

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE**

## **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Elektrická pevnost vzduchu při impulzním napět'ovém  
namáhání**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2015/2016

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Miroslav MALÍK**  
Osobní číslo: **E14N0122P**  
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Elektroenergetika**  
Název tématu: **Elektrická pevnost vzduchu při impulzním napěťovém namáhání**  
Zadávající 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 text na téma dielektrických vlastností a užití plyných izolantů ve vysokonapěťové elektrotechnice.
2. Zpracujte formou odborného textu výklad testovacích metod užívaných v technice vysokého napětí při impulzním napěťovém namáhání.
3. Uskutečňte experimentální měření elektrické pevnosti vzduchového izolantu při impulzním namáhání. Zvolte parametry jednotlivých testů - tvar elektrod, vzdálenost, tlak plynu.
4. Experimentálně získané výsledky vhodně zpracujte, vyhodnoťte a interpretujte.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah kvalifikační práce: **40 - 60 stran**

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

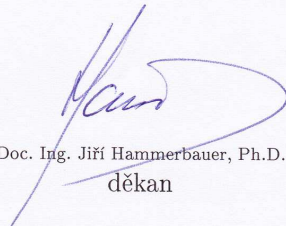
Seznam odborné literatury:

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


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

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

Termín odevzdání diplomové práce: **16. května 2016**

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



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

V Plzni dne 15. října 2015

## **Abstrakt**

Předkládaná diplomová práce se zabývá elektrickou pevností vzduchového dielektrika při působení impulzního napěťového namáhání. Úvodní část práce popisuje dielektrické vlastnosti plyných dielektrických materiálů, včetně vysvětlení průběhu výboje na jejich voltampérové charakteristice. Další část práce definuje normalizovaný napěťový pulz, jeho tvorbu v laboratorních podmínkách pomocí rázového generátoru a popisuje postup jednotlivých zkoušek pro testování tímto napětím. V praktické části práce je provedeno měření elektrické pevnosti vzduchu pomocí metody více hladinami. Výsledkem měření je statistické porovnání elektrické pevnosti vzduchu při různých parametrech testu, jako je tlak vzduchu, tvar elektrod a jejich vzájemná vzdálenost.

## **Klíčová slova**

Plynná dielektrika, elektrická pevnost, impulzní napětí, rázový generátor, impulzní zkoušky.

## **Abstract**

This diploma thesis deals with the dielectric strength of the air dielectrics at impulse voltage stress. The introductory part are described the dielectric properties of gaseous dielectric materials, including an explanation of the course of discharge on their current-voltage characteristics. The next part defines a standardized voltage pulse, his generation in the laboratory using high voltage impulse generator and describes proceeding of the tests for testing this voltage. In the practical part of the work is performed measuring the electrical strength of the air using the multiple-level method. The result of measurement is a statistical comparison of the electric strength of air at different test parameters like air pressure, the shape of the electrodes and their mutual distance.

## **Keywords**

Gaseous dielectric, dielectric strength, impulse voltage, impulse generation, impulse tests.

## **Prohlášení**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

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.

V Plzni dne 10.5.2016

Jméno příjmení

.....

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing. Petru Martínkovi, Ph.D. za cenné profesionální rady a připomínky k této práci.

Velké poděkování také patří rodičům za jejich všestrannou podporu a trpělivost, kterou mi projevovali při mém studiu.

## Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>8</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>9</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>10</b>
<b>1. PLYNNÁ DIELEKTRIKA A JEJICH VLASTNOSTI</b> .....	<b>12</b>
1.1 OBEČNÉ CHOVÁNÍ PLYNŮ .....	12
1.2 POLARIZACE DIELEKTRIKA .....	13
1.3 DIELEKTRICKÉ ZTRÁTY V PLYNNÝCH IZOLANTECH .....	14
1.4 ELEKTRICKÁ VODIVOST .....	14
1.4.1 Nárazová ionizace .....	14
1.4.2 Tepelná ionizace .....	15
1.4.3 Fotoionizace.....	15
1.4.4 Povrchová ionizace .....	16
1.4.5 Koncentrace nosičů náboje .....	16
1.5 ELEKTRICKÁ PEVNOST.....	17
1.6 VOLTAMPÉROVÁ CHARAKTERISTIKA PLYNNÉHO DIELEKTRIKA .....	18
1.6.1 Tiché výboje.....	18
1.6.2 Townsendovy výboje .....	20
1.6.3 Samostatné výboje .....	22
1.7 STREAMEROVÁ TEORIE PŘESKOKU .....	22
1.8 PASCHENŮV ZÁKON .....	23
1.9 NEHOMOGENNÍ POLE .....	24
1.10 PLYNNÉ IZOLANTY VE VYSOKONAPĚŤOVÉ TECHNICE .....	25
1.10.1 Vzduch .....	25
1.10.2 Fluorid sírový.....	26
<b>2. IMPULZNÍ NAPĚTÍ</b> .....	<b>27</b>
2.1 ATMOSFÉRICKÝ PULZ .....	28
2.2 SPÍNACÍ PULZ.....	31
2.3 GENERÁTOR IMPULZNÍHO NAPĚTÍ.....	31
2.3.1 Vícestupňový rázový generátor.....	33
2.4 ZKOUŠKY IMPULZNÍM NAPĚTÍM .....	35
2.4.1 Zkoušky více hladinami .....	35
2.4.2 Zkouška metodou nahoru-dolů .....	36
2.4.3 Zkoušky postupným namáháním .....	38
2.5 STATISTICKÉ VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ ZKOUŠEK .....	39
2.5.1 Binomické rozdělení .....	39
2.5.2 Normální rozdělení .....	41
2.5.3 Kolmogorovův - Smirnovův test.....	42
2.5.4 Lineární regrese .....	43
<b>3. TESTOVÁNÍ PLYNNÉHO DIELEKTRIKA IMPULZNÍM GENERÁTOREM</b> .....	<b>43</b>
3.1 POPIS MĚŘICÍHO PRACOVÍŠTĚ .....	43
3.2 VLIV VZDÁLENOSTI ELEKTROD.....	46
3.3 VLIV TVARU ELEKTROD .....	48
3.4 VLIV VELIKOSTI TLAKU .....	51
<b>4. ZÁVĚR</b> .....	<b>53</b>
<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ</b> .....	<b>55</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH</b> .....	<b>57</b>



## Úvod

Plyny patří mezi nejjednodušší a široce používaná dielektrika. Vzduchové dielektrikum je nejstarším plynným izolantem používaným v energetice, ovšem jeho elektrická pevnost v ideálních podmínkách v homogenním poli dosahuje pouze 3 kV/mm. Existují plynná dielektrika s větší elektrickou pevností, ale velikou výhodou vzduchu je jeho snadná dostupnost a tedy i jeho cena. Kromě ekonomické výhodnosti vede k používání vzduchu i jeho ekologičnost.

Pokud chceme plynná dielektrika efektivně využívat, je nutné znát jejich elektrické chování, především procesy vedoucí k jejich ionizaci. Jedním z hlavních témat v oboru přenosu elektrické energie je přenos velmi vysokého napětí do center městských oblastí. To má za následek vznik plynem izolovaných rozvodů, které mají za úkol spolehlivě spínat a vypínat velmi vysoké napětí s maximální spolehlivostí. Přitom je kladen důraz na to, aby rozvodna zabírala co nejmenší prostor. Z těchto důvodů musí být každé zařízení pečlivě navrhováno a testováno na odolnost velmi vysokému napětí včetně impulzních přepětí, která se v sítích vyskytují kvůli spínacím procesům a atmosférickým jevům. V dnešní době jsou plynem izolované rozvodny vyráběny až pro velikost napětí 800 kV.

Tato práce nejprve seznámí čtenáře s vlastnostmi plynných dielektrik a procesy vedoucí k výboji při působení elektrického pole. Kvůli úderům blesků a spínacím procesům vznikají v síti přepětí impulzního charakteru. Tato přepětí jsou i přes svůj velmi krátký čas trvání nebezpečná svou velkou amplitudou. Pro testování má impulzní napětí v technických normách přesně definovaný průběh. Testování impulzním napětím se provádí přesně stanovenými postupy. Abychom mohli říci, s jakou pravděpodobností dojde k přeskoku při daných parametrech, je nutné provést náležitá měření a data vyhodnotit pomocí statistických metod. Elektrický přeskok je při těchto testech brán jako náhodná veličina řídicí se danými distribučními funkcemi. Cílem práce je zjistit, jaký vliv na velikost elektrické pevnosti při impulzním namáhání má vzdálenost elektrod, tvar elektrod a tlak dielektrického média. Naměřená data budou statisticky vyhodnocena a následně mezi sebou porovnána.

## Seznam symbolů a zkratk

A	Atom (bez znaménka je elektricky neutrální)
C [F]	Kapacita
d [mm]	Vzdálenost
$e^-$	Elektron
$E_p$ [V/mm]	Elektrické pevnost
E [V/m]	Intenzita elektrického pole
f [Hz]	Frekvence
F(x)	Distribuční funkce náhodné proměnné x
f(x)	Funkce hustoty pravděpodobnosti náhodné proměnné x
$g$ [ $m^{-3}\cdot s^{-1}$ ]	Koeficient generace
h [J·s]	Planckova konstanta ( $6,625\cdot 10^{-34}$ J·s)
h [-]	Relativní frekvence
I [A]	Elektrický proud
J [ $A/m^2$ ]	Hustota elektrického proudu
J	Jiskřiště
k [ $J\cdot K^{-1}$ ]	Boltzmannova konstanta
k [-]	Počet přeskoků
L [H]	Indukčnost
m [kg]	Hmotnost částice
m [-]	Počet měřících skupin
$\Delta\vec{M}$ [C·m]	Dipólový moment objemového elementu $\Delta V$
n [mol]	Látkové množství
n [-]	Počet (elektronů; napěťových hladin)
$n_+$ , $n_-$ [-]	Koncentrace kladných (resp. záporných) iontů
$N_A$ [ $mol^{-1}$ ]	Avogadrova konstanta
p [Pa]	Tlak
$\vec{P}$ [ $C\cdot m^{-2}$ ]	Vektor polarizace
p [-]	Pravděpodobnost jevu
q [-]	Elementární náboj
r [ $m^3\cdot s^{-1}$ ]	Koeficient rekombinace
R [ $\Omega$ ]	Elektrický odpor

$R$ [ $J \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$ ]	..... Molární plynová konstanta ( $8,314 J \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$ )
$S$ [ $mm^2$ ]	..... Plocha
$t$ [s]	..... Čas
$T$ [ $^{\circ}C$ ]	..... Teplota
$T$ [s]	..... Časový úsek
$U$ [V]	..... Elektrické napětí
$U_p$ [kV]	..... Napětí s $p$ procentní pravděpodobností přeskoku
$\Delta U$ [V]	..... Napětový krok
$V$ [ $m^3$ ]	..... Objem
$V_{0max}$ [V]	..... Maximální nabíjecí napětí
$v$ [m/s]	..... Rychlost částice
$\Delta V$ [ $m^3$ ]	..... Objemový element látky
$W_i$ [J]	..... Ionizační energie
$W_t$ [J]	..... Tepelná energie
$x$	..... Náhodná proměnná
$1/\lambda$ [-]	..... Střední počet srážek elektronu na jednotkové délce
$\alpha$ [-]	..... První Townsendův ionizační koeficient
$\alpha$ [-]	..... Hladina významnosti
$\beta'$ [-]	..... Relativní velikost překmitu
$\gamma$ [-]	..... První Townsendův ionizační koeficient
$\gamma$ [ $S \cdot m^{-1}$ ]	..... Měrná vodivost
$\sigma$ [-]	..... Rozptyl
$\epsilon_0$ [ $F \cdot m^{-1}$ ]	..... Permittivita vakua ( $8,854 \cdot 10^{-12} F \cdot m^{-1}$ )
$\epsilon'$ [-]	..... Reálná část komplexní relativní permitivity
$\epsilon$ [-]	..... Koeficient spolehlivosti
$\kappa$ [-]	..... Dielektrická susceptibilita
$\lambda$ [m]	..... Vlnová délka
$\mu$ [-]	..... Střední hodnota
$\eta$ [-]	..... účinnost
$\eta$ [-]	..... Schwaigrův faktor
$\tau$ [s]	..... Časová konstanta

## 1. Plynná dielektrika a jejich vlastnosti

Dielektrikum je název pro skupinu materiálů, které si po vložení do elektrického pole dovedou vytvořit své vlastní pole. Hlavní vlastností dielektrické látky je tedy schopnost polarizovat se. Další častou vlastností těchto materiálů je jejich nízká elektrická vodivost. Není ovšem podmínkou, že by každé dielektrikum muselo být izolantem. Dielektrikum je nadřazený název, a tak lze říci pouze skutečnost, že každý izolant je zároveň i dielektrikem. Dielektrika můžeme dělit dle existence elementárního dipólového momentu na polární a nepolární. Dielektrické látky se vyskytují ve všech třech skupenstvích. O vlastnostech plynných dielektrik bude pojednáno v následujících odstavcích.

### 1.1 Obecné chování plynů

Pro plyny, které se nevyskytují v přítomnosti elektrického nebo magnetického pole, platí Boyleův-Mariottův zákon (1.1).

$$p \cdot V = C = \text{konstanta} \quad (1.1)$$

Součin tlaku a objemu plynu nám udává konstantní hodnotu, jejíž velikost je závislá na množství plynu  $m$  a jeho absolutní teplotě  $T$ . Dalším základním zákonem popisující chování plynu je Gay-Lussacův zákon vyjádřený pomocí vztahu (1.2). Tento zákon platí za předpokladu konstantního tlaku a popisuje rovnost podílu objemu  $V$  při dané teplotě  $T$  ku objemu  $V_0$  při absolutní teplotě  $T_0$  s poměrem teploty  $T$  ku  $T_0$ .

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

Pokud vezmeme v úvahu, že konstanta z rovnice (1.1) je vztažena na teplotu  $T_0$  a objem  $V_0$ . Můžeme za  $V_0$  dosadit z rovnice (1.2), a tak dostaneme stavovou rovnici ideálního plynu (1.3):

$$p \cdot V = n \left( \frac{C_0}{T_0} \right) \cdot T = nRT = C \quad (1.3)$$

Podíl  $\left( \frac{C_0}{T_0} \right)$  je nazýván univerzální plynovou konstantou  $R$ , jejíž numerická hodnota je  $8,314 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$ . Písmeno  $n$  označuje látkové množství, které lze charakterizovat jako podíl celkového počtu molekul v plynu  $N_I$  s Avogadrovým číslem  $N_A$  (počet částic v jednom látkovém množství). Rovnici (1.3) lze napsat z hlediska hustoty plynu  $N$  v objemu  $V$  obsahující  $N_I$  molekul následující rovnicí:

$$p \cdot V = \frac{N_1}{N_A} \cdot R \cdot T = N_1 \cdot k \cdot T \quad (1.4)$$

$$p = N \cdot k \cdot T$$

Podíl  $\frac{R}{N_A}$  se označuje  $k$  a je nazýván Boltzmanovou konstantou. Užitím klasické mechaniky s některými výše uvedenými předpoklady, může být souvislost mezi kinetickou energií plynu a její termální energií popsána dle vztahu (1.5). [5,6]

$$\frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 = \frac{3}{2} \cdot k \cdot T \quad (1.5)$$

kde:  $v$  - rychlost molekuly, jejíž hodnota je dána Maxwellovou distribuční funkcí.

## 1.2 Polarizace dielektrika

Polarizační proces je děj nastávající v dielektrické látce po vložení do vnějšího elektrického pole. Pokud jsou v dielektrické látce přítomny tzv. permanentní dipólové momenty, dojde při vložení do vnějšího elektrického pole pouze k jejich souhlasné orientaci s působícím elektrickým polem. Dielektrické látky obsahující permanentní dipólový moment, se říká polární. Ze skupiny plyných dielektrik se za polární považuje například oxid dusný ( $N_2O$ ) a amoniak ( $NH_3$ ).

Pokud látka neobsahuje dipólové momenty, dojde při vložení do elektrického pole k vzájemnému posunutí nábojových středů kladných a záporných nábojů. Tím dojde ke vzniku nových tzv. indukovaných dipólových momentů. Pokud přestane elektrické pole působit, tyto indukované dipólové momenty zanikají a nosiče elektrického náboje se vrací na svá původní místa. Mezi nepolární dielektrika z plyného skupenství řadíme například vodík ( $H_2$ ), kyslík ( $O_2$ ), dusík ( $N_2$ ) a fluorid sírový ( $SF_6$ ).

Výsledkem polarizace je vznik vázaného náboje na povrchu dielektrika, který lze charakterizovat pomocí vektoru polarizace  $\vec{P}$  definovaného vztahem (1.6).

$$\vec{P} = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{M}}{\Delta V} \quad (1.6)$$

kde:  $\Delta \vec{M}$  - dipólový moment objemového elementu  $\Delta V$

$\Delta V$  - objemový element látky

Vektor polarizace je závislý na intenzitě elektrického pole dle vztahu:

$$\vec{P} = \kappa \cdot \epsilon_0 \cdot \vec{E} \quad (1.7)$$

kde:  $\kappa$  - dielektrická susceptibilita

$\epsilon_0$  - permitivita vakua

V plynných dielektrikách dochází nejčastěji k elektronové, iontové a orientační polarizaci. [2,8]

### 1.3 Dielektrické ztráty v plynných izolantech

Plynná dielektrika mají díky svým velmi dobrým elektroizolačním vlastnostem velice malé dielektrické ztráty. Pro frekvenci 50 Hz se udává velikost ztrátového činitele  $tg \delta$  řádově  $10^{-8}$ . S rostoucí frekvencí se hodnota ztrátového činitele zmenšuje. Pokud budeme uvažovat v izolantu pouze vodivostní ztráty, pak velikost ztrátového činitele určíme pomocí vztahu (1.8). [2]

$$tg \delta = \frac{\gamma}{\omega \cdot \epsilon' \cdot \epsilon_0} \quad (1.8)$$

kde  $\gamma$  – konduktivita plynu

$\epsilon'$  – reálná část komplexní permitivity  $\epsilon^*$ , kde  $\epsilon^*(j\omega) = \epsilon'(\omega) - j \cdot \epsilon''(\omega)$

$\epsilon_0$  – permitivita vakua ( $8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$ )

### 1.4 Elektrická vodivost

Plyny, díky malé koncentraci volných nosičů elektrického náboje, mají při normální teplotě a slabém působení elektrického pole velmi dobré izolační vlastnosti. Tato malá koncentrace volných nosičů elektrického náboje je způsobena radioaktivním zářením Země a kosmickým zářením. Kdyby kvůli tomuto záření nedocházelo k ionizaci plynu, byl by plyn ideálním izolantem s nulovou vodivostí.

Aby se plyn stal vodivým, je nutné, aby došlo k jeho ionizaci. Ionizace nastane, když atom plynu pohltí dostatečně velké množství ionizační energie. Jednotlivé mechanismy ionizace jsou popsány níže. Pokud se ionizovaný plyn nachází mezi dvěma elektrodami o různém potenciálu, začne mezi nimi procházet elektrický proud, jehož průchod se projeví výbojem. Výboje rozdělujeme na samostatné a nesamostatné. Samostatný výboj vzniká při působení vlastního zdroje energie, čímž je dostatečně velké elektrické napětí mezi elektrodami potřebné pro vznik elektrického výboje. Naopak nesamostatný výboj vzniká ve slabých elektrických polích, kde pro svůj vznik potřebuje vnější ionizační činidlo (např. zdroj záření). Pokud přestane vnější zdroj elektronů působit, tak nesamostatný výboj zaniká. [1,2]

#### 1.4.1 Nárazová ionizace

K nárazové ionizaci dochází v elektrickém poli mezi dvěma elektrodami. Nachází-li se v mezeře mezi těmito elektrodami volný elektron, je vlivem působícího elektrického pole urychlován směrem k anodě. Dostane-li dostatečně velkou kinetickou energii, dojde k vzájemné srážce mezi tímto elektronem a neutrální částicí. Srážkou dojde k interakci

silových polí těchto dvou částic a vzájemnému vychýlení jejich původních drah. Aby došlo k ionizaci, musí být kinetická energie elektronů větší, než ionizační energie neutrální částice plynu, čímž dojde k nepružné srážce (1.9).

$$\frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \geq W_i \quad (1.9)$$

Při splnění této podmínky každá srážka vytvoří pozitivní iont a další elektron. Kladný iont je přitahován ke katodě. Oba elektrony získávají energii z elektrického pole a mohou ionizovat další molekulu plynu. Pokud by nebyla kinetická energie elektronu větší než ionizační energie, narážející elektron by molekulu pouze nabudil a ionizace by mohla být dokončena až nárazem dalšího pomalého elektronu. Tomuto procesu se říká postupná ionizace a je významná pouze tam, kde je velká hustota elektronů. Proces nárazové ionizace je možné popsat pomocí následující rovnice:



kde: A – atom (případné znaménko určuje jeho náboj)

$e^-$  – elektron

V atmosférickém vzduchu je hlavním ionizačním činidlem plyn radon, který se rozpadá a v jeho okolí probíhá proces nárazové ionizace. Nárazová ionizace může být vyvolána i rychle se pohybujícími částicemi  $\alpha$  a  $\beta$  radioaktivních látek. [2,5,8]

### 1.4.2 Tepelná ionizace

Tepelná ionizace je speciální typ nárazové ionizace, při které je pro urychlení částic plynu použito vysoké teploty. Při vysoké teplotě se částice plynu pohybují rychleji, a tak mezi nimi může docházet ke srážkám. Tepelná energie  $W_t$  může způsobit ionizaci sama o sobě, anebo se může projevit až při hoření oblouku díky jeho vysoké teplotě. Proces tepelné ionizace lze popsat rovnicí (1.11). [5]



### 1.4.3 Fotoionizace

Fotoionizací se nazývá proces, který je způsoben absorpcí fotonu neutrálním atomem. Kinetická energie fotonu je dána součinem Planckovy konstanty  $h$  a frekvencí záření  $f$ . Obdobně jako u nárazové ionizace musí být splněna podmínka velikostí energií (1.12).

$$h \cdot f \geq W_i \quad (1.12)$$

kde:  $h$  – Planckova konstanta ( $h = 6,625 \cdot 10^{-34}$  J·s)

$f$  – frekvence záření  $f=c/\lambda$  ( $c$  – rychlost světla;  $\lambda$  – vlnová délka)

$W_i$  – ionizační energie

Pokud není podmínka splněna, je stejně jako u nárazové ionizace možná postupná ionizace. Ve vzduchu se na procesu fotoionizace nejvíce podílí kosmické záření. Dále fotoionizaci způsobují i rentgenové paprsky a gama záření. Pokud v plynu nastane výboj, začne se fotoionizace uplatňovat jako sekundární proces. [1,2]

#### 1.4.4 Povrchová ionizace

U tohoto typu ionizace dochází k uvolňování elektronů z povrchu elektrod. Aby k tomuto jevu docházelo, je nutné dodat výstupní práci, například ve formě tepelné energie (zahřívání elektrody) nebo pomocí krátkovlnného záření, které způsobuje na povrchu elektrod vnější fotoefekt. Oproti ostatním typům ionizace, při kterých vodivost mezi elektrodami je závislá na použitém plynu, je u povrchové ionizace elektrická vodivost závislá na materiálu elektrod. [1,2]

#### 1.4.5 Koncentrace nosičů náboje

Kromě ionizace, která má za následek zvyšování počtu volných nosičů náboje, probíhají v plynu zároveň děje snižující jejich počet. Snižování počtu volných nosičů je způsobeno především těmito dvěma mechanismy deionizace:

- Neutralizací
- Rekombinací

**Neutralizace** – děj, při kterém volný nosič náboje přitahovaný elektrodou opačné polarity, této elektrodě odevzdá svůj náboj. Zpátky od elektrody se atom vrací jako elektricky neutrální.

**Rekombinace** – jev, ke kterému dochází, po srážce dvou opačně orientovaných částic. Mezi částicemi dojde k výměně náboje a z obou atomů nebo molekul se stávají neutrální částice. Pravděpodobnost, že dojde k rekombinaci mezi dvěma opačně nabitými částicemi, se zvětšuje, čím déle jsou rekombinující částice vedle sebe. Při působení rekombinace se bude koncentrace kladných a záporných nosičů náboje řídit rovnicí:

$$\frac{dn_+}{dt} = \frac{dn_-}{dt} = -r \cdot n_+ \cdot n_- \quad (1.13)$$

kde:  $r$  – koeficient rekombinace

$n_+$ ,  $n_-$  – koncentrace kladných (resp. záporných) iontů

Pokud budeme uvažovat stejnou koncentraci kladných i záporných iontů, lze rovnici přepsat do tvaru:

$$\frac{dn}{dt} = -r \cdot n^2 \quad (1.14)$$



Budeme-li tuto rovnici integrovat v závislosti na čase, dostaneme vztah pro koncentraci volných nosičů náboje v daném čase:

$$n(t) = \frac{n_0}{1 + n_0 \cdot r \cdot t} \quad (1.15)$$

kde:  $n_0$  – počáteční hodnota koncentrace volných nosičů náboje

Tyto vztahy (1.13 – 1.15) jsou ovšem platné pouze za předpokladu, že v plynu přestalo působit ionizační činidlo. Pokud bychom chtěli znát koncentraci volných nosičů náboje při působení ionizace, museli bychom do vztahu (1.14) zahrnout ještě koeficient generace  $g$ .

$$\frac{dn}{dt} = g - r \cdot n^2 \quad (1.16)$$

Řešením této rovnice získáme:

$$n = \sqrt{\frac{g}{r}} \cdot \tanh \sqrt{g \cdot r \cdot t} \quad (1.17)$$

V ustáleném stavu je časová derivace koncentrace volných nosičů náboje rovna nule, a tak lze napsat vztah (1.18) pro koncentraci volných nosičů náboje při působení ionizace i rekombinace zároveň. [2,5]

$$n = \left(\frac{g}{r}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (1.18)$$

## 1.5 Elektrická pevnost

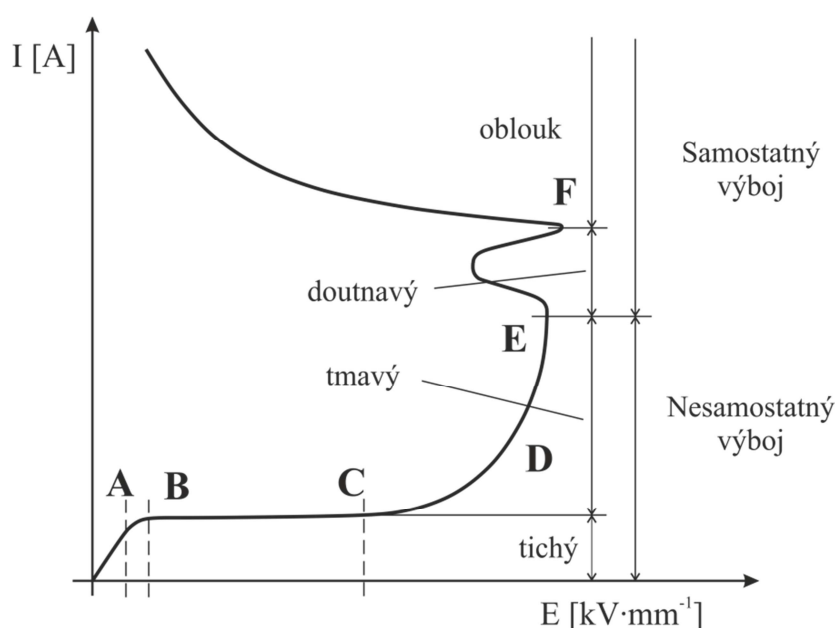
Elektrická pevnost je veličina charakteristická pro všechny elektroizolační materiály. Udává kvalitu izolačního materiálu z hlediska schopnosti elektrického oddělení dvou míst s rozdílným elektrickým potenciálem. Pokud budeme zvyšovat napětí mezi 2 elektrodami oddělenými elektroizolačním materiálem, bude tento materiál plnit izolační funkci až do té doby, než bude na elektrodách dosaženo kritického napětí. Při tomto napětí dojde k průrazu izolačního materiálu a následnému toku proudu mezi elektrodami. Průraz ovšem nastává pouze u pevných látek a jedná se o nevratné poškození jejich elektroizolační schopnosti. U plyných a kapalných izolantů dojde po dosažení kritické hodnoty napětí k elektrickému přeskoku. Přeskok, stejně jako průraz, způsobí vodivou cestu mezi elektrodami, která se projeví elektrickým výbojem. Ovšem na rozdíl od průrazu je přeskok pouze dočasný stav a po uhašení elektrického oblouku dojde u plyných a kapalných izolantů k samogeneraci elektrické pevnosti. Hodnota elektrické pevnosti je dána poměrem mezi velikostí napětí, při kterém došlo k elektrickému přeskoku (průrazu) a vzdáleností mezi elektrodami.

$$E_P = \frac{U_P}{d} \quad (1.19)$$

Z důvodu velkých hodnot elektrické pevnosti při dosazení v základních jednotkách, se elektrická pevnost udává v kV na mm. Elektrická pevnost je závislá na tvaru elektrod určujících homogenitu elektrického pole, druhu napětí (stejnoseměrné, střídavé, impulzní), době působení, a také dalších fyzikálních veličinách jako je teplota a tlak. [7]

## 1.6 Voltampérová charakteristika plynného dielektrika

Voltampérová charakteristika je základním ukazatelem elektrické vodivosti plynných izolantů. Jedná se o závislost velikosti proudu tekoucího skrz plynné dielektrikum mezi dvěma elektrodami na velikosti intenzity elektrického pole. Na úplné voltampérové charakteristice (Obrázek 1.1) můžeme vidět rozdělení výboje na samostatný a nesamostatný. V následujících podkapitolách bude vysvětlen průběh této charakteristiky.



### 1.6.1 Tiché výboje

Přivedeme-li napětí na elektrody, začne v plynu probíhat ionizace, jejíž rychlost je závislá na intenzitě elektrického pole. Ovšem zároveň s ionizací působí i proces rekombinace. Rychlost rekombinace je přímo úměrná kvadrátu koncentrace iontových párů v plynu. Pokud budeme předpokládat konstantní rychlost ionizace, bude se rychlost rekombinace zvyšovat až do té hodnoty, než dojde k dynamické rovnováze. Tehdy bude počet vznikajících nosičů náboje stejný jako počet zanikajících. Rovnováhu mezi počtem vznikajících a zanikajících nosičů náboje lze popsat rovnicí (1.20).

$$g \cdot S \cdot d = r \cdot n^2 \cdot S \cdot d + \frac{I}{q} \quad (1.20)$$

kde:  $q$  – elementární náboj  
 $S \cdot d$  – objem dielektrika  
 $g$  – koeficient generace  
 $r$  – koeficient rekombinace

Člen vlevo představuje vznikající ionty, první člen na pravé straně rovnice ionty zaniklé rekombinací a poslední člen je náhradou za ionty zaniklé neutralizací. Pokud použijeme vyjádření tohoto vztahu se zavedením proudové hustoty  $J = I/S$ , vztah se promění do následujícího tvaru:

$$g = r \cdot n^2 + \frac{J}{q \cdot d} \quad (1.21)$$

Význam jednotlivých členů rovnice je stejný jako u předchozího vztahu (1.20). Dle toho jakým způsobem zaniká více volných nosičů náboje, rozdělujeme tento vztah na 2 případy.

Nejprve se budeme zabývat případem, při kterém kvůli malé intenzitě působení elektrického pole nemají částice takovou energii, aby se dostaly až k elektrodám, a tak zatím převládá rekombinace volných nosičů náboje nad jejich neutralizací. Na voltampérové charakteristice je tomuto případu vyčleněna část od počátku do bodu A. Při zvyšování elektrického napětí na elektrodách dochází k lineárnímu nárůstu proudu. Z toho vyplývá, že v této části platí Ohmův zákon.

Když je překročena přechodová část mezi body A a B, dostáváme se do fáze, při které je naopak neutralizace větší než rekombinace. Nosiče náboje získávají větší rychlost, a tak jsou schopni dostat se až na elektrodu, kde předají náboj v podobě neutralizace. Naopak, díky větší rychlosti těchto nábojů se rekombinující schopnost částic razantně snižuje. Platí tedy:

$$r \cdot n^2 \ll \frac{J}{q \cdot d} \quad (1.22)$$

Zanedbáme-li tedy rekombinační člen, dostaneme vztah pro proudovou hustotu:

$$J = g \cdot q \cdot d \quad (1.23)$$

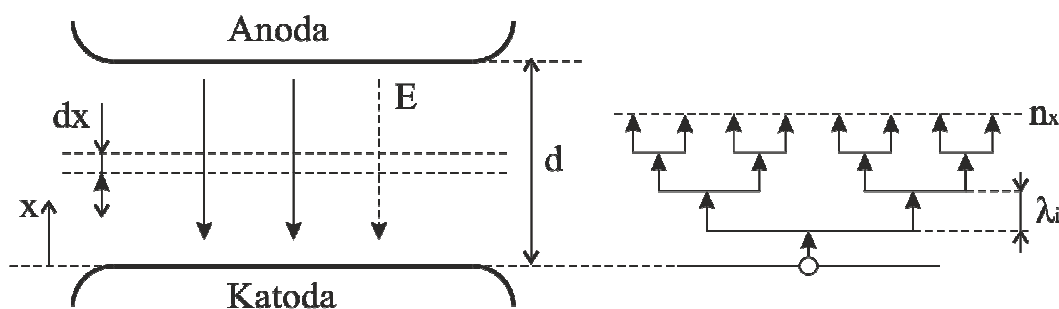
Jak ze vztahu (1.23), tak z průběhu charakteristiky mezi body B a C je vidět nezávislost proudové hustoty na intenzitě elektrického pole. Plynným dielektrikem protéká tzv. nasycený proud. Až do hodnoty intenzity elektrického pole  $E_k$  se jedná o oblast nesamostatné vodivosti. Zvýšíme-li intenzitu elektrického pole nad úroveň zápalného napětí (této velikosti odpovídá bod C), začíná v plynu probíhat nárazová ionizace způsobující exponenciální nárůst proudu. Této oblasti se věnuje následující podkapitola. [2]

### 1.6.2 Townsendovy výboje

Nesamostatnými výboji v části voltampérové charakteristiky mezi body C až E se zabýval britský fyzik John Sealy Townsend, po němž je pojmenována teorie nesamostatných výbojů v plynném dielektriku. Změna strmosti nárůstu proudu rozděluje tento úsek charakteristiky na dvě části.

#### První Townsendův ionizační koeficient

Nejprve se budeme zabývat oblastí mezi body C a D. Vlivem vnějšího ionizačního činidla dochází k uvolnění elektronu z katody. Elektrické pole svým působením dodává elektronu kinetickou energii, a tak dochází k jeho urychlování. Vlivem nárazové ionizace (viz kapitola 1.4.1) dochází k nárůstu počtu nepružných srážek. Kvůli velké koncentraci srážek se střední rychlost elektronu ustálí na konstantní hodnotě. Pro vysvětlení nárůstu proudu v této oblasti byl zaveden tzv. první Townsendův ionizační koeficient  $\alpha$ . Ten je definován jako počet ionizačních srážek způsobených elektronem na jednotku délky ve směru pole.



Obrázek 1.2 - Uspořádání v Townsendově teorii s naznačenou elektronovou lavinou [6]

Budeme-li předpokládat počet elektronů  $n$ , ve vzdálenosti  $x$  od katody ve směru pole, pak zvýšení elektronů  $dn$  na dráze  $dx$  je dáno vztahem:

$$\frac{dn}{dx} = n \cdot \alpha \quad (1.24)$$

Abychom určili přírůstek nových elektronů na celé dráze mezi elektrodami, musíme danou rovnici integrovat po celé dráze  $d$ . Výsledkem integrace dostaneme:

$$n(d) = n(0) \cdot e^{\alpha \cdot d} \quad (1.25)$$

kde:  $n(0)$  – počet elektronů uvolněných vlivem působení vnějšího ionizačního činidla za jednotku času z jednotkové plochy katody

$n(d)$  – počet elektronů, které dorazily k anodě

Přírůstek nových elektronů se při průběhu nárazové ionizace zvyšuje exponenciálně s přibývajícím vzdáleností elektronu od katody. Velikost proudu lze přepsáním předchozí rovnice vyjádřit jako:

$$I(d) = I(0) \cdot e^{\alpha \cdot d} \quad (1.26)$$

kde:  $I(0)$  – počáteční velikost proudu na katodě

$e^{\alpha \cdot d}$  – činitel zesílení laviny

Energii získanou jedním elektronem na jeho střední dráze  $\lambda$  vyjádříme vztahem:

$$W = e \cdot E \cdot \lambda \quad (1.27)$$

kde:  $e$  – elementární náboj

Počet srážek na délkové jednotce je  $I/\lambda$ . První Townsendův koeficient  $\alpha$  je funkcí intenzity elektrického pole  $E$ . Při konstantní teplotě závisí na tlaku plynu  $p$ , a proto tedy pak můžeme psát:

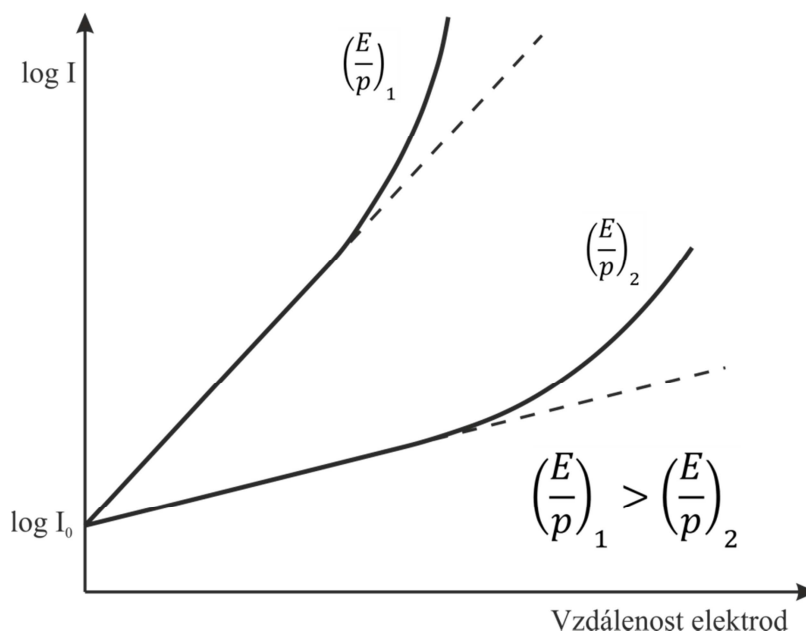
$$\alpha = p \cdot f\left(\frac{E}{p}\right) \quad (1.28)$$

### Druhý Townsendův ionizační koeficient

Pokud bychom rovnici (1.26) zlogaritmovali, dostaneme rovnici přímky ve tvaru:

$$\ln(I) = \ln(I_0) + \alpha x \quad (1.29)$$

Znázorníme-li graficky tuto přímku (Obrázek 1.3 - čárkovaná čára) a porovnáme s experimentálně zjištěnými hodnotami (plná čára), zjistíme, že dochází na přímce ke zlomu a skutečný proud narůstá mnohem rychleji.



Obrázek 1.3 - Velikost proudu v závislosti na vzdálenosti elektrod v homogenním elektrickém poli [6]

Na grafu jsou zobrazeny dvě křivky, přičemž každá z nich odpovídá jiné velikosti poměru  $E/p$ . Z těchto křivek je patrné, že v silnějším elektrickém poli dojde ke zlomu dříve a nárůst proudu bude rychlejší. Prudký nárůst proudu způsobují kladné ionty, které vlivem

působení elektrického pole narážejí do katody. Tímto nárazem dojde na katodě k vyvolání povrchové emise elektronů. Počet uvolněných elektronů z katody po dopadu jednoho kladného iontu se nazývá druhým Townsendovým ionizačním koeficientem  $\gamma$ . Tento koeficient je funkcí poměru  $E/p$  a závisí také na materiálu elektrod. Počet elektronů dosahujících anody za jednu vteřinu je dán vztahem:

$$n = (n_0 + n_+) \cdot e^{\alpha d} \quad (1.30)$$

kde:  $n_0$  – počet elektronů uvolněných z katody pomocí ionizačního činitele

$n_+$  - počet elektronů uvolněných z katody nárazem kladných iontů

Jestliže ke každému elektronu náleží jeden kladný iont a víme, že každý kladný iont uvolní z katody  $\gamma$  elektronů, můžeme pro  $n_+$  psát:

$$n_+ = \gamma \cdot [n - (n_0 + n_+)] \quad (1.31)$$

Dosazením do vztahu (1.30) pak můžeme vyjádřit počet elektronů  $n$  jako:

$$n = \frac{n_0 \cdot e^{\alpha d}}{1 - \gamma \cdot (e^{\alpha d} - 1)} \quad (1.32)$$

V případě vyjádření proudu lze vztah přepsat následovně:

$$I = \frac{I_0 \cdot e^{\alpha d}}{1 - \gamma \cdot (e^{\alpha d} - 1)} \quad (1.33)$$

Proud je tedy v porovnání se vztahem (1.26) větší, ovšem stále se pohybujeme v nesamostatném výboji. Pokud by přestali působit vnější ionizační činitelé, tak by proud zanikl. [1,2,6]

### 1.6.3 Samostatné výboje

K tomu, aby nebyl proud mezi elektrodami přerušen, když přestane působit vnější ionizační činidlo, je třeba splnit podmínku samostatného výboje (1.34).

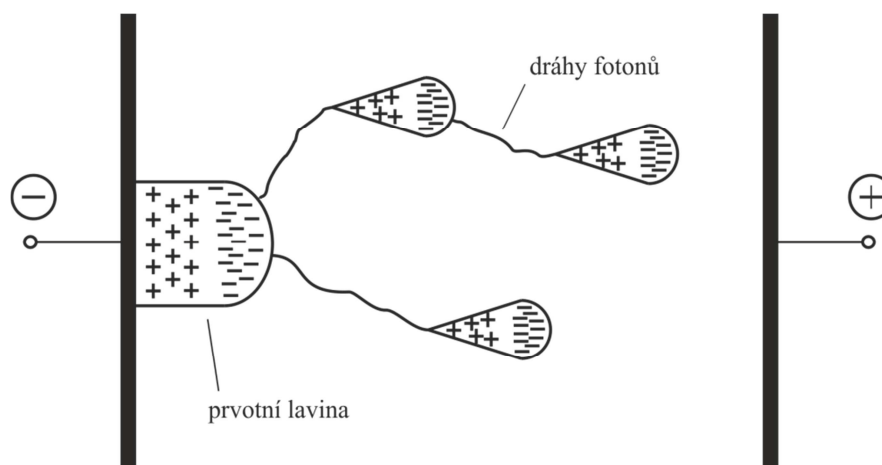
$$\gamma \cdot (e^{\alpha d} - 1) = 1 \quad (1.34)$$

Výraz uvedený v závorce značí počet kladných iontů vytvořených jediným elektronem, který je emitován z katody při jeho pohybu mezi elektrodami. Celá levá strana rovnice (1.34) vyjadřuje počet elektronů uvolněných právě těmito ionty z katody a velikostně se má rovnat jedné. Z toho vyplývá, že samostatný výboj nastane, když elektron opouštějící katodu vytvoří kladné ionty, které uvolní na katodě zase jeden nový elektron. Při splnění této podmínky již neplatí vztahy pro nesamostatný výboj. [1,2]

## 1.7 Streamerová teorie přeskoků

Při intenzitách elektrického pole, které způsobí jiskrový výboj, přestává platit Townsendova teorie, jelikož za krátký čas výstavby jiskry ( $10^{-7}$  s) se kladné ionty nestihnou

dostat přes celou vzdálenost mezi elektrodami a uvolnit na katodě potřebný počet elektronů. Při tvorbě takovýchto rychlých samostatných výbojů se uplatňuje mechanismus streamerové teorie přeskoku. Začátek výboje je tvořen elektronovou lavinou, na jejímž čele probíhá nárazová ionizace. Elektronová lavina za sebou zanechává prostorový náboj, který po dosažení potřebné velikosti přechází v kanálový výboj šířící se k oběma elektrodám. Rozhodující vliv na rychlost propojení elektrod výbojem má probíhající fotoionizace, která je způsobena zářením vycházejícím z první laviny. Díky fotoionizaci se před čelem prvotní laviny vytvoří nový elektron přitahovaný k anodě a vlivem nárazové ionizace způsobuje další lavinu. Těchto lavin vzniká velké množství, přičemž se sekundární laviny spojují do úzkého výbojového kanálu nazývaného streamer. [2,19]



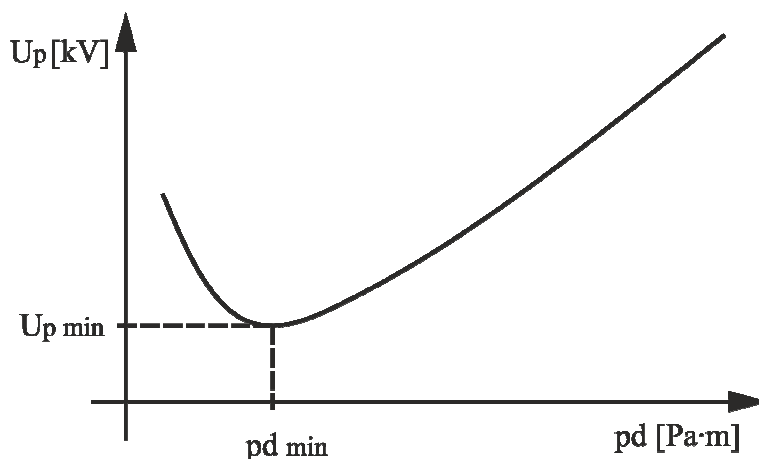
Obrázek 1.4 - Vznik streamerového výboje [2]

## 1.8 Paschenův zákon

Ještě před vznikem Townsendovy teorie elektrického výboje bylo experimentálně dokázáno německým fyzikem Friedrichem Paschenem, že velikost přeskokového napětí v plynu silně závisí na jeho tlaku.

$$U_p = f(p \cdot d) \quad (1.35)$$

Paschenův zákon (1.35) nám říká, že přeskokové napětí je funkcí součinu vzdálenosti elektrod a tlaku plynu mezi nimi. Jinými slovy lze říci, že pokud bychom například zdvojnásobili vzdálenost elektrod tak proto, aby nám zůstala stejná hodnota přeskokového napětí, musíme dvakrát zmenšit velikost tlaku. Tento zákon platí pouze v homogenním prostředí za stálé teploty. Paschenův zákon lze znázornit také graficky pomocí Paschenovy křivky (Obrázek 1.5).

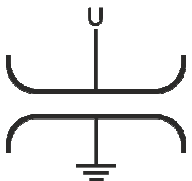
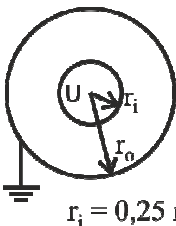
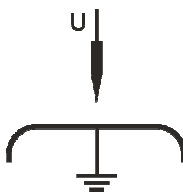


Obrázek 1.5 - Paschenova křivka [2]

Pomocí této křivky můžeme u každého plynného dielektrika zjistit podmínky energeticky nejvýhodnějších parametrů pro udržení elektrického výboje. Levá část křivky až do minima je popisována při konstantní vzdálenosti elektrod a měněním se tlaku. Při vyšším tlaku se zvyšuje pravděpodobnost nárazu volného elektronu s neutrální molekulou, která by jím mohla být ionizována. Když se ovšem dostaneme do bodu zlomu, tak je již velká koncentrace molekul a elektron se nestačí urychlit na takovou rychlost, aby došlo k nepružné srážce. Od této velikosti tlaku se s jeho dalším nárůstem zhoršují podmínky pro vytvoření elektrického oblouku. [2,6]

### 1.9 Nehomogenní pole

Elektrické pole tvořené dvěma elektrodami můžeme rozdělovat na homogenní a nehomogenní. V homogenním poli má elektrická intenzita v každém bodě stejnou velikost a směr. Příkladem homogenního pole je uspořádání dvou deskových elektrod. Pokud nejsou siločáry navzájem rovnoběžné, je pole nazýváno nehomogenním. Dle míry nehomogenity rozdělujeme pole na slabě nehomogenní a silně nehomogenní (Obrázek 1.6).

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

Obrázek 1.6 - Nehomogenita různých elektrodoých uspořádání [10]



Stupeň nehomogenity pole je udávána pomocí Schwaigrova faktoru  $\eta$ , který určujeme jako poměr průměrné intenzity ku maximální intenzitě elektrického pole (1.36). Hodnota  $\eta$  leží v rozmezí 0 až 1, přičemž hodnota 1 přísluší homogennímu poli.

$$\eta = \frac{E_{mean}}{E_{max}} = \frac{U}{d \cdot E_{max}} \quad (1.36)$$

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

Jelikož u nehomogenního pole není intenzita elektrického pole všude stejná, dochází před vznikem elektrického výboje ke koróně. Koróna je speciální forma výboje, která se v nejsilnějších místech elektrického pole projevuje částečnými výboji, ale kvůli místům se slabou elektrickou intenzitou, v níž se nemohou tvořit laviny, nedojde k úplnému výbojovému propojení elektrod. [6,10]

## 1.10 Plynné izolanty ve vysokonapěťové technice

Plynná dielektrika jsou ve vysokonapěťové technice často využívána. Mezi jejich hlavních výhody patří schopnost rovnoměrně vyplnit celý objem. Dielektrické ztráty plynných izolantů jsou velice malé a při přeskočení dovedou po ukončení výboje velice rychle obnovit svou izolační schopnost. Nevýhodou je, že plyny oproti kapalným a pevným dielektrikům mají nejmenší elektrickou pevnost.

### 1.10.1 Vzduch

Vzduch je díky své dostupnosti a ekonomické výhodnosti velice často používaným plynným dielektrikem. Velké využití má při přenosu elektrické energie, přičemž u venkovního vedení slouží jako izolant mezi jednotlivými fázemi a zemí. Další jeho využití nalezneme u vzduchových kondenzátorů a transformátorů. Vlastnosti vzduchu, které jsou platné při teplotě 20°C, atmosférickém tlaku 100 kPa a homogenním elektrickém poli, udává Tabulka 1.1.

Relativní permitivita $\epsilon_r$ [-]	1,000594
Konduktivita $\sigma$ [ $S \cdot m^{-1}$ ]	$10^{-14}$
Ztrátový činitel $tg \delta$ [-]	$10^{-6}$
Elektrická pevnost $E_p$ [kV/mm]	3

Tabulka 1.1- Dielektrické vlastnosti vzduchu

V praxi se však většinou vyskytuje nehomogenní elektrické pole, a tak je skutečná elektrická pevnost vzduchu nižší. Doporučuje se proto počítat s elektrickou pevností

vzduchu 1 kV/mm. Pro suchý čistý vzduch ve spodních vrstvách atmosféry (do 20 km) se udává složení uvedené v Tabulce 1.2. [7,8]

Dusík	78 %	Metan	$1 \cdot 10^{-4}$ %
Kyslík	21 %	Vodík	$1 \cdot 10^{-4}$ %
Argon	0,93 %	Oxid uhličitý	0,03 %
Neon	$1,61 \cdot 10^{-3}$ %	Krypton	$1,08 \cdot 10^{-4}$ %
Helium	$4,6 \cdot 10^{-4}$ %	Xenon	$8 \cdot 10^{-6}$ %

Tabulka 1.2- Složení vzduchu

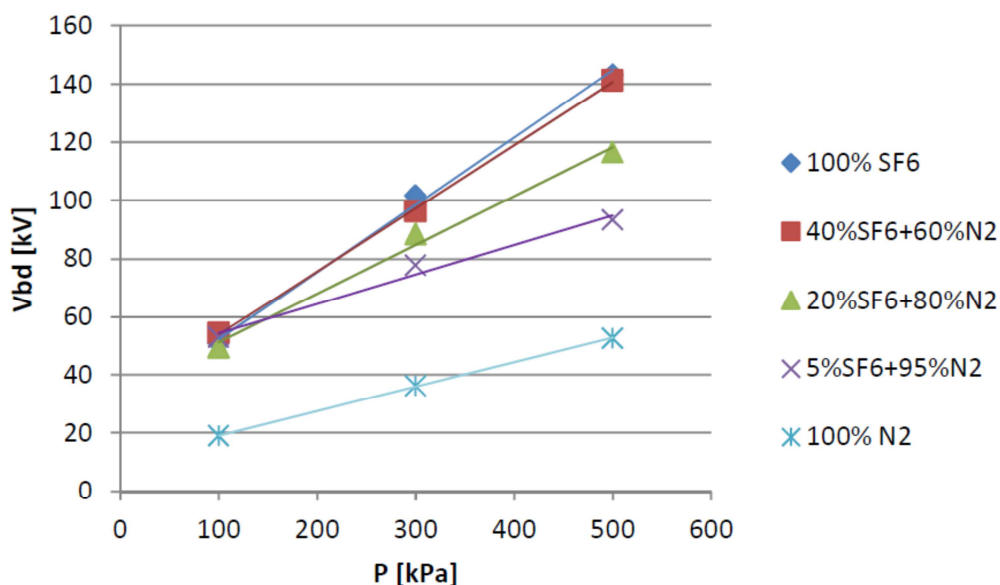
## Dusík

Vzhledem k tomu, že převážná část vzduchu je tvořena právě dusíkem, jsou jejich dielektrické vlastnosti podobné. Samotný dusík je někdy využíván tam, kde by vzduch mohl ostatní materiály poškozovat svými oxidačními účinky. Takový případ je u olejových transformátorů, kde se dusík používá jako inertní atmosféra chránící izolační olej před jeho okysličováním. [8]

### 1.10.2 Fluorid sírový

Fluorid sírový označovaný  $\text{SF}_6$  patří do skupiny elektronegativních plynů. Tyto plyny mají díky obsahu chloru a fluoru sníženou pohyblivost nosičů náboje, která má za následek zvýšení jejich elektrické pevnosti. Oproti vzduchu je jeho elektrická pevnost 2,5 krát větší. Do kapalného stavu přechází při teplotě  $-64$  °C a tepelně může být namáhán až do teploty  $150$  °C.  $\text{SF}_6$  patří mezi nejtěžší plyny, v porovnání se vzduchem je 5 krát těžší. Mezi vlastnosti čistého nedegradovaného plynu  $\text{SF}_6$  patří nehořlavost, bezbarvost a chemická neaktivnost s ostatními látkami. Plyn  $\text{SF}_6$  není jedovatý, ale z důvodu jeho hmotnosti může dojít v uzavřených prostorech k vytlačení vzduchu, potřebného pro živé organismy, do horních prostorů místnosti. Při vyšší koncentraci tohoto plynu ve vzduchu může docházet k dušnosti, kašli, otoku plic a k poškození nervové soustavy. Pokud v nádobě, kde je plyn  $\text{SF}_6$ , dojde k výskytu elektrického oblouku,  $\text{SF}_6$  degraduje. Při výboji se  $\text{SF}_6$  rozpadá na látky, které jsou pro člověka nebezpečné. Jedná se o tvorbu těchto plynů:  $\text{SF}_4$  – fluorid siřičitý, F – fluor,  $\text{F}_2$  – fluorin, HF – fluorovodík,  $\text{SO}_2\text{F}_2$  – sulfuryl fluorid,  $\text{SO}_2$  – oxid siřičitý. Z hlediska ochrany zdraví člověka je tedy lepší provozovat rozvaděče bez plynu  $\text{SF}_6$ . Další negativní vlastností je jeho velký vliv na tvorbu skleníkového efektu. V porovnání s často diskutovaným skleníkovým plynem  $\text{CO}_2$ , je vliv plynu  $\text{SF}_6$  na globální oteplování 23 000 krát větší. Poločas rozpadu plynu  $\text{SF}_6$  se odhaduje na 3 000 let. Z tohoto důvodu je snaha omezit používání plynu  $\text{SF}_6$ , nebo jej nahrazovat jiným. Autoři studie popsané v [9] se zabývali testováním kombinací plynů  $\text{SF}_6$  a  $\text{N}_2$ . Měřením elektrické pevnosti bylo dokázáno, že při poměru plynů 40%  $\text{SF}_6$

a 60% N<sub>2</sub> dojde pouze k nepatrnému poklesu elektrické pevnosti, než při použití čistého fluoridu sírového. Chování samotných plynů SF<sub>6</sub> a N<sub>2</sub> v porovnání s jejich kombinacemi při různých koncentracích je graficky zobrazeno na Obrázku 1.7. Kromě ekologického důvodu pro použití této směsi může být i ekonomická výhodnost, jelikož dusík je v porovnání s fluoridem sírovým levnější.



Obrázek 1.7- Elektrická pevnost vSF<sub>6</sub>, N<sub>2</sub> a jejich kombinací [9]

Plyn SF<sub>6</sub> je z důvodu velké elektrické pevnosti využíván jako chladicí a izolační médium v transformátorech a elektrických rozvaděčích. U vypínačů velmi vysokého napětí se používá pro zhasnutí oblouku. Pořizovací náklady rozvaděče s plynem SF<sub>6</sub> a bez tohoto plynu jsou téměř srovnatelné, ovšem v provozních nákladech je rozvaděč obsahující plyn SF<sub>6</sub> dražší. U rozvaděče s fluoridem sírovým je nutná kontrola tlaku tohoto plynu. Udává se, že během životnosti rozvaděče 8% plynu samovolně unikne, toto uniklé množství je při kontrole nutné doplňovat. [7,9,11]

## 2. Impulzní napětí

Všechna elektrická zařízení používaná pro přenos elektrické energie (např. transformátory, průchodky, izolátory, ...) se navrhují tak, aby odolala elektrickému namáhání, které dle velikosti napětí dělíme na dva druhy.

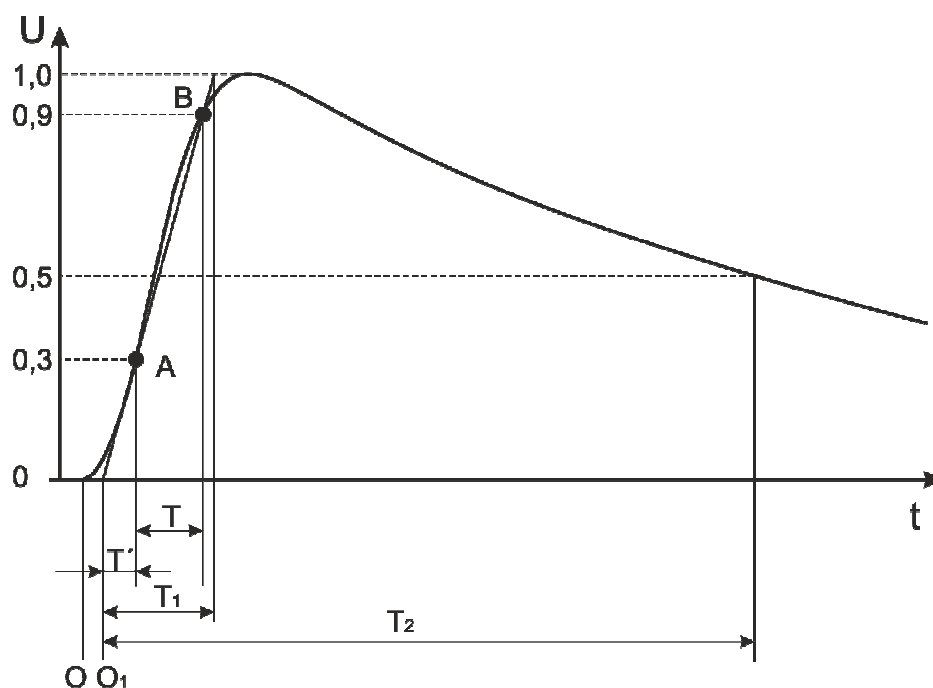
- Prvním typem je elektrické namáhání provozním napětím, kterému jsou zařízení vystavena trvale, a tak odolnost vůči tomuto namáhání nesmí být časově omezena.
- Napětí vyšší než provozní je nazýváno přepětím. Přepětí je velmi často tvořeno impulzem aperiodického charakteru s trváním velmi krátkého časového intervalu.

Impulzní přepětí je druhem napětí, jehož hodnota amplitudy značně přesahuje špičkovou hodnotu provozního napětí. Obecně lze říci, že se jedná o pulzy, které mají velice rychlý náběh na svou maximální hodnotu a pak pomalý pokles na nulovou hodnotu. Impulzní napětí dělíme na atmosférické a spínací.

## 2.1 Atmosférický pulz

Atmosférické přepětí je nejčastěji způsobeno přímým úderem blesku do fázového vodiče venkovního vedení. Pro vznik atmosférického přepětí stačí i nepřímý úder blesku, který nezasáhne přímo vedení. V tomto případě se vytvoří elektromagnetickou indukci od blesku indukované přepětí šířící se rychlostí světla. Amplituda atmosférického pulzu nabývá vysokých hodnot, obvykle v řádu 1000 kV, nebo více. Každý úder je následován šířící se vlnou po vedení, jejíž amplituda je omezena pevností izolace venkovního vedení. Rychlost nárůstu přepětí takovéto vlny je na svém počátku přímo úměrná strmosti proudu, který může dosahovat hodnoty 100 kA/ $\mu$ s. [6]

Průběh atmosférického pulzu používaného pro testování zařízení je definován normou ČSN EN 60060-1. Tvar atmosférického pulzu s definovanými časovými parametry je zobrazen na Obrázku 2.1.



Obrázek 2.1 - Plný atmosférický pulz [3]

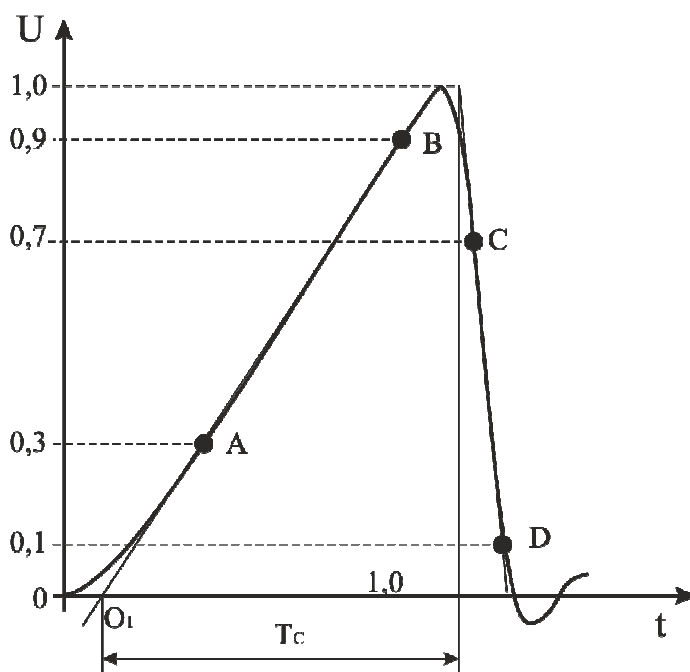
Hodnota  $O_1$  označuje virtuální počátek, který je definován jako průsečík přímky tvořené body  $A$  a  $B$  v čele pulzu s časovou osou. Bod  $A$  je umístěn v čele pulzu, kdy jeho hodnota dosahuje 30 % vrcholového napětí plného pulzu. Bod  $B$  odpovídá 90 % úrovni vrcholové

hodnoty napětí opět v čele pulzu. Doba čela  $T_1$  je též zdánlivý parametr jako  $O_1$ . Jeho hodnota je definována jako 1,67 násobek intervalu  $T$ , což je čas mezi body A a B.  $T_2$  je zdánlivý časový parametr nazývaný doba půltýlu a jeho hodnota odpovídá intervalu začínajícího virtuálním počátkem  $O_1$  s trváním až do doby, kdy napětí pulzu klesne na polovinu své hodnoty. Atmosférický pulz se udává jako poměr hodnoty parametru  $T_1$  s dobou půltýlu  $T_2$ . Standardně tyto parametry dosahují těchto časů:

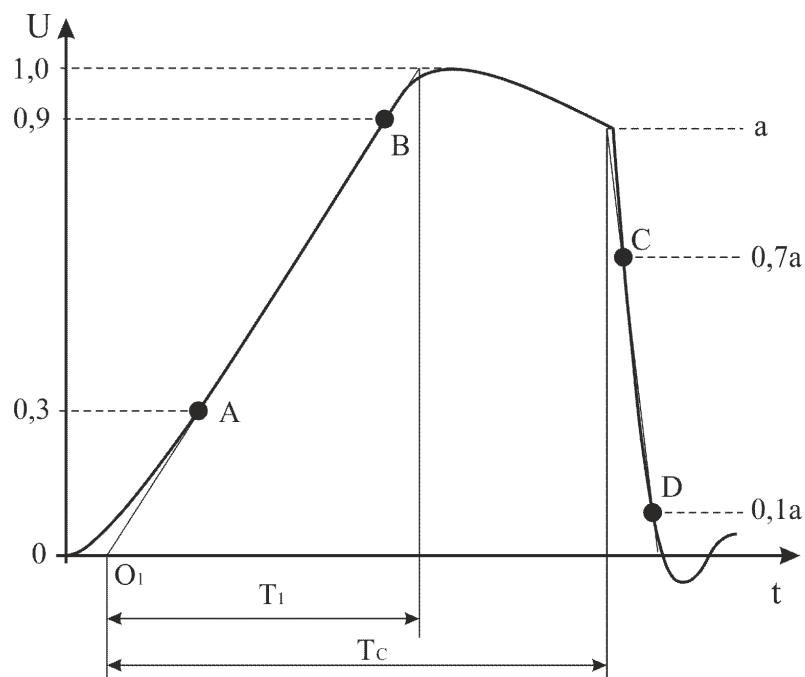
- Doba čela  $T_1$ : 1,2  $\mu$ s s tolerancí  $\pm 30$  %
- Doba půltýlu  $T_2$ : 50  $\mu$ s s tolerancí  $\pm 20$  % [3,6]

Z velikostí těchto časových konstant je tedy patrné, že atmosférické pulzy mají velmi krátký průběh, obzvláště je-li pulz přerušen elektrickým průrazem v čelní části.

Pokud u testovaného dielektrického materiálu dojde k elektrickému přeskoku (průrazu), pak dojde k oříznutí tvaru pulzu. Useknutý pulz může být přerušen v čele (Obrázek 2.2) nebo v týle (Obrázek 2.3). Takovýto useknutý pulz má délku trvání danou virtuálním časovým intervalem  $T_c$ , který začíná virtuálním počátkem  $O_1$  a končí okamžikem useknutí. Doba trvání zhroucení napětí je definována jako 1,67 násobek intervalu mezi body C a D. Body C a D jsou umístěny na 10 % a 70 % hodnotě napětí v části charakteristiky, kde došlo ke zhroucení napětí.

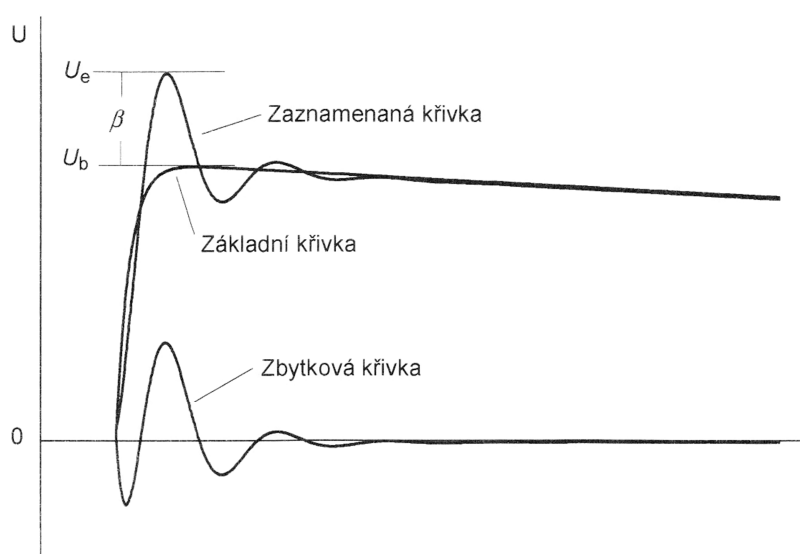


Obrázek 2.2 - Atmosférické impulzní napětí useknuté v čele [3]



Obrázek 2.3 - Atmosférické impulzní napětí useknuté v týle [3]

Při generování normalizovaného impulzu napětí, je třeba kromě velikosti časových parametrů brát ohled i na velikost překmitu. Překmit je nárůst amplitudy pulzu, který je způsobený tlumenými oscilacemi kvůli indukčnosti obvodu. Velikost překmitu označujeme  $\beta$  a definujeme jej jako rozdíl mezi krajními hodnotami zaznamenané křivky a maximální hodnotou základní křivky (Obrázek 2.4). Informaci o překmitu lze také vyjádřit pomocí relativní velikosti překmitu  $\beta'$ , kterou nejčastěji udáváme v procentech a určíme ji pomocí vztahu (2.1). [3,6]

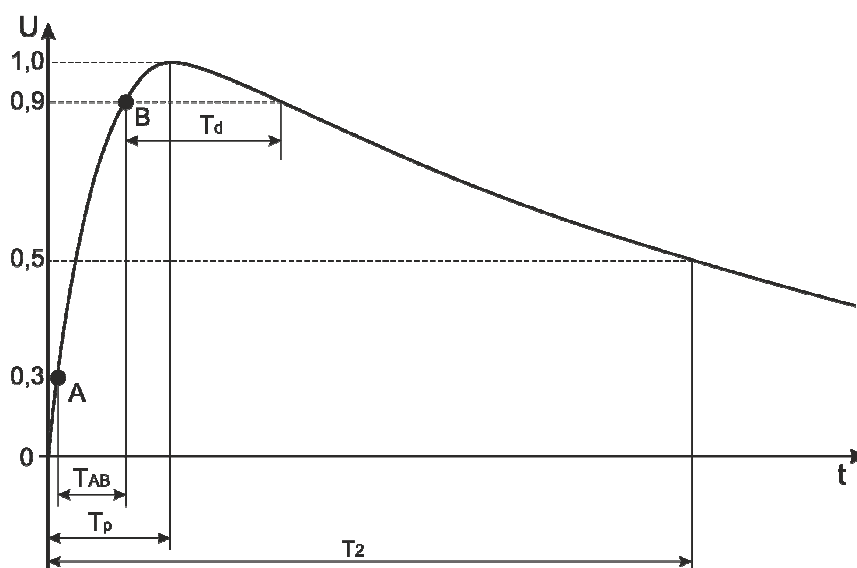


Obrázek 2.4 - Základní a zaznamenaná křivka s vyznačením překmitu [3]

$$\beta' = \frac{U_e - U_b}{U_e} \cdot 100 \quad (2.1)$$

## 2.2 Spínací pulz

Druhý typ vzniku impulzních přepětí je způsoben spínacími jevy v soustavě. Spínacím jevem v soustavě se rozumí každá náhlá změna parametrů soustavy nezávisle na tom, jestli byla plánovaná (vypnutí/zapnutí vedení), nebo neplánovaná (zemní spojení a zkrat). Amplitudy těchto přepětí se vztahují vždy na síťové napětí a tvar je závislý na impedanci systému a spínacích podmínkách. Rychlost nárůstu napětí je obvykle pomalejší, ale je dobře známo, že tvar vlny může být velice nebezpečný pro různé izolační systémy.



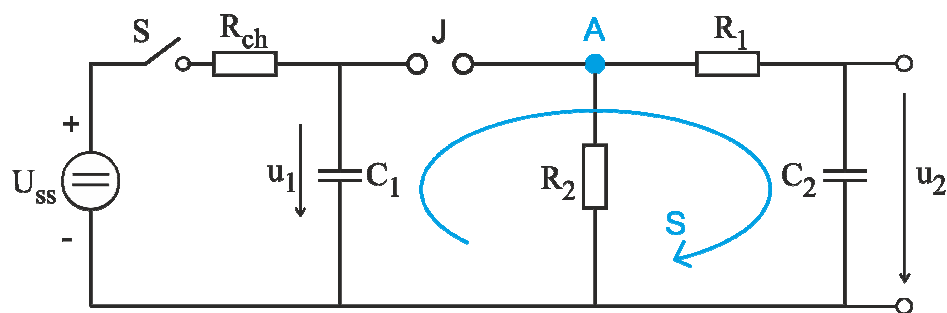
Obrázek 2.5 - Spínací impulzní přepětí [3]

Spínací pulz definovaný normou ČSN EN 60060-1 je zobrazen na Obrázku 2.5. Čas potřebný pro dosažení maximální hodnoty je označen  $T_p$ . Doba půltýlu  $T_2$  je časový interval mezi skutečným počátkem a okamžikem, kdy průběh napětí poprvé klesne pod polovinu své maximální dosažené hodnoty. Časový parametr  $T_d$  udává dobu, kdy spínací pulz přesahuje hodnotu 90% maximální hodnoty napětí. Průběh spínacího pulzu se udává poměrem parametrů  $T_p/T_2$ . Normalizovaný spínací pulz dosahuje těchto časů:

- Doba vrcholu  $T_p$ : 250  $\mu$ s s tolerancí  $\pm 20$  %
- Doba půltýlu  $T_2$ : 2500  $\mu$ s s tolerancí  $\pm 60$  % [3,6]

## 2.3 Generátor impulzního napětí

Aby mohla být zařízení testována na odolnost proti impulznímu přepětí, je nutné toto napětí v laboratorních podmínkách vyrobit. K tomu slouží rázový generátor, jehož náhradní schéma je zobrazeno na Obrázku 2.6.



Obrázek 2.6 - Náhradní schéma rázového generátoru

Kondenzátor  $C_1$  představuje tzv. činnou kapacitu, která je nabíjena ze stejnosměrného zdroje přes nabíjecí rezistor  $R_{CH}$ . Po dokončení procesu nabíjení  $C_1$  je nutné pomocí vypínače odpojit stejnosměrný zdroj. Tvorba napěťového pulzu je započata přeskokem na jiskřišti  $G$ , čímž dojde k nabití zatěžovací kapacity  $C_2$  přes čelní rezistor  $R_1$ . Velikost rezistoru  $R_1$  ovlivňuje rychlost nabíjení  $C_2$ , a tak i délku čela pulzu. Týlní část pulzu je řízena velikostí týlního odporu  $R_2$ , přes který dochází k vybíjení  $C_2$ . Účinnost impulzního generátoru  $\eta$  je dána podílem mezi maximální hodnotou vytvořeného napěťového pulzu  $U_{pm}$  a velikostí napětí  $U_0$ , které způsobilo přeskok na jiskřišti  $G$ . [6]

$$\eta = \frac{U_{pm}}{U_0} \quad (2.2)$$

Obvykle se hodnota účinnosti impulzního generátoru pohybuje v rozmezí 0,85 až 0,95. Výběr čelního kondenzátoru  $C_1$  určuje společně s jeho maximálním nabíjecím napětím  $V_{0max}$  maximální akumulovanou impulzní energii daného generátoru  $W_i$  (2.3). Energie je závislá právě na kapacitě  $C_1$ , která je mnohem větší než zatěžovací kapacita  $C_2$ . [4]

$$W_i = \frac{1}{2} C_1 \cdot V_{0max}^2 \quad (2.3)$$

Takovýto jednoduchý náhradní obvod impulzního generátoru lze popsat následujícími diferenciálními rovnicemi:

Pro smyčku  $S$  naznačenou ve schématu platí:

$$S: \quad u_1 = R_1 \cdot C_2 \frac{du_2}{dt} + u_2 \quad (2.4)$$

Pro uzel  $A$  platí:

$$A: \quad -C_1 \frac{du_1}{dt} = \frac{u_1}{R_2} + C_2 \frac{du_2}{dt} \quad (2.5)$$

Pokud si z těchto rovnic vyjádříme derivované veličiny, dostaneme soustavu rovnic:



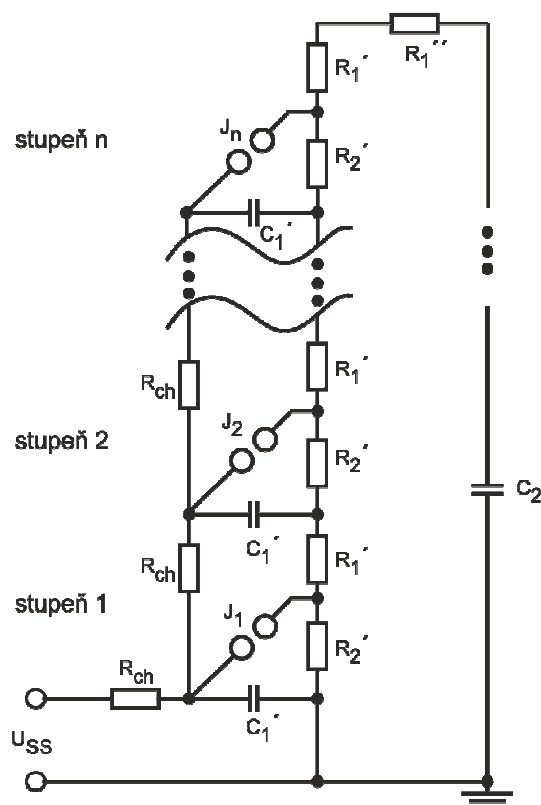
$$\frac{du_2}{dt} = \frac{u_1}{R_1 \cdot C_2} - \frac{u_2}{R_1 \cdot C_2} \quad (2.6)$$

$$\frac{du_1}{dt} = -\frac{u_1}{R_2 \cdot C_1} - \frac{u_1}{R_1 \cdot C_1} + \frac{u_2}{R_1 \cdot C_1}$$

Využitím těchto rovnic můžeme pomocí různých simulačních programů vytvořit předpokládaný průběh impulzního napětí. V příloze A je uvedena simulace rázového generátoru pomocí programu MATLAB a DYNAST.

### 2.3.1 Vícestupňový rázový generátor

U impulzního generátoru zobrazeného na Obrázku 2.6 je maximální velikost amplitudy pulzu omezena velikostí napětí na stejnosměrném zdroji. V roce 1923 zkonstruoval německý fyzik E. Marx impulzní generátor sestavený z několika stupňů. Schéma Marxova generátoru je zobrazené na Obrázku 2.7. Hlavní myšlenkou tohoto zapojení je paralelní nabíjení kondenzátorů  $C_1$  a jejich vybíjení pomocí sériového spojení.



Obrázek 2.7 - Marxův impulzní generátor [12]

Kondenzátory  $C_1'$  ve všech  $n$  stupních jsou nabíjeny přes nabíjecí rezistory  $R_{CH}$  umístěné v sériovém spojení. Toto spojení je zakresleno ve schématu v levém sloupci. Doba nabíjení kondenzátorů  $C_1'$  musí být zvolena dostatečně dlouhá, aby se stihly nabít všechny stupně. Při tomto zapojení je totiž nabíjecí rezistor u prvního stupně  $n$ -krát menší, než nabíjecí rezistor pro  $n$ -tý stupeň, který je tvořen sériovým spojením předešlých rezistorů  $R_{CH}$ . Proto

i čas potřebný pro nabití jednotlivých stupňů je rozdílný. Po dokončení nabíjení je mezi elektrodami všech jiskříšť stejný rozdíl potenciálů. Jedna elektroda je uzemněna a druhá je připojena na nabitý kondenzátor  $C_1'$ . První jiskříště  $J_1$ , nazvané spouštěcí, je vybaveno speciální elektrodou. Na tu se přivede spouštěcí impuls o velikosti 5 – 20 % napětí, které je na kondenzátorech  $C_1'$ . Přeskokem na prvním jiskříšti  $J_1$  dojde k sériovému spojení prvních dvou kondenzátorů  $C_1'$ . Toto spojení způsobí na druhém jiskříšti  $J_2$  dvojnásobný rozdíl potenciálů, který je natolik velký, aby vyvolal na daném jiskříšti přeskok. Takto nastane řetězová reakce, jež způsobí sériové spojení všech kondenzátorů  $C_1'$  přes jiskříště a čelní rezistory  $R_1'$ . Po přeskoku na posledním jiskříšti dojde k nabití zatěžovací kapacity  $C_2$ . Na tvaru týlní části pulzu mají hlavní podíl rezistory  $R_2'$ , jejichž velikost bývá několikanásobně větší než rezistorů  $R_1'$ . Přídavný rezistor  $R_1''$  pomáhá tlumit oscilace vznikající vlivem indukčnosti a kapacity externích vývodů mezi generátorem a zátěží.[6] Pokud bychom Marxův generátor chtěli popsat pomocí obvodu pro jednostupňový generátor, museli bychom velikost kondenzátoru  $C_1$  a obou rezistorů  $R_1$  a  $R_2$  vyjádřit pomocí vztahů:

$$\frac{1}{C_1} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_1'} \quad (2.7)$$

$$R_1 = \sum_{i=1}^n R_1' + R_1'' \quad (2.8)$$

$$R_2 = \sum_{i=1}^n R_2' = n \cdot R_2' \quad (2.9)$$

Impulzní napětí z obvodu rázového generátoru je matematicky popsáno rozdílem dvou exponenciálních funkcí:

$$u(t) = \frac{U_0}{R_1 \cdot C_2} \cdot \frac{\tau_1 \cdot \tau_2}{\tau_2 - \tau_1} \cdot \left[ e^{-\frac{t}{\tau_2}} - e^{-\frac{t}{\tau_1}} \right], \quad (2.10)$$

kde časové konstanty jsou určeny dle vztahů:

$$\tau_1 = R_1 \cdot \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2} \quad (2.11)$$

$$\tau_2 = R_2 \cdot (C_1 + C_2) \quad (2.12)$$

Mezi těmito časovými konstantami a časovými úseky  $T_1$  a  $T_2$ , které definují tvar pulzu (viz kapitola 2.1) existují korelační vztahy:

$$T_1 = K_1 \cdot \tau_1 \quad (2.2)$$

$$T_2 = K_2 \cdot \tau_2 \quad (2.3)$$

Velikost konstanty  $K$  závisí na typu pulzu. Její konkrétní hodnotu udává Tabulka 2.1. [12]

	Atmosférický pulz	Spínací pulz
$K_1$	2,96	2,41
$K_2$	0,73	0,87

Tabulka 2.1 - Velikost konstanty  $K$  pro jednotlivé pulzy [12]

### Určení velikosti jednotlivých rezistorů

V praktickém zapojení nastává situace, že obvod rázového generátoru má nějakou parazitní indukčnost  $L$ . Indukčnost způsobuje nežádoucí oscilace na vrcholu atmosférického pulzu, které se snažíme omezit pomocí vhodně zvolené velikosti čelního rezistoru  $R_1$ . Aby nevznikly oscilace, musí být splněna následující podmínka: [12]

$$R_1 \geq 2 \cdot \sqrt{L \cdot \frac{C_1 + C_2}{C_1 \cdot C_2}} \quad (2.15)$$

Vztah pro určení velikosti čelního rezistoru vychází z rovnic (2.11) a (2.13):

$$R_1 = \frac{T_1}{K_1} \cdot \frac{C_1 + C_2}{C_1 \cdot C_2} \quad (2.16)$$

Velikost týlního rezistoru je pak určena:

$$R_2 = \frac{T_2}{K_2} \cdot \frac{1}{C_1 + C_2} \quad (2.17)$$

## 2.4 Zkoušky impulzním napětím

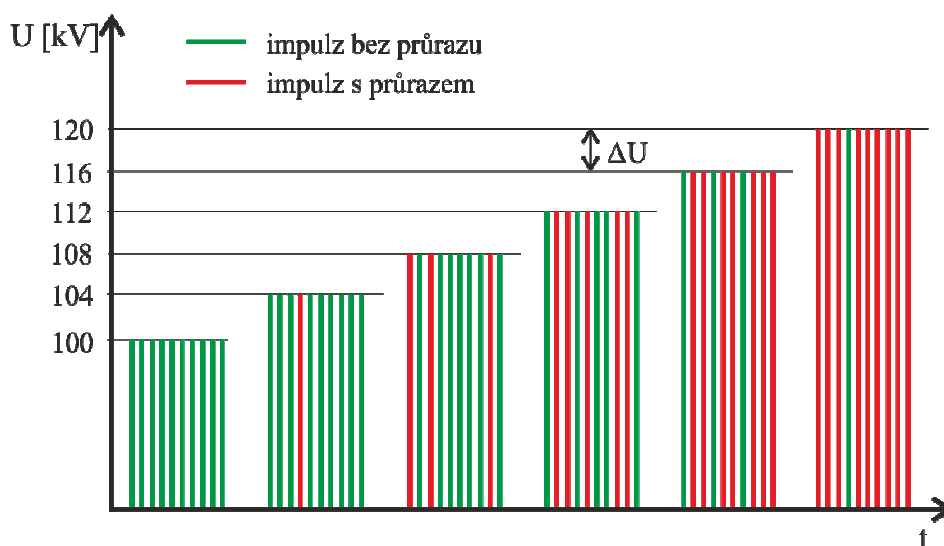
Pro laboratorní testování různých druhů izolačních médií na odolnost vůči impulznímu napětí, jsou vytvořeny zkušební postupy popsané v příslušných normách. V ČR se touto problematikou testování zabývá norma ČSN EN 60060-1, ve které jsou zkoušky rozděleny do třech tříd:

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

### 2.4.1 Zkoušky více hladinami

Tato zkouška je určena především pro testování elektrické pevnosti izolantů při působení impulzního napětí. Pokud by bylo použito jiné než impulzní napětí, například stejnosměrné nebo střídavé, je třeba u těchto napětí definovat dobu trvání napěťového namáhání.

Před měřením je třeba si stanovit, kolik přiložení  $n$  napětových pulzů budeme aplikovat při všech  $m$  měřených napětových hladinách. Měření začínáme na takové napětové hladině, při níž nedojde k žádnému elektrickému přeskoku. Po aplikaci všech  $n$  pulzů zvýšíme velikost napětí o napětový krok  $\Delta U$ . Pro každý testovaný napětový stupeň se zaznamenává počet přeskoků  $k$ . Na Obrázku 2.8 je znázorněné testování 6 napětových hladin s 10 přiloženími pulzu na elektrody pro každou úroveň napětí. [3]



Obrázek 2.8 - Zkouška více hladinami [4]

Z naměřených hodnot lze získat statistickou charakteristiku, na níž lze odečíst pravděpodobnost přeskoku pro danou velikost napětí na elektrodách. Jelikož je tato metoda použita v praktické části, je postup získání statické charakteristiky uveden podrobněji v kapitole 2.5. Nevýhodou této zkoušky je, že pro získání velké přesnosti je třeba provést velký počet měření pro každý napětový stupeň, což je časově náročné.

#### 2.4.2 Zkouška metodou nahoru-dolů

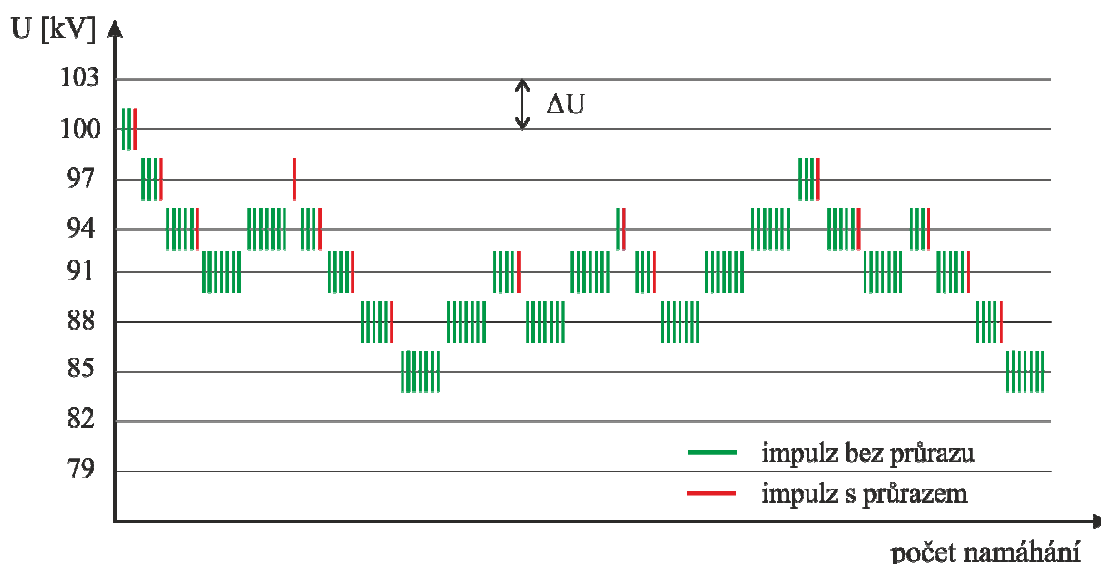
Tento typ zkoušky se také využívá k testování izolanů se samoregenerativním procesem. Metoda nahoru-dolů je používána především pro určení velikosti napětí s 90 % a 10 % pravděpodobností přeskoku. Jedna napětová hladina je aplikována maximálně sedmi přiloženími za sebou, pak dojde ke snížení nebo zvýšení velikosti napětí v závislosti na tom, zda vyhodnocujeme  $U_{90}$  nebo  $U_{10}$ . Zkoušky s jiným počtem  $n$  než  $n = 7$  se také používají, ale slouží k určení napětí s jinými hodnotami pravděpodobnostmi. Například pro  $n = 1$  se zkouška používá pro určení velikosti napětí s 50 % pravděpodobností průrazu. Na Obrázku 2.9 je uveden příklad měření při určování velikosti napětí s 10 % pravděpodobností přeskoku. Výdržný typ zkoušky probíhá tak, že začneme přikládat první zvolený napětový stupeň. Pokud ani při jednom ze sedmi pokusů nedojde k přeskoku, zvýšíme napětí o  $\Delta U$

a pokračujeme obdobným způsobem. Když k přeskočení dojde, tak již zbylé pokusy netestujeme, ale rovnou snížíme napětí o  $\Delta U$  a měříme na nižší napěťové úrovni. Velikost kroku změny napětí by měla být v rozmezí  $0,01 \cdot U_{50}$  až  $0,03 \cdot U_{50}$ . Velikost napětí s danou pravděpodobností určíme dle vztahu:

$$U = \sum_{i=1}^l \frac{k_i \cdot U_i}{m} \quad (2.18)$$

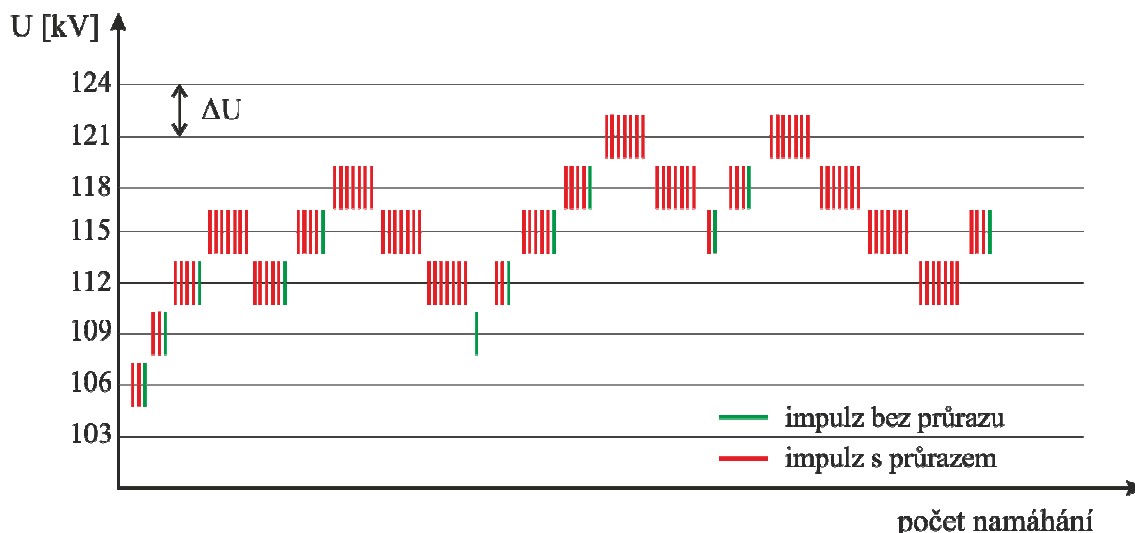
- kde:  $k_i$  – počet přijatých skupin pro danou napěťovou hladinu  $i$   
 $i$  – počet přijatých napěťových hladin  
 $U_i$  – velikost napětí dané přijaté napěťové hladiny  $i$   
 $m$  – celkový počet přijatých skupin ve všech napěťových hladinách

Za přijatou napěťovou hladinu se bere ta, při které byly měřeny minimálně dvě skupiny. Dle Obrázku 2.9 by se tedy napěťová hladina 100kV nebrala za přijatou.



Obrázek 2.9 - Měření metodou nahoru-dolů výdržným postupem [4]

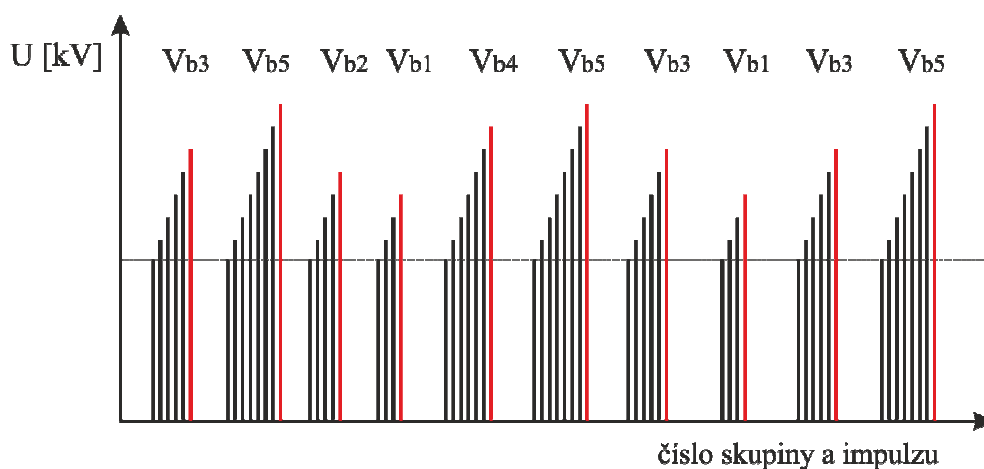
Druhý postup, nazývaný výbojový, se používá pro určení velikosti napětí s 90 % pravděpodobností přeskočení  $U_{90}$ . Průběh zkoušky je naznačen na Obrázku 2.10. U tohoto postupu zvyšujeme napěťovou hladinu o  $\Delta U$ , pokud při některém přiložení daného napětí nedojde k přeskočení a naopak pokud při všech přiložení napěťových pulzů ve skupině dojde k přeskočení, sníží se velikost napětí na nižší napěťovou hladinu. Velikost  $U_{90}$  je pak zjištěna stejným vztahem jako u výdržného postupu této zkoušky. [3]



Obrázek 2.10 - Měření metodou nahoru-dolů výbojovým postupem [4]

### 2.4.3 Zkoušky postupným namáháním

Princip zkoušky postupným namáháním je založen na zvyšování velikosti napětí buď plynule, nebo po krocích, až do takové hodnoty, než dojde k přeskoku. Většinou je této metody využíváno při použití stejnosměrného nebo střídavého napětí. Zkouška vede vždy k elektrickému přeskoku a zaznamenává se velikost napětí, při kterém přeskok nastal. Zkouška může být použita i pro impulzní napětí, s tím že po krocích zvyšujeme amplitudu pulzů a zaznamenáme hodnotu napětí, při kterém k přeskoku došlo. Po  $n$  provedení zkoušky dostaneme  $n$  hodnot přeskových napětí. Postup měření pro impulzní napětí je znázorněn na Obrázku 2.11. Změřené hodnoty napětí, při kterých došlo k přeskoku, rozdělíme do skupin dle jejich velikosti. Následně můžeme data, obdobně jako u metody více hladinami, statisticky vyhodnotit a získat tak pravděpodobnostní funkci přeskových napětí. [3,4]



Obrázek 2.11 - Měření zkouškou postupným namáháním [4]

## 2.5 Statistické vyhodnocení výsledků zkoušek

Elektrický výboj v izolačním plynu je založen na náhodném procesu, jehož pravděpodobnost lze popsat pomocí statistických metod. Než se začneme zabývat statistikou, bude třeba představit význam některých pojmů využívaných ve statistice. Mezi nejjednodušší hodnotící parametr patří střední hodnota, která může být charakterizována aritmetickým průměrem (2.19), modusem, nebo mediánem.

$$U_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_i \quad (2.19)$$

kde:  $U_i$  – velikost napětí průrazného výboje

$n$  – počet přiložení napětí

Za hodnotu rozptylu budeme brát směrodatnou odchylku napětí průrazného výboje:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (U_i - U_a)^2} \quad (2.20)$$

Náhodná veličina  $X$  je jednoznačně určena rozdělením pravděpodobnosti pomocí distribuční funkce. Distribuční funkce každému reálnému číslu  $x_i$  přiřazuje pravděpodobnost, že náhodná veličina  $X$  nabude hodnoty menší nebo rovné, než toto číslo.

$$F(x_i) = P(X < x_i) \quad (2.21)$$

Kvantil je definován jako hodnota náhodné proměnné, která rozděluje soubor dat na dvě části ( $s$  vyššími a nižšími hodnotami, než je velikost daného kvantilu). Nejpoužívanější kvantil je s označením  $x_{0,5}$ , který rozděluje statistický soubor na 2 stejné části a je nazýván mediánem. [14]

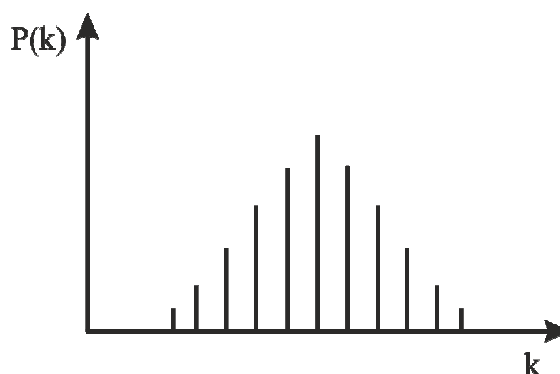
### 2.5.1 Binomické rozdělení

Dále se budeme zabývat případem, ve kterém při provedení  $n$  aplikací stejné napěťové hladiny  $U_i$ , dojde v  $k$  případech k elektrickému přeskoku. Jedná se o výskyt náhodného jevu v  $n$  nezávislých pokusech. Pravděpodobnost, že nastane přeskok právě  $k$ -krát při pravděpodobnosti přeskoku  $p$ , je určena na základě binomického rozdělení: [6]

$$P(X = k) = \binom{n}{k} p^k (1-p)^{n-k} \quad (2.22)$$

kde:

$$\binom{n}{k} = \frac{n!}{k! (n-k)!}$$



Obrázek 2.12 – Rozložení hustoty pravděpodobnosti binomického rozdělení [16]

Grafické znázornění binomického rozdělení je zobrazeno na Obrázku 2.12. Tvar tohoto rozdělení silně závisí na počtu provedených pokusů  $n$ . Pro malé hodnoty  $n$  je hustota pravděpodobnosti rozložena po celém intervalu, naopak u velkého počtu provedených pokusů se charakteristika stává symetrickou a užší, čímž se zvyšuje přesnost odhadu. Hustota pravděpodobnosti má svůj vrchol na očekávané hodnotě, kterou nazýváme relativní frekvencí a můžeme ji určit pomocí vztahu (2.23).

$$h_n(A) = \frac{k}{n} \quad (2.23)$$

Hodnota vyjde vždy menší nebo rovna jedné. Zbylá část scházející do jedné je relativní frekvencí výdržných testů a lze ji určit pomocí komplementárního vztahu:

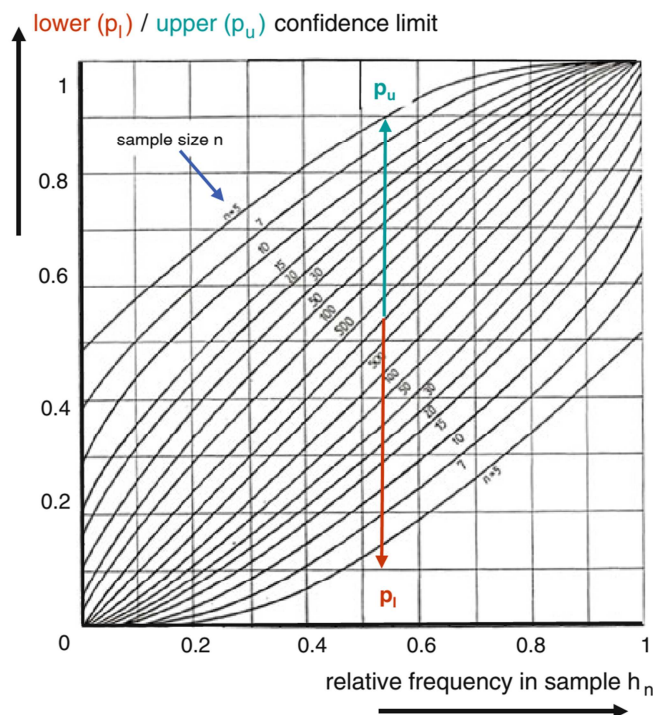
$$h_n(\bar{A}) = \frac{(n - k)}{n} = 1 - h_n(A) \quad (2.24)$$

Čím bude větší počet měření  $n$  pro jednu napěťovou hladinu, tím dostaneme přesnější hodnotu kumulativní frekvence. Pokud bychom se počtem  $n$  blížili k nekonečnu, získali bychom pak pravděpodobnost náhodného jevu vyjádřeného limitním vztahem:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} h_n(A) = p \quad (2.25)$$

Ve skutečnosti však nedosahujeme tak vysokého počtu aplikací jedné napěťové hladiny, a proto musíme očekávanou hodnotu pravděpodobnosti umístit do intervalu s určitou úrovní spolehlivosti  $\varepsilon$ . Nejčastěji se používá koeficient spolehlivosti  $\varepsilon = 0,95$ . Horní a dolní hodnoty, určující velikost intervalu, jsou velmi závislé na počtu provedených pokusů  $n$ . Jejich velikost můžeme snadno odečíst z grafu na Obrázku 2.13, případně z tabulkových hodnot. Například pro  $h_n(A) = 0,7$  a  $n = 10$  je horní limit pravděpodobnosti  $p_u = 0,91$  a dolní limit pravděpodobnosti  $p_l = 0,37$ . [4]



Obrázek 2.13 - Meze spolehlivosti s koeficientem spolehlivosti  $\varepsilon=0,95$  [4]

## 2.5.2 Normální rozdělení

Z výše uvedených metod pro měření impulzním napětím je zřejmé, že budeme používat několik napěťových hladin. Tím dostaneme skupinu dat se spojitou náhodnou proměnnou, jejíž pravděpodobnostní chování popisuje distribuční funkce (2.21). Distribuční funkce znázorňuje kumulativní pravděpodobnost, která je součtem všech předešlých hustot pravděpodobnosti. Toto obecné vysvětlení statistiky přes kumulativní pravděpodobnost platí například u vyhodnocování zkoušky postupným namáháním. U metody více hladin je vztah mezi velikostí napěťového namáhání a přeskokové pravděpodobnosti nazýván Performance function. Performance function, na rozdíl od klasické distribuční funkce, nemusí být nutně monotónně vzrůstající, jelikož udává velikost pravděpodobnosti pro konkrétní napěťovou hladinu a nesčítá hustoty pravděpodobnosti nižších hladin jako je to u distribuční funkce.[4]

Pro vysokonapěťové aplikace se nejčastěji využívá Gaussova (normálního) distribučního rozdělení, jehož hustota pravděpodobnosti má zvonkový tvar, jak je vidět na Obrázku 2.14. Funkci hustoty pravděpodobnosti pro toto rozdělení lze obecně popsat rovnicí (2.26). [15]

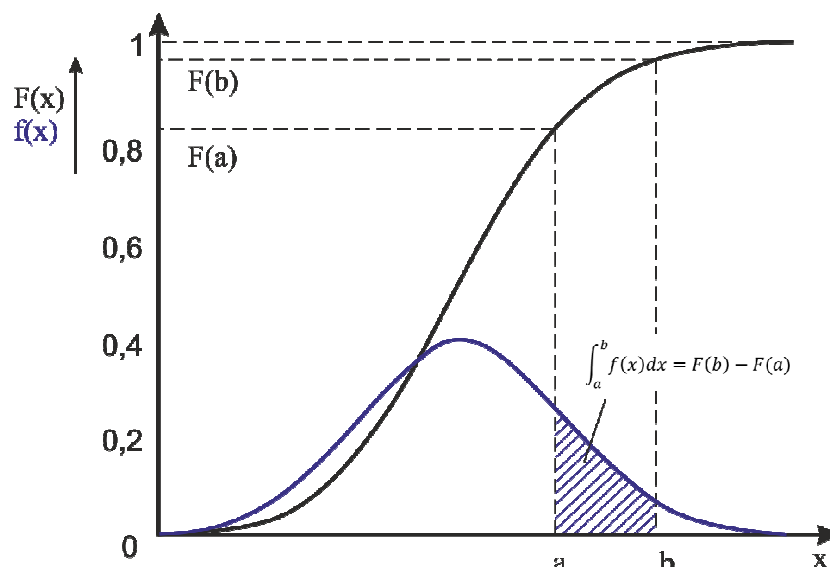
$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (2.26)$$

kde:  $\mu$  – střední hodnota (aritmetický průměr)

$\sigma$  – rozptyl (směrodatná odchylka)

Distribuční funkce je pak určena dle vztahu (2.27). [15]

$$F(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}} dt \quad (2.27)$$



Obrázek 2.14 - Distribuční funkce a funkce hustoty Gaussova rozdělení [4]

Kromě Gaussova rozdělení se můžeme setkat ještě s rozdělením Gumbelovým a Weibullovým. Gumbelovo rozdělení je vhodné k popisu jevu, při němž má izolace minimální elektrickou pevnost, a tak dochází k mnoha průrazům. Weibullovo rozdělení je naopak vhodné použít k vyhodnocování opačného extrému, tedy při zkoumání velké elektrické pevnosti. Všechny rozdělení mají své vlastní distribuční funkce, které jsou uvedeny s podrobnějšími informacemi o jejich využití v [4].

### 2.5.3 Kolmogorovův - Smirnovův test

Kolmogorovův - Smirnovův test, též nazývaný testem dobré schody, se používá k testování, zda se rozdělení spojité náhodné veličiny shoduje s daným teoretickým rozdělením. Může být také využit k ověření, zda dvě náhodné veličiny pocházejí ze stejného rozdělení. Pro náš případ bude využita první varianta testu, ve kterém budeme naměřená data porovnávat s normálním rozdělením. Z uspořádaně seřazeného výběru náhodných dat ( $x_1 - x_n$ ) je třeba vytvořit distribuční výběrovou funkci  $F_n(x)$ , která má následující tvar:

$$F_n(x) = 0, \text{ pro } x < x_1$$

$$F_n(x) = \frac{i}{n}, \text{ pro } x_i < x < x_{i+1} \text{ kde } i = 1, 2, \dots, n - 1$$

$$F_n(x) = 1, \text{ pro } x \geq x_n$$

Získanou výběrovou distribuční funkci porovnáváme s distribuční funkcí daného rozdělení  $F_D(x)$ . Testovaným kritériem je Kolmogorovova statistika  $D_n$ , jejíž hodnota je určena maximálním absolutním rozdílem mezi výběrovou distribuční funkcí  $F_n(x)$  a distribuční funkcí  $F_D(x)$ . Tyto hodnoty jsou porovnávány s kritickými hodnotami, které jsou uvedeny v příslušných statistických tabulkách pro různé hladiny významnosti  $\alpha$ . Hladinu významnosti lze chápat jako pravděpodobnost, se kterou může být daná hypotéza chybně zamítnuta. [17,18]

#### 2.5.4 Lineární regrese

Pro přehledné znázornění závislosti pravděpodobnosti na velikosti napětí využijeme lineární regrese hodnot zakreslených do mřížky odpovídající zvolenému rozdělení. Mřížku vytvoříme tak, že hodnoty osy Y budou odpovídat inverzní funkci daného rozdělení. Tímto se z typického tvaru distribuční funkce dostaneme na přímkový tvar. Jednotlivé body pak již proložíme vhodnou přímkou. Nejpoužívanější metodou pro lineární regresi je numerická metoda nejmenších čtverců. Jejím cílem je proložit body takovou přímkou, aby součet obsahu čtverců vzniklých ze vzdáleností mezi přímkou a jednotlivými body byl co nejmenší. [15]

### 3. Testování plynného dielektrika impulzním generátorem

V této kapitole je provedeno testování elektrické pevnosti vzduchu při impulzním napětovém namáhání. Je zde pozorován vliv tvaru elektrod, jejich vzájemné vzdálenosti a tlak plynu na velikost přeskokového napětí. Pro měření byl použit vzduch o obsahu 80 %  $N_2$  a 20 %  $O_2$ .

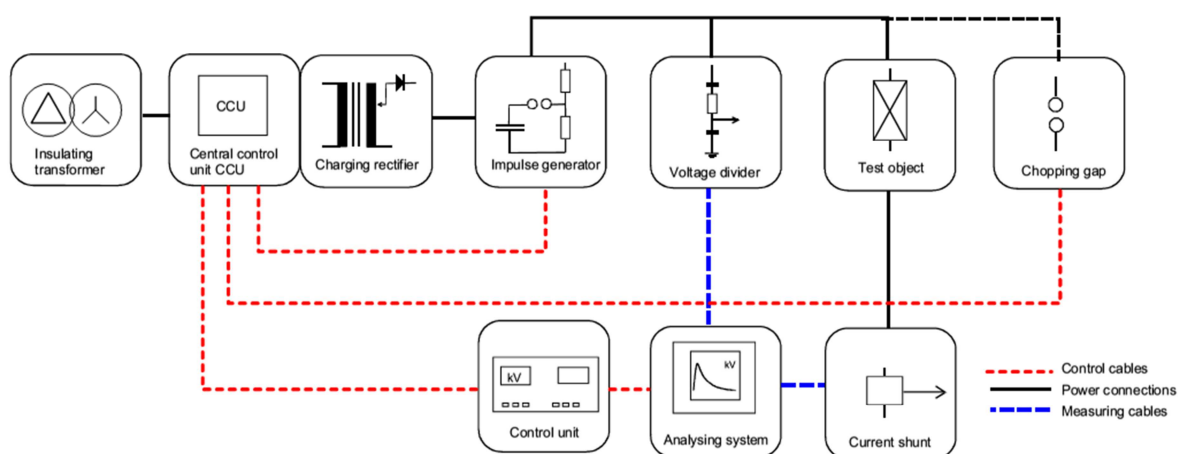
#### 3.1 Popis měřicího pracoviště

K testování byl použit impulzní napětový generátor od společnosti HAEFELY, jehož schéma a popis jsou uvedeny v kapitole 2.3.1. Použitý rázový generátor byl složen ze tří stupňů. Fotografie tohoto generátoru je zobrazena v příloze C. Velikost jednotlivých rezistorů a kondenzátorů je uvedena v Tabulce 3.1. Zatěžovací kapacita  $C_2$  je tvořena kapacitou testovaného objektu, kapacitou děliče a rozptylovou kapacitou. Velikost zatěžovací kapacity se pohybuje řádově v jednotkách nF. [12]

	Velikost v jednom stupni	Celková velikost
$C_1$	1 $\mu\text{F}$	333,3 nF
$R_1$	12 $\Omega$	36 $\Omega$
$R_2$	69 $\Omega$	207 $\Omega$

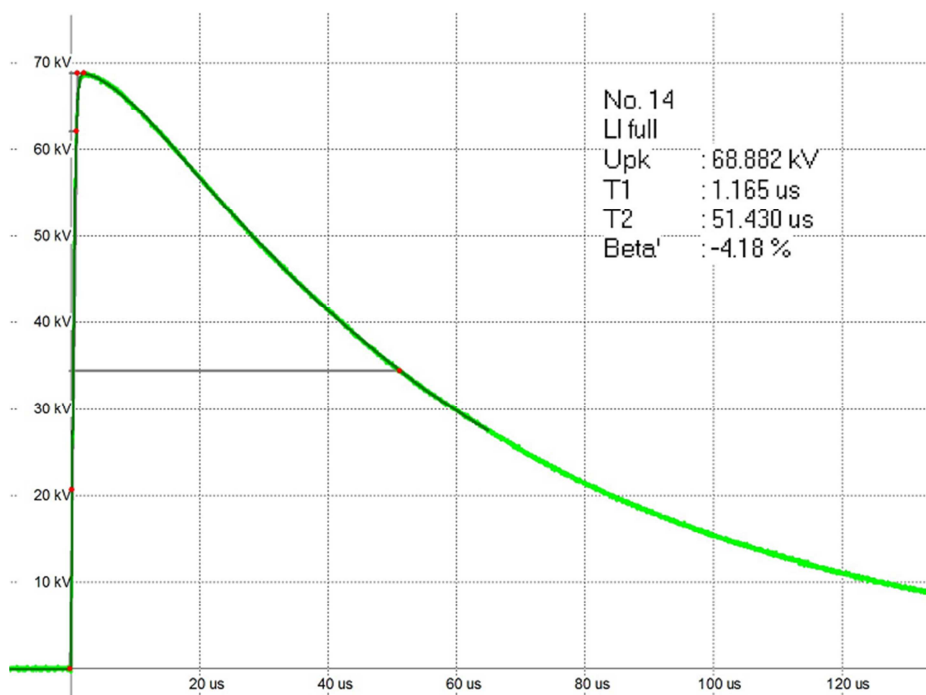
Tabulka 3.1 - Velikosti jednotlivých komponent v použitém impulzním generátoru [12]

Maximální nabíjecí napětí jednoho kondenzátoru je 100 kV, tedy při použití tří stupňů bude maximální amplituda pulzu 300 kV. Při tomto maximálním nabíjecím napětí je energie generátoru 15 kJ. Impulzní generátor je nabíjen ze stejnosměrného zdroje a ovládán pomocí řídicího modulu (Impulse Generator Control GC 223). Úplné schéma zapojení je znázorněno na Obrázku 3.2. Přes čelní ovládací panel se nastavují parametry pro testování impulzním napětím. V menu ovládacího softwaru můžeme nastavit velikost amplitudy pulzu včetně jeho polarity, ovšem ke změně polarity je třeba ještě manuálně obrátit diodu umístěnou na stejnosměrném zdroji. Dalším parametrem je nabíjecí čas, který zajišťuje stejný časový interval mezi jednotlivými pulzy a zároveň čas nabíjení kondenzátorů  $C_1$ . Pro automatické testování sérií impulzů lze nastavit počet opakování pulzů při dané velikosti napětí. Velikost mezery mezi jednotlivými jiskřičkami se vypočítává a nastavuje automaticky v závislosti na požadované velikosti amplitudy pulzu. Pro maximální bezpečnost je celý systém vybaven několika bezpečnostními alarmy, které v případě aktivace nedovolí zapnutí generátoru. [12,13]



Obrázek 3.1 - Zapojení měřicího systému s impulzním generátorem [12]

Vyhodnocování průběhu měření je provedeno pomocí softwarového analyzátoru (Impulse Analysing System HiAS 743). Impulzní napětí je před zpracováním upraveno přes vysokonapěťový dělič na takovou velikost, která je vhodná pro měřicí systém a nehrozí tak zničení měřicích přístrojů velkým napěťovým pulzem. Naměřené hodnoty jsou přenášeny do vyhodnocovacího programu v počítači, kde je z nich vykreslen průběh pulzu (Obrázek 3.2). U každého změřeného pulzu jsou počítány jeho parametry, jako je doba čela, doba půltýlu, velikost amplitudy a relativní velikost překmitu. Změřené pulzy můžeme v případě potřeby převést z časové oblasti do frekvenční oblasti užitím funkce rychlé Fourierovi transformace. [13]



Obrázek 3.2 - Ukázka zobrazení změřeného pulzu

### Popis tlakové nádoby

Elektrodotový systém, na kterém bylo prováděno měření, byl umístěn v tlakové nádobě, aby bylo možné nastavit požadovaný tlak plynného média. Používaná tlaková nádoba je vyfocena v příloze D. Uzemněná elektroda byla polokulového tvaru o poloměru 75 mm. Druhou elektrodu, na kterou byl přiváděn napětový pulz, tvořil vyměnitelný hrot s různými velikostmi poloměru jeho zaoblení. Nádoba je vybavena dvěma vstupy pro napouštění a vypouštění plynu. Na výstupní vývod je připojena vývěva, která odčerpá plyn a vytvoří podtlak. Přívodní ventil je vybaven systémem pro připojení tlakové plynové lahve se systémem pro regulaci vpouštěného plynu. Ve všech měření provedených v této práci bylo použito vzduchové dielektrikum složené z 20 % O<sub>2</sub> a 80 % N<sub>2</sub>.

### Postup měření:

Jelikož se jedná o měření s vysokým napětím, je nutné dodržovat bezpečnostní předpisy a nevstupovat do prostoru s vysokonapětovými přístroji bez předchozího vyzkratování případného naakumulovaného náboje. Před měřením je potřeba nainstalovat do tlakové nádoby elektrodu s požadovaným tvarem hrotu. Po uzavření a utěsnění tlakové nádoby v ní pomocí vývěvy na čerpání plynu vytvoříme podtlak s hodnotou alespoň 0,02 baru. K trubkovému výstupu z komory připevníme tlakovou nádobu s požadovaným plynem a přes ovládací ventil napustíme do komory takové množství plynu, dokud digitální manometr

neukazuje požadovanou hodnotu tlaku. Po bezpečném uzavření laboratoře nastavíme na řídicím panelu velikost amplitudy pulzu a můžeme spustit měření. Všechny testy v rámci této práce byly provedeny pomocí zkoušky více hladin (Kapitola 2.4.1). Každá měřená napěťová hladina amplitudy pulzu byla 25 krát přiváděna na elektrody. Přitom jsem postupně zaznamenával, zda došlo k přeskoku mezi elektrodami. Napěťový krok  $\Delta U$  mezi jednotlivými měřenými napěťovými hladinami byl zvolen na 5 kV. Měření probíhalo vždy minimálně až do takové napěťové úrovně, v níž nastalo více než 90% přeskoků.

### 3.2 Vliv vzdálenosti elektrod

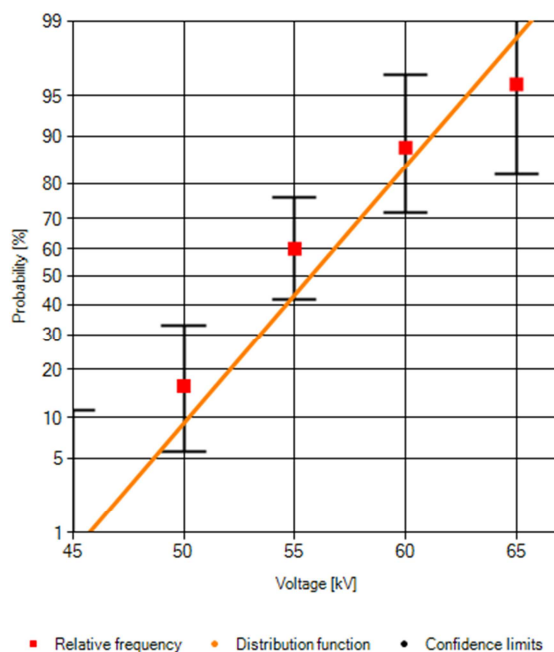
Nejprve se budeme zabývat vlivem vzdálenosti elektrod na velikost přeskokového napětí. Dle teoretických předpokladů je elektrická pevnost vzduchu v homogenním elektrickém poli 3 kV/mm. Z tohoto údaje je zřejmé, že se zvyšující se vzdáleností elektrod bude větší i elektrická pevnost.

Měření bylo provedeno pro konstantní tlak 100 kPa a tři různé vzdálenosti elektrod. Napěťový impuls byl přiváděn na hrotovou elektrodu o poloměru 4 mm. Pro každou měřenou vzdálenost je zaznamenán průběh měření, jako je uveden v Tabulce 3.2 pro vzdálenost elektrod 40 mm. Přeskok mezi elektrodami je označován značkou x.

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	Suma
30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
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

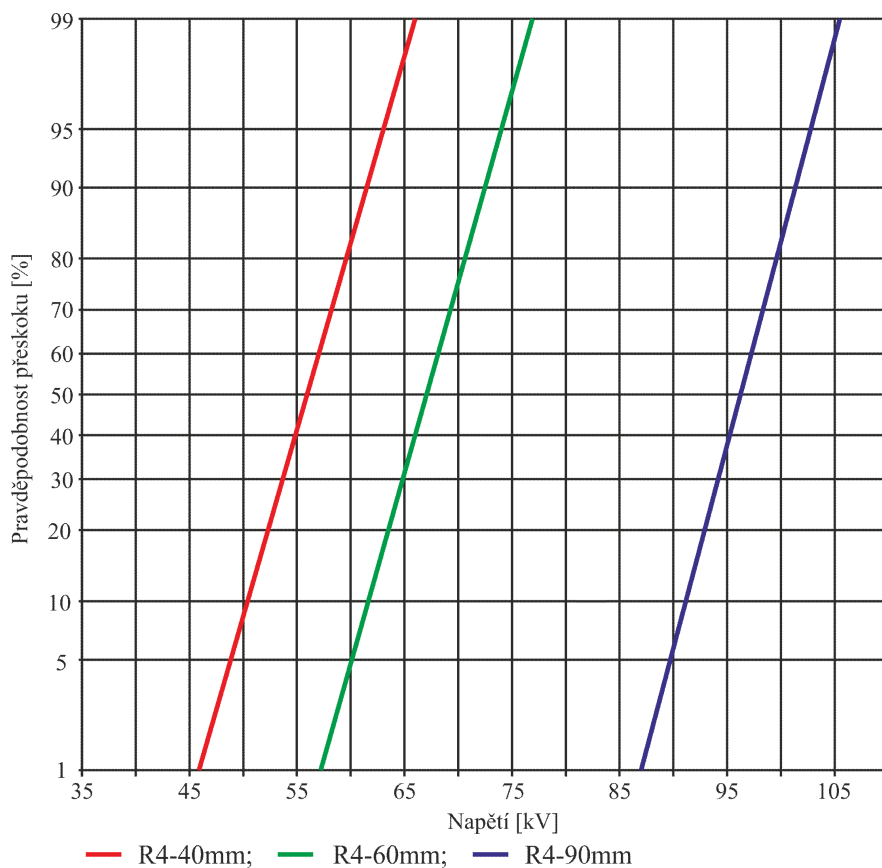
Tabulka 3.2 - Zaznamenané přeskoky při parametrech měření - elektroda R4, 40mm, 1bar

Při měření metodou více hladin bylo nutné začít na takové napěťové úrovni, při které nedojde ani k jednomu přeskoku. To je z důvodu, abychom měli jistotu, že v nižších napěťových hladinách nenastane ani jeden přeskok. Z Tabulky 3.2 lze vidět, že při měření vzdálenosti 40 mm byla první napěťová hladina zvolena moc nízko. Pokud provedeme statistické vyhodnocení takto naměřených dat, dostaneme graf (Obrázek 3.3), z něhož můžeme pro každou napěťovou hladinu jednoduše odečíst velikost pravděpodobnosti přeskoku. Postup, jakým je získán takovýto graf, je popsán v kapitole 2.5.



Obrázek 3.3 - Statistické vyhodnocení testu R4, 40mm, 1bar

Pro lepší přehlednost a snadnější porovnání jsou naměřená data pro všechny tři vzdálenosti uvedeny v Tabulce 3.3. Statistické závislosti přesokového napětí pro jednotlivé vzdálenosti jsou společně zobrazeny v jedné Gaussově mřížce (Obrázek 3.4).



Obrázek 3.4 - Porovnání přímek pravděpodobnosti pro tři různé vzdálenosti

Výsledky pro elektrodový systém R75/R4 se vzájemnou vzdáleností $l$					
$l = 40 \text{ mm}$		$l = 60 \text{ mm}$		$l = 90 \text{ mm}$	
U [kV]	přeskoků	U [kV]	přeskoků	U [kV]	přeskoků
45	0	55	0	90	0
50	4	60	2	95	9
55	15	65	12	100	19
60	22	70	17	105	25
65	24	75	24		

**Tabulka 3.3 - Změřené hodnoty pro tři různé vzdálenosti při stejném tlaku**

Samostatné záznamy měření pro zbylé měřené vzdálenosti elektrod včetně statistického vyhodnocení jsou uvedeny v přílohách B. Cílem měření při impulzních testech je určit pravděpodobnost přeskoků pro danou napěťovou hladinu. Ze získaných grafů lze odečíst hodnoty napětí pro požadovanou hodnotu pravděpodobnosti přeskoků. Napětí s 50 % pravděpodobností přeskoků budeme označovat  $U_{50}$ . Obdobným způsobem pak i napětí s ostatními hodnotami pravděpodobnosti přeskoků. Pro porovnávání jednotlivých testů bude využito napětí  $U_{10}$ , jelikož hodnotu napětí, při které dojde, u samočinně se obnovující izolace, k průrazu s 10 % pravděpodobností, bereme jako maximální hodnotu výdržného napětí.

$l$ [mm]	$U_{10}$ [kV]	$U_{50}$ [kV]	$U_{90}$ [kV]
40 mm	50	55,5	61
60 mm	61,5	67	72,5
90 mm	91	96,5	101,5

**Tabulka 3.4 - Hodnoty přeskokových napětí pro vybrané pravděpodobnosti přeskoků**

Z Tabulky 3.4 je vidět, že se zvyšující se vzdáleností vzrůstá i elektrická pevnost. Pro vzdálenost 40 mm byla zjištěna velikost výdržného napětí 50 kV a pro vzdálenost 90 mm jsem naměřil skoro dvojnásobnou hodnotu přeskokového napětí, přesně 91 kV. Elektrická pevnost se s větší vzdáleností elektrod zvyšuje, ale růst není rovnoměrný. To je způsobeno tím, že se s rostoucí vzdáleností mění i nehomogenita elektrického pole.

### 3.3 Vliv tvaru elektrod

Další parametr ovlivňující elektrickou pevnost je tvar elektrického pole, který je závislý na tvaru elektrod a jejich vzájemné vzdálenosti. Pro zjištění vlivu tvaru elektrod na elektrickou pevnost, bylo provedeno měření při konstantním tlaku 1 bar a vzdálenostmi stejnými jako při měření v kapitole 3.2. Použitá elektroda měla hrot s poloměrem 0,5 mm. Výsledky změřené touto elektrodou budou porovnány s výsledky v předchozím měření, kde pro stejné vzdálenosti a stejný tlak byla použita elektroda s hrotem o poloměru 4 mm. Naměřené výsledky pro tuto elektrodu jsou uvedeny v následující tabulce:



Výsledky pro elektrodový systém R75/R0,5 s vzájemnou vzdáleností $l$							
$l = 40$ mm		$l = 60$ mm		$l = 60$ mm		$l = 90$ mm	
U [kV]	přeskoků	U [kV]	přeskoků	U [kV]	přeskoků	U [kV]	přeskoků
40	0	60	0	64	0	75	0
45	1	65	7	66	2	80	1
50	19	70	14	68	14	85	9
55	18	75	25	70	23	90	20
60	22			72	25	95	25
65	25						

Tabulka 3.5 - Změřené hodnoty pro tři vzdálenosti s elektrodou R0,5

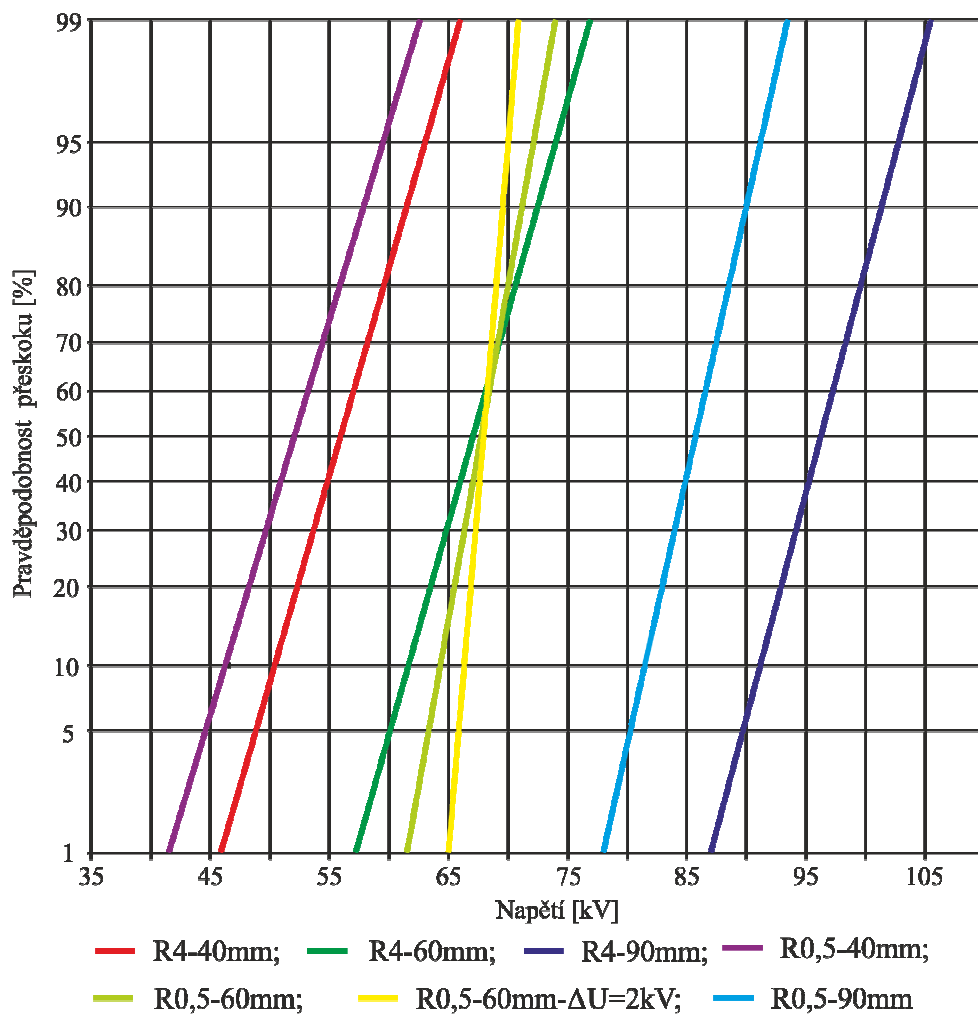
U naměřených výsledků pro elektrodu R0,5 při vzdálenosti 40 mm, je nutné upozornit na to, že naměřená data neprošla Kolmogorovým testem. Z toho tedy vyplývá, že data se ani s nastavenou hladinou významnosti  $\alpha = 20\%$  nepodobají Gaussově distribuční funkci. I přesto mají obě statistické přímky pro vzdálenost 40 mm stejný sklon. Pro elektrodu s hrotem o poloměru 0,5 mm vychází o 4 kV nižší elektrická pevnost. Ovšem pro věrohodnější výsledky by bylo nutné měření zopakovat, nebo provést více přiložení napětovým pulzů pro každou napětovou hladinu.

Při měření s nastavenou vzdáleností elektrod na 60 mm jsem s krokem napětí  $\Delta U = 5$  kV naměřil mezi napětovou hladinou, při které ještě nenastal žádný přeskok a hladinou, ve které všechny pokusy vedly k přeskoku pouze 2 napětové úrovně. Abych získal více dat pro lepší proložení přímky, rozhodl jsem se test pro tuto vzdálenost elektrod zopakovat s nižším napětovým krokem mezi hladinami  $\Delta U = 2$  kV. Tímto druhým měřením jsem získal data, která obsahovala pouze o jednu napětovou hladinu více. Statistickým vyhodnocením obou testů lze vidět, že 50 % pravděpodobnost přeskoku odpovídá v obou případech stejné velikosti napětí. Krajiní hodnoty pravděpodobnosti přeskoku jsou díky jiné směrnici přímky lehce rozdílné. Pomocí prvního měření byla velikost maximálního výdržného napětí 64,5 kV, při druhém měření nám statistická přímka protíná hodnotu 66,5 kV. Zjištěný rozdíl je 2 kV, což znamená, že se nová hodnota napětí od té původní liší o 3 %. Jelikož je při statistickém vyhodnocování počítáno s určitým koeficientem spolehlivosti silně závislým na počtu přiložení napětí  $n$  při každé napětové hladině, je tedy zřejmé, že rozdíl těchto statistických přímek bychom zmenšili aplikováním vyššího počtu  $n$  pro každou napětovou hladinu. Na příkladu těchto dvou regresních přímek je vidět, že i při použití pouze  $n = 25$  jsou přímky velice podobné.

Obě změřené přímky pro vzdálenost 60 mm s elektrodou R0,5 se moc neliší od statistické přímky pro stejnou vzdálenost s elektrodou R4. Napětí  $U_{10}$  u elektrody R4 bylo

nižší, než u elektrody R0,5 a naopak  $U_{90}$  bylo vyšší u elektrody R4. Hodnoty lze porovnat v Tabulce 3.6.

Ovšem u vzdálenosti 90 mm se průběh statistických přímek již výrazně liší. Přímký mají téměř stejný sklon s rozdílem napětí 10 kV. Z tohoto testu je tedy zřejmé, že elektroda s menším poloměrem zakřivení snížila u vzdálenosti elektrod 90 mm elektrickou pevnost o 10 kV.



Obrázek 3.5 - Porovnání statistických přímek pro 2 elektrody a 3 vzdálenosti

1bar		40 mm	60 mm	90 mm
R4	$U_{10}$ [kV]	50	61,5	91
	$U_{90}$ [kV]	61	72,5	101,5
R0,5	$U_{10}$ [kV]	46	64,5/66,5	81,5
	$U_{90}$ [kV]	57,5	71,5/69	90

Tabulka 3.6 – Hodnoty přeskokových napětí pro vybrané pravděpodobnosti přeskoku

Statistické vyhodnocení jednotlivých testů je uvedeno v přílohách B. Pro porovnání jsou jednotlivé statistické přímky zobrazeny do jednoho grafu na Obrázku 3.5. Porovnání

vlivu tvaru elektrod na elektrickou pevnost je provedeno v Tabulce 3.6 pro napětí s 10 a 90 % pravděpodobností přeskoků.

### 3.4 Vliv velikosti tlaku

U homogenního pole platí pro závislost tlaku na elektrické pevnosti Paschenův zákon. V našem případě kromě nehomogenního pole máme impulzní napěťové namáhání impulzy velmi krátkého trvání. Můžeme tedy pouze očekávat vzrůstající elektrickou pevnost s vyšším tlakem, ale samotné hodnoty je třeba pro danou konfiguraci elektrod a velikost tlaku zjistit pomocí měření. Pro měření byla použita elektroda s poloměrem hrotu 4 mm. Velikosti použitých tlaků, které byly zvoleny pro porovnávání je 100 kPa a 200 kPa.

R75/R4 při $p = 200 \text{ kPa}$			
l = 40 mm		l = 60 mm	
U [kV]	přeskoků	U [kV]	přeskoků
70	0	95	0
75	1	100	0
80	14	105	6
85	23	110	8
		115	6
		120	23

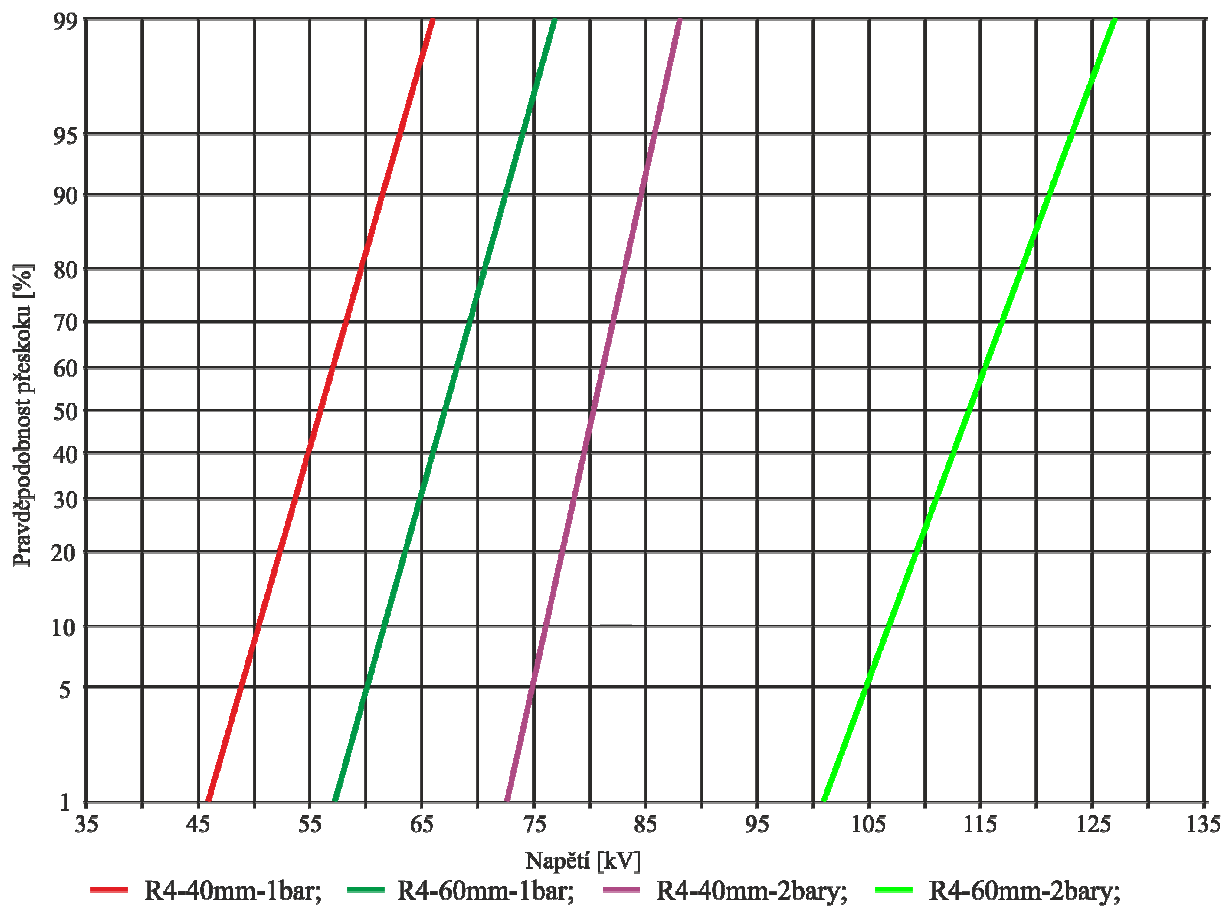
Tabulka 3.7 – Změřené hodnoty pro tlak 2 bary

Z Tabulky 3.8 je vidět, že dvojnásobné zvýšení tlaku plynu výrazně zvýšilo i jeho elektrickou pevnost. Při vzdálenosti elektrod 40 mm se zvýšila velikost  $U_{10}$  o 26 kV a pro vzdálenost 60 mm bylo zvýšení elektrické pevnosti mezi elektrodami pro  $U_{10}$  o 45 kV. Ovšem u vzdálenosti elektrod 60 mm nebyl splněn Kolmogorovův test. Provedl jsem tedy měření s danými parametry znovu s polovičním krokem napětí  $\Delta U = 2,5 \text{ kV}$ . Výsledky jsou uvedeny pouze v příloze B10, jelikož naměřená data opět neprošla Kolmogorovým testem, a dokonce tato data nebylo možné vhodně proložit přímkou. Pro zjištění důvěryhodnějších dat bych doporučoval provést měření s  $n \geq 50$ . Případně použít jinou metodu zkoušky.

Měření pro vzdálenost elektrod 90 mm s tlakem 2 bary již nebylo provedeno z důvodu velké elektrické pevnosti. Při měření by docházelo k nadměrnému zahřívání rázového generátoru.

R75/R4		40 mm	60 mm
100 kPa	$U_{10}$ [kV]	50	61,5
	$U_{90}$ [kV]	61	72,5
200 kPa	$U_{10}$ [kV]	76	107
	$U_{90}$ [kV]	84,5	121

Tabulka 3.8 – Hodnoty přeskových napětí pro vybrané pravděpodobnosti přeskoku



Obrázek 3.6 – Porovnání statistických průměků při zvýšené velikosti tlaku

## 4. Závěr

V první kapitole této diplomové práce byly shrnuty vlastnosti a chování plynných dielektrik při působení elektrického pole. Velká část textu byla věnována vysvětlení principu ionizace plynného dielektrika spojeného s popisem vzniku elektrického výboje v plynu při působení elektrického pole. Další kapitola popisuje tvar impulzního napětí a rozděluje jej dle příčiny vzniku a velikosti jednotlivých parametrů na atmosférické a spínací impulzní přepětí. Následně jsou popsány postupy zkoušek prováděných pro měření elektrické pevnosti impulzním napětím. Naměřená data pomocí jednotlivých zkoušek je třeba statisticky vyhodnotit, abychom mohli určit pravděpodobnost přeskočení pro danou napětovou hladinu. U zkoušky více hladinami, která je využita i v praktické části, je získaná distribuční funkce využita jako performance function, jenž popisuje pravděpodobnost přeskočení pro jednotlivá napětí v celém rozsahu.

Abychom však vůbec mohli zjistit odolnost izolace na působení napětového pulzu, je nutné umět jej v laboratoři vyrobit s dodržением požadovaných parametrů pulzu, které jsou stanoveny v technických normách. Na schématu Marxova zapojení impulzního generátoru je vysvětlen princip vzniku takového pulzu. V kapitole, kde je popsána funkce rázového generátoru, jsou uvedeny možnosti simulace rázového pulzu. K simulacím byly využity programy MATLAB a DYNAST.

Jelikož dnešní doba klade požadavek na co nejefektivnější využití místa při stavbě plynem izolovaných rozvodů, je nutné velice dobře znát chování plynných dielektrik při působení elektrického pole. Ovšem ve většině případů technických aplikací se nevyskytuje homogenní pole, a tak se nemůžeme odkazovat na teoretické předpoklady, které jsou platné pro homogenní pole. Vzdálenost elektrod a jejich tvar ovlivňují homogenitu pole, jejíž stupeň lze popsat pomocí Schwaigerova koeficientu.

V praktické části bylo zjišťováno, jak se mění vliv elektrické pevnosti vzduchového dielektrika při impulzním napětovém namáhání, když dojde ke změně homogenity pole vyvolané rozdílným tvarem elektrod a jejich vzdáleností. Dalším faktorem, ovlivňující elektrickou pevnost mezi elektrodami, byl tlak vzduchového dielektrika. U měření vlivu vzdálenosti elektrod bylo zjištěno, že s postupným oddalováním elektrod stoupá i elektrická pevnost vůči impulznímu napětí. Při měření s elektrodou o poloměru hrotu 0,5 mm, nám test pro vzdálenost 40 mm neprošel Kolmogorovým testem, a tak bych porovnání s touto vzdáleností mezi elektrodami nebral za věrohodné a doporučil bych měření zopakovat s větším počtem přiložení napětových pulzů pro všechny měřené napětové hladiny. Případně

kdyby bylo potřeba znát pouze hodnotu napětí např. s 10 % pravděpodobností přeskočení, mohlo by se využít měřicí zkoušky metodou nahoru-dolů.

Pro vzdálenost elektrod 90 mm vyšla pro hrotovou elektrodu R0,5 elektrická pevnost menší o 10 kV, než pro hrotovou elektrodu R4. Poslední porovnání zabývající se závislostí na tlaku nám pro obě měřené vzdálenosti elektrod jasně dokazuje, že při změně tlaku ze 100 kPa na 200 kPa nám skoro dvojnásobně stoupne i elektrická pevnost.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] VEVERKA, Antonín. *Technika vysokých napětí: vysokoškolská učebnice pro elektrotechnické fakulty*. 2., přeprac. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1978, 295 s. Řada elektrotechnické literatury.
- [2] MENTLÍK, Václav. *Dielektrické prvky a systémy*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2006, 235 s. ISBN 80-7300-189-6.
- [3] ČSN EN 60060-1. *Technika Zkoušek vysokým napětím – Část 1: Obecné definice a požadavky na zkoušky*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zastupitelství, 2011.
- [4] *High-voltage test and measuring techniques*. New York: Springer, 2013, pages cm. ISBN 9783642453519.
- [5] MALIK, N, A AL-ARAINY a M QURESHI. *Electrical insulation in power systems*. New York: Marcel Dekker, 1998, xii, 394 p. ISBN 0824701062-.
- [6] KUFFEL, E, W ZAENGL a J KUFFEL. *High voltage engineering: fundamentals*. 2nd ed. Boston: Butterworth-Heinemann, 2000, xiii, 539 p.
- [7] KUČEROVÁ, Eva. *Elektrotechnické materiály*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2002, 174 s. ISBN 80-7082-940-0.
- [8] LIPTÁK, Jan a Josef SEDLÁČEK. *Úvod do elektrotechnických materiálů*. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005, 168 s. ISBN 80-01-03191-8.
- [9] GUASTAVINO, F., A. RATTO, F. PORCILE, E. TORELLO a D. SANTINELLI. Dielectric characterization of gas mixtures as electrical insulating for high voltage components and appliances. *2013 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*. IEEE, 2013, , 1008-1011. DOI: 10.1109/CEIDP.2013.6748295. ISBN 978-1-4799-2597-1. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6748295>
- [10] 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)
- [11] Rozdíl mezi vysokonapěťovými rozváděči bez a s použitím plynu SF6. In: Profi klub elektrotechniku [online]. [cit. 2016-04-26]. 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)
- [12] SCHWENK, Klaus a Jürgen WOLF. *SGS Impulse Voltage Generator - Manual*. 2006.

- [13] HAEFELY HIPOTRONICS [online]. [cit. 2016-04-26]. Dostupné z:  
<http://www.haefely-hipotronics.com/>
- [14] KOVÁČ, František. *Statistické vyhodnocení dat v technice vysokého napětí*. Plzeň 2015. Diplomová práce. Západočeská univerzita.
- [15] OTIPKA, Petr a Vladislav ŠMAJSTRLA. *Pravděpodobnost a statistika*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2008. ISBN 978-80-248-1302-8.
- [16] Statistika a informatika – přednášky [online]. [cit. 2016-03-17]  
Dostupné z: <http://cit.vfu.cz/statwelf/WELF/prednasky.htm>
- [17] MYSLIVEC, Vojtěch. *Matematická statistika - Kolmogorovův - Smirnovův test* [online]. [cit. 2016-04-26]. Dostupné z:  
<http://vojtech.myslivec.net/sites/default/files/ctu/kolmogorov-smirnov.pdf>
- [18] Testování hypotéz. In: *Fakulta bezpečnostního inženýrstva* [online]. Žilinská univerzita v Žilině [cit. 2016-04-26]. Dostupné z:  
[http://fsi.uniza.sk/kkm/old/zamestnanci/novak/p\\_12.doc](http://fsi.uniza.sk/kkm/old/zamestnanci/novak/p_12.doc).
- [19] 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>



## **Seznam příloh**

Příloha A1 – Simulace napěťového pulzu v programu MATLAB

Příloha A1 – Simulace napěťového pulzu v programu DYNAST

Příloha B1 – B10 – Vyhodnocení jednotlivých testů

Příloha C – Fotografie rázového generátoru

Příloha D – Fotografie tlakové nádoby

## Příloha A1

### Simulace rázového pulzu v simulačním programu MATLAB:

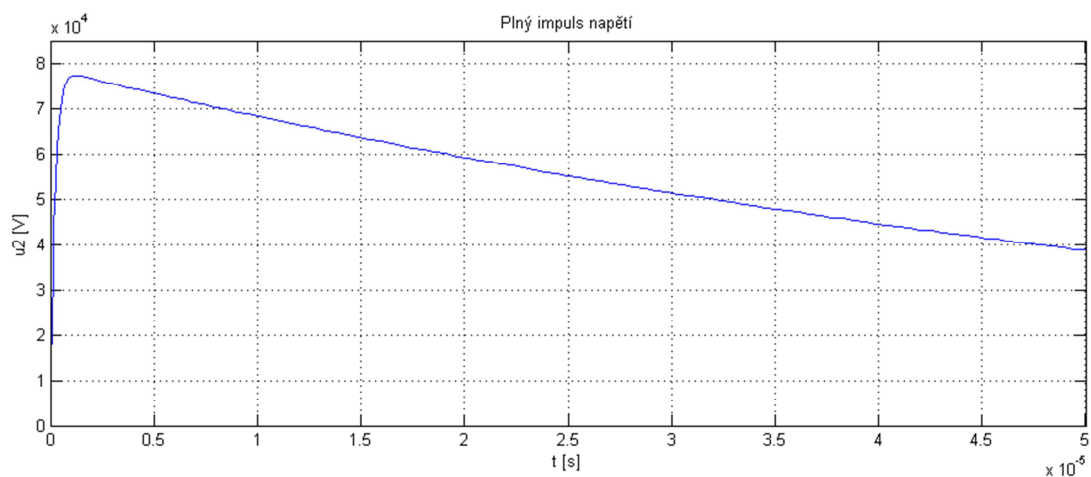
Simulaci provedeme řešením soustavy diferenciálních rovnic (2.5). Pro řešení diferenciálních rovnic je možné v programu MATLAB využít funkce ode23. Funkce ode23 řeší diferenciální rovnici integrační metodou Runge-Kutta 3. řádu. Funkce ode23 je vytvořena v samostatném souboru a je na ní z hlavního souboru odkazováno.

Text hlavního souboru:

- clc;
- clear;
- tpulzu = [0,0.00005]; %časový vektor
- y0=[80000;0]; %počáteční podmínky
- [t,y]=ode23(@vypocet, tpulzu, y0, []); %funkce ode23 vypočte diferenciální rovnice v souboru vypocet
- plot(t,y(:,2)); %vykreslení grafu (všechny hodnoty pro napětí na C<sub>2</sub>)
- grid on;
- title('Plný impuls napětí');
- xlabel('t [s]');
- ylabel('u2 [V]');
- axis([0 0.00005 0 85e3]); úprava os pro lepší zobrazení pulzu

Text funkce výpočet:

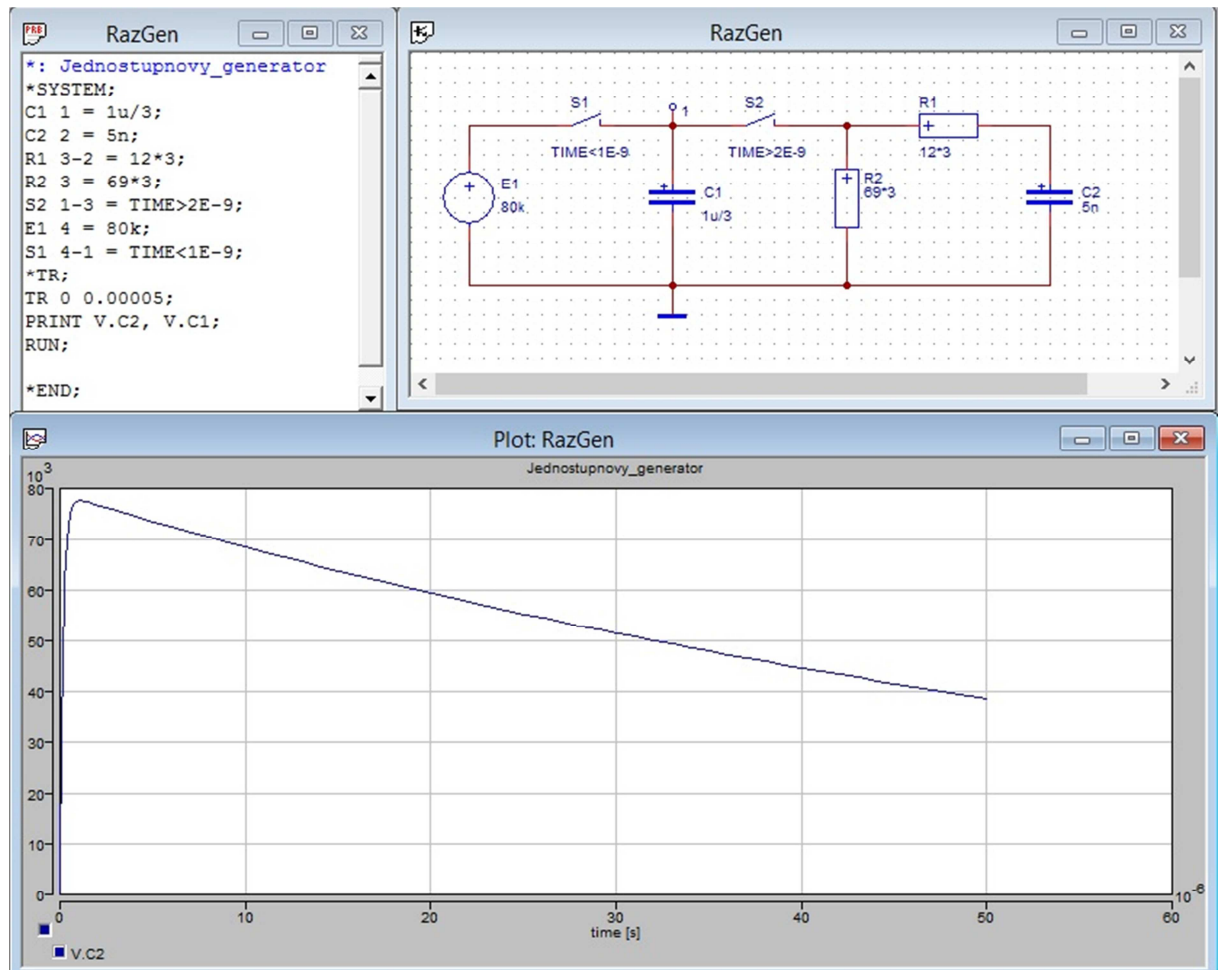
- function yd=vypocet(t,y) %propojení s volajícím programem
- C1=1E-6/3; %zadání hodnot pro výpočet diff. rovnice
- R1=12\*3;
- R2=69\*3;
- C2=5E-9;
- yd=zeros(2,1); %vytvoření nulového vektoru pro uložení výsledku
- %zadání diferenciálních rovnic:
- yd(1)=-y(1)/(R1\*C1)+y(2)/(R1\*C1)-y(1)/(R2\*C1)
- yd(2)=(y(1)/(R1\*C2))-y(2)/(R1\*C2)



## Příloha A2

### Simulace rázového pulzu v simulačním programu DYNAST:

Pro simulaci v programu DYNAST není nutné znát diferenciální rovnice. Do grafického prostředí lze pouze zakreslit schéma zapojení a zadat parametry prvků včetně počátečních podmínek. Schéma rázového generátoru s textovým zápisem v programu DYNAST je uvedeno na následujícím obrázku:



## Příloha B1

Vyhodnocení testu s následujícími parametry:

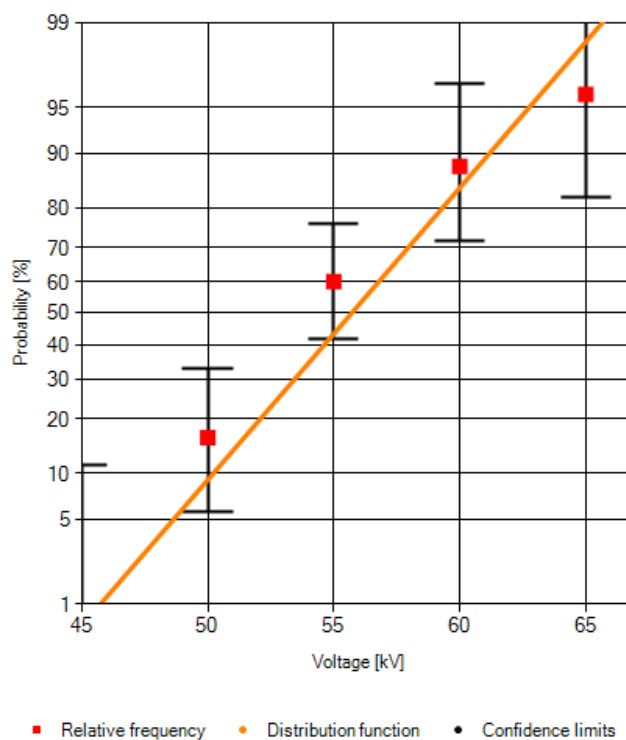
Tvar elektrod	R75/R4
Vzdálenost elektrod [mm]	40
Typ plynného dielektrika	20 % O <sub>2</sub> + 80 % N <sub>2</sub>
Tlak daného plynu [bar]	1

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	Suma	
30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	
35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
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	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	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	24

Kolmogorovův-Smirnovův test - splněn

Statistické znázornění testu v Gaussově mřížce:



## Příloha B2

Vyhodnocení testu s následujícími parametry:

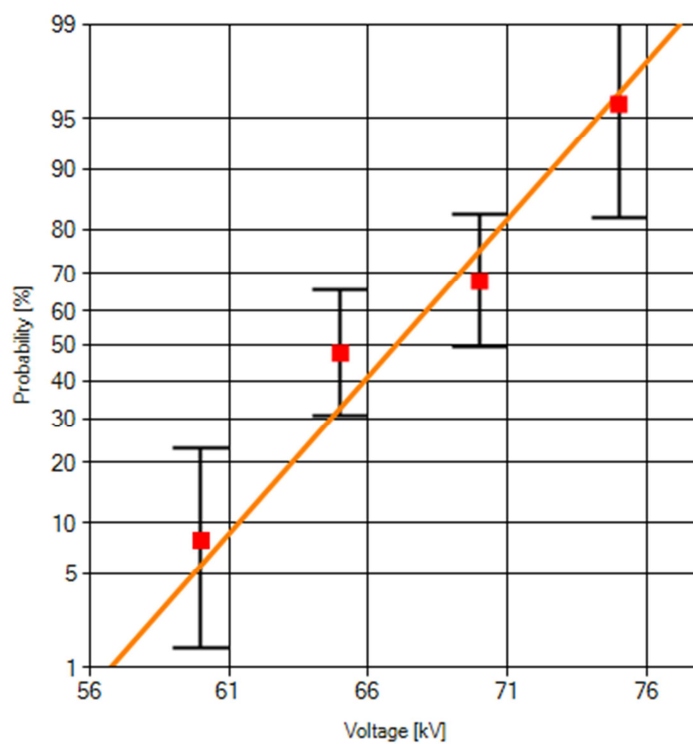
Tvar elektrod	R75/R4
Vzdálenost elektrod [mm]	60
Typ plynného dielektrika	20 % O <sub>2</sub> + 80 % N <sub>2</sub>
Tlak daného plynu [bar]	1

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	Suma	
60	-	-	-	-	-	-	x	konec testu a začátek na nižší hladině																	END		
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

Kolmogorovův-Smirnovův test - splněn

Statistické znázornění testu v Gaussově mřížce:



■ Relative frequency    ● Distribution function    • Confidence limits

## Příloha B3

Vyhodnocení testu s následujícími parametry:

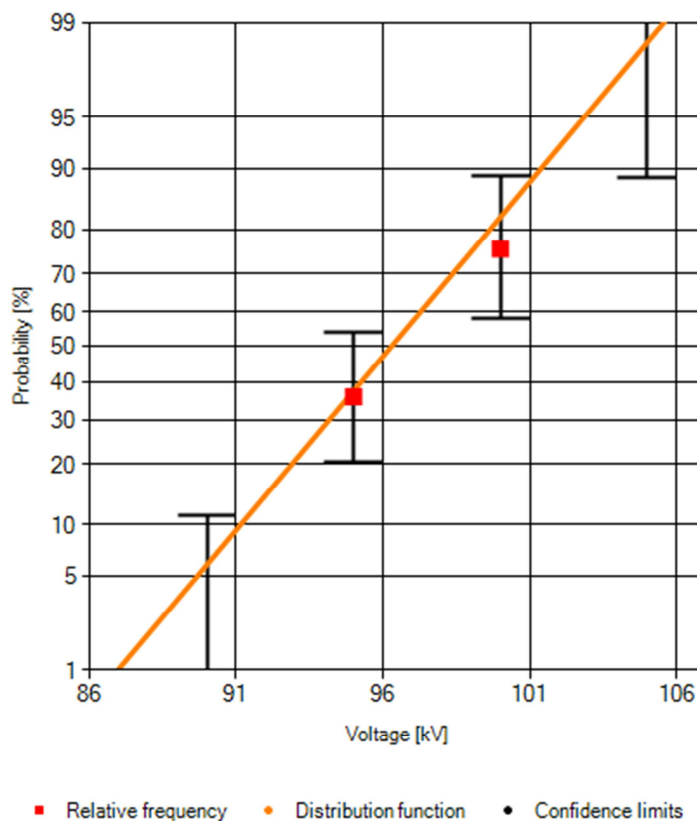
Tvar elektrod	R75/R4
Vzdálenost elektrod [mm]	90
Typ plynného dielektrika	20 % O <sub>2</sub> + 80 % N <sub>2</sub>
Tlak daného plynu [bar]	1

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	Suma
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	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	25

Kolmogorovův-Smirnovův test - splněn

Statistické znázornění testu v Gaussově mřížce:



## Příloha B4

Vyhodnocení testu s následujícími parametry:

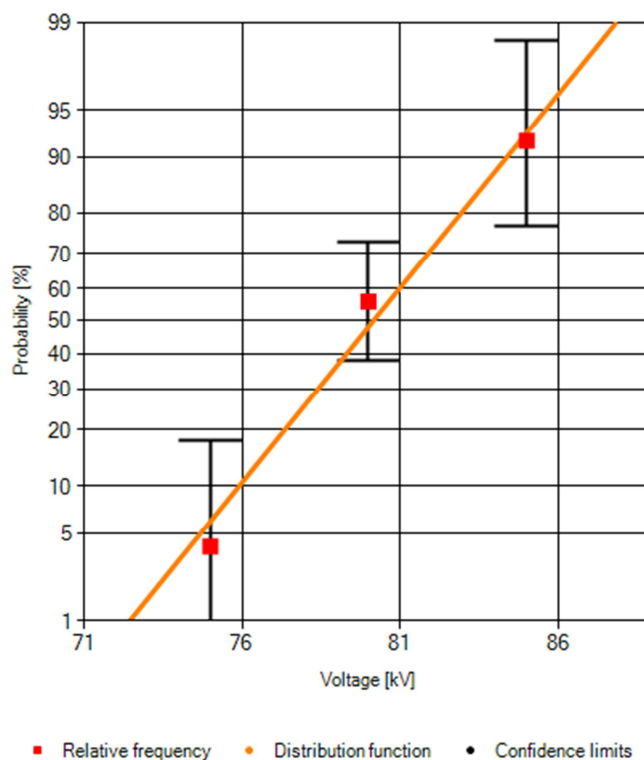
Tvar elektrod	R75/R4
Vzdálenost elektrod [mm]	40
Typ plynného dielektrika	20 % O <sub>2</sub> + 80 % N <sub>2</sub>
Tlak daného plynu [bar]	2

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	Suma
45	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
55	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
65	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
70	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
75	-	-	-	-	-	-	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1
80	-	x	x	x	-	x	x	x	-	-	-	-	x	x	-	x	-	x	-	-	x	-	x	x	x	14
85	x	-	x	x	x	x	x	x	x	-	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	23

Kolmogorovův-Smirnovův test - splněn

Statistické znázornění testu v Gaussově mřížce:



**Příloha B5**

Vyhodnocení testu s následujícími parametry:

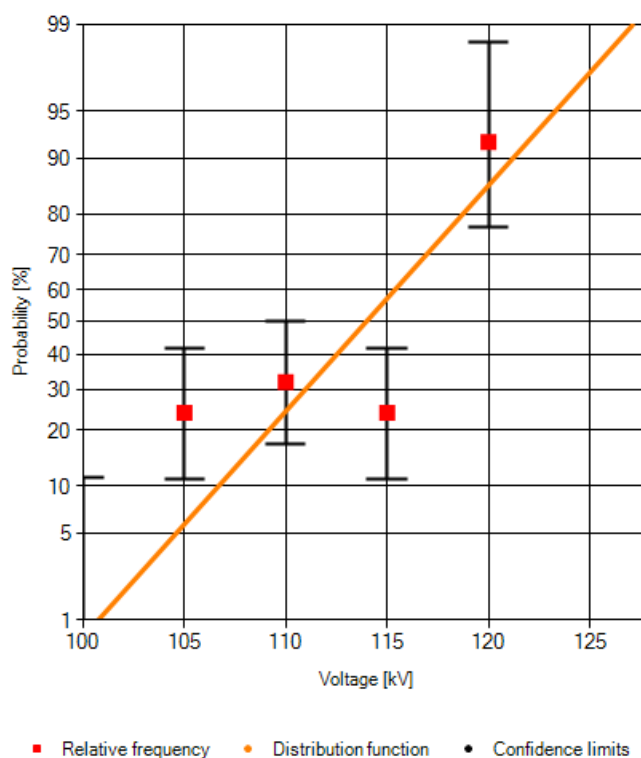
Tvar elektrod	R75/R4
Vzdálenost elektrod [mm]	60
Typ plynného dielektrika	20 % O <sub>2</sub> + 80 % N <sub>2</sub>
Tlak daného plynu [bar]	2

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	Suma
95	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
105	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	x	x	x	-	-	-	x	-	x	-	6
110	x	-	x	x	-	x	-	-	-	x	x	-	-	x	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8
115	x	x	-	-	-	-	-	x	x	x	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6
120	-	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	-	x	x	x	x	x	x	x	x	x	23

Kolmogorovův-Smirnovův test – není splněn

Statistické znázornění testu v Gaussově mřížce:





## Příloha B6

Vyhodnocení testu s následujícími parametry:

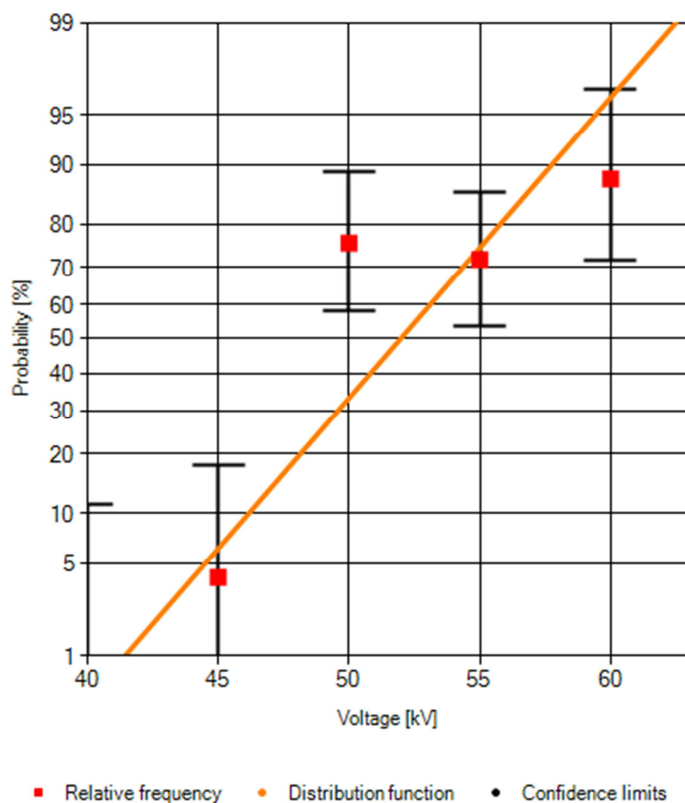
Tvar elektrod	R75/R0,5
Vzdálenost elektrod [mm]	40
Typ plynného dielektrika	20 % O <sub>2</sub> + 80 % N <sub>2</sub>
Tlak daného plynu [bar]	1

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	Suma	
30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	
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	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

Kolmogorovův-Smirnovův test – není splněn

Statistické znázornění testu v Gaussově mřížce:



## Příloha B7

Vyhodnocení testu s následujícími parametry:

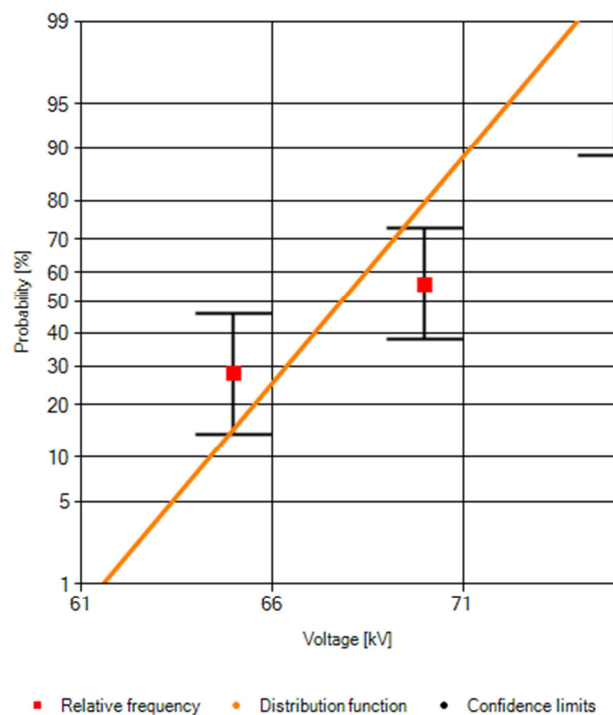
Tvar elektrod	R75/R0,5
Vzdálenost elektrod [mm]	60
Typ plynného dielektrika	20 % O <sub>2</sub> + 80 % N <sub>2</sub>
Tlak daného plynu [bar]	1

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	Suma
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	25

Kolmogorovův-Smirnovův test - splněn

Statistické znázornění testu v Gaussově mřížce:



## Příloha B8

Vyhodnocení testu s následujícími parametry:

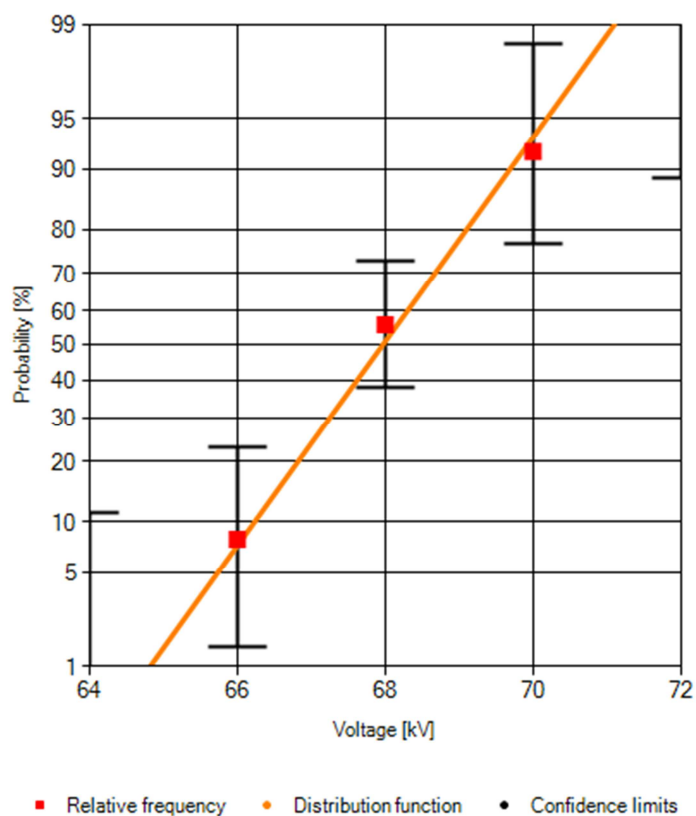
Tvar elektrod	R75/R0,5
Vzdálenost elektrod [mm]	60
Typ plynného dielektrika	20 % O <sub>2</sub> + 80 % N <sub>2</sub>
Tlak daného plynu [bar]	1

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	Suma
60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
62	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
64	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
66	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	2
68	x	x	x	x	x	x	x	x	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	x	x	x	x	x	14
70	x	x	x	x	x	x	x	x	x	-	-	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	23
72	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

Kolmogorovův-Smirnovův test - splněn

Statistické znázornění testu v Gaussově mřížce:



## Příloha B9

Vyhodnocení testu s následujícími parametry:

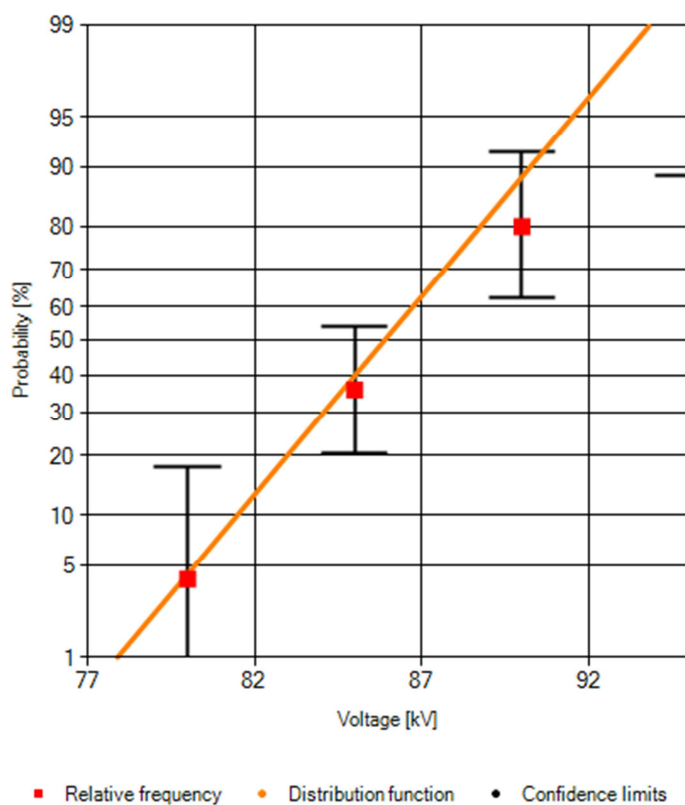
Tvar elektrod	R75/R0,5
Vzdálenost elektrod [mm]	90
Typ plynného dielektrika	20 % O <sub>2</sub> + 80 % N <sub>2</sub>
Tlak daného plynu [bar]	1

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	Suma
75	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
80	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1
85	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	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	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	25

Kolmogorovův-Smirnovův test - splněn

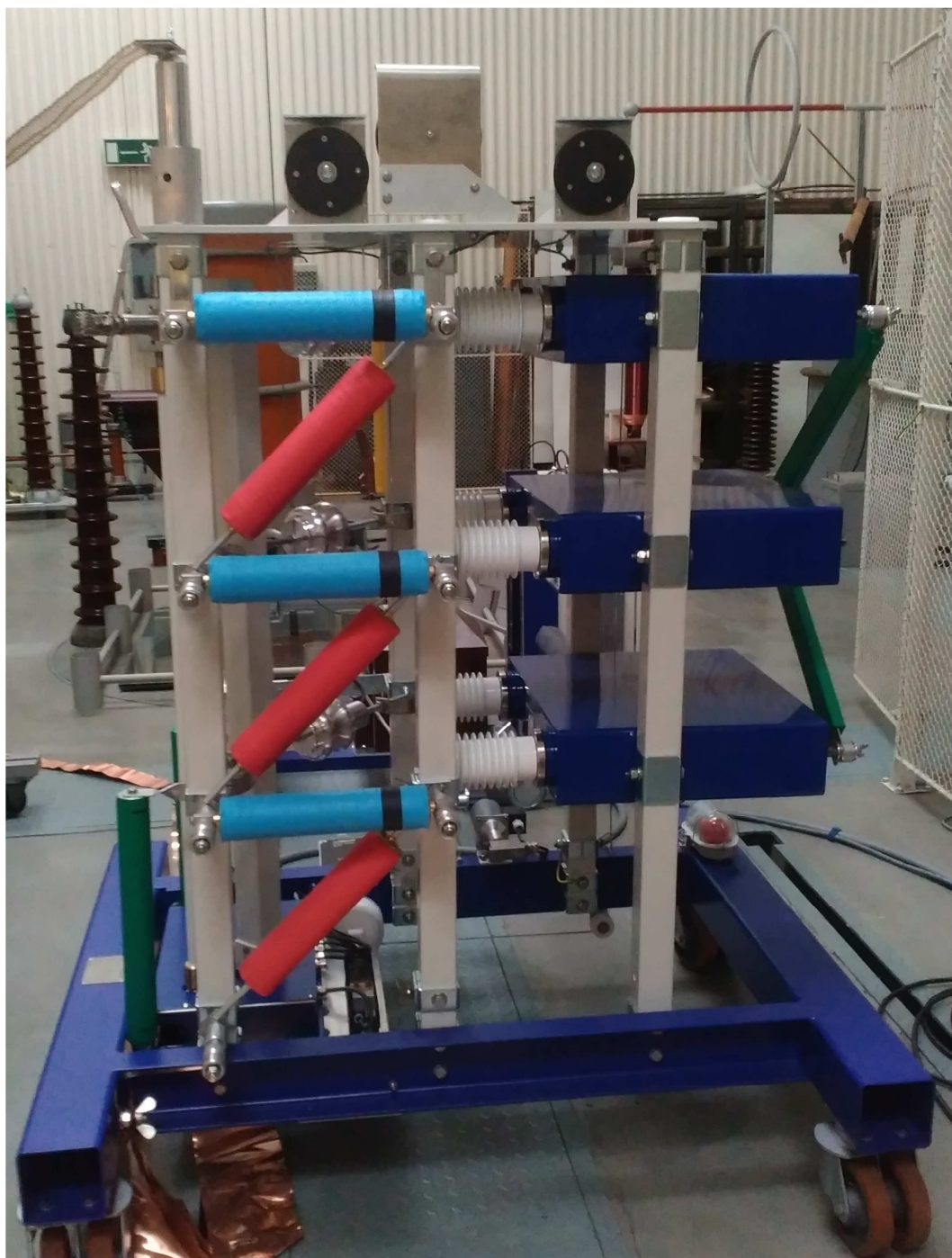
Statistické znázornění testu v Gaussově mřížce:





## Příloha C

Rázový generátor použitý k tvorbě napětových pulzů při měření:



## **Příloha D**

Tlaková nádoba, ve které je umístěna soustava elektrod pro měření v požadovaném tlaku daného plynného dielektrika:

