

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra technologií a měření

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Chování plyných izolací s barierou

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Václav POLANKA**
Osobní číslo: **E12N0029P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Název tématu: **Chování plynných izolací s barierou**
Zadávající katedra: **Katedra technologií a měření**

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

1. Teoreticky zpracujte problematiku izolačních barier v plynných izolacích.
2. Provedte experimentální měření průrazných napětí na elektrodovém uspořádání s barierou umístěnou v plynném izolantu při namáhání atmosférickým impulzním napětím.
3. Provedte vyhodnocení naměřených hodnot průrazných napětí. Formulujte závěry a hypotézy.



V Plzni dne 14. října 2013

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

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

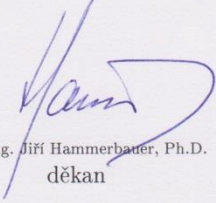
Vedoucí diplomové práce:

Ing. Petr Martínek, Ph.D.

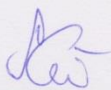
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání diplomové práce: 14. října 2013

Termín odevzdání diplomové práce: 12. května 2014


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




Doc. Ing. Vlastimil Škočil, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2013

Abstrakt

Předložená diplomová práce se zabývá výzkumem vlivu vložené bariéry v plynném izolantu. Popisuje základní vlastnosti dielektrických látek a pojednává o jevech nastávajících v plynném dielektriku s bariérou. Provedený výzkum se zaměřuje na zkoušky atmosférickými napěťovými impulzy 1,2/50. Postup zkoušek probíhá dle českých technických norem. V závěru práce je zpracováno statistické vyhodnocení naměřených hodnot. Zjištěny jsou závislosti na časové prodlevě mezi impulzy, vliv poloměru zakřivení hrotové elektrody a rozdíl mezi použitím kladného a záporného impulzu.

Klíčová slova

Dielektrikum, plynný izolant, bariera, vysoké napětí, rázový generátor, atmosférický impulz, hrotová elektroda, kulová elektroda, nehomogenní pole, přeskokové napětí

Abstract

This thesis deals with the investigation of the effects embedded barrier in a gaseous insulator. It describes the basic properties of dielectric materials and discusses the phenomena taking place in a gaseous dielectric with a barrier. The research focuses on atmospheric test voltage 1.2/50. The testing is carried out according to the Czech technical standards. At the end of the thesis is processed the statistical evaluation of measured values. The findings are based on the time delay between the pulses, the influence of the radius of curvature of the needle electrode and the difference between the use of positive and negative pulse.

Key words

Dielectric, gaseous insulator, barrier, high voltage impulse generator, lightning impulse, needle electrode, spherical electrode, inhomogeneous field, the flashover voltage

Prohlášení

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

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

.....
podpis

V Plzni dne 12.5.2014

Václav Polanka

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Petru Martínkovi, Ph.D. a prof. Ing. Raineru Hallerovi, Dr. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH	7
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
ÚVOD	11
1 VLASTNOSTI DIELEKTRIK A VLIV BARIERY	12
1.1 DIELEKTRIKA A IZOLANTY	12
1.2 ELEKTRICKÁ VODIVOST	12
1.3 VODIVOST PLYNNÝCH IZOLANTŮ	14
1.3.1 <i>Nárazová ionizace</i>	14
1.3.2 <i>Fotoionizace</i>	14
1.3.3 <i>Povrchová ionizace</i>	15
1.3.4 <i>Neutralizace</i>	15
1.3.5 <i>Rekombinace</i>	15
1.3.6 <i>Voltampérová charakteristika plynných izolantů</i>	15
1.4 VODIVOST PEVNÝCH IZOLANTŮ	16
1.4.1 <i>Iontové krystalické látky</i>	17
1.4.2 <i>Anorganické amorfni látky</i>	17
1.4.3 <i>Organické amorfni látky</i>	17
1.4.4 <i>Povrchová vodivost pevných izolantů</i>	18
1.5 ELEKTRICKÁ PEVNOST	18
1.6 ELEKTRICKÁ PEVNOST PLYNNÝCH IZOLANTŮ	19
1.6.1 <i>Nesamostatné a samostatné výboje</i>	20
1.6.2 <i>Townsendovy výboje</i>	21
1.6.3 <i>Nárazová ionizace elektrony v elektrickém poli</i>	21
1.6.4 <i>Podmínka vzniku samostatného výboje</i>	22
1.6.5 <i>Paschenův zákon</i>	24
1.6.6 <i>Kanálový výboj</i>	25
1.6.7 <i>Líderový mechanismus</i>	26
1.6.8 <i>Výboje v nehomogenním poli - koróna</i>	27
1.7 ELEKTRICKÁ PEVNOST PEVNÝCH LÁTEK	29
1.7.1 <i>Čistě elektrický průraz</i>	29
1.7.2 <i>Tepelný průraz</i>	30
1.7.3 <i>Elektrochemický průraz</i>	30
1.8 PLYNNÉ IZOLANTY	30
1.8.1 <i>Výběr plynu</i>	31
1.8.2 <i>Vzduch</i>	31
1.8.3 <i>SF6</i>	32
1.9 BARIERA	33
1.9.1 <i>Více přeskoků s jednou bariérou</i>	35
1.9.2 <i>Bariera s otvorem</i>	36
1.9.3 <i>Impulzní napětí</i>	37
1.9.4 <i>Vliv různých druhů impulzních napětí</i>	39
1.9.5 <i>Vliv tloušťky bariery</i>	39
1.9.6 <i>Přeskok okolo bariery bez průrazu</i>	39

2	ZKOUŠKY ATMOSFÉRICKÝM IMPULZNÍM NAPĚTÍM.....	41
2.1	NORMALIZOVANÝ ATMOSFÉRICKÝ IMPULZ	42
2.2	STATISTICKÉ VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ	42
2.2.1	<i>Třída 1: Zkoušky více hladinami</i>	<i>42</i>
2.2.2	<i>Třída 2: Zkoušky metodou nahoru-dolů</i>	<i>43</i>
2.2.3	<i>Třída 3: Zkoušky postupným namáháním</i>	<i>43</i>
2.3	RÁZOVÝ GENERÁTOR NAPĚTÍ	44
2.4	ATMOSFÉRICKÉ KOREKCE	46
3	PRAKTICKÉ MĚŘENÍ.....	47
3.1	SCHÉMA ZAPOJENÍ	51
3.2	POSTUP MĚŘENÍ	53
3.3	POUŽITÉ PŘÍSTROJE	55
3.4	ZPRACOVÁNÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ	57
3.5	ZKOUŠKY VÍCE HLADINAMI	58
3.5.1	<i>Vliv změny poloměru zakřivení hrotové elektrody.....</i>	<i>59</i>
3.5.2	<i>Vliv polarity impulzu.....</i>	<i>60</i>
3.5.3	<i>Vliv časové prodlevy mezi jednotlivými impulzy.....</i>	<i>61</i>
3.6	ZKOUŠKY NAHORU-DOLŮ	63
3.6.1	<i>Měření metodou nahoru-dolů s vloženou barierou</i>	<i>63</i>
3.6.2	<i>Měření metodou nahoru-dolů bez bariery</i>	<i>65</i>
3.6.3	<i>Porovnání měření metodou nahoru-dolů s metodou více hladinami.....</i>	<i>66</i>
	ZÁVĚR	67
	SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	69
	PŘÍLOHY.....	1

Seznam symbolů a zkratek

O	impulz bez přeskočků
ΔU	napěťový krok [V]
d	tloušťka izolantu [m]
E	intenzita elektrického pole [$V \cdot m^{-1}$]
E_p	elektrická pevnost [$V \cdot m^{-1}$]
f_i	četnost výbojů
h	tloušťka [m]
I_p	proud na povrchu izolantu [$A \cdot m^{-1}$]
$J(0)$	proudová hustota na katodě [$A \cdot m^{-1}$]
$J(d)$	proudová hustota na anodě [$A \cdot m^{-1}$]
k	rázový součinitel
k_1	korekční činitel na hustotu vzduchu
k_i	počet skupin namáhání
k_i	počet průrazných výbojů
LI	atmosférický impulz
m	hmotnost (ionizující částice) [kg]
m	počet napěťových hladin
$n(0)$	počet elektronů uvolněných z katody vlivem ionizačního činitele [m^{-3}]
$n(d)$	počet elektronů, které se dostaly k anodě [m^{-3}]
n_i	počet přiložených napětí
p	tlak [Pa; bar]
R	změřený elektrický odpor [Ω]
r	poloměr [m]
S	plocha elektrod [m^2]
s	strmost
T	časový úsek v čele vlny mezi 30 % a 90 % vrcholového napětí [s]
t	teplota [$^{\circ}C$]
t	prodleva mezi impulzy [s]
T_1	doba čela vlny [s]
T_2	doba půltýlu [s]
U	elektrické napětí [V]
U_{50}	napětí s odhadem 50% pravděpodobností přeskočků [V]

U_i	určitá napět'ová hladina [V]
U_{kor}	korigované napětí na referenční atmosférické podmínky [V]
U_m	měřené napětí [V]
U_{max}	střídavé přeskokové napětí [V]
U_{nab}	nabíjecí napětí rázového generátoru
U_p	průrazné (přeskokové) napětí [V]
$U_{ráz}$	rázové přeskokové napětí [V]
U_z	napětí změřené vrcholovým voltmetrem [V]
v	rychlost ionizační částice [$m \cdot s^{-1}$]
ν	frekvence záření [Hz]
W_i	ionizační energie [J]
x	impulz s přeskokem
y	vzdálenost bariéry od desky [m]
α	Townsendův ionizační činitel
β	ionizační činitel vlivem kladných iontů
γ	konduktivita [$S \cdot m^{-1}$]
γ	Townsendův ionizační činitel (sekundární)
γ_p	měrná povrchová elektrická vodivost [S]
δ	relativní hustota vzduchu
ε	spolehlivostní koeficient
ρ	rezistivita [$\Omega \cdot m$]
ρ_p	měrný povrchový elektrický odpor [Ω]

Úvod

Výzkum související s vysokonapěťovou technikou je dnes velice časté téma a také velice důležité. Energetická náročnost naší civilizace stále stoupá a je zapotřebí zkoumat a objevovat nové možnosti a nové směry. Jednou z cest je tvorba efektivnějších a finančně méně náročných elektrických strojů, zařízení a všech součástí pro výrobu a distribuci elektrické energie. Důležitým faktorem je také spolehlivost a životnost.

Úkolem této práce je zjistit vliv vložené bariery v plynném izolantu při elektrodoovém uspořádání hrotu proti kulové elektrodě. Toto pole je nehomogenní a vložená bariera z pevného dielektrika by měla díky akumulaci náboje na svém povrchu toto pole homogenizovat. Cílem bariery je hlavně zvýšit hodnotu přeskokového napětí, snižuje ale také namáhání izolantu a zvyšuje spolehlivost a životnost.

Měření probíhalo v laboratoři vysokého napětí katedry elektroenergetiky a ekologie Fakulty elektrotechnické na Západočeské univerzitě v Plzni. Tato práce je součástí výzkumu zadaného externí společností, která spolupracuje s katedrou elektroenergetiky a ekologie.

Jako plynné dielektrikum byl použit vzduch. Měření probíhalo ve speciálně vyrobené testovací nádobě. Vložená bariera byla tvořena z materiálu Ultramid® A3X2G7.

Práce je rozdělena do tří hlavních částí. První polovina teoretické části je věnována rozboru vybraných vlastností dielektrik, které pomáhají vysvětlit problematiku bariery vložené do plynného dielektrika. Druhá polovina se zabývá samotnou bariérou, významností jejich parametrů a snahou popsat jevy, ke kterým v její přítomnosti dochází.

Druhá část se zabývá definicí, postupem a vyhodnocováním zkoušek vysokým napětím, které jsou v této práci použity. Převážně vychází z českých technických norem a studijních materiálů pro měření v oblasti vysokého napětí.

Třetí část je praktická. Obsahuje informace o konkrétním měření, postupu, použitých přístrojích a hlavně uvádí naměřená data a zpracované výsledky. Hlavní metodou měření jsou zkoušky více hladinami, které jsou doplněny zkouškami metodou nahoru-dolů pro možné porovnání. Mimo samotný vliv vložené bariery na přeskokové napětí se dále zjišťuje rozdíl mezi použitým kladným a záporným napětím impulzu, vliv poloměru zakřivení hrotové elektrody a rozdíl mezi výskytem přeskoků v závislosti na časové prodlevě mezi impulzy. Výsledky se v případě zkoušek více hladinami zpracovávají statisticky na pravděpodobnostní papír s Gaussovo rozdělením.

1 Vlastnosti dielektrik a vliv bariery

Dielektrika jsou velmi rozsáhlou skupinou látek, které tvoří velmi důležitou část elektrotechnických materiálů. Dielektrika se v elektrotechnice využívají nejčastěji k izolování vodivých těles s rozdílným potenciálem. Materiály k tomuto použití se nazývají izolanty. Důležitým parametrem je u těchto materiálů rezistivita. Dielektrika se používají dále například v kondenzátorech k hromadění elektrické energie. [1][2]

Dielektrika je možné rozdělit podle skupenství na plynná, kapalná a pevná. Dále je možné rozdělit je na polární a nepolární, podle existence elementárního dipólového momentu. Polární látky obsahují elementární dipólové momenty, které jsou permanentní, a to bez působení vnějšího elektrického pole. Pevná dielektrika se dají ještě dělit podle struktury na amorfni a krystalické. [1]

1.1 Dielektrika a izolanty

Dielektrikum si po vložení do vnějšího elektrického pole vytváří vlastní vnitřní elektrické pole. Dokáže se tedy ve vnějším elektrickém poli polarizovat a je to aktivní prvek. Izolanty jsou látky, které jsou pro získání určitých vlastností průmyslově upravené, jedná se tedy o materiály. Jsou to pasivní prvky, jejichž hlavním úkolem je odizolování dvou míst s různým elektrickým potenciálem a zabránit průchodu elektrického proudu mezi těmito místy. Izolanty jsou tedy upravená dielektrika, každý izolant je dielektrikum, ale ne každé dielektrikum je izolant. [1]

1.2 Elektrická vodivost

Ideální dielektrikum nebo izolant neobsahuje žádné volné nosiče elektrického náboje a nevede žádný proud. Skutečná dielektrika a izolanty však obsahují volné nosiče náboje. Jejich množství je oproti vodičům nebo polovodičům velice malé. Je u nich možné měřit rezistivitu a konduktivitu. [2]

Vodivost u elektroizolačních materiálů je nežádoucí. Způsobena je volnými nosiči a nečistotami či příměsemi v materiálu. [1]

Pro jejich hodnocení se používají hodnoty rezistivity ρ a konduktivity γ . Rezistivita je jiný název pro měrný elektrický odpor a vypočítá se jako [1]:

$$\rho = R \cdot \frac{S}{h} \quad (1.1)$$

ρ	rezistivita [$\Omega \cdot m$]
S	plocha elektrod [m^2]
h	tloušťka vzorku [m]
R	změřený elektrický odpor [Ω]

Konduktivita je měrná elektrická vodivost a spočítá se jako převrácená hodnota rezistivity [1]:

$$\gamma = \frac{1}{\rho} \quad (1.2)$$

γ	konduktivita [$S \cdot m^{-1}$]
----------	-----------------------------------

Obě tyto hodnoty jsou určovány na jednotku objemu. Hodnota rezistivity odpovídá odporu krychle z daného materiálu o hraně 1 m, kdy mezi dvěma protilehlými stranami protéká proud. Jedná se o měrné hodnoty pro usnadnění porovnávání jednotlivých materiálů. [1]

Elektrickou vodivost lze rozdělit podle nosiče volného náboje na elektronovou, děrovou, iontovou a protonovou. U těchto vodivostí jsou nosiči elementární částice nebo ionty. Další vodivostí je elektroforetická, kde jsou nosičem koloidní částice. [3] Koloidní částice jsou strukturální tělíska o velikostech od 1 do 500 μm . [4]

Při normálních podmínkách je nejčastějším typem vodivost iontová. Jedná se buď o disociované ionty nebo o ionty příměsí či nečistot. [1]

Mechanismus vodivosti je rozdílný u různých skupenství. Popisují se proto zvlášť. Záleží například na vzdálenosti jednotlivých částic a jejich vzájemné interakci. [1][3]

Obecně lze uvést, že rezistivita výborných izolantů je přibližně $10^{14} \div 10^{16} \Omega \cdot m$. Průměrné izolanty se pohybují mezi $10^{12} \div 10^{13} \Omega \cdot m$. Méně kvalitní, které bývají používány například pro konstrukční účely, mohou mít rezistivitu v rozmezí $10^8 \div 10^{11} \Omega \cdot m$. [1]

1.3 Vodivost plynných izolantů

Plyny patří mezi dobré izolanty. Důvodem jsou velké vzdálenosti mezi částicemi, které na sebe vzájemně téměř nepůsobí. Při nízkých teplotách a bez přítomnosti vnějších zdrojů ionizace nejsou v plynu obsaženy žádné volné nosiče náboje. Proto jsou velice dobrými izolanty. Volné nosiče se v plynu vytváří ionizací. Jedná se elektrony nebo kladné ionty, které se díky velkým vzdálenostem mezi částicemi mohou pohybovat volně. Nejčastějšími typy ionizace u plynů je nárazová ionizace a fotoionizace. [3] Jsou ale i další, jako například povrchová. Aby došlo k ionizaci, je nutné velké množství tzv. ionizační energie. [1]

1.3.1 Nárazová ionizace

K nárazové ionizaci dochází při srážce volných částic s neutrálními molekulami. Pohybující se elektron nebo iont musí mít dostatečnou kinetickou energii. Nedochozí k srážce fyzické, ale k vzájemnému působení sil mezi volným elektronem či iontem a neutrální molekulou. Může také nastat tzv. tepelná ionizace, k té dochází za vysoké teploty, kdy se srazí dvě neutrální molekuly. [1][3]

Aby došlo k nárazové ionizaci, musí být splněna tato podmínka [1]:

$$W_i \leq \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad (1.3)$$

W_i	ionizační energie [J]
m	hmotnost ionizující částice [kg]
v	rychlost ionizační částice [$m \cdot s^{-1}$]

1.3.2 Fotoionizace

Při fotoionizaci je energie získaná absorpcí fotonu. Na této ionizaci mají účast gama záření, Rentgenovo záření a kosmické záření [3]. Podmínka ionizační energie pro fotoionizaci [1][3]:

$$W_i \leq h \cdot \nu \quad (1.4)$$

h	Planckova konstanta ($h = 6,6256 \cdot 10^{-34} J \cdot s$)
ν	frekvence záření [Hz]

1.3.3 Povrchová ionizace

Na povrchové ionizaci se podílí volné elektrony uvolněné z povrchu elektrod. Tento druh ionizace je závislý na materiálu elektrod. Použitý plyn mezi elektrodami nemá takový význam. K uvolnění elektronů z elektrod dochází pomocí fotoemise, při které na elektrody působí různá krátkovlnná záření nebo termoemise, při které k uvolnění elektronu dochází pomocí tepelné energie. [1][3]

1.3.4 Neutralizace

Díky ionizacím dochází k vytváření volných nosičů náboje, dochází ale také k jejich zániku. To se může dít dvěma způsoby, neutralizací nebo rekombinací. [3]

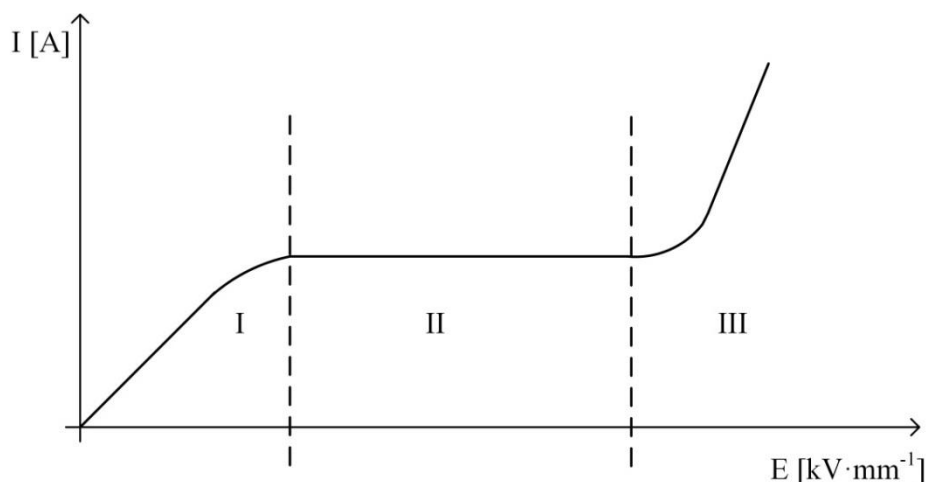
K neutralizaci dochází při předání náboje na elektrodách. Elektrony se neutralizují na kladných elektrodách, kladné ionty na záporných. Po předání náboje se vrací zpět do plynu jako neutrální částice. Nutné je, aby byl umožněn přenos náboje mezi částicí a elektrodou. [3] Při měření elektrického proudu jsou měřeny náboje přecházející mezi dielektrikem a elektrodou. [1]

1.3.5 Rekombinace

Při srážce dvou nebo i více částic s opačnými polaritami dojde k jejich spojení a vytvoří neutrální atom nebo molekulu. Tento jev se nazývá rekombinace. Dochází k němu souběžně s ionizací a je závislý na množství iontových párů v daném objemu plynu. Rekombinace může nastat pravděpodobněji při nízké vzájemné rychlosti rekombinujících částic. Větší pravděpodobnost rekombinace tak mají ionty, které se pohybují mnohem pomaleji oproti elektronům. Elektrony se mohou zachytávat na neutrálních atomech, a tím vznikne záporný iont. Jedná se o nepřímou rekombinaci. [1][3]

1.3.6 Voltampérová charakteristika plynných izolantů

Voltampérovou charakteristiku plynných izolantů lze rozdělit do tří částí, které jsou zobrazeny na *Obr. 1.1*.



Obr. 1.1 Voltampérová charakteristika plynných izolantů [1][3]

V první oblasti je intenzita elektrického pole nízká, nosiče náboje mají malou relativní rychlost, a proto dochází převážně jen k rekombinaci. Při zvyšování intenzity elektrického pole se zvyšuje rychlost nosičů náboje a častěji dochází i k neutralizaci. V této oblasti platí Ohmův zákon. V druhé oblasti převažuje neutralizace. K rekombinaci dochází velice málo kvůli vysokým rychlostem nosičů náboje. Proud je nasycený a není závislý na intenzitě elektrického pole. V třetí oblasti se projevuje nárazová ionizace. Sníží se schopnost plynu izolovat a dojde k samostatným výbojům. Vlivem lavinovitého procesu nárazové ionizace nastane průraz. [3]

1.4 Vodivost pevných izolantů

Pevné izolanty mají při nevysokých teplotách a ve slabých elektrických polích velmi malou konduktivitu. Jedná se ale o složitou problematiku, hlavně kvůli existenci mnoha rozdílných struktur pevných izolantů. Ty se mohou chovat rozdílně v různých podmínkách.

U pevných izolantů se vyskytují dva druhy ionizace, iontová a elektronová. Iontová převládá častěji, hlavně za normálních podmínek. Elektronová se projevuje především při vyšších intenzitách elektrického pole. Pevné izolanty se pro lepší popis elektrické vodivosti dělí do tří skupin. [1]

- Iontové krystalické látky
- Anorganické amorfnní látky
- Organické amorfnní látky

1.4.1 Iontové krystalické látky

Iontové krystalické látky mají strukturu tvořenou mřížkou kladných a záporných iontů, které se nacházejí v uzlech. K přenosu náboje výměnou kladných a záporných iontů je potřeba velká energie. Vodivost je tak většinou tvořena některým typem poruchy. Nejčastěji se jedná o Frenkelovu poruchu, kdy iont získá při tepelných kmitech dostatečnou energii k uvolnění z mřížky do intersticiální polohy. Na jeho bývalé pozici vznikne vakance, tedy volné místo. Pro přechod do intersticiální polohy je potřebná energie 1 až 2 eV. Pro přechod mezi jednotlivými intersticiálními polohami stačí mnohem menší energie, přibližně 0,15 eV. [1]

Dalšími možnými poruchami způsobující vodivost je Schottkyho porucha nebo tzv. sekundární porucha, která je způsobena přítomností cizích atomů. Ty vytváří poruchy v pravidelnosti stavby základní mřížky. Při nižších teplotách je vodivost způsobena nejčastěji přítomností příměsí. [1]

1.4.2 Anorganické amorfní látky

Jedná se hlavně o různé druhy skel. Elektrická vodivost má při normálních podmínkách velký rozsah, a to přibližně mezi $10^{-3} \div 10^{-17} \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$. Nejnižších hodnot vodivosti dosahují skla křemičitá (SiO_2) a boritá (B_2O_3). Ionty jsou u zmíněných skel rozmístěny velice napevno. Technická skla mohou mít vodivost vyšší vlivem příměsí, které jsou určeny pro změnu mechanických vlastností, které ale mohou negativně ovlivnit elektrické vlastnosti. [1]

1.4.3 Organické amorfní látky

Organické amorfní látky jsou velmi rozsáhlou skupinou materiálů, které mají různorodé vlastnosti. Jedná se o syntetické nebo přírodní makromolekulární látky, mezi které patří například polyetylen, polystyren, polytetrafluoretylen, polyvinylchlorid a další. Jejich vodivost je menší než $10^{-17} \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$. [1]

Důležitá je čistota materiálů. Nejčastěji mají na elektrické vodivosti podíl nečistoty a iontové příměsí. U polárních izolantů je vodivost vyšší než u nepolárních. Důvodem je mimo nečistot možnost disociace molekuly samotného izolantu. Velký vliv na vodivost má také přítomnost vody, která elektrické vlastnosti zhoršuje. Záleží na míře navlhavosti materiálu. [1]

1.4.4 Povrchová vodivost pevných izolantů

U pevných izolantů dochází kromě vnitřní elektrické vodivosti také k povrchové vodivosti. Měrná povrchová vodivost se může počítat jako [1]:

$$\gamma_p = \frac{I_p}{E} \quad (1.5)$$

γ_p	měrná povrchová elektrická vodivost [S]
I_p	proud tekoucí na povrchu izolant na jednotku délky [A · m ⁻¹]
E	intenzita elektrického pole [V · m ⁻¹]

Lze také určit měrný povrchový elektrický odpor ρ_p , který vychází v jednotkách Ω . Povrchová vodivost je způsobena převážně nečistotami na povrchu. Ty disociují a vznikají volné nosiče náboje. Disociace molekul nečistot je ovlivněna vlhkostí okolí. U většiny materiálů je povrchová vodivost menší než vnitřní, pouze u skel je větší. [1][5]

1.5 Elektrická pevnost

Hlavní úlohou elektroizolačního materiálu je oddělit od sebe místa s rozdílným elektrickým potenciálem. Pro charakterizaci vybraného materiálu slouží elektrická pevnost. Jedná se o podíl průrazného napětí U_p , při kterém dojde k průrazu či přeskoku a tloušťky izolantu d . [3]

Průraz nastává u látek v pevném skupenství a trvale mění vlastnosti materiálu. U kapalných a plynných látek se používá termín přeskok. Rozdíl oproti průrazu je ve schopnosti plynných a kapalných látek regenerovat. Zhoršení vlastností materiálu je jen dočasné. [1]

$$E_p = \frac{U_p}{d} \quad (1.6)$$

E_p	elektrická pevnost [V · m ⁻¹]
U_p	průrazné napětí [V]
d	tloušťka izolantu [m]

Při vyšším napětí, které přesahuje určitou mez, přestávají izolanty plnit svou funkci. Dochází k růstu počtu volných nosičů a jejich pohyblivosti. Během tohoto procesu dojde k nekontrolovatelnému zvýšení elektrické vodivosti. Rezistivita, která byla zpočátku vysoká, prudce poklesne a materiál přestane izolovat. [1][3]

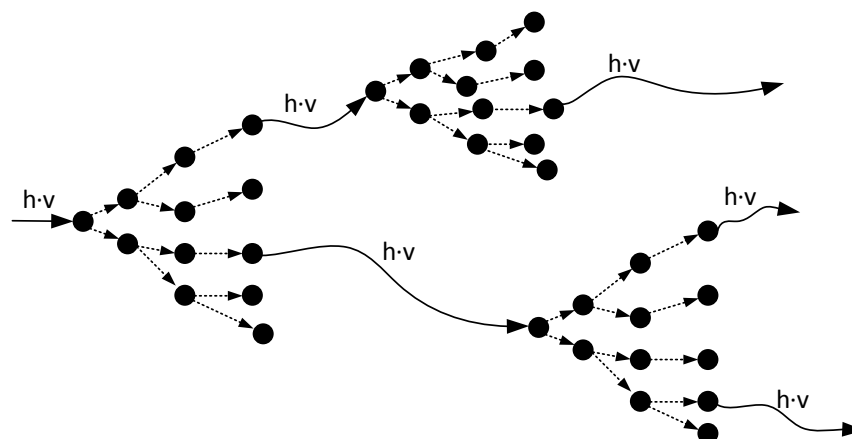
Při zvýšení elektrické vodivosti vznikne elektrický výboj, který vytvoří vodivou cestu mezi místy s rozdílným elektrickým potenciálem. Tekoucí proud je omezen pouze impedancí přívodů k elektrodám a zdroje napětí. Vznik výboje je rozdílný podle skupenství prostředí, ve kterém k němu dojde. Výboj má silné degradační účinky, které způsobuje hlavně elektrický oblouk s vysokými teplotami. [1]

Velký vliv na elektrickou pevnost materiálu mají okolní podmínky a další parametry, které nejsou dosud ve všech případech dostatečně vysvětleny. Jednoznačný fyzikální smysl má elektrická pevnost pro homogenní elektrická pole. Pro nehomogenní pole je možné jednotlivé materiály porovnávat jen při stejných podmínkách, které obvykle stanovují příslušné normy. [1][3]

Elektrická pevnost je závislá na druhu působícího napětí. Jedná se o elektrickou pevnost střídavou, stejnosměrnou a impulzní. Stejnosměrná elektrická pevnost je zpravidla vyšší než střídavá. Pro impulzní elektrickou pevnost se většinou používá rázové zkušební napětí ve tvaru vlny 1,2/50. Čelo vlny trvá 1,2 μ s a pokles vlny na poloviční hodnotu trvá 50 μ s. Zkoušky jsou stanoveny normami, které budou dále upřesněny. [1]

1.6 Elektrická pevnost plynných izolantů

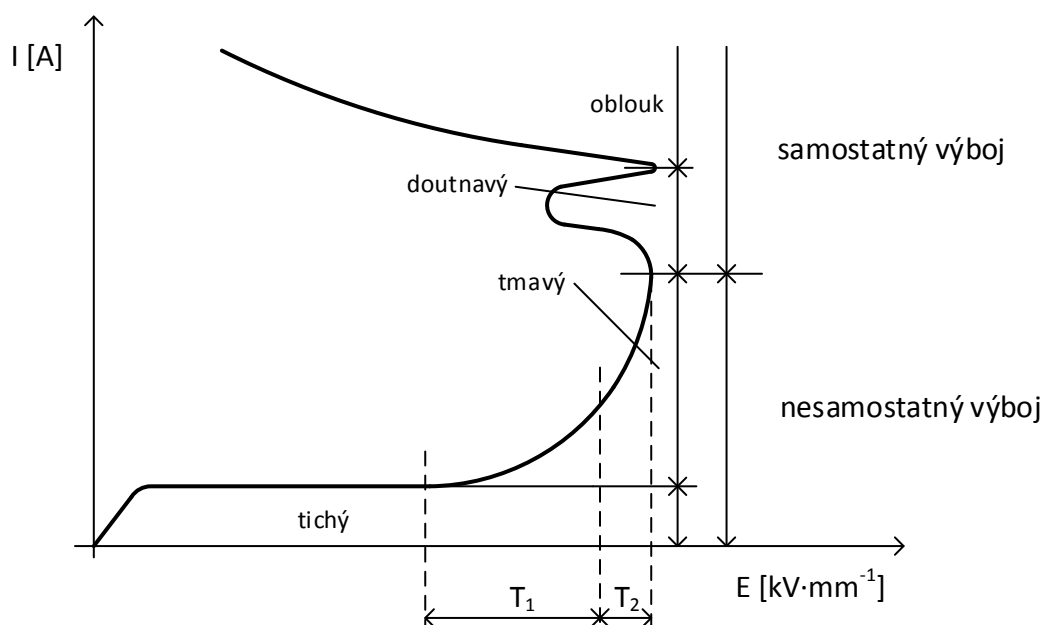
U plynných izolací dochází k elektrickému průrazu nárazovou ionizací. Při vysoké intenzitě elektrického pole vzrůstá počet nosičů náboje lavinovitě. Lavinová ionizace je zobrazena na *Obr. 1.2*. Důležité jsou elektrony, které mají větší rychlost oproti iontům. Některé elektrony jsou pouze vybuzeny do vyšší energetické hladiny a nepodílí se na uvolnění dalších elektronů. Při návratu do nižší hladiny nebo při rekombinaci mohou uvolnit foton, který ionizuje další neutrální molekuly. Foton má velmi velkou rychlost, další lavinu tak může spustit i v místech, kam předchozí laviny nestačily zatím dorazit. K přeskoku tak může docházet v celé vodivé dráze téměř současně.



Obr. 1.2 Lavinová ionizace v plynech [3]

1.6.1 Nesamostatné a samostatné výboje

Nesamostatné výboje vznikají pouze za přítomnosti ionizačního činitele. Tím může být například zdroj záření nebo externí zdroj elektronů. Pokud tyto ionizační činitele přestanou působit, nesamostatný výboj zanikne. Samostatné výboje nepotřebují ionizační činitele. Jako jejich zdroj slouží odpovídající elektrické napětí. [1]



Obr. 1.3 Voltampérová charakteristika plynného izolantu [1][6]

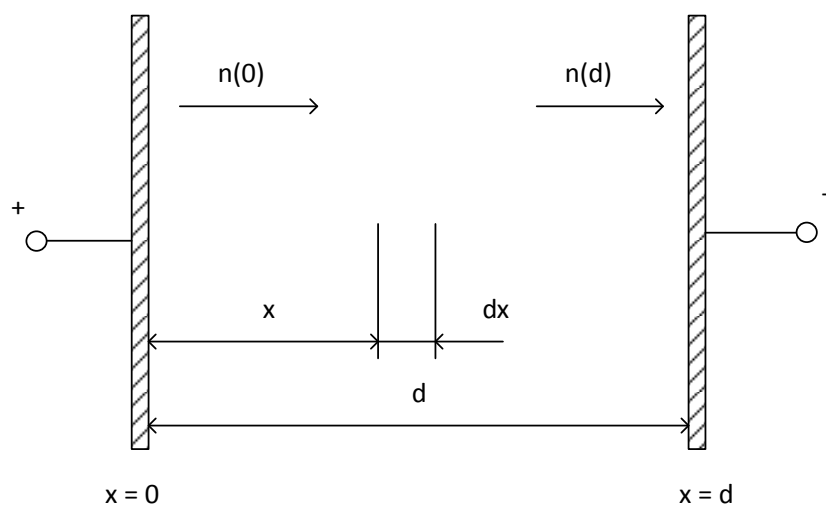
1.6.2 Townsendovy výboje

Jedná se o nesamostatné výboje. Studium těchto výbojů se zabýval John Sealy Edward Townsend, po kterém bývají pojmenovány. [1] Předpokladem je, že pomocí ionizačního činitele emitují z katody elektrony. Zvyšováním napětí nad úroveň napětí nasyceného proudu dochází ke stále rostoucímu zvětšování proudu v plynu. Rychlost elektronů je v tomto stavu dostatečně velká a kinetická energie je dostačující, aby došlo k nárazové ionizaci. Oblast Townsendových výbojů je znázorněna na *Obr. 1.3* dvěma oblastmi T_1 a T_2 . V oblasti T_1 dochází k pomalejšímu nárůstu vlivem nárazové ionizace volných elektronů. V oblasti T_2 je nárůst rychlejší. Townsend to vysvětlil přítomností nově vytvořených kladných iontů [6]

1.6.3 Nárazová ionizace elektrony v elektrickém poli

Energie, kterou elektron získá, je dána podle intenzity elektrického pole a dráhy mezi dvěma srážkami. Pokud je energie dostačující, dojde při srážce k ionizaci. Pro určení počtu vzniklých dvojic nosičů se používá Townsendův ionizační činitel označený α . Někdy se nazývá jen ionizační činitel α . Townsend pro jeho výpočet použil zjednodušení. [6]

- Elektron ionizuje plyn, jen pokud má vyšší nebo stejnou kinetickou energii jako je ionizační práce plynu.
- Během srážky předá elektron veškerou svou kinetickou energii.
- Pohyb elektronů je jen ve směru pole.



Obr. 1.4 Uspořádání k vysvětlení Townsendově teorii [1]

Pro následující výpočty se uvažuje uspořádání jako na *Obr. 1.4*. V případě, že elektron projde ve vzdálenosti x od katody jednotkovým průřezem o tloušťce dx , vznikne nárazovou ionizací $\alpha \cdot dx$ dvojic nosičů náboje. Pokud je v dané vzdálenosti x od katody koncentrace elektronů n , tak na dráze dx vznikne dn nových elektronů. [1]

$$dn = n \cdot \alpha \cdot dx \quad (1.7)$$

Po několika úpravách lze získat vztah:

$$n(d) = n(0) \cdot e^{\alpha \cdot d} \quad (1.8)$$

$n(d)$ počet elektronů, které se dostaly k anodě [m^{-3}]

$n(0)$ počet elektronů uvolněných z katody vlivem ionizačního činitele [m^{-3}]

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

Vztahu výše odpovídá proud o proudové hustotě:

$$J(d) = J(0) \cdot e^{\alpha \cdot d} \quad (1.9)$$

$J(d)$ proudová hustota na anodě [$A \cdot m^{-1}$]

$J(0)$ proudová hustota na katodě [$A \cdot m^{-1}$]

Z rovnice (1.9) je vidět, že počet elektronů vzrůstá exponenciálně se vzdáleností od katody. Jedním emitovaným elektronem z katody vznikne $e^{\alpha \cdot d}$ elektronů. V tomto čísle je započítán i emitovaný elektron. Celkový počet nově vzniklých elektronů je $e^{\alpha \cdot d} - 1$. Každému nově vzniklému elektronu odpovídá nově vzniklý kladný iont. [1]

1.6.4 Podmínka vzniku samostatného výboje

Výše zmíněný mechanismus platí pro nesamostatné výboje v oblasti T_1 . V oblasti T_2 , jak již bylo řečeno, je nárůst vyšší. Dříve se předpokládalo, že kladné ionty získají dostatečnou energii a podílí se také na nárazové ionizaci. Townsend proto zavedl ionizační činitel β . Ukázalo se, že jejich podíl je minimální, proto se tato úvaha zanedbává. Důvodem jsou již zmíněné kladné ionty, které při nárazu na katodu emitují z katody další elektron. Byl

zaveden třetí ionizační součinitel γ , který udává průměrný počet emitovaných elektronů z katody vlivem nárazu kladných iontů. [6]

V ustáleném stavu je $n(0)$ počet emitovaných elektronů z katody vlivem ionizačních činitelů. Celkový počet emitovaných elektronů i vlivem nárazu kladných iontů na katodu je n_1 . Na anodu dopadne za jednotku času n elektronů. V trubici mezi elektrodami o průřezu 1 cm^2 vznikne za jednotku času $n - n_1$ kladných iontů. Pro emitované elektrony platí:

$$n_1 = n(0) + \gamma \cdot (n - n_1) \quad (1.10)$$

Po úpravě získáme:

$$n_1 = \frac{n(0) + \gamma \cdot n}{1 + \gamma} \quad (1.11)$$

Při dosazení do vztahu (1.8) místo $n(0)$ dopočtené n_1 , se získá počet dopadajících elektronů na anodu.

$$n = \frac{n(0) + \gamma \cdot n}{1 + \gamma} \cdot e^{\alpha \cdot d} \quad (1.12)$$

Po úpravě dostaneme:

$$n = \frac{n(0) \cdot e^{\alpha \cdot d}}{1 - \gamma \cdot (e^{\alpha \cdot d} - 1)} \quad (1.13)$$

Při vynásobení nábojem e , získáme vztah proudové hustoty:

$$J(d) = \frac{J(0) \cdot e^{\alpha \cdot d}}{1 - \gamma \cdot (e^{\alpha \cdot d} - 1)} \quad (1.14)$$

Výboj je stále nesamostatný, pokud by přestaly působit ionizační činitelé, proud v plynu zanikne. Aby se výboj stal samostatným, musí být splněna podmínka:

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

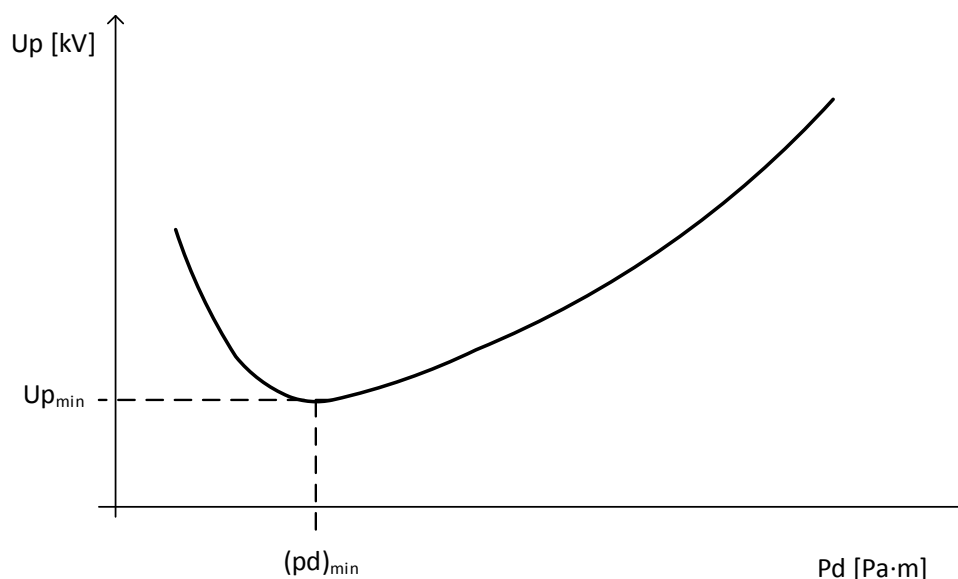
Při splnění této podmínky se proud v plynu udrží i bez působení ionizačních činitelů. Počet kladných iontů vytvořených jedním emitovaným elektronem z katody je $e^{\alpha \cdot d} - 1$. Počet

emitovaných elektronů z katody pomocí těchto kladných iontů je $\gamma \cdot (e^{\alpha \cdot d} - 1)$ a měl by být roven jedné. Samostatný výboj je možné zavést změnou vzdálenosti elektrod při stejném napětí nebo změnou napětí při konstantní vzdálenosti elektrod. [6]

Napětí, při kterém vzniká samostatný výboj, se označuje jako počáteční napětí výboje. V homogenním elektrickém poli odpovídá přibližně přeskokovému napětí. V nehomogenním poli se při tomto počátečním napětí výboje objevuje korona. [1]

1.6.5 Paschenův zákon

Friedrich Paschen zjistil pomocí pokusů, že přeskokové napětí v plynu je v homogenním poli funkcí součinu tlaku p a vzdálenosti elektrod d . Platí to pouze při konstantní teplotě. Pokud se zmenší vzdálenost elektrod n -krát a současně se zvýší tlak n -krát, přeskokové napětí bude odpovídat stále stejné hodnotě jako před změnou. Jedná se o funkci $U_p = f(p \cdot d)$.



Obr. 1.5 Paschenova křivka [1]

Na Obr. 1.5 je zobrazena Paschenova křivka. Nejprve prudčeji klesá, poté dosáhne minima a následně méně strmě roste. Pro různé plyny jsou hodnoty minima různé, ale přibližný tvar křivky zůstává. V levé části křivky se předpokládá nízký tlak plynu a konstantní vzdálenost elektrod. Vlivem nízkého tlaku je hustota molekul v plynu malá.

Většina elektronů uvolněných z katody během své dráhy nenarazí na neutrální molekulu. Nedochozí tak k nárazové ionizaci a vzniku dalších nosičů náboje. Se vzrůstajícím tlakem se pravděpodobnost srážek zvyšuje a křivka je klesající. V pravé části křivky se uvažuje vyšší tlak plynu. Vzdálenosti mezi částicemi v plynu jsou malé a k nárazům elektronů a neutrálních molekul dochází dříve, než elektrony získají dostatečnou kinetickou energii. V obou těchto extrémech je nutné velmi vysoké urychlující napětí, aby došlo k přeskoku. V minimu Paschenovy křivky jsou energeticky nejvýhodnější parametry pro vytvoření výboje. Ve vzduchu se dá Paschenova křivka použít přibližně jen do hodnot $pd = 1000 \text{ Pa}\cdot\text{m}$ a do napětí, které nezpůsobí přeskok. Při vyšších tlacích a vzdálenostech se projevuje jiný mechanismus výstavby výboje. [1][6][9]

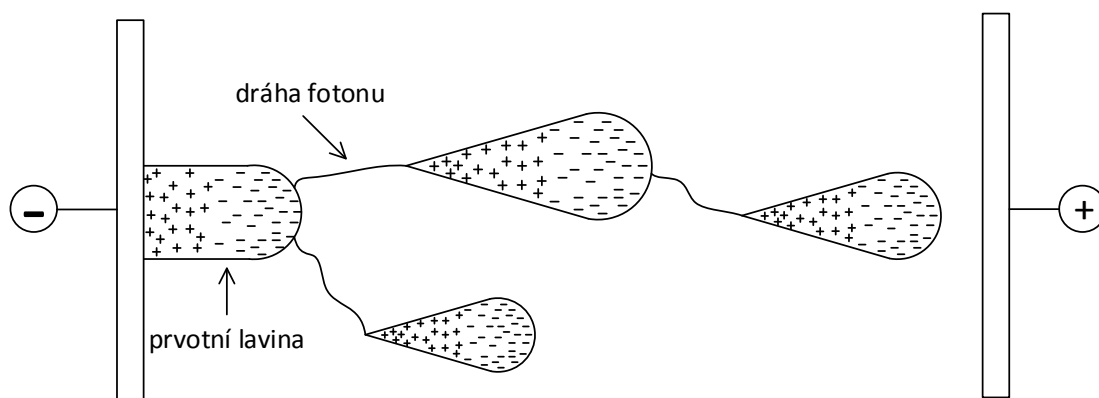
1.6.6 Kanálový výboj

Při větších vzdálenostech elektrod v řádu desítek milimetrů při atmosférickém tlaku, dojde k vzniku jiskry v krátkých časech, řádově $10^{-6} \div 10^{-7} \text{ s}$. Při přeskoku je rychlost volných elektronů přibližně $10^7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, kladné ionty se pohybují mnohem pomaleji. Rychlost iontů je přibližně jen $10^3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Jak bylo zmíněno v předchozích kapitolách, pro vytvoření samostatného výboje je nutný dopad kladných iontů na katodu k následné excitaci nových elektronů. Při takto rychlých časech vzniku jiskry nemají kladné ionty možnost dostat se až na katodu. Znamená to, že k přeskoku dochází jiným mechanismem. Zavedla se streamerová nebo také kanálová teorie přeskoku. Dojde k vytvoření kanálového výboje, viz *Obr. 1.6*, který se šíří velkou rychlostí. Kanálový výboj se nazývá „streamer“, u nás se používá fonetické pojmenování strimér. [1][6]

Nejprve dochází k tvorbě elektronové laviny. Díky mnohem větší rychlosti elektronů zůstávají kladné ionty za elektrony. Šířka laviny ve vzduchu za atmosférického tlaku je přibližně $1 \div 2 \text{ mm}$. Vlivem rozložení elektronů a kladných iontů se v místě laviny mění homogenní pole v nehomogenní. Důvodem je vytvoření prostorového náboje. Rozložení napětí se tak deformuje. V oblasti čela laviny působí pole prostorového náboje proti vnějšímu poli. Intenzita elektrického pole v tomto místě klesá, ale před čelem a za čelem laviny dochází ke zvýšení. Zvýšená intenzita před čelem laviny posiluje nárazovou ionizaci, a tím tvorbu většího prostorového náboje. Ten opět podporuje nárazovou ionizaci a děj stále pokračuje. Při dosažení velké laviny s dostatečnou rychlostí začne při nárazech elektronů o neutrální molekuly docházet k fotoelektrické ionizaci. Emisí fotonů z prvotní laviny se vytvoří nový elektron před lavinou směřující k anodě. Tento elektron vytvoří novou lavinu, která stejným

principem dosáhne tvorby další laviny a vše se opakuje. Laviny vznikají v místech, kam předchozí lavina ještě nestačila dorazit. Postupně se propojují do výbojového kanálu, který tvoří ionizovaná plazma, a tak vznikne strimér. [1][6]

Strimér se začíná tvořit někde mezi elektrodami a roste na obě strany. Strimér tvořící se směrem od katody k anodě se označuje jako katodový strimér. Opačným směrem se tvoří anodový strimér. Po propojení katody a anody dojde k přeskoku. [1]



Obr. 1.6 Vznik kanálového výboje [1][6]

1.6.7 Líderový mechanismus

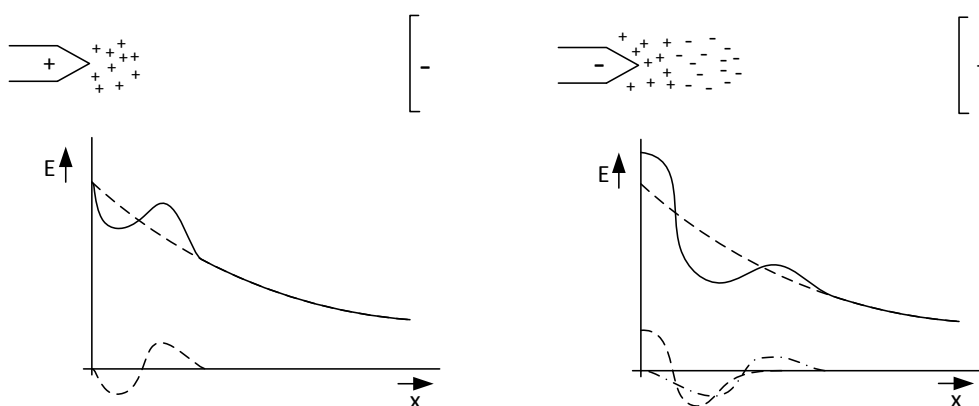
Pokud jsou vzdálenosti mezi elektrodami větší, v řádech stovek milimetrů a více, dosahuje teplota výboje v průměru přibližně 3000 °C. Při této teplotě dochází k tepelné ionizaci vzduchu. Teplota není všude stejná, v polovině délky striméru je přibližně poloviční oproti místu jeho počátku. Elektrická intenzita je v místě jeho vzniku malá. Naopak na konci výboje je intenzita velká, to vede ke vzniku dalších strimérů a prodlužování kanálu spolu s narůstající teplotou. Vzniká tzv. líder, který dosahuje malé změny elektrické intenzity. Podélná intenzita líderu je malá, intenzita mezi jeho koncem a elektrodou narůstá. Od kladné elektrody se šíří kontinuálně, ale od záporné ve skocích. Jeho průměr je přibližně 1 cm, průměr striméru je jen kolem 1 mm. Na líder navazují ze strany striméry a laviny. Líder se může šířit z obou elektrod, v místě jejich styku dochází k velkému potenciálovému rozdílu. Vlivem velkého nárůstu proudu se uvolňuje značné množství Jouleova tepla. Rozdíl potenciálu se začne kvůli velké energii šířit od místa styku k druhé elektrodě tzv. zpětnou vlnou. [6][7]

1.6.8 Výboje v nehomogenním poli - koróna

V silně nehomogenních polích dochází ke vzniku koróny. Koróna je samostatný částečný výboj. Vzniká v místech s vysokou intenzitou elektrického pole. Sledovat ji můžeme na elektrodách s malým poloměrem zakřivení oproti vzájemné vzdálenosti mezi nimi. Samotný výboj obklopuje místo s vysokou intenzitou. Dochází ke vzniku lavin, které ve větší vzdálenosti od místa vzniku koróny ustávají z důvodu klesající intenzity. Korónový výboj je neúplný. Projevuje se viditelně světélkující vrstvou a akusticky praskotem a šumem. [1]

Skutečný průměr koróny je přibližně 1,9 násobný oproti průměru, který je vidět pouhým okem. Neviditelné části koróny se nacházejí v ultrafialovém spektru. Vznik je závislý na materiálu a povrchu elektrod. Na hrubých nebo znečištěných površích dochází nejdříve k výskytu malých nestabilních výbojů. V takovém případě je těžké určit přesné počáteční napětí koróny. U hladkých a čistých povrchů je možnost zjištění počátku snazší, záleží na okolních podmínkách. [6]

Během koróny dochází k rozkladu plynů a tvorbě ozónu. [7]



Obr. 1.7 Rozložení el. pole mezi elektrodami hrot – deska [9]

Pro vytvoření nehomogenních polí se používá elektrodové uspořádání s hrotem a deskou nebo kulovou elektrodou s větším poloměrem. Průrazné napětí je za stejných podmínek rozdílné, pokud je na hrotu kladné nebo záporné napětí. U hrotu je vyšší intenzita elektrického pole, proto jsou u něj lepší podmínky pro vznik výboje. Nárazovou ionizací dochází k vytváření volných elektronů a kladných iontů v blízkosti hrotu. Elektrony díky lepší

pohyblivosti oblast opustí, kladné ionty jsou pomalé a vytváří prostorový náboj. Vznikem prostorového náboje se mění rozložení elektrického pole. [1][7]

V případě kladné hrotové elektrody oproti záporné desce, se okolo hrotu hromadí kladné ionty, které vytvářejí prostorový náboj. Rozložení pole odpovídá situaci, kdy by hrotová elektroda byla nahrazena elektrodou v rozměru prostorového náboje. Rozložení intenzity se částečně vyrovná a u hrotu intenzita klesne. Naproti tomu je prostorový náboj blíže k záporné desce. Vzdálenost mezi nimi klesne, což způsobí zvýšení intenzity elektrického pole v této oblasti. Rozložení elektrického pole je vidět na *Obr. 1.7*. Koróna má u hrotu pulzní charakter. Vzniklý výboj je utlačen kladným prostorovým nábojem. Po vzdálení se náboje směrem k desce dojde opět ke zvýšení intenzity a zesílení koróny. [1][7]

Pokud je hrot záporný a deska kladná, opět se vytvoří u hrotu kladný prostorový náboj. Elektronky se pohybují směrem k desce, vlivem snížení intenzity elektrického pole ve vzdálenosti od hrotu ztrácí rychlost a zachytávají je neutrální molekuly. Dojde k vytvoření záporného prostorového náboje za kladným. Blízko hrotu je zvýšená intenzita, a to podporuje nárazovou ionizaci. To se projevuje výraznější korónou. Nově vzniklé elektronky intenzitu opět zeslabí a koróna zanikne. Má pulzní charakter. [7]

Přeskokové napětí je vyšší u záporného hrotu, protože intenzita mezi kladným prostorovým nábojem u hrotu a kladnou deskou je nižší. V případě kladného hrotu kladný prostorový náboj zmenšil vzdálenost mezi ním a deskou a došlo ke zvýšení intenzity. [1][7]

Při použití rázového napětí je přeskokové napětí výrazně vyšší oproti použití stejnosměrného nebo střídavého napětí s nižší frekvencí, například 50 Hz. Vliv frekvence na průrazné napětí začíná být znatelný přibližně od 1000 Hz. Pro přechod od výboje k jiskře je potřebná určitá doba. Impulz dosáhne prudkým nárůstem napětí svého maxima během jednotek mikrosekund a opět začne klesat. Vysoké hodnoty napětí působí jen přibližně po dobu desetin mikrosekundy. Za takto krátkou dobu nestačí vzniknout jiskrový výboj, který by propojil obě elektrody. Proto je potřebné napětí výrazně vyšší v porovnání se střídavým nebo stejnosměrným napětím. Vliv polarity je také méně výrazný. Poměr velikosti průrazných napětí se nazývá rázový součinitel. Počítá se jako poměr rázového přeskokového napětí a střídavého přeskokového napětí [4][7]:

$$k = \frac{U_{\text{ráz.}}}{U_{\text{max}}} \quad (1.16)$$

1.7 Elektrická pevnost pevných látek

U pevných látek dochází po průrazu dielektrika k trvalým následkům. To neplatí u kapalných a plynných látek, které mají schopnost regenerace. Po průrazu u pevných látek zůstane pozměněná struktura materiálu a vytvoří se vodivá cesta. Po vytvoření vodivé cesty je dielektrikum nevhodné pro izolační použití. Po průrazu pevného izolantu při použití v praxi i při pokusech je nutné tento izolant vyměnit. Problém může nastat například u zkoušek materiálů, kdy je po každém pokusu nutné použít nový vzorek. U pevných látek se uvádí tři možné způsoby průrazu. Čistě elektrický průraz, tepelný průraz a elektrochemický průraz. [1]

1.7.1 Čistě elektrický průraz

Čistě elektrický průraz může nastat, pokud velikost průrazného napětí není ovlivněna teplotou ani dobou působení napětí. K průrazu dojde v nejslabším místě izolace okamžitě při působení dostatečně velkého elektrického pole. Důležité je, aby k průrazu došlo ihned. V jiném případě by mohlo vlivem teploty dojít ke stárnutí izolantu a změnám vlastností materiálu. [1]

Vysvětlení mechanismu čistě elektrického průrazu je více. Nejčastějším názorem, který vyplynul z experimentů, je vznik průrazu kvůli existenci volných elektronů v dielektriku. V ideálním pevném dielektriku se přítomnost volných elektronů nepředpokládá, ale v reálných dielektrikách ano. Používají se dvě teorie vzniku čistě elektrického průrazu vlivem volných elektronů. [1]

Předpoklad malé hustoty volných elektronů

Počet srážek elektronů s molekulami izolantu je malý. Při zvýšení intenzity elektrického pole na velikost úrovně elektrické pevnosti, dojde k nárůstu elektrického proudu tekoucího v izolantu. Zvýší se teplota a vlivem vysoké teploty se poruší struktura izolantu. [1]

Předpoklad velké hustoty volných elektronů

Volné elektrony do sebe naráží, a tím nemohou dosáhnout vyšší rychlosti a energie. Vlivem nárazů dochází k téměř rovnoměrnému ohřívání všech volných elektronů. Pokud se více energie předává mezi elektrony než struktuře izolantu, teplota elektronů se zvyšuje. Dojde k rovnováze mezi energií dodanou elektrickým polem a energií odevzdanou struktuře

izolantu. Po překročení rovnováhy začne teplota elektronů růst. Po prudkém ohřátí dojde k průrazu. [1]

1.7.2 Tepelný průraz

Tepelný průraz je závislý na teplotě a době působení elektrického pole. Může se označovat jako elektrotepelný průraz. U čistě elektrického průrazu měly vliv na elektrický průraz nehomogenity elektrického pole nebo izolantu. U tepelného průrazu stupeň homogenity nemá vliv. [1]

K ohřátí izolantu může dojít Jouleovými či dielektrickými ztrátami nebo jejich kombinací. K nárůstu teploty dochází při těchto způsobech ohřevu jen v omezených oblastech a neprobíhá rovnoměrně. Vlivem zvýšené teploty dochází k růstu elektrické vodivosti a dielektrických ztrát, které způsobují ještě větší nárůst teploty. [1]

Elektrická pevnost je závislá na teplotě a frekvenci napětí. Dále záleží na době působení elektrického pole. [1]

1.7.3 Elektrochemický průraz

K elektrochemickému průrazu dochází u izolantu, na který působí elektrické pole dlouhou dobu. Kvůli delší době působení elektrického pole se postupně začnou zhoršovat vlastnosti izolantu. Elektrická pevnost se časem snižuje. Výsledný průraz není elektrochemický, ale ve většině případů tepelný. Změny materiálu mohou být vratné nebo nevratné. Velký vliv na stárnutí materiálu mají částečné výboje, které se objevují v dutinkách pevných izolantů. Výboje v dutinkách mají chemické a fyzikální účinky na materiál izolantu. [1]

1.8 Plynné izolanty

Plyny jsou nejjednodušší a nejrozšířenější používaná dielektrika. Pro jejich správné využití je nutné znát jejich vlastnosti a chování, hlavně fyzikální procesy, které vedou k ionizaci a přeskoku v určitém elektrodovém systému. K přeskoku dochází u každého plynu při určité hodnotě přiloženého napětí. Přeskokové napětí je vrcholová hodnota přiloženého napětí v okamžiku, kdy dojde k přeskoku. [8]

1.8.1 Výběr plynu

Nejčastěji používanými plynnými dielektriky, pro využití ve vysokonapěťové technice jako izolantu, jsou vzduch a SF₆. Ačkoli SF₆ je velice dobrý izolant a vhodný plyn pro použití ve vysokonapěťové technice, snaha je najít alternativu. Porovnání elektrické pevnosti vybraných plynných izolantů je v *Tab. 1.1*. Vysoká elektrická pevnost dovoluje navrhovat vysokonapěťové stroje a zařízení s menšími rozměry. Menší rozměry znamenají menší množství izolačního plynu, méně konstrukčního materiálu atd. Elektrická pevnost je dána schopností zachytávat volné elektrony i na vysokých energetických hladinách. Většina plynných dielektrik ale zachytává elektrony jen omezeně na nízkých energetických hladinách. Například SF₆ zachytává elektrony na hladině $\leq 0,4$ eV. [8]

Tab. 1.1 Přehled vlastností vybraných plynných izolantů [10]

Plyn	Chemický vzorec	Relativní el. pevnost	Bod varu [°C]
Vzduch	Směs	1,0	-192
Dusík	N ₂	1,0	-196
Vodík	H ₂	0,6	-253
Oxid uhličitý	CO ₂	0,9	-78,5
Fluorid sírový	SF ₆	2,3 – 2,5	-63,8

Důležitými vlastnostmi mimo elektrickou pevnost je například cena, toxicita plynu v určitém stavu, bod varu, rizika vůči životnímu prostředí a další. [8]

1.8.2 Vzduch

Vzduch je nejpoužívanějším plynným izolačním médiem ve vysokonapěťové technice. Důvodem je dobrá dostupnost a je zdarma. Také se po přeskoku sám obnoví, pokud je v otevřených prostorech nebo venku. Kvůli jeho častému použití je nutné znát podrobně jeho vlastnosti a chování pro navrhování izolací. V *Tab. 1.2* je uvedeno složení vzduchu. [8]

Tab. 1.2 Složení vzduchu [4]

Plyn obsažený ve vzduchu	Chemická značka/vzorec	Objemový podíl [%]	Bod varu [°C]
Dusík	N	78	-196
Kyslík	O	21	-183
Argon	Ar	0,9325	-186
Oxid uhličitý	CO ₂	0,03	-78,5
Neon	Ne	0,00161	-246
Helium	He	0,00046	-269
Metan	CH ₄	0,0001	-161,4
Vodík	H	0,0001	-253
Krypton	Kr	0,000108	-153
Xenon	Xe	0,000008	-109

1.8.3 SF₆

Jedná se o velmi dobře známý a často používaný plynný izolant ve vysokonapěťové technice. Skládá se z fluoru a chloru, což jsou těžké plyny ze sedmé skupiny periodické tabulky prvků. Tyto plyny mají poměrně velkou elektrickou pevnost oproti vzduchu při stejných podmínkách. Vysoká elektrická pevnost je způsobena hlavně jejich schopností navazovat volné elektrony, a tím tvořit těžké záporné ionty. Plyny s touto schopností se označují jako elektronegativní. Z mnoha dostupných elektronegativních plynů je SF₆ důležité díky své chemické stabilitě a také vyšší elektrické pevnosti. [8]

SF₆ je bezbarvý, bez zápachu, netoxický, nehořlavý a inertní plyn. Při vysokém tlaku zkapaňuje při vyšších teplotách, což může být problém. Při tlaku přibližně 14 barů zkapaňuje při teplotě kolem 0 °C, při 3,5 barech je to přibližně -40 °C. Při atmosférickém tlaku je chemicky stabilní do teploty přibližně 500°C. Při vyšších teplotách může dojít k jeho rozkladu na jiné látky. SF₆ je inertní plyn a na většině používaných vodivých materiálech nezpůsobuje korozi. Při jeho rozkladu mohou být určité látky toxické nebo škodlivé pro ostatní materiály. Problém může nastat při přítomnosti kyslíku či vodních par v plynu. Pokud dojde k disociaci během elektrického výboje, vzniklé látky rychle rekombinují a obnoví SF₆ a elektrická pevnost je tak v krátké době opět na původní hodnotě. [8]

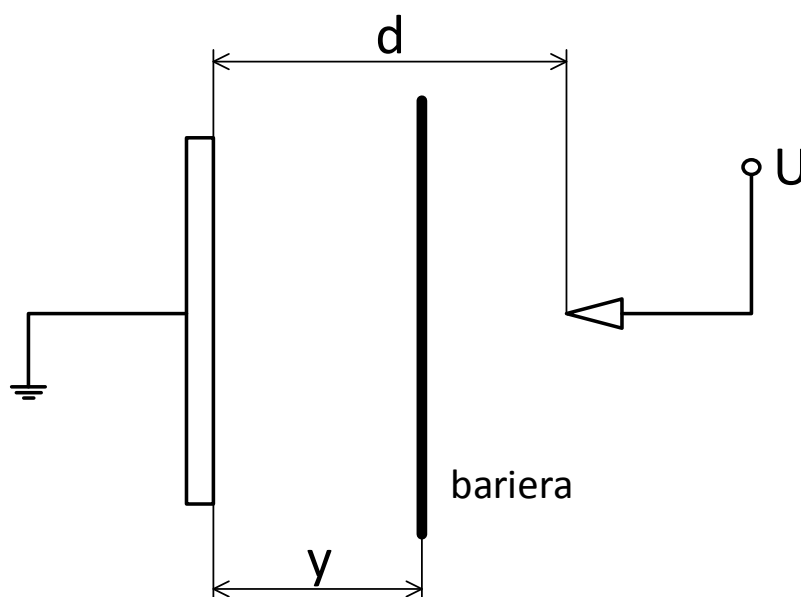
SF₆ je netoxický plyn a člověk by mohl přežít při kombinaci 80 % SF₆ a 20 % O₂. Ve větším množství SF₆ by vedlo vdechování plynu k udušení. Má vyšší hustotu a je těžší než vzduch. Je nutné dávat pozor, aby nedošlo k úniku. Některé vedlejší produkty při rozkladu SF₆ mohou být velmi toxické. SF₆ má lepší tepelnou vodivost oproti vzduchu, a to přibližně čtyřikrát. [8]

1.9 Bariera

Princip bariery byl objeven pány Marxem a Roserem při studiu částečných výbojů ve vzduchové mezeře v 30. letech minulého století. Funkce bariery souvisí s rozložením elektrického pole mezi elektrodami. Blízko hrotu se vytvoří nárazovou ionizací prostorový náboj a nabíjí bariéru. Jejich model používá většina autorů pro vysvětlení vlivu bariery nejen v plynných dielektrikách, ale i v kapalných a pevných. [11]

Dodnes vzniklo mnoho experimentálních hypotéz pro další vysvětlení funkce bariery. Autoři se snaží vysvětlit funkci pomocí vlivu různých faktorů jako elektro-fyzickou charakteristikou materiálu dielektrika a bariery a nehomogenní polarizace. Navzdory mnoha výzkumům není problematika bariery stále zcela objasněna. [11]

Bariera se používá v silně nehomogenních polích pro zvýšení elektrické pevnosti, viz *Obr. 1.8*. Může být tvořena z papíru, lepenky, skla, porcelánu, slídy nebo jiného tenkého pevného dielektrika. Poloha umístění bariery je kolmo k siločárám. Sama přispívá k větší pevnosti svou elektrickou pevností jen zanedbatelně. Na bariéře se zachycuje elektrický náboj, který má vliv na rozložení elektrického pole. [4][7]

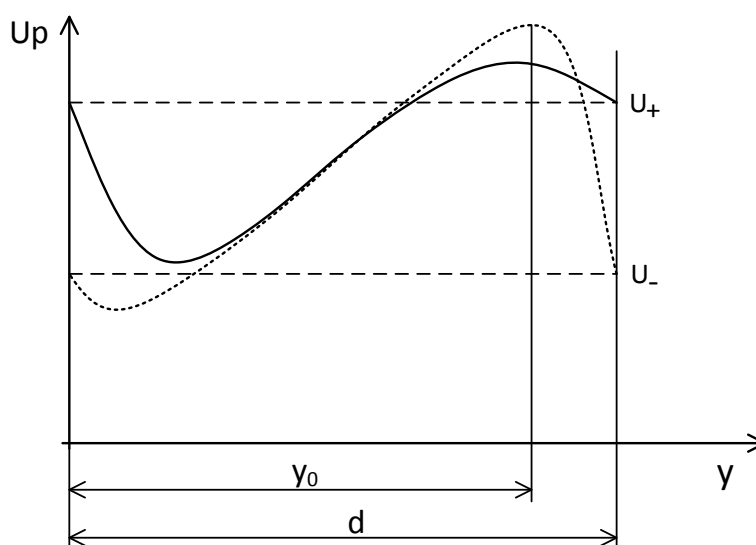


Obr. 1.8 Znárodnění bariery mezi deskou a hrotem [9]

Pro vytvoření silně nehomogenního pole se používá hrotová elektroda proti desce. Mezi tyto elektrody se vloží bariera z tenkého dielektrika v určité vzdálenosti od desky. Při vyšším napětí se na hrotu objeví koróna a dochází k ionizaci. Rychle se pohybující

elektrony bariéru překonají, ale pomalé ionty jsou zachyceny. V případě záporné polarity hrotu se na bariéře hromadí záporné ionty, které vznikly reakcí volných elektronů s neutrálními částicemi. Bariéra je tak nabitá záporným nábojem, zatímco deska je kladná. Pokud je na hrotu kladná polarita, bariéra zachytává kladné ionty směřující k záporné desce. Náboj bariéry je vždy opačný než polarita desky. Pole mezi deskou a bariérou se stává homogenní. Mezi hrotem a bariérou klesne intenzita elektrického pole a protéká jen malý proud. [7]

Velikost průrazného napětí téměř nezávisí na polaritě hrotu, protože k přeskoku dochází mezi bariérou a deskou, kde je pole homogenní. Vliv na velikost průrazného napětí má umístění bariéry, viz *Obr. 1.9*. Pokud je bariéra příliš blízko u desky, je průrazkové napětí určeno vzdáleností mezi bariérou a hrotem, a ne bariérou a deskou. V případě, že je bariéra příliš blízko hrotu, je její vliv také snížený. Nosiče náboje vznikají díky ionizaci i za bariérou, která je nemůže zachytit. [7]



Obr. 1.9 Velikost průrazného napětí v závislosti na poloze bariéry [9]

Bariéru lze použít i při střídavém napětí s nižší frekvencí, kdy bariéra má dostatečnou dobu pro nabití při obou polaritách. Při střídavém napětí je nejlepší místo pro umístění bariéry v určité vzdálenosti poblíž hrotu. Při použití střídavého napětí o vysoké frekvenci nebo rázového napětí je vliv bariéry nižší, protože bariéra nemá dostatečný čas pro plné nabití. [7]

V případě střídavého napětí nebo při častých změnách napětí záleží na druhu materiálu, ze kterého je bariera vytvořena. Materiály s vyšší povrchovou a vnitřní rezistivitou udrží náboj po delší dobu oproti materiálům s nižší rezistivitou. [12]

Při změně polarity na hrotu se nejdříve náboj z bariery přenesse na hrot a bariera se nabije opačnou polaritou. Nepřenesse se veškerý náboj, ale část opačného náboje zůstane na bariéře. [12]

Nejvhodnější umístění bariery je přibližně ve vzdálenosti $y/d = 0,15 - 0,3$. V určitých případech může vložená bariera zvýšit hodnotu přeskokového napětí i dvounásobně až třínásobně. [13]

V nehomogenních polích je počáteční napětí koróny mnohem nižší než přeskokové napětí. Částečné výboje způsobují pomalou degradaci izolace a zhoršování jejich vlastností. Bariera zvyšuje hodnotu přeskokového napětí, ale i počáteční napětí koróny, a tím zvyšuje životnost izolace. [14]

Při výzkumech koróny a přeskokového napětí při velkých vzdálenostech elektrod v plynných dielektrikách, se předpokládalo, že prostorový náboj omezuje vytvoření výboje, ale jeho vliv je zanedbatelný. Při velkých vzdálenostech elektrod se usoudilo, že bariera slouží jen jako mechanická překážka. Rostoucí výboj nemůže projít skrze barieru a začne se rozšiřovat po jejím povrchu. Velkou roli má materiál a rozměr bariery. Hlavně pak její elektrická pevnost a odolnost vůči koróně. [11]

1.9.1 Více přeskoků s jednou bariérou

V homogenním poli začíná přeskokový kanál na vysokonapěťové elektrodě a prochází skrze barieru. Náboj naakumulovaný na bariéře neovlivňuje elektrické pole, protože je již homogenní. Vliv bariery je v tomto poli téměř zanedbatelný. Důkazem je, že po prvním přeskoku a průrazu bariery, dojde při dalším přeskoku k vytvoření výbojového kanálu v jiném místě bariery. Nenásleduje cestu prvního průrazu, kde je po vytvoření vodivého kanálu nebo díry lepší vodivost. Hodnota přeskokového napětí dalších přeskoků je tedy odpovídající hodnotě napětí při prvním přeskoku. Tyto poznatky potvrdily další výzkumy. To znamená, že změna izolačních vlastností bariery jako je tloušťka bariery nebo její elektrická pevnost jsou zanedbatelné. Důležitá je změna rozložení pole vlivem naakumulovaného náboje. [13]

1.9.2 Bariera s otvorem

Aby se ověřila teorie, že bariera je funkční kvůli zachycení nábojů na svém povrchu a více přeskoků s jednou bariérou neovlivní její vlastnosti, provedl Roser experiment s otvorem v bariéře. Použil stejnosměrné napětí a malou vzdálenost elektrod s umístěním bariéry v určitém bodě. Použil bariéru s otvorem a měnil průměr otvoru. Hodnota přeskokového napětí zůstala stále vysoká. Přeskokové napětí klesalo se zvětšujícím se průměrem otvoru, ale stále bylo vyšší. Napětí neklesalo vlivem otvoru, ale vlivem zmenšujícího se povrchu bariéry, na který se mohl akumulovat náboj. V místě otvoru se žádný náboj nezachytil, a proto ani výsledné pole nemohlo být tolik homogenizované. Množství náboje na bariéře je dáno její použitelnou plochou, která se dá určit jako celkový povrch s odečtením plochy otvoru. [13]

Tyto poznatky o několik desetiletí později rozšířili výzkumníci Wasilenko a Olesz. Použili pro měření bariéry s otvorem impulzní a střídavé napětí, tím doplnili Roserovy pokusy se stejnosměrným. Potvrdili, že bariera plní svou roli i s otvorem a závisí na jeho průměru. Pro malé průměry se přeskokové napětí jen lehce lišilo od napětí s plnou bariérou. Při pokusech se vzdáleností elektrod 30 cm a průměrem bariéry 45 cm se ukázalo, že vliv bariéry je téměř zanedbatelný při průměru otvoru 8 cm. [13]

Bylo také dokázáno, že vliv na přeskokové napětí má jak materiál bariéry, tak i její tloušťka. V tom by mohl být rozpor oproti postřehům Marxe a Rosera. Wasilenko a Olesz uvedli vysvětlení, které nevyvrací původní teorie. Podle nich je největší hustota naakumulovaného náboje ve středu bariéry. To znamená, že případně vzniklý přeskokový výboj projde bariérou mimo oblast s nejvyšším množstvím náboje. Při vytvoření otvoru se tato oblast odebere, a tím se redukuje náboj na bariéře a mění se jeho rozložení. [13]

Při použití tenké bariéry s malým průměrem otvoru, může být výhodnější průraz bariéry než průchod skrz otvor. To se ale neděje v případě materiálů bariéry s vysokým průrazným napětím. Materiály s velkou elektrickou pevností nebo velkou tloušťkou brání průrazu bariéry a striméry musí projít otvorem. V takovém případě je napětí potřebné pro průchod otvorem mnohem větší. [13]

Výše zmíněné poznatky neplatí při použití velmi malých vzdáleností elektrod. Při pokusech s malou mezerou bylo zjištěno, že malý otvor v bariéře může významně ovlivnit hodnotu přeskokového napětí. Důležité je umístění otvoru. Pokud je ve středu bariéry, může potlačit veškeré výhody bariéry. Pokud se nachází dále od středu, nemá takový význam. Hodnota přeskokového napětí zůstane stále vysoká, ale může být o něco snížena oproti stavu

bez otvoru. Při velmi malých vzdálenostech elektrod jsou tedy významné i malé otvory, záleží na jejich umístění. Čím jsou blíže ke středu, tedy k místu s vysokou hustotou náboje, tím více ovlivňují přeskokové napětí. [13]

1.9.3 Impulzní napětí

Marx během svých výzkumů ve 30. letech zjišťoval vliv polarit hrotu při použití impulzního napětí. Při kladné polaritě hrotu dochází ke vzniku tenkého striméru na hrotu rozvětvlujícího se směrem k bariéře. Bariéra ho zastaví a pozitivní náboj se přenesse na bariéru. Bariéra se nabije kladně a pole mezi bariérou a deskou se stane více homogenním, jak již bylo vysvětleno. Při použití impulzního napětí s kladnou polaritou hrotu a bariéry může být dosaženo i dvojnásobné hodnoty přeskokového napětí. [13]

V případě záporné polarit hrotu Marx ukázal, že vliv bariéry není takový. Bez bariéry je přeskokové napětí se záporným hrotem podstatně vyšší než při kladné polaritě hrotu. Rozdíl u záporné polarit hrotu mezi použitím s bariérou a bez bariéry je poměrně malý. Za určitých okolností, jako například při zvolení nevhodné pozice bariéry, může být hodnota přeskokového napětí dokonce nižší s vloženou bariérou. [13]

Široký strimér ze záporné hrotové elektrody dosáhne bariéry bez větvení oproti striméru z kladné, který se větví. Nedojde k tolik rovnoměrnému rozložení pole jako v případě kladné polarit hrotu. V okolí hrotu je vysoká přítomnost náboje, který je více nahuštěný. Náboj projde skrz bariéru a může dojít ke vzniku výboje mezi bariérou a deskou. Takovéto výboje nebyly při použití kladné polarit hrotu pozorovány. Rozložení pole je více rovnoměrné a k přeskoku je potřeba vyššího napětí. Příčina není zcela jasná, ale předpokládá se, že důvodem je emitování elektronů z hrotu během koróny, ke kterému při použití kladné polarit nedochází. [13]

Kladná polarita hrotu

Důležitým výzkumem bylo zjišťování mechanismu bariérového efektu. Pánové Remde a Boecker experimentovali s elektrodami hrot proti desce se vzdáleností 6 cm. Použili kladný obdélníkový impuls. Doba půltýlu byla 3 ms. Poté použili i záporný impuls. Bariéra byla z papíru o tloušťce 2 mm. [13]

Při kladném impulzu je možné rozdělit proces přeskoku na tři fáze. Zaprvé přeskok mezi hrotem s vysokým napětím a bariérou. Zadruhé přeskok mezery mezi bariérou a deskou a zatřetí průraz bariéry a celkový přeskok mezi elektrodami. [13]

První fáze začíná jiskrou, která se chová jako by se impulzní napětí zvyšovalo. Jiskra se rozšiřuje od hrotu směrem k bariéře a dojde k přemostění. Tento jev doprovází vysoký proud ve formě pulzu. Způsoben je jedním nebo dvěma striméry. Počáteční striméry jsou silně ionizované a postupně vytvářejí oblouk mezi jehlou a bariérou. Na bariéře se objeví první povrchové výboje. Poté povrchu bariéry dosáhne oblouk. Následně dojde k přeskoku mezi hrotem a bariérou. [13]

Mezitím se na povrchu bariéry stále akumuluje kladný náboj. Zvyšuje se napětí mezi bariérou a deskou a zároveň se snižuje napětí mezi hrotem a bariérou. Zvyšováním intenzity dojde k svítivému výboji mezi bariérou a deskou. Tento výboj nemá dostatečnou intenzitu ke vzniku přeskoku. [13]

V druhé fázi je hodnota impulzního napětí dostatečná, aby se ze svítivého výboje stal oblouk, který opět doprovází vysoký proudový pulz. Na straně bariéry směrem k desce dochází k tvorbě povrchových výbojů v blízkosti oblouku. Na obou stranách bariéry se akumuluje náboj. [13]

Ke třetí fázi dojde, když hodnota impulzního napětí dosáhne hodnoty průrazu bariéry. K tomu dojde v nejslabším místě bariéry bez závislosti na poloze. Poté dojde k celkovému přeskoku mezi elektrodami skrze bariéru. Cesta přeskoku není rovná, přeskok nenásleduje nejkratší cestu. [13]

Záporná polarita hrotu

Pokud je na hrotu připojeno záporné impulzní napětí, jev probíhá odlišně oproti zapojení s kladným impulzním napětím na hrotu. Koróna, která vzniká na hrotu, emituje elektrony s velkou kinetickou energií. Elektrony dosáhnou bariéry velmi rychle. Náboj akumulovaný bariérou posiluje pole mezi bariérou a deskou. Výsledkem je přeskok mezi bariérou a deskou. Uvedený proces je rychlejší než u zapojení s kladným hrotem, protože akumulování negativního náboje je dosaženo jeho vyzářováním, a ne vlivem elektrického oblouku. [13]

Z hrotu se stále emitují elektrony. Tento jev je podporován nábojem na bariéře a oblouku, který již propojil bariéru a desku. Při dosažení určité úrovně impulzního napětí dojde k průrazu bariéry a celkovému přeskoku. [13]

1.9.4 Vliv různých druhů impulzních napětí

Remde a Boecker obecně potvrdili výzkum Marxe a Rosera. Pozorovali, že přeskokový jev je rozdílný při použití kladného nebo záporného impulzu na hrotu. Teoretické závěry zmíněného rozdílu se ale někdy liší. Remde a Boecker použili impulzní napětí obloukového tvaru s dlouhou dobou trvání. Zaznamenali obloukový výboj při použití kladného hrotu, který Marx a Roser nezaznamenali. Důvodem je nejspíše delší doba impulzu, díky které se uvolnilo více elektronů, které se podílely na výboji. V některých případech byla doba do přeskoku i 10 μs . Vliv má i typ rázového generátoru. Záleží na použitých kapacitách a odporu, které mohou ovlivnit velikost proudu při přeskoku. Rázový generátor 1,2/50 μs nemusí dodat dostatečný proud a navíc impulz trvá velice krátkou dobu, takže se nestačí naakumulovat dostatečné množství náboje na bariéru. Tyto problémy se neobjevují při použití spínacího impulzu 250/2500 μs . [13]

1.9.5 Vliv tloušťky bariery

Při uspořádání elektrod hrot a deska bylo dokázáno, že se zvyšující se tloušťkou bariery klesá počáteční napětí koróny. [14]

Vliv tloušťky je ale oproti jiným parametrům minimální. Roser provedl několik pokusů pro zjištění vlivu tloušťky bariery na hodnotu přeskokového napětí. Testy prováděl při vzdálenosti elektrod do 10 cm. Z experimentů vyplynulo, že vhodnější je použití bariery s menší tloušťkou, ale rozdíl je poměrně zanedbatelný. Dané výsledky ověřili v budoucnu i další výzkumníci. Tloušťka bariery může mít vliv na elektrickou pevnost dielektrika, ale tato hodnota má pro změnu přeskokového napětí zanedbatelný dopad. Dnes se tedy tloušťka bariery nepovažuje za významný parametr. Mnohem důležitější je vzdálenost elektrod, rozložení elektrického pole, tvar aplikovaného napětí a pozice bariery mezi elektrodami. Rozdíl může být při použití bariery s velkou tloušťkou, kdy elektrická pevnost těchto bariery může ovlivnit celkovou elektrickou pevnost. Při těchto parametrech není důležitý vliv bariery, ale jedná se o problematiku a výzkum pevných dielektrik. [13]

1.9.6 Přeskok okolo bariery bez průrazu

Přeskok nemusí jít vždy skrz bariéru. V určitých případech může být přeskok veden okolo bariery. To v případě, že je tato cesta energeticky snazší než při průrazu bariery. Závisí na elektrické pevnosti bariery, na jejích rozměrech, umístění a na vzdálenosti elektrod.

V každém případě je stále hlavní vliv bariery v zachycení náboje na jejím povrchu. Hodnota přeskokového napětí je dána délkou cesty přeskoku okolo bariery. Pole mezi bariérou a deskou je díky náboji na bariéře více homogenizované. [13]

Přeskok může být veden přímo nebo ve skocích. Záleží na polaritě napětí, vzdálenosti bariery od hrotové elektrody a na rozměrech bariery. V případě použití kladné polaritě na hrotu a umístění bariery mezi 20 % a 60 % celkové vzdálenosti od hrotu je přeskok veden přímo. V případě umístění bariery v menší vzdálenosti elektrod, je přeskok veden ve skocích. V případě použití záporné polaritě na hrotu je přeskok ve skocích bez závislosti na umístění bariery. Výjimkou může být uspořádání elektrod v menší vzájemné vzdálenosti než je výška či šířka bariery. [13]

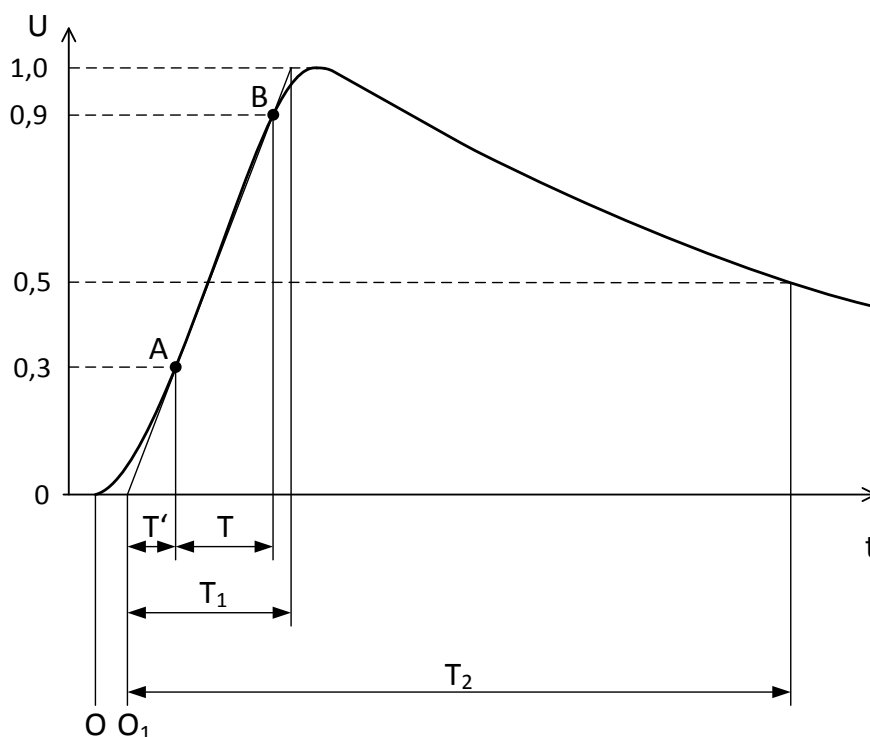
Přímý přeskok je směřován od hrotu na hranu bariery nejkratší cestou. Dále se rozvíjí k desce, dokud nepřemostí mezeru. Délka přeskoku odpovídá nejkratší cestě, která spojuje hrot a desku bez průrazu bariery. Hodnota přeskokového napětí při umístění bariery přibližně odpovídá hodnotě při zapojení bez bariery, ale se vzdáleností elektrod odpovídající vzdálenosti přeskoku, který v předchozím zapojení vede okolo bariery. [13]

Skokový přeskok s kladnou polaritou hrotu začíná striméry, které míří do středu bariery. Na povrchu bariery blíže k hrotu dojde k vytvoření klouzavých výbojů. Tyto výboje dosáhnou okraje bariery a rozvinou se přímo k desce. [13]

V případě záporné polaritě hrotu je vyslán jeden strimér z hrotu a druhý z desky. Striméry dosáhnou bariery a na povrchu se vytvoří klouzavé výboje. K přeskoku dojde po spojení těchto výbojů. [13][15]

2 Zkoušky atmosférickým impulzním napětím

Atmosférické impulzy napětí slouží pro napodobení účinků atmosférických přepětí. Impulz má tvar vlny, viz *Obr. 2.1*, která se skládá z čela, které prudce roste až k vrcholové hodnotě napětí, a z týlu, který oproti čelu pozvolna klesá. Atmosférické impulzní napětí má dobu čela kratší než 20 μs . [9][16]



Obr. 2.1 Atmosférický impulz s časovými parametry [16]

Norma definuje několik pojmů, které se týkají atmosférických napěťových zkoušek. Jedná se například o plné atmosférické impulzní napětí, které není přerušeno průrazem nebo přeskokem. Dále stanovuje potenciální překmity a další.

Důležitým parametrem je doba čela T_1 , která je určena jako 1,67 (nebo také $1/0,6$) násobek doby T . Doba T je časový úsek, kdy impulz dosáhne z 30 % na 90 % vrcholové hodnoty napětí. Dalším důležitým parametrem je doba půltýlu T_2 . Tj. doba od bodu O_1 až do bodu, kdy hodnota napětí v týlu klesne na polovinu (50 %) zkušebního napětí. [9][16]

2.1 Normalizovaný atmosférický impulz

Jedná se o plný atmosférický impulz napětí s dobou čela $1,2 \mu\text{s}$ a dobou půltýlu $50 \mu\text{s}$. Používá se označení 1,2/50. Normy stanovují tolerance, které jsou platné, pokud není stanoveno jinak příslušnou technickou komisí. [16]

Hodnota zkušebního napětí	$\pm 3 \%$
Doba čela	$\pm 30 \%$
Doba půltýlu	$\pm 20 \%$

Relativní hodnota překmitu by neměla překročit 10% . Pro generování zkušebního napětí se používá impulzní nebo také rázový generátor napětí. [9][16]

2.2 Statistické vyhodnocení měření

Pro statistické vyhodnocování výsledků měření průrazným výbojem se používají postupy rozdělené na tři třídy. [16]

2.2.1 Třída 1: Zkoušky více hladinami

Při zkoušce třídy 1 se přiloží na měřený objekt n_i napětí na určité napěťové hladině, které způsobí k_i průrazných výbojů. Měření se provádí pro m napěťových hladin. [16]

n_i	počet přiložených napětí (doporučeno $n_i \geq 10$)
k_i	počet průrazných výbojů ($k_i \leq n_i$)
m	počet napěťových hladin (doporučeno $m \geq 5$)

Nejčastěji se tato třída používá pro zkoušky atmosférickým impulzním napětím, ale může být použita i pro zkoušky střídavým nebo stejnosměrným napětím. [16]

Pro vyhodnocení se získává četnost výbojů f_i na určité napěťové hladině U_i a považuje se za odhad pravděpodobnosti průrazného výboje $p(U_i)$. Počet získaných odhadů odpovídá počtu hladin m a lze z nich stanovit předpokládané distribuční funkce $p(U)$ a jejich parametry U_{50} a $s = U_{50} - U_{16} = U_{84} - U_{50}$. [16]

Pro získání výsledků se může použít například grafické vynesení na pravděpodobnostní papír. Často používaný je pravděpodobnostní papír pro Gaussovo nebo

normální rozdělení. Výsledkem je přímka, ze které lze určit přibližný odhad pravděpodobnosti průrazného výboje pro vybrané napětí. [9][16]

2.2.2 Třída 2: Zkoušky metodou nahoru-dolů

Při zkoušce třídy 2 se na přijaté skupiny m přikládá n stejných napěťových namáhání. Zkoušky probíhají na napěťových hladinách U_i ($i = 1, 2, \dots, l$). Jednotlivé hladiny se liší o rozdíl ΔU . Následující hladina je zvyšována nebo snižována o ΔU oproti předchozí hladině v závislosti na výsledku předchozí skupiny namáhání. [16]

Používají se dva postupy. Jedním je výdržný postup, při kterém se hledají nízké pravděpodobnosti průrazného výboje. Druhým je výbojový postup, kterým je možné najít napěťovou hladinu, která odpovídá vysoké pravděpodobnosti průrazného výboje. [16]

Podle počtu n se určuje pravděpodobnost průrazného výboje při zjištěné napěťové hladině. Pro $n = 1$ se oba postupy shodují a výsledkem je napětí s 50% pravděpodobností průrazného výboje. Odhad pravděpodobnosti průrazného výboje pro jiná n je v Tab. 2.1. Dle normy je doporučeno $m > 15$. [16]

Tab. 2.1 Pravděpodobnost výboje při zkoušce nahoru-dolů [16]

n =	70	34	14	7	4	3	2	1	
p =	0,01	0,02	0,05	0,10	0,15	0,20	0,30	0,50	(výdržný postup)
p =	0,99	0,98	0,95	0,90	0,85	0,80	0,70	0,50	(výbojový postup)

Při zkoušce metodou nahoru-dolů se získá odhad U_p , který je dán aproximačním vzorcem:

$$U_p^* = \sum_{i=1}^l \frac{(k_i \cdot U_i)}{m} \quad (2.1)$$

- k_i počet skupin namáhání
- U_i napěťová hladina
- m počet platných skupin

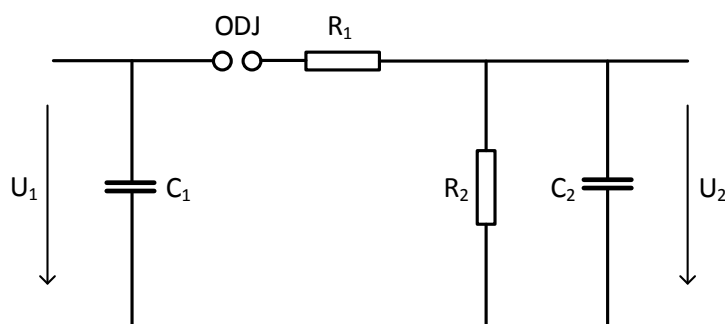
2.2.3 Třída 3: Zkoušky postupným namáháním

Při zkoušce třídy 3 se zkušební napětí postupně nebo po krocích zvyšuje, až se dosáhne

průrazného výboje. Uvedený postup se provede n -krát. Je možné také udržovat konstantní hladinu, dokud se v určitém čase nedosáhne průrazného výboje. Daná třída měření nebyla v této práci použita, více lze nalézt v příslušných normách. [16]

2.3 Rázový generátor napětí

Pro generování atmosférického impulsu napětí je potřebný speciální generátor. Jedná se o rázový generátor napětí. Na *Obr. 2.2* je zobrazeno principiální schéma. Čelní odpor R_1 má vliv na tvar čela, zatímco odpor R_2 má vliv na průběh týlu. Oddělovací jiskřiště, na kterém vzniká elektrický oblouk, slouží jako spínací prvek. [9]



Obr. 2.2 Principiální schéma rázového generátoru [9]

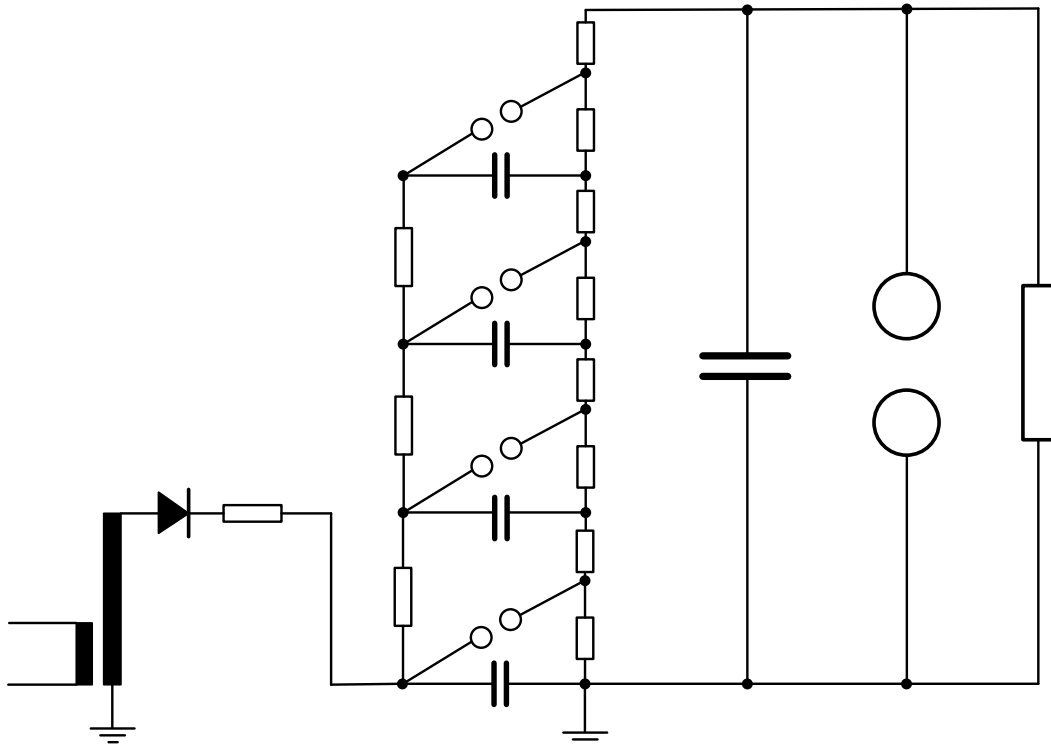
- C_1 hlavní nebo aktivní kapacita
- C_2 zatěžovací kapacita
- R_1 čelní odpor
- R_2 týlní odpor
- ODJ oddělovací jiskřiště

Pokud by se připojil kondenzátor C_2 paralelně ke kondenzátoru C_1 , který je nabitý na hodnotu napětí U_1 , nabil by se kondenzátor C_2 na napětí U_2 . V případě, že by se zanedbala indukčnost obvodu a čelní odpor R_1 byl nulový a zároveň týlní odpor R_2 byl nekonečně velký, nabil by se kondenzátor C_2 skokově na hodnotu napětí:

$$U_2 = U_1 \cdot \frac{C_1}{C_1 + C_2} \quad (2.2)$$

V případě, že oba odpory mají určité hodnoty, nabíjí se kondenzátor C_2 přes odpor R_1 a zároveň se vybíjí oba kondenzátory paralelně přes R_2 . Výsledný průběh napětí se skládá ze dvou exponenciál. Vhodným zvolením kondenzátorů a odporů lze určovat tvar a průběh napěťového impulsu na svorkách na kondenzátoru C_2 . [9]

Pro rázové generátory se používá vícestupňové zapojení. Na *Obr. 2.3* je vidět rázový generátor se čtyřmi stupni. Kapacita C_1 je tvořena řadou kondenzátorů C_1^* až C_n^* , v tomto případě až C_4^* . K nabíjení se používá stejnosměrný zdroj napětí. Kondenzátory jsou připojeny ke zdroji paralelně přes velké nabíjecí odpory a nabíjí se na napětí zdroje U_z . Ke spuštění rázového generátoru je nutné způsobit přeskok na prvním spouštěcím jiskřišti SJ_1 . Vzniklým obloukem se připojí k prvnímu kondenzátoru C_1^* i druhý kondenzátor C_2^* do série. Na druhém jiskřišti SJ_2 se objeví napětí blízké $2U_z$ a dojde k přeskoku. Takto se připojí i další jiskřiště. Jejich počet je dán návrhem generátoru. Výsledné napětí odpovídá hodnotě $n \cdot U_z$. Poté dojde k přeskoku na oddělovacím jiskřišti ODJ a další postup je stejný jako v případě jednostupňového generátoru. [9]



Obr. 2.3 Schéma vícestupňového rázového generátoru [9]

2.4 Atmosférické korekce

Pokud měření neprobíhá za přesných atmosférických podmínek, je nutné pro další porovnávání naměřených hodnot použít atmosférické korekce. Pro zkoušky za sucha jsou referenčními hodnotami teplota $t_0 = 20$ °C, absolutní tlak $p_0 = 101,3$ kPa a absolutní vlhkost $h_0 = 11$ g/m³. Pokud je měřené napětí $U_m < 72,5$ kV nebo přibližná vzdálenost mezery je $l < 0,5$ m, nemusí se provádět korekce na vlhkost, ale stačí jen korekce na hustotu vzduchu. V této práci je použita pouze korekce na hustotu vzduchu, která je:

$$k_1 = \delta^m \quad (2.3)$$

Dle norem je nutné určit exponent m , který může nabývat hodnoty od 0 do 1. Pro měření v této práci vyšlo pro všechna měření $m = 1$. Relativní hustota vzduchu se spočítá jako:

$$\delta = \frac{p}{p_0} \cdot \frac{273 + t_0}{273 + t} \quad (2.4)$$

Pro tento vztah je nutné zadávat teplotu ve stupních Celsia a tlak ve stejných jednotkách. Pokud se uvažuje pouze korekce na hustotu vzduchu k_1 , potom se naměřené napětí U přepočítá na korigované napětí U_{kor} vztahem:

$$U_{kor} = \frac{U}{k_1} \quad (2.5)$$

3 Praktické měření

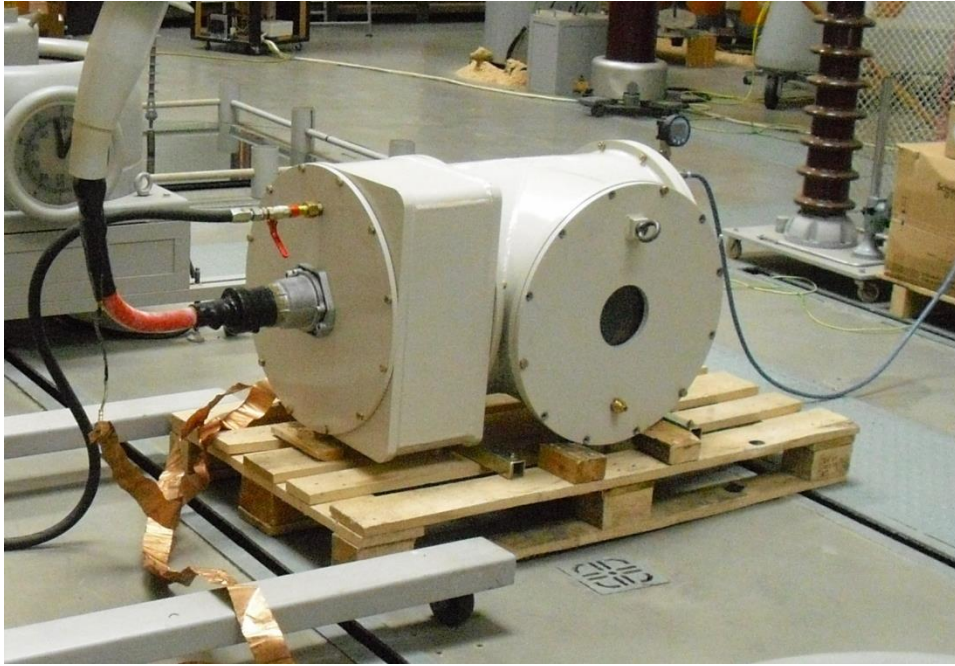
Měření probíhalo v laboratoři vysokého napětí, která spadá pod Elektrotechnickou fakultu Západočeské univerzity v Plzni. Laboratoř je vybavena rázovým generátorem od společnosti HAEFELY. Na *Obr. 3.1* je v popředí vidět ovládací pult rázového generátoru. Po pravé straně je umístěn osciloskop a vrcholový voltmetr.



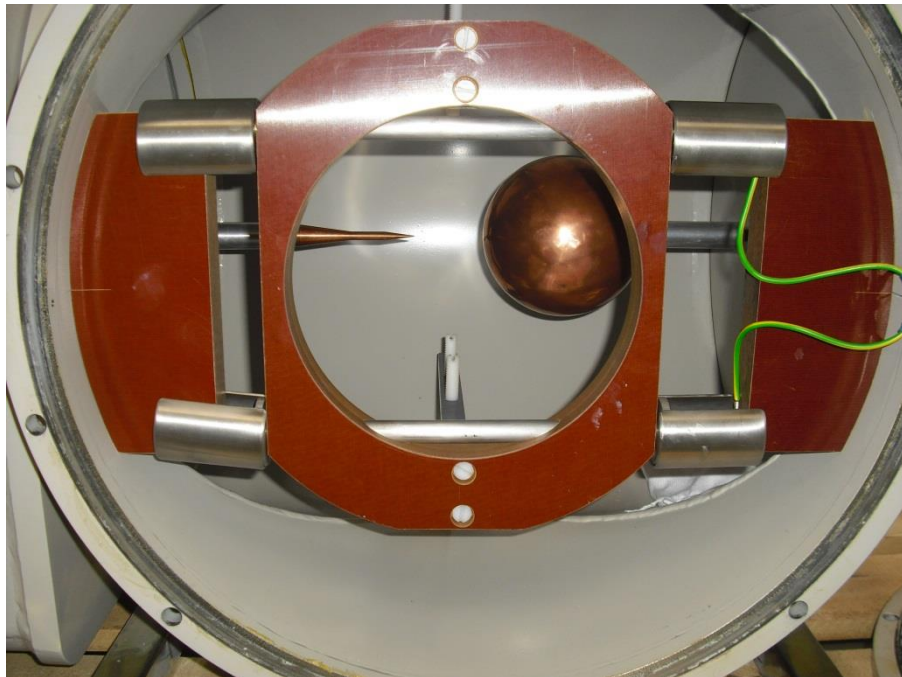
Obr. 3.1 Měřící pracoviště v laboratoři VN

Pro měření byla využita speciálně vytvořená testovací nádoba, která je zobrazena na *Obr. 3.2*. Vzdálenost elektrod je možné měnit i bez otevření nádoby. Levé uchycení elektrody, při pohledu do nádoby, je pevné. Během těchto měření zde byla namontována hrotová elektroda. Pravé uchycení je posunovatelné pomocí jezdce, který je vyveden z nádoby. Zde byla namontována kulová elektroda.

Nádoba je vybavena konstrukcí pro uchycení bariéry mezi elektrodami, která je vidět na *Obr. 3.3*. Celou konstrukci je možno posouvat pro přiblížení nebo oddálení bariéry k vybrané elektrodě. Bariéra je uchycena pomocí dvou plastových válců shora a dvou válců zdola. Nosiče mají výřezy, do kterých se bariéra vsadí.



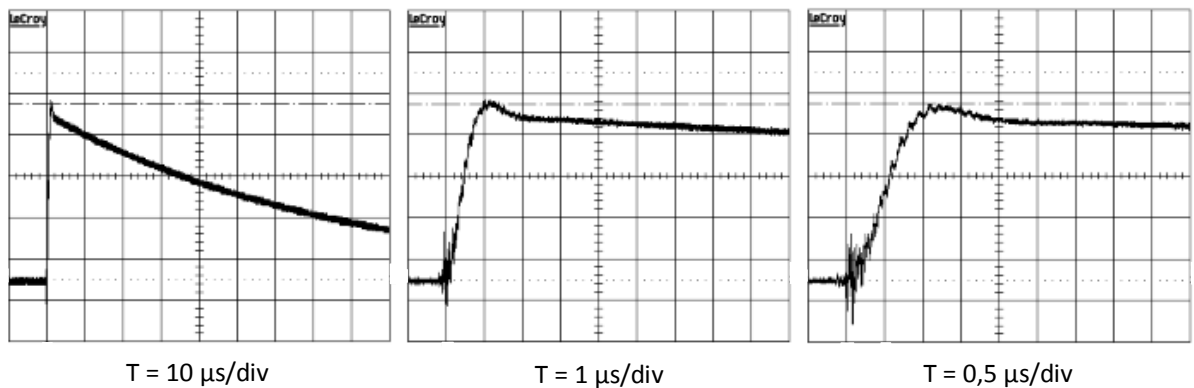
Obr. 3.2 Testovací nádoba s uzavřeným víkem



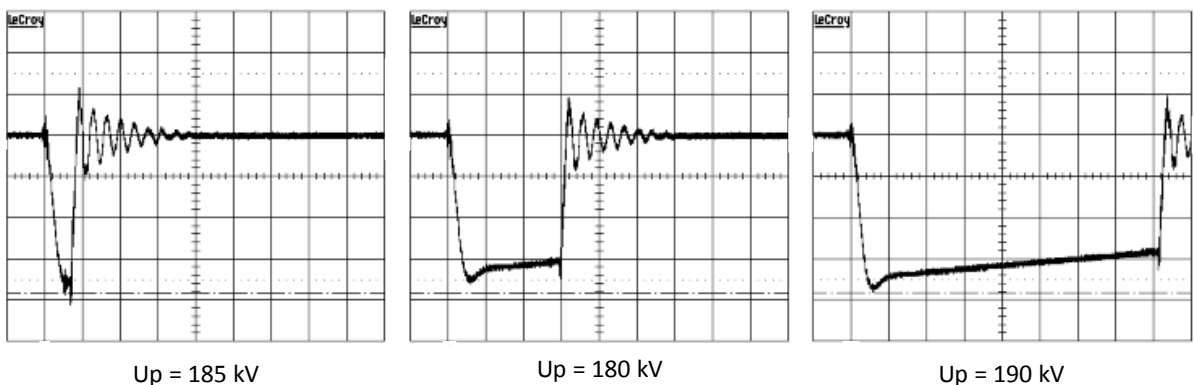
Obr. 3.3 Pohled na elektrody a nosnou konstrukci bariery v nádobě

Testovaným napětím byl normalizovaný atmosférický impulz 1,2/50. Polarita přivedeného impulzu byla kladná i záporná. Zdrojem atmosférických impulzů byl rázový generátor HAEFELY. Kladné impulzy zaznamenané osciloskopem LeCroy jsou vidět

na Obr. 3.4. V tomto případě jsou zobrazeny impulzy bez přeskoku. Impulz je zaznamenán s různým časovým rozložením. Na Obr. 3.5 jsou vidět záporné impulzy s přeskokem. Záznamy jsou pořízené v různých napěťových hladinách. Na prvním obrázku došlo k přeskoku v oblasti vrcholu impulzu. V druhých dvou případech došlo k přeskoku v týlu impulzu.



Obr. 3.4 Kladné impulzy bez přeskoku ($U_p = 110 \text{ kV}$)



Obr. 3.5 Záporné impulzy s přeskokem v různém čase t ($T = 2 \mu\text{s/div}$)

Pro měření chování plynných izolací s barierou bylo provedeno několik měření. Měření byla prováděna dle normy ČSN EN 60060-1 postupem třídy 1: Zkoušky více hladinami a postupem třídy 2: Zkoušky metodou nahoru-dolů.

Vzdálenost elektrod byla vždy stejná $d = 60 \text{ mm}$. Jako uzemněná elektroda byla použita kulová elektroda z mědi (Cu) o poloměru zakřivení $r = 75 \text{ mm}$. Elektrodou, na kterou bylo přivedeno impulzní napětí, byla ve většině případů hrotová elektroda z mědi (Cu) o poloměru $r = 0,5 \text{ mm}$. V několika případech byla použita hrotová elektroda z mědi (Cu)

o poloměru $r = 4$ mm. Použité elektrody jsou vidět na *Obr. 3.6*. Vlevo jsou hrotové elektrody R4 a R0,5. Vpravo je kulová elektroda společně s hrotovou R0,5.



Obr. 3.6 Použité elektrody

Jednotlivé testy byly prováděny za atmosférického tlaku. Víko nádoby bylo při každém měření zavřené. Jako plynné dielektrikum byl použit vzduch.

Bariera

Použitá bariera je tvořena z pevného materiálu Ultramid® A3X2G7 červené barvy. Bariera má čtvercový tvar o rozměrech 200 x 200 mm (V x Š). Tloušťka bariery je $h = 3$ mm. Na *Obr. 3.7* je vyfocená bariera po provedení všech testů. Na jejím povrchu jsou viditelné stopy od výbojů. Vpravo je bariera umístěná mezi elektrodami. Bariera byla umístěna v konstantní vzdálenosti $y = 1/3d$ z celkové vzdálenosti elektrod od hrotové elektrody. Střed bariery byl tedy umístěn ve vzdálenosti $d = 20$ mm od hrotové elektrody. Kvůli své šířce $h = 3$ mm byla vzdálenost mezi hrotem a povrchem bariery $d = 18,5$ mm, vzdálenost povrchu bariery od kulové elektrody byla $d = 38,5$ mm.

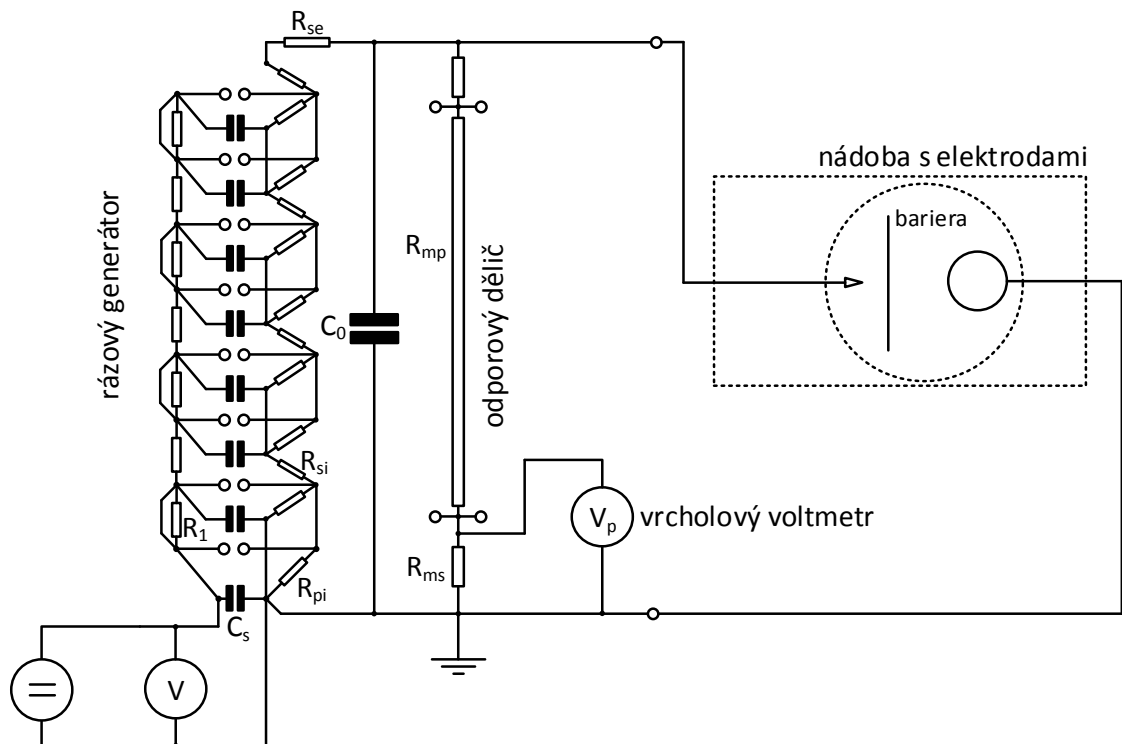


Obr. 3.7 Bariéra – vlevo mimo nádobu, vpravo mezi elektrodami

3.1 Schéma zapojení

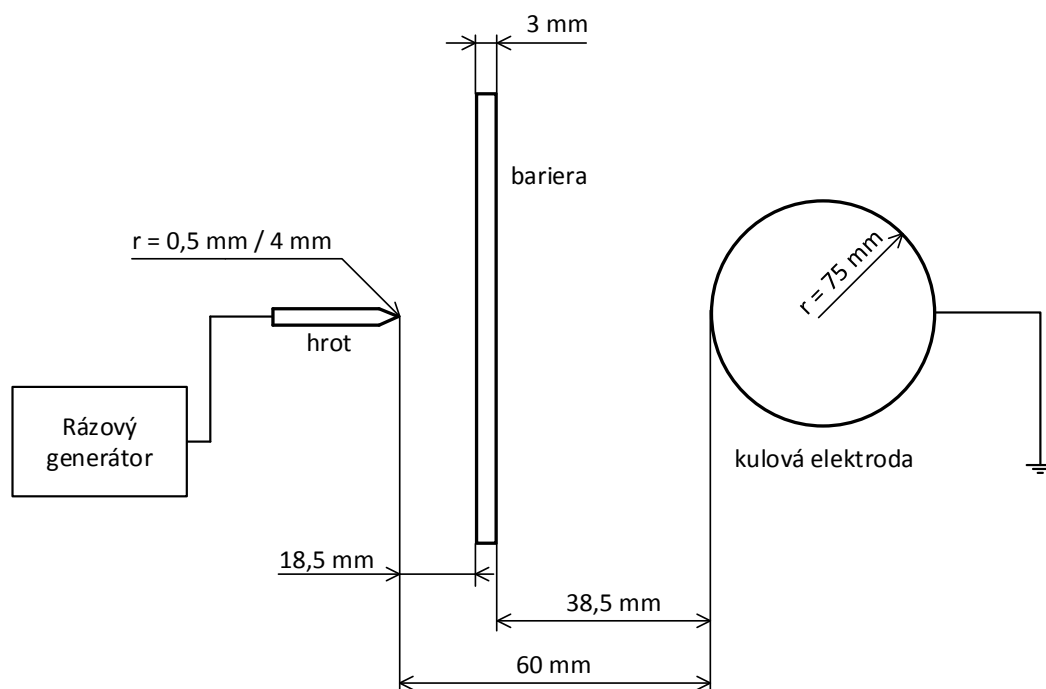
Na Obr. 3.8 je zobrazeno schéma zapojení. Jako zdroj byl použit rázový generátor HAEFELY v zapojení se čtyřmi stupni. Na jeho první stupeň byl přes odporový dělič připojen digitální multimetr V v režimu voltmetru. Převod odporového děliče byl 1:1000, zobrazované napětí na voltmetru bylo tedy v jednotkách V , ale skutečné nabíjecí napětí bylo v kV . Odporový dělič není kvůli přehlednosti ve schématu vyznačen. K výstupu rázového generátoru byl připojen stíněný rázový dělič, na který je připojen vrcholový voltmetr V_p pomocí koaxiálního kabelu s impedancí 75Ω a osciloskop.

Převod rázového děliče činí 530,3. Určen je odpory $R_{mp} = 19850 \Omega$, $R_{ms} = 75 \Omega$ a vlnovou impedancí koaxiálního kabelu $Z_k = 75 \Omega$.



Obr. 3.8 Schéma zapojení rázového generátoru a testovací nádoby s elektrodami

Na Obr. 3.9 je zobrazeno elektrodové rozložení s vloženou bariérou. Pozice bariéry je v $1/3$ z celkové vzdálenosti od hrotové elektrody. Hrotová elektroda je připojená k rázovému generátoru. Kulová elektroda je uzemněná.



Obr. 3.9 Umístění bariery mezi elektrodami

3.2 Postup měření

Před měřením bylo potřeba připravit nádobu. Pomocí jezdce vyvedeného z nádoby se nastavila vzdálenost elektrod na $d = 60$ mm. Poté se demontovalo víko, které je k nádobě upevněno pomocí patnácti šroubů. Další postup závisel na prováděném testu. Jako první byl prováděn test s hrotovou elektrodou o poloměru $r = 0,5$ mm a vloženou bariérou. Po otevření víka bylo nutné namontovat vybranou elektrodu. Kulová elektroda o poloměru $r = 75$ mm již byla instalovaná. Do konstrukce mezi elektrody se vsadila nová nepoužitá bariera. Bylo nutné ji umístit přesně. Poté se nastavila vzdálenost bariery od hrotové elektrody. Toho se dosáhlo posunutím celého nosiče bariery. Mezera mezi povrchem bariery a hrotovou elektrodou byla $d = 18,5$ mm. Aby se zajistila správná vzdálenost, použila se kombinace dvou etalonů o hodnotách $d = 10$ mm a $d = 8,5$ mm. Po zkontrolování správné instalace se namontovalo víko zpět na nádobu. Měření probíhalo v laboratoři vysokého napětí, bylo třeba dbát zvýšené opatrnosti a dodržovat bezpečnostní opatření.

Pro měření postupem třídy 1: Zkoušky více hladinami byl použit rázový generátor HAEFELY. Nejprve bylo nutné připravit nádobu pro dané měření, tj. nainstalovat vybrané elektrody a nainstalovat nebo případně vyjmout bariéru. Před měřením se odebrala zkratovací

tyč z rázového generátoru a uzavřely dveře laboratoře, které jsou opatřeny blokovacím kontaktem. Nejprve se prováděly testy s kladnou polaritou impulzu. Přepínač polarity je umístěn mezi ovládacím pultem rázového generátoru a nosným sloupem s kondenzátory a jiskřišti.

Pro zkoušky více hladinami byl dle požadavků zvolen počet přiložených napětí $n = 25$ pro každou napětěovou hladinu. Začínalo se na nižších hladinách bez přeskočků. Poté se napětěová hladina zvýšila o $\Delta U = 5 \text{ kV}$. Zvyšování hladiny pokračovalo, dokud nedošlo k přeskočků alespoň v 18 případech z 25 přiložených napětí.

Před každým měřením se zaznamenala hodnota tlaku v uzavřené nádobě a teplota a tlak v laboratoři. Pokud byla splněna všechna bezpečnostní opatření, zapnul se rázový generátor, digitální multimetr v režimu voltmetru měřící nabíjecí napětí rázového generátoru, voltmetr pro měření vrcholové hodnoty napětí a osciloskop. Rázový generátor je na čelní straně ovládacího panelu opatřen dvěma otočnými regulátory. Pravým se nastavuje nabíjecí napětí aktivní kapacity generátoru, levým se mechanicky přibližují elektrody jiskřiště. Hodnota napětí na generátoru se odečítala z voltmetru, který byl k němu připojen. Napětí se nastavilo na určitou hodnotu, a poté se pomocí levého regulátoru přiblížily elektrody jiskřiště, což způsobilo sepnutí obvodu a na měřený prvek byl přiveden atmosférický impulz napětí. Prodlevy mezi jednotlivými přiloženými napětími byly pro každé měření konstantní. Po každém impulzu se zaznamenala vrcholová hodnota napětěového impulzu pomocí vrcholového voltmetru. Tvar impulzu s případným přeskočkem se kontroloval na osciloskopu. Ten podával informaci, jestli došlo k přeskočků a pokud ano, tak v jakém místě impulzu. Pro měření byly použity dva osciloskopy. Nejdříve osciloskop značky Tektronix a později novější LeCroy, ze kterého bylo možné ukládat záznamy obrazovky.

Pro měření postupem třídy 2: Zkoušky metodou nahoru-dolů zůstalo zapojení stejné jako v případě měření postupem třídy 1. Obsluha zařízení byla totožná.

Počet přiložených napětí při určité napětěové hladině byl $n = 1$. Výsledkem je odhad hodnoty napětí s 50% pravděpodobností přeskočků. Krok pro změnu napětěových hladin byl $\Delta U = 5 \text{ kV}$. Nejprve se přivedl napětěový impulz na nižší hladině bez přeskočků. Poté se zvyšovala napětěová hladina po krocích ΔU do přeskočků. Přeskočků se zaznamenal a napětěová hladina se snižovala po krocích ΔU , dokud se neobjevil impulz bez přeskočků. Poté se hladina opět zvyšovala. Počet přiložených napětí se lišil podle vývoje měření.

Všechna měření probíhala podle postupu třídy 1: Zkoušky více hladinami nebo třídy 2: Zkoušky metodou nahoru-dolů. Pro výměny elektrod nebo instalaci bariéry bylo vždy nutné otevřít víko nádoby.

3.3 Použité přístroje

Rázový generátor HAEFELY 600 kV – 4 kJ

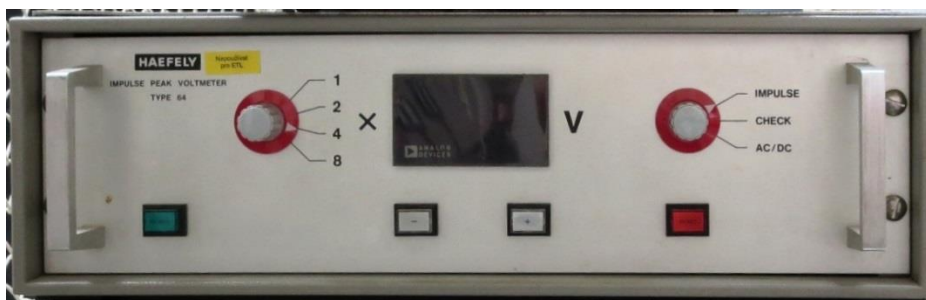
Pro vytvoření rázového napětí 1,2/50 byl použit rázový generátor ve velké laboratoři vysokého napětí, který je vidět na *Obr. 3.10*. Jedná se o pojízdný generátor, který je umístěn na podvozku společně s ovládacím pultem. Má 8 stupňů a je možné dosáhnout maximálního napětí 600 kV. Při měření bylo použito zapojení se čtyřmi stupni s maximálním napětím 300 kV.



Obr. 3.10 Rázový generátor HAEFELY

Vrcholový voltmetr HAEFELY

Pro měření vrcholové hodnoty napětí impulzu byl použit vrcholový voltmetr HAEFELY Impulse peak voltmeter Type 64, který je vidět na *Obr. 3.11*. Označení ZČU 37973.



Obr. 3.11 Vrcholový voltmetr HAEFELY Type 64

Jako voltmetr pro měření nabíjecího napětí na rázovém generátoru byl použit digitální multimetr MetraHit 14S s označením 42775.

Osciloskop

Pro zobrazení rázového impulzu byly použity dva osciloskopy. Nejdříve starší Tektronix TDS 460 s označením ZCU 12066, a poté novější digitální osciloskop LeCroy Wavepro 950 s označením ZCU 21183. Zobrazeny jsou na *Obr. 3.12*.



Obr. 3.12 Vlevo Tektronix TDS 460, vpravo LeCroy Wavepro 950

3.4 Zpracování výsledků měření

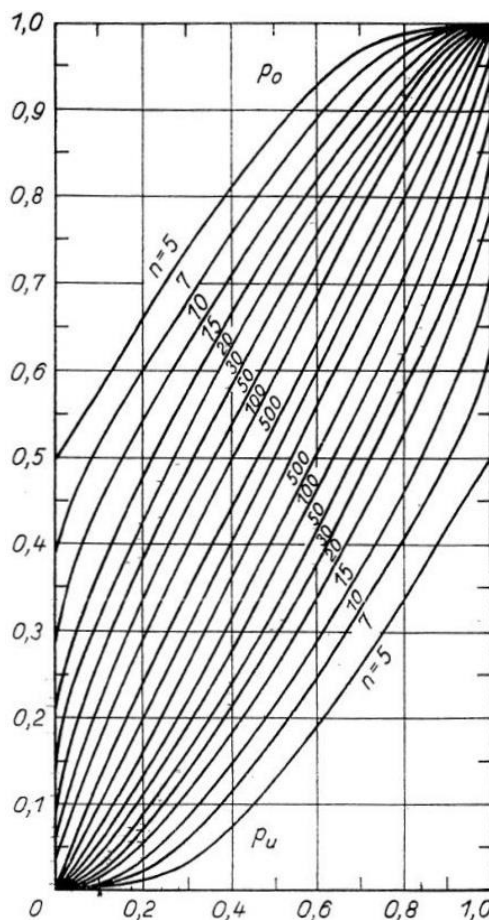
Přeskok byl vždy veden okolo bariéry. Testovací nádoba je opatřena digitálním manometrem, který zobrazuje velikost tlaku v jednotkách *bar*. Výsledné hodnoty v této práci jsou přepočítány na jednotky *kPa*, s převodním vztahem $1 \text{ bar} = 101,3 \text{ kPa}$.

Vrcholový voltmetr od společnosti HAEFELY type 64 byl nastaven pro měření impulzů s rozsahem 4x. Připojen byl k rázovému děliči s převodem 530,3. K přepočtu naměřené hodnoty na skutečnou byla použita kalibrační přímka se vztahem:

$$y = 20719 \cdot x + 4,8 \quad (3.1)$$

Skutečné hodnoty jsou dále přepočítané s korekcí na hustotu vzduchu. Hodnoty jsou uvedeny v tabulkách, viz *Přílohy*.

Pro statistické vyhodnocení měření podle postupu třídy 1: Zkoušky více hladinami, byl použit pravděpodobnostní papír s Gaussovo rozdělením. Horní a dolní meze spolehlivosti se stanovily z grafu na *Obr. 3.13* se spolehlivostním koeficientem $\varepsilon = 0,95$.



Obr. 3.13 Graf pro stanovení mezí spolehlivosti [17]

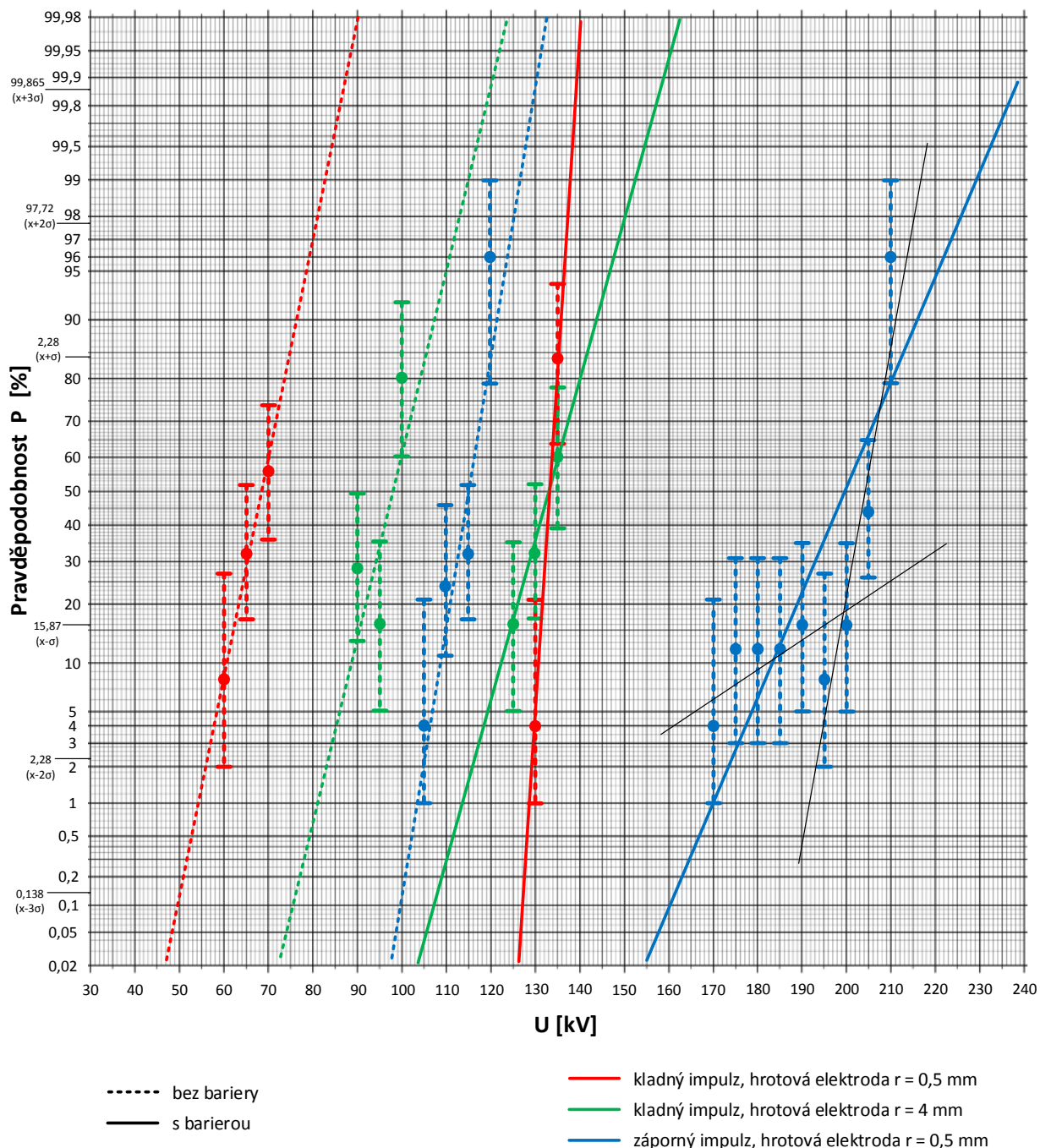
3.5 Zkoušky více hladinami

Při zkouškách více hladinami bylo celkem změřeno 7 testů. Měření probíhalo vždy s 25 atmosférickými impulzy na dané napět'ové hladině. Prodleva mezi jednotlivými impulzy byla konstantní. Měření probíhalo vždy s uzavřenou nádobou. Cílem bylo zjistit vliv bariery na přeskokové napětí při různém poloměru zakřivení hrotových elektrod. Dále rozdíl přeskokových napětí s kladnou a zápornou polaritou při vložené bariéře a vliv změny časové prodlevy mezi jednotlivými impulzy. Vzdálenost elektrod byla konstantních $d = 60$ mm, a pokud byla bariera vložena, nacházel se její střed vždy ve vzdálenosti $d = 20$ mm od hrotové elektrody.

Na *Obr. 3.14* jsou graficky zpracovány výsledky měření více hladinami. Výsledky jsou vyneseny na pravděpodobnostním papíru s Gaussovo rozdělením. Červenou barvou jsou zobrazena měření s hrotovou elektrodou $r = 0,5$ mm a kladnou polaritou impulzu. Zelenou barvou jsou zvýrazněna měření s hrotovou elektrodou o poloměru $r = 4$ mm a kladnou polaritou přiváděného impulzu. Modrou barvou jsou vyznačena měření s použitím hrotové elektrody $r = 0,5$ mm se zápornou polaritou impulzu. Čárkovanou čarou jsou znázorněna měření bez vložené bariery, zatímco plná čára znázorňuje měření s bariérou. Vertikálními úsečkami okolo bodů jsou vyznačeny spolehlivostní meze získané z *Obr. 3.13* pro $n = 25$. Jelikož není pro tento počet přiložených napětí v grafu samostatná křivka, byla hodnota spolehlivostních mezí odhadnuta z oblasti mezi $n = 20$ a $n = 30$. Údaje osy x jsou vrcholové hodnoty napětí. Všechna tato měření proběhla s časovou prodlevou $t = 30$ s. Mezi těmito výsledky není zahrnuto měření s větší časovou prodlevou, to je zpracováno až v další části.

Výsledné čáry jsou pouze odhadem pravděpodobnosti přeskoku. V některých případech jako například u hrotové elektrody $r = 4$ mm bez bariery vyšla pravděpodobnost přeskoku na vyšší napět'ové hladině nižší než na hladině předchozí. Výsledný odhad se ale nachází v mezích spolehlivosti a má rostoucí trend.

Z grafů je možné odečíst odhad pravděpodobnosti přeskoku při určité napět'ové hladině nebo naopak. Například pro elektrodu $r = 0,5$ mm bez bariery je 10% pravděpodobnost přeskoku přibližně při napětí $U_{10} = 60$ kV. Padesátiprocentní pravděpodobnost přeskoku nastává při napětí $U_{50} = 68$ kV a 90% pravděpodobnost odpovídá přibližně $U_{90} = 76$ kV.

Obr. 3.14 Zkoušky více hladinami při prodlevě mezi impulzy $t = 30$ s

3.5.1 Vliv změny poloměru zakřivení hrotové elektrody

Z grafu je vidět patrný vliv druhu elektrod s vloženou a bez vložené bariéry. Změnu elektrod znázorňují červené a zelené čáry. Pole při elektrodovém zapojení hrotové elektrody proti kulové, v tomto případě s poloměrem $r = 75$ mm, je silně nehomogenní. Při použití hrotové elektrody $r = 0,5$ mm je pole více nehomogenní než při použití elektrody $r = 4$ mm.

Předpokladem tedy bylo, že přeskokové napětí bude ve více homogenním poli vyšší. Bez použití bariéry se tento předpoklad potvrdil. Zatímco u menší z elektrod je $U_{50} = 68$ kV, u větší elektrody je odhad přeskokového napětí s 50% procentní pravděpodobností přibližně $U_{50} = 98$ kV. Rozdíl je tedy 30 kV. Vložená bariera by měla pole více homogenizovat a zvýšené přeskokové napětí by mělo být méně závislé na druhu elektrody. Tento jev se potvrdil. Elektrická pevnost u obou druhů elektrod vzrostla a navíc se vyrovnala. Při 50% pravděpodobnosti přeskoku je hodnota přeskokového napětí v obou případech shodná, a to $U_{50} = 133$ kV. Čára při měření s elektrodou $r = 0,5$ mm má větší strmost. Jelikož se jedná o odhad a rozložení přeskoků bylo jen na dvou až třech měřených hladinách, lze tyto výsledky označit jako shodné.

Potvrdil se vliv bariéry, která ze silně nehomogenního pole vytvořila pole více homogenní. V tomto případě byl výsledný rozdíl přeskokového napětí zanedbatelný v závislosti na poloměru zakřivení elektrod a míře homogenity.

3.5.2 Vliv polarity impulzu

Vliv polarity je vidět z červených a modrých čar. Při porovnání polarity byla vždy použita hrotová elektroda $r = 0,5$ mm. Předpokladem bylo, že bez vložené bariéry by mělo být přeskokové napětí mnohem vyšší se záporným impulzem. To se potvrdilo. Oproti přeskokovému napětí $U_{50} = 68$ kV při kladném impulzu bylo při záporném impulzu $U_{50} = 115$ kV. Podle teoretického základu by se v případě použití bariéry měla hladina přeskokového napětí přibližně srovnat, nebo být dokonce vyšší při kladném napětí. To se při tomto měření nepotvrdilo. Hodnota přeskokového napětí byla při použití záporného impulzu bez bariéry nižší oproti kladnému impulzu s bariérou přibližně jen o $U = 20$ kV. Bariera při záporném impulzu zvýšila přeskokové napětí na $U_{50} = 200$ kV. Tato hodnota je o třetinu vyšší než v případě kladného impulzu s bariérou. Podle předpokladů ale nebyl vliv bariéry relativně tolik účinný jako v případě kladného impulzu. Zatímco s kladným impulzem se s bariérou přeskokové napětí zvýšilo přibližně dvojnásobně, se záporným impulzem zvýšila bariera přeskokové napětí o trochu méně než dvojnásobek. Rozdíl ale není nijak velký.

Důvodem je zřejmě konkrétní zapojení a použitá bariera. Při větší vzdálenosti elektrod by se zřejmě rozdíl mezi kladnou a zápornou polaritou impulzu s bariérou snižovaly. To by ale bylo potřeba ověřit dalšími testy.

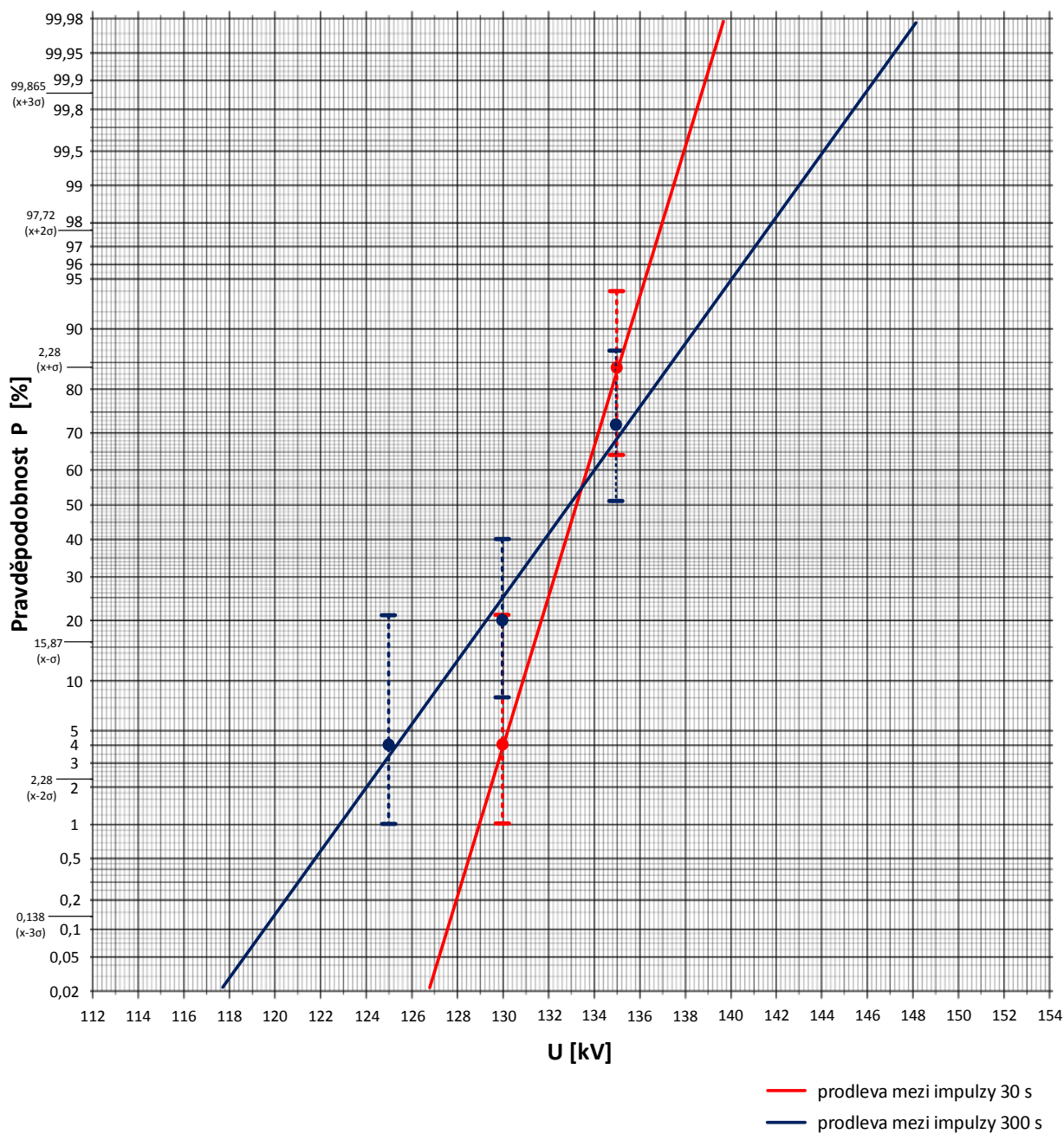
U měření se záporným impulzem a vloženou bariérou se výsledná čára nevešla mezi stanovené meze spolehlivosti se spolehlivostním koeficientem $\varepsilon = 0,95$. Je zde předpoklad

dvou rozdílných mechanismů přeskoků, který při tomto měření nastal. Přibližné trendy těchto dvou mechanismů jsou v *Obr. 3.14* znázorněny černými čarami. Jak je patrné z grafu, od hodnoty $U = 170$ kV do $U = 200$ kV se počet přeskoků při přiložených napětích $n = 25$ pohyboval mezi 1 až 4 přeskoky. Při napětí $U = 205$ kV se počet přeskoků začal zvyšovat mnohem rychleji. V této hladině bylo dosaženo 11 přeskoků z $n = 25$. Při napětí $U = 210$ kV byl počet přeskoků již 24. Tento test byl ověřen dalším pomocným testem s téměř shodnými výsledky.

3.5.3 Vliv časové prodlevy mezi jednotlivými impulzy

Pro zjištění vlivu rozdílné časové prodlevy mezi přiloženými napěťovými impulzy proběhlo k předešlým měřením ještě další měření s prodlevou $t = 300$ s (5 minut). Nádoba byla po celou dobu testu uzavřena. Větší časová prodleva by byla problematická z časové náročnosti na prováděné testy.

Test byl prováděn v porovnání s časovou prodlevou $t = 30$ s. Na *Obr. 3.15* je graficky znázorněn odhad pravděpodobnosti přeskoků při obou časových prodlevách. Měření proběhlo s vloženou barierou a hrotovou elektrodou s poloměrem hrotu $r = 0,5$ mm. Tento test je pro větší přehlednost znázorněn v jiném grafu než předešlé testy.



Obr. 3.15 Zkoušky více hladinami s rozdílnou časovou prodlevou (hrot $r = 0,5$ mm, bariera)

Vliv různé časové prodlevy mezi jednotlivými impulzy se neprojevil. Jak je vidět na Obr. 3.15, tmavě modrá čára znázorňující test s prodlevou $t = 300$ s je méně strmá, k přeskokům došlo již na hladině $U = 125$ kV, zatímco pro prodlevu $t = 30$ s až na hladině $U = 130$ kV. Lze říci, že zkrácení časové prodlevy mezi impulzy nemá vliv na velikost přeskovového napětí. V obou případech je odhad 50% pravděpodobnosti přeskoků přibližně $U_{50} = 133$ kV.

3.6 Zkoušky nahoru-dolů

Pro ověření výsledků a zjištění závislostí pro možné porovnání bylo provedeno 5 testů metodou nahoru-dolů. Oproti předchozí zkoušce více hladinami byla vynechána závislost na poloměru zakřivení hrotové elektrody. Všechny testy proběhly s elektrodou o $r = 0,5$ mm. Pro zjištění závislosti na časové prodlevě byla prodleva snížena z $t = 300$ s na $t = 120$ s. Zkoušky se zápornou polaritou proběhly nejdříve metodou nahoru-dolů, a poté metodou více hladinami. Snadněji se lokalizovala oblast napětí, kdy se začaly objevovat přeskoky. Z metody nahoru-dolů lze také odhadnout, zda se se zvyšujícím počtem přeskoků mění napěťové hladiny s přeskoky. Testy probíhaly s uzavřenou nádobou.

Vysvětlení k tabulkám pro metodu nahoru-dolů je uvedeno v *Tab. 3.1*. Výpočet U_{50} je uveden v kapitole 2.2.2 (Třída 2: Zkoušky metodou nahoru-dolů) v rovnici (2.1).

Tab. 3.1 Vysvětlení použitých zkratk a značení pro metodu nahoru-dolů

x	impulz s přeskokem
0	impulz bez přeskoků
k_j	počet změřených skupin
i	počet přijatých napětí
k_i	počet přijatých skupin
Σx	počet přeskoků na dané hladině U_i
ppst x	pravděpodobnost přeskoků na dané hladině U_i
u_i	napětí přijatých skupin
m	celkový počet přijatých skupin
U_{50}	napětí s 50% pravděpodobností přeskoků

3.6.1 Měření metodou nahoru-dolů s vloženou barierou

Tab. 3.2 LI66 (R0,5B, bariera, prodleva $t = 30$ s, kladná polarita impulsu)

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	26	27	28	29	30	31	32	
140	x								x																							x	
135		x		x		x		0		x		x		x		x		x		x				x		x		x		0		x	
130			0		0		0					0		0		0		0		0		x		0		0		0		0			
125																							0										

U [kV]	k_j	i	k_i	Σx	ppst x [%]	u_i	m	$k_i \cdot u_i$	U_{50} [kV]
140	3	3	3	3		140	31	420	133,4
135	15	2	15	13	87	135		2025	
130	13	1	13	1	8	130		1690	
125	1			0					

V *Tab. 3.2* je znázorněn průběh testu s barierou a kladnou polaritou impulzů. Změřeno bylo 32 hodnot. Měřené hladiny stále kolísaly s malým rozptylem okolo $U = 130$ kV a $U = 135$ kV. Při porovnání jednotlivých hladin vychází při $U = 130$ kV odhad pravděpodobnosti přeskočení 8 %. Z odhadu z grafu více hladinami vychází $U_8 = 130,6$ kV. Při $U = 135$ kV je pravděpodobnost přeskočení již 87 %. Z odhadu z grafu více hladinami vychází $U_{87} = 135,4$ kV. Tyto hodnoty jsou určeny z jednotlivých hladin znázorněných v *Tab. 3.2* pro metodu nahoru-dolů a z grafu *Obr. 3.15* Zkoušky více hladinami s rozdílnou časovou prodlevou (hrot $r = 0,5$ mm, bariera) pro zkoušky více hladinami. Vypočítaná hodnota metodou nahoru-dolů při $n = 1$ je napětí s pravděpodobností přeskočení 50 %. Z tohoto měření vyšlo $U_{50} = 133,4$ kV. Při měření více hladinami vyšlo $U_{50} = 133$ kV. Výsledky obou metod jsou téměř shodné.

Tab. 3.3 LI67 (R0,5B, bariera, prodleva $t = 120$ s, kladná polarita impulzu)

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	26	27	28	29	30
140				x				x								x								x				x		
135	x		0		x		0		x		x		x		0		x		x				0		x		0		x	
130		0				0				0		0		0				0		x		0				0				0
125																						0								

U [kV]	k_j	i	k_i	Σx	ppst x [%]	u_i	m	$k_j \cdot u_i$	U_{50} [kV]
140	5	3	5	5		140	29	700	134,1
135	14	2	14	9	64	135		1890	
130	10	1	10	1	10	130		1300	
125	1			0					

V *Tab. 3.3* je znázorněn průběh testu s barierou a kladnou polaritou impulzů s vyšší časovou prodlevou mezi přeskoky $t = 120$ s. Změřeno bylo 30 hodnot. Měření vychází velmi podobně jako v případě testu s prodlevou $t = 30$ s. Rozptyl hodnot je o něco větší. Při porovnání jednotlivých hladin vychází při $U = 130$ kV odhad pravděpodobnosti přeskočení 10 %. Při $U = 135$ kV je pravděpodobnost přeskočení 64 %. To poukazuje na pozvolnější nárůst oproti předchozímu testu. Stejně tak v případě metody více hladin byla při delší prodlevě strmost čáry menší. Při prodlevě $t = 30$ s vyšlo $U_{50} = 133,4$ kV. Při prodlevě $t = 120$ s bylo $U_{50} = 134,1$ kV. Tato hodnota je vyšší, ale rozdíl je velice malý a nelze určit, zda je způsoben změnou prodlevy. Vliv změny času mezi jednotlivými impulzy se zde neprojevil stejně jako v případě zkoušky více hladinami.

U metody nahoru-dolů vyšlo $U_{77} = 120$ kV a $U_{29} = 115$ kV. Z grafu Obr. 3.14 lze odečíst z měření více hladinami pro pravděpodobnost přeskočení 77 % napětí $U_{77} = 119$ kV. Pravděpodobnost přeskočení 29 % odpovídá $U_{29} = 112$ kV. Oba tyto testy probíhaly v jeden den. Mezi nimi byl vložen ještě jeden test nahoru-dolů. Výjimečně mezi těmito testy nebylo otevřeno víko. Důvodem byla časová náročnost a předpoklad vyplývající z předcházejících měření, že počet přeskoků při prvních dvou testech nahoru-dolů neovlivní následná měření.

Tab. 3.6 LI72 (R0,5B, bez bariery, prodleva $t = 30$ s, kladná polarita impulzu)

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	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38		
75																							x																	
70				x						x		x				x				x		0		x		x											x			
65	x		0		x				0		0		x		0		x		0		0				0		x		x						0		x			
60		0				x		0						0				0											0		x		x		0				0	
55							0																																	

U [kV]	k_j	i	k_i	Σx	ppst x [%]	u_i	m	$k_i \cdot u_i$	U_{50} [kV]
75	1			1		75	37		64,1
70	9	4	9	8	89	70		630	
65	15	3	15	7	47	65		975	
60	10	2	10	3	30	60		600	
55	3	1	3	0		55		165	

V Tab. 3.6 je uveden test s kladnou polaritou bez bariery. Hodnoty jsou oproti měření s bariérou rozloženy na více napěťových hladinách. Zaznamenáno bylo 38 hodnot, z toho 37 hodnot bylo použito pro výpočet. Na hladině $U = 75$ kV byl výskyt pouze jednoho přeskočení. Pravděpodobnost přeskočení 50 % vyšla $U_{50} = 64,1$ kV. V měření více hladinami byla tato hodnota vyšší, a to $U_{50} = 68$ kV. Rozdíl není nijak významný.

3.6.3 Porovnání měření metodou nahoru-dolů s metodou více hladinami

Výsledky mezi měřeními se stejnými parametry vyšly téměř shodně. Ukázalo se, že obě metody v tomto měření dokážou podat vzájemně odpovídající výsledky. Výhodou metody nahoru-dolů je nižší časová náročnost. Při dalších měřeních by bylo možné provést všechny testy metodou nahoru-dolů a metodu více hladinami použít jen u vybraných měření.

Rozdíl atmosférických podmínek byl během všech měření oběma metodami malý. Korekční činitel na hustotu vzduchu pro teplotu $t = 20$ °C a tlak $p = 101,3$ kPa se pohyboval během všech měření od $k_1 = 0,9279$ do $k_1 = 0,9479$. Uvedené výsledky nejsou přepočítané. Přepočítané hodnoty s korekcí na hustotu vzduchu a korekční činitele všech testů jsou uvedeny u jednotlivých naměřených dat v příloze.

Závěr

Cílem této práce bylo zjistit, jaký vliv má pevná bariera na chování plynného izolantu. Vliv bariery je stálý a snadno reprodukovatelný. Využití nalezne bariera u plynných, kapalných i pevných látek. Použitelná je pro stejnosměrné, střídavé i rázové napětí. Vzdálenost elektrod může být v řádech milimetrů, ale i desítek centimetrů. Její chování je známo, základní princip také, ale stále se nejedná o plně vysvětlený jev.

V teoretické části jsou shrnuty vybrané vlastnosti plynných dielektrik a zpracována problematika izolačních bariér v plynných izolacích. Bariera se používá v nehomogenních polích pro zvýšení elektrické pevnosti. Vliv bariery není dán její tloušťkou, ale možností akumulace náboje na jejím povrchu. Účinné jsou proto i bariery z tenkého papíru. K přeskoku může dojít vytvořením výboje okolo bariery, což se dělo při tomto měření, nebo průrazem bariery. Podle publikovaných testů se ukázalo, že k průrazu dochází v různém místě bariery nezávisle na předchozím průrazu. Další výzkum se zabýval například vlivem otvorů v bariéře, které do určitých rozměrů ovlivňují působení bariery jen z důvodů zmenšení povrchu pro zachycení náboje.

Podle výsledků zkoušek více hladinami, které byly vyhodnocovány na pravděpodobnostním papíru s Gaussovo rozdělením, je vliv bariery jednoznačný. U měření s hrotovou elektrodou s poloměrem zakřivení $r = 0,5$ mm se při kladné polaritě zvýšilo přeskokové napětí z hodnoty $U_{50} = 68$ kV na $U_{50} = 133$ kV. S použitím hrotové elektrody $r = 4$ mm bylo $U_{50} = 98$ kV bez bariery a $U_{50} = 133$ kV s bariérou jako v případě elektrody s menším zakřivením. To znamená, že bariera opravdu homogenizovala pole a elektrická pevnost nezávisí na poloměru zakřivení hrotové elektrody.

Zjišťováno bylo také, zda má na hodnotu přeskoku vliv doba prodlevy mezi jednotlivými impulzy. Při delší době prodlevy se dá předpokládat snížení vlivu ionizace, což by přispělo ke zvýšení elektrické pevnosti. Naopak se sníží množství náboje naakumulovaného na bariéře z předchozích impulzů, což by mělo snížit přeskokové napětí. Rozdíl hladin přeskokového napětí v závislosti na prodlevě, která byla zvolena $t = 30$ s a $t = 300$ s při kladné polaritě napětí, se neprojevil. Další testy je tedy možné provádět při nižších časových prodlevách, které jsou časově méně náročné.

Dalším zjišťovaným údajem byl rozdíl odhadu pravděpodobnosti při záporné polaritě impulzu. Přeskokové napětí bylo bez vložené bariery dle předpokladu vyšší se zápornou polaritou oproti kladné polaritě. Zvýšilo se z $U_{50} = 68$ kV při kladném impulzu na $U_{50} = 115$ kV při záporném impulzu. Při vložené bariéře se předpokládaly více vyrovnané

hodnoty. S barierou se zvýšil odhad pravděpodobnosti z $U_{50} = 133$ kV s kladným impulzem na $U_{50} = 200$ kV se záporným impulzem. Důvodem odlišnosti oproti předpokladům, které měly být více rovnoměrné, by mohl být přeskok nikoli průrazem skrz barieru, který byl obvyklý při popisu jevu v literatuře, ale okolo bariery. Při záporné polaritě impulzu s barierou došlo zřejmě k výstavbě přeskokového výboje dvěma různými mechanismy.

Zkouškami nahoru-dolů byly porovnány výsledky se zkouškami více hladinami. Výsledné hodnoty jsou si velmi blízké. Výhodou metody nahoru-dolů v tomto měření byla nižší časová náročnost. Na druhou stranu byly při tomto měření zjišťovány pouze hodnoty napětí s 50% pravděpodobností přeskočení, které jsou časově nejméně náročné. Ostatní hodnoty jsou jen odhadnuty z dostupných dat. Při testech metodou nahoru-dolů se ukázalo, že přeskokové napětí nebylo při provedených měřeních závislé na počtu předešlých přeskoků.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] MENTLÍK, Václav. *Dielektrické prvky a systémy*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2006, 235 s. ISBN 80-7300-0189-6.
- [2] ŠAVEL, Josef. *Elektrotechnologie: materiály, technologie a výroba v elektronice a elektrotechnice*. 4., rozš. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2005, 314 s. ISBN 978-80-7300-190-2.
- [3] LIPTÁK, Jan a Josef SEDLÁČEK. *Úvod do elektrotechnických materiálů*. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2008, 168 s. ISBN 80-010-3191-8.
- [4] HASSDENTEUFEL, Josef. *Elektrotechnické materiály*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1967, 857 s.
- [5] REVIL, A. a P. W. J. GLOVER. Nature of surface electrical conductivity in natural sands, sandstones, and clays. *GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS* [online]. 1998, Vol. 25, No. 5, s. 691-694 [cit. 2014-01-09]. Dostupné z: http://www.researchgate.net/publication/228078067_Nature_of_Surface_Electrical_Conductivity_in_Natural_Sand_s_Sandstones_and_Clays/file/79e4150e4b912b9520.pdf
- [6] VEVERKA, Antonín. *Technika vysokých napětí*. 3. přepr. vyd. Praha: SNTL, 1982, 301 s.
- [7] KUBEŠ, Pavel. *Impulsní silnoproudé výboje a jejich diagnostika*. Praha: FEL ČVUT, 2004, 83 s. Dostupné z: <http://www.aldebaran.cz/studium/vyboje.pdf>
- [8] MALIK, N, A AL-ARAINY a M QURESHI. *Electrical insulation in power systems*. New York: Marcel Dekker, c1998, xii, 394 p. ISBN 08-247-0106-2.
- [9] RUSŇÁK, Štěpán, VEBR, Vladislav. *Laboratorní měření v technice vysokého napětí*. 1. vyd. Plzeň: VŠSE, 1972, 97 s.
- [10] ARTBAUER, Ján, Juraj ŠEDOVIČ a Vladimír ADAMEC. *Izolanty a izolácie*. 1. vyd. Bratislava: Alfa, 1969, 619 s.
- [11] LEBEDEV, S.M., O.S. GEFLE a Y.P. POKHOLKOV. The barrier effect in dielectrics: the role of interfaces in the breakdown of inhomogeneous dielectrics. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* [online]. 2005, vol. 12, issue 3, s. 537-555 [cit. 2014-04-12]. DOI: 10.1109/TDEI.2005.1453459. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1453459>
- [12] CORNICK, K.J., I.D. COUPER a Z. GUAN. Flashover characteristics of barrier insulation under uni-directional and bi-directional oscillatory impulse voltages. *Proceedings., Second International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials* [online]. IEEE, 1988, s. 717-720 [cit. 2014-04-12]. DOI: 10.1109/ICPADM.1988.38500. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=38500>
- [13] TOPALIS, Frangiskos V. a Michael G. DANIKAS. Breakdown in Air Gaps with Solid Insulating Barrier under Impulse Voltage Stress. *FACTA UNIVERSITATIS (NIŠ)* [online]. Apr. 2005, vol.18, s. 87-104 [cit. 2014-04-12]. Dostupné z: <http://facta.junis.ni.ac.rs/eae/fu2k51/topalis.pdf>
- [14] NAIDU, K., S. JAIN, V. MALLER a P. SATYANARAYANA. Partial Discharge Studies in Non-Uniform Fields with Insulation Barriers. *IEEE Transactions on Electrical Insulation* [online]. 1979, EI-14, issue 5, s. 285-287 [cit. 2014-04-12]. DOI: 10.1109/TEI.1979.298234. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4080663>

- [15] KANG, Hyoungku, Jin Bae NA, Yoon Do CHUNG a Tae Kuk KO. Experimental Study on the Barrier Effects in Gaseous Helium for the Insulation Design of a High Voltage SFCL. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* [online]. 2011, vol. 21, issue 3, s. 1328-1331 [cit. 2014-04-12]. DOI: 10.1109/TASC.2010.2104310. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5710669>
- [16] 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.
- [17] HAUSCHILD, Wolfgang a Wolfgang MOSCH. *Statistical techniques for high-voltage engineering*. English ed. London: P. Peregrinus on behalf of the Institution of Electrical Engineers, c2007, xii, 310 p. ISBN 08-634-1205-X.

Přílohy

Seznam příloh:

Příloha A – Tabulky naměřených hodnot metodou více hladinami	2
Přílohy B – Rozložení přeskoků při zkouškách více hladinami v čase	10
Příloha C – Tabulky naměřených hodnot metodou nahoru-dolů.....	13

Vysvětlivky:

U_z	Napětí změřené vrcholovým voltmetrem
U_p	přepočítané změřené napětí dle kalibračního vzorce
U_{kor}	korigované napětí U_p pro $t = 20^\circ\text{C}$ a $p = 101,3 \text{ kPa}$
U_{nab}	změřené nabíjecí napětí jednoho stupně rázového generátoru
x	přeskok
0	bez přeskoků

Příloha A – Tabulky naměřených hodnot metodou více hladinami

U_p [kV]	120	125	130	135
U_{nab} [V]	33,7	35,3	36,7	38,2

Číslo testu Datum měření
L161 12.3.2014

Elektrody	Mezera	Prodleva	Polarita impulsu	Bariera	Tlak v nádobě	Tlak v laboratoři	Teplota v laboratoři	Korekční činitel
R0,5B	60 mm	30 s	kladná	ano	98,32 kPa	98,96 kPa	27 °C	0,9479

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	Σx
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	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
130	0	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
135	0	x	x	0	x	x	x	x	x	x	x	x	0	x	0	x	x	x	0	x	x	x	x	x	x	21

U [kV]	Impulzč.	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	
120	U_z [V]	57,9	58,1	58,0	58,1	57,7	58,2	59,7	57,7	57,6	57,9	57,6	57,9	58,2	58,1	58,2	57,9	58,0	58,2	57,8	57,7	57,8	57,9	57,8	57,7	57,8	
	U_p [kV]	120,0	120,4	120,2	120,4	119,6	120,6	123,7	119,6	119,3	120,0	119,3	120,0	120,6	120,4	120,6	120,0	120,2	120,6	119,8	119,6	119,6	120,0	119,8	120,0	119,8	
	U_{ker} [kV]	126,6	127,0	126,8	127,0	126,1	127,2	130,5	126,1	125,9	126,6	125,9	126,6	127,2	127,0	127,0	127,2	126,6	126,8	127,2	126,3	126,1	126,3	126,6	126,3	126,1	126,3
125	U_z [V]	60,6	60,5	60,4	60,5	60,1	60,4	60,2	60,1	60,3	60,2	60,4	60,3	60,1	60,1	60,3	60,4	60,3	60,3	60,3	60,5	60,4	60,2	60,4	60,5	60,2	60,1
	U_p [kV]	125,6	125,4	125,1	125,4	124,5	125,1	124,7	124,5	124,9	124,7	125,1	124,9	124,5	124,5	124,9	125,1	124,9	124,9	124,9	125,4	125,1	124,7	125,1	125,4	125,4	124,7
	U_{ker} [kV]	132,5	132,2	132,0	132,2	131,4	132,0	131,6	131,4	131,8	131,6	132,0	131,8	131,4	131,4	131,8	132,0	131,8	132,0	131,8	132,2	132,0	131,6	132,0	132,2	131,6	131,4
130	U_z [V]	62,6	62,6	62,5	62,8	62,5	62,5	62,6	62,5	62,7	62,7	62,6	62,5	62,6	62,8	62,6	62,8	62,5	62,5	62,6	62,8	62,6	62,5	62,6	62,5	62,4	62,5
	U_p [kV]	129,7	129,7	129,5	130,1	129,5	129,5	129,7	129,5	129,9	129,9	129,7	129,5	129,7	130,1	129,5	129,5	130,1	129,5	129,5	129,7	130,1	129,7	129,5	129,3	129,7	129,5
	U_{ker} [kV]	136,8	136,8	136,6	137,3	136,6	136,6	136,8	136,6	137,0	137,0	136,8	136,6	136,8	137,3	136,6	137,3	136,6	136,6	136,6	137,3	136,8	137,3	136,8	136,6	136,4	136,6
135	U_z [V]	65,1	65,1	64,9	64,9	64,9	65,0	64,9	64,9	65,0	65,0	65,2	64,9	64,8	64,4	64,9	65,2	65,1	65,0	64,9	65,1	65,2	65,1	65,2	64,9	65,4	65,2
	U_p [kV]	134,9	134,9	134,5	134,5	134,5	134,7	134,5	134,5	134,5	134,7	135,1	134,5	134,3	133,4	134,5	135,1	134,9	134,7	134,5	134,9	135,1	134,5	135,1	134,5	135,5	135,1
	U_{ker} [kV]	142,3	142,3	141,9	141,9	141,9	142,3	142,1	141,9	141,9	142,1	142,5	141,9	141,6	140,7	141,9	142,5	142,3	142,1	141,9	142,3	142,3	142,5	141,9	142,5	141,9	142,9

Číslo testu Datum měření
L162 12.3.2014

U_p [kV]	120	125	130	135	140
U_{hab} [V]	33,8	35,3	36,7	38,4	40,1

Elektrody	Mezera	Prodleva	Polarita impulsu	Bariera	Tlak v nádobě	Tlak v laboratořích	Teplota v laboratořích	Korekční činitel
R4B	60 mm	30 s	kladná	ano	98,22 kPa	98,89 kPa	27,2 °C	0,9463

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	Σx	
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	0
125	0	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	4
130	0	0	0	x	0	0	0	0	0	x	0	0	0	0	0	0	0	0	x	0	x	0	x	0	x	0	8
135	x	x	x	x	x	0	x	0	x	0	x	0	x	0	x	0	0	0	x	0	x	x	x	x	0	x	15
140	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

U [kV]	Impulz.č.	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	
120	U_z [V]	57,8	57,7	57,8	57,8	58,0	58,2	57,9	57,7	57,8	57,6	57,7	57,7	58,1	58,2	57,6	58,2	58,1	57,9	57,9	57,7	57,7	57,7	57,7	58,0	58,2	57,9
	U_p [kV]	119,8	119,6	119,8	119,8	120,2	120,6	120,0	119,6	119,6	119,8	119,3	119,6	120,4	120,6	119,3	120,6	120,4	120,0	120,0	119,6	119,6	119,6	120,0	120,2	120,6	120,0
	U_{kor} [kV]	126,6	126,3	126,6	126,6	127,0	127,4	126,8	126,3	126,3	126,6	126,1	126,3	127,2	127,4	126,1	127,4	127,2	126,8	126,8	126,3	126,3	126,3	126,3	126,8	127,0	127,4
125	U_z [V]	60,3	60,4	60,3	60,2	60,5	60,4	60,3	60,5	60,3	60,2	60,2	60,1	60,0	60,3	60,2	60,4	60,2	60,3	60,3	60,4	60,0	60,2	60,2	60,3	60,3	60,2
	U_p [kV]	124,9	125,1	124,9	124,7	125,4	125,1	124,9	125,4	124,7	124,7	124,7	124,5	124,3	124,9	124,7	125,1	124,7	124,9	124,9	125,1	125,1	124,3	124,7	124,9	124,9	124,7
	U_{kor} [kV]	132,0	132,2	132,0	131,8	132,5	132,2	132,0	132,5	132,5	131,8	131,8	131,6	131,4	132,0	131,8	132,2	131,8	132,0	132,0	132,2	132,2	131,4	131,8	132,0	132,0	131,8
130	U_z [V]	62,5	62,5	62,5	62,5	62,4	62,7	62,9	62,6	62,6	62,6	62,4	62,5	62,6	62,6	62,6	62,6	62,8	62,5	62,8	62,5	62,6	62,6	62,4	62,6	62,5	62,7
	U_p [kV]	129,5	129,5	129,5	129,5	129,3	129,9	130,3	129,7	129,5	129,7	129,3	129,5	129,7	129,7	129,7	129,7	129,7	130,1	129,5	130,1	129,5	129,3	129,7	129,7	129,5	129,9
	U_{kor} [kV]	136,8	136,8	136,8	136,8	136,6	137,3	137,7	137,1	136,8	137,1	136,6	136,8	137,1	137,1	137,1	137,1	137,5	136,8	137,5	136,8	137,5	136,6	137,1	136,6	137,1	136,8
135	U_z [V]	65,4	64,9	65,1	64,9	64,8	65,1	65,1	65,3	65,3	65,4	65,1	65,4	65,1	65,0	65,1	65,4	65,2	65,4	65,6	65,0	65,5	65,4	65,5	65,4	65,2	65,5
	U_p [kV]	135,5	134,5	134,9	134,5	134,3	134,9	134,9	135,3	135,3	135,5	134,9	135,5	134,9	134,7	134,9	135,5	135,1	135,5	135,9	134,7	135,7	135,7	135,5	135,1	134,9	135,7
	U_{kor} [kV]	143,2	142,1	142,5	142,1	141,9	142,5	142,5	143,0	143,0	143,0	143,2	142,5	143,2	142,5	142,3	142,5	143,2	142,8	143,6	142,3	143,4	143,2	143,4	143,2	142,8	143,4
140	U_z [V]	67,4	67,7	67,6	67,7	67,5	67,5	67,4	67,4	67,6	67,7	67,8	67,3	67,6	67,5	67,7	67,5	67,6	67,5	67,6	67,6	67,9	67,8	67,9	67,6	67,7	67,7
	U_p [kV]	139,7	140,3	140,1	140,3	139,9	139,9	139,7	139,7	140,1	140,3	140,5	139,4	140,1	139,9	140,3	139,9	140,1	140,1	140,1	140,1	140,1	140,7	140,5	140,1	140,3	140,3
	U_{kor} [kV]	147,6	148,2	148,0	148,2	147,8	147,8	147,6	147,6	148,0	148,2	148,4	147,4	148,0	147,8	148,2	147,8	148,0	147,8	148,0	148,0	148,0	148,7	148,4	148,0	148,2	148,2

Číslo testu
L163

Datum měření
13.3.2014

U_p [kV]	120	125	130	135
U_{hab} [V]	33,6	35,5	37	38,7

Elektrody	Mezera	Prodleva	Polarita impulsu	Bariera	Tlak v nádobě	Tlak v laboratoři	Teplota v laboratoři	Korekční činitel
R0,5B	60 mm	300 s	kladná	ano	98,12 kPa	98,7 kPa	27 °C	0,9460

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	Σx
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	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
130	x	0	x	0	0	x	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	x	0	0	0	0	0	5
135	x	0	x	x	0	x	0	x	x	0	0	x	0	x	0	x	x	x	x	x	x	x	0	x	x	18

U [kV]	Impulz č.	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
120	U_z [V]	57,9	57,5	57,7	57,6	58,1	58,0	58,1	57,6	57,7	57,7	58,0	57,9	57,7	57,9	57,7	57,6	57,9	57,9	57,7	57,6	57,8	58,0	57,8	58,0	57,8
	U_p [kV]	120,0	119,1	119,6	119,3	120,4	120,2	120,4	119,3	119,6	120,2	120,0	119,8	119,6	120,0	119,6	119,3	120,0	120,0	119,6	119,3	119,8	120,2	119,8	120,2	119,8
	U_{kor} [kV]	126,8	125,9	126,4	126,2	127,3	127,0	127,3	127,0	126,2	126,4	127,0	126,8	126,6	126,4	126,8	126,4	126,2	126,8	126,8	126,4	126,2	126,6	127,0	127,0	126,6
125	U_z [V]	60,6	59,8	59,8	60,1	60,1	60,4	60,3	60,4	60,4	60,2	60,4	60,4	60,3	60,3	60,5	60,1	60,4	60,4	60,2	60,3	60,3	60,4	60,2	60,3	60,3
	U_p [kV]	125,6	123,9	123,9	124,5	124,5	125,1	124,9	125,1	125,1	124,7	125,1	125,1	124,9	124,9	125,4	124,5	125,1	125,1	124,7	124,9	124,9	125,1	124,7	124,9	124,9
	U_{kor} [kV]	132,7	131,0	131,0	131,6	131,6	132,3	132,1	132,3	132,3	132,5	131,9	132,3	132,3	132,1	132,5	131,6	132,3	132,3	131,9	132,1	132,1	132,3	131,9	132,1	132,1
130	U_z [V]	62,4	62,4	62,9	62,6	62,6	62,7	62,6	62,6	62,6	63,1	62,8	62,7	63,1	63,0	62,8	62,9	62,7	63,0	62,6	62,6	62,7	62,7	62,7	62,6	62,8
	U_p [kV]	129,3	129,3	130,3	129,7	129,7	129,9	129,7	129,7	129,7	130,7	130,1	129,9	130,7	130,5	130,1	130,3	129,9	130,5	129,9	129,7	129,7	129,9	129,9	129,9	130,1
	U_{kor} [kV]	136,7	136,7	137,8	137,1	137,1	137,3	137,1	137,1	137,1	138,2	137,5	137,3	138,2	138,0	137,5	137,8	137,3	138,0	137,3	137,1	137,1	137,3	137,3	137,1	137,5
135	U_z [V]	65,0	65,2	65,1	65,1	65,1	65,0	65,3	65,4	65,4	65,4	65,4	65,4	65,1	65,1	65,4	65,5	65,4	65,4	65,3	65,3	65,2	65,5	65,5	65,4	65,4
	U_p [kV]	134,7	135,1	134,9	134,9	134,9	134,7	135,3	135,5	135,5	135,5	135,5	135,5	134,9	134,9	135,5	135,7	135,5	135,5	135,3	135,3	135,1	135,7	135,7	135,5	135,5
	U_{kor} [kV]	142,4	142,8	142,6	142,6	142,6	142,4	143,0	143,2	143,2	143,2	143,2	143,2	142,6	142,6	143,2	143,5	143,2	143,2	143,0	143,0	142,8	143,5	143,5	143,0	143,2

Číslo testu Datum měření
L164 18.3.2014

U_p [kV]	75	80	85	90	95	100
U_{hab} [V]	20,6	22	23,4	24,8	26,2	27,7

Elektrody R4B	Mezera 60 mm	Prodleva 30 s	Polarita impulzu kladná	Bariera ne	Tlak v laboratořích																			Korekční činitel 0,9329
					Tlak v nádobě 96,44 kPa	Tlak v laboratořích 97,28 kPa	Teplota v laboratořích 26 °C																	

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	Σx
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	0	0	0	0
90	x	x	x	0	0	0	x	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	x	x	0	0	0	0	0	7
95	0	0	0	0	0	0	x	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4
100	x	x	x	x	0	0	x	0	x	0	x	x	x	x	x	x	x	x	x	0	x	x	x	x	x	20

U [kV]	Impulz.č.	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
75	U_z [V]	35,8	36,2	36,2	36,5	36,1	36,2	36,4	36,5	36,3	36,1	36,3	36,2	36,3	36,3	36,3	36,2	36,3	36,4	36,3	36,2	36,3	36,3	36,3	36,3	36,2
	U_p [kV]	74,2	75,0	75,0	75,6	74,8	75,0	75,4	75,6	75,2	74,8	75,2	75,0	75,2	75,2	75,2	75,0	75,2	75,4	75,2	75,0	75,2	75,2	75,2	75,2	75,0
	U_{kor} [kV]	79,5	80,4	80,4	81,1	80,2	80,4	80,8	81,1	80,6	80,2	80,6	80,4	80,6	80,6	80,6	80,4	80,6	80,8	80,6	80,4	80,6	80,6	80,6	80,6	80,4
80	U_z [V]	38,6	38,7	38,7	38,6	38,5	38,5	38,6	38,5	38,6	38,5	38,6	38,6	38,6	38,5	38,5	38,5	38,6	38,6	38,6	38,7	38,5	38,6	38,5	38,5	38,6
	U_p [kV]	80,0	80,2	80,2	80,0	79,8	79,8	80,0	79,8	80,0	79,8	80,0	79,8	79,8	79,8	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0	80,2	79,8	80,0	79,8	79,8	80,0
	U_{kor} [kV]	85,7	86,0	86,0	85,7	85,5	85,5	85,5	85,7	85,5	85,5	85,7	85,5	85,5	85,5	85,5	85,5	85,7	85,7	85,7	86,0	85,5	85,7	85,5	85,5	85,7
85	U_z [V]	41,1	41,3	41,1	41,2	41,1	41,0	41,0	41,1	41,1	41,1	41,1	41,1	41,1	41,1	41,0	41,1	41,1	41,1	41,1	41,2	41,0	41,0	41,1	41,1	41,1
	U_p [kV]	85,2	85,6	85,2	85,4	85,2	85,0	85,0	85,2	85,2	85,2	85,2	85,2	85,2	85,2	85,0	85,2	85,2	85,2	85,4	85,4	85,0	85,0	85,4	85,2	85,2
	U_{kor} [kV]	91,3	91,7	91,3	91,5	91,3	91,3	91,1	91,1	91,3	91,3	91,3	91,3	91,3	91,3	91,1	91,3	91,3	91,3	91,3	91,5	91,1	91,1	91,5	91,3	91,3
90	U_z [V]	43,5	43,4	43,3	43,4	43,4	43,4	43,4	43,4	43,4	43,3	43,4	43,4	43,4	43,4	43,3	43,3	43,3	43,3	43,3	43,3	43,1	43,4	43,5	43,2	43,4
	U_p [kV]	90,1	89,9	89,7	89,9	89,9	89,9	89,9	89,9	89,9	89,7	89,9	89,9	89,9	89,9	89,7	89,7	89,7	89,9	89,7	89,5	89,3	89,9	90,1	89,7	89,9
	U_{kor} [kV]	96,6	96,4	96,2	96,4	96,4	96,4	96,4	96,4	96,4	96,2	96,4	96,4	96,4	96,4	96,2	96,2	96,2	96,4	96,2	97,1	95,7	96,4	96,6	96,2	95,9
95	U_z [V]	45,8	45,8	45,8	45,8	45,8	45,7	45,6	45,8	45,1	45,9	45,0	46,0	45,7	45,7	45,7	45,7	46,0	45,9	45,9	46,0	45,9	45,9	45,8	45,8	45,9
	U_p [kV]	94,9	94,9	94,9	94,9	94,9	94,9	94,7	94,5	94,9	93,4	95,1	93,2	95,3	94,7	94,7	95,3	95,1	95,1	95,1	95,3	95,1	95,1	95,1	94,9	95,1
	U_{kor} [kV]	101,7	101,7	101,7	101,7	101,7	101,7	101,5	101,3	101,7	100,2	101,9	99,9	102,2	101,5	101,5	102,2	101,9	102,2	101,9	101,9	102,2	101,9	101,9	101,7	101,9
100	U_z [V]	48,0	47,9	47,9	47,9	48,3	48,4	48,4	48,4	48,4	48,4	48,5	48,1	48,5	48,0	48,9	48,9	48,1	48,0	47,7	49,0	48,1	48,2	49,0	47,1	48,6
	U_p [kV]	99,5	99,2	99,2	99,2	100,1	100,3	100,3	100,3	100,3	100,3	100,5	99,7	100,5	101,3	101,3	99,7	99,5	99,5	98,8	101,5	99,7	99,9	101,5	97,6	100,7
	U_{kor} [kV]	106,6	106,4	106,4	106,4	106,4	107,3	107,5	107,5	107,5	107,5	107,7	106,8	107,7	106,6	108,6	108,6	106,8	106,6	105,9	108,8	106,8	107,1	108,8	104,6	107,9

Číslo testu Datum měření
LI65 19.3.2014

U_p [kV]	50	55	60	65	70	75
U_{nab} [V]	13,6	15	16,4	17,8	19,2	20,6

Elektrody	Mezera	Prodleva	Polarita impulzu	Bariera	Tlak v nádobě	Tlak v laboratoři	Teplota v laboratoři	Korekční činitel
R0,5B	60 mm	30 s	kladná	ne	97,24 kPa	97,86 kPa	25,9 °C	0,9410

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	Σx	
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	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	x	0	x	0	0	x	x	0	0	0	x	x	x	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8
70	0	0	x	0	x	x	x	x	0	0	x	x	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	14
75	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	25

U [kV]	Impulz č.	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	U_z [V]	24,1	24,3	24,1	24,1	24,1	24,1	24,1	24,1	24,1	24,1	24,1	24,0	24,1	24,1	24,0	24,2	24,0	24,1	24,1	24,1	24,1	24,1	24,1	24,1	24,0	24,1	24,0
	U_p [kV]	49,9	50,4	49,9	49,9	49,9	49,9	49,9	49,9	49,9	49,9	49,9	49,7	49,9	49,9	49,7	50,1	49,7	49,9	49,9	49,9	49,9	49,9	49,9	49,9	49,7	49,9	49,7
	U_{kor} [kV]	53,1	53,5	53,1	53,1	53,1	53,1	53,1	53,1	53,1	53,1	53,1	53,1	52,8	53,1	52,8	53,3	52,8	52,8	53,1	53,1	53,1	53,1	53,1	53,1	52,8	53,1	52,8
55	U_z [V]	26,9	26,5	26,5	26,6	26,5	26,5	26,5	26,5	26,6	26,6	26,4	26,5	26,4	26,5	26,5	26,6	26,5	26,5	26,5	26,4	26,5	26,5	26,5	26,5	26,5	26,5	26,5
	U_p [kV]	55,7	54,9	54,9	55,1	54,9	54,9	54,9	54,9	55,1	55,1	54,7	54,9	54,9	54,7	54,9	55,1	54,9	54,9	54,9	54,7	54,9	54,9	54,9	54,9	54,9	54,9	54,9
	U_{kor} [kV]	59,2	58,4	58,4	58,6	58,4	58,4	58,4	58,4	58,6	58,6	58,1	58,4	58,4	58,1	58,4	58,6	58,4	58,4	58,4	58,1	58,4	58,4	58,4	58,4	58,4	58,4	58,4
60	U_z [V]	28,8	29,1	29,9	28,8	29,0	28,9	28,9	28,9	28,8	28,8	29,0	29,1	28,9	29,2	28,9	29,1	28,9	28,9	29,0	28,9	29,0	29,0	29,1	29,0	28,4	29,0	
	U_p [kV]	59,7	60,3	62,0	59,7	60,1	59,9	59,9	59,9	59,9	59,7	60,1	60,3	59,9	60,5	59,9	60,3	59,9	59,9	60,1	60,1	60,1	60,1	60,3	60,1	58,8	60,1	
	U_{kor} [kV]	63,4	64,1	65,8	63,4	63,9	63,6	63,6	63,6	63,6	63,4	63,9	64,1	63,6	64,3	63,6	64,1	63,6	63,6	63,9	63,9	63,6	63,9	64,1	63,9	62,5	63,9	
65	U_z [V]	31,4	31,4	31,4	31,4	31,3	31,3	31,4	31,4	31,4	31,4	31,4	31,4	31,4	31,4	31,4	31,3	31,3	31,3	31,3	31,2	31,3	31,3	31,3	31,3	31,3	31,3	
	U_p [kV]	65,1	65,1	65,1	65,1	64,9	64,9	65,1	65,1	65,1	65,1	64,9	65,1	65,1	65,1	65,1	65,1	64,9	64,9	64,9	64,6	64,9	64,9	65,1	64,9	65,1	64,9	
	U_{kor} [kV]	69,1	69,1	69,1	69,1	68,9	68,9	69,1	69,1	69,1	69,1	68,9	69,1	69,1	69,1	69,1	69,1	68,9	68,9	68,9	68,7	68,9	68,9	69,1	68,9	69,1	68,9	
70	U_z [V]	33,8	33,7	33,8	33,8	33,7	33,6	33,8	33,7	33,8	33,9	33,7	33,8	33,8	33,9	33,8	33,7	33,7	33,8	34,0	33,8	33,7	33,7	33,7	33,7	33,7	33,7	
	U_p [kV]	70,0	69,8	70,0	70,0	69,8	69,6	70,0	69,8	70,0	70,2	69,8	70,0	70,0	70,0	70,0	69,8	70,0	70,0	70,4	69,8	69,8	69,8	69,8	69,8	69,8	69,8	
	U_{kor} [kV]	74,4	74,2	74,4	74,4	74,2	74,0	74,4	74,2	74,4	74,6	74,2	74,4	74,4	74,6	74,4	74,4	74,2	74,4	74,9	74,4	74,2	74,2	74,2	74,2	74,2	74,2	74,2
75	U_z [V]	36,1	36,2	36,0	36,1	36,2	36,0	36,0	36,0	35,9	36,5	36,2	36,2	36,1	36,2	36,2	36,3	36,2	36,2	36,2	36,2	36,4	36,1	36,2	36,1	36,0	36,2	
	U_p [kV]	74,8	75,0	74,6	74,8	75,0	74,6	74,6	74,4	75,6	75,0	75,0	74,8	75,0	75,0	75,0	75,2	75,0	75,0	75,0	75,4	74,8	75,0	74,8	74,6	75,0		
	U_{kor} [kV]	79,5	79,7	79,3	79,5	79,7	79,3	79,3	79,1	80,4	79,7	79,7	79,7	79,5	79,7	79,7	79,9	79,9	79,7	79,7	80,2	79,5	79,7	79,5	79,3	79,7		

Číslo testu Datum měření
L170 31.3.2014

Elektrody	Mezera	Prodleva	Polarita impulsu	Bariera	Tlak v nádobě	Tlak v laboratoři	Teplota v laboratoři	Korekční činitel
R0,5B	60 mm	30 s	záporná	ano	96,54 kPa	97,23 kPa	27,1 °C	0,9305

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	Σx
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	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
165	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
170	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	x	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
175	x	0	0	0	0	0	x	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	x	0	0	0	3
180	0	0	x	0	0	0	0	0	0	0	0	x	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	x	0	3
185	0	x	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	x	0	0	0	0	0	0	0	0	3
190	0	0	0	0	0	0	0	x	0	0	0	0	0	0	x	0	0	x	0	0	0	0	0	0	0	4
195	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	x	0	0	x	2
200	0	0	0	0	0	0	0	x	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	x	0	0	0	0	0	4
205	x	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	x	x	x	x	x	x	x	11
210	x	x	0	0	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	24

U_p [kV]	155	160	165	170	175	180	185	190	195	200	205	210
U_{reb} [V]	43,5	44,8	46,2	47,7	49,4	50,9	52,3	53,8	55,5	57	58,5	60,2

U [kV]	Impulz.č.	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
155	U_z [V]	75,1	74,9	74,8	75,2	74,8	74,6	75,1	75,2	74,7	74,7	74,6	74,8	75,1	74,8	75,2	74,7	74,8	74,9	74,9	74,9	75,1	75,0	75,2	75,0	75,1
	U_p [kV]	155,6	155,2	155,0	155,8	154,6	154,6	155,6	155,8	154,8	154,8	154,6	155,0	155,6	155,0	155,8	155,8	154,8	155,0	155,2	155,2	155,6	155,4	155,8	155,4	155,6
	U_{kor} [kV]	167,2	166,8	166,6	167,5	166,6	166,1	167,2	167,5	167,5	166,3	166,3	166,6	166,6	167,2	166,6	167,5	166,3	166,6	166,8	166,8	166,8	167,2	167,0	167,5	167,0
160	U_z [V]	77,0	76,9	77,0	77,5	77,2	77,3	77,3	77,3	77,3	77,4	77,0	77,3	77,0	77,3	77,1	77,1	76,9	77,4	77,2	77,3	77,3	77,0	77,2	77,0	77,2
	U_p [kV]	159,5	159,3	159,5	160,6	160,0	160,2	160,6	160,2	160,4	160,4	159,5	160,2	159,5	159,7	159,7	159,3	160,4	160,0	160,2	160,2	160,2	159,5	160,0	159,5	160,0
	U_{kor} [kV]	171,5	171,2	171,5	172,6	171,9	172,1	172,6	172,1	172,1	172,4	171,5	172,1	171,5	171,7	171,7	171,2	172,4	171,9	172,1	172,1	172,1	171,5	171,5	171,9	171,9
165	U_z [V]	79,4	79,6	79,5	79,7	79,9	79,4	79,3	79,3	79,3	79,7	79,7	80,0	79,6	79,6	79,5	79,7	79,6	79,4	79,4	79,2	79,5	79,5	79,6	79,5	79,6
	U_p [kV]	164,5	164,9	164,7	165,1	165,5	164,5	164,3	164,3	164,3	165,1	165,1	165,8	164,9	164,7	165,1	164,9	164,5	164,5	164,1	164,7	164,7	164,7	164,9	164,7	164,9
	U_{kor} [kV]	176,8	177,3	177,0	177,5	177,9	176,8	176,6	176,6	176,6	177,5	177,5	178,1	177,3	177,3	177,0	177,5	177,3	176,8	176,8	176,4	177,0	177,0	177,3	177,0	177,3

U [kV]	Impulz.č.	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			
175	U_z [V]	84,1	84,2	84,4	84,5	84,5	84,3	84,1	84,4	84,7	84,6	84,8	84,7	84,6	84,6	84,9	84,8	84,8	84,8	84,8	84,4	84,6	84,7	84,6	84,6	84,7	84,7		
	U_p [kV]	174,3	174,5	174,9	175,1	175,1	174,7	174,3	174,9	175,5	175,3	175,3	175,7	175,5	175,3	175,3	175,9	175,7	175,7	175,7	175,7	174,9	175,3	175,5	175,3	175,3	175,5	175,5	
	U_{kor} [kV]	187,3	187,5	187,9	188,2	188,2	187,7	187,3	187,9	188,6	188,4	188,4	188,8	188,6	188,4	188,4	189,1	188,8	188,8	188,8	188,8	187,9	188,4	188,6	188,4	188,4	188,6	188,6	
180	U_z [V]	86,5	86,8	86,8	86,9	87,2	86,8	86,9	86,8	86,9	87,1	87,1	86,6	86,6	86,9	87,2	86,8	86,9	87,0	87,2	86,9	87,2	86,8	87,0	87,1	87,1	87,1	87,2	
	U_p [kV]	179,2	179,8	179,8	180,1	180,7	179,8	180,1	179,8	180,1	180,5	180,5	179,4	179,4	180,1	180,7	179,8	180,1	180,3	180,7	180,1	180,7	179,8	180,3	180,5	180,5	180,5	180,7	
	U_{kor} [kV]	192,6	193,3	193,3	193,5	194,2	193,3	193,3	193,5	193,3	193,5	194,0	194,0	192,8	193,5	194,2	193,3	193,5	193,7	194,2	193,5	194,2	193,3	193,7	193,7	194,0	194,0	194,2	194,2
185	U_z [V]	89,2	88,7	89,0	89,2	89,3	89,3	89,4	89,5	89,6	89,2	89,3	89,2	89,2	89,7	89,0	89,3	89,3	89,4	89,4	89,3	88,5	89,7	89,4	89,1	89,2	89,3	89,3	
	U_p [kV]	184,8	183,8	184,4	185,0	185,0	185,0	185,2	185,4	185,6	184,8	185,0	184,8	185,9	184,4	185,0	185,0	185,0	185,2	185,2	185,0	183,4	185,9	185,2	184,6	184,8	185,0	185,0	
	U_{kor} [kV]	198,6	197,5	198,2	198,6	198,9	198,9	199,1	199,3	199,5	198,6	198,9	198,6	198,6	199,7	198,2	198,9	198,9	199,1	199,1	199,1	198,9	197,1	199,7	199,1	198,4	184,8	198,9	198,9
190	U_z [V]	91,2	91,6	91,6	91,7	91,8	91,8	91,3	91,1	91,5	91,9	92,0	91,7	91,7	91,7	91,8	91,8	91,8	91,7	91,0	91,7	91,8	91,9	91,8	91,7	92,0	91,8	91,8	
	U_p [kV]	189,0	189,8	189,8	190,0	190,2	190,2	189,2	188,8	189,6	190,4	190,6	190,0	190,0	190,0	190,2	190,2	190,2	190,0	188,5	190,0	190,2	190,4	190,2	190,0	190,6	190,2	190,2	
	U_{kor} [kV]	203,1	204,0	204,0	204,2	204,4	204,4	203,3	202,9	203,8	204,6	204,9	204,2	204,2	204,2	204,4	204,4	204,4	204,2	202,6	204,2	204,4	204,6	204,4	204,2	204,9	204,4	204,4	204,4
195	U_z [V]	94,0	94,1	94,2	94,0	93,9	94,1	94,1	94,1	94,1	94,1	94,1	94,1	94,0	93,8	94,1	93,8	94,2	94,1	94,2	94,1	94,3	94,2	94,1	94,2	94,2	94,2	93,8	93,8
	U_p [kV]	194,8	195,0	195,2	194,8	194,6	195,0	195,0	195,0	195,0	195,0	195,0	195,0	194,8	194,3	195,0	194,3	195,2	195,0	195,2	195,0	195,4	195,2	195,0	195,2	195,2	194,3	194,3	194,3
	U_{kor} [kV]	209,3	209,5	209,8	209,3	209,1	209,5	209,5	209,5	209,5	209,5	209,5	209,5	209,3	208,9	209,5	208,9	209,8	209,5	209,8	209,5	210,0	209,8	209,5	209,8	209,8	208,9	208,9	208,9
200	U_z [V]	96,3	96,7	96,6	96,6	96,4	96,9	96,6	96,2	96,6	96,6	95,7	96,4	96,3	96,6	96,7	96,3	96,5	96,4	96,6	96,5	96,5	96,5	96,5	96,5	96,6	96,6	96,5	96,5
	U_p [kV]	199,5	200,4	200,2	200,2	199,7	200,8	200,2	199,3	200,2	198,3	199,7	199,5	199,5	200,2	200,4	199,5	199,9	199,7	200,2	199,9	199,9	199,9	199,9	199,9	200,2	200,2	199,9	199,9
	U_{kor} [kV]	214,4	215,3	215,1	215,1	214,7	215,8	215,1	214,2	215,1	214,2	213,1	214,7	214,4	215,1	215,3	214,4	214,9	214,7	215,1	214,9	214,9	214,9	214,9	214,9	214,9	215,1	214,9	214,9
205	U_z [V]	98,9	98,9	99,0	99,1	99,0	98,9	98,9	99,1	98,0	99,0	98,8	98,8	98,9	98,8	98,8	98,7	98,7	99,2	98,7	98,8	98,7	98,6	98,6	98,6	97,6	98,7	98,7	
	U_p [kV]	204,9	204,9	205,1	205,3	205,1	204,9	204,9	205,3	203,1	205,1	204,7	204,7	204,9	204,7	204,7	204,5	204,5	205,5	204,5	204,7	204,5	204,3	204,3	204,3	202,2	204,5	204,5	204,5
	U_{kor} [kV]	220,2	220,2	220,5	220,7	220,5	220,2	220,2	220,2	220,7	218,2	220,5	220,0	220,2	220,0	220,0	219,8	219,8	220,9	219,8	220,0	219,8	219,6	219,6	219,6	217,3	219,8	219,8	219,8
210	U_z [V]	100,8	101,2	101,2	101,4	101,2	101,0	100,7	101,3	101,4	100,5	101,5	101,1	101,2	101,2	101,0	101,2	101,2	101,3	101,2	101,2	101,1	101,2	101,2	101,2	101,2	101,1	101,1	101,1
	U_p [kV]	208,9	209,7	209,7	210,1	209,7	209,3	208,6	209,9	210,1	208,2	210,3	209,5	209,5	209,7	209,3	209,7	209,7	209,9	209,7	209,7	209,5	209,7	209,7	209,7	209,7	209,5	209,5	209,5
	U_{kor} [kV]	224,5	225,4	225,4	225,8	225,4	224,9	224,2	225,6	225,8	223,8	226,0	225,1	225,4	225,4	224,9	225,4	225,4	225,6	225,4	225,4	225,1	225,4	225,4	225,4	225,4	225,4	225,4	225,1

Číslo testu Datum měření
L173 2.4.2014

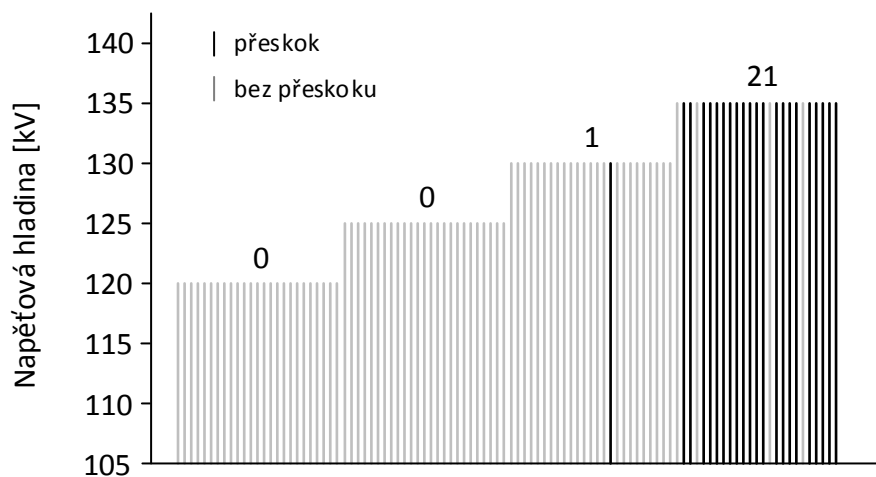
U_p [kV]	100	105	110	115	120
U_{nab} [V]	27,2	28,7	30,2	31,6	33,1

Elektrody	Mezera 60 mm	Prodleva 30 s	Polarita impulsu		Bariera ne	Tlak v laboratořích		Teplota v laboratořích										Korekční činitel
			záporná	záporná		96,35 kPa	96,95 kPa	27,1 °C	17	18	19	20	21	22	23	24	25	

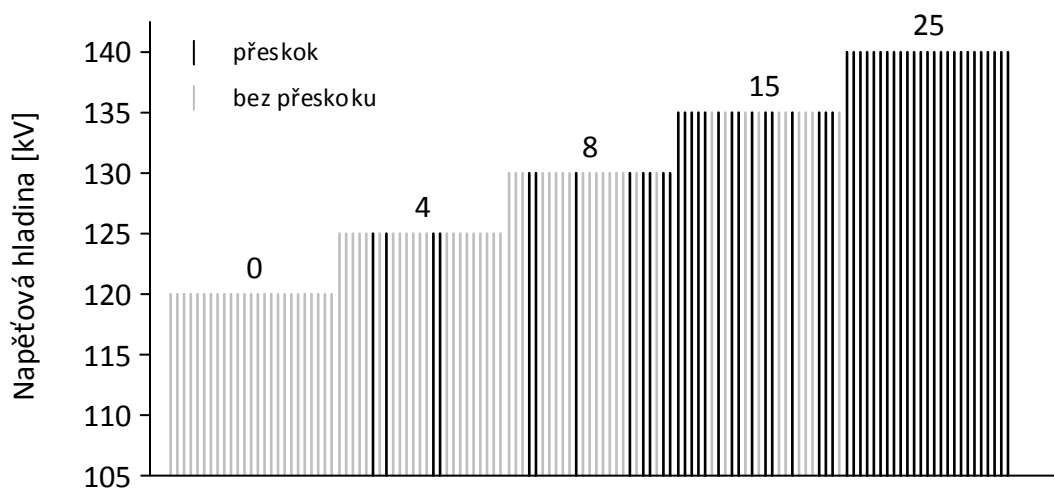
U [kV]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	Σx
100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
105	0	0	0	x	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
110	x	0	0	0	0	x	0	0	0	x	0	0	0	0	0	x	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6
115	0	0	x	0	0	0	0	0	x	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	x	0	0	0	0	0	8
120	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	24

U [kV]	Impulz.č.	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
100	U_z [V]	48,8	47,9	48,3	48,3	48,7	48,6	48,2	48,4	48,2	48,4	48,5	48,5	48,4	48,5	48,4	48,2	48,4	48,2	48,4	48,3	48,3	48,4	48,4	48,3	48,1
	U_p [kV]	101,1	99,2	100,1	100,1	100,9	100,7	99,9	100,3	99,9	100,3	100,5	100,5	100,3	100,5	100,3	99,9	100,3	99,9	100,3	100,1	100,1	100,3	100,3	100,1	99,7
	U_{kor} [kV]	108,9	106,9	107,8	107,8	108,7	108,4	107,5	108,0	107,5	108,0	108,2	108,2	108,2	108,0	108,2	108,0	107,5	108,0	107,5	108,0	107,8	107,8	108,0	108,0	107,8
105	U_z [V]	50,5	50,6	50,6	50,8	51,0	50,7	50,8	50,9	50,7	50,6	50,6	50,7	50,7	50,7	50,7	50,4	50,5	50,7	50,6	50,6	50,7	50,5	50,7	50,8	50,7
	U_p [kV]	104,6	104,8	104,8	105,3	105,7	105,1	105,3	105,5	105,1	104,8	104,8	105,1	105,1	105,1	104,4	104,6	105,1	104,8	104,8	105,1	104,6	105,1	105,1	105,3	105,1
	U_{kor} [kV]	112,7	112,9	112,9	113,3	113,8	113,1	113,3	113,6	113,1	112,9	112,9	113,1	113,1	113,1	112,5	112,7	113,1	112,9	112,9	113,1	112,7	113,1	113,1	113,3	113,1
110	U_z [V]	53,2	53,0	53,0	53,2	53,3	53,3	53,1	53,1	53,2	53,2	53,2	53,2	53,2	53,3	53,2	53,1	53,3	53,0	53,1	53,2	53,2	53,2	53,2	53,3	53,1
	U_p [kV]	110,2	109,8	109,8	110,2	110,4	110,4	110,0	110,0	110,2	110,2	110,2	110,2	110,2	110,4	110,2	110,0	110,4	109,8	110,0	110,2	110,2	110,2	110,2	110,4	110,0
	U_{kor} [kV]	118,7	118,3	118,3	118,7	118,9	118,9	118,5	118,5	118,7	118,7	118,7	118,7	118,7	118,9	118,7	118,5	118,9	118,3	118,5	118,7	118,7	118,7	118,0	118,9	118,5
115	U_z [V]	55,5	55,5	55,7	55,3	55,5	55,5	55,5	55,5	55,5	55,5	55,5	55,5	55,5	55,5	55,4	55,4	55,6	55,4	55,5	55,5	55,5	55,5	55,5	55,4	55,5
	U_p [kV]	115,0	115,0	115,4	114,6	115,0	115,0	115,0	115,0	115,0	115,4	115,0	115,0	115,0	115,0	114,8	114,8	115,2	114,8	115,0	115,0	115,0	115,2	115,0	114,8	115,0
	U_{kor} [kV]	123,8	123,8	124,3	123,4	123,8	123,8	123,8	123,8	123,8	124,3	123,8	123,8	123,8	123,8	123,6	123,6	124,1	123,6	123,8	123,8	123,8	123,8	124,1	123,8	123,6
120	U_z [V]	57,8	57,9	58,1	58,1	57,9	57,9	57,9	58,0	57,8	57,9	57,9	57,9	57,9	58,0	57,8	57,9	58,0	57,9	57,9	57,8	57,7	57,8	57,8	57,9	57,9
	U_p [kV]	119,8	120,0	120,4	120,4	120,0	120,0	120,0	120,2	119,8	120,0	120,0	120,0	120,2	120,2	119,8	120,0	120,2	120,0	120,0	119,8	119,6	119,8	119,8	120,0	120,0
	U_{kor} [kV]	129,0	129,2	129,6	129,6	129,2	129,2	129,2	129,2	129,4	129,0	129,2	129,2	129,2	129,4	129,0	129,2	129,2	129,4	129,2	129,0	128,7	129,0	128,7	129,0	129,2

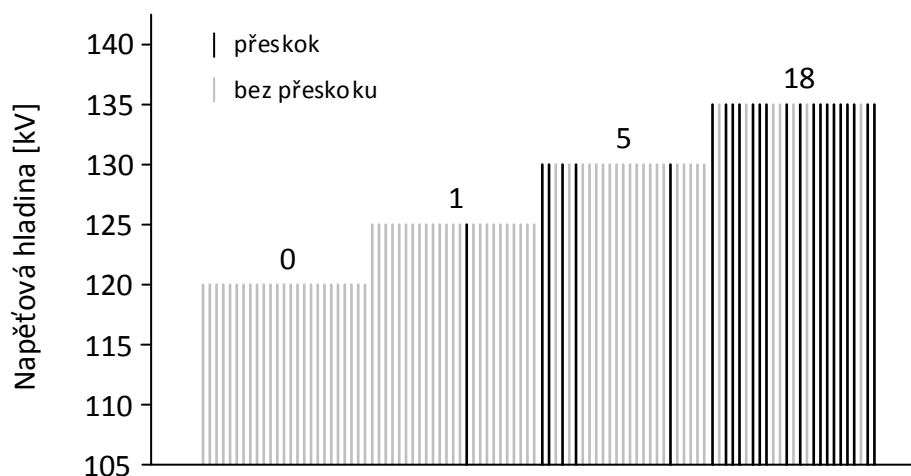
Přílohy B – Rozložení přeskoků při zkouškách více hladinami v čase



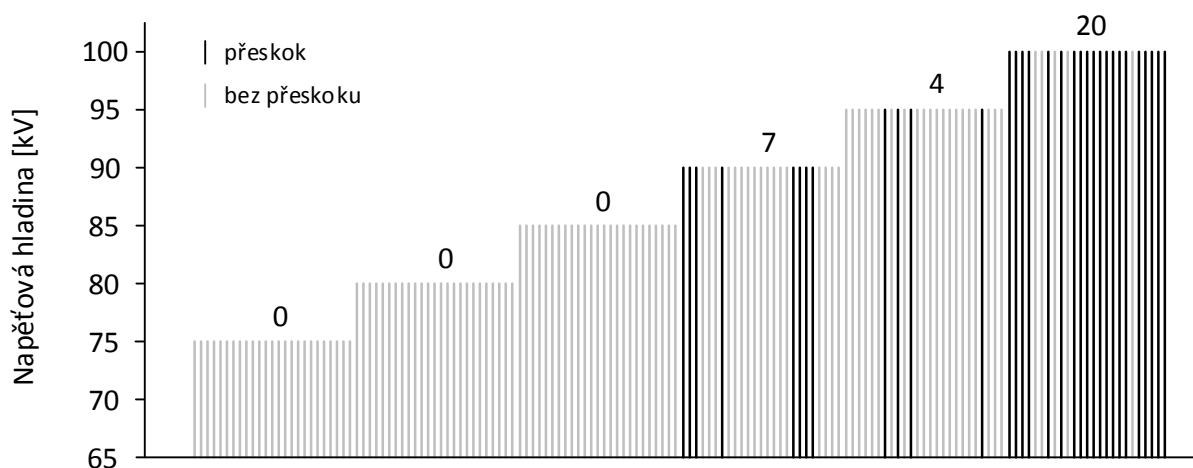
Obr. 0.1 LI61 (R0.5B, s barierou, kladný impulz, $\Delta t = 30$ s)



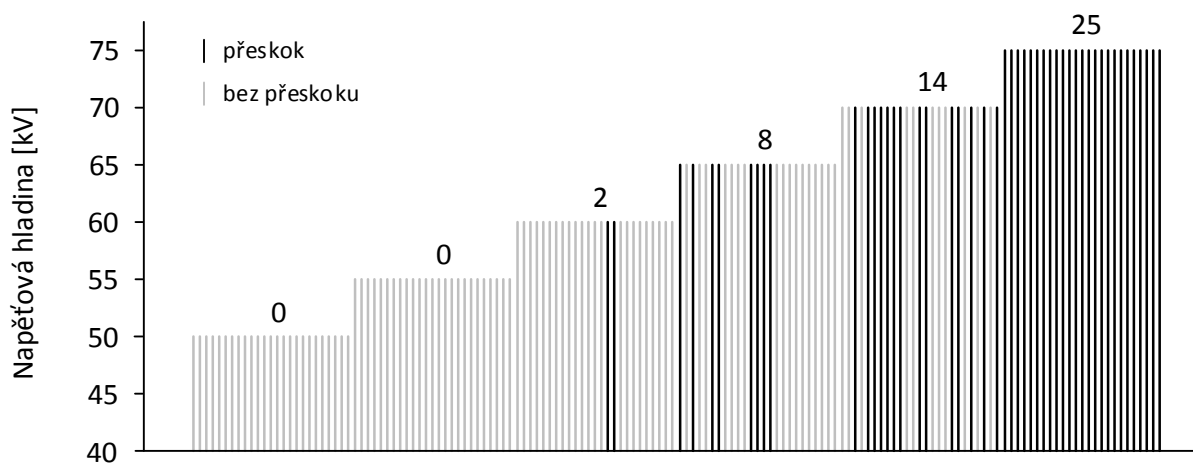
Obr. 0.2 LI62 (R4B, s barierou, kladný impulz, $\Delta t = 30$ s)



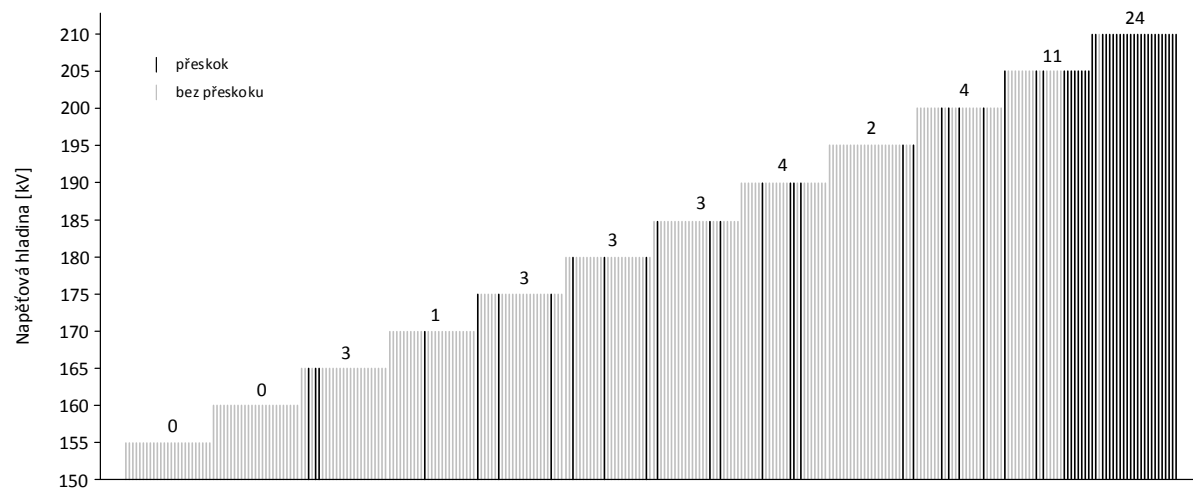
Obr. 0.3 LI63 (R0.5B, s barierou, kladný impulz, $\Delta t = 300$ s)



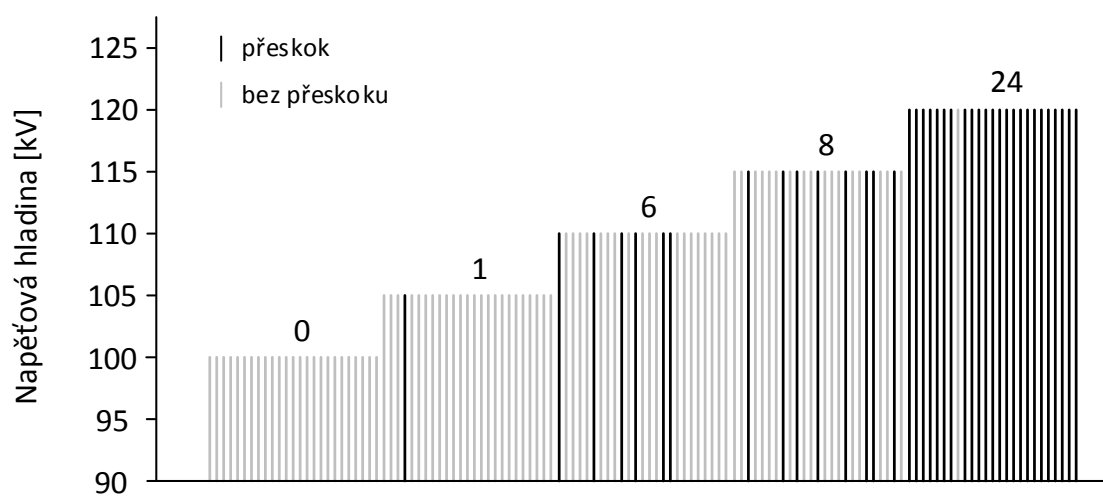
Obr. 0.4 LI64 (R4B, bez bariery, kladný impulz, $\Delta t = 30$ s)



Obr. 0.5 LI65 (R0.5B, bez bariery, kladný impulz, $\Delta t = 30$ s)



Obr. 0.6 LI70 (R0.5B, s bariérou, záporný impulz, $\Delta t = 30$ s)



Obr. 0.7 LI73 (R0.5B, bez bariéry, záporný impulz, $\Delta t = 30$ s)

Přílohy C – Tabulky naměřených hodnot metodou nahoru-dolů

U _p [kV]	120	125	130	135	140
U _{nab} [V]	33,3	34,7	36,6	37,8	39,2

Číslo testu
L166

Datum měření
24.3.2014

Elektrody	Mezera	Prodleva	Polarita impulzu	Bariera	Tlak v nádobě	Tlak v laboratoři	Teplota v laboratoři	Korekční činitel
R0,5B	60 mm	30 s	kladná	ano	96,15 kPa	96,71 kPa	25,9 °C	0,9304

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	26	27	28	29	30	31	32	
140	x								x																							x	
135		x		x		x	0			x		x		x				x		x				x							0		x
130			0	0	0	0				0		0	0	0	0	0	0		0	0	x		0	0	0	0	0	0	0	0	0		
125																																	
120																																	

x přeskok
0 bez přeskoku

Impulz č.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
U _z [V]	67,4	64,7	62,5	65,0	62,3	64,7	62,4	64,7	67,0	64,5	62,4	64,8	62,4	65,0	62,7	64,9
U _p [kV]	139,7	134,1	129,5	134,7	129,1	134,1	129,3	134,1	138,8	133,6	129,3	134,3	129,3	134,7	129,9	134,5
U _{kor} [kV]	150,1	144,1	139,2	144,7	138,7	144,1	139,0	144,1	149,2	143,6	139,0	144,3	139,0	144,7	139,6	144,5

Impulz č.	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
U _z [V]	62,4	64,9	62,7	65,0	62,6	59,7	62,9	65,0	62,6	65,1	62,8	64,8	62,9	64,8	67,2	64,9
U _p [kV]	129,3	134,5	129,9	134,7	129,7	123,7	130,3	134,7	129,7	134,9	130,1	134,3	130,3	134,3	139,2	134,5
U _{kor} [kV]	139,0	144,5	139,6	144,7	139,4	132,9	140,1	144,7	139,4	145,0	139,9	144,3	140,1	144,3	149,6	144,5

Číslo testu Datum měření
LI67 24.3.2014

U_p [kV]	120	125	130	135	140
U_{nab} [V]	33,3	34,7	36,6	37,8	39,2

Elektrody	Mezera	Prodleva	Polarita impulzu	Bariera	Tlak v nádobě	Tlak v laboratoři	Teplota v laboratoři	Korekční činitel
R0,5B	60 mm	120 s	kladná	ano	96,15 kPa	96,7 kPa	26,1	0,9298

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	26	27	28	29	30			
140				x				x								x								x									
135	x		0		x		0		x		x		x		0		x						0		x								
130		0				0				0		0		0				0		x		0				0							
125																					0												
120																																	

x přeskok
0 bez přeskoku

Impulz č.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
U_z [V]	64,9	62,8	64,8	66,6	65,0	62,3	64,6	67,1	64,8	62,4	64,7	62,7	64,8	62,9	65,0
U_p [kV]	134,5	130,1	134,3	138,0	134,7	129,1	133,8	139,0	134,3	129,3	134,1	129,9	134,3	130,3	134,7
U_{kor} [kV]	144,6	139,9	144,4	148,4	144,8	138,8	144,0	149,5	144,4	139,1	144,2	139,7	144,4	140,2	144,8

Impulz č.	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
U_z [V]	66,9	64,8	62,9	64,8	62,5	59,4	62,9	64,6	66,9	64,8	62,8	64,6	67,5	64,5	62,8
U_p [kV]	138,6	134,3	130,3	134,3	129,5	123,1	130,3	133,8	138,6	134,3	130,1	133,8	139,9	133,6	130,1
U_{kor} [kV]	149,1	144,4	140,2	144,4	139,3	132,4	140,2	144,0	149,1	144,4	139,9	144,0	150,4	143,7	139,9

Číslo testu Datum měření
LI72 2.4.2014

U_p [kV]	50	55	60	65	70	75
U_{nab} [V]	13,6	15,1	16,5	18	19,3	20,7

Elektrody	Mězera	Prodléva	Polarita impulzu	Bariera	Tlak v nádobě	Tlak v laboratoři	Teplota v laboratoři	Korekční činitel
R0,5B	60 mm	30 s	kladná	ne	96,35 kPa	96,97 kPa	26,6 °C	0,9302

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	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38				
75																							x																			
70				x						x												0		x																		
65	x	0			x				0								x								0																	
60		0																0																								
55																																										
50																																										

x přeskok
0 bez přeskoku

Impulzč.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
U_z [V]	31,4	28,9	31,6	33,9	31,5	29,0	26,7	29,1	31,6	33,8	31,5	33,7	31,5	28,9	31,6	33,7	31,5	29,1	31,6
U_p [kV]	65,1	59,9	65,5	70,2	65,3	60,1	55,3	60,3	65,5	70,0	65,3	69,8	65,3	59,9	65,5	69,8	65,3	60,3	65,5
U_{kor} [kV]	69,9	64,4	70,4	75,5	70,2	64,6	59,5	64,8	70,4	75,3	70,2	75,1	70,2	64,4	70,4	75,1	70,2	64,8	70,4

Impulzč.	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38
U_z [V]	33,9	31,5	33,9	36,1	33,8	31,6	33,6	31,4	55,4	31,6	29,1	26,6	29,0	27,0	29,0	31,6	33,8	31,6	29,0
U_p [kV]	70,2	65,3	70,2	74,8	70,0	65,5	69,6	65,1	114,8	65,5	60,3	55,1	60,1	55,9	60,1	65,5	70,0	65,5	60,1
U_{kor} [kV]	75,5	70,2	75,5	80,4	75,3	70,4	74,8	69,9	123,4	70,4	64,8	59,3	64,6	60,1	64,6	70,4	75,3	70,4	64,6