

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra elektroenergetiky a ekologie

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Průrazné napětí izolačního média v závislosti na tlaku

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Vojtěch BEHRÍK**
Osobní číslo: **E12N0136P**
Studijní program: **N2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu: **Průrazné napětí izolačního média v závislosti na tlaku**
Zadávající katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

Zásady pro vypracování:

1. Obecně zpracujte problematiku napěťové pevnosti pevných a plyných dielektrik a výbojové činnosti.
2. Provedte experimentální měření za účelem zjištění tlakové závislosti průrazného napětí plynného izolantu.
3. Napěťovou pevnost v závislosti na tlaku studujte pro slabě i silně nehomogenní elektromagnetická pole.
4. Výsledky naměřených hodnot průrazných napětí zpracujte a vhodnou metodou vyhodnoťte. Formulujte závěry na základě uskutečněných měření.



Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. IEEE Xplore Digital Library - <http://ieeexplore.ieee.org>
2. Veverka, A.: Technika vysokých napětí. SNTL 1982.
3. ČSN EN 60060-1 Technika zkoušek vysokým napětím, Srpen 2011

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Petr Martínek, Ph.D.


Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání diplomové práce: 14. října 2013

Termín odevzdání diplomové práce: 12. května 2014


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




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

V Plzni dne 14. října 2013

Abstrakt

Cílem této diplomové práce je vysvětlení pojmů napěťové pevnosti a výbojové činnosti v plynech a pevných látkách. Dále jsou v diplomové práci zpracovány výsledky měření rázovým a střídavým napětím.

Klíčová slova

výboj, přeskok, průraz, elektrická pevnost

Abstract

Title: The breakdown voltage pressure dependence of the insulating medium

The aim of this diploma thesis is an explanation of facts about electric strength and discharge activity in gases and solid materials. Further, in this diploma thesis there are processed values of measuring by lightning impulse and alternating voltage.

Key words

discharge, flashover, breakdown, electric strength

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 7.5.2014

Vojtěch Behřík

.....

Poděkování

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

Obsah

OBSAH	8
ÚVOD	9
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
1 VÝBOJE V PLYNECH, NAPĚŤOVÁ PEVNOST PLYNNÝCH LÁTEK	11
1.1 NOSIČE ELEKTRINY	11
1.1.1 <i>Vznik nosičů elektriny</i>	11
1.1.2 <i>Nárazová ionizace</i>	11
1.1.3 <i>Fotoionizace</i>	12
1.1.4 <i>Tepelná ionizace</i>	13
1.1.5 <i>Povrchová ionizace</i>	13
1.2 VÝBOJE V PLYNECH	13
1.2.1 <i>Nesamostatný výboj</i>	14
1.2.2 <i>Podmínka samostatného výboje</i>	15
1.2.3 <i>Paschenův zákon, přeskové napětí v homogenním poli</i>	18
1.3 VÝBOJE V PLYNECH V NEHOMOGENNÍM ELEKTRICKÉM POLI	21
1.3.1 <i>Kanálový výboj</i>	22
1.3.2 <i>Šíření striméru směrem k anodě</i>	23
1.3.3 <i>Uspořádání hrot - deska, vliv bariéry</i>	24
1.3.4 <i>Koróna</i>	26
1.3.5 <i>Trsový výboj a sršení</i>	27
1.3.6 <i>Jiskrový výboj</i>	27
1.4 DIELEKTRICKÉ VLASTNOSTI PLYNNÝCH MATERIÁLŮ	28
2 PRŮRAZY V PEVNÝCH LÁTKÁCH, NAPĚŤOVÁ PEVNOST PEVNÝCH DIELEKTRIK	29
2.1 ČISTĚ ELEKTRICKÝ PRŮRAZ PEVNÝCH IZOLANTŮ	29
2.2 ČÁSTEČNÉ VÝBOJE	30
2.2.1 <i>Vliv částečných výbojů v dutinách dielektrika na elektrickou pevnost</i>	30
2.3 TEPELNÝ PRŮRAZ	31
2.4 ROZHŘANÍ VZDUCH - PEVNÝ IZOLANT	31
2.4.1 <i>Rozhraní vzduchu a izolantu je vodorovné se silovými čarami</i>	31
2.4.2 <i>Rozhraní vzduchu a izolantu je kolmé k silovým čarám</i>	32
2.4.3 <i>Silové čáry vstupují do rozhraní vzduchu a izolantu šikmo</i>	32
2.5 VYBRANÉ PEVNÉ IZOLANTY POUŽÍVANÉ V TECHNICE VYSOKÝCH NAPĚTÍ	33
3 MĚŘENÍ TLAKOVÉ ZÁVISLOSTI PRŮRAZNÉHO NAPĚTÍ PLYNNÉHO IZOLANTU	34
3.1 ZKOUŠKY RÁZOVÝM NAPĚTÍM	34
3.1.1 <i>Zadání měřicí úlohy</i>	37
3.1.2 <i>Naměřené a dopočítané hodnoty</i>	37
3.2 ZKOUŠKY STRÍDAVÝM NAPĚTÍM	48
3.2.1 <i>Naměřené a dopočítané hodnoty</i>	48
4 ZÁVĚR	50
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	51
PŘÍLOHY	1

Úvod

Ke správnému návrhu elektrotechnických zařízení je základním požadavkem znalost materiálů. V této diplomové práci jsou uvedeny mechanismy výbojů, které se vyskytují v plynných a pevných izolačních materiálech. V případě plynných izolačních materiálů jsou mechanismy výbojů vysvětleny na vzduchu, který patří k nejpoužívanějším plynným izolantům.

Plynné izolační materiály jsou jako izolanty velmi vhodné, protože rovnoměrně vyplňují celý prostor a mají schopnost regenerace, což je schopnost obnovení izolačních vlastností po přeskočení.

Dále jsou v této práci popsány jevy, které se dějí při průrazu v pevném izolačním materiálu.

V poslední kapitole jsou uveřejněny výsledky měření závislosti napěťové pevnosti na tlaku plynného izolantu.

Seznam symbolů a zkratk

α	Teplotní činitel dielektrických ztrát
α	Ionizační číslo
β	Ionizační číslo
γ	Ionizační číslo
δ	Poměrná hustota [-]
λ	Vlnová délka [m]
Θ	Oteplení [K]
c	Rychlost světla- $3 \cdot 10^9$ m/s
d, l	Vzdálenost elektrod [m]
E	Intenzita elektrického pole [V/m]
d	Počet přeskoků [-]
f	Frekvence [Hz]
h	Četnost přeskoků [-]
h	Planckova konstanta- $6,625 \cdot 10^{-34}$ Js
m	Hmotnost [kg]
n, n_0, n_1	Počet elektronů [-]
p_{01}	Poměrné dielektrické ztráty
U_0	Počáteční napětí [V]
U_i	Ionizační napětí [V]
U_p	Přeskokové napětí [V]
U_{p50}	Polovinové přeskokové napětí [V]
W_i	Ionizační práce
v_{vn}	Velmi vysoké napětí
z_{vn}	Zvlášť vysoké napětí

1 Výboje v plynech, napěťová pevnost plynných látek

1.1 Nosiče elektřiny

Nosiči elektřiny jsou elektrony a ionty. Ionty jsou kladně nebo záporně nabité. Nosiče elektřiny s opačnou polaritou se vzájemně přitahují a neutralizují se.

1.1.1 Vznik nosičů elektřiny

Ve vzduchu vznikají nosiče ionizací. Ionizací se rozumí proces, při kterém se z elektricky neutrálního atomu stává iont. Pokud se do elektronového obalu atomu přidá jeden nebo více elektronů, vznikne záporný iont, označovaný jako aniont. [1]

Kladné ionty, kationty, vznikají odebráním jednoho nebo více elektronů z elektronového obalu atomu. [1]

K tomu, aby došlo k ionizaci, je potřeba dodat energii. Minimální energii potřebnou k ionizaci označujeme jako ionizační potenciál. [1]

Zavedeme-li označení pro neutrální částice "A", "B", molekulu označení "AB", elektron "e" a pro negativní energii "-", resp. "+" pro pozitivní energii, lze potom uvést druhy ionizace molekul. Tyto druhy jsou uvedeny v Tab. 1.1.

Tab. 1.1 Druhy chemických reakcí a ionizací

Reakce	Ionizace
$AB \rightarrow AB^+ + e^-$	Ionizace elektrickým polem Tepelná ionizace Ionizace radioaktivním zářením Nárazová ionizace
$AB \rightarrow AB^{2+} + 2e^-$	Ionizace radioaktivním zářením Ionizace tepelným polem
$AB + e^- \rightarrow AB^-$	Fotoionizace
$AB \rightarrow A^+ + B^-$	Ionizace radioaktivním zářením
$AB \rightarrow A^+ + B + e^-$	Ionizace radioaktivním zářením Ionizace elektrickým polem
$AB + e^- \rightarrow A^- + B$	Tepelná ionizace Nárazová ionizace

1.1.2 Nárazová ionizace

K nárazové ionizaci dochází, pokud dostatečně rychlý elektron, neutrální částice nebo iont narazí na neutrální atom nebo molekulu. [1]

Aby vznikla nárazová ionizace musí platit: [1]

- narážející částice je elektron:

$$\frac{mv^2}{2} \geq W_i \quad (1.1)$$

- narážející částice má stejnou hmotnost jako naražená:

$$\frac{mv^2}{2} \geq 2W_i \quad (1.2)$$

V rovnicích (1.1) a (1.2) jsou uvedeny podmínky pro vznik nárazové ionizace. Na levých stranách rovnic je velikost kinetické energie vyrážejících částic, na pravých stranách rovnic je uvedena ionizační práce (udává se v elektronvoltech) neutrálních částic plynu. V případě, že není kinetická energie větší než ionizační práce, může dojít k jinému druhu ionizace. Této ionizaci se říká stupňovitá. Tu lze popsat tak, že pokud je kinetická energie elektronu menší než ionizační práce, elektron nabudí molekulu nebo atom a ionizaci dokončí jiný elektron. [1]

1.1.3 Fotoionizace

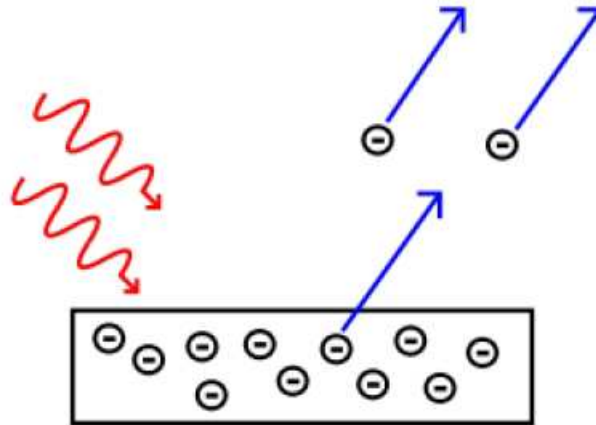
Fotoionizace vzniká při krátkovlnném záření. Podmínka vzniku fotoionizace je uvedena v rovnici (1.3). [1]

$$hf \geq W_i \quad (1.3)$$

Z tohoto vztahu lze odvodit délku vlny, při které dojde k fotoionizaci

$$\lambda \leq \frac{hc}{W_i} = \frac{123 \cdot 10^{-8}}{W_i} \quad (1.4)$$

Fotoionizace vzniká ve vzduchu rentgenovými paprsky, zářením γ , a kosmickým zářením. Záření γ vychází ze solí radia, které jsou rozptýlené v zemské kůře. [1]



Obr. 1 Princip fotoionizace [2]

I v tomto případě je možná postupná ionizace. Při ní foton nabudí atom plynu při jeho absorbování. Vlivem pohlcení energie fotonu se elektron dostane do vyššího energetického stavu, elektron pohlcením dalšího fotonu obdrží zbytek ionizační energie a opustí atom plynu. Tím vznikne volný elektron a kladný iont. Pravděpodobnost stupňovité ionizace stoupá s koncentrací nabuzených atomů plynu a velikostí intenzity záření. [1]

Z hlediska výbojů v plynech je fotoionizace sekundárním procesem. [1]

1.1.4 Tepelná ionizace

K tepelné ionizaci dochází u plynů s vysokou teplotou. U tepelné ionizace mohou nastat 3 případy[1]

- Fotoionizace tepelným zářením plynu
- Ionizace způsobená srážkami molekul plynu s velkou kinetickou energií
- Ionizace způsobená srážkami elektronů vzniklých při předešlých pochodech a molekulami plynu

1.1.5 Povrchová ionizace

Při tomto druhu ionizace dochází k uvolňování elektronů z povrchu elektrod. Aby došlo k uvolňování těchto elektronů, je třeba přidat výstupní práci. Tuto práci lze dodat několika způsoby: působením silného elektrického pole, ohříváním elektrody, ozařováním povrchu kovu krátkovlnným zářením nebo bombardováním povrchu kovu částicemi s dostatečnou energií. [1]

1.2 Výboje v plynech

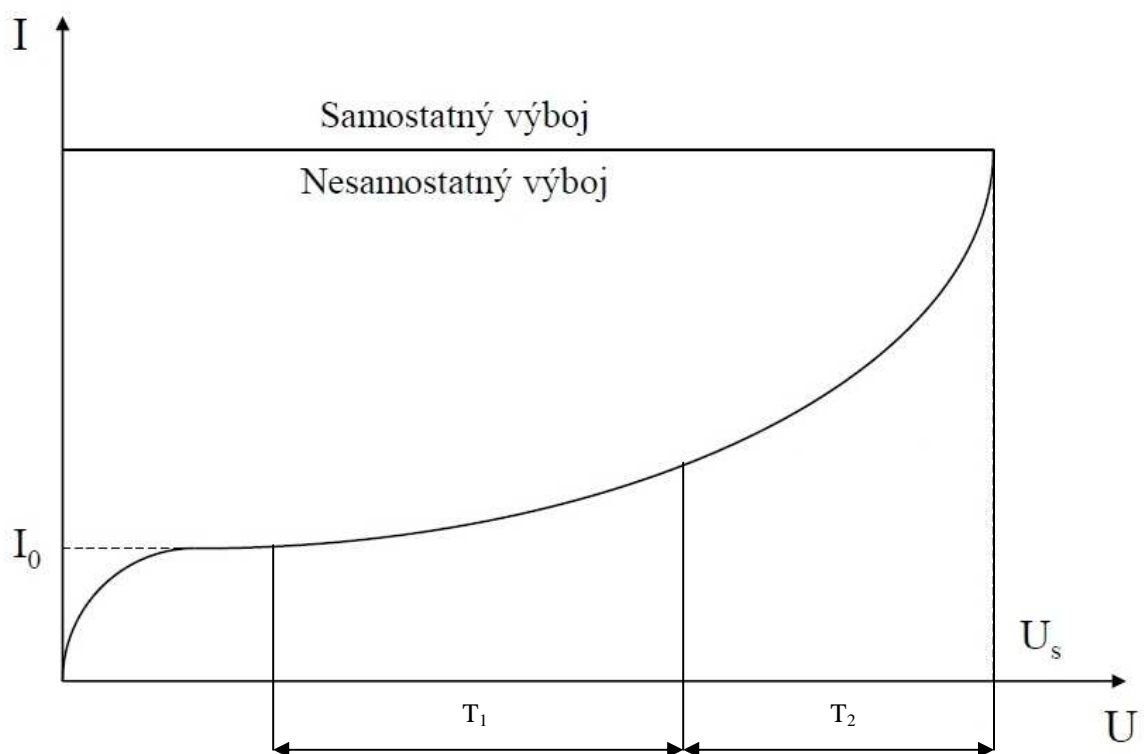
Výboje v plynech jsou procesy, při kterých dochází k přenosu elektrického náboje. Při přenosu elektrického náboje hrají ionizované částice, jejichž vznik byl popsán v předchozí

kapitole důležitou roli. Rozeznáváme několik druhů výbojů v plynech, které budou dále popsány. [1]

1.2.1 Nesamostatný výboj

Nachází-li se plyn ve slabém elektrickém poli, prochází jím velmi malý proud. Budeme uvažovat plyn v homogenním poli mezi dvěma rovinnými elektrodami, které jsou připojeny na zdroj stejnosměrného napětí. Změnou intenzity elektrického pole nabývá kladný nosič složku rychlosti ve směru intenzity elektrického pole. Záporný nosič nabývá opačný směr rychlosti. [1]

Důležitým parametrem pro nesamostatné výboje je tzv. "nasyčený proud mezi elektrodami". Pokud by se zvyšovala intenzita elektrického pole mezi elektrodami, zvýší se rychlost nosičů mezi těmito elektrodami. Vzhledem k malé prostorové hustotě přestanou nosiče rekombinovat a vznikne rovnováha mezi vznikem a odváděním nosičů. Proud už se dále se zvětšujícím se napětím nebude zvětšovat, protože nemá k dispozici dostatek nosičů. [1]



Obr. 2 Závislost výbojového proudu na přiloženém stejnosměrném napětí [2]

1.2.1.1 Townsendovy výboje

Při napětí vyšším, než je napětí nasyceného proudu, budeme předpokládat, že z jedné elektrody emitují elektrony účinkem vnějšího ionizačního činidla. Pokud se zvýší napětí, začne pomalu růst proud (oblast T_1 na Obr.2). Při dalším zvětšování napětí se bude proud v

plynu zvětšovat rychleji (Oblast T_2 na Obr.2) Výboje v těchto oblastech se nazývají Townsendovy. Podle Townsenda je pomalé zvyšování proudu v oblasti T_1 způsobené tím, že volné elektrony v plynu získávají v elektrickém poli dostatek energie pro nárazovou ionizaci. Rychlé zvětšování proudu v oblasti T_2 vysvětluje tím, že kladné ionty vzniklé při srážkách elektronů s neutrálními částicemi získávají dostatečnou energii, aby mohlo dojít k přidavné ionizaci na katodě. Pokud z elektrod odebereme vnější ionizační činidlo, přestane plynem procházet proud. Proto jsou tyto výboje označovány jako nesamostatné. Pokud by docházelo k dalšímu zvyšování napětí (na Obr.2 označeno jako U_s), proud se zvětší velmi rychle a vznikne samostatný výboj. [1]

1.2.2 Podmínka samostatného výboje

Pro oblast vyššího napětí (oblast T_2 na Obr.2) se nelze spoléhat na teoretické poznatky odvozené pro oblast T_1 , protože experimenty prokazují značné odchylky. Podle Townsenda kladné ionty, vytvořené při srážkách elektronů, nabývají dostatečné množství energie, aby prováděli také nárazovou ionizaci. Pomocí ionizačních čísel α a β analyzoval činnost elektronů a kladných iontů v plynu v homogenním poli. [1]

Ionizační číslo α závisí na energii získané elektronem na jeho střední volné dráze λ . Tato energie je $eE\lambda$, střední počet srážek na délkové jednotce je $1/\lambda$. Pokud uvážíme, že e je konstanta, lze psát[1]

$$\alpha = \frac{f(E\lambda)}{\lambda} \quad (1.5)$$

Střední volná dráha je nepřímo úměrná tlaku p . Potom lze psát

$$\frac{\alpha}{p} = F\left(\frac{E}{p}\right) \quad (1.6)$$

Aby mohl elektron, který se pohybuje v homogenním poli, při srážce ionizovat molekulu, musí platit zjednodušení, že elektron ionizuje plyn, pokud jeho kinetická energie je větší nebo rovna ionizační práci plynu. Pro energii elektronu, kterou získá na dráze x platí[1]

$$eEx \geq W_i = eU_i \quad (1.7)$$

Z toho plyne dráha, kterou musí proběhnout

$$x \geq \frac{U_i}{E} \quad (1.8)$$

Pravděpodobnost, že elektron proběhne bez srážky dráhu x nebo dráhu větší je $e^{-\frac{x}{\lambda}}$. Při ionizační srážce je

$$e^{-\frac{x}{\lambda}} = e^{-\frac{U_i}{\lambda E}} \quad (1.9)$$

Ionizační číslo α získáme vynásobením středního počtu volných drah na délkovou jednotku $1/\lambda$ pravděpodobností, že volná dráha stačí na ionizaci

$$\alpha = \frac{1}{\lambda} e^{-\frac{U_i}{\lambda E}} \quad (1.10)$$

Za předpokladu, konstantních teplot lze dosadit $1/\lambda = Ap$. Potom

$$\frac{\alpha}{p} = A e^{-\frac{AU_i p}{E}} = A e^{-\frac{Bp}{E}} \quad (1.11)$$

A a $B = AU_i$ jsou konstanty závislé na druhu plynu a teplotě.

Ionizační číslo β zavedl pro kladné ionty s analogickou závislostí na E a p jako ionizační číslo α . [1]

K dalšímu popisu mechanismu výboje budeme uvažovat, že probíhá pouze nárazová ionizace elektrony v plynu a povrchová ionizace bombardováním katody kladnými ionty. [1]

Opět budeme uvažovat dvě rovinné elektrody ve vzdálenosti d , mezi kterými je elektrické pole o intenzitě E v plynu o tlaku p . Při dostatečně velkém poměru E/p dochází k elektronové ionizaci. Za ustálených poměrů je z 1 cm^2 vnějším ionizačním čidlem emitováno n_0 elektronů za 1 sekundu. Označení n použijeme pro počet dopadajících elektronů na 1 cm^2 anody. γ je průměrný počet nových elektronů vyražených z katody kladným iontem, n_1 je počet elektronů uvolněných každou sekundu z 1 cm^2 katody ionizačním čidlem i bombardováním dohromady. Počet kladných iontů vznikajících v trubici mezi elektrodami o průřezu 1 cm^2 v ustáleném stavu za sekundu je $n - n_1$. Pro elektrony vystupující z katody platí [1]

$$n_1 = n_0 + \gamma(n - n_1) \quad (1.12)$$

$$n_1 = \frac{n_0 + \gamma n}{1 + \gamma} \quad (1.13)$$

počet elektronů dopadajících na anodu lze vyjádřit vztahem

$$n = \frac{n_0 + \gamma n}{1 + \gamma} e^{\alpha d} \quad (1.14)$$

odkud

$$n = \frac{n_0 e^{\alpha d}}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)} \quad (1.15)$$

Po vynásobení nábojem elektronu získáme hustotu proudu u anody

$$J = \frac{J_0 e^{\alpha d}}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)} \quad (1.16)$$

Hustota proudu je v celém rozsahu trubice stejná. Rovnice dává smysl jen za předpokladu, že jmenovatel je kladný. [1]

Na rozhraní katody a plynu neprobíhají jen nárazová ionizace elektrony v plynu a povrchová ionizace bombardováním katody kladnými ionty, jak Townsend předpokládal. Dochází zde především k uvolňování elektronů na povrchu katody fotony, jež vznikají v plynu při nárazové ionizaci elektrony. Ionizační číslo γ zahrnuje všechny tyto procesy mezi elektrodami. [1]

Když vzrůstá intenzita elektrického pole, stoupá hustota proudu podle rovnice (1.16). Zatím se ale nejedná o samostatný výboj, protože pokud přestane působit vnější ionizační činidlo, přestane mezi elektrodami procházet proud. Pokud ale mezi elektrodami působí dostatečně velká intenzita elektrického pole, nastane přechod k samostatnému výboji. Tento přechod nastane, pokud je splněna podmínka [1]

$$\gamma(e^{\alpha d} - 1) = 1 \quad (1.17)$$

Při splnění této podmínky může proud mezi elektrodami procházet i bez vnějšího ionizačního činidla. Podle Townsenda část rovnice (1.17) " $e^{\alpha d} - 1$ " značí počet kladných iontů vytvořených jediným elektronem, který je emitován z katody při jeho pohybu mezi elektrodami, a $\gamma(e^{\alpha d} - 1)$ počet elektronů uvolněných těmito ionty z katody. Tento počet má být jedna." [1] Samostatný výboj tedy vznikne, pokud elektrické pole, tlak plynu a vzdálenost elektrod jsou takové, že elektron opouštějící katodu vytvoří kladné ionty, které uvolní na katodě právě zase jeden nový elektron. [1]

Pokud se mění vzdálenost elektrod při konstantním napětí, popř. pokud se mění napětí při konstantní vzdálenosti elektrod, může být zaveden samostatný výboj. [1]

1.2.3 Paschenův zákon, přeskokové napětí v homogenním poli

Přeskokové napětí lze odvodit z podmínky samostatného výboje. Tuto podmínku lze napsat ve tvaru[1]

$$\alpha d = \ln \left(1 + \frac{1}{\gamma} \right) \quad (1.18)$$

Platí, že α/d je funkcí E/p . γ je také funkcí E/p , protože ionizační číslo γ je funkcí energie, kterou v průměru získá kladný iont na volné dráze před katodou. Lze tedy psát $\alpha/d=F(E/p)$ a $\gamma=G(E/p)$. Dále platí, že $E=U/d$. U je napětí mezi elektrodami. Rovnici tedy můžeme napsat ve tvaru[1]

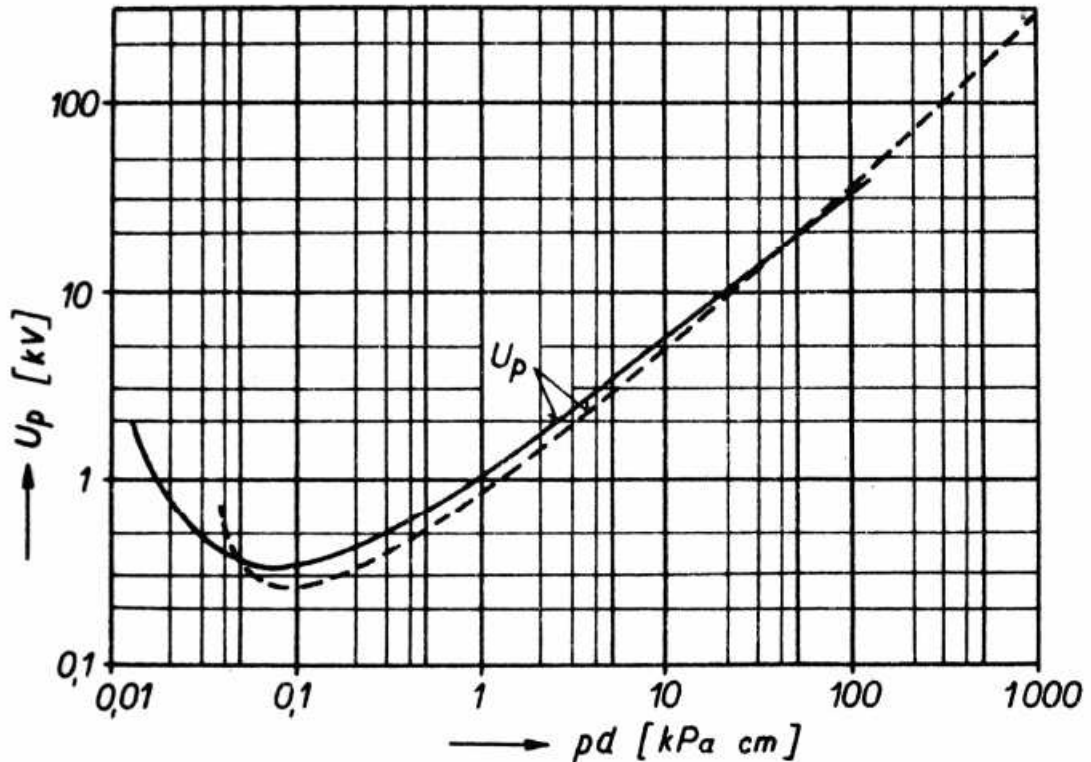
$$pd F \left(\frac{U}{pd} \right) = \ln \left[1 + \frac{1}{G \left(\frac{U}{pd} \right)} \right] \quad (1.19)$$

Při napětí, které splňuje tuto podmínku se nastaví samostatný výboj a v homogenním poli vznikne přeskok. Tomuto napětí se říká přeskokové napětí a budeme ho značit U_p . Pokud bude zachována velikost součinu pd , je zachována velikost přeskokového napětí v homogenním poli při konstantní teplotě. Pokud upravíme rovnici (1.18) tak, že za α dosadíme podle rovnice (1.11) a budeme-li předpokládat, že γ je konstantní, získáme vztah[1]

$$Apd e^{\frac{-Bpd}{U}} = \ln \left(1 + \frac{1}{\gamma} \right) \quad (1.20)$$

$$U_p = \frac{Bpd}{\ln \frac{Apd}{\ln \left(1 + \frac{1}{\gamma} \right)}} \quad (1.21)$$

Podle této rovnice lze sestavit křivku (Obr.3) znázorňující závislost přeskokového napětí v závislosti na součinu pd . Pro konstrukci byly použity tyto hodnoty: $A=109,5 \text{ (cm kPa)}^{-1}$, $B=2738 \text{ V/(cm kPa)}$, $\gamma=0,025$. Tato křivka je na obrázku čárkovaná. [1]



Obr. 3 Závislost přeskovového napětí v homogenním poli pro vzduch

[1]

Na Obr.3 je sestrojena ještě jedna plná křivka. Ta byla sestrojena na základě měření. Tato křivka se od křivky sestrojené podle rovnice (1.21) liší především v oblasti malých hodnot součinu pd . Tato odlišnost je částečně způsobena tím, že pro konstrukci křivky podle výpočtu je ionizační číslo γ uvažováno jako konstantní. [1]

Pokud bychom chtěli znát nejmenší hodnotu přeskovového napětí U_p , je potřeba derivovat rovnici (1.21) podle pd a položit ji rovnu nule. Dostali bychom se k výrazu[1]

$$\ln \frac{Apd}{\ln \left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)} = 1 \quad (1.22)$$

z toho dále

$$(pd)_{min} = \frac{e \ln \left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)}{A} \quad (1.23)$$

a

$$U_{p min} = B(pd)_{min} \quad (1.24)$$

Pokud bychom nadále neuvažovali konstantní teplotu $\vartheta_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ($\Theta_0 = 293 \text{ K}$), musíme zahrnout vliv teploty na velikost přeskovového napětí. Toho dosáhneme, pokud uvážíme, že

střední volná dráha je úměrná absolutní teplotě Θ a konstanty A a B v rovnici (1.11) jsou nepřímo úměrné Θ . Rovnici (1.21) lze poté přepsat v tvaru[1]

$$U_p = \frac{Bpd \frac{\theta_0}{\theta}}{\ln \frac{Apd \frac{\theta_0}{\theta}}{\ln \left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)}} \quad (1.25)$$

Dále lze zavést poměrná hustota $\delta = p/\Theta$ a pro vzduch platí

$$\delta = \frac{p}{p_0} \cdot \frac{\theta_0}{\theta} = 2,89 \frac{p}{\theta} \quad (1.26)$$

Na Obr.3 je vidět, že pro oblast velkých hodnot součinu pd je závislost velikosti U_p téměř lineární. Pro orientační výpočty, kde se počítá s hodnotou elektrické pevnosti vzduchu 30 kV/cm, uvažovat vztah[1]

$$U_p = 1,36 + 30\delta d \text{ [kV; cm]} \quad (1.27)$$

Rovnice (1.27) platí i pro vrcholové hodnoty střídavého napětí.

1.3 Výboje v plynech v nehomogenním elektrickém poli

V nehomogenním poli je potřeba rozlišovat počáteční napětí U_0 a přeskokové napětí U_p . Počáteční napětí U_0 je takové napětí, při kterém dochází ke vzniku prvního samostatného výboje. Tento výboj může být i částečný, protože se nemusí rozšířit po celé vzdálenosti mezi elektrodami. V homogenním poli platí $U_0=U_p$. Určení počátečního napětí v nehomogenním poli je mnohem složitější, než v poli homogenním. Velikost přeskokového napětí v nehomogenním poli závisí na polaritě elektrod a jejich tvaru. [1]

V nehomogenním poli lze formulovat podmínku pro vznik samostatného výboje tak, jak to učinil Schumann[1]

$$\int_0^d \frac{1}{E^2} e^{-\frac{6300}{E^2}} dx \geq 0,186 \cdot 10^{-5} \quad (1.28)$$

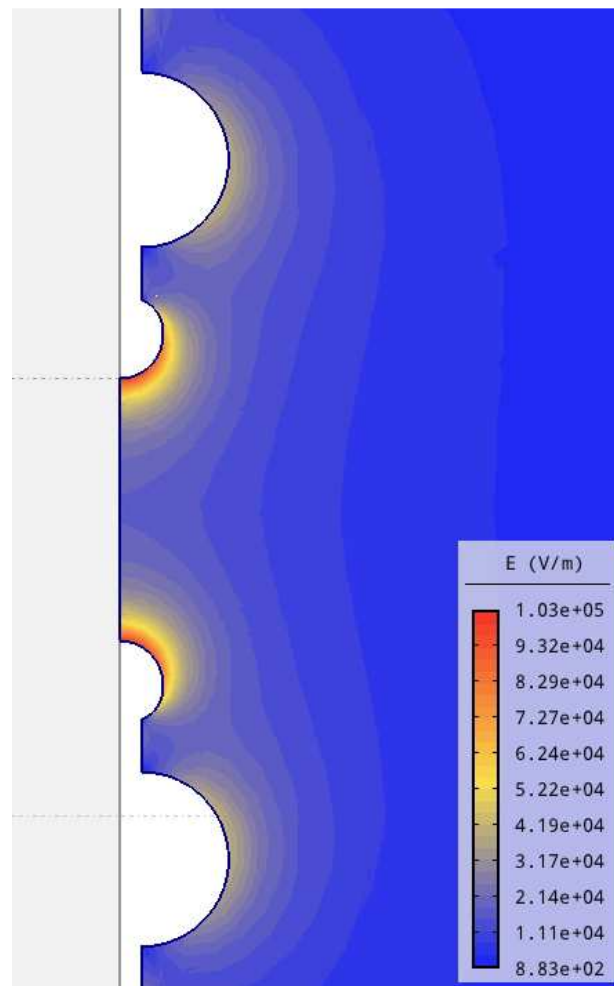
V rovnici (1.28) se E dosazuje v kV/cm, d a x v cm. Rovnici (1.28) lze použít pro nehomogenní elektrické pole, které se jen málo liší od homogenního. [1]

Pro slabě nehomogenní pole, u kterého je vliv polarity nepatrný, lze podle zákonitosti samostatného výboje v homogenním poli psát analogicky k rovnici (1.18)[1]

$$\ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right) = \int_0^d \alpha dx \quad (1.29)$$

Pro slabě nehomogenní pole lze uplatnit zákon podobnosti výbojů. *"Při konstantní teplotě je přeskokové napětí v geometricky podobných uspořádání stejné, mění-li se tlak v obráceném poměru s geometrickými rozměry."* [1]

U polí, která jsou silně nehomogenní, se v praxi používají vzorce zjištěné experimenty nebo se využívá počítačových programů určených k řešení polí (např. Agros2D).



Obr. 4 Rozložení intenzity elektrického pole kolem jiskřičtě

1.3.1 Kanálový výboj

Je to mechanismus, podle něhož elektronová lavina, zavedená jedním elektronem, po vytvoření dostatečného prostorového náboje, přechází v kanálový výboj, který se šíří velkou rychlostí k oběma elektrodám. Tento mechanismus byl zaveden z toho důvodu, že Townsendova teorie elektrického výboje nevysvětlovala při pokusech zjištěné krátké doby výstavby jiskry u vzdálených elektrod za atmosférického tlaku. Doba výstavby jiskry byla řádově asi 10^{-7} s a rychlost pohybu kladných iontů přibližně 10^5 cm/s. Tato rychlost je taková, že za dobu výstavby jiskry žádný kladný iont neproběhne vzdálenost mezi elektrodami. [1]

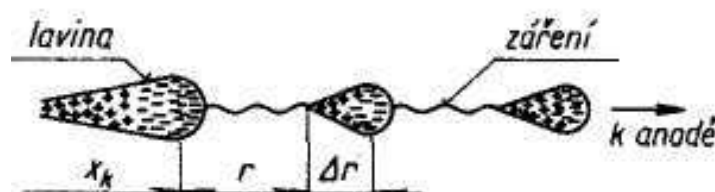
Ve Wilsonově mlžné komoře bylo experimentálně sledováno šíření laviny v počátečním stadiu. V komoře byly umístěny 2 rovnoběžné deskové elektrody. Na tyto elektrody bylo přiváděno impulzní napětí s dobou trvání řádově 10^{-7} s. Ultrafialové záření uvolňovalo z katody počáteční elektrony. Postup výboje byl sledován pomocí vodních kapiček, které kondenzovaly na kladných iontech. Náboj elektronů v čele laviny roste podle zákona $e^{\alpha x}$. x značí vzdálenost čela od katody. V blízkosti čela laviny se nachází největší počet kladných iontů. Průřez laviny se rozšiřuje ve směru příčném na směr laviny vlivem difuze. Pokusem

bylo zjištěno, při dostatečně velkém poměru E/p , kdy lavina proběhla takovou vzdáleností x , že αx nabylo hodnoty 18-20, vyrazil od čela laviny kanálový výboj. Kanálový výboj se šířil k anodě rychlostí asi desetkrát větší, než původní lavina. Z kanálu je ve tmě patrné namodralé světélkování. Podle tohoto jevu je výboji říká strimér, anglicky streamer. [1]

Přechod z laviny do striméru se nastává, když se nahromadí v čele laviny dostatečně veliký prostorový náboj. Při přechodu z laviny na strimér je výboj schopen rozvíjet se samostatně. Prostorová hustota elektronů a kladných iontů je v počátečním stadiu laviny malá a nedochází k výrazné deformaci homogenního pole. Homogenní pole je deformováno až s narůstající hustotou náboje. Spád napětí vzrůstá těsně před čelem a v týlu laviny. Čelo laviny se stává zdrojem fotonové emise. [1]

1.3.2 Šíření striméru směrem k anodě

Na Obr.5 je uveden mechanismus šíření striméru postupujícího k anodě. Pokud proběhne lavina určitou vzdáleností x_k , dojde k překročení kritické hodnoty hustoty elektronů a intenzita UV záření vzroste tak, že se může vytvořit elektron fotoionizací ve vzdálenosti r před čelem laviny. Elektron se vytvoří v oblasti elektrického pole, které je zesíleno prostorovým nábojem laviny. Elektron se začíná vlivem tohoto pole rychle pohybovat k anodě a vytváří svoji lavinu. Se zvyšující se intenzitou elektrického pole se zvětšuje ionizační číslo a prostorový náboj v čele nové laviny dosahuje stejné velikosti jako u prvotní laviny.. Prostor mezi lavinami se vyplní elektrony a kladnými ionty a vytvoří se kanál dobře vodivého plazmatu. Sekundární lavina vysílá fotony, které dále rozvíjejí pochod a vytvoří se strimér. Ten se šíří větší rychlostí, než je rychlost elektronů v čele striméru. Po dosažení anody je vzdálenost od prvotní laviny až k anodě překlenuta vodivým kanálem. Mezi katodou a začátkem vodivého kanálu se objeví celé napětí připojené na elektrodách. Následně se vytvoří další kanál ve směru ke katodě. [1]



Obr. 5 Mechanismus šíření striméru[1]

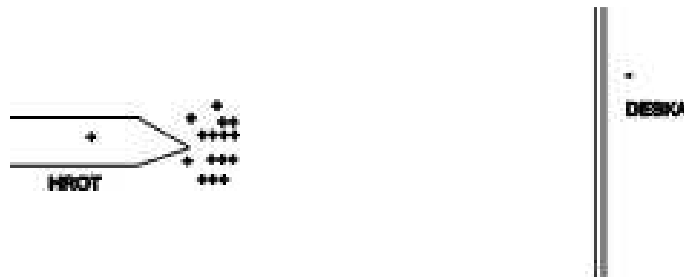
Kanálová teorie vysvětluje pochody při vzniku výbojů v nehomogenním poli. Typickým příkladem je uspořádání hrot - deska. [1]

1.3.3 Uspořádání hrot - deska, vliv bariéry

V uspořádání hrot - deska je intenzita elektrického pole nejvyšší v blízkosti hrotu a směrem k desce klesá. Ke vzniku ionizace ve vzduchu, nejdříve v těsné blízkosti hrotu je potřeba zvyšovat napětí, dokud nedosáhne kritické úrovně. Dojde k samostatnému výboji. Proud samostatného výboje je omezen malou vodivostí prostoru, kde intenzita elektrického pole nedosahuje kritické hodnoty. Dochází k výboji známém jako koróna. Pokud by se nadále zvyšovalo napětí, dojde ke splnění podmínek pro ionizaci podél celého doskoku a dojde k přeskoku mezi elektrodami. [3]

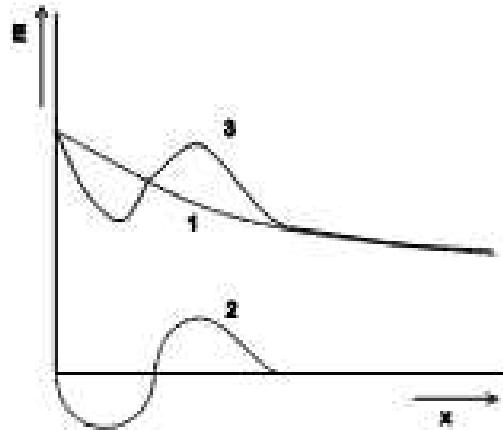
1.3.3.1 Kladný hrot - záporná deska

Předpokládejme zapojení elektrod kladný hrot - záporná deska (Obr.6). Připojíme-li k elektrodám takové napětí, že v okolí hrotu je intenzita elektrického pole dostatečně velká pro vznik nárazové ionizace, objeví se volné elektrony a vzniká několik lavin směrem k hrotu. Elektrony se v důsledku své malé hmotnosti rychle přemístí k hrotu a kladné ionty se vzhledem k vyšší hmotnosti v porovnání s elektrony pomaleji přibližují k desce. V blízkosti hrotu vznikne kladný objemový náboj. [3]



Obr. 6 Uspořádání kladný hrot - záporná deska [3]

Na Obr.7 můžeme sledovat rozložení intenzity elektrického pole. Křivka 1 představuje intenzitu pole způsobenou vnějším zdrojem, křivka 2 znázorňuje rozložení intenzity způsobenou objemovým nábojem. Výsledné rozložení intenzity představuje křivka 3. Jak je patrné z grafů, objemový kladný náboj zmenšuje intenzitu pole v blízkosti hrotu. V ostatním prostoru mezi elektrodami ji naopak zvyšuje. Snížení intenzity pole v blízkosti hrotu způsobí, že výboj uhasíná, protože nevzniknou další laviny. Podmínky pro vznik dalšího výboje se obnoví, až když se kladný náboj vzdálí směrem k desce. Korónový výboj má v tomto uspořádání pulzní charakter. [3]

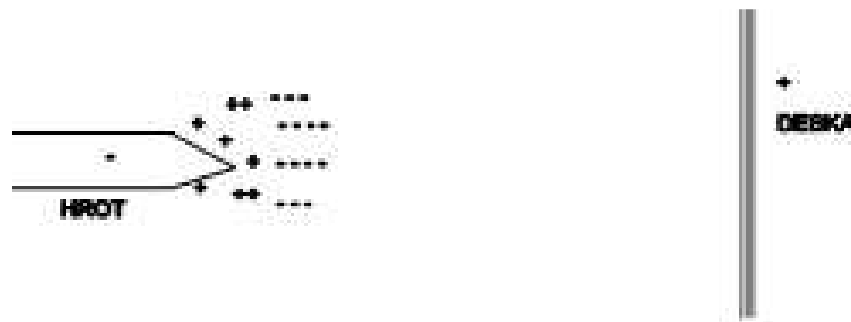


Obr. 7 Uspořádání kladný hrot - záporná deska, rozložení intenzity elektrického pole [3]

[3]

1.3.3.2 Záporný hrot - kladná deska

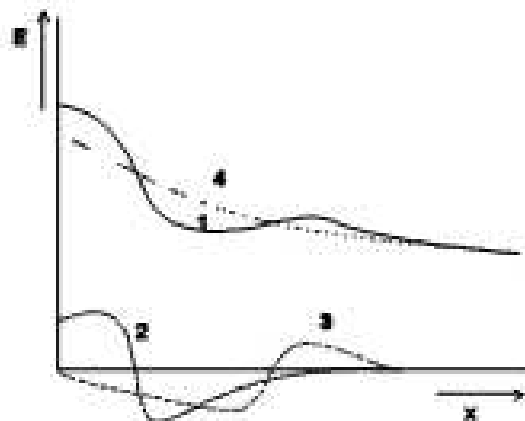
Do vzniku ionizace je rozložení intenzity pole stejné jako v případě kladný hrot-záporná deska. Laviny elektronů vznikají při stejném napětí v blízkosti hrotu. Elektrony se pohybují k desce a za sebou zanechávají kladný objemový náboj z iontů. Tyto ionty se pomalu přibližují k hrotu. Když elektrony opustí oblast vysoké intenzity pole, ztratí svoji rychlost a jsou částečně zachyceny neutrálními molekulami. Vzniknou záporné ionty a vytvoří se druhý, záporný prostorový náboj. Tento náboj se nachází u hrotu blíže desce. [3]



Obr. 8 Uspořádání záporný hrot - kladná deska [3]

[3]

V porovnání s uspořádáním kladný hrot - záporná deska má objemový náboj složitější strukturu. Nejvyšší intenzita pole je v blízkosti hrotu a je způsobena kladným objemovým nábojem. S narůstajícím záporným kladným prostorovým nábojem klesá intenzita pole a doposud silně vyjádřený korónový výboj ustává. Podmínky pro vznik ionizace se opět obnoví, když se záporný prostorový náboj přiblíží k desce. Výboj má opět pulzní charakter. Protože prostorové náboje snižují směrem k desce intenzitu pole a tím zabraňují rozvinutí výboje v jiskru, je průrazné napětí tohoto uspořádání větší než v případě uspořádání kladný hrot - záporná deska. [3]



Obr. 9 Uspořádání záporný hrot - kladná deska, rozložení intenzity elektrického pole [3]

[3]

1.3.3.3 Vliv bariéry

V silně nehomogenním poli se vložení bariéry z tenkého dielektrika mezi elektrody zvýší elektrickou pevnost. Elektrická pevnost se zvýší, protože se na bariéře vytvoří elektrický náboj, který ovlivňuje rozložení pole. [3]

Uvažujme opět uspořádání hrot - deska jako v předchozích případech. Mezi elektrody vložíme bariéru z lepenky nebo papíru. Bariéra není překážkou pro malé rychle letící elektrony. Naopak velké pomalé ionty se zachytí na bariéře. Na bariéře se zachycují ionty stejné polaritě jako má hrot. Ionty postupně nabíjejí bariéru a pole mezi deskou a bariérou se stává homogenním. Intenzita mezi bariérou a hrotem je malá a prochází jí malý proud. Pokud bychom zvyšovali napětí mezi elektrodami, zvětšil by se náboj na desce a nakonec by došlo k přeskoku. Velikost přeskokového napětí je závislá na poloze bariéry. [3]

1.3.4 Koróna

Koróna vzniká, pokud intenzita elektrického pole mezi značně zakřivenými a vzdálenými elektrodami dosáhne hodnot dostatečných pro vznik nesamostatného výboje. Pro tyto výboje jsou charakteristické svítící kanálky směřující od elektrod. Na počáteční stadia koróny má vliv stav povrchu elektrod. Ohnisky malých předběžných nestabilních výbojů jsou drobné nečistoty a nerovnosti elektrod. [1]

O počátečním napětí vzniku koróny lze mluvit za určitých podmínek (vlhkost, hustota plynu, tvar elektrod) jen u hladkých a čistých elektrod. V takovém případě lze měřit protékající proud jdoucí k elektrodám při zvyšování napětí. Vodiče se obklopí slabě svítící vrstvou a je možné slyšet šumění a praskání. Se zvyšováním napětí výboj přechází v trsový a jiskrový. [1]

Koróna vzniká na kladné i záporné elektrodě při podobných hodnotách intenzity elektrického pole. U záporné elektrody vstupují elektrony ze slabě svítící vrstvy výboje do vnější oblasti a rychle tvoří záporné ionty, kladné ionty se pohybují k elektrodě a neutralizují se. V případě kladné polaritě elektrody přecházejí kladné ionty do vnější oblasti a elektrony vstupují do vodiče. [1]

1.3.5 Trsový výboj a sršení

Trsový výboj vzniká u elektrod tvaru hrotu, jejichž pole je divergentní, pokud jejich vzdálenost překročí určitou vzdálenost. Vzniká i u koulí a válců, pokud poměr doskoku a poloměru zakřivení překračuje určitou hodnotu. U hladkých povrchu, kde není velká nehomogenita, přejímá úlohu hrotů prach. Trsový výboj téměř vždy předchází jiskrovému výboji. Pokud napětí mezi elektrodami překročí určitou kritickou hodnotu, vytvoří se trsový výboj. Ten se vyvíjí z klidného samostatného svítícího výboje v jednotlivých bodech povrchu ve formě drobných paprsků. Ty tvoří rozvětvený trs a končí ve vzduchu nebo na povrchu izolantů. Tvar trsu záleží na polaritě. Trsy se při výboji rychle vytvářejí a zase mizí. Když dojde k ustálení výboje, jedná se o sršení. [1]

Napětí jiskry reprezentuje napětí, při kterém přejde trsový výboj v jiskrový výboj. Pro tento přechod jsou rozhodující poměry v části výboje, která sedí na elektrodě a v níž se pohybují nosiče v úzkém kanálu. Této části výboje se říká stvol. Při určitém napětí se úbytek napětí ve stvolu náhle zmenší, stvol se prodlouží na úkor větví trsu a vytvoří se jiskra. [1]

Vlhkost nepříznivě ovlivňuje vznik trsového výboje, protože vodní kapičky absorbují ionty a tím vznikají těžké částice. [1]

1.3.6 Jiskrový výboj

V homogenním nebo slabě nehomogenním poli mezi hladkými čistými elektrodami vznikne jiskra, pokud přiložené napětí překročí napětí samostatného výboje. V případě nehomogenního pole se jiskra vytvoří z trsového výboje, když proud trsu překročí kritickou hodnotu. V případě přiložení stejnosměrného nebo střídavého napětí potřebného na přeskok na elektrody, může být doba od přiložení napětí do přeskoku libovolně dlouhá. Jedná se o statický přeskok. [1]

Pokud přiložíme rázové napětí na elektrody, pro vznik jiskry musí být vrcholová hodnota napětí tím vyšší, čím je strmější rázové napětí aby došlo ke vzniku jiskry. Pokud je vrcholová hodnota napětí nižší, než je potřeba k přeskoku v čele rázu, postačí k přeskoku v týlu rázu. Čím vyšší je vrcholová hodnota rázového napětí a čím pozvolnější je klesání napětí v týlu, tím dříve dojde k přeskoku. Jiskrový výboj vždy potřebuje určitý čas ke svému vytvoření. Této

době se říká doba zpoždění výboje a je to doba od přiložení náhlého napětí, které stačí k přeskoku do okamžiku přeskoku. Skládá se ze dvou částí: statické doby zpoždění a z doby výstavby náboje. [1]

Statická doba zpoždění

Vzniká tím, že v okamžiku zavedení napětí na elektrody nemusí být mezi elektrodami žádný volný elektron, nebo pokud tam elektron je, nemusí ještě ionizace zavedená tímto elektronem vést k přeskoku. Střední doba statického zpoždění závisí na následujících faktorech: tvar pole u katody, materiál katody, stav povrchu katody, jak rychle a jakou hodnotou převyšuje přiložené napětí statické přeskovkové napětí, druh a intenzita ultrakrátkovlnného záření. V praxi má tato doba význam u malých jiskřišť s poměrně homogenním polem. [1]

Doba výstavby jiskry

"Je to doba potřebná k vybudování výboje od okamžiku, kdy jsou k dispozici počáteční elektrony; má statický charakter, který se projevuje při dlouhých doskocích v nehomogenním poli"[1]

1.4 Dielektrické vlastnosti plynných materiálů

Až doposud jsme při výkladu výbojů uvažovali jediný plynný izolant a to vzduch. V technické praxi se ovšem používá mnohem více plynných dielektrik. Jejich vlastnosti se popisují především poměrnou elektrickou pevností. *"Poměrná elektrická pevnost je poměr elektrické pevnosti plynu a vzduchu při téže tlaku a téže vzdálenosti stejných elektrod."* [1] Hodnoty poměrné elektrické pevnosti některých plynů jsou uvedeny v následující tabulce [1]

Tab. 1.2 Poměrná elektrická pevnost plynů

Plyn	Poměrná elektrická pevnost
Vodík	0,6-0,75
Dusík	1,0
Vzduch	1,0
Kyslík	1,1
Kysličník uhličitý	1,15-1,25
Chlór	1,55
CCl ₄ (tetrachlormethan)	6,3
SeF ₄ (fluorid seleničitý)	4,5
C ₂ H ₅ J	3,0
CCl ₂ F ₂ (freon)	2,4-2,6
SF ₆ (fluorid sírový)	2,3-2,5

Některé prvky, zejména deriváty halových prvků, mají velkou poměrnou elektrickou

pevnost. To souvisí s tím, že mají menší ionizační číslo α . Malé ionizační číslo α má tyto příčiny: [1]

1. Elektrony získávají kinetickou energii pomalu se zřetelem ke ztrátám energie pro polarizaci a disociaci molekul

2. Malé volné dráhy způsobené většími rozměry molekul plynu.

3. Velká přilnavost elektronů k halovým prvkům. Tím vznikají málo pohyblivé ionty. Ty snadno rekombinují s kladnými ionty.

Poměrná elektrická pevnost není jediným kritériem, které rozhoduje o vhodnosti plynů a jejich sloučenin jako dielektrik. Další kritéria pro použití jako izolantu jsou: [1]

1. Chemická netečnost k materiálům

2. Nepatrný rozklad působením elektrického výboje

3. Nízká teplota zkapalnění. Ta umožňuje použití vyšších tlaků při zachování teplot vhodných k provozu.

V některých zařízeních se využívá toho, že přeskokové napětí plynů roste s tlakem. Toho se však využívá jen do určitého tlaku, protože to s sebou přináší složité úpravy a provoz to činí složitějším. [1]

V elektrotechnice je často používaný fluorid sírový SF_6 . Je to nehořlavý plyn, bez zápachu. Do 800 °C je nehořlavý a není jedovatý. Velice často se používá v zapouzdřených stanicích vvn a zvn obzvláště v zastavěné oblasti, protože tyto zapouzdřené rozvodny vyžadují méně stavebního místa ve srovnání s klasickými stanicemi.

2 Průrazy v pevných látkách, napěťová pevnost pevných dielektrik

2.1 Čistě elektrický průraz pevných izolantů

Čistě elektrický průraz je takový, který závisí pouze na fyzikálním stavu izolantu, chemickém stavu izolantu a mikroskopické struktuře. Abychom mohli dále rozebrat problematiku čistě tepelného průrazu, je potřeba zavést jistá zjednodušení. Je třeba zanedbat vliv nehomogenity izolantu, tvar a materiál elektrod, ohřátí izolantu elektrickými proudy, chemické změny, okrajové jevy u elektrod a uvažovat homogenní elektrické pole. [1]

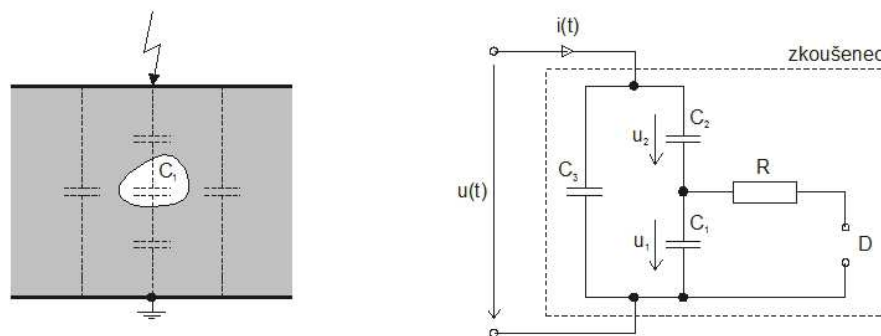
Kvantově mechanický výklad čistě elektrického průrazu vychází z vodivosti v nedokonalém dielektriku. V takovém dielektriku se vždy může vyskytnout určitý počet elektronů v energetických hladinách vodivostního pásu. Tyto elektrony se poté chovají obdobně jako volné. Přestup elektronu do energeticky vyššího pásu je tím snazší, čím méně kvalitní je krystalický charakter dielektrika. K přesunu elektronu může dojít nepružnými

srážkami s částicemi, absorpcí záření, účinkem teploty nebo účinkem velké intenzity elektrického pole. Uvolněné elektrony se rozptýlí v dielektriku a jsou v interakci s oscilacemi jeho mřížky, popř. v interakci mezi sebou. Pokud na dielektrikum působí silné elektrické pole, získají elektrony více energie a mohou vyrazet elektrony z dielektrického pásu. Takto vyražené elektrony získají dostatek energie z elektrického pole a provádějí ionizaci. Následně může dojít k průrazu. Jedná se o obdobu Townsendovy teorie nárazové ionizace v plynech. Uvolněné elektrony mají snahu se pohybovat v poli uvnitř krystalu v určitých směrech. K čistě elektrickému průrazu dochází především při rázovém namáhání. [1]

2.2 Částečné výboje

Jsou to výboje, ke kterým dochází v plynech vyplněných dutinách pevného izolantu při elektrickém namáhání. Zvyšujeme-li střídavé napětí přiložené na takový objekt, objeví se v okolí určitého napětí v těchto dutinách výboje. Výboje v dutinách mají charakter drobných jiskrových nebo lavinových výbojů. Nejnižší napětí, při kterém vznikají tyto výboje, se nazývá počáteční napětí částečných výbojů. [1] [4]

Pokud dutinky v dielektriku obsahují kyslík, výboje vytvářejí ozón. Ten má intenzivní oxidační účinky a způsobuje chemickou destrukci materiálu. Spolu s ozónem se na chemické destrukci dielektrika podílejí i plyny vzniklé při rozkladu dielektrika při výbojích. Tato chemická destrukce vede k průrazu dielektrika. Na Obr.10 je znázorněn objekt s dutinou a náhradní schéma objektu s dutinou, kde C_1 je kapacita dutiny, C_2 je kapacita zdravého dielektrika v sérii s dutinou a C_3 kapacita zkoušence paralelně se sériovou kombinací C_1 , C_2 . Paralelně ke kapacitě C_1 je připojen odpor R , který v hrubém přiblížení zastupuje odpor cesty proudu výboj. Výboj v dutině je napodoben výbojem mezi koulemi jiskřiště. [1]



Obr. 10 Dutina v dielektriku a náhradní schéma [4]

2.2.1 Vliv částečných výbojů v dutinách dielektrika na elektrickou pevnost

Výboje v dielektriku mohou mít za následek elektrické, erozivní, chemické a tepelné účinky. [1]

-Elektrické účinky: Za předpokladu, že se v dutině vyvine oblouk, může se vytvořit vodivá dráha. Je možné, že nastane čistě elektrický průraz a v tomto místě se vytvoří vodivá dráha, která se šíří celým dielektrikem.

-Erozivní účinky: Výboje v dielektriku mohou vyvolat erozi na stěnách dutiny. Následně se může vyvinout mechanický průraz nebo čistě elektrický průraz.

-Chemické účinky: Vznikají při déle trvajícím elektrickém namáhání. Jak bylo uvedeno výše, produkty výbojů (ozón, vodík, oxid dusíku) mohou rozkládat určité množství dielektrika. Dochází k tomu především u organických materiálů. Produkty rozkladu mohou difundovat do pevného dielektrika a vytvářet vodivější oblasti.

-Tepelné účinky: Výboje mohou mít za následek tepelnou nestabilitu, protože ohřívají dielektrikum a tím klesá napětí tepelného průrazu.

2.3 Tepelný průraz

Překročí-li napětí na dielektriku určitou kritickou hodnotu a nenastaví se v něm tepelná rovnováha, vznikne vlivem nárůstu dielektrických ztrát tepelný průraz. Závislost měrných tepelných ztrát při určitém kmitočtu na oteplení a na intenzitě elektrického pole lze přibližně vyjádřit vztahem [1]

$$p_z = p_{01} E^2 e^{\alpha\theta} \quad (2.1)$$

kde p_{01} jsou měrné dielektrické ztráty pro jednotkovou intenzitu elektrického pole při teplotě okolí a za uvažovaného kmitočtu

E je efektivní hodnota intenzity elektrického pole

α teplotní činitel dielektrických ztrát

θ oteplení

S možností vzniku tepelného průrazu je třeba počítat při dlouhodobém namáhání dielektrika. Napětí tepelného průrazu se většinou stanovují pro zvýšenou teplotu okolí. V praxi by k tepelnému průrazu nemělo docházet při krátkodobém elektrickém namáhání. Jelikož dielektrické ztráty rostou s kmitočtem, je především u kondenzátorů, které se používají i při frekvenci řádově kHz, potřeba počítat s malým elektrickým namáháním. Napětí tepelného průrazu lze ovlivnit správnou volbou dielektrika. [1]

2.4 Rozhraní vzduch - pevný izolant

2.4.1 Rozhraní vzduchu a izolantu je vodorovné se silovými čarami

Zvyšuje-li se napětí mezi elektrodami, vyvine se na povrchu pevného dielektrika přeskok. Pole zůstává na obou stranách rozhraní homogenní. I přes to je přeskokové napětí zlomkem

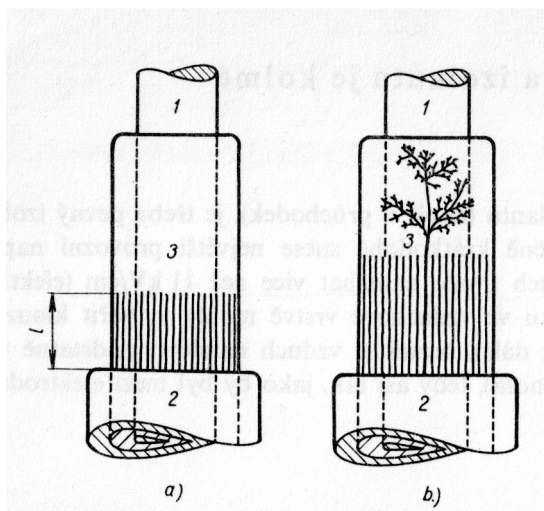
přeskokového napětí mezi stejnými elektrodami ve vzduchu. Při rázovém napětí a při vysokém kmitočtu je tento rozdíl menší ve srovnání s působením dlouhodobě působícího stejnosměrného napětí nebo střídavého napětí průmyslového kmitočtu. Na přeskokové napětí má vliv vlhkost absorbovaná izolantem. S rostoucí vlhkostí se přeskokové napětí blíží přeskokovému napětí mezi deskou a hrotem ve vzduchu při stejné vzdálenosti mezi elektrodami. Přeskokové napětí dále ovlivňují výboje v trhlinkách na povrchu izolantu a v místech nedokonalého přiléhání elektrod. [1]

2.4.2 Rozhraní vzduchu a izolantu je kolmé k silovým čarám

Je-li vzduch v pevném izolantu, je třeba pevný izolant dimenzovat tak, aby sám bezpečně krátkodobě snesl největší provozní napětí. Vzduch se trvale nesmí namáhat více než 11 kV/cm. [1]

2.4.3 Silové čáry vstupují do rozhraní vzduchu a izolantu šikmo

Toto uspořádání se vyskytuje v technické praxi u průchodek, kabelových koncovek, u výstupu vinutí z drážek, u kondenzátorů apod. Přestoupí-li zde střídavé nebo impulzní napětí mezi elektrodami určitou velikost, vznikají na povrchu pevného izolantu tzv. klouzavé výboje. Délka klouzavých výbojů je zde mnohem větší, než délka výboje podél dielektrika, při němž siločáry jsou rovnoběžné s povrchem dielektrika. [1]



Obr. 11 Klouzavé výboje na průchodce [1]

Na Obr.11 si můžeme vysvětlit vznik klouzavých výbojů na průchodce ve vzduchu. Při zvyšování napětí mezi svorníkem (1) a objímkou (2) se objeví při určitém napětí souvislý výbojový prsten. Jedná se o směs korónového a trsového výboje. Napětí, při kterém se objeví tento prsten označujeme počáteční napětí koróny. Při dalším zvyšování napětí se výboj šíří po povrchu izolační trubky (3) ve tvaru paralelních světélkujících vláken. Výboj vytvoří pás,

jehož okraj leží v rovině rovnoběžné s rovinou okraje objímky. Podle toho se nazývá pásový výboj. Při dalším zvyšování napětí přestoupí napětí určitou kritickou mez. Vláčna pásového výboje se začínají prodlužovat a některá vytvářejí jemně rozvětvený stvol. Toto kritické napětí nazýváme kritické napětí klouzavých stvolů U_{st} . Dalším zvyšováním napětí přecházejí výboje v klouzavé jiskry. [1]

2.5 Vybrané pevné izolanty používané v technice vysokých napětí

Anorganické materiály

-Sklo: $E_p=16$ kV/mm Je to silně polární látka s malou povrchovou rezistivitou a vysokou elektrickou pevností. [6]

-Porcelán: $E_p=30$ kV/mm Je to druh silikátové keramiky. Používá se na výrobu izolátorů pro elektrická vedení, průchodek transformátorů a kabelových koncovek[6]

-Azbest: Je to vláknitý silikátový minerál, odolný proti vysokým teplotám, oxidaci, korozi a chemikáliím. Je zdravotně závadný. Použití: ve formě desek jako dělící stěny v rozvodnách. Ve formě papíru jako mezizávitová izolace a ve formě lepenky jako vnitřní izolace krytů vypínačů. [6]

Organické materiály

-Papír: $E_p=6$ kV/mm Vlastnosti papíru jsou závislé na teplotě a vlhkosti. Po naimpregnování se jeho elektrická pevnost zvýší asi 10 krát. [6]

Syntetické polymery

-Polyetylen: $E_p=20$ kV/mm. Má vynikající dielektrické vlastnosti. Dobře se opracovává. [6]

-Polystyrén: $E_p=100$ kV/mm. Stejně jako polyetylen má dobré dielektrické vlastnosti a dobře se opracovává. [6]

3 Měření tlakové závislosti průrazného napětí plynného izolantu

3.1 Zkoušky rázovým napětím

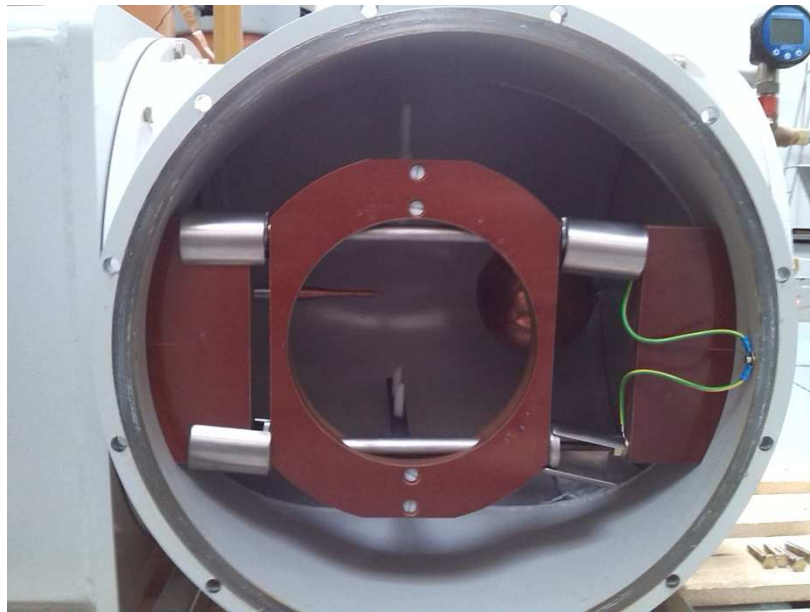
Měření bylo orientováno na zkoušky průrazného rázového napětí technického vzduchu (5 % kyslíku, 95 % dusíku) v závislosti na tlaku plynu a vzdálenosti elektrod v uzavřené tlakové nádobě. Měřilo se při tlaku $p=1$ bar, 1,5 bar, 2 bar a 2,5 bar a vzdálenostech elektrod $l=40$ mm, 60 mm, 90 mm a 115 mm. Při nastavení jedné hodnoty tlaku se postupně odměřila závislost průrazného napětí pro všechny 4 hodnoty doskoku. Poté byl plyn z nádoby (Obr. 12) pomocí vývěvy odčerpán a následně z tlakové lahve doplněn na nový požadovaný tlak. Zdrojem rázového napětí byl rázový generátor HAEFELY (Obr. 14) umístěný v halové laboratoři katedry elektroenergetiky a ekologie.

Jedná se o osmistupňový generátor HAEFELY (Obr.14), který je zdrojem atmosférických impulzů tvaru 1,2/50 μ s o maximální amplitudě 600 kV a energii 4 kJ nebo tvaru 250/2500 μ s při amplitudě do 480 kV a energii 4 kJ. [7]

Nabíjecí kapacity všech osmi stupňů jsou schovány uvnitř centrálního válce. Z vnějšku válce jsou osazena spouštěcí jiskřiště, nabíjecí odpory a tvarovací odpory. Úzký válec v popředí je zatěžovací kapacita. [7]



Obr. 12 Pohled na tlakovou nádobu



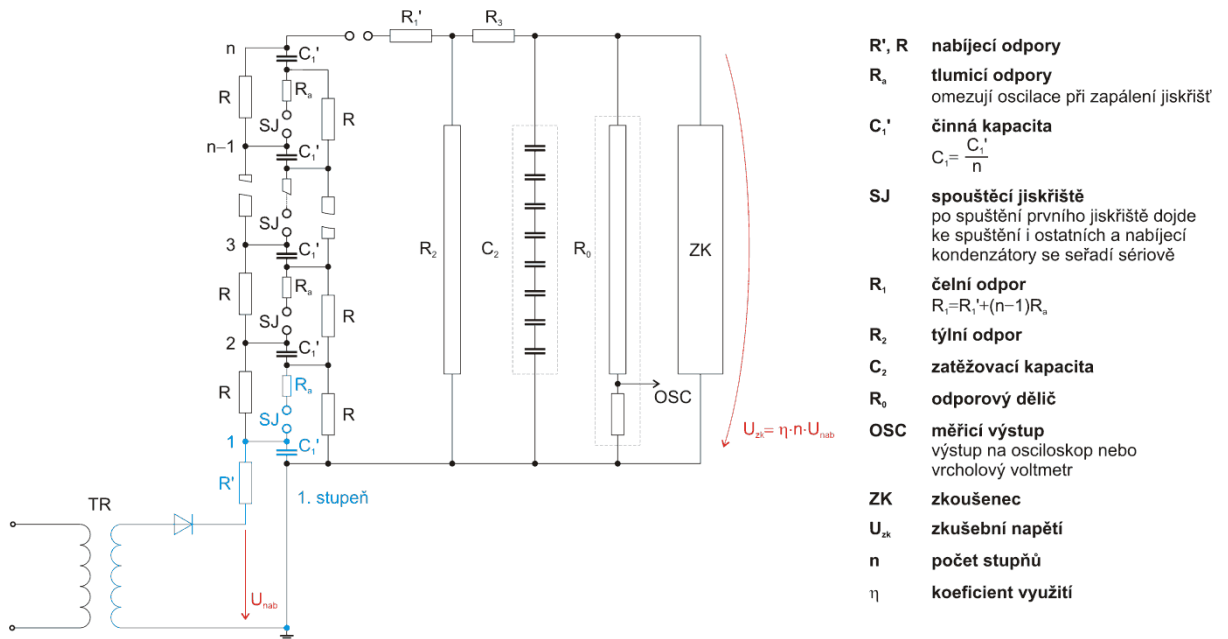
Obr. 13 Vnitřní uspořádání tlakové nádoby



Obr. 14 Rázový generátor HAEFELY

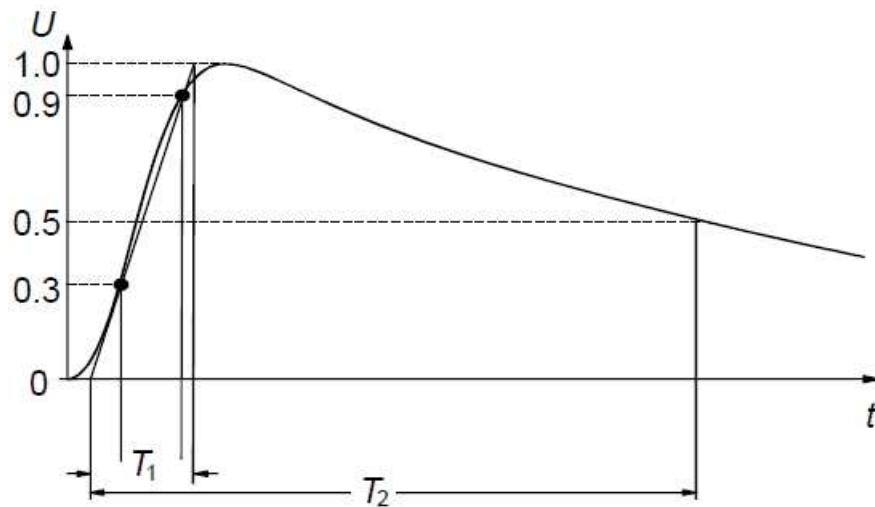
Jednotlivé stupně je možné řadit do sério-paralelních změnou rozmístění kovových spojek. Tím lze zvyšovat energii. To se děje na úkor nižšího výstupního napětí. [7]

Na Obr. 15 je schéma rázového generátoru HAEFELY.



Obr. 15 Schéma rázového generátoru HAEFELY[8]

Produktem rázového generátoru je rázová vlna. Na Obr. 16 je znázorněna plná rázová vlna napětí. Na obrázku jsou uvedeny parametry určující tvar rázové vlny. Těmito parametry jsou čas T_1 - doba čela vlny, čas T_2 - doba půltýlu a vrcholová hodnota napětí vlny. Při měření byla použita rázová vlna 1,2/50 μ s.



Obr. 16 Plná rázová vlna [9]

Dalším přístrojovým vybavením laboratoře, které jsme využili pro měření byl digitální multimetr, kterým jsme sledovali velikost nabíjecího napětí rázového generátoru. Dále vrcholový voltmetr, kterým jsme měřili vrcholovou hodnotu napětí rázové vlny. Dalším zařízením, které bylo použito pro měření, byl digitální osciloskop, kterým jsme sledovali tvar vlny a podle toho jsme vyhodnotili, zda došlo k přeskoku nebo ne. Při přeskoku se totiž na stínítku osciloskopu nevykreslí celá rázová vlna ale pouze tzv. kusá vlna.

3.1.1 Zadání měřicí úlohy

V požadavcích na měření průrazného napětí v závislosti na tlaku plynu a vzdálenosti elektrod bylo uvedeno:

- 1) Tlak plynu $p=1$ bar, 1,5 bar, 2 bar, 2,5 bar
- 2) Vzdálenost elektrod $l=40$ mm, 60 mm, 90 mm, 115 mm.
- 3) Pro jednu kombinaci tlaku plynu a vzdálenosti elektrod uskutečnit 25 měření při zvolené 1 hodnotě vrcholového napětí.
- 4) Vrcholové napětí po provedení série 25 měření pro zvolenou kombinaci tlaku plynu a vzdálenosti elektrod navýšit o 5 kV.
- 4) Začít měření s takovou hodnotou vrcholového napětí, aby nedocházelo k žádnému přeskoku.
- 5) Čekací doba mezi jednotlivými měřeními přibližně 60 sekund.
- 6) Není potřeba dále zvyšovat vrcholové napětí, pokud při měření na předešlé hodnotě vrcholového napětí rázové vlny došlo k 18 a více přeskokům.

Měření bylo prováděno na elektrodě s poloměrem 7,5 cm a hrotové elektrodě s poloměrem hrotu 0,5 mm. Na hrotovou elektrodu byl přiváděn rázový impuls, kuloová elektroda byla uzemněna.

3.1.2 Naměřené a dopočítané hodnoty

Z naměřených a dopočítaných hodnot lze sestavit S křivky, s jejichž pomocí lze určit polovinové přeskokové napětí U_{p50} . Polovinové napětí je takové, při kterém je četnost přeskoků 50 %.

Tab. 3.1 Naměřené hodnoty, $p=1$ bar, $l=40$ mm

LI 37	$p=1$ bar, $l=40$ mm	
U_p [kV]	počet přeskoků d [-]	četnost přeskoků h [%]
35	0	0
40	0	0
45	12	48
50	24	96

Tab. 3.2 Naměřené hodnoty, p=1 bar, l= 60 mm

LI 38	p=1 bar, l= 60 mm	
U_p [kV]	počet přeskoků d [-]	četnost přeskoků h [%]
50	0	0
55	0	0
60	1	4
65	8	32
70	17	68
75	24	96

Tab. 3.3 Naměřené hodnoty, p=1 bar, l= 90 mm

LI 39	p=1 bar, l= 90 mm	
U_p [kV]	počet přeskoků d [-]	četnost přeskoků h [%]
75	0	0
80	0	0
85	1	4
90	7	28
95	13	52
100	23	92

Tab. 3.4 Naměřené hodnoty, p= 1 bar, l= 115 mm

LI 40	p=1 bar, l= 115 mm	
U_p [kV]	počet přeskoků d [-]	četnost přeskoků h [%]
90	0	0
95	0	0
100	0	0
105	3	12
110	7	28
115	19	76

Tab. 3.5 Naměřené hodnoty, p= 1,5 bar, l= 40 mm

LI 44	p=1,5 bar, l= 40 mm	
U_p [kV]	počet přeskoků d [-]	četnost přeskoků h [%]
50	0	0
55	0	0
60	13	52
65	20	80

Tab. 3.6 Naměřené hodnoty, p= 1,5 bar, l= 60 mm

LI 43	p=1,5 bar, l= 60 mm	
U _p [kV]	počet přeskoků d [-]	četnost přeskoků h [%]
70	0	0
75	1	4
80	4	16
85	13	52
90	20	80

Tab. 3.7 Naměřené hodnoty, p= 1,5 bar, l= 90 mm

LI 42	p=1,5 bar, l= 90 mm	
U _p [kV]	počet přeskoků d [-]	četnost přeskoků h [%]
100	0	0
105	0	0
110	2	8
115	6	24
120	20	80

Tab. 3.8 Naměřené hodnoty, p= 1,5 bar, l= 115 mm

LI 41	p=1,5 bar, l= 115 mm	
U _p [kV]	počet přeskoků d [-]	četnost přeskoků h [%]
100	0	0
105	0	0
110	0	0
115	0	0
120	0	0
125	3	12
130	5	20
135	19	76

Tab. 3.9 Naměřené hodnoty, p= 2 bar, l= 40 mm

LI 45	p=2 bar, l= 40 mm	
U _p [kV]	počet přeskoků d [-]	četnost přeskoků h [%]
60	0	0
65	0	0
70	1	4
75	8	32
80	17	68
85	24	96

Tab. 3.10 Naměřené hodnoty, p= 2 bar, l= 60 mm

LI 46	p=2 bar, l= 60 mm	
U_p [kV]	počet přeskoků d [-]	četnost přeskoků h [%]
80	0	0
85	0	0
90	1	4
95	2	8
100	5	20
105	10	40
110	23	92

Tab. 3.11 Naměřené hodnoty, p= 2 bar, l= 90 mm

LI 53	p=2 bar, l= 90 mm	
U_p [kV]	počet přeskoků d [-]	četnost přeskoků h [%]
100	0	0
105	0	0
110	0	0
115	0	0
120	1	4
125	11	44
130	12	48
135	24	96

Tab. 3.12 Naměřené hodnoty, p= 2 bar, l= 115 mm

LI 48	p=2 bar, l= 115 mm	
U_p [kV]	počet přeskoků d [-]	četnost přeskoků h [%]
130	0	0
135	0	0
140	1	4
145	11	44
150	23	92

Tab. 3.13 Naměřené hodnoty, $p=2,5$ bar, $l=40$ mm

LI 49	$p=2,5$ bar, $l=40$ mm	
U_p [kV]	počet přeskoků d [-]	četnost přeskoků h [%]
75	0	0
80	3	12
85	11	44
90	22	88

Tab. 3.14 Naměřené hodnoty, $p=2,5$ bar, $l=60$ mm

LI 50	$p=2,5$ bar, $l=60$ mm	
U_p [kV]	počet přeskoků d [-]	četnost přeskoků h [%]
90	0	0
95	0	0
100	0	0
105	0	0
110	1	4
115	3	12
120	23	92

Tab. 3.15 Naměřené hodnoty, $p=2,5$ bar, $l=90$ mm

LI 51	$p=2,5$ bar, $l=90$ mm	
U_p [kV]	počet přeskoků d [-]	četnost přeskoků h [%]
130	0	0
135	1	4
140	5	20
145	10	40
150	18	72

Tab. 3.16 Naměřené hodnoty, $p=2,5$ bar, $l=115$ mm

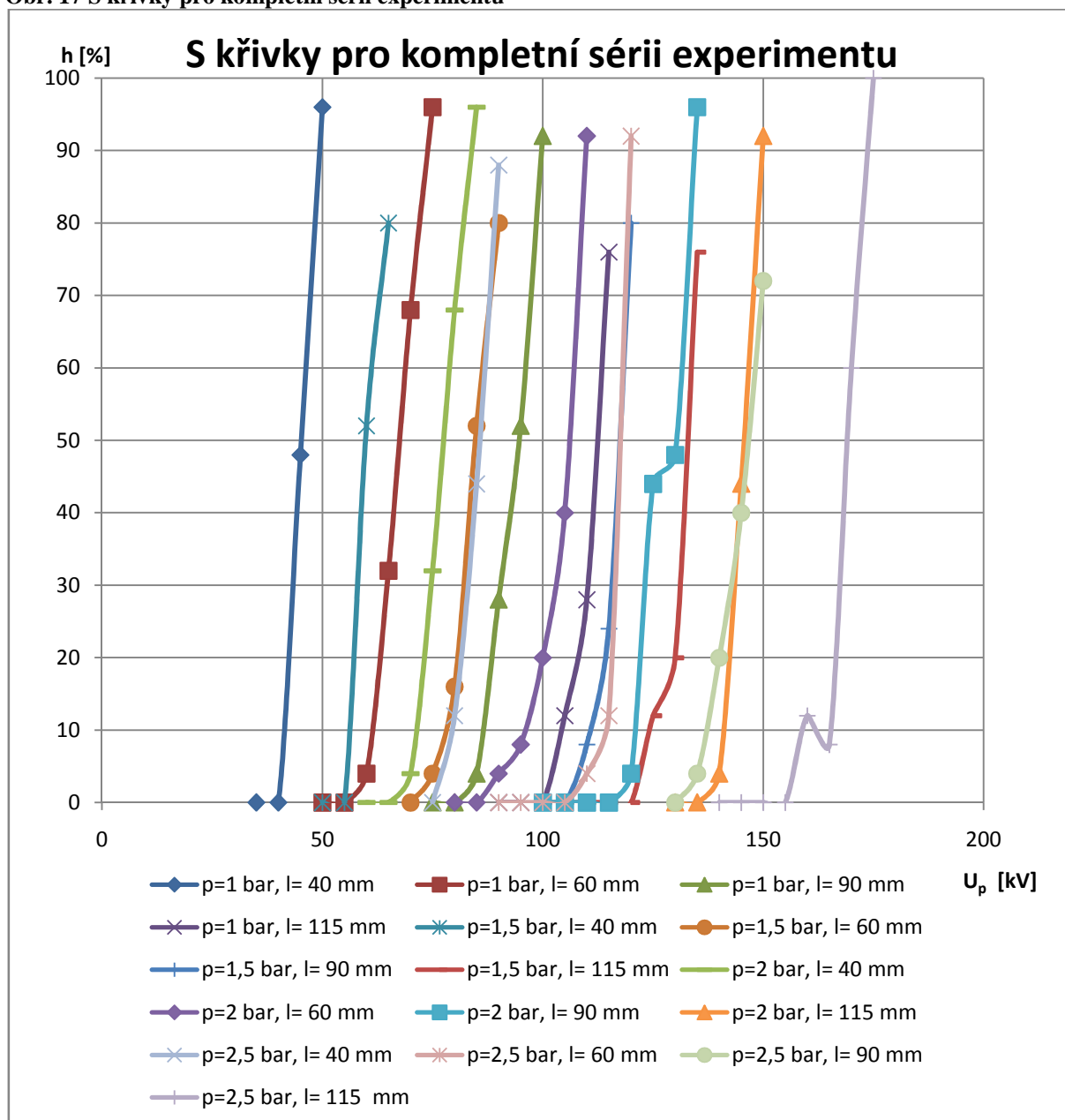
LI 52	$p=2,5$ bar, $l=115$ mm	
U_p [kV]	počet přeskoků d [-]	četnost přeskoků h [%]
140	0	0
145	0	0
150	0	0
155	0	0
160	3	12
165	2	8
170	15	60
175	25	100

Příklad výpočtu četnosti přeskoků h :

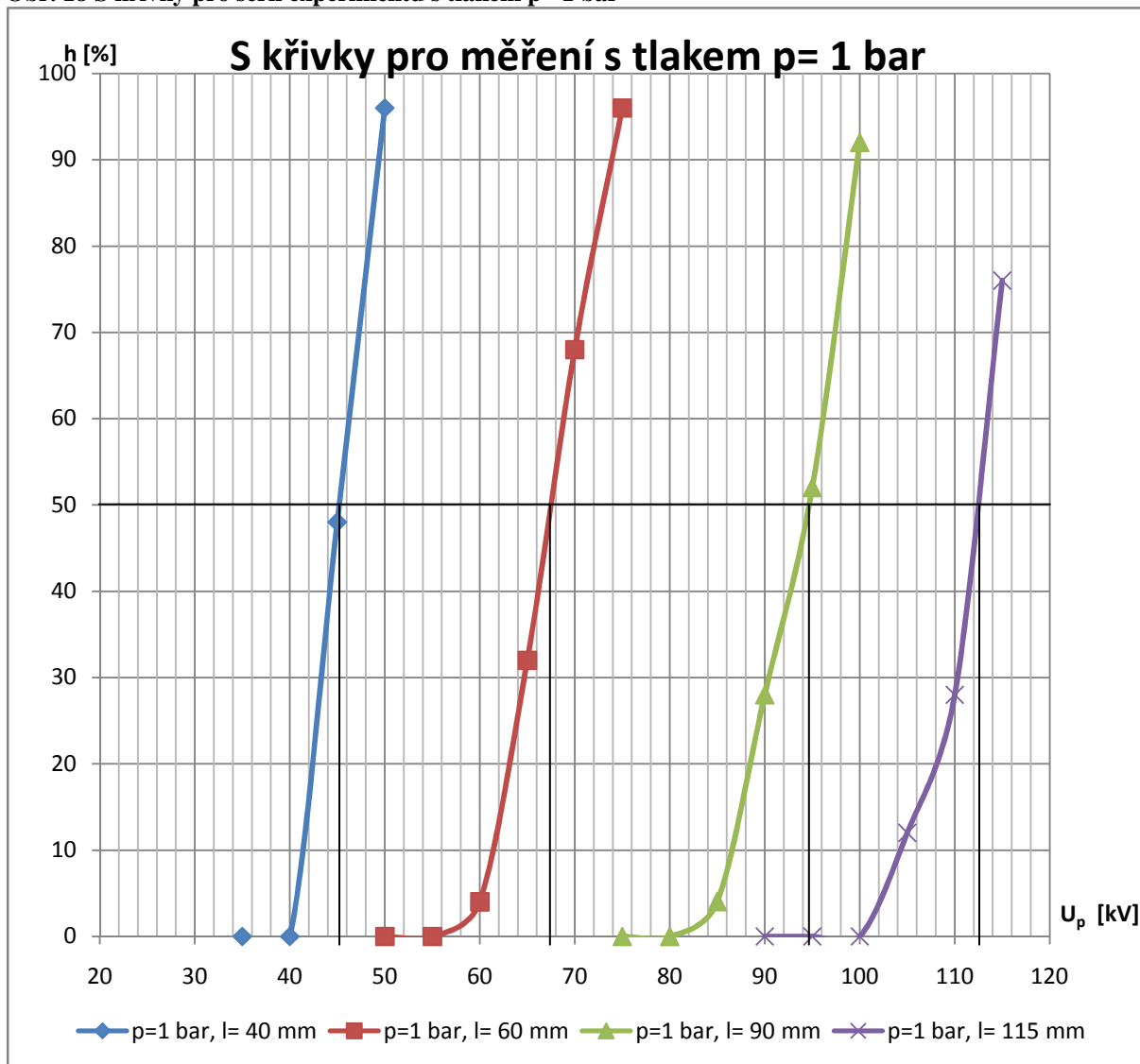
$$n = 25$$

$$h = \frac{d}{n} = \frac{12}{25} = 0,48 = 48\% \quad (3.1)$$

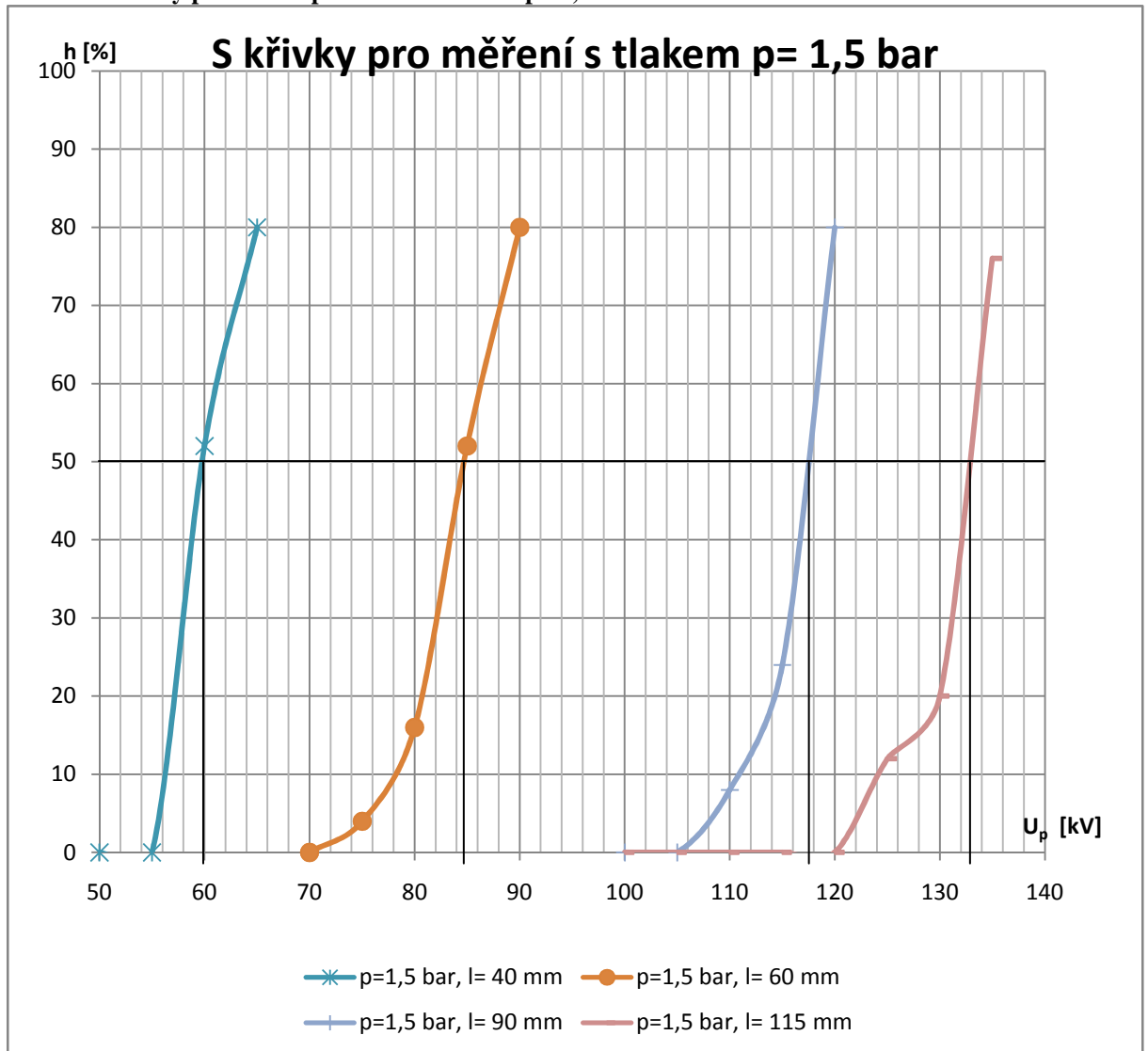
Obr. 17 S křivky pro kompletní sérii experimentu



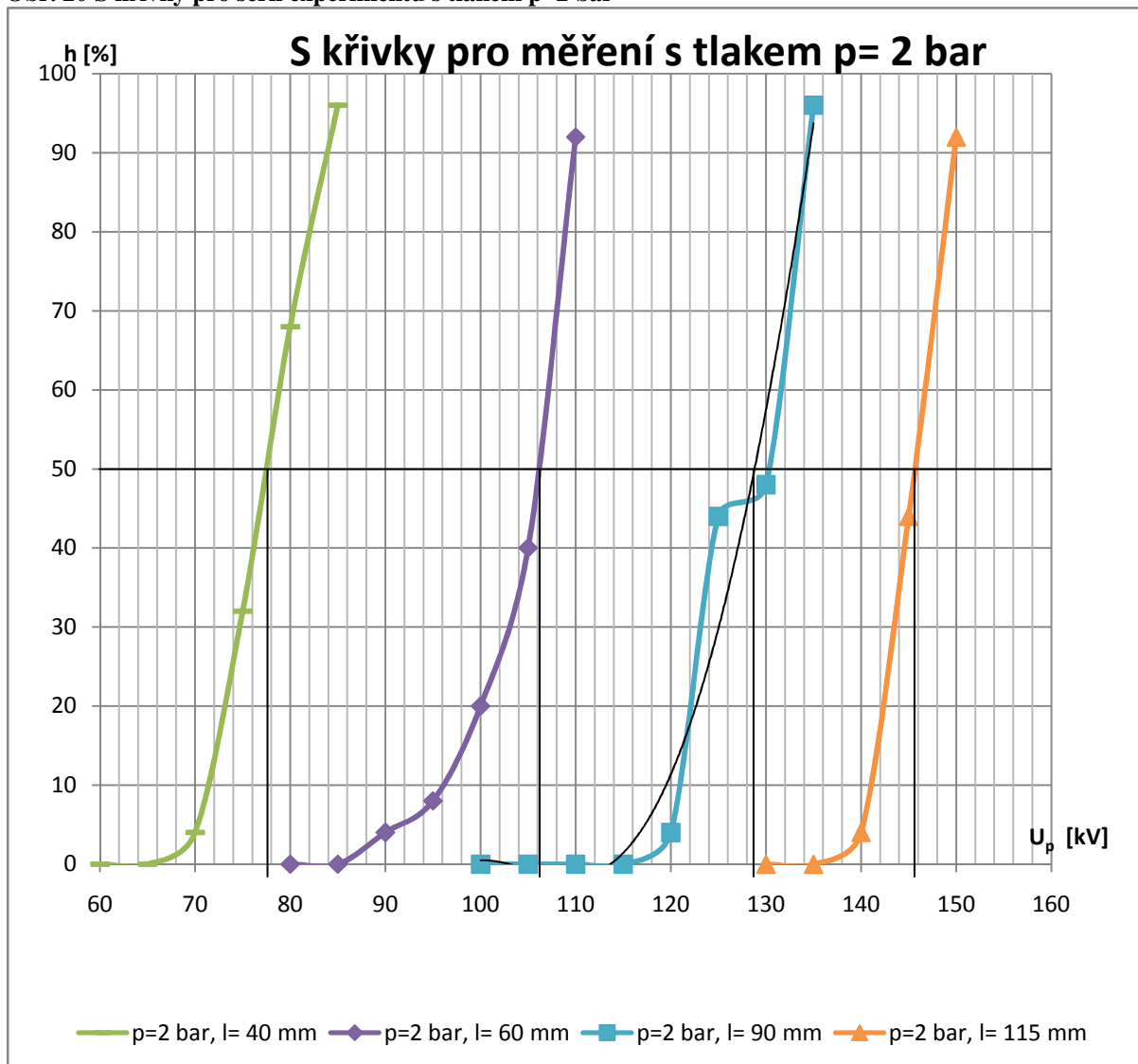
Z důvodu přesnějšího odečtení polovinového přeskokového napětí jsem dále sestrojil grafy, ve kterých jsou zobrazeny S křivky pro sérii měření se stejným tlakem.

Obr. 18 S křivky pro sérii experimentu s tlakem $p=1$ barTab. 3.17 Odečtené polovinové napětí pro S křivky při $p=1$ bar

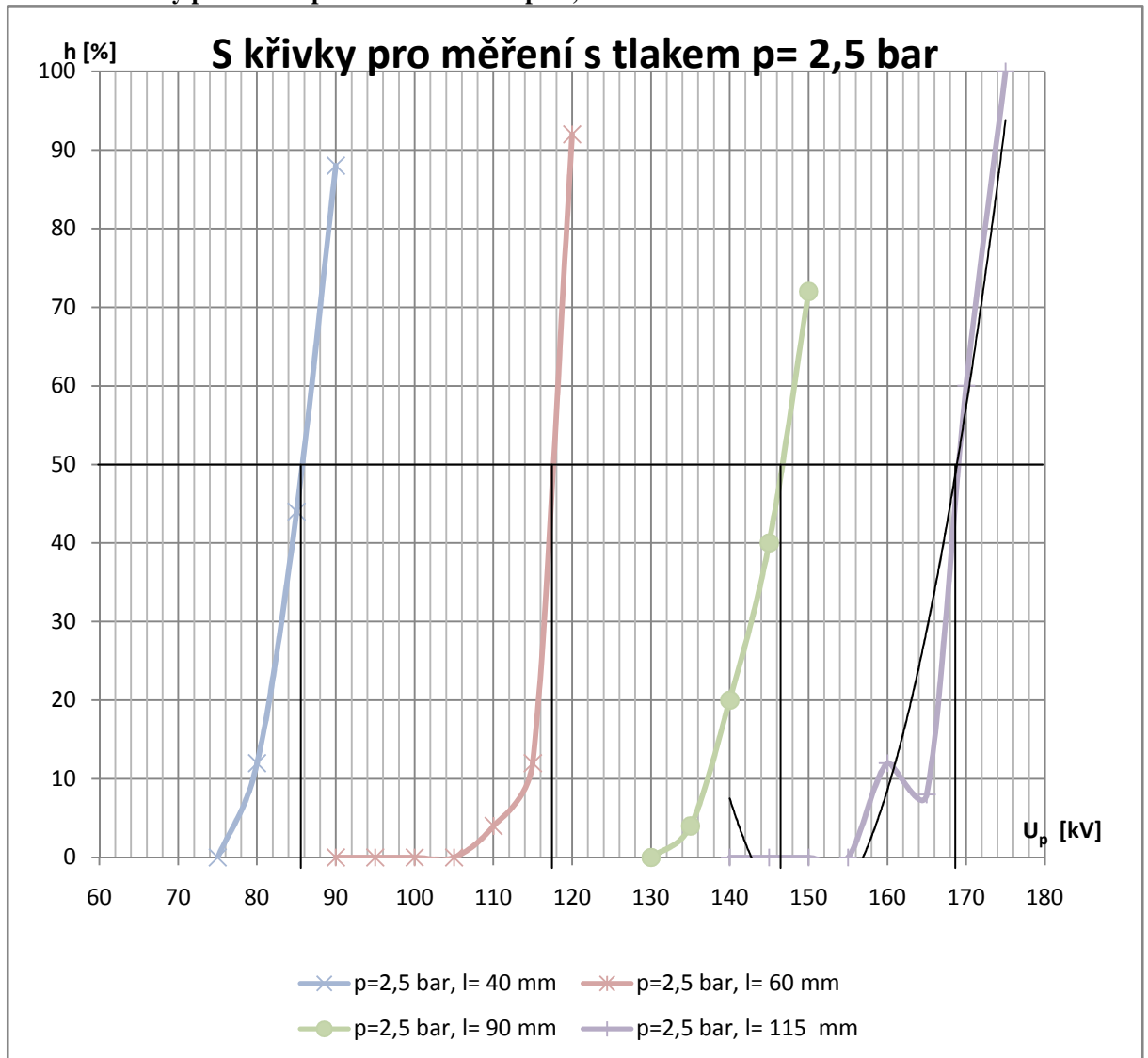
$p=1$ bar	
l [mm]	U_{p50} [kV]
40	55
60	67,5
90	94,5
115	112,5

Obr. 19 S křivky pro sérii experimentu s tlakem $p=1,5$ barTab. 3.18 Odečtené polovinové napětí pro S křivky při $p=1,5$ bar

p= 1,5 bar	
l [mm]	U_{p50} [kV]
40	60
60	81
90	117,5
115	133

Obr. 20 S křivky pro sérii experimentu s tlakem $p=2$ barTab. 3.19 Odečtené polovinové napětí pro S křivky při $p=2$ bar

p=2 bar	
l [mm]	U_{p50} [kV]
40	77,5
60	106
90	129
115	146

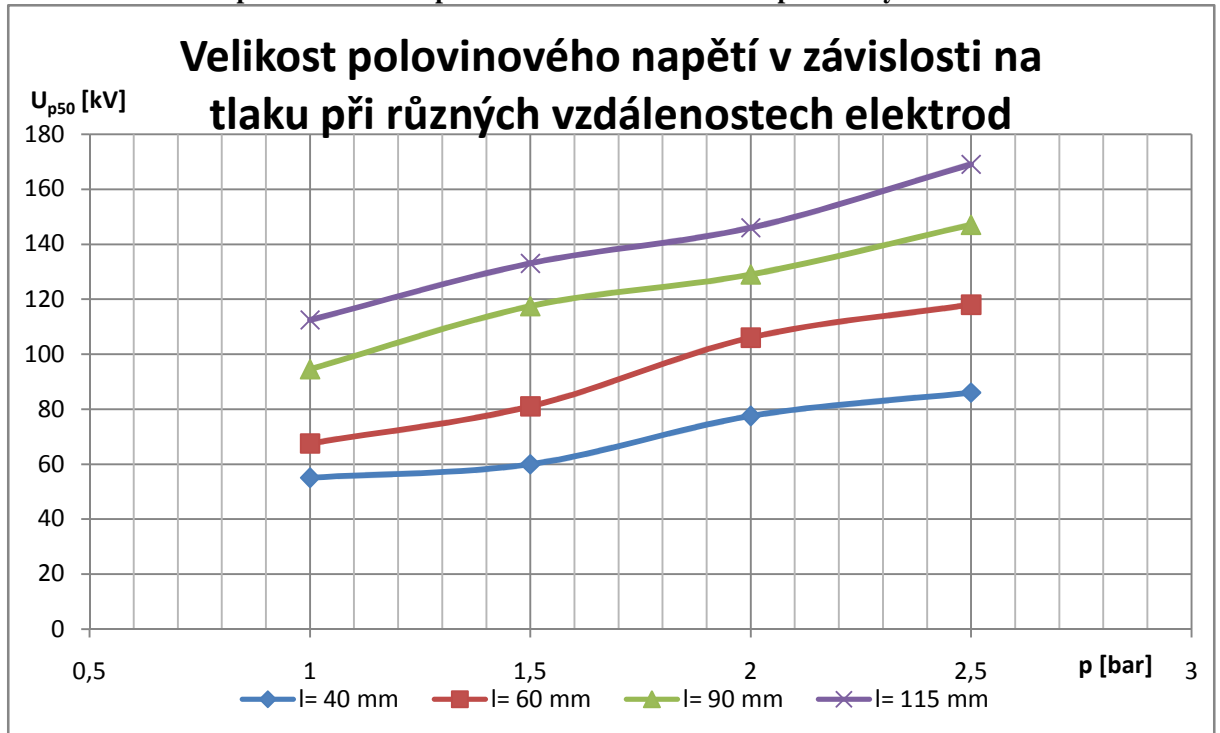
Obr. 21 S křivky pro sérii experimentu s tlakem $p=2,5$ barTab. 3.20 Odečtené polovinové napětí pro S křivky při $p=2,5$ bar

p= 2,5 bar	
l [mm]	U _{p50} [kV]
40	86
60	118
90	147
115	169

Tab. 3.21 Velikost polovinového napětí v závislosti na tlaku

	l= 40 mm	l= 60 mm	l= 90 mm	l= 115 mm
p [bar]	U_{p50} [kV]	U_{p50} [kV]	U_{p50} [kV]	U_{p50} [kV]
1	55	67,5	94,5	112,5
1,5	60	81	117,5	133
2	77,5	106	129	146
2,5	86	118	147	169

Obr. 22 Velikost polovinového napětí v závislosti na tlaku při různých vzdálenostech elektrod



3.2 Zkoušky střídavým napětím

Hodnoty, se kterými je pracováno v této kapitole, mi byly dodány vedoucím práce za účelem porovnání přeskokového napětí získané zkouškami rázovým a střídavým napětím.

Při měření přeskokového střídavého napětí byly použity stejné hodnoty tlaku, vzdálenosti elektrod a stejné izolační médium. Pro jednu kombinaci tlaku plynu a vzdálenosti elektrod bylo změřeno 20 hodnot vrcholového přeskokového střídavého napětí z nichž je dopočítána průměrná hodnota napětí.

3.2.1 Naměřené a dopočítané hodnoty

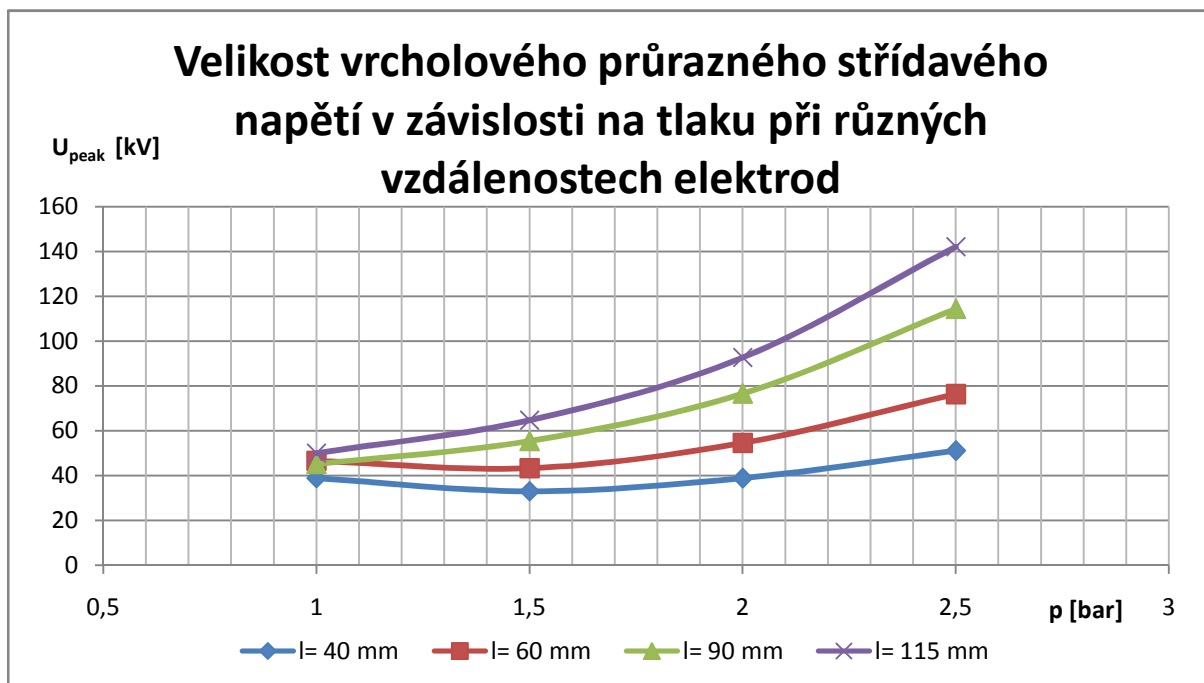
Tab. 3.22 Naměřené hodnoty vrcholového přeskokového střídavého napětí

p [bar]	l [mm]	U_{peak} [kV]
1	40	39,8
1	60	46,6
1	90	45,2
1	115	50
1,5	40	33
1,5	60	43,4
1,5	90	55,5
1,5	115	64,7
2	40	38,8
2	60	54,6
2	90	76,5
2	115	92,7
2,5	40	51,1
2,5	60	76,4
2,5	90	114,4
2,5	115	142,2

Obr. 23 Velikost střídavého přeskovového napětí



Obr. 24 Velikost vrcholového průrazného střídavého napětí v závislosti na tlaku při různých vzdálenostech elektrod



4 Závěr

V první kapitole jsem popsal problematiku výbojů a elektrické pevnosti plyných látek v homogenním i nehomogenním elektrickém poli. Dále jsem zde uvedl typy výbojů, se kterými se můžeme setkat v technice vysokých napětí. Uvádím zde některé vybrané plynné materiály, které se používají jako izolanty.

Ve druhé kapitole jsem se věnoval problematice výbojů a elektrické pevnosti pevných látek. V této kapitole jsem se dále věnoval i pochodům na rozhraní plyných a pevných izolantů a uvedl jsem některé zástupce pevných dielektrik.

Ve třetí, poslední kapitole, jsem popsal měření za účelem zjištění tlakové závislosti průrazného napětí plynného izolantu namáhaného rázovým i střídavým napětím. Výsledky z těchto měření jsem zpracoval jak graficky, tak početně. U výsledků zkoušek střídavým napětím je důležité věnovat pozornost grafu na Obr. 24. Při vzdálenostech elektrod 40 mm a 60 mm zde došlo v oblasti tlaku 1,5 bar k poklesu přeskokového napětí.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] VEVERKA, Antonín. *Technika vysokých napětí*. Praha: SNTL, 1978.
- [2] *Plynová izolace*. [cit. 2014-04-02]. [online] Dostupné z: https://courseware.zcu.cz/wps/PA_Courseware/DownloadDokumentu?id=42084.
- [3] *Měření elektrické pevnosti vzduchu v silně nehomogenním poli. Vliv polarity; vliv bariéry*. [cit. 2014-04-10]. [online] Dostupné z: https://courseware.zcu.cz/wps/PA_Courseware/DownloadDokumentu?id=18888.
- [4] *Měření částečných výbojů*. [cit. 2014-04-12]. [online] Dostupné z: https://courseware.zcu.cz/wps/PA_Courseware/DownloadDokumentu?id=18891.
- [5] *Výboje na klouzavém uspořádání*. [cit. 2014-04-12]. [online] Dostupné z: https://courseware.zcu.cz/wps/PA_Courseware/DownloadDokumentu?id=18889.
- [6] KUČEROVÁ, Eva. *Elektrotechnické materiály*. 1. vyd. V Plzni: Západočeská univerzita, 2002, 174 s. ISBN 80-708-2940-0.
- [7] Zařízení laboratoří VN. [online]. [cit. 2014-05-06]. Dostupné z: <http://home.zcu.cz/~laurenc/razak.php>.
- [8] *Schéma rázového generátoru*. [online]. [cit. 2014-05-06]. Dostupné z: <http://home.zcu.cz/~laurenc/images/razak-schema-velky.gif>.
- [9] *Vznik (výroba) vysokého napětí*. [online]. [cit. 2014-05-06]. Dostupné z: https://courseware.zcu.cz/wps/PA_Courseware/DownloadDokumentu?id=42082.

Přílohy

Příloha 1 - Záznam měření rázovým napětím, $p=1 \text{ bar}$, $l=40 \text{ mm}$

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	60 number	
50	0	X	X																								
35	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
45	X	X	0	0	X	X	X	0	X	X	X	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	X	X	X	0	12
50	X	X	X	X	X	X	X	0	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	24
0																											

Příloha 2 - Záznam měření rázovým napětím, p= 1 bar, l= 60 mm

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	BO number
50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
55	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
60	x	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
65	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	x	x	x	x	0	x	0	x	0	x	0	x	0	x	0	8
70	x	x	x	x	0	x	0	x	0	0	x	x	x	0	x	0	x	0	x	x	x	x	0	x	x	17
75	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	0	y	y	y	y	y	y	24

0 Withstand
x Breakdown

Příloha 3 - Záznam měření rázovým napětím, p= 1 bar, l= 90 mm

U (kJ)	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	BD number
75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
80	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
85	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0	0	1
90	0	0	0	0	0	X	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	X	X	0	0	0	X	X	0	7
95	X	X	X	0	0	0	X	X	X	X	0	X	0	0	0	X	0	0	X	0	0	X	X	X	0	13
100	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	0	X	0	X	X	X	X	23

0 Withstand
X Breakdown

Příloha 4 - Záznam měření rázovým napětím, p= 1 bar, l= 115 mm

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	BD number	
90	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
95	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
105	0	0	X	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3
110	0	0	0	0	X	0	0	0	X	0	0	0	0	0	0	X	0	0	X	0	0	0	X	X	X	X	7
115	0	X	X	X	X	X	X	0	0	0	X	0	X	X	X	X	X	X	X	X	X	0	X	X	X	X	19

0 Withstand
X Breakdown

Příloha 5 - Záznam měření rázovým napětím, p= 1,5 bar, l= 40 mm

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	60 number	
50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
55	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
60	0	0	X	0	X	X	X	0	0	X	0	X	X	X	X	X	X	0	0	X	0	X	0	0	0	0	13
65	X	X	X	X	0	0	X	X	X	X	X	0	X	X	0	X	X	X	X	X	X	X	X	0	0	X	20

0 Withstand
 X Breakdown

Příloha 6 - Záznam měření rázovým napětím, p= 1,5 bar, l= 60 mm

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	60 number
70	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
75	0	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
80	0	0	0	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0	0	0	0	0	X	X	0	0	0	4
85	0	0	X	0	X	X	0	X	X	X	X	0	0	0	X	X	X	0	0	X	0	X	X	0	0	13
90	X	X	X	X	0	X	0	X	X	X	X	X	X	0	X	0	X	X	X	X	X	0	X	X	X	20
0	withstand																									
X	Breakdown																									

Příloha 7 - Záznam měření rázovým napětím, p= 1,5 bar, l= 90 mm

	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	SD number
100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
105	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
110	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0	0	0	0	0	0	0	X	0	0	0	0	0	0	0	2
115	0	X	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0	0	0	0	0	X	0	0	0	0	0	X	X	0	6
120	X	X	0	X	X	X	X	X	X	X	0	X	X	X	X	X	X	X	X	0	0	X	0	X	X	20
0	withstand																									
X	Breakdown																									

Příloha 8 - Záznam měření rázovým napětím, $p=1,5$ bar, $l=115$ mm

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	BO number
100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
105	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
110	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
115	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
120	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
125	0	0	X	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0	3
130	X	0	X	0	0	0	0	X	0	0	0	X	0	0	0	0	0	X	0	0	0	0	0	0	0	5
135	X	X	0	0	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	0	0	0	0	19
0																										

0 Withstand
X Breakdown

Příloha 9 - Záznam měření rázovým napětím, p= 2 bar, l= 40 mm

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	ED number
60	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
65	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
70	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0	0	0	0	0	0	0	1
75	X	0	X	X	0	0	0	0	0	0	0	X	0	0	0	0	0	X	X	X	X	0	0	X	0	8
80	0	X	0	X	X	X	X	X	0	X	0	0	X	0	X	X	X	X	X	X	X	X	X	0	0	17
85	X	X	X	0	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	24

0 Withstand
 X Breakdown

Příloha 10 - Záznam měření rázovým napětím, p= 2 bar, l= 60 mm

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	BD number
80	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
85	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
90	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	x	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
95	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	x	0	0	0	0	0	0	x	0	0	0	0	0	0	0	2
100	0	0	x	x	0	0	0	x	0	0	x	0	0	0	0	0	x	0	0	0	0	0	0	0	0	5
105	0	0	0	0	0	0	x	x	x	x	x	0	0	x	0	0	0	0	0	x	0	0	x	x	x	10
110	x	x	x	x	x	x	x	x	0	x	x	x	x	x	x	x	0	x	x	x	x	x	x	x	x	23

0 withstand
x Breakdown

Příloha 11 - Záznam měření rázovým napětím, p= 2 bar, l= 90 mm

U(V)	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	BD number	
100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
105	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
110	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
115	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
120	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
125	0	0	X	X	0	0	X	0	X	0	0	0	0	X	X	0	0	0	0	X	X	X	X	X	0	11	
130	X	0	0	0	0	X	0	0	X	X	X	0	0	0	0	0	X	0	0	X	X	X	X	X	X	12	
135	X	X	0	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	24
0																											
X																											

Příloha 12 - Záznam měření rázovým napětím, p= 2 bar, l= 115 mm

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	BD number	
130	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
135	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
140	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
145	0	0	X	X	X	X	0	0	0	0	0	0	0	X	0	0	0	X	X	X	X	X	X	0	0	11	
150	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	0	X	X	X	X	X	X	X	0	X	X	X	X	X	23	

0 Withstand
X Breakdown

Příloha 13 - Záznam měření rázovým napětím, p= 2,5 bar, l= 40 mm

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	BO number	
80	0	0	0	0	0	0	0	X																			
75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
80	0	0	X	0	0	0	0	0	X	0	0	0	0	0	0	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3
85	X	X	X	X	0	0	0	0	0	X	X	0	0	0	X	X	X	0	0	X	0	0	0	X	0	0	11
90	X	X	0	0	X	X	X	X	0	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	22

0 withstand
 X Breakdown

Příloha 14 - Záznam měření rázovým napětím, p= 2,5 bar, l= 60 mm

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	50 number
90	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
95	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
105	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
110	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0	0	0	0	0	0
115	X	0	0	0	0	X	0	0	0	0	0	0	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
120	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	0	0	X	X	X	X	X	X	X

0 Withstand

X Breakdown

Příloha 15 - Záznam měření rázovým napětím, $p= 2,5 \text{ bar}$, $l= 90 \text{ mm}$

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	BO number
130	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
135	0	x	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
140	0	0	0	0	0	0	0	x	x	0	0	0	0	0	0	0	x	0	0	0	x	0	0	0	x	5
145	0	0	0	0	0	x	x	0	0	0	0	0	0	x	0	x	x	x	x	x	0	x	0	x	0	10
150	0	x	0	x	0	x	x	0	x	0	0	0	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	15

0 withstand
x Breakdown

Příloha 16 - Záznam měření rázovým napětím, p= 2,5 bar, l= 115 mm

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	EO number
150	0	0	0	0	0	0	0	0	X																	
145	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X																
140	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
145	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
150	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
155	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
160	0	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	X	3
165	X	0	0	0	0	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
170	X	0	X	X	0	0	X	0	0	0	X	0	X	X	X	X	X	X	0	X	X	0	X	X	X	15
175	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
0	withstand																									
X	Breakdown																									

Příloha 17 - Záznam měření střídavým napětím, p= 1 bar, l= 40 mm

Number of breakdown	Effective voltage on voltmeter (V)	Peak voltage (kV)
1	27,1	40,4
2	27,3	40,7
3	27,4	40,8
4	27,2	40,5
5	27,6	41,1
6	27,7	41,3
7	26,9	40,1
8	27,3	40,7
9	23,3	34,7
10	28,0	41,7
11	27,2	40,5
12	27,2	40,5
13	23,2	34,5
14	28,5	42,5
15	26,8	39,9
16	24,3	36,2
17	26,8	39,9
18	27,3	40,7
19	28,2	42,0
20	24,5	36,5
AVERAGE	26,7	39,8

Příloha 18 - Záznam měření střídavým napětím, p= 1 bar, l= 60 mm

Number of breakdown	Effective voltage on voltmeter (V)	Peak voltage (kV)
1	28,7	42,8
2	32,3	48,1
3	27,5	41,0
4	26,6	39,6
5	32,1	47,8
6	27,0	40,2
7	32,2	48,0
8	27,9	41,6
9	33,7	50,2
10	32,2	48,0
11	33,4	49,8
12	28,6	42,6
13	32,6	48,6
14	35,0	52,2
15	27,1	40,4
16	33,8	50,4
17	34,4	51,3
18	28,6	42,6
19	35,2	52,5
20	33,2	49,5
AVERAGE	31,1	46,4

Příloha 19 - Záznam měření střídavým napětím, p= 1 bar, l= 90 mm

Number of breakdown	Effective voltage on voltmeter (V)	Peak voltage (kV)
1	29,5	44,0
2	30,0	44,7
3	29,6	44,1
4	29,4	43,8
5	29,3	43,7
6	29,4	43,8
7	28,8	42,9
8	33,4	49,8
9	32,4	48,3
10	29,9	44,6
11	28,7	42,8
12	29,7	44,3
13	34,3	51,1
14	29,8	44,4
15	33,7	50,2
16	29,3	43,7
17	28,7	42,8
18	28,8	42,9
19	33,4	49,8
20	28,8	42,9
AVERAGE	30,3	45,2

Příloha 20 - Záznam měření střídavým napětím, p= 1 bar, l= 115 mm

Number of breakdown	Effective voltage on voltmeter (V)	Peak voltage (kV)
1	33,6	50,1
2	33,3	49,6
3	33,1	49,3
4	33,0	49,2
5	34,4	51,3
6	33,4	49,8
7	33,2	49,5
8	33,5	49,9
9	33,5	49,9
10	34,3	51,1
11	33,7	50,2
12	33,7	50,2
13	33,7	50,2
14	33,8	50,4
15	33,2	49,5
16	34,2	51,0
17	33,3	49,6
18	33,7	50,2
19	33,4	49,8
20	33,3	49,6
AVERAGE	33,6	50,0

Příloha 21 - Záznam měření střídavým napětím, p= 1,5 bar, l= 40 mm

Number of breakdown	Effective voltage on voltmeter (V)	Peak voltage (kV)
1	24,0	35,7
2	23,5	35,0
3	22,5	33,5
4	21,3	31,7
5	22,7	33,8
6	21,6	32,1
7	22,5	33,5
8	22,3	33,2
9	21,4	31,9
10	22,4	33,3
11	21,7	32,3
12	21,8	32,4
13	21,7	32,3
14	22,6	33,6
15	23,0	34,2
16	22,3	33,2
17	20,6	30,6
18	21,4	31,8
19	22,4	33,3
20	21,4	31,8
AVERAGE	22,2	33,0

Příloha 22 - Záznam měření střídavým napětím, p= 1,5 bar, l= 60 mm

Number of breakdown	Effective voltage on voltmeter (V)	Peak voltage (kV)
1	31,4	46,8
2	31,4	46,8
3	28,8	42,9
4	28,7	42,8
5	29,1	43,4
6	29,1	43,4
7	29,2	43,5
8	29,1	43,4
9	29,1	43,4
10	29,8	44,4
11	29,8	44,4
12	28,5	42,5
13	28,9	43,1
14	28,9	43,1
15	28,8	42,9
16	28,4	42,3
17	28,7	42,8
18	28,6	42,6
19	28,4	42,3
20	28,5	42,5
AVERAGE	29,2	43,4

Příloha 23 - Záznam měření střídavým napětím, p= 1,5 bar, l= 90 mm

Number of breakdown	Effective voltage on voltmeter (V)	Peak voltage (kV)
1	37,1	55,3
2	37,7	56,2
3	36,9	55,0
4	36,5	54,4
5	37,4	55,8
6	37,8	56,4
7	37,2	55,5
8	37,2	55,5
9	37,5	55,9
10	37,6	56,1
11	38,2	57,0
12	37,0	55,2
13	37,6	56,1
14	36,7	54,7
15	37,1	55,3
16	36,7	54,7
17	37,1	55,3
18	37,1	55,3
19	35,6	53,1
20	37,8	56,4
AVERAGE	37,2	55,5

Příloha 24 - Záznam měření střídavým napětím, $p= 1,5$ bar, $l= 115$ mm

Number of breakdown	Effective voltage on voltmeter (V)	Peak voltage (kV)
1	43,9	65,5
2	43,8	65,3
3	43,7	65,2
4	43,8	65,3
5	43,6	65,0
6	43,1	64,3
7	43,6	65,0
8	43,8	65,3
9	43,4	64,7
10	42,4	63,2
11	42,4	63,2
12	43,5	64,9
13	43,0	64,1
14	43,5	64,9
15	43,0	64,1
16	43,5	64,9
17	43,3	64,6
18	43,0	64,1
19	43,8	65,3
20	43,2	64,4
AVERAGE	43,4	64,7

Příloha 25 - Záznam měření střídavým napětím, p= 2 bar, l= 40 mm

Number of breakdown	Effective voltage on voltmeter (V)	Peak voltage (kV)
1	26,6	39,6
2	26,0	38,7
3	25,9	38,6
4	26,2	39,0
5	26,3	39,2
6	26,5	39,5
7	25,3	37,7
8	25,8	38,4
9	26,1	38,9
10	25,6	38,1
11	25,3	37,7
12	26,1	38,9
13	26,2	39,0
14	26,3	39,2
15	26,5	39,5
16	26,5	39,5
17	25,8	38,4
18	26,5	39,5
19	26,2	39,0
20	25,9	38,6
AVERAGE	26,1	38,8

Příloha 26 - Záznam měření střídavým napětím, p= 2 bar, l= 60 mm

Number of breakdown	Effective voltage on voltmeter (V)	Peak voltage (kV)
1	36,6	54,6
2	37,3	55,6
3	37,1	55,3
4	36,9	55,0
5	36,5	54,4
6	37,0	55,2
7	36,7	54,7
8	36,3	54,1
9	37,0	55,2
10	36,2	54,0
11	36,8	54,9
12	36,3	54,1
13	36,7	54,7
14	37,3	55,6
15	36,6	54,6
16	36,5	54,4
17	36,2	54,0
18	35,9	53,5
19	36,0	53,7
20	36,1	53,8
AVERAGE	36,6	54,6

Příloha 27 - Záznam měření střídavým napětím, p= 2 bar, l= 90 mm

Number of breakdown	Effective voltage on voltmeter (V)	Peak voltage (kV)
1	51,5	76,8
2	51,8	77,3
3	50,6	75,5
4	51,2	76,4
5	51,0	76,1
6	51,0	76,1
7	51,9	77,4
8	50,0	74,6
9	51,5	76,8
10	51,6	77,0
11	51,6	77,0
12	51,5	76,8
13	51,7	77,1
14	51,6	77,0
15	51,2	76,4
16	51,2	76,4
17	50,5	75,4
18	51,0	76,1
19	51,2	76,4
20	51,3	76,5
AVERAGE	51,2	76,5

Příloha 28 - Záznam měření střídavým napětím, p= 2 bar, l= 115 mm

Number of breakdown	Effective voltage on voltmeter (V)	Peak voltage (kV)
1	63,4	94,6
2	62,9	93,9
3	61,6	92,0
4	62,8	93,7
5	63,0	94,0
6	63,7	95,1
7	62,9	93,9
8	61,2	91,4
9	62,3	93,0
10	63,8	95,2
11	63,8	95,2
12	62,1	92,7
13	62,3	93,0
14	63,0	94,0
15	61,8	92,2
16	62,6	93,4
17	62,2	92,8
18	62,8	93,7
19	50,8	75,8
20	62,9	93,9
AVERAGE	62,1	92,7

Příloha 29 - Záznam měření střídavým napětím, p= 2,5 bar, l= 40 mm

Number of breakdown	Effective voltage on voltmeter (V)	Peak voltage (kV)
1	34,3	51,1
2	34,4	51,3
3	34,2	51,0
4	34,4	51,3
5	34,2	51,0
6	34,5	51,4
7	33,3	49,6
8	34,6	51,6
9	34,5	51,4
10	34,7	51,7
11	34,7	51,7
12	34,3	51,1
13	34,1	50,8
14	33,8	50,4
15	34,0	50,7
16	34,9	52,0
17	34,2	51,0
18	34,5	51,4
19	33,9	50,5
20	34,7	51,7
AVERAGE	34,3	51,1

Příloha 30 - Záznam měření střídavým napětím, p= 2,5 bar, l= 60 mm

Number of breakdown	Effective voltage on voltmeter (V)	Peak voltage (kV)
1	51,3	76,5
2	51,2	76,4
3	51,4	76,7
4	51,6	77,0
5	52,2	77,9
6	50,8	75,8
7	50,5	75,4
8	51,7	77,1
9	51,7	77,1
10	51,0	76,1
11	50,9	76,0
12	51,0	76,1
13	51,3	76,5
14	51,7	77,1
15	52,6	78,5
16	51,0	76,1
17	50,4	75,2
18	49,7	74,2
19	50,7	75,7
20	51,1	76,3
AVERAGE	51,2	76,4

Příloha 31 - Záznam měření střídavým napětím, p= 2,5 bar, l= 90 mm

Number of breakdown	Effective voltage on voltmeter (V)	Peak voltage (kV)
1	78,0	116,5
2	75,6	112,9
3	76,1	113,6
4	75,2	112,3
5	75,5	112,7
6	75,7	113,0
7	76,6	114,4
8	78,9	117,8
9	77,2	115,3
10	77,7	116,0
11	76,0	113,5
12	77,3	115,4
13	76,8	114,7
14	77,2	115,3
15	77,7	116,0
16	77,3	115,4
17	75,9	113,3
18	76,1	113,6
19	74,9	111,8
20	77,1	115,1
AVERAGE	76,6	114,4

Příloha 32 - Záznam měření střídavým napětím, p= 2,5 bar, l= 115 mm

Number of breakdown	Effective voltage on voltmeter (V)	Peak voltage (kV)
1	95,4	142,5
2	94,7	141,4
3	93,8	140,1
4	93,1	139,0
5	95,5	142,6
6	97,1	145,0
7	95,9	143,2
8	94,0	140,4
9	94,3	140,8
10	94,5	141,1
11	96,5	144,1
12	97,2	145,2
13	94,6	141,3
14	96,0	143,4
15	95,0	141,9
16	97,5	145,6
17	95,4	142,5
18	93,3	139,3
19	96,0	143,4
20	94,5	141,1
AVERAGE	95,2	142,2