný průběh rozložení intenzity elektrického pole.

Intenzita elektrického pole se zmenšuje působením kladného objemového náboje v blízkosti hrotu, ale ve zbylém prostoru ji naopak zvyšuje. Dojde-li ke snížení intenzity pod kritickou hodnotu, výboj začne zhasínat, a naopak vzdálí-li se kladný objemový náboj od hrotu intenzita stoupne nad kritickou hodnotu a dojde opět k zapálení výboje. [20]

- **Katodová koróna (záporná)**

Na rozdíl od anodové koróny je záporná polarita přivedena na hrot a kladná na desku. Koróna zde vzniká při stejné intenzitě elektrického pole jako u anodové koróny, ale rozložení pole a výsledný průběh intenzity je odlišný.

Stejně jako u anodové koróny se elektrony pohybují směrem k desce a zanechávají za sebou kladný prostorový náboj. Po uražení určité vzdálenosti do místa s menší intenzitou elektrického pole elektrony začnou zpomalovat a některé dokonce pohltní neutrální molekuly. Dochází k rekombinaci elektronů a vznikají těžké záporné ionty. Vzniká záporný prostorový náboj. Tento náboj vzniká ve větší vzdálenosti od hrotu. Výsledkem máme kombinaci kladného a záporného objemového náboje.



Obr. 11 Rozložení intenzity elektrického pole v zapojení záporný hrot a kladná deska (převzato z [16])

Na Obr. 11 vidíme rozložení náboje mezi elektrodami. Intenzita elektrického pole je velká v blízkosti hrotu, což způsobuje kladný objemový náboj. Dále nastane ionizace, která vytváří velké množství náboje. Následně se začne projevovat koróna, což zapříčiní nárůst záporného prostorového náboje a dojde ke snížení intenzity v blízkosti hrotu. To vede k uhasnutí koróny. V grafu na Obr. 11 vidíme, jak prostorové náboje snižují intenzitu elektrického pole ve směru k desce. Prostorový náboj dále brání rozvinutí výboje v jiskru. [20]

## 2 Zkoušky průrazným výbojem

Teoretickou část práce zakončíme definováním vysokonapětových zkoušek dle normy ČSN EN 60060-1. Vysokonapětové zkoušky lze rozdělit do tří tříd [20]:

- Třída 1: Zkoušky více hladinami
- Třída 2: Zkoušky metodou nahoru-dolů
- Třída 3: Zkoušky postupným namáháním

### 2.1 Třída 1: Zkoušky více hladinami

U zkoušky více hladinami se příkládá  $n$  napětí, použité na každé z  $m$  napět'ových hladin, kde sledujeme počet průrazných výbojů. Metodu více hladinami lze nejlépe pochopit z Obr. 12. Princip spočívá ve zvyšování napět'ových hladin s krokem [21]:

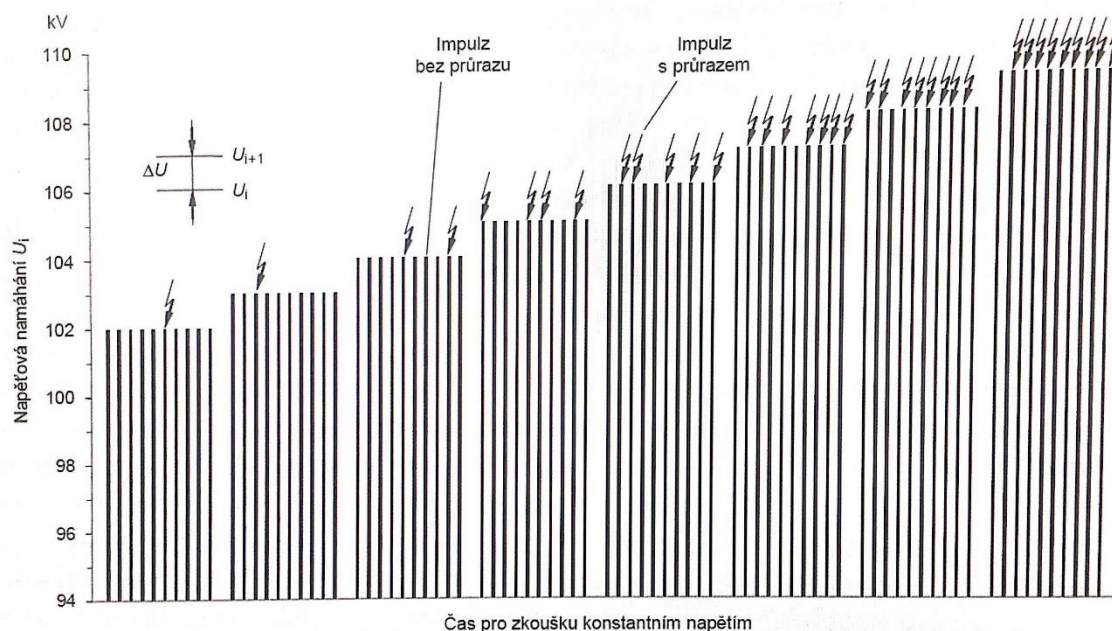
$$\Delta U \geq U_{i+1} - U_i \quad (i = 1, 2, \dots, m - 1) \quad (2.1.1)$$

Většinou se využívá impulzní napětí, ale lze použít i stejnosměrné a střídavé napětí s předepsanou dobou namáhání. Doporučené parametry dle normy ČSN EN 60060-1 [21]:

$$m \geq 5; n \geq 10; \Delta U = (0,01 \text{ až } 0,06)U_{50} \quad (2.1.2)$$

Četnost výbojů stanovíme z naměřených hodnot na určité napět'ové hladině:

$$f_i = \frac{k_i}{n_i} \quad (2.1.3)$$



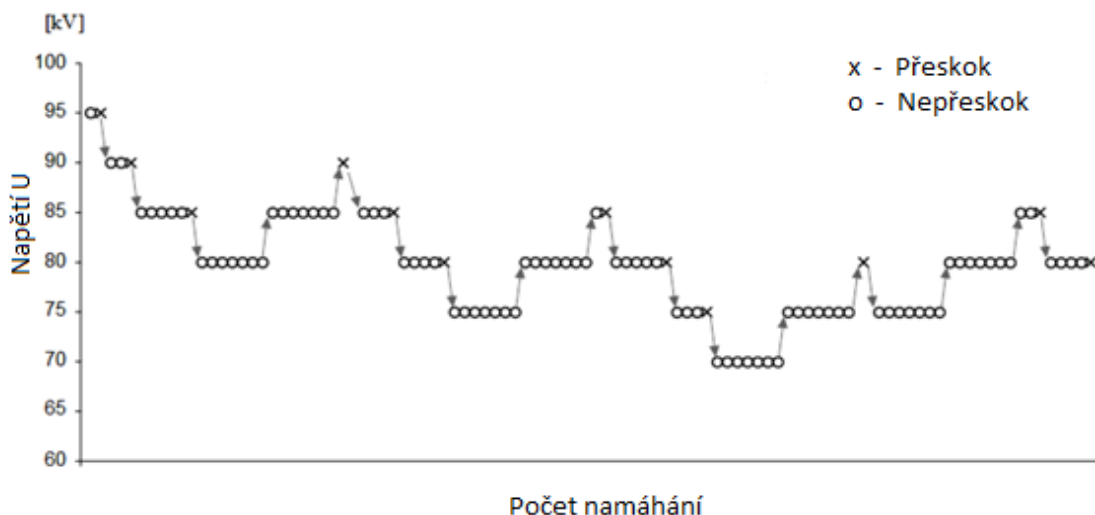
Obr. 12 Metoda více hladinami (převzato z [21])

Metodu více hladinami lze popsat tímto způsobem. V rozsahu testovaného napětí volíme  $m$  napěťových testovacích hladin. Na každé testovací hladině  $m$  přivedeme  $n$  napěťových impulzů, které vedou k přeskoku. Zvolený počet impulzů  $n$  na jedné napěťové hladině má v konečném výsledku vliv na přesnost měření. Můžeme říci, že s rostoucím počtem impulzů  $n$  na jednotlivých napěťových hladinách zvyšujeme spolehlivost měření

Tato práce je založena na použití zkoušky více hladinami. Konkrétně používáme 25 impulzů na každé napěťové hladině, což vede k výbojům. Měření se provádí do doby, než alespoň 90 % impulzů skončí výbojem. Z naměřených hodnot můžeme získat statistickou charakteristiku, ze které dále můžeme odečíst pravděpodobnost přeskoku pro danou velikost napětí přivedeného na elektrody. Nevýhodou této zkoušky je časová náročnost, jelikož chceme dosáhnout co největší přesnosti, musíme provést velký počet měření pro každý napěťový stupeň. [21]

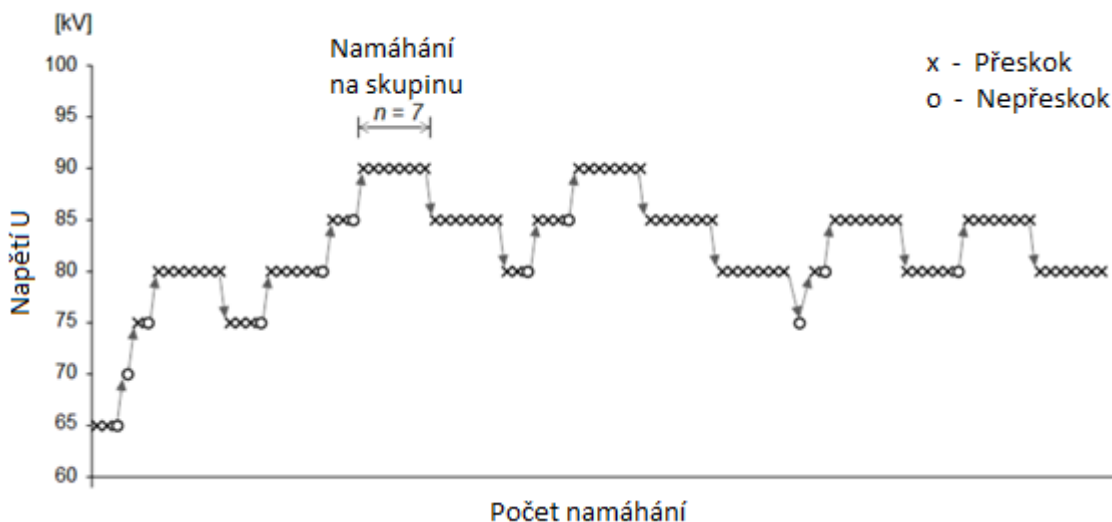
## 2.2 Třída 2: Zkoušky metodou nahoru-dolů

U zkoušky metodou nahoru-dolů se používá  $m$  skupin po  $n$  stejných napěťových impulzech při napěťových hladinách  $U_i$ , kde  $i = 1, 2, \dots, m$ . Napěťové hladiny se snižují nebo zvyšují o malý rozdíl  $\Delta U$ . Změna závisí na reakci zkoušeného objektu na přiložený impulz. Zkoušky třídy 2 lze využívat k testování izolantů se samoregenerativním procesem. Pro zkoušky nahoru-dolů jsou používány dva zkušební postupy.



Obr. 13 Metoda nahoru-dolů (třída 2) – výdržný postup (převzato z [21])

První postup je výdržný, je zaměřen na hledání napěťových hladin, kde je nízká pravděpodobnost vzniku výboje. Princip výdržného postupu spočívá nejprve v nastavení vyšší napěťové hladiny, kde dojde k průraznému výboji. Na to reagujeme snížením napěťové hladiny. Nedojde-li na nižší napěťové hladině k výboji, napěťovou hladinu navýšíme, ale pokud opět dojde k výboji, napěťovou hladinu znovu snížíme. Na Obr. 13 vidíme, že skupiny impulzů jsou složeny z velkého počtu úspěšných impulzů a výboje v tomto případě nastávají pouze výjimečně. [21]



Obr. 14 Metoda nahoru-dolů (třída 2) – výbojový postup (převzato z [21])

Druhý postup je výbojový. Naopak od výdržného postupu se používá k hledání napěťových hladin, kde je vysoká pravděpodobnost průrazného výboje. Princip výbojového postupu spočívá oproti předchozí metodě v nastavení nižší napěťové hladiny. Nenastane-li



na této hladině výboj navýšíme napět'ovou hladinu, a hladinu navyšujeme až do té doby, kdy z každého impulzu nastane výboj. Na *Obr. 14* zle vidět, že skupina impulzů se skládá z velkého počtu výbojů. Naopak od předchozí metody nenastává průrazný výboj zcela výjimečně.

Pro  $n = 1$  s výdržným a výbojovým postupem nalezneme hodnotu  $U_{50}$ . Pro jiné  $n$  ze zkoušky používají na získání hodnot napětí s jinou pravděpodobností průrazného výboje. Zkoušky  $n = 7$  naleznou hodnoty napětí s 10–90% pravděpodobností.

Výsledek zkoušky nahoru-dolů je odhad  $U_p$ , při kterém je pravděpodobnost napětí průrazného výboje dána  $p \cdot U_p^*$  a odhad  $U_p$  vyjádříme vztahem:

$$U_p^* = \sum_{i=1}^l \frac{k_i \cdot U_i}{m} \quad (2.2.1)$$

kde:	$k_i$	- počet skupin namáhání
	$m$	- celkový počet platných hladin
	$U_i$	- napět'ová hladina

Pro zlepšení přesnosti výpočtu a vyhnutí se chyb by se nejnižší napět'ová hladina neměla lišit od  $U_p^*$  o více než  $2\Delta U$ . [21]

Výdržný postup určuje odhad  $U_p$  pro pravděpodobnost průrazného výboje  $p$  daný vztahem:

$$p = 1 - (0,5)^{\frac{1}{n}} \quad (2.2.2)$$

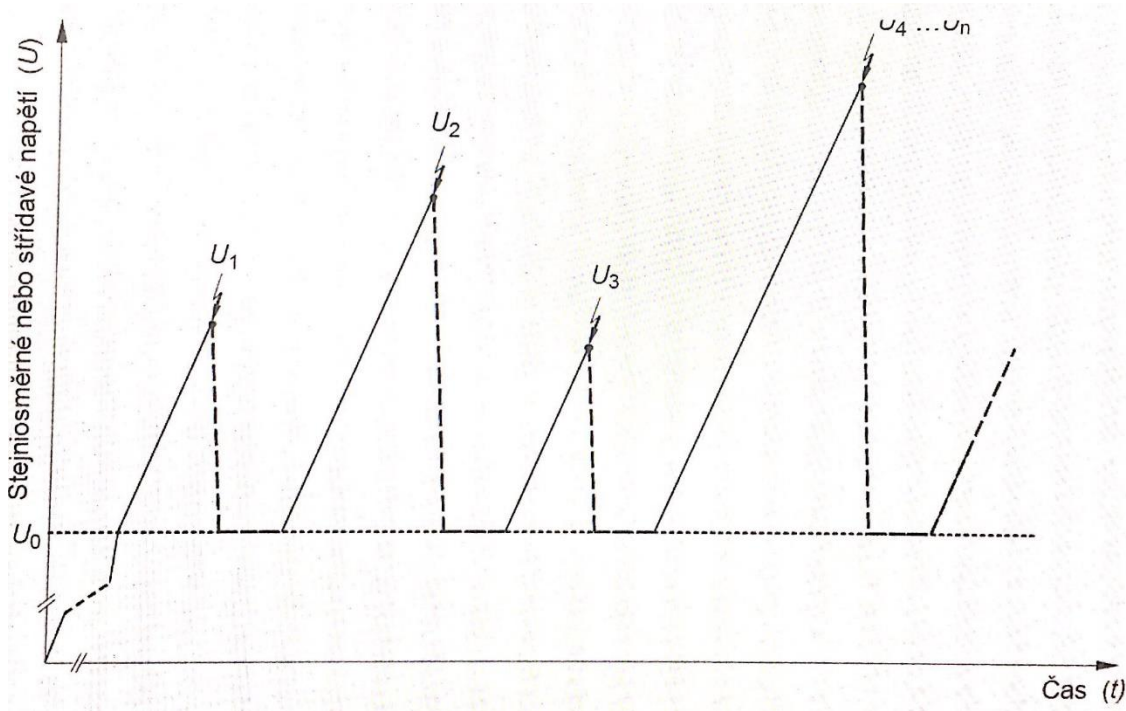
Na rozdíl pro výbojový postup je odhad  $U_p$  pro pravděpodobnost průrazného výboje  $p$  daný ze vztahu:

$$p = (0,5)^{\frac{1}{n}} \quad (2.2.3)$$

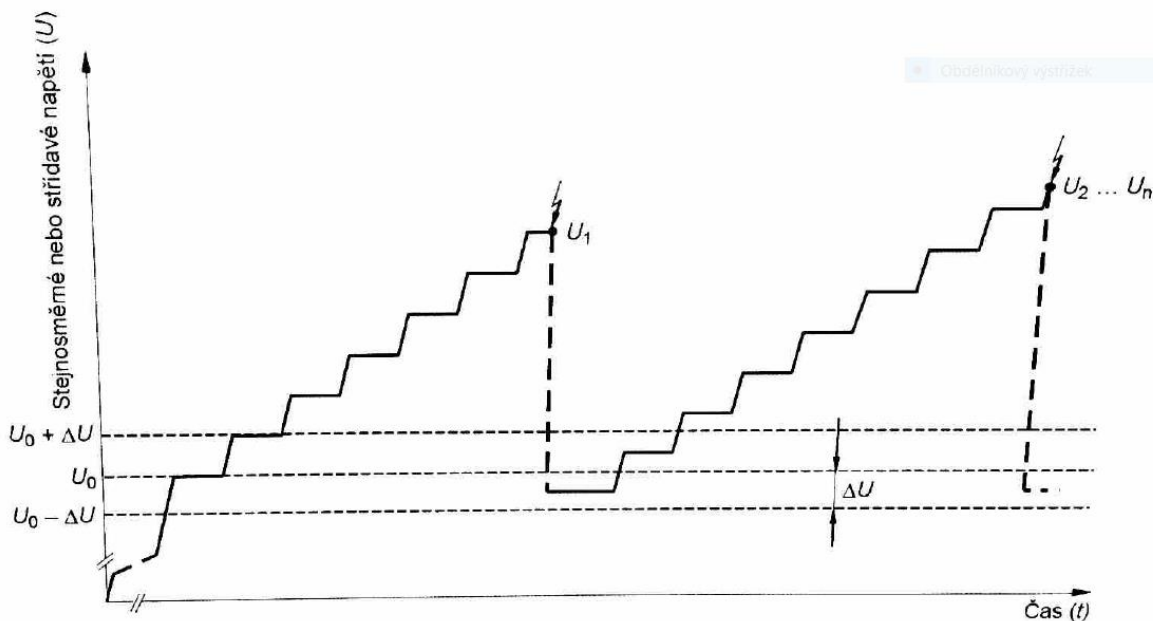
### 2.3 Třída 3: Zkoušky postupným namáháním

Zkouška postupným namáháním je založena na postupném nebo skokovém zvyšování napětí. Napětí zvyšujeme do doby, než nastane výboj, který nastává při napětí  $U_i$  nebo se drží na konstantní hladině, až je pozorován průrazný výboj v čase  $t_i$ . Zkouška využívá postupné nebo plynulé zvyšování stejnosměrného nebo střídavého napětí. Využívá se i impulzní napětí, kde se zvyšuje po krocích amplituda pulzů, což vede vždy k průraznému

výboji, u kterého se zaznamená, při jak velkém napětí nastal.



Obr. 15 Metoda postupným namáháním (třída 3) – souvislé zvyšování napětí (převzato z [21])



Obr. 16 Metoda postupným namáháním (třída 3) – postupným zvyšováním napětí (převzato z [21])

U této metody pozorujeme určité parametry. Mezi tyto parametry patří rychlost zvyšování napětí. V ideálním případě by měla být rychlost zvyšování napětí konstantní. Hlavním důvodem je, aby nedošlo k ovlivnění jednotlivých výsledků. Jako další parametr se u této zkoušky uvažuje doba mezi jednotlivými testy, která je charakterizována jako čas mezi průrazným výbojem předchozího testu a zahájení zvyšování napětí při testu následujícím. První hodnotu napětí, než ji začneme navyšovat, nazýváme jako hodnotu počáteční.

Podmínka při volbě počátečního napětí je, že nejmenší hodnota napětí přeskočků by měla být větší než 1,1krát počátečního napětí. Tyto parametry se týkají metody, kdy dochází k plynulému zvyšování napětí. Pokud uvažujeme metodu se skokovou změnou napětí, musíme počítat s dalšími parametry. Mezi další parametry patří velikost jednotlivého kroku, doba zvyšování napětí a čas trvání jednoho kroku. [21]

### 3 Praktické měření

Tato kapitola se zabývá hlavním úkolem této práce, testování elektrické pevnosti syntetického vzduchu v nehomogenním i homogenním poli při impulzním napěťovém namáhání. Pro měření se používal vzduch složený z 20 % O<sub>2</sub> a 80 % N<sub>2</sub>. Z naměřených hodnot pozorujeme vliv tvaru elektrod, vzdálenosti mezi elektrodami a tlak plynu na velikost přeskokového napětí.

#### 3.1 Měřicí pracoviště

Testování elektrické pevnosti se provádělo v laboratoři vysokého napětí patřící pod elektrotechnickou fakultu Západočeské univerzity v Plzni, která se konkrétně nachází v objektu halových laboratoří strojní fakulty.



Obr. 17 Laboratoř vysokého napětí

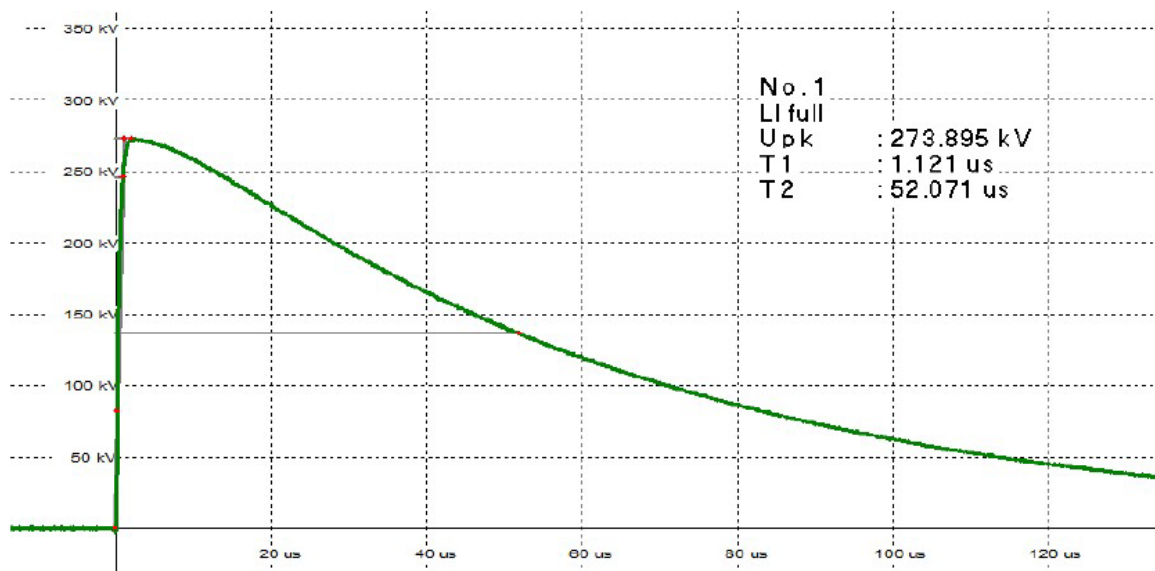
K testování elektrické pevnosti byl použit zdroj stejnosměrného napětí, na kterém se manuálně měnila polarita napětí obrácením diod umístěných na zdroji, impulzní generátor a tlaková nádoba, jejíž popis se vyskytuje níže. Impulzní generátor je řízen pomocí ovládacího zařízení generátoru GC 223 a napájen je ze stejnosměrného zdroje. Ovládací zařízení generátoru slouží k nastavení parametrů pro testování. V menu ovládacího zařízení generátoru se nastaví velikost amplitudy pulzu, polarita napětí současně se změnou polarity

na zdroji a doba nabíjení, která zajišťuje stejný časový interval mezi jednotlivými pulzy a čas nabíjení kondenzátorů. Nakonec se nastaví počet pulzů pro automatické testování sérií pulzů.



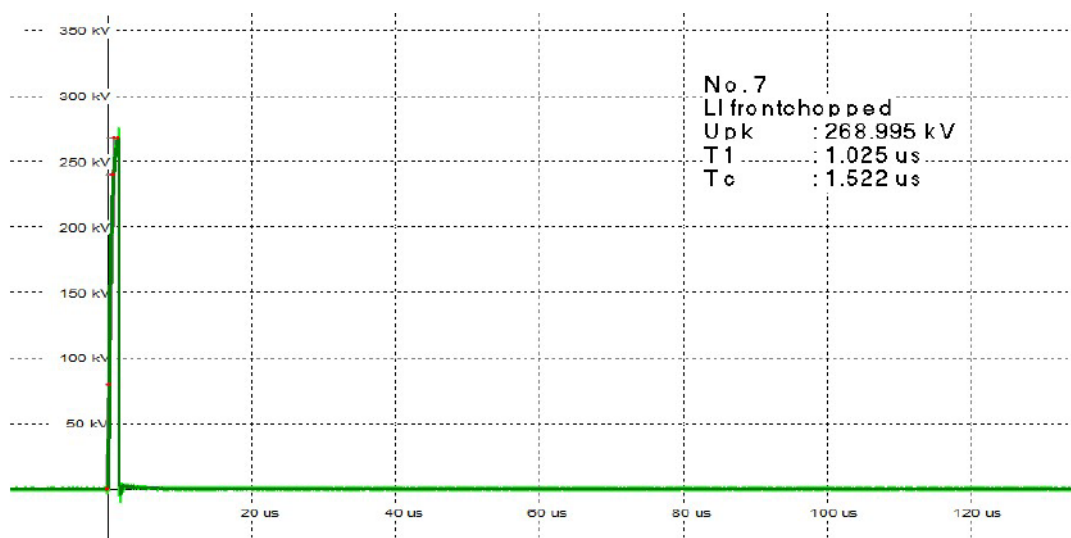
Obr. 18 Ovládací zařízení generátoru GC 223

Záznam a vyhodnocení pulzu se provádí měřicím přístrojem DiAS 733. Jedná se o měřicí přístroj amplitudy napětí, který nejen dokáže změřit vrcholovou hodnotu napětí, ale dokáže i zaznamenat průběh napětí, který se vykreslí pomocí softwaru ve vestavěném počítači. Z průběhu vykresleného lze na monitoru počítače vidět, jestli došlo k přeskočení nebo ne. Napětí musí nejprve upravit na takovou hodnotu, aby nedošlo k poškození vyhodnocovacích přístrojů. Úpravu impulzního napětí provádíme přes vysokonapěťový dělič. Obě zařízení, řídicí i měřicí jednotka, jsou od výrobce Haefely Hipotronics.



Obr. 19 Průběh napětí

Na Obr. 19 je průběh vygenerovaný měřicím přístrojem DiAS 733. Z průběhu vidíme, že nedošlo k přeskočení mezi elektrodami. Na rozdíl od Obr. 20, kde je zobrazen průběh, ve kterém k přeskočení došlo.



Obr. 20 Průběh napětí

### Popis tlakové nádoby

Elektrody různého tvaru, na nichž jsme uskutečnili veškerá měření, musely být umístěny do tlakové nádoby. Do nádoby byly umístěny z důvodu, aby bylo možné nastavit požadovaný tlak daného plynného media. Elektroda přivedena na potenciál země neboli uzemněna byla vždy elektroda kulového tvaru o poloměru 15 mm. Proti ní byla elektroda pod napětím, tvořená hrotem s různými velikostmi poloměru jeho zaoblení. Elektrody s hrotem sloužily k vytvoření nehomogenního pole. Pro vytvoření pole homogenního byly obě elektrody kulového tvaru o poloměru 15 mm.



Obr. 21 Tlaková nádoba



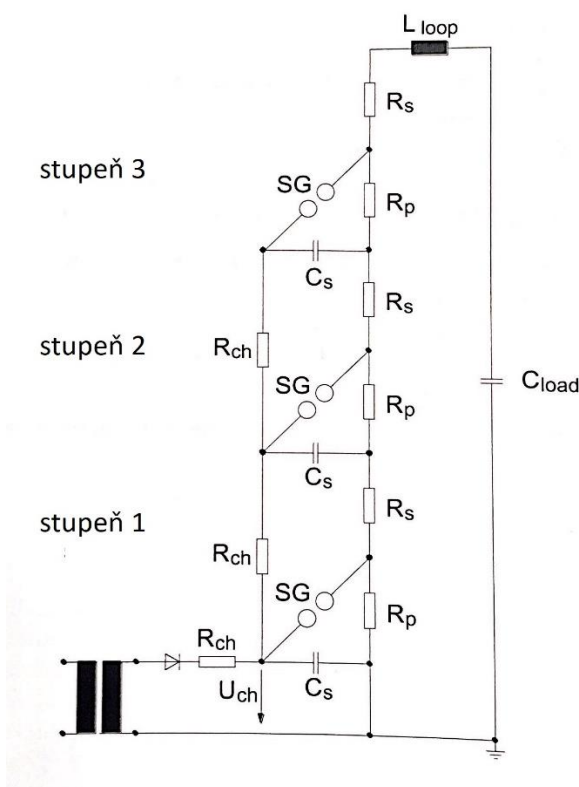
Obr. 22 Vývěva

Na jedné straně nádoby je umístěn přívodní ventil pro napouštění plynu. Na přívodní ventil je připojena tlaková nádoba se systémem regulace vpouštění plynu. Na druhé straně je ventil, na které je připojena vývěva, která slouží k odčerpání plynu a k vytvoření podtlaku.

## Popis impulzního generátoru

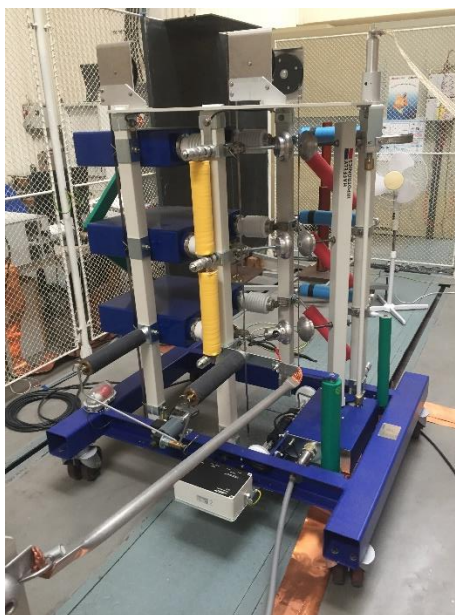
Ke zkouškám elektrické pevnosti využíváme rázový generátor, který slouží ke generování impulzních přepětí. V laboratoři VN se využívá vícestupňový generátor od společnosti HAEFELY, konkrétně třístupňový. První generátor rázových impulzů byl vynalezen v roce 1923, sestrojil ho německý fyzik E. Max.

Rázový generátor slouží k tvorbě vysokonapětových impulzů z nízkonapětového stejnosměrného zdroje. Generátor tohoto typu nebo-li Marxovy generátory slouží k fyzikálním experimentům. V energetice se využívají k testování odolnosti elektrických vedení a izolace transformátorů.



Obr. 23 Náhradní schéma použitého 3-stupňového generátoru

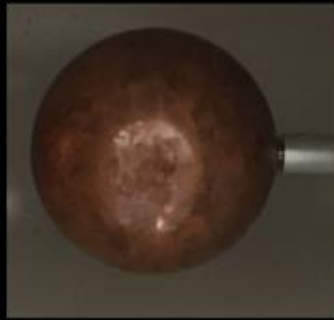



Levá část schématu je součástí nabíjecího procesu, kde je řada kondenzátorů  $C_S$  připojena k rezistoru  $R_{ch}$ . Kondenzátory  $C_S$  jsou nabíjeny přes rezistory  $R_{ch}$  ve všech stupních. Musíme zvolit vhodnou dobu pro nabíjení kondenzátoru  $C_S$ , aby byla dostatečně dlouhá pro nabití kondenzátorů ve všech stupních. Proto je rezistor v prvním stupni menší než rezistor pro druhý a třetí stupeň. V našeho měření byla doba nabíjení kondenzátorů 30 sekund. Konkrétní nabíjení probíhá nejprve nabitím kondenzátoru na požadované napětí připojeného zdroje, které vyvolá v jiskřišti  $SG$  jiskrový výboji. To způsobí sériové spojení všech kondenzátorů  $C_S$  přes jiskřiště a čelní rezistory  $R_a$ . Po přeskoku dojde k nabití kondenzátoru  $C_{load}$ . [7]



Obr. 24 Impulzní generátor

Rázový generátor použitý při našem měření byl složen ze tří stupňů. Maximální napětí jednoho kondenzátoru je 100 kV, při třech stupních je maximální hodnota pulzu 300 kV.

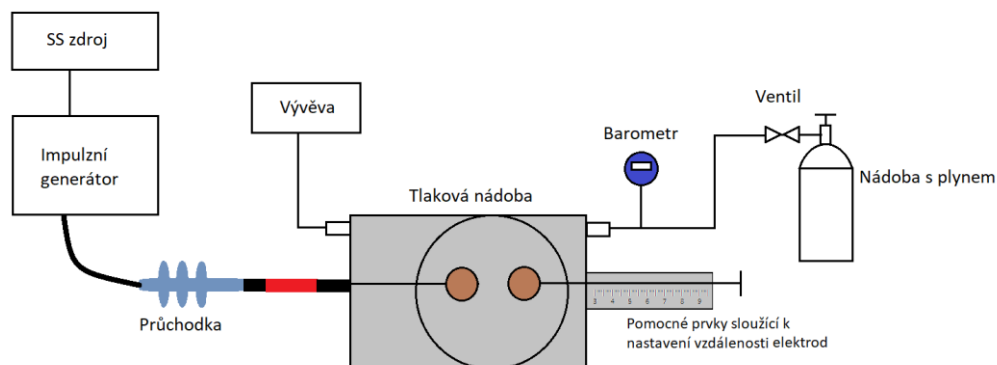
### Popis použitých elektrod

R75	R0,5	R2	R4
			
R = 15 mm	R = 0,5 mm	R = 2 mm	R = 4 mm

Obr. 25 Použité elektrody s poloměrem zakřivení  $R$

Obr. 25 ukazuje použité elektrody při tomto měření a jejich poloměr zakřivení. Každá elektroda se od sebe liší svým stupněm nehomogenity.

### 3.2 Schéma zapojení



Obr. 26 Schéma zapojení pro měření elektrické pevnosti

### 3.3 Postup měření

Jelikož se měření provádí pod vysokým napětím, je nutno dodržovat veškeré bezpečnostní předpisy. Proto musíme před vstupem do prostoru měření s vysokým napětím vyzkratovat možné naakumulované náboje pomocí zkratovací tyče. Před započítím měření jsme do tlakové nádoby nainstalovali danou elektrodu, na které právě chceme měřit. Po umístění elektrod nádobu utěsníme, aby nedošlo k úniku plynu. Jako další krok jsme si nastavili vzdálenost elektrod od sebe. Než ale budeme chtít napustit tlakovou nádobu plynem, musíme nejprve pomocí vývěvy odčerpat veškerý vzduch a vytvořit podtlak. K tlakové nádobě je připojena láhev s požadovaným plynem. Pomocí ovládacího ventilu jsme napustili plyn. Napouštíme do doby, než nám digitální manometr ukáže požadovanou hodnotu. Po přípravě v laboratoři odstraníme zkratovací tyč a zavřeme dveře od laboratoře opatřené blokovacím kontaktem. Ještě před úplným měřením si zapíšeme hodnoty teploty a vlhkosti v místnosti. Pracoviště máme připravené a můžeme zapnout řídicí panel, nastavit velikost amplitudy pulzů a počet pulzů. Na každé napěťové hladině jsme aplikovali 25 pulzů, které jsme přivedli na elektrody. Malým okýnkem v tlakové nádobě jsme sledovali, jestli došlo k přeskoku mezi elektrodami, a zároveň jsme na monitoru pozorovali průběh napětí. Nejprve jsme si našli napěťovou hladinu, kde nedojde k žádnému přeskoku, a dále jsme napěťovou hladinu zvyšovali postupně po 5 kV u elektrod R0.5, R2, a R4 do doby, než na napěťové hladině nastalo více než 90 % přeskoků. U elektrody R75 jsme postupně zvyšovali napěťovou hladinu po 10 kV. Stalo-li se tak, zvětšíme vzdálenost mezi elektrodami a znovu měříme.



### 3.4 Vyhodnocení měření

V této kapitole budeme popisovat vliv jednotlivých parametrů na elektrickou pevnost syntetického vzduchu. Mezi ty to parametry patří vzdálenost, tlak, polarita, tvar elektrod a druh použitého plynu.

#### 3.4.1 Vliv vzdálenosti elektrod

Za prvé jsme se rozhodli porovnat vliv vzdálenosti elektrod na velikosti přeskovového napětí. Dle získaných teoretických znalostí je elektrická pevnost s rostoucí vzdáleností větší.

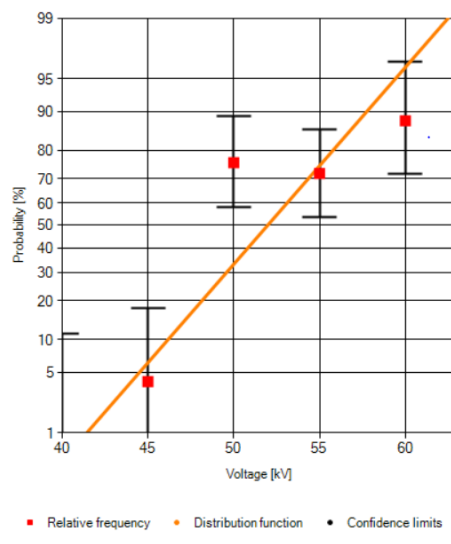
Měření jsme prováděli pro různé tlaky a pro tři různé vzdálenosti elektrod (40, 60 a 90 mm). Měření jsme začali na vzdálenosti 40 mm, tlaku 1 baru, první elektroda byla kulového tvaru o poloměru 150 mm a druhá elektroda, která byla pod napětím a přiváděly se na ni pulzy, byla ve tvaru hrotu o poloměru 0,5 mm. Pro každý test jsme si vytvořili tabulku, do které jsme zaznamenali výsledky měření. Přeskoky jsme označovali v tabulkách písmenem *x*.

Tab. 2 Záznam prvního měření při parametrech: elektrody R0,5/R75, 40mm, 1 bar

U [kV]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	Σ	
35																										0	
40																											0
45										x																	1
50		x		x	x	x		x		x	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x		x	x	x	x	19
55	x	x	x	x	x	x		x	x			x		x	x	x	x		x	x	x	x	x				18
60	x	x		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x	x		x		22
65	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	X	x	x	x	x	x	x	x	x	25

Jak už bylo řečeno výše, nejprve jsme si našli hladinu, kde nedošlo k žádnému přeskoku. To se provádí za účelem zjištění, zda na nižších napěťových hladinách nevznikne žádný přeskok. Dále jsme napěťovou hladinu zvyšovali krokem 5 kV a můžeme vidět, jak roste počet přeskoků na napěťových hladinách.

Pomocí nástroje pro statické vyhodnocování testů se z naměřených hodnot vykreslí graf, který vidíme na *Obr. 27*. Z grafu pak vyplývá velikost pravděpodobností přeskoků.



Obr. 27 Vyhodnocené pravděpodobnosti přeskoku u testu R0,5/R75, 40 mm, 1bar

Měření jsme opakovali pro zbylé vzdálenosti. Výsledky pro tyto vzdálenosti jsou uvedeny v přílohách A. Pro přehlednost při vyhodnocování vlivu vzdálenosti elektrod jsme naměřené hodnoty umístili do jedné tabulky.

Tab. 3 Naměřené hodnoty pro tři různé vzdálenosti při tlaku 1 bar

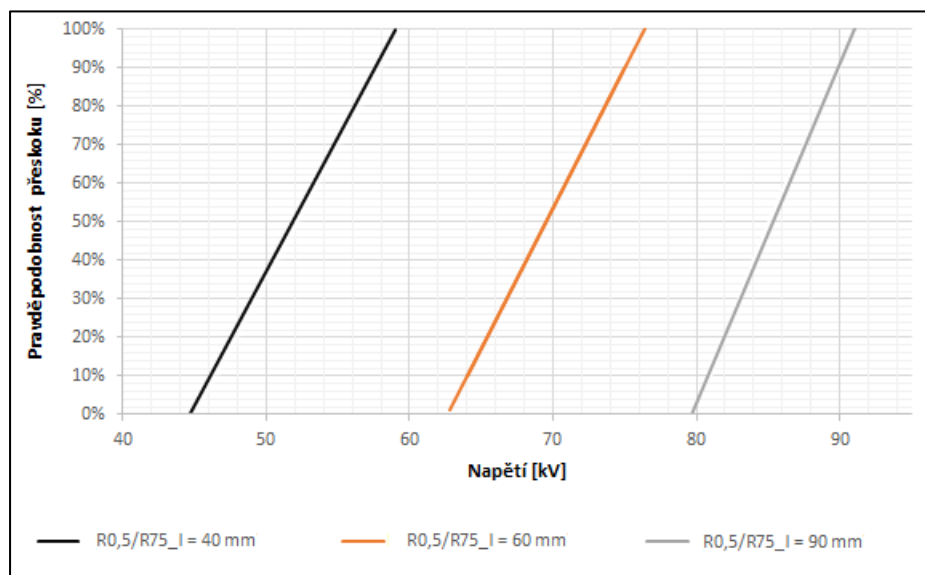
R0,5/R75					
l = 40 mm		l = 60 mm		l = 90 mm	
U [kV]	přeskoky	U [kV]	přeskoky	U [kV]	přeskoky
35	0	55	0	75	0
40	0	60	0	80	1
45	1	65	7	85	19
50	19	70	14	90	20
55	18	75	25	95	25
60	22				
65	25				

V Tab. 3 na první pohled vidíme, jak s rostoucí vzdáleností rostou i hladiny napětí na kterých dochází ke stejnému nebo podobnému počtu přeskoků. Dále ze získaných hodnot lze určit pravděpodobnost přeskoku na dané napěťové hladině. Určujeme napětí  $U_{10}$ ,  $U_{50}$  a  $U_{90}$  podle pravděpodobností přeskoku. U napětí  $U_{10}$  dochází k přeskoku s 10 % pravděpodobností a jedná se o maximální hodnotu výdržného napětí. U napětí  $U_{90}$  dochází k přeskoku s 90 % pravděpodobností a nazýváme ho přeskokové napětí. Všechny tři hodnoty odečítáme se získaných grafů v příloze A.

Tab. 4 Hodnoty napětí pro 10 %, 50 % a 90 % pravděpodobnost přeskočení

R0,5/R75			
l [mm]	U <sub>10</sub> [kV]	U <sub>50</sub> [kV]	U <sub>90</sub> [kV]
40	46	52	57,5
60	64	69,5	75
90	81	85	90

Z Tab. 4 si můžeme ověřit, že s rostoucí vzdáleností roste i napětí při kterém dochází k přeskočení. To znamená, že s rostoucí vzdáleností roste i elektrická pevnost. Pro vzdálenost 40 mm byla hodnota výdržného napětí 46 kV a pro vzdálenost 90 mm se hodnota napětí o 45 % zvětšila na hodnotu 81 kV. Tím pádem můžeme říci, že elektrická pevnost roste se zvětšující se vzdáleností. Nejedná se o rovnoměrný růst, což zapříčinila nehomogenita elektrického pole, která se s rostoucí vzdáleností mění.



Obr. 28 Porovnání pravděpodobnostních funkcí (přímek) pro tři vzdálenosti a tlak 1 bar

Pro porovnání jsou pravděpodobnostní funkce (přímky) umístěné do jednoho grafu (Obr. 28). Na první pohled na Obr. 28 vidíme, že pravděpodobnostní funkce u vzdálenosti 40 mm a 60 mm mají téměř stejný sklon. Největší rozdíl ve sklonu přímek je u vzdálenosti 90 mm, kde se sklon více liší od ostatních dvou přímek. Tento rozdíl můžeme zaznamenat i v Tab. 4, kdy byl u vzdálenosti 40 mm rozdíl mezi průrazným a výdržným napětím 11,5 kV, u vzdálenosti 60 mm 11 kV a u vzdálenosti 90 byl tento rozdíl nejmenší o 9 kV.

### 3.4.2 Vliv velikosti tlaku

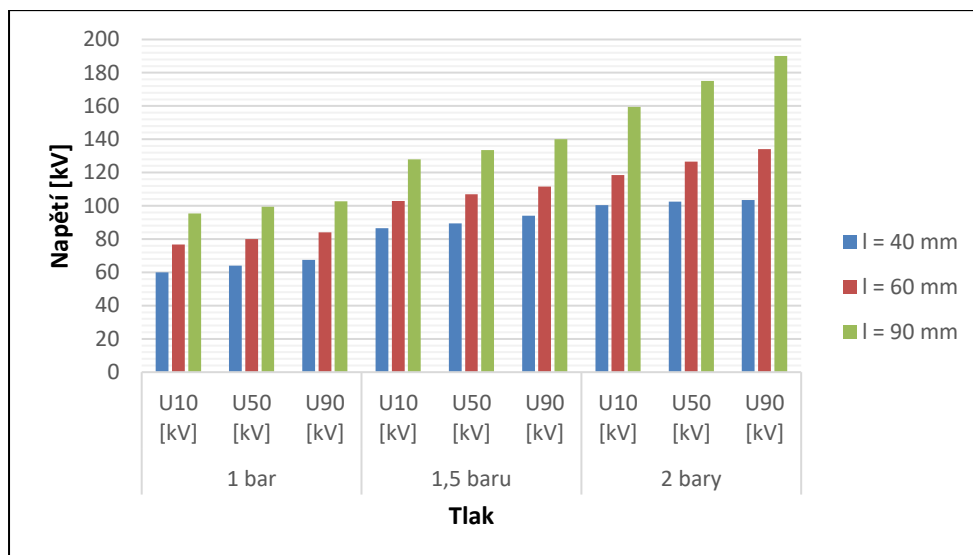
Velikost tlaku nádoby zvýšíme dopuštěním plynu z lahve na požadovaný tlak. Očekáváme, že s rostoucím tlakem roste i elektrická pevnost. Pro vyhodnocení vlivu tlaku jsme si zvolili uspořádání elektrod R2/R75. To znamená, že elektroda, na které přivádíme napěťové pulzy, je hrotového tvaru s poloměrem hrotu 2 mm. Pro porovnání vlivu tlaku jsme zvolili tři různé tlaky.

Tab. 5 Naměřené hodnoty pro tři vzdálenosti a tři různé tlaky

R2/R75				
Tlak	Napětí	Vzdálenost		
		l = 40 mm	l = 60 mm	l = 90 mm
1 bar	U <sub>10</sub> [kV]	60	76,7	95,5
	U <sub>50</sub> [kV]	64,1	80	99,5
	U <sub>90</sub> [kV]	67,5	84	102,7
1,5 baru	U <sub>10</sub> [kV]	86,5	103	128
	U <sub>50</sub> [kV]	89,5	107	133,5
	U <sub>90</sub> [kV]	94	111,5	140
2 bary	U <sub>10</sub> [kV]	100,5	118,5	159,5
	U <sub>50</sub> [kV]	102,5	126,5	175
	U <sub>90</sub> [kV]	103,5	134	190

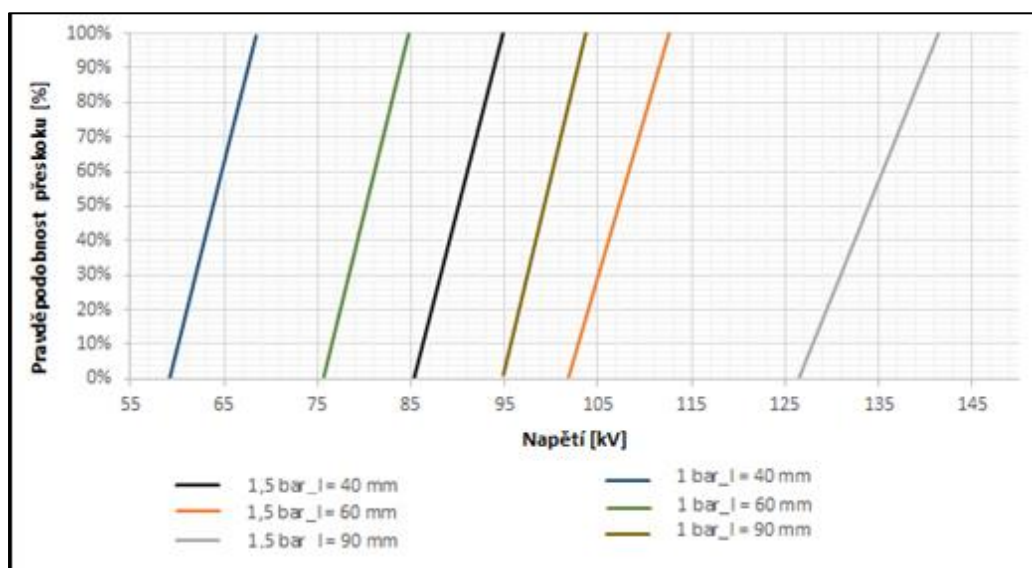
V *Velikost tlaku* nádoby zvýšíme dopuštěním plynu z lahve na požadovaný tlak. Očekáváme, že s rostoucím tlakem roste i elektrická pevnost. Pro vyhodnocení vlivu tlaku jsme si zvolili uspořádání elektrod R2/R75. To znamená, že elektroda, na které přivádíme napěťové pulzy, je hrotového tvaru s poloměrem hrotu 2 mm. Pro porovnání vlivu tlaku jsme zvolili tři různé tlaky.

Tab. 5 vidíme, jak s rostoucím tlakem roste výdržné a přeskokové napětí. Z toho můžeme usoudit, že s rostoucím tlakem narůstá i elektrická pevnost. Pro přehlednost se naměřené hodnoty vloží do jednoho grafu (*Obr. 29*).



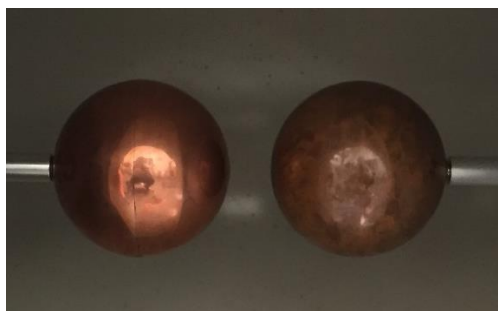
Obr. 29 Porovnání elektrické pevnosti pro tři různé tlaky u elektrod R2/R75

V grafu (Obr. 29) vidíme, že při tlaku 1 bar a vzdálenosti 40 mm hodnota výdržného napětí  $U_{10}$  vyšla 60 kV. Při navýšení tlaku na dvojnásobnou hodnotu 2 bary se navýšila elektrická pevnost o 40,5 kV. U vzdálenosti 60 mm byl nárůst elektrické pevnosti o 41,8 kV. Pro vzdálenost 90 mm byl nárůst největší o 64 kV.



Obr. 30 Porovnání pravděpodobnostních funkcí přeskočků pro dvě hodnoty tlaku a tři vzdálenosti u elektrody s hrotem o poměru 2 mm

Při použití dvou stejných elektrod kulového tvaru o poloměru 150 mm jsme mohli měřit hodnoty pouze pro tlak 1 a 1,5 baru. Pro tlak 1,5 baru bylo možné uskutečnit testy maximálně do vzdálenosti 40 mm. Při měření ostatních dvou vzdáleností by muselo dojít k překročení maximálního napětí rázového generátoru. Z toho důvodu neporovnáváme vliv tlaku u elektrod kulového tvaru o poloměru 150 mm. Naměřené hodnoty využijeme u porovnání tvaru elektrod.



Obr. 31 Elektrody kulového tvaru o poloměru 150 mm

### 3.4.3 Vliv tvaru elektrod

Hlavním parametrem ovlivňujícím elektrickou pevnost je tvar použité elektrody. Tvar, tedy rádie zakřivení elektrod ovlivňují výsledný tvar elektrického pole. Při posouzení vlivu tvaru elektrod jsme nejprve provedli měření při konstantním tlaku 1 bar pro vzdálenosti 40 mm, 60 mm a 90 mm. Použitá elektroda měla hrot s poloměrem 4 mm. Naměřené hodnoty najdeme v příloze D.

Tab. 6 Naměřené hodnoty pro elektrody R4/R75

l = 40 mm		l = 60 mm		l = 90 mm	
U [kV]	přeskoky	U [kV]	přeskoky	U [kV]	přeskoky
40	0	55	0	80	0
45	0	60	2	85	0
50	4	65	12	90	0
55	15	70	17	95	9
60	22	75	24	100	19
65	25			105	25

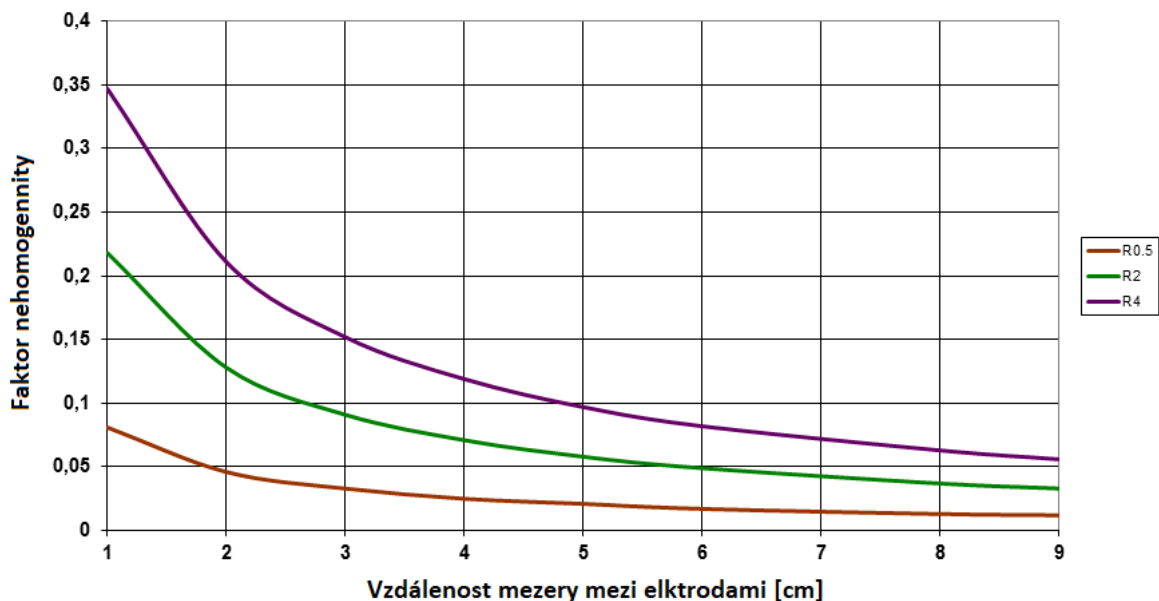
V Tab. 6 vidíme naměřené hodnoty pro elektrodu s hrotem o poloměru 4 mm. Z naměřených hodnot stanovíme napětí  $U_{10}$ ,  $U_{50}$  a  $U_{90}$  podle pravděpodobností přeskoku. Získané hodnoty  $U_{10}$ ,  $U_{50}$  a  $U_{90}$  dále porovnáme s výsledky naměřených hodnot pro ostatní použité elektrody (Obr. 25).

Jako u ostatních měření jsme postupovali s krokem 5 kV. Opět si můžeme všimnout, jak s rostoucí vzdáleností roste elektrická pevnost. Pro jednoduchost a přehlednost vyhodnocení, jak tvar elektrod ovlivňuje elektrickou pevnost, umístíme veškeré získané hodnoty napětí  $U_{10}$ ,  $U_{50}$  a  $U_{90}$  pro tři různé vzdálenosti do jediné tabulky. Porovnááme získané hodnoty při konstantním tlaku 1 bar.

Tab. 7 Naměřené hodnoty pro různé typy elektrod

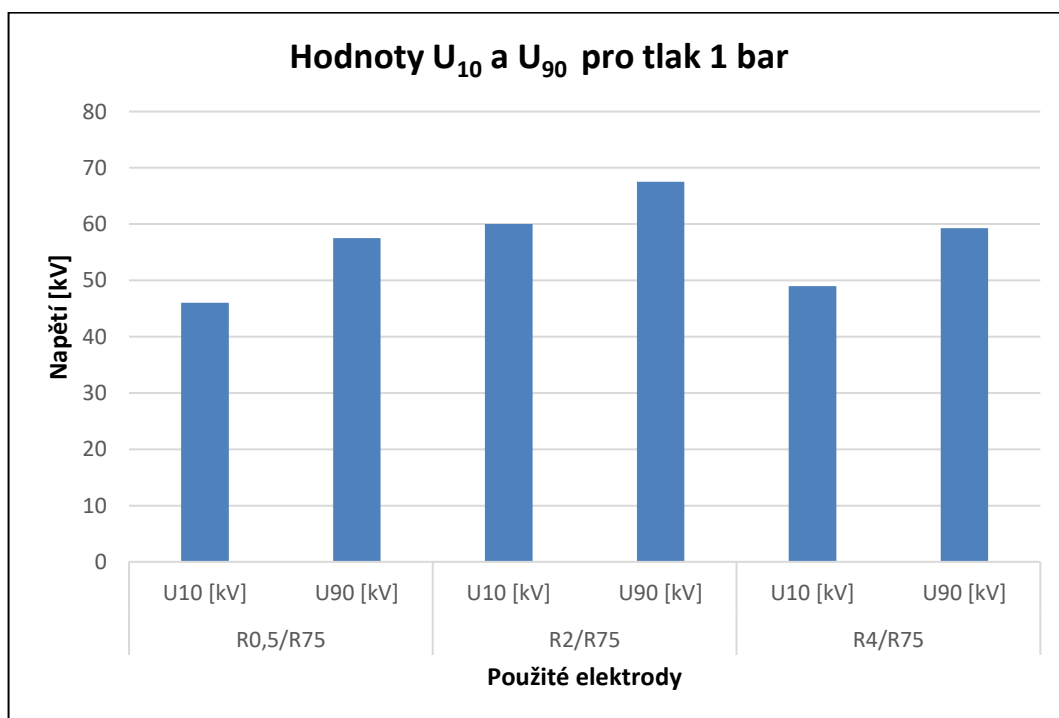
Tlak = 1 bar				
Elektrody	Napětí	Vzdálenost		
		l = 40 mm	l = 60 mm	l = 90 mm
R0,5/R75	U <sub>10</sub> [kV]	46	64	81
	U <sub>50</sub> [kV]	52	69,5	85
	U <sub>90</sub> [kV]	57,5	75	90
R2/R75	U <sub>10</sub> [kV]	60	76,7	95,5
	U <sub>50</sub> [kV]	64,1	80	99,5
	U <sub>90</sub> [kV]	67,5	84	102,7
R4/R75	U <sub>10</sub> [kV]	49	61,1	91,1
	U <sub>50</sub> [kV]	54,2	67,8	96,2
	U <sub>90</sub> [kV]	59,3	74	101,2
R75/R75	U <sub>10</sub> [kV]	132,7	168	190
	U <sub>50</sub> [kV]	148	193	221
	U <sub>90</sub> [kV]	169	216,5	261,6

Ze získaných hodnot, které jsme zaznamenali v Tab. 7, můžeme porovnat vlivy jednotlivých elektrod na elektrickou pevnost. Vidíme, jak se mění elektrická pevnost, což je způsobeno právě tím, že se mění míra nehomogenity pole následkem různého poloměru zakřivení hrotu elektrod. To lze vidět na Obr. 32, který ukazuje, jak se u jednotlivých elektrod mění stupeň nehomogenity v závislosti na velikosti mezery mezi elektrodami.



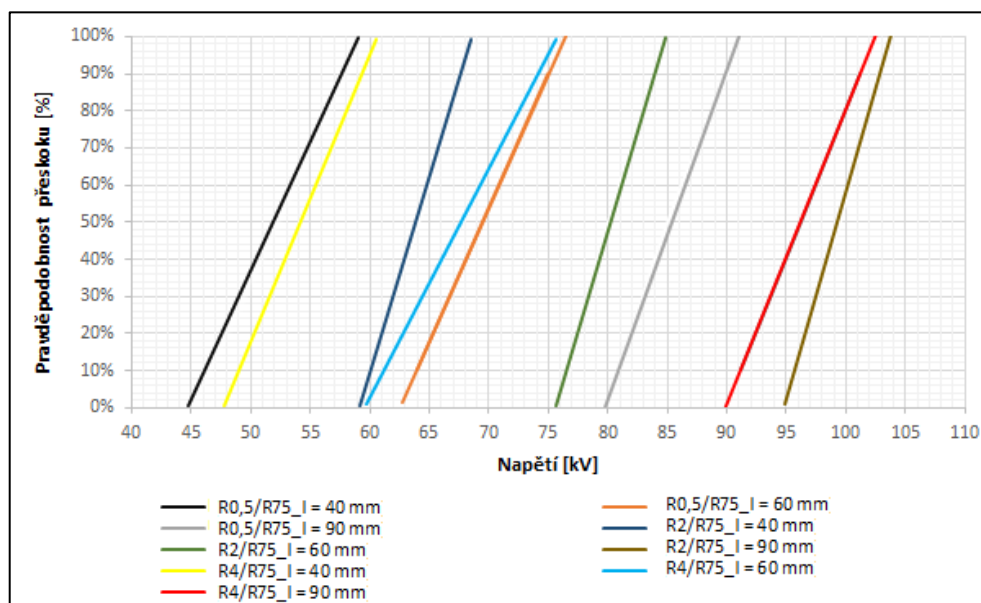
Obr. 32 Schwaigrův faktor nehomogenity  $\eta$  v závislosti na velikosti mezery

Pro porovnání elektrod si vybereme elektrody s hrotem o poloměru 0,5 mm a poloměrem 2 mm. Pro tyto elektrody sestavíme graf, kde se budou porovnávat pro vzdálenost 40 mm. Jak z *Tab. 7*, tak i z *Obr. 33* lze vidět, jak se hodnoty výdržného napětí  $U_{10}$  a přeskokového napětí  $U_{90}$  s poloměrem elektrody zvětšují. Rozdíl výdržného napětí pro tyto typy elektrod u vzdálenosti 40 mm je 14 kV. U vzdálenosti 90 mm je rozdíl napětí 14,5 kV. Tím pádem je větší i hodnota přeskokového napětí  $U_{90}$  u elektrody R2, a to o 12 kV u vzdálenosti 40 mm.



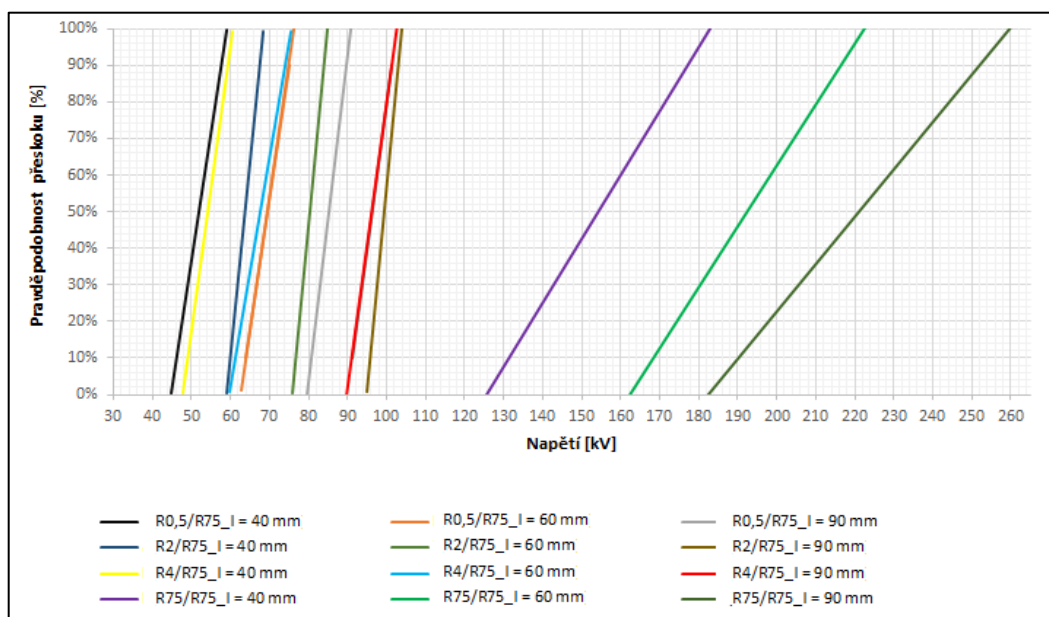
Obr. 33 Porovnání elektrod R0,5, R2 a R4 pro vzdálenost 40 mm a tlak 1 bar





Obr. 34 Porovnání pravděpodobnostních funkcí přeskočení pro tři typy elektrod

Jednotlivé pravděpodobnostní přímky pro různé typy elektrod a vzdálenosti jsou umístěny v přílohách. Pro porovnání pravděpodobnostní přímky přeskočení elektrod R4, R2 a R0,5 jsou zobrazeny do jednoho grafu na Obr. 34. Z grafu můžeme vidět, jak se sklony přímek pro elektrody R0,5 a R4 podobají. Z teoretických předpokladů s rostoucím poloměrem roste faktor homogenity, a tedy se zmenšuje faktor nehomogenity. To se neprokázalo při měření elektrod s hrotem o poloměru 2 a 4 mm, kdy byla právě naopak elektrická pevnost větší u elektrody s menším poloměrem, to lze vidět na Obr. 34. Doporučovali bychom pro ověření přeměření všech elektrod při tlaku 1 bar.



Obr. 35 Porovnání pravděpodobnostních funkcí přeskočení pro homogenní a nehomogenní pole

Dále lze porovnat, jak se liší hodnoty  $U_{10}$  a  $U_{90}$  pro homogenní a nehomogenní pole. Z teoretických předpokladů vycházíme, že elektrická pevnost je větší u homogenního pole než u pole nehomogenního. Toto tvrzení jsme si ověřili. Pro homogenní pole jsme naměřil hodnoty výdržného a přeskokového napětí více než dvojnásobné. Konkrétně u vzdálenosti 90 mm je rozdíl  $U_{10}$  mezi elektrodami R4 a R75 98,9 kV. U hodnoty  $U_{90}$  byl rozdíl elektrické pevnosti o 160,4 kV. Pro porovnání homogenního a nehomogenního pole jsme k *Obr. 34* Porovnání pravděpodobnostních funkcí přeskoků pro tři typy elektrod přidali přímky pravděpodobnosti přeskoků naměřené u elektrod s poloměrem 150 mm, za podmínky, že se jedná o homogenní pole. Výsledek je na *Obr. 35*, kde se nachází pravděpodobnostní funkce (přímky) pro elektrody R0,5, R2 a R4 reprezentující pole nehomogenní a vpravo se nachází přímky reprezentující elektrodu R75, a tedy homogenní pole.

#### 3.4.4 Vliv polarit napětí

Mezi další parametry, které by mohly ovlivňovat elektrickou pevnost, patří polarita napětí, kterou přivádíme na elektrodu. Oproti předchozím testům byla záporná polarita změřena pouze u elektrody s hrotem o poloměru 4 mm a elektrody kulového tvaru s poloměrem 150 mm. V případě 4mm elektrody bylo mezi elektrodami nehomogenní pole, kde jsme předpokládali vliv polarit impulsu na výslednou pevnost. V případě 150 mm elektrody pod napětím i na straně uzemnění, tedy v případě homogenního pole jsme předpokládali, že se polarita impulsu neprojeví na výsledné pevnosti. U elektrody R4 jsme si zvolili tlak 1,5 a 2 bary pro vzdálenost 40 mm. U elektrody R75 jsme si pro porovnání zvolil 1 bar. Naměřené hodnoty jsem vložil do jediné tabulky pro porovnání.

Tab. 8 Porovnání vlivu polarit u elektrody R4

Elektrody R4/R75, vzdálenost 40 mm							
Tlak = 1,5 baru				Tlak = 2 bary			
U [kV]	přeskoky	U [kV]	přeskoky	U [kV]	přeskoky	U [kV]	přeskoky
75	0	-100	0	70	0	-100	0
80	1	-105	15	75	1	-115	10
85	0	-110	17	80	14	-120	2
90	9	-115	25	85	23	-125	24
95	0						
100	14						
110	20						

115	6
120	19
125	19
130	21
135	22

V Tab. 8 vidíme, že při tlaku 1,5 baru je elektrická pevnost větší při přivedení kladné polaritě napětí. Naopak je to u tlaku 2 bary, kdy je elektrická pevnost větší u záporné polaritě než u polaritě kladné. Hodnoty se v tomto případě liší o 40 kV.

Tab. 9 Porovnání vlivu polaritě u elektrody R75

l = 60 mm				l = 90 mm			
U [kV]	přeskoky	-U [kV]	přeskoky	U [kV]	přeskoky	-U [kV]	přeskoky
160	1	-170	0	180	1	-180	0
170	4	-180	0	190	2	-190	6
180	10	-190	3	200	10	-200	14
190	9	-200	11	210	9	-210	25
200	15	-210	15	220	11		
210	16	-220	21	230	11		
220	21	-230	25	240	17		
230	25			250	14		
				260	25		

U homogenního pole při tlaku 1 bar a vzdálenosti 60 mm byly výsledky téměř totožné. Z 25 pulzů došlo k 25 přeskokům na stejné napěťové hladině. Jediným rozdílem byl v napěťové hladině, na které začalo docházet k přeskokům. U kladné polaritě napětí došlo k přeskokům mezi elektrodami na hladině 160 kV, na rozdíl od záporné polaritě, kdy přeskok nastal až při napětí -190 kV. U vzdálenosti 90 mm byly výsledky velice odlišné. Lze si povšimnout, že elektrická pevnost je vyšší při kladné polaritě napětí, ale oproti předchozí vzdálenosti nenastal takový rozdíl napětí, ke kterému docházelo při prvních přeskocích.

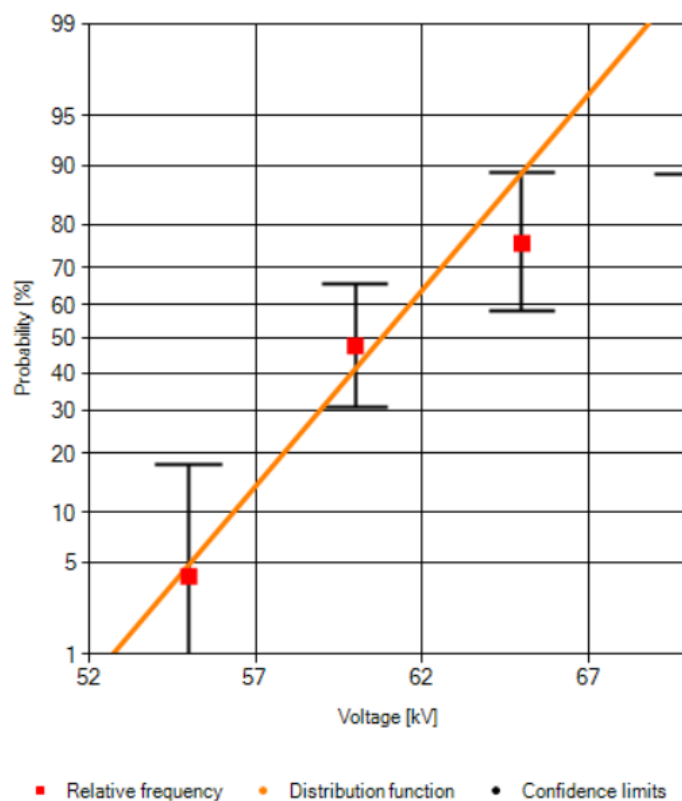
### 3.4.5 Vliv použitého plynu

Mezi velmi důležitý vliv, na kterém závisí elektrická pevnost, je druh použitého plynu. V našem případě jsme u všech měření používali syntetický plyn se složením 20 % O<sub>2</sub> + 80 % N<sub>2</sub>. Měření jsme zkusili i pro obyčejný vzduch, abychom zjistili, jak velký rozdíl elektrické pevnosti je mezi vzduchem a syntetickým vzduchem. Měření jsme provedli pro elektrody R0,5 a R2, které dále porovnáme s předchozími naměřenými hodnotami pro stejné elektrody s tlakem 1 bar.

Tab. 10 Naměřené hodnoty se vzduchem pro elektrodu R0,5

R0,5/R75					
l = 40 mm		l = 60 mm		l = 90 mm	
U [kV]	přeskoky	U [kV]	přeskoky	U [kV]	přeskoky
40	0	50	0	75	0
45	7	55	1	80	1
50	22	60	12	85	13
		65	19	90	22
		70	25	95	24

Pro porovnání se syntetickým plynem opět stanovíme hodnoty  $U_{10}$ ,  $U_{50}$  a  $U_{90}$ , které určíme z grafu (Obr. 36). Tyto hodnoty napětí stanovíme pro obě použité elektrody a pro tři různé vzdálenosti.

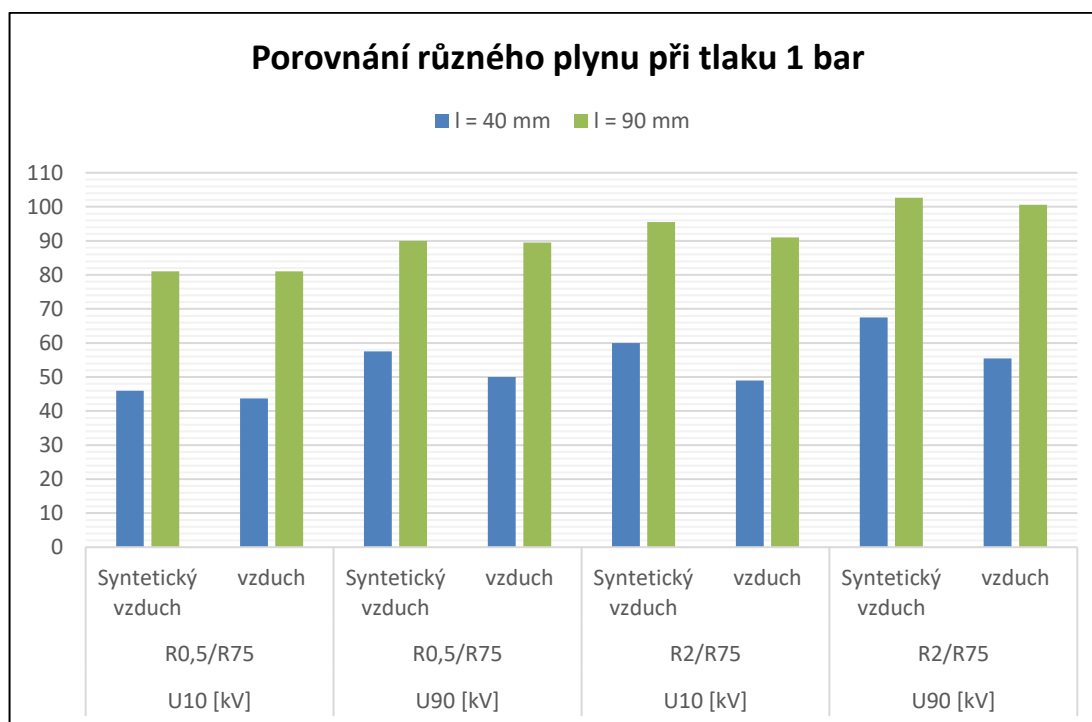


Obr. 36 Elektroda R0,5 se vzdáleností 60 mm (plyn: vzduch)

Z grafu na Obr. 36 odečteme hodnoty  $U_{10}$ ,  $U_{50}$  a  $U_{90}$ . Hodnota výdržného napětí  $U_{10}$  je po odečtení z grafu 56,5 kV a hodnota přeskovového napětí  $U_{90}$  je 65 kV. Hodnota  $U_{50}$  je 61 kV. Pro přehlednost vložíme hodnoty pro elektrody R0,5 a R2 naměřené pro syntetický a obyčejný vzduch pro všechny tři vzdálenosti do jedné tabulky.

Tab. 11 Porovnání hodnot napětí  $U_{10}$ ,  $U_{50}$  a  $U_{90}$  pro syntetický a obyčejný vzduch

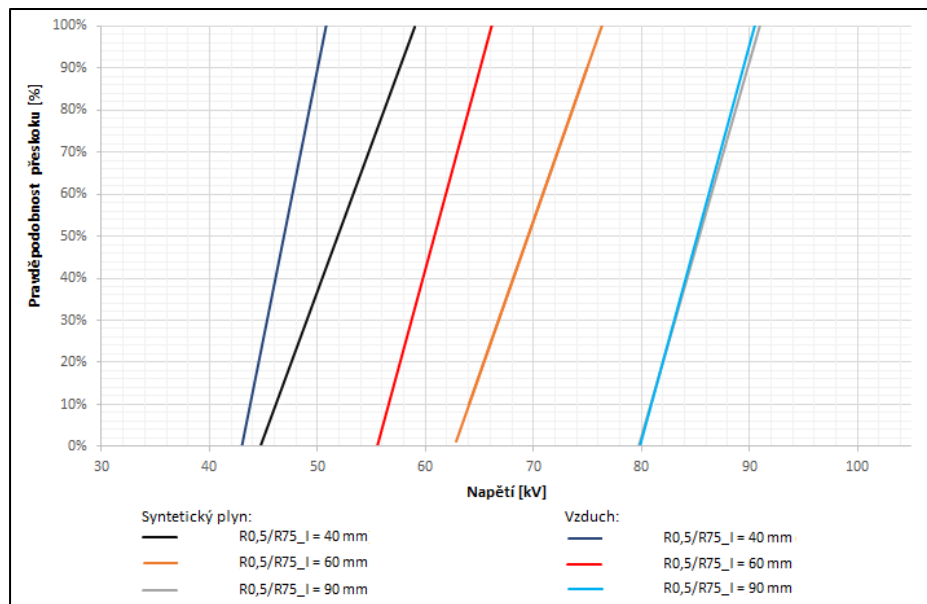
Tlak = 1 bar					
Použitý plyn	Elektrody	Napětí	Vzdálenost		
			l = 40 mm	l = 60 mm	l = 90 mm
Syntetický vzduch	R0,5/R75	$U_{10}$ [kV]	46	64	81
		$U_{50}$ [kV]	52	69,5	85
		$U_{90}$ [kV]	57,5	75	90
Vzduch	R0,5/R75	$U_{10}$ [kV]	43,75	56,5	81
		$U_{50}$ [kV]	47	61	84,7
		$U_{90}$ [kV]	50	65	89,5
Syntetický vzduch	R2/R75	$U_{10}$ [kV]	60	76,7	95,5
		$U_{50}$ [kV]	64,1	80	99,5
		$U_{90}$ [kV]	67,5	84	102,7
Vzduch	R2/R75	$U_{10}$ [kV]	49	67,9	91
		$U_{50}$ [kV]	52,2	72,5	95,5
		$U_{90}$ [kV]	55,5	77	100,6



Obr. 37 Porovnání dvou plynů u elektrod R0,5 a R2 při tlaku 1 bar

V Tab. 11 i v z grafu (Obr. 37) lze vidět rozdíl mezi syntetickým a obyčejným vzduchem. Z naměřených hodnot pozorujeme, že elektrická pevnost je menší u vzduchu, což jsme podle získaných teoretických znalostí očekávali. U elektrody s hrotem o poloměru 0,5

u tlaku 1 bar se hodnoty  $U_{10}$  pro vzdálenost 40 mm liší o 3,75 kV. Hodnota  $U_{90}$  se liší o 7,5 kV. U vzdálenosti 90 mm byly naměřeny hodnoty  $U_{10}$ ,  $U_{50}$  a  $U_{90}$  téměř shodné. U elektrody s hrotem o poloměru 2 mm je rozdíl výdržného napětí větší než u předchozí elektrody. Výdržné napětí je u syntetického vzduchu větší o 11 kV u vzdálenosti 40 mm a tlaku 1 bar.



Obr. 38 Porovnání přímek pravděpodobnosti přeskoku při použití odlišných plynů

Pro porovnání přímek pravděpodobnosti přeskoku jsme je umístili do jednoho grafu. Z grafu vidíme, jak se liší sklon přímek pravděpodobností přeskoku vzduchu a syntetického vzduchu. Vidíme, že pro vzdálenost 90 mm se přímky téměř překrývají.

## Závěr

První kapitola této diplomové práce byla rozdělena do 4 podkapitol. V prvních podkapitolách byly shrnuty obecné vlastnosti dielektrika a chování při působení elektrického pole. Byla zde popsána elektrická vodivost, kde byla většina textu věnována principu ionizace plynného dielektrika. Dále byly popsány dielektrické ztráty a permitivita plynu. Další podkapitola směřovala k problematice elektrické pevnosti, v níž byl popsán průraz dielektrika a Paschenův zákon. V poslední podkapitole jsem se zabýval nehomogenním polem.

V druhé kapitole se nachází postupy vysokonapěťových zkoušek pro měření elektrické pevnosti pomocí impulzního napětí, kde byla pro moji práci nejdůležitější metoda více hladinami, která byla použita pro testování napěťové pevnosti.

Experimentální část diplomové práce je zaměřena na zkoumání elektrické pevnosti syntetického vzduchu. Cílem této práce je zjistit, jak se mění elektrická pevnost v závislosti na změně parametrů. Při změně tvaru elektrod a vzdálenosti elektrod se mění homogenita pole a tím i elektrická pevnost. Další faktor ovlivňující elektrickou pevnost je tlak plynu. Při měření vlivu vzdálenosti na elektrickou pevnost jsem získanými výsledky potvrdil předpoklad, že postupným zvyšováním mezery mezi elektrodami roste elektrická pevnost. Pro měření byly použity čtyři elektrody. U tvaru elektrody vycházíme z teoretických předpokladů, že čím je menší hrot elektrody, tím více je pole nehomogenní, což v konečném výsledku vyvolá nižší elektrickou pevnost. U elektrody s hrotem o poloměru 0,5 mm vyšla podle očekávání elektrická pevnost nižší než u elektrody s hrotem o poloměru 2 mm. Problém nastal při měření elektrody s hrotem o poloměru 4 mm, kdy pevnost vyšla nižší než u elektrody s hrotem 2 mm. Doporučoval bych měření pro elektrody R0,5, R2 a R4 při tlaku 1 bar zopakovat. U porovnání vlivu tlaku jsem došel k výsledku, že u všech měřených vzdálenosti došlo při zvýšení tlaku na dvojnásobnou hodnotu o nárůst elektrické pevnosti více než 40 kV. Při porovnání syntetického vzduchu a vzduchu normálního je elektrická pevnost vyšší u vzduchu syntetického, pouze pro vzdálenost 90 mm byla elektrická pevnost stejná.

## 4 Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] LIPTÁK, Jan a Josef SEDLÁČEK. *Úvod do elektrotechnických materiálů*. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005, 168 s. ISBN 80-01-03191-8.
- [2] KUČEROVÁ, Eva. *Elektrotechnické materiály*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2002, 174 s. ISBN 80-7082-940-0.
- [3] HASSDENTEUFEL, Josef, DUBSKÝ Jan, RAPOŠ Michal, ŠANDERA Josef. *Elektrotechnické materiály*. 2., přeprac. vyd. Praha: SNTL, 1978. 607 s.
- [4] HASSDENTEUFEL, Josef, KVĚT Karel, a kolektiv. *Elektrotechnické materiály*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1967. 856 s.
- [5] Rozdíl mezi vysokonapěťovými rozváděči bez a s použitím plynu SF<sub>6</sub>. PROFIKLUBELEKTROTECHNIKU [online]. [cit. 2019-03-11]. Dostupné z: [http://www.profiklubelektrotechniku.cz/\\_\\_\\_files/upload/content/rozdil-mezi-rozvadeci-bez-s-sf6-pro-web.pdf](http://www.profiklubelektrotechniku.cz/___files/upload/content/rozdil-mezi-rozvadeci-bez-s-sf6-pro-web.pdf)
- [6] MENTLÍK, Václav. *Dielektrické prvky a systémy*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2006, 235 s. ISBN 80-7300-189-6.
- [7] VEVERKA, Antonín. *Technika vysokých napětí: vysokoškolská učebnice pro elektrotechnické fakulty*. 2., přeprac. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1978, 295 s. Řada elektrotechnické literatury.
- [8] ARTBAUER, Ján, Juraj ŠEDOVIČ a Vladimír ADAMEC. *Izolanty a izolácie*. 1. vyd. Bratislava: Alfa, 1969, 619 s.
- [9] MENTLÍK, Václav et al. *Diagnostika elektrických zařízení*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2008. 439 s. ISBN 978-80-7300-232-9.
- [10] HELLER, Bedřich a VEVERKA, Antonín. *Elektrická pevnost*. 1. vyd. Praha: ČSAV, 1957. 397 s.
- [11] ČSN EN 60270. *Technika zkoušek vysokým napětím: Měření částečných výbojů*. Praha: Český normalizační institut, 2001.
- [12] ZÁLIŠ, Karel. *Částečné výboje v izolačních systémech elektrických strojů*. 1. vyd. Praha: Academia, 2005, 135 s. Česká matice technická (Academia). ISBN 80-2001358-X.
- [13] HUBÁČEK, Jaroslav. *Nekonvenční metody sledování částečných výbojů*. Plzeň, 2013. Diplomová práce (Ing.). Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Eva Müllerová.
- [14] FABŠIC, Jiří. *Částečné výboje v plynném izolantu*. Plzeň, 2014. Diplomová práce.



- Západočeská univerzita. Fakulta elektrotechnická. Katedra technologií a měření.  
Vedoucí práce Petr Martínek.
- [15] Electric Field Intensity. *High Voltage Engineering* [online]. [cit. 2016-04-26].  
Dostupné z: [http://nptel.ac.in/courses/108104048/ui/Course\\_home1\\_3.htm](http://nptel.ac.in/courses/108104048/ui/Course_home1_3.htm)
- [16] KUFFEL, E., ZAENGL, W. S. a KUFFEL, J. *High voltage engineering: fundamentals*. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier Butterworth-Heinemann, ©2000. xiii, 539 s. ISBN 978-0-7506-3634-6.
- [17] KUBEŠ, Pavel. *Impulsní silnoproudé výboje a jejich diagnostika* [online]. In: . FEL ČVUT Praha, 2004 [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: <http://www.aldebaran.cz/studium/vyboje.pdf>
- [18] Corona discharge 2. CARTWRIGHT, Sarah. EHD Thrusters Research [online]. 2013 [cit. 2015-04-21]. Dostupné z: <https://www.flickr.com/photos/sarahcartwright/9755596591>
- [19] V. Timoshkin et al., "Bactericidal Effect of Corona Discharges in Atmospheric Air," in *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 40, no. 10, pp. 2322-2333, Oct. 2012. doi: 10.1109/TPS.2012.2193621. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6192349&isnumber=6324463>
- VEVERKA, Antonín. *Technika vysokých napětí*. 3. přeprac. vyd. Praha: SNTL, 1982.
- [20] WEISER, Roman. *Dielektrické vlastnosti vzduchu v nehomogenním poli*. Plzeň, 2013. Dostupné také z: [https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/handle/11025/10100/DP\\_Weiser.pdf?sequence=1](https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/handle/11025/10100/DP_Weiser.pdf?sequence=1). Bakalářská práce.
- [21] ČSN EN 60060-1. *Technika zkoušek vysokým napětím: Část 1: Obecné definice a požadavky na zkoušky*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, srpen 2011.

## 5 Přílohy

### Příloha A

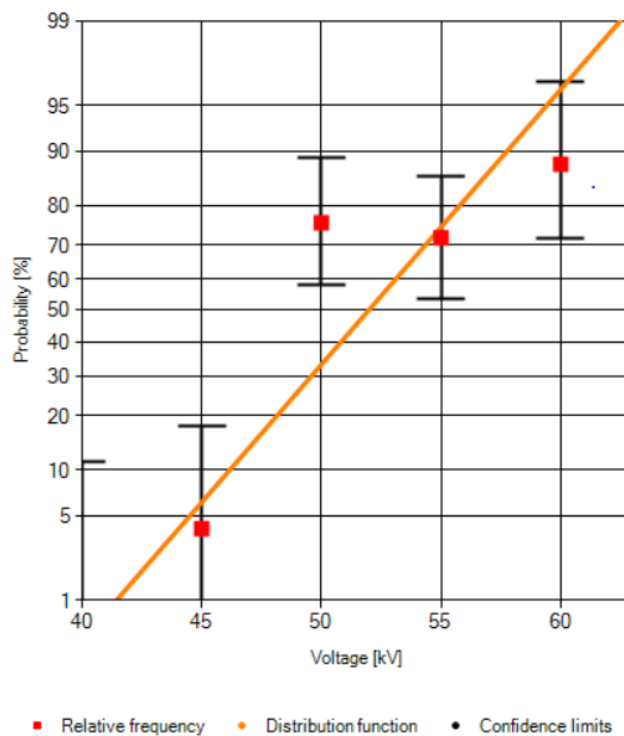
Parametry pro dané měření:

Typ a uspořádání elektrod	R0,5 – R75
Polarita napětí	Kladná
Vzdálenost elektrod [mm]	40
Tlak plynu [bar]	1
Typ plynu	20% O <sub>2</sub> + 80% N <sub>2</sub>

Naměřené hodnoty:

U [kV]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	Σ	
35																										0	
40																											0
45										x																	1
50		x		x	x	x		x		x	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x		x	x	x	19	
55	x	x	x	x	x	x		x	x			x		x	x	x	x		x	x	x	x	x			18	
60	x	x		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x	x		x	22	
65	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	X	x	x	x	x	x	x	x	25	

Statistické znázornění testu v Gaussově mřížce:



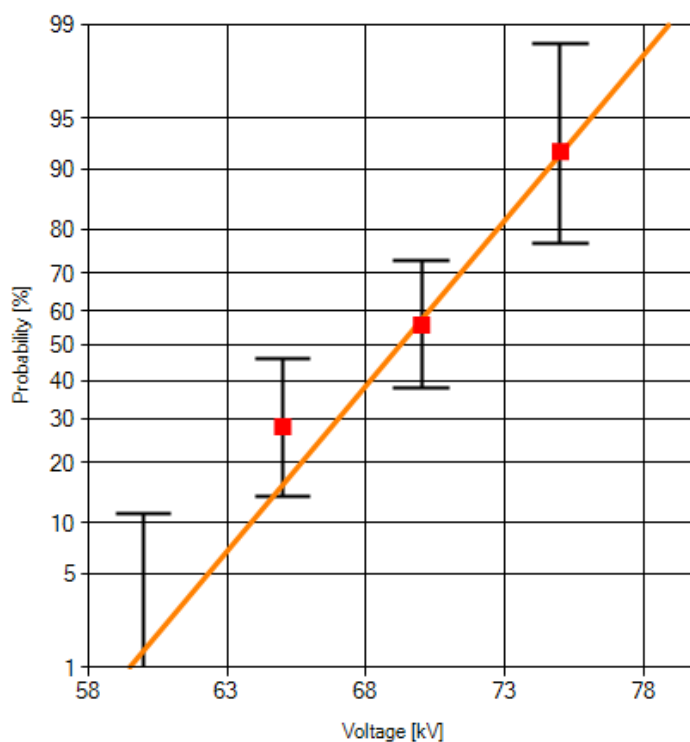
Parametry pro dané měření:

Typ a uspořádání elektrod	R0,5 – R75
Polarita napětí	Kladná
Vzdálenost elektrod [mm]	60
Tlak plynu [bar]	1
Typ plynu	20% O <sub>2</sub> + 80% N <sub>2</sub>

Naměřené hodnoty:

Statistické znázornění testu v Gaussově mřížce:

U [kV]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	Σ	
55																										0	
60																											0
65						x		x					x							x	x	x	x				7
70	x	x				x	x	x		x					x					x	x	x	x	x	x	x	14
75	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	23



■ Relative frequency    ● Distribution function    • Confidence limits

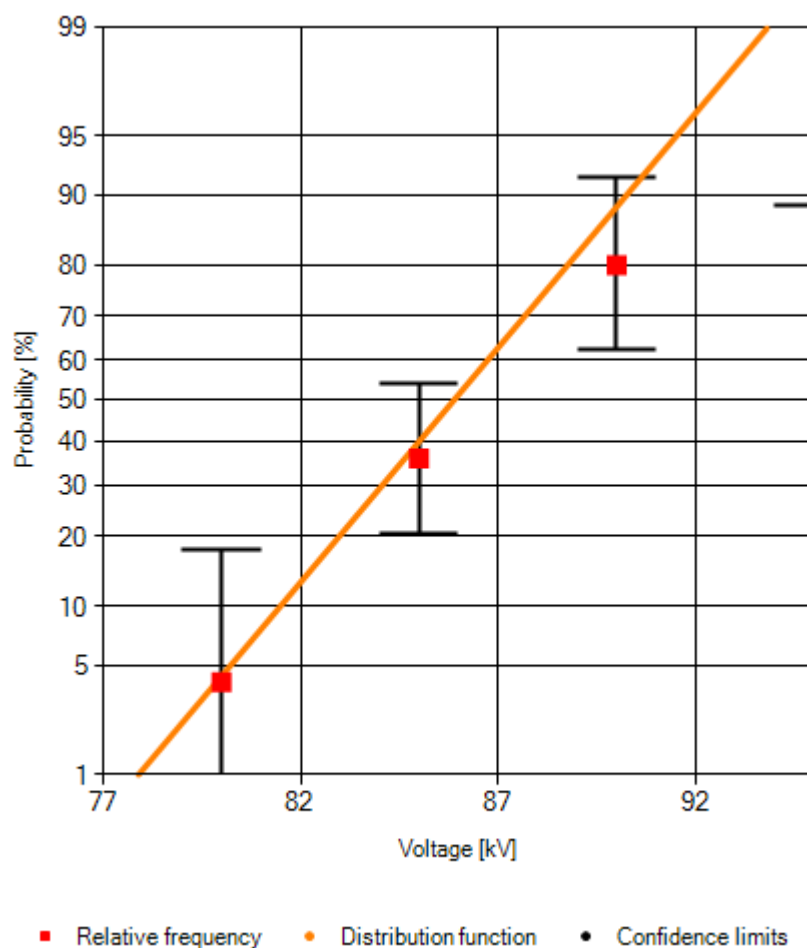
Parametry pro dané měření:

Typ a uspořádání elektrod	R0,5 – R75
Polarita napětí	Kladná
Vzdálenost elektrod [mm]	90
Tlak plynu [bar]	1
Typ plynu	20% O <sub>2</sub> + 80% N <sub>2</sub>

Naměřené hodnoty:

U [kV]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	Σ	
75																										0	
80			x																								1
85												x						x	x	x	x	x	x	x	x	x	9
90	x	x	x	x			x				x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	20
95	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	25

Statistické znázornění testu v Gaussově mřížce:



**Příloha B**

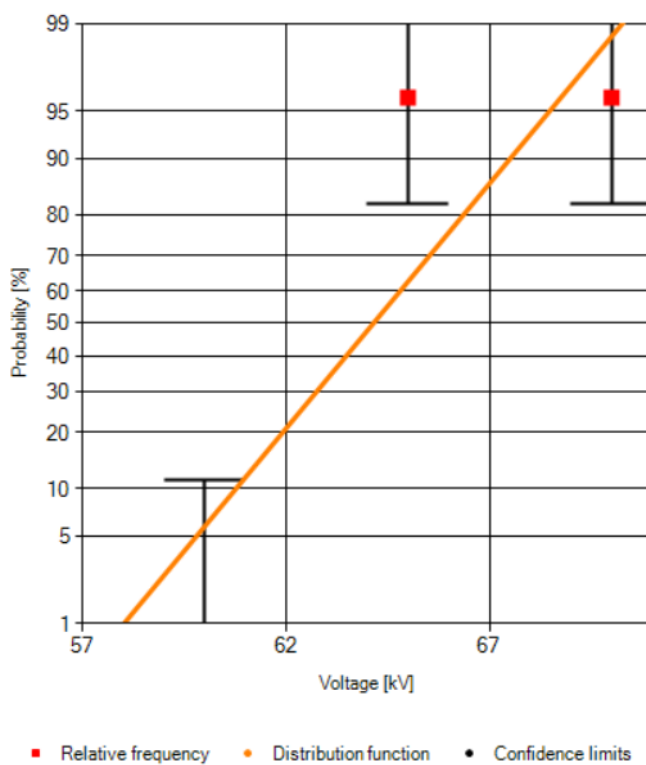
Parametry pro dané měření:

Typ a uspořádání elektrod	R2 – R75
Polarita napětí	Kladná
Vzdálenost elektrod [mm]	40
Tlak plynu [bar]	1
Typ plynu	20% O <sub>2</sub> + 80% N <sub>2</sub>

Naměřené hodnoty:

U [kV]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	Σ	
55																										0	
60																											0
65		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	24	
70	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	24	

Statistické znázornění testu v Gaussově mřížce:



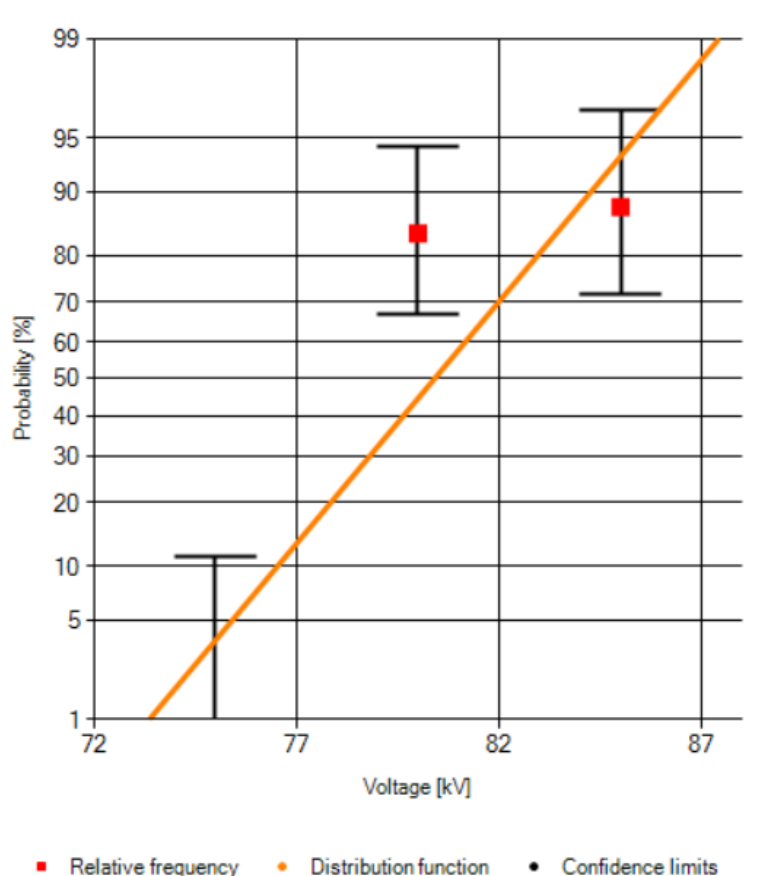
Parametry pro dané měření:

Typ a uspořádání elektrod	R2 – R75
Polarita napětí	Kladná
Vzdálenost elektrod [mm]	60
Tlak plynu [bar]	1
Typ plynu	20% O <sub>2</sub> + 80% N <sub>2</sub>

Naměřené hodnoty:

U [kV]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	Σ	
70																										0	
75																											0
80		x	x	x	x	x	x	x	x		x		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		21	
85	x	x		x	x	x		x	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x	x	x	x	22	

Statistické znázornění testu v Gaussově mřížce:



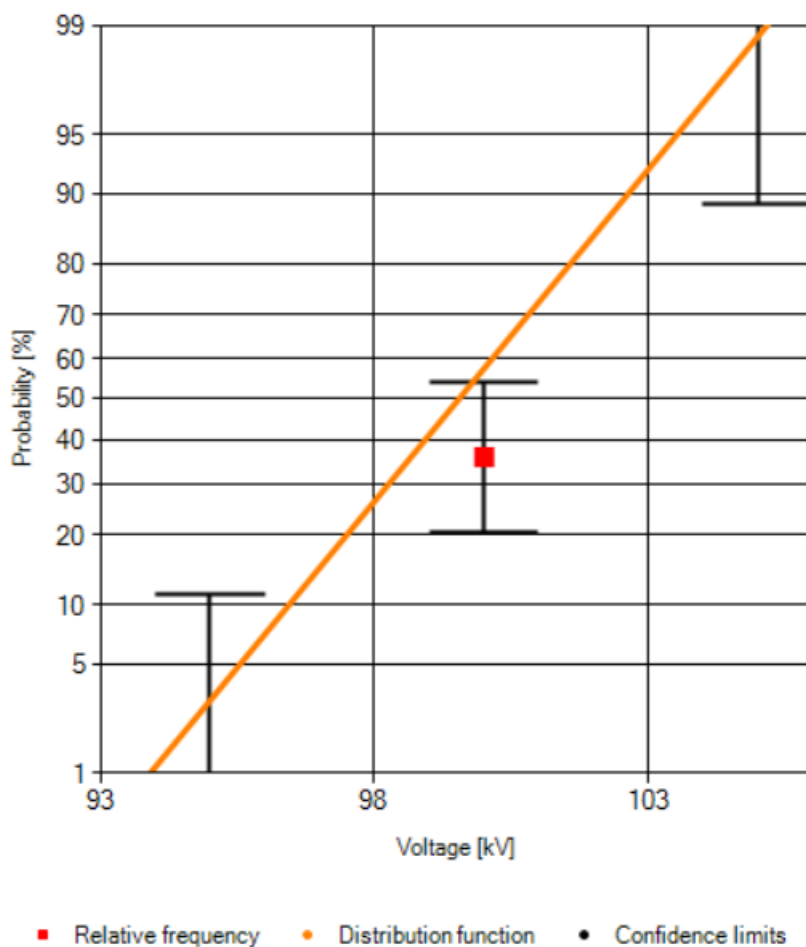
Parametry pro dané měření:

Typ a uspořádání elektrod	R2 – R75
Polarita napětí	Kladná
Vzdálenost elektrod [mm]	90
Tlak plynu [bar]	1
Typ plynu	20% O <sub>2</sub> + 80% N <sub>2</sub>

Naměřené hodnoty:

U [kV]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	Σ	
90																										0	
95																											0
100							x	x	x	x	x	x	x		x		x									9	
105	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	25	

Statistické znázornění testu v Gaussově mřížce:



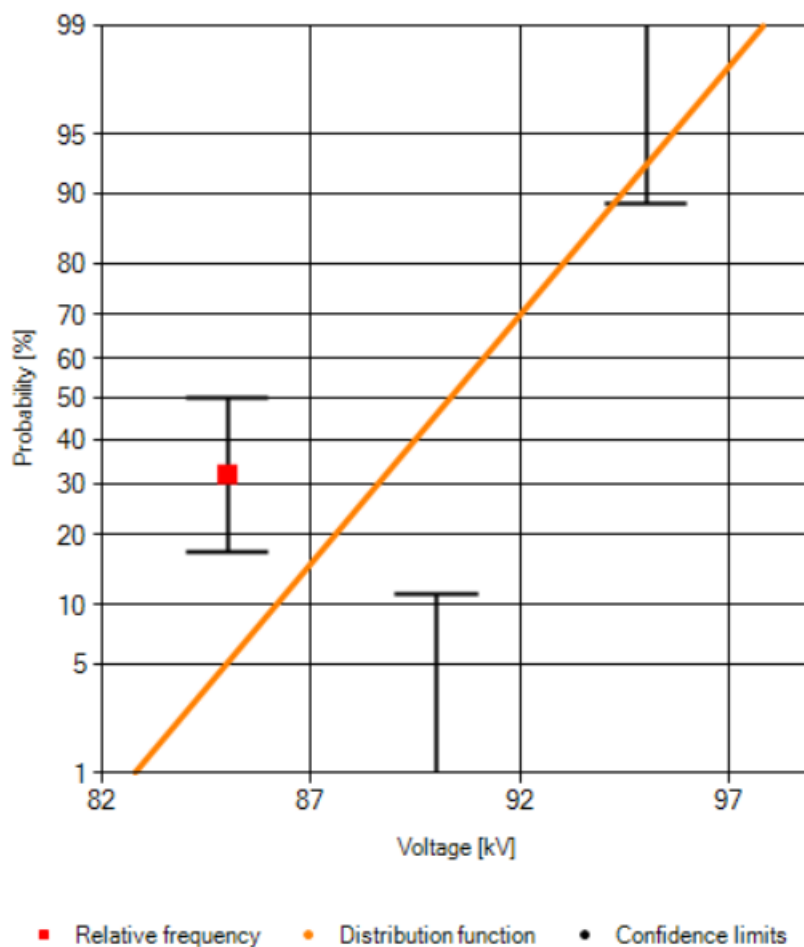
Parametry pro dané měření:

Typ a uspořádání elektrod	R2 – R75
Polarita napětí	Kladná
Vzdálenost elektrod [mm]	40
Tlak plynu [bar]	1,5
Typ plynu	20% O <sub>2</sub> + 80% N <sub>2</sub>

Naměřené hodnoty:

U [kV]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	Σ	
80																										0	
85					x	x	x		x				x								x	x	x				8
90																											0
95	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	22	

Statistické znázornění testu v Gaussově mřížce:





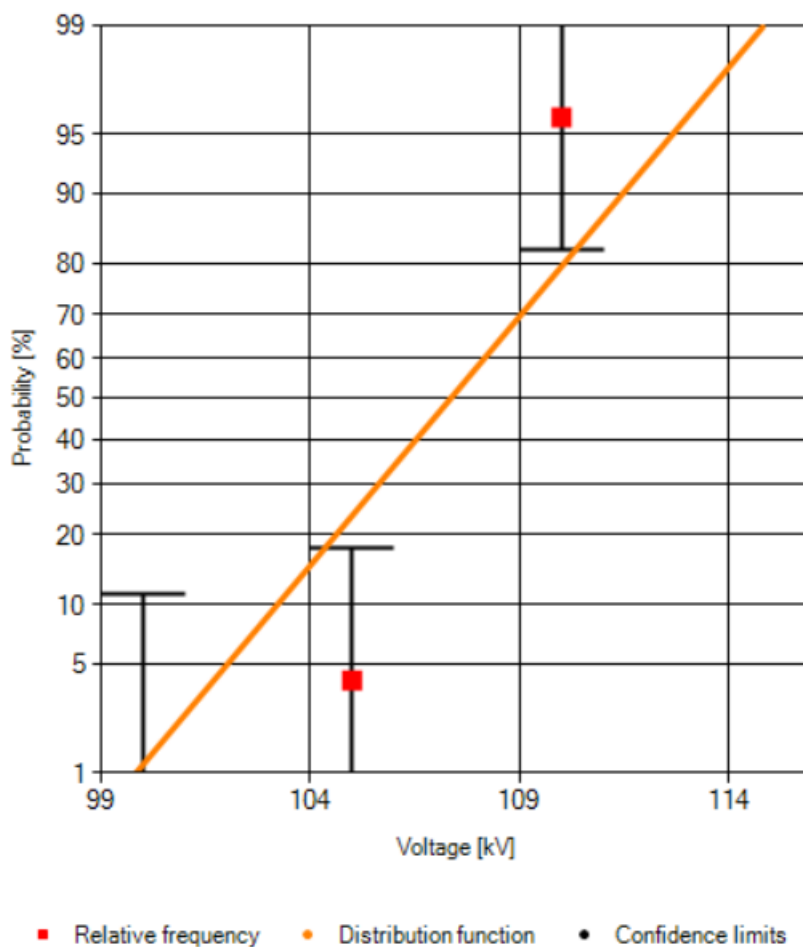
Parametry pro dané měření:

Typ a uspořádání elektrod	R2 – R75
Polarita napětí	Kladná
Vzdálenost elektrod [mm]	60
Tlak plynu [bar]	1,5
Typ plynu	20% O <sub>2</sub> + 80% N <sub>2</sub>

Naměřené hodnoty:

U [kV]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	Σ	
95																										0	
100																											0
105																	x										1
110	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x	x	x	x	24	

Statistické znázornění testu v Gaussově mřížce:



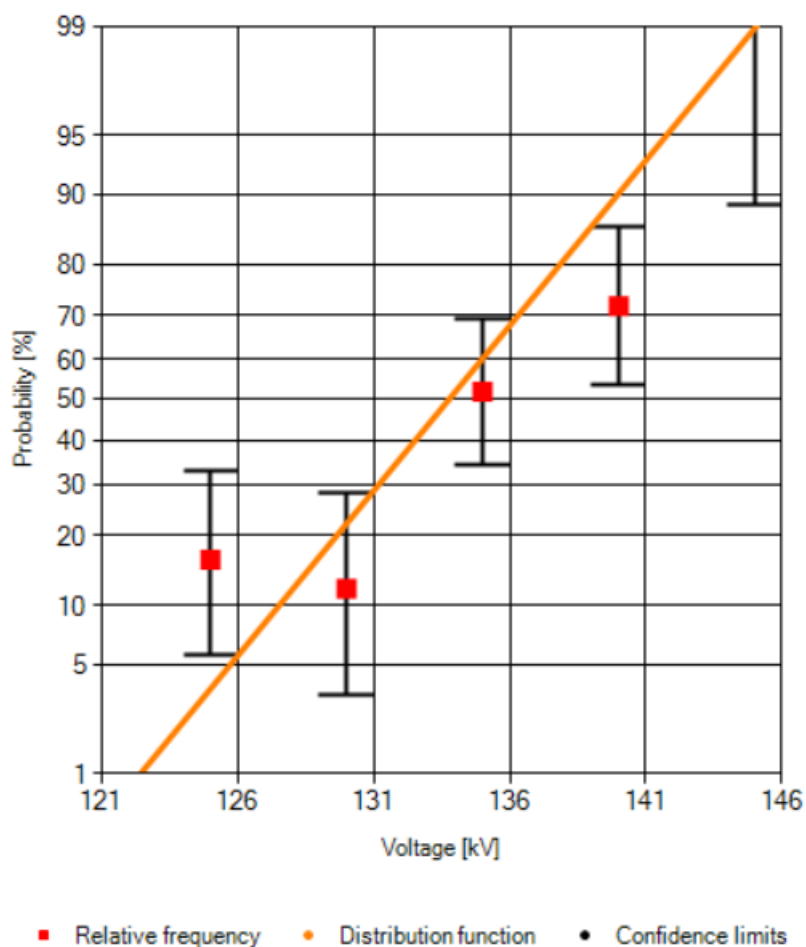
Parametry pro dané měření:

Typ a uspořádání elektrod	R2 – R75
Polarita napětí	Kladná
Vzdálenost elektrod [mm]	90
Tlak plynu [bar]	1,5
Typ plynu	20% O <sub>2</sub> + 80% N <sub>2</sub>

Naměřené hodnoty:

U [kV]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	Σ
120																										0
125		x			x												x		x							4
130						x							x						x							3
135			x	x		x	x			x	x	x	x					x		x	x	x		x		13
140	x		x	x	x	x	x		x		x		x	x	x			x	x	x	x		x	x	x	18
145	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	25

Statistické znázornění testu v Gaussově mřížce:



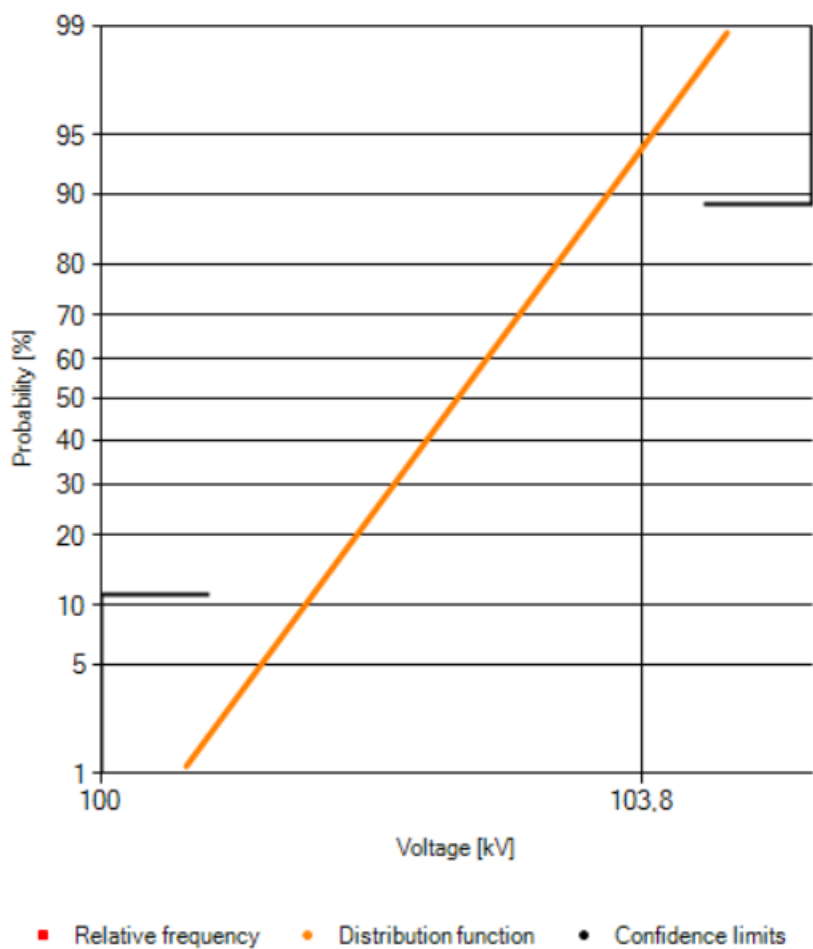
Parametry pro dané měření:

Typ a uspořádání elektrod	R2 – R75
Polarita napětí	Kladná
Vzdálenost elektrod [mm]	40
Tlak plynu [bar]	2
Typ plynu	20% O <sub>2</sub> + 80% N <sub>2</sub>

Naměřené hodnoty:

U [kV]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	Σ
100																										0
105	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	0

Statistické znázornění testu v Gaussově mřížce:



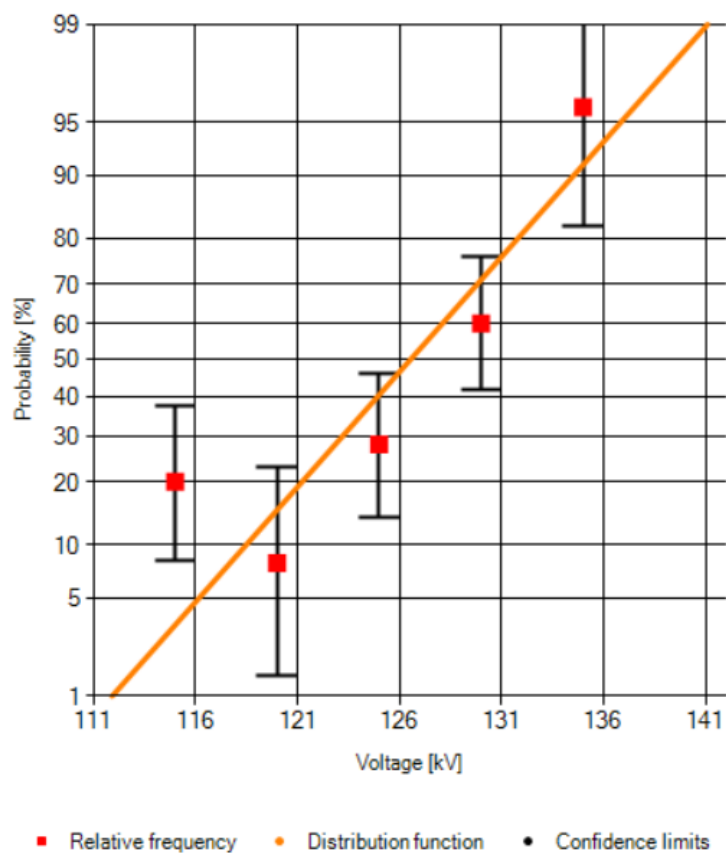
Parametry pro dané měření:

Typ a uspořádání elektrod	R2 – R75
Polarita napětí	Kladná
Vzdálenost elektrod [mm]	60
Tlak plynu [bar]	2
Typ plynu	20% O <sub>2</sub> + 80% N <sub>2</sub>

Naměřené hodnoty:

U [kV]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	Σ
110																										0
115					X	X				X			X											X		5
120																	X								X	2
125							X	X				X							X				X	X	X	7
130	X	X	X	X	X		X		X	X	X		X		X					X	X			X		15
135		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	24

Statistické znázornění testu v Gaussově mřížce:



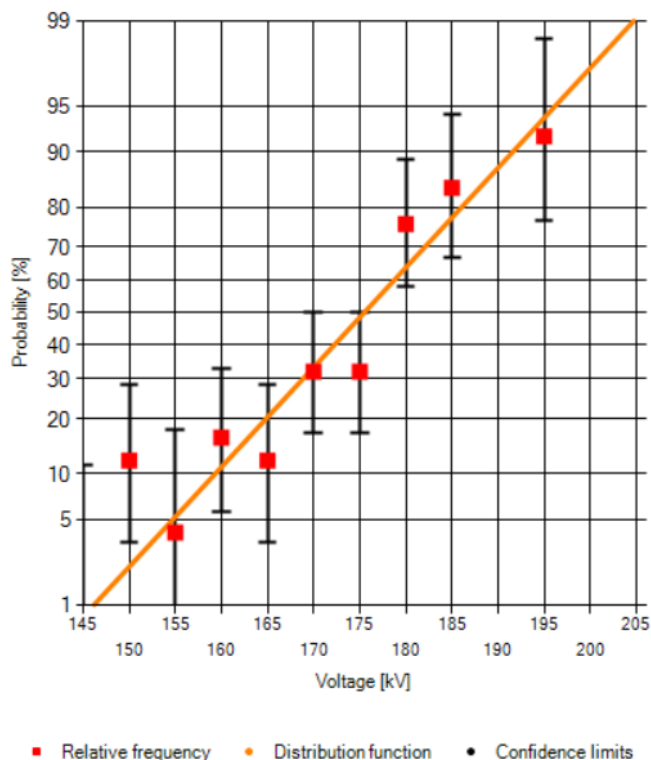
Parametry pro dané měření:

Typ a uspořádání elektrod	R2 – R75
Polarita napětí	Kladná
Vzdálenost elektrod [mm]	90
Tlak plynu [bar]	2
Typ plynu	20% O <sub>2</sub> + 80% N <sub>2</sub>

Naměřené hodnoty:

U [kV]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	Σ	
145																										0	
150			x										x									x					3
155																								x			1
160		x		x		x																		x			4
165							x												x			x					3
170						x	x			x				x	x			x						x		x	8
175				x				x										x				x	x	x	x	x	8
180	x		x		x	x	x	x		x	x	x	x	x		x	x			x	x	x	x		x	x	19
185	x	x	x	x	x		x	x	x		x	x	x	x	x	x	x			x	x	x	x	x		x	21
190	x	x	x	x	x	x	x	x		x		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	23

Statistické znázornění testu v Gaussově mřížce:



## Příloha C

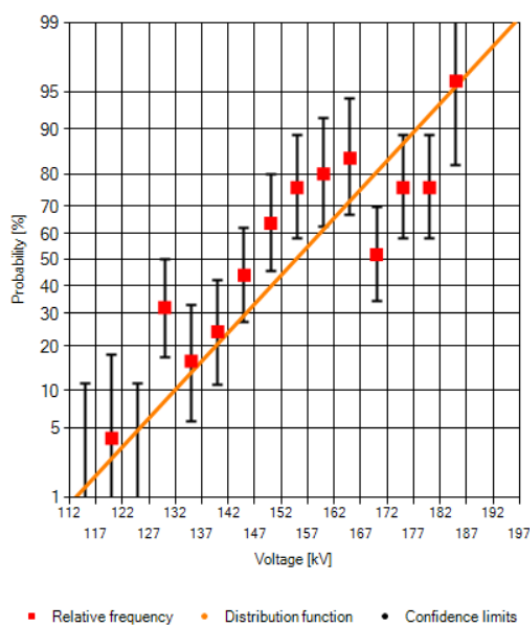
Parametry pro dané měření:

Typ a uspořádání elektrod	R75 – R75
Polarita napětí	Kladná
Vzdálenost elektrod [mm]	40
Tlak plynu [bar]	1
Typ plynu	20% O <sub>2</sub> + 80% N <sub>2</sub>

Naměřené hodnoty:

U [kV]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	Σ	
110																										0	
115																											0
120									x																		1
125																											0
130	x			x							x		x	x				x		x	x						8
135		x						x							x							x					4
140		x	x	x					x	x														x			6
145	x		x		x			x					x	x					x	x	x			x	x		11
150	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x		x		x			x			x			x		16
155		x	x	x		x	x	x		x	x		x	x	x	x	x	x	x	x		x	x		x		19
160	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x				x	x	x		x	x		x		20
165	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x			x	x	x		x	x	x	x	x	x	x		21
170	x	x	x			x	x	x				x	x					x	x		x	x		x			13
175	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x			x	x	x	x		x	x		x	x		x		19
180		x	x	x	x			x	x	x	x	x			x	x	x	x	x	x	x	x	x			x	19
185	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	24

Statistické znázornění testu v Gaussově mřížce:



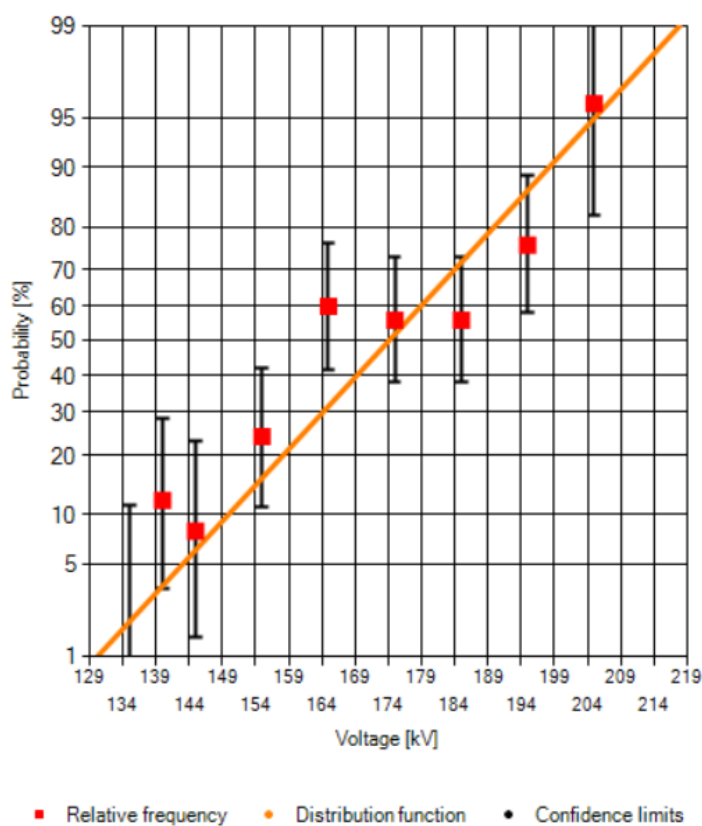
Parametry pro dané měření:

Typ a uspořádání elektrod	R75 – R75
Polarita napětí	Záporná
Vzdálenost elektrod [mm]	40
Tlak plynu [bar]	1
Typ plynu	20% O <sub>2</sub> + 80% N <sub>2</sub>

Naměřené hodnoty:

U [kV]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	Σ	
-115																										0	
-125																											0
-135																											0
-140	x																		x				x			3	
-145		x		x																x						2	
-155	x				x											x				x					x	x	6
-165		x	x	x	x	x	x	x		x					x	x	x	x			x			x		x	15
-175		x	x	x	x	x			x			x		x		x	x			x			x	x	x		14
-185	x		x	x	x	x	x		x	x						x	x			x	x				x		14
-195	x	x	x	x	x	x	x	x		x		x	x		x	x	x	x			x			x	x	x	19
-205	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	24

Statistické znázornění testu v Gaussově mřížce:



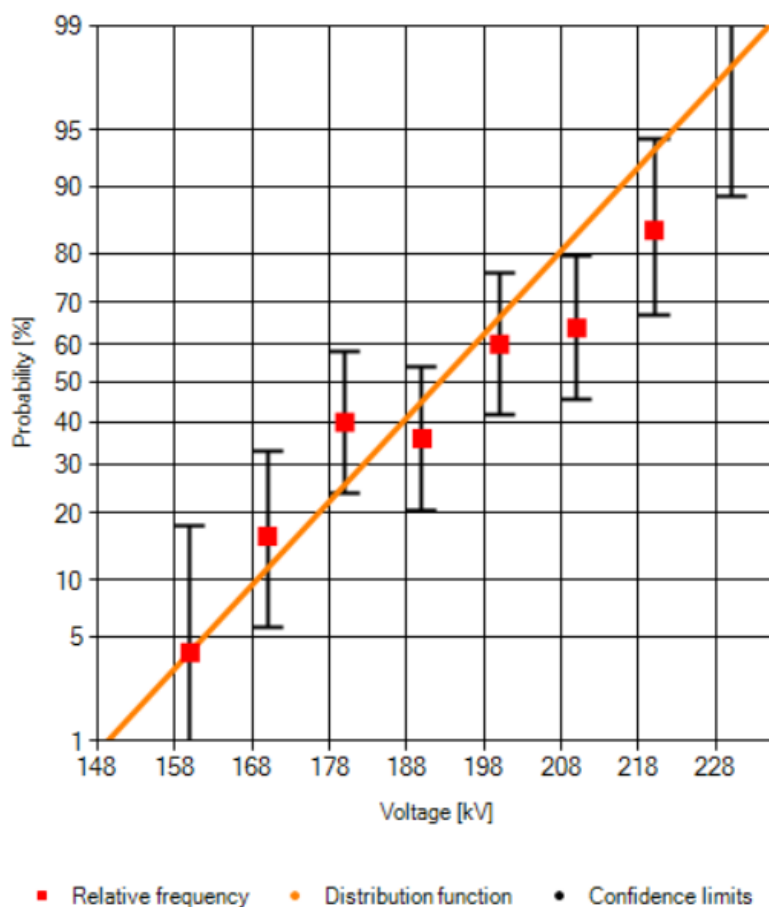
Parametry pro dané měření:

Typ a uspořádání elektrod	R75 – R75
Polarita napětí	Kladná
Vzdálenost elektrod [mm]	60
Tlak plynu [bar]	1
Typ plynu	20% O <sub>2</sub> + 80% N <sub>2</sub>

Naměřené hodnoty:

U [kV]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	Σ
160																						x				1
170				x					x				x									x				4
180	x			x		x		x	x				x						x	x	x	x				10
190			x			x		x	x	x		x	x			x	x									9
200	x		x	x	x	x		x	x		x		x		x						x		x	x	x	15
210	x	x		x	x		x		x		x		x		x		x	x	x	x	x	x			x	16
220	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x				x	x	21
230	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	25

Statistické znázornění testu v Gaussově mřížce:





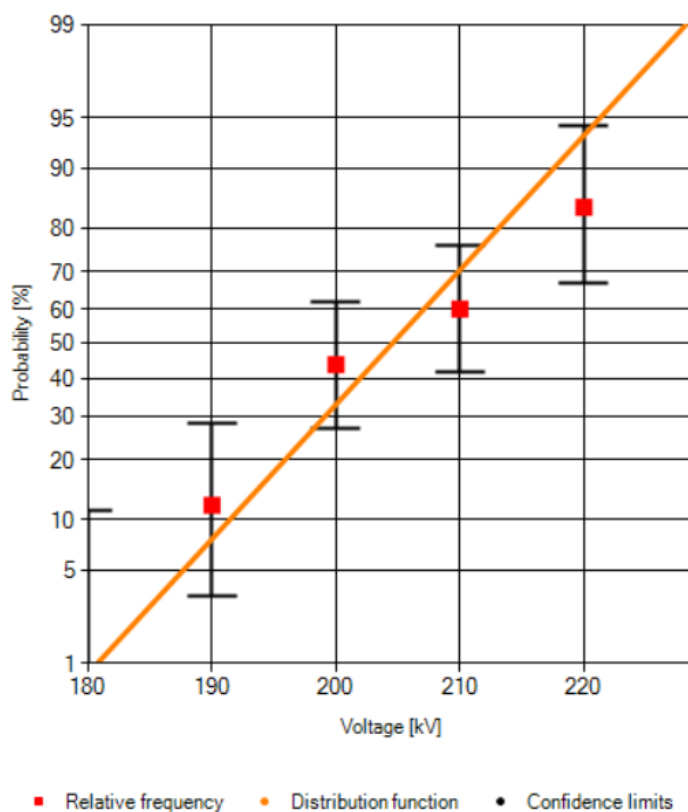
Parametry pro dané měření:

Typ a uspořádání elektrod	R75 – R75
Polarita napětí	Záporná
Vzdálenost elektrod [mm]	60
Tlak plynu [bar]	1
Typ plynu	20% O <sub>2</sub> + 80% N <sub>2</sub>

Naměřené hodnoty:

U [kV]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	Σ	
170																										0	
180																											0
190	x					x											x									3	
200	x			x		x			x	x	x			x	x				x		x			x		11	
210		x		x	x	x		x	x	x	x		x				x	x	x	x	x				x	15	
220	x	x	x	x	x	x	x		x	x		x	x	x		x	x	x	x	x			x	x	x	21	
230	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	25	

Statistické znázornění testu v Gaussově mřížce:



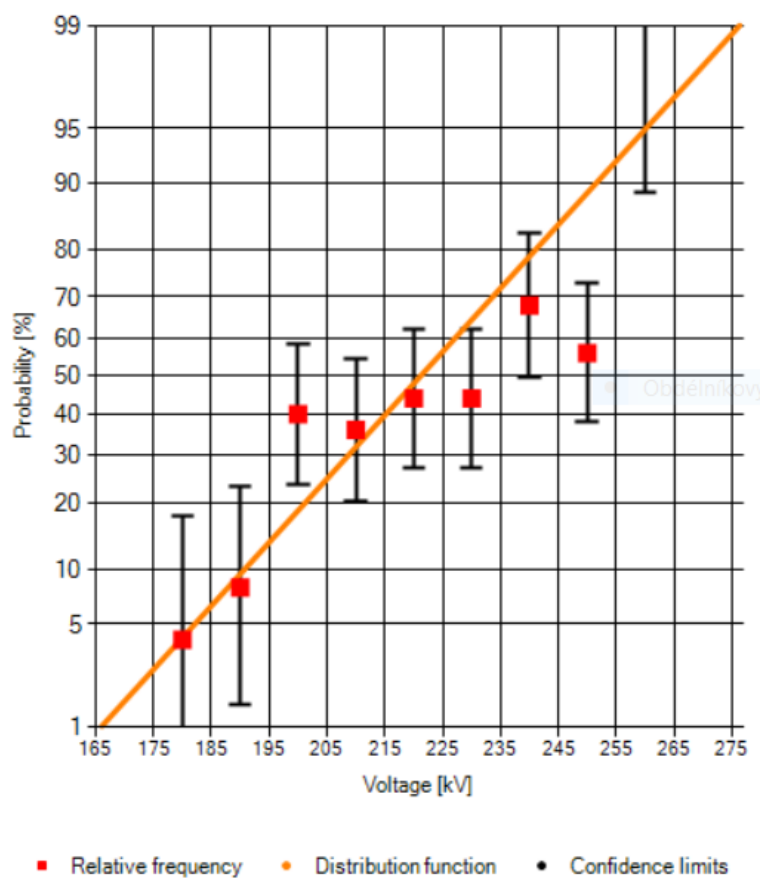
Parametry pro dané měření:

Typ a uspořádání elektrod	R75 – R75
Polarita napětí	Kladná
Vzdálenost elektrod [mm]	90
Tlak plynu [bar]	1
Typ plynu	20% O <sub>2</sub> + 80% N <sub>2</sub>

Naměřené hodnoty:

U [kV]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	Σ	
180																		x								1	
190													x					x									2
200		x			x			x		x	x	x	x						x	x				x		10	
210	x	x				x	x	x		x	x									x	x					9	
220		x	x	x	x		x							x	x	x			x			x				11	
230	x				x		x		x	x					x	x		x	x		x	x		x		11	
240	x	x		x	x	x	x	x		x		x		x	x	x		x	x			x			x	17	
250		x	x		x	x	x	x	x	x	x	x	x					x	x				x			14	
260	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	25	

Statistické znázornění testu v Gaussově mřížce:



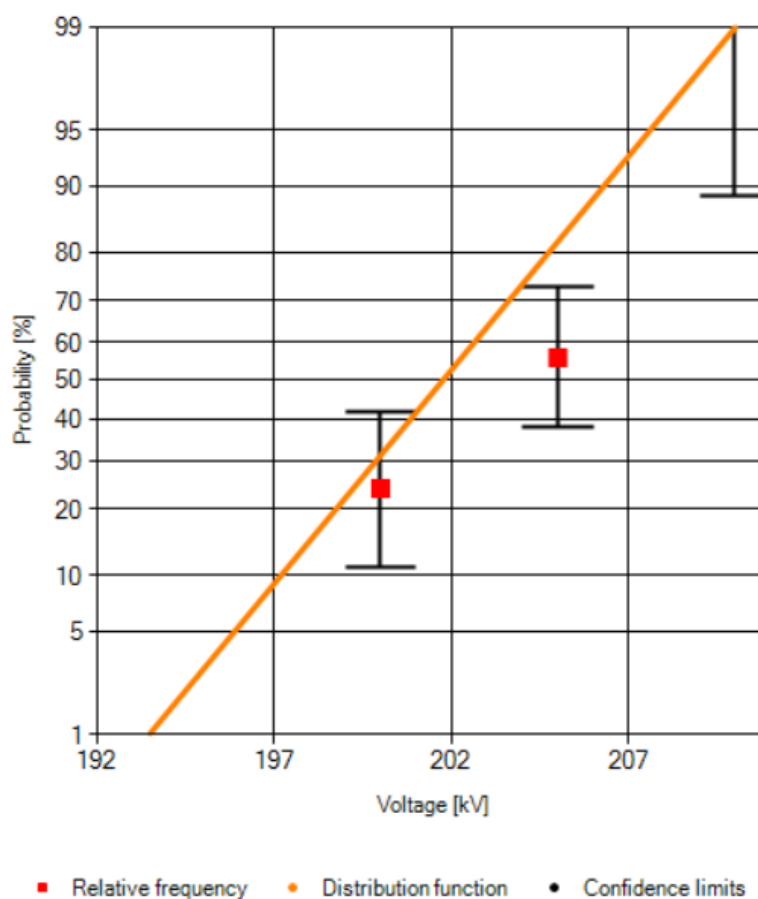
Parametry pro dané měření:

Typ a uspořádání elektrod	R75 – R75
Polarita napětí	Záporná
Vzdálenost elektrod [mm]	90
Tlak plynu [bar]	1
Typ plynu	20% O <sub>2</sub> + 80% N <sub>2</sub>

Naměřené hodnoty:

U [kV]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	Σ	
-180																										0	
-190									x			x			x		x		x			x					6
-200		x	x	x				x			x		x			x	x	x	x	x	x	x			x	x	14
-210	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	25

Statistické znázornění testu v Gaussově mřížce:



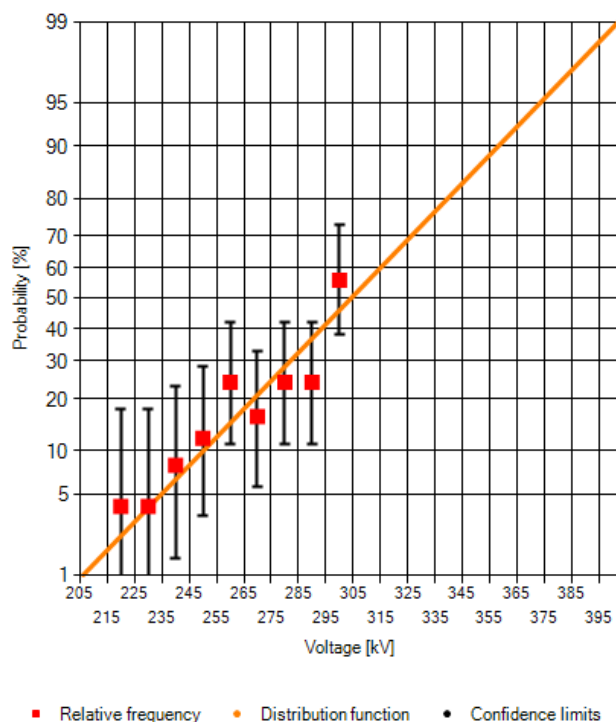
Parametry pro dané měření:

Typ a uspořádání elektrod	R75 – R75
Polarita napětí	Kladná
Vzdálenost elektrod [mm]	40
Tlak plynu [bar]	1,5
Typ plynu	20% O <sub>2</sub> + 80% N <sub>2</sub>

Naměřené hodnoty:

U [kV]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	Σ	
170																										0	
180																											0
200																											0
220																x											1
230							x																				1
240									x														x				2
250		x					x							x									x				3
260					x		x	x		x					x							x					6
270							x									x	x						x				4
280		x	x				x	x																x	x		6
290	x	x	x														x					x	x				6
300	x	x		x	x	x	x					x		x			x	x	x	x			x		x		14

Statistické znázornění testu v Gaussově mřížce:



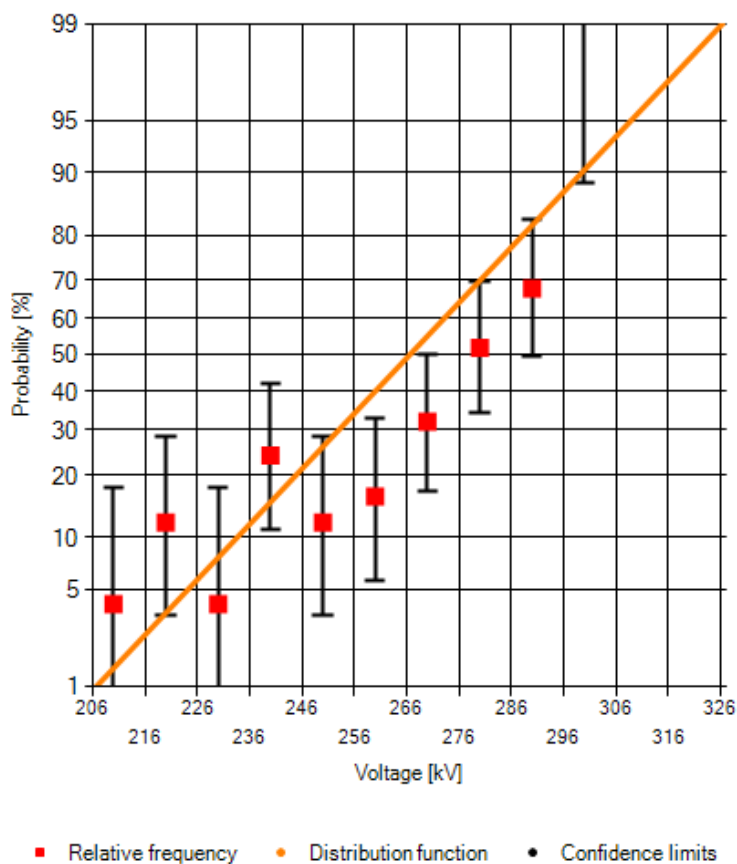
Parametry pro dané měření:

Typ a uspořádání elektrod	R75 – R75
Polarita napětí	Záporná
Vzdálenost elektrod [mm]	40
Tlak plynu [bar]	1,5
Typ plynu	20% O <sub>2</sub> + 80% N <sub>2</sub>

Naměřené hodnoty:

U [kV]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	Σ	
-210															x											1	
-220		x		x		x																					3
-230		x																									1
-240				x							x	x						x				x	x				6
-250					x										x						x						3
-260										x							x					x			x		4
-270	x	x	x			x						x						x	x					x			8
-280		x					x	x		x		x	x	x	x			x	x	x	x	x	x				13
-290	x	x		x			x		x	x	x			x	x			x	x	x	x		x	x	x	x	17
-300	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	25

Statistické znázornění testu v Gaussově mřížce:



## Příloha D

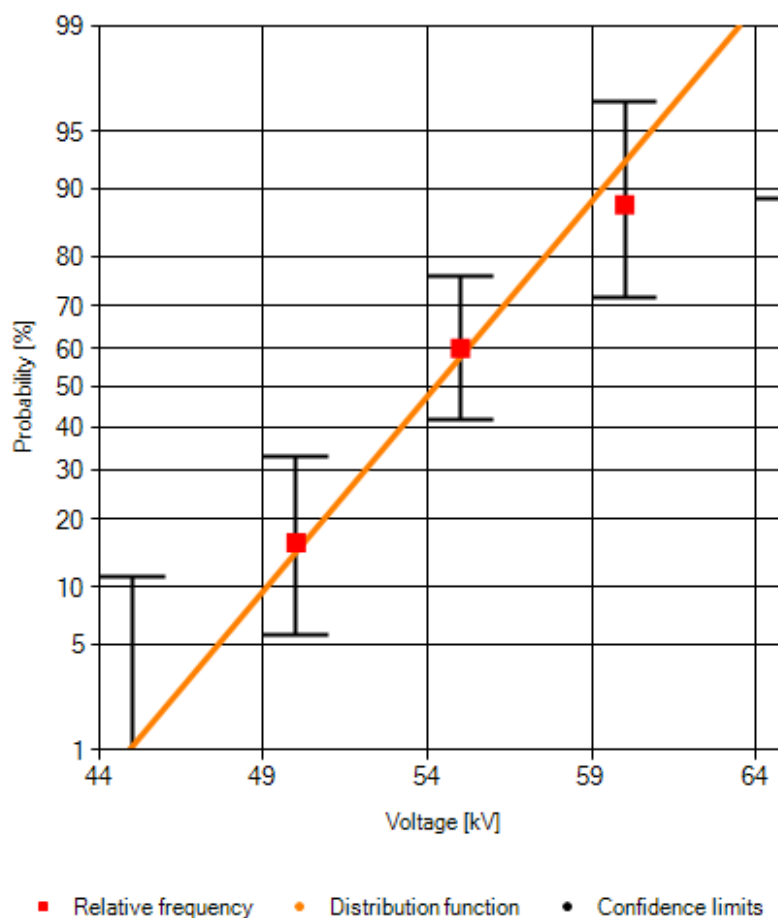
Parametry pro dané měření:

Typ a uspořádání elektrod	R4 – R75
Polarita napětí	Kladná
Vzdálenost elektrod [mm]	40
Tlak plynu [bar]	1
Typ plynu	20% O <sub>2</sub> + 80% N <sub>2</sub>

Naměřené hodnoty:

U [kV]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	Σ	
40																										0	
45																											0
50						x							x	x										x		4	
55			x	x	x	x				x	x	x	x	x		x	x			x	x	x	x			15	
60	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x	x		x	x	x		x	x	x	x	x	22	
65	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x	24	

Statistické znázornění testu v Gaussově mřížce:



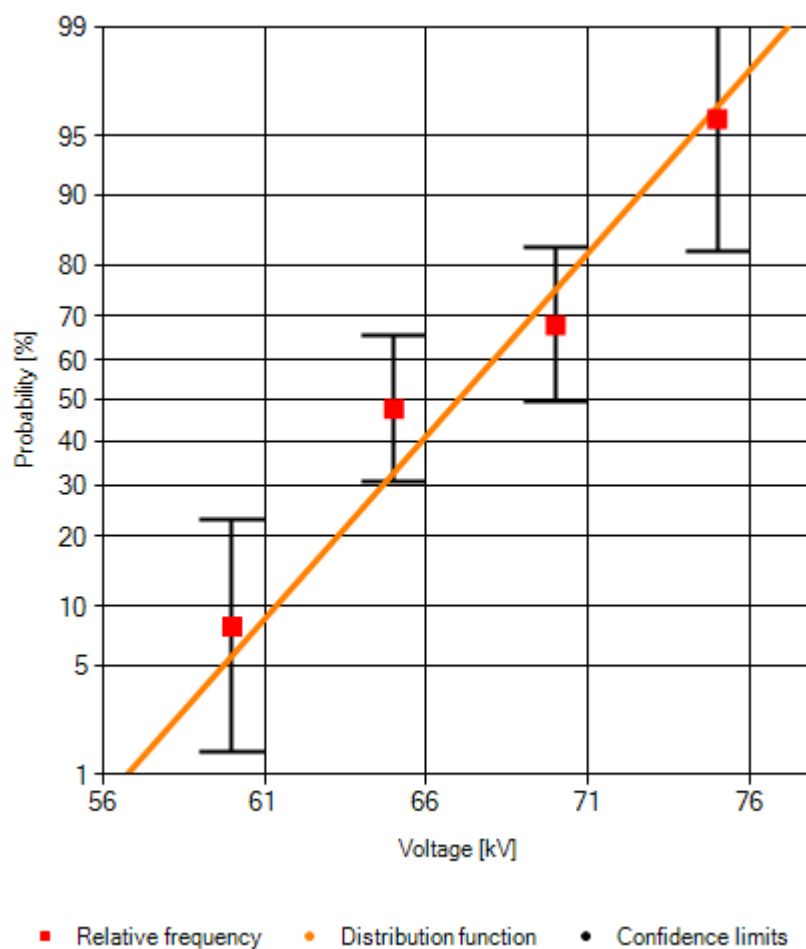
Parametry pro dané měření:

Typ a uspořádání elektrod	R4 – R75
Polarita napětí	Kladná
Vzdálenost elektrod [mm]	60
Tlak plynu [bar]	1
Typ plynu	20% O <sub>2</sub> + 80% N <sub>2</sub>

Naměřené hodnoty:

U [kV]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	Σ	
55																										0	
60						x											x									2	
65		x		x	x	x					x		x	x					x	x	x			x		x	12
70	x	x	x			x	x	x		x	x	x		x		x	x	x		x	x				x	x	17
75	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	24

Statistické znázornění testu v Gaussově mřížce:



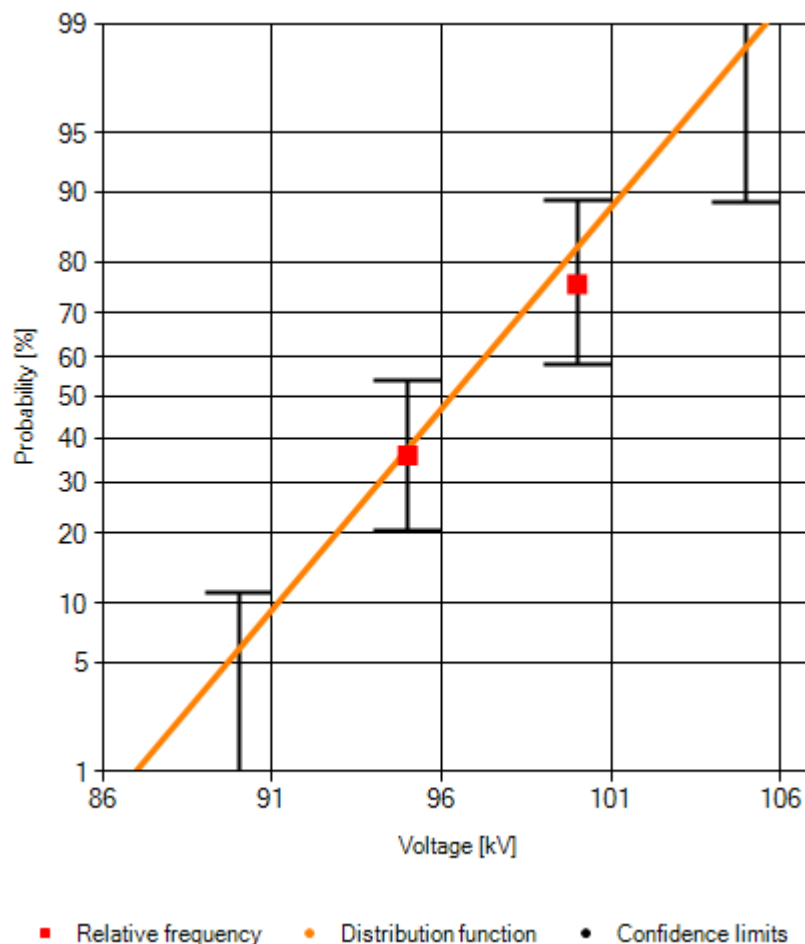
Parametry pro dané měření:

Typ a uspořádání elektrod	R4 – R75
Polarita napětí	Kladná
Vzdálenost elektrod [mm]	90
Tlak plynu [bar]	1
Typ plynu	20% O <sub>2</sub> + 80% N <sub>2</sub>

Naměřené hodnoty:

U [kV]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	Σ	
80																										0	
85																											0
90																											0
95	x	x	x										x	x	x	x	x	x									9
100							x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	19
105	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	25

Statistické znázornění testu v Gaussově mřížce:





**Příloha E**

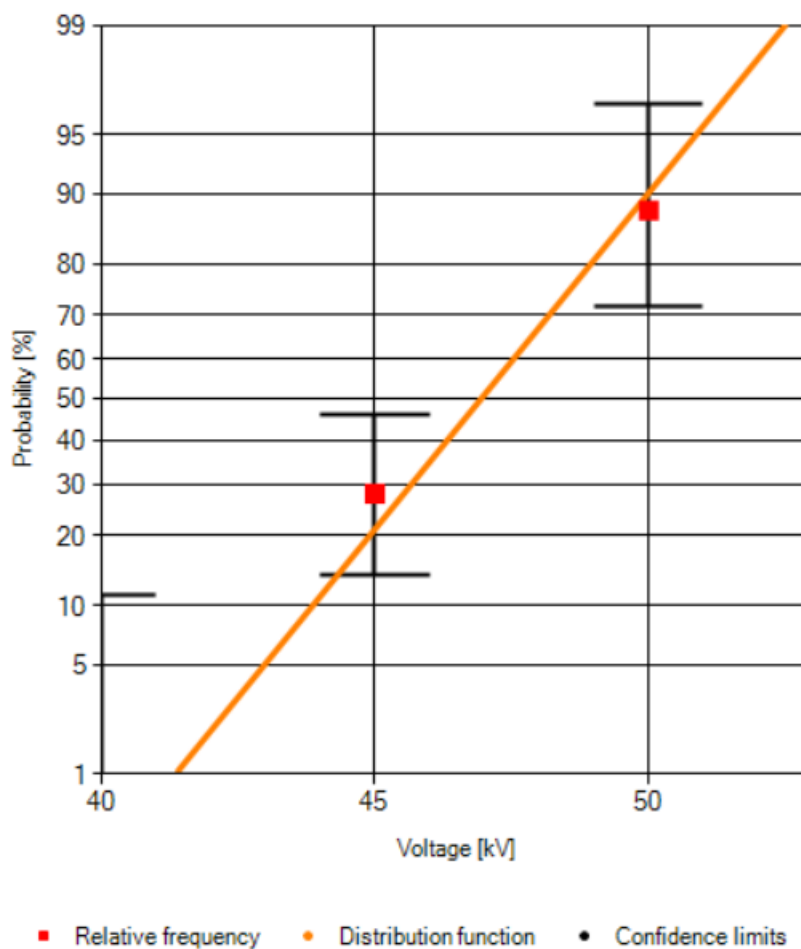
Parametry pro dané měření:

Typ a uspořádání elektrod	R0,5 – R75
Polarita napětí	Kladná
Vzdálenost elektrod [mm]	40
Tlak plynu [bar]	1
Typ plynu	vzduch

Naměřené hodnoty:

U [kV]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	Σ
40																										0
45											x	x	x			x				x	x	x				7
50	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x			x	x	x		x	22

Statistické znázornění testu v Gaussově mřížce:



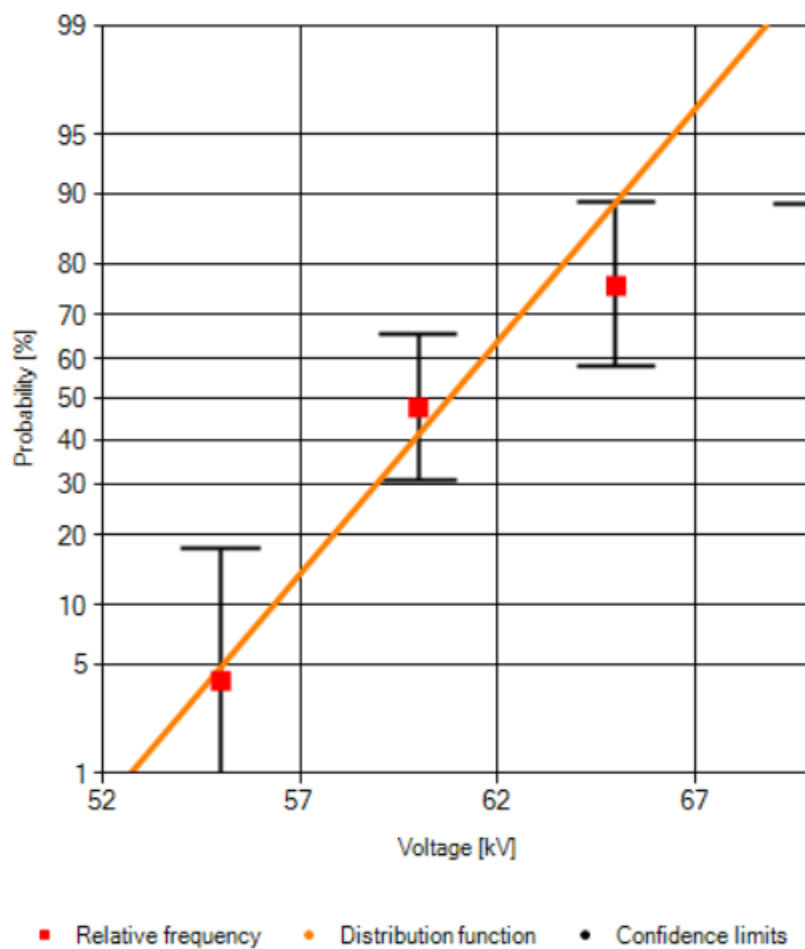
Parametry pro dané měření:

Typ a uspořádání elektrod	R0,5 – R75
Polarita napětí	Kladná
Vzdálenost elektrod [mm]	60
Tlak plynu [bar]	1
Typ plynu	vzduch

Naměřené hodnoty:

U [kV]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	Σ	
50																										0	
55							x																				1
60		x			x	x	x	x	x	x	x	x						x	x						x	12	
65	x	x	x	x			x	x		x	x	x	x	x	x	x		x	x	x		x	x		x	19	
70	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	25	

Statistické znázornění testu v Gaussově mřížce:



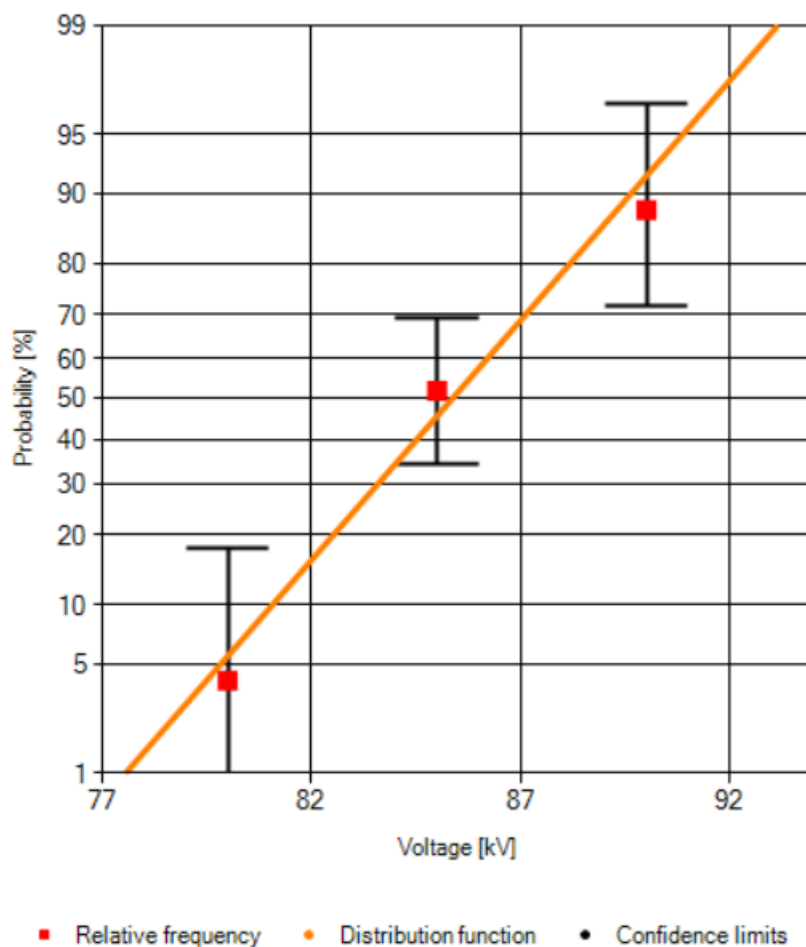
Parametry pro dané měření:

Typ a uspořádání elektrod	R0,5 – R75
Polarita napětí	Kladná
Vzdálenost elektrod [mm]	90
Tlak plynu [bar]	1
Typ plynu	vzduch

Naměřené hodnoty:

U [kV]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	Σ	
75																										0	
80			x																								1
85		x						x	x		x		x	x			x	x	x	x	x		x		x	13	
90	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x		22	
95	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x	24	

Statistické znázornění testu v Gaussově mřížce:



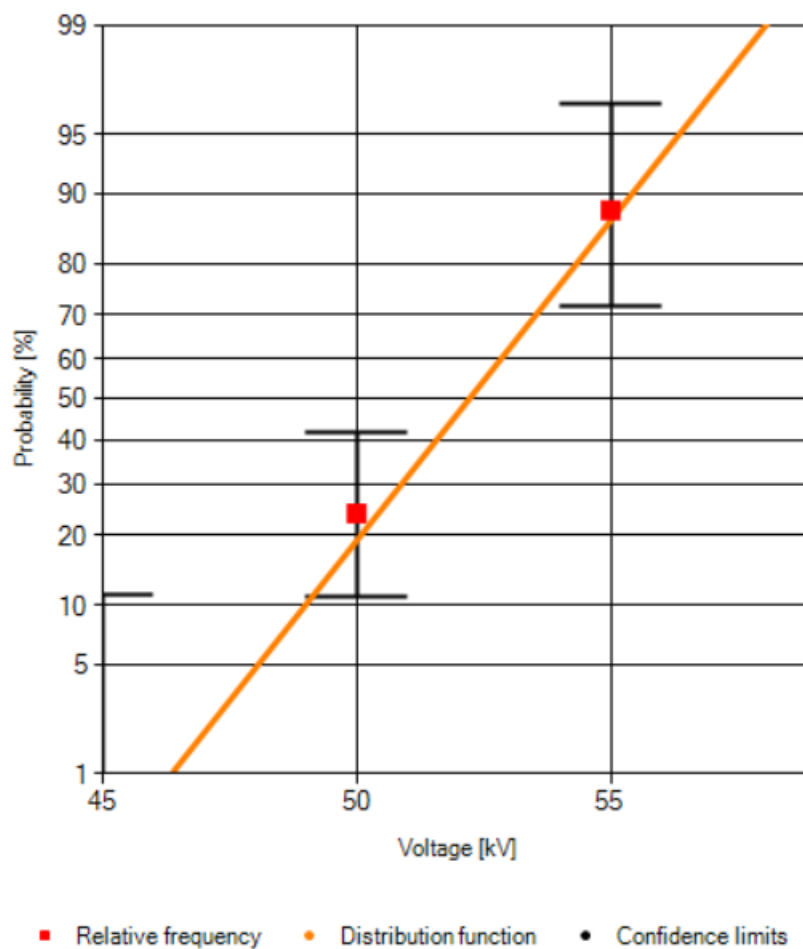
Parametry pro dané měření:

Typ a uspořádání elektrod	R2 – R75
Polarita napětí	Kladná
Vzdálenost elektrod [mm]	40
Tlak plynu [bar]	1
Typ plynu	vzduch

Naměřené hodnoty:

U [kV]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	Σ
45																										0
50		x		x								x						x	x			x				6
55	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x	x		x	x	x	x	x	x	x	x	22
60	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	25

Statistické znázornění testu v Gaussově mřížce:



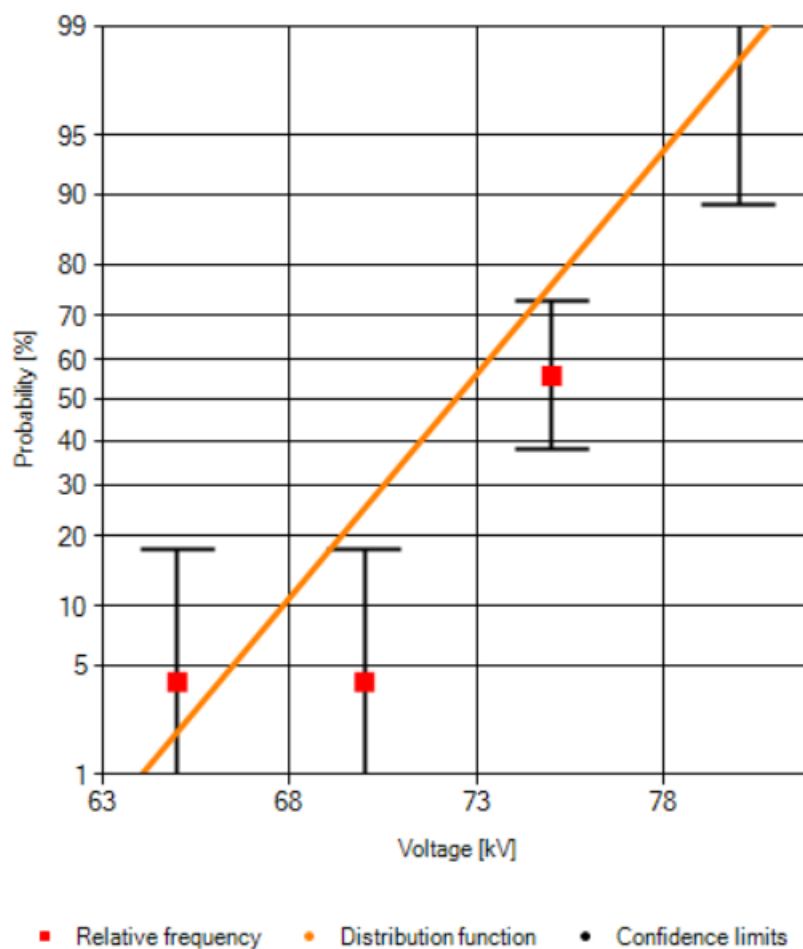
Parametry pro dané měření:

Typ a uspořádání elektrod	R2 – R75
Polarita napětí	Kladná
Vzdálenost elektrod [mm]	60
Tlak plynu [bar]	1
Typ plynu	vzduch

Naměřené hodnoty:

U [kV]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	Σ	
60																										0	
65														X													1
70												X															1
75				X				X			X	X	X	X	X	X	X		X		X		X	X	X		14
80	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		25

Statistické znázornění testu v Gaussově mřížce:



Parametry pro dané měření:

Typ a uspořádání elektrod	R2 – R75
Polarita napětí	Kladná
Vzdálenost elektrod [mm]	90
Tlak plynu [bar]	1
Typ plynu	vzduch

Naměřené hodnoty:

U [kV]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	Σ
85																										0
90							x																			1
95		x	x	x			x		x	x	x	x				x		x			x	x			x	13
100	x		x	x	x	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	23

Statistické znázornění testu v Gaussově mřížce:

