

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Dielektrické vlastnosti vzduchu v nehomogenním poli

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Lenka AJGLOVÁ**
Osobní číslo: **E13N0039K**
Studijní program: **N2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu: **Dielektrické vlastnosti vzduchu v nehomogenním poli**
Zadávací katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

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

1. Uveďte příčiny rozdílných dielektrických vlastností vzduchu v homogenním a nehomogenním poli.
2. Popište vliv polarity napětí na dielektrické vlastnosti vzduchu.
3. Popište vliv nevodivé bariéry vložené do nehomogenního pole.
4. Ověřte popsané jevy a závislosti měřením.
5. Zhodnoťte výsledky měření.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 30 - 40 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

Vhodnou literaturu si student vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucí práce.

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Jiří Laurenc, CSc.**
Katedra elektroenergetiky a ekologie

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

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


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




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

V Plzni dne 15. října 2015

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na experimentální ověření teoretických předpokladů o dielektrických vlastnostech vzduchu. V první polovině práce jsou popsány dielektrické vlastnosti vzduchu v homogenním a nehomogenním poli, vliv polaritu napětí na dielektrické vlastnosti vzduchu a teoretický předpoklad ovlivnění vlastností vložením nevodivé bariéry do nehomogenního pole. V druhé polovině práce jsou zhodnoceny výsledky měření a porovnány s teoretickými předpoklady.

Klíčová slova

Homogenní a nehomogenní pole, vzduch, izolant, elektrická pevnost, elektrická vodivost, intenzita elektrického pole, koróna, ionizace, lavina, strimér, výboje v plynech, přeskokové napětí, polarita, nevodivá bariéra, koule, deska, hrot, kužel.

Abstract

Submitted diploma thesis is focused on the experimental verification of the theoretical assumptions about the dielectric attributes of the air. In the first half of this thesis are described the dielectric attributes of the air in the homogeneous and in the inhomogeneous field, effect of the polarity voltage on the dielectric attributes of the air and the theoretical assumption of the affecting the properties by the inserting of the non-conductive barrier in the inhomogeneous field. In the second half of the thesis are evaluated the measurement results and they are compared with the theoretical assumptions.

Key words

Homogeneous and inhomogeneous field, air, insulator, dielectric strength, electrical conductivity, electric field strength, corona, ionization, avalanche, streamer, gas discharge, over voltage, polarity, non-conductive barrier, balls, board, spike, cone.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracovala 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

Poděkování

Tímto bych ráda poděkovala vedoucímu diplomové práce Doc. Ing. Jiřímu Laurencovi, CSc. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce. Poté bych také ráda poděkovala Ing. Romanu Hamarovi, Ph.D. za pomoc s výpočtem matematického modelu rozložení intenzity elektrického pole. V neposlední řadě mi je milou povinností poděkovat celé rodině, především rodičům, kteří mě během studia ochotně a trpělivě podporovali, a všem vyučujícím, kteří se na mém vzdělání podíleli.

Obsah

OBSAH	8
ÚVOD	10
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	11
1 ZÁKLADNÍ ZÁKONITOSTI VEDENÍ PROUDU V PLYNECH	13
1.1 SLOŽENÍ VZDUCHU	13
1.1.1 Dielektrické vlastnosti jiných plynů než vzduchu	14
1.2 DIELEKTRIKUM	15
1.3 ELEKTRICKÁ PEVNOST	15
1.4 ELEKTRICKÁ VODIVOST PLYNNÝCH IZOLANTŮ.....	17
1.4.1 Nárazová ionizace	17
1.4.2 Fotoionizace	20
1.4.3 Tepelná ionizace.....	21
1.4.4 Povrchová ionizace.....	22
1.5 ZÁNİK NOSIČŮ NÁBOJE	22
2 VÝBOJE V PLYNECH	23
2.1.1 Townsendovy výboje – nesamostatné výboje.....	24
2.1.2 Samostatné výboje	26
2.1.3 Kanálové výboje – striméry	31
2.2 KORÓNA.....	33
2.2.1 Kladná koróna	34
2.2.2 Záporná koróna	34
2.3 TRSOVÝ VÝBOJ A SRŠENÍ.....	35
2.4 JISKROVÝ VÝBOJ	35
3 VLIV POLARITY ELEKTROD NA VELIKOST PŘESKOKOVÉHO NAPĚTÍ ...	36
4 VLIV NEVODIVÉ BARIÉRY VLOŽENÉ DO NEHOMOGENNÍHO POLE NA VELIKOST PŘESKOKOVÉHO NAPĚTÍ	37
5 MATEMATICKÝ MODEL ROZLOŽENÍ INTENZITY ELEKTRICKÉHO POLE	39
6 MĚŘENÍ	43
6.1 SCHÉMA ZAPOJENÍ.....	43
6.2 POSTUP MĚŘENÍ.....	44
6.3 LABORATOŘ A POUŽITÉ PŘÍSTROJE	45
6.4 ZPRACOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH VÝSLEDKŮ	48
6.4.1 Koule - koule.....	48
6.4.2 Deska - koule	49
6.4.3 Deska – ostrý hrot	51
6.4.4 Ostrý hrot – ostrý hrot	52

6.4.5	<i>Deska – ostrý hrot s vloženou nevodivou bariérou</i>	54	
6.4.6	<i>Deska – kužel</i>	55	
6.4.7	<i>Deska – polokoule</i>	57	
6.4.8	<i>Porovnání přeskového napětí v závislosti na polaritě a vzdálenosti elektrod</i> 59		
6.4.9	<i>Porovnání přeskového napětí v závislosti na polaritě a poloměru elektrod</i>	60	
ZÁVĚR		63	
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ		65	
PŘÍLOHY		1	
PŘÍLOHA A – MATEMATICKÝ MODEL ROZLOŽENÍ INTENZITY ELEKTRICKÉHO POLE			1
	<i>Ostrý hrot</i>	1	
	<i>Kuželový hrot</i>	7	
	<i>Polokoule</i>	12	
	<i>Koule</i>	17	
PŘÍLOHA B - GRAFY			22
PŘÍLOHA C - FOTODOKUMENTACE			26

Úvod

Ve vysokonapěťové technice je nejvyužívanějším izolačním prvkem vzduch. Při izolování dvou různých potenciálů vzduchem mohou nastat různé děje, které je zapotřebí definovat. Předkládaná práce je zaměřena na dielektrické vlastnosti vzduchu v nehomogenním poli.

Práce je rozdělena do dvou hlavních částí. V první části práce popisují již zjištěné a vysvětlené základní zákonitosti vedení proudu v plynech. Jednotlivé kapitoly se zabývají popisem elektrické pevnosti a vodivosti plyných izolantů. Dále popisují jednotlivé druhy výbojů v plynech a podmínky jejich vzniku. Ke konci teoretické části se zabývám vlivem polaritý elektrod a vlivem vložené nevodivé bariéry do nehomogenního pole na velikost přeskokového napětí. Zjištěné předpoklady jsou následně ověřeny měřením.

V druhé praktické části jsou uvedeny výsledky provedených laboratorních měření. Měření jsou prováděna pro uspořádání tvořené hrotem proti desce. Pro porovnání různých nehomogenních polí jsou použity hrotové elektrody s různým poloměrem zakřivení. Také je provedeno měření pro uspořádání ostrý hrot proti desce s vloženou nevodivou bariérou. Výsledky jsou graficky zpracovány a porovnány s teoretickými předpoklady.

Seznam symbolů a zkratek

atd.	a tak dále
cca	přibližně
Obr.	obrázek
resp.	respektive
Tab.	tabulka
tj.	to je
tzv.	tak zvaně
%	označení procentuálního vyjádření
A	konstanta závislá na druhu plynu a teplotě ($\text{cm}^{-1} \cdot \text{kPa}^{-1}$)
B	konstanty závislé na druhu plynu a teplotě ($\text{V} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{kPa}^{-1}$)
E_p	elektrická pevnost ($\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$)
E	intenzita elektrického pole ($\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$)
I	elektrický proud (A)
I_n	nasycený proud (A)
J	proudová hustota ($\text{A} \cdot \text{m}^{-2}$)
N, n	koncentrace iontů (-)
NN	nízké napětí (V)
R	elektrický odpor, izolační elektrický odpor (Ω)
R_v	ochranný vodní odpor (Ω)
RGN	rázový generátor napětí
RGP	rázová vlna proudu
S	plocha elektrod (m^2)
U_i	ionizační napětí (V)
U_p	průrazné napětí, napětí jiskry, přeskokové napětí (V)
U_0	počáteční napětí (V)
U_m	maximální napětí (V)
VN	vyšoké napětí (V)
VVN	velmi vyšoké napětí (V)
W_i	ionizační práce neutrální částice plynu, ionizační energie (eV)
ZVN	zvláště vyšoké napětí (V)

c	rychlost světla ve vakuu $c=3 \cdot 10^8$ (m.s ⁻¹)
d	tloušťka izolantu (m)
d	vzdálenost mezi elektrodami (m)
dx	derivace podle x
e	elementární náboj (C)
f	kmitočet záření (Hz)
h	je Planckova konstanta $h=6,625 \cdot 10^{-34}$ (Js)
ln	přirozený logaritmus
m	hmotnost částice (kg)
p	tlak plynu (Pa)
r	poloměr (m)
v	rychlost částice (m.s ⁻¹)
x	dráha elektronu (m)
y	vzdálenost nevodivé bariéry od elektrody (m)
$1/\lambda$	střední počet srážek elektronu (-)
α	Townsendův ionizační činitel (-)
β	ionizační číslo pro kladné ionty (-)
γ	Townsendův činitel sekundární ionizace (-)
δ	poměrná hustota (-)
ϑ	teplota (°C)
λ	střední volná dráha elektronu, vlnová délka (m)
π	Ludolfovo číslo (3,14926535)

1 Základní zákonitosti vedení proudu v plynech

1.1 Složení vzduchu

Vzduch se jako izolant využívá pro venkovní vedení, vzduchové kondenzátory a transformátory. Pro vysokonapěťová zařízení bývá stlačen. Vzduch jako izolant má pro techniku vysokého napětí velký význam, ať již sám nebo ve spojení s pevnými izolanty.

Vzduch je směs plynů tvořící plynný obal Země. Skládá se z celé řady plynů. Největší zastoupení mají dusík (78 % objemu) a kyslík (21 % objemu). Ostatní plyny jsou zastoupeny ve zdatelně menším množství. Jednotlivé plyny a jejich procentní a hmotnostní zastoupení ve vzduchu je uvedeno v tabulce (Tab. 1.1).

Tab. 1.1 Složení vzduchu

Plyn	Chemická značka	Objem (%)	Hmotnost (%)
Dusík	N ₂	78,09	75,51
Kyslík	O ₂	20,95	23,17
Argon	Ar	0,93	1,28
Oxid uhličitý	CO ₂	0,033	0,04
Neon	Ne	0,0018	0,0012
Helium	He	0,000524	0,000072
Metan	CH ₄	0,0002	0,0001
Krypton	Kr	0,000114	0,0003
Vodík	H ₂	0,00005	0,000001
Xenon	Xe	0,0000087	0,00004

[7]

Vzduch obsahuje kromě výše uvedených plynů určité množství vlhkosti v podobě vodních par nebo mlhy a také pevné prachové částice buď přírodního původu, nebo vzniklé lidskou činností. Kinetická teorie plynů uvádí, že molekuly a ionty jsou trvale v nepravidelném pohybu. Při vykonávání pohybu překonávají určité dráhy, kdy se sráží každá molekula s jinou nebo dochází ke srážkám molekul s ionty. Počet molekul a iontů ve

vzduchu se neustále mění působením ionizace¹ a rekombinace². Vlivem ionizačních činitelů vznikají srážkami volné elektrony a kladné nebo záporné ionty. Vzduch je vždy částečně ionizován vlivem kosmického záření a radioaktivitou zemské kůry. Počet iontů závisí i na umístění. Pokud je vzduch za atmosférického tlaku vystaven silné ionizaci (rentgenovými paprsky), může počet iontů narůstat. [1] [5]

1.1.1 Dielektrické vlastnosti jiných plynů než vzduchu

Izolační vlastnosti plynu jsou charakterizovány zejména tzv. poměrnou elektrickou pevností³. Tabulka (Tab. 1.2) udává její velikost pro vybrané plyny při atmosférickém tlaku.

Tab. 1.2 Poměrná elektrická pevnost některých plynů

Plyn	Poměrná elektrická pevnost
Vodík	0,6 až 0,75
Dusík	1,0
Vzduch	1,0
Kyslík	1,1
Kysličník uhličitý	1,15 až 1,25
chlór	1,55

V některých elektrických zařízeních se využívá závislosti zvýšení přeskokového napětí plynů se zvyšujícím se tlakem. Při použití tlaků nad 1,5 MPa se musí provádět složité úpravy zařízení a to ztěžuje provozní podmínky. Proto mají význam převážně plyny s velkou poměrnou elektrickou pevností (viz. Tab. 1.3).

Tab. 1.3 Poměrná elektrická pevnost některých halových derivátů

Plyn	Chemická značka	Poměrná elektrická pevnost
Chlorid uhličitý	CCl ₄	6,3
Fluorid selenu	SeF ₄	4,5
Freon	CCl ₂ F ₂	2,4 až 2,6
Fluorid sírový	SF ₆	2,3 až 2,5

¹ Vysvětleno v kapitole 1.4

² Vysvětleno v kapitole 1.6

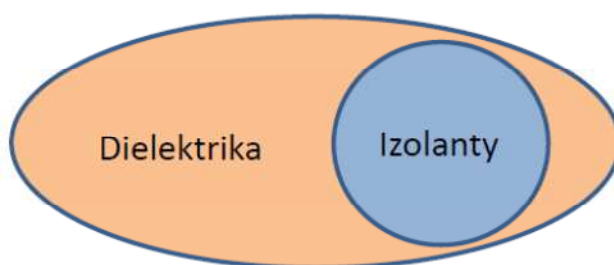
³ Elektrická pevnost je poměr elektrické pevnosti plynu a vzduchu při téže tlaku a téže vzdálenosti stejných elektrod.

Pro použití v elektrotechnice je nejvhodnější fluorid sírový SF₆. Čistý SF₆ je inertní, bez zápachu, nehořlavý, nerozkládá se do 800°C a není jedovatý. Elektrický oblouk zháší lépe než vzduch. Je vhodný pro použití v elektrických přístrojích, zejména v zapouzdřených stanicích vvn a zvn. [1]

1.2 Dielektrikum

Dielektrikum je látka, která má po vložení do elektrického pole schopnost tvorby vlastního vnitřního elektrického pole, tedy má schopnost se polarizovat. Dielektrika jsou tak aktivními prvky se specifickými vlastnostmi. Izolant má oproti dielektriku schopnost zabránit průchodu proudu mezi dvěma místy s různým elektrickým potenciálem. Izolanty jsou tak pasivními prvky bránícími průchodu proudu.

Pojem dielektrikum a izolant bývají často zaměňovány. Izolanty jsou podmnožinou dielektrik, z čehož vyplývá, že každý izolant je dielektrikum, ne však každé dielektrikum je izolant.



Obr. 1.1 Dielektrika – izolanty [6]

Dielektrika rozdělujeme podle struktury, uspořádání a skupenství. Dielektrika podle skupenství dělíme na plynná, kapalná a pevná. Každá skupina má své specifické fyzikální a tím i elektrické vlastnosti, které jsou společné pro danou skupinu. Rozdělení podle skupenství je důležité i z hlediska definování matematického popisu chování a vlastností. [4]

1.3 Elektrická pevnost

Elektrická pevnost je veličinou jednoznačně charakterizující daný elektroizolační materiál, který od sebe odděluje dvě místa s rozdílným elektrickým potenciálem a zabraňuje průchodu proudu. Z toho důvodu je prakticky využívána při návrzích konstrukcí

elektrických zařízení jako dimenzionální parametr. Elektrická pevnost se u elektrických zařízení posuzuje podle nejmenšího napětí, které způsobuje za určitých okolností (tlak, teplota, vlhkost atd.) na zařízení průraz nebo přeskok. Toto napětí záleží na rozměrech a izolačním materiálu předmětu, na tvaru elektrického pole, které vznikne v izolantu i kolem něho, na tvaru elektrod a na okolních předmětech. Závisí také na časovém průběhu elektrického namáhání, tedy u rázového namáhání na tvaru napěťového rázu, u střídavého namáhání na kmitočtu a na době trvání namáhání, tj. jak dlouho je izolant vystaven účinku elektrického pole. Toto napětí se nazývá průrazné napětí a označuje se U_p . Proces elektrického namáhání končí výbojem⁴, kdy jsou původně izolovaná místa s různým potenciálem (např. elektrody) spojena dokonale vodivou cestou. Touto nově vzniklou vodivou cestou tečou proudy velkých hodnot. Jejich velikost je omezena pouze impedancí zdroje napětí a přívodů elektrod. Konečné následky vzniklého výboje mají významné degradační účinky. V závislosti na skupenství daného materiálu a uspořádání elektrického obvodu mluvíme o průrazu⁵ či přeskoku⁶.

Pokud průrazné napětí U_p (kV) lineárně přepočítáme na tloušťku izolantu d (mm) v místě průrazu či přeskoku, získáme hodnotu elektrické pevnosti E_p materiálu:

$$E_p = \frac{U_p}{d} \text{ (kV} \cdot \text{mm}^{-1}\text{)} \quad (1.1)$$

kde d je tloušťka izolantu v místě průrazu nebo nejmenší vzdálenost mezi elektrodami.

⁴ Výboj je jev, který charakterizuje průchod proudu izolujícím prostředím. Může být soustředěný na jedno nebo více míst. Při úplném výboji dochází k poklesu napětí na zkoušeném předmětu.

⁵ Průraz je vždy charakterizován rychlým vzrůstem proudu, poklesem napětí, jasně svítící ohnivou stopou mezi elektrodami, vysokou teplotou, která zuhelnatuje, taví nebo zplyňuje izolant. Pevné izolanty ztrácejí průrazem trvale svou izolační vlastnost. Průrazné napětí je hodnota napětí, při které dochází k průrazu.

⁶ Přeskok je souhrn jevů, provázejících úplný výboj v plynném nebo kapalném izolantu. Je spojen s poklesem napětí na elektrodách a nárůstem proudu. Zhoršení izolačních vlastností dielektrika je zpravidla přechodné. Plynné a kapalné izolanty mají vlastnost regenerace. Přeskokové napětí je pak hodnota napětí, při které dochází k přeskoku.

V případě homogenního⁷ elektrického pole má elektrická pevnost jasný fyzikální smysl – představuje intenzitu elektrického pole, při níž dojde k průrazu (resp. přeskoku). V nehomogenních elektrických polích⁸ je situace podstatně složitější. Porovnání různých materiálů můžeme provést pouze za předpokladu, že byly výsledky získány za stejných podmínek. Vzájemně srovnatelné podmínky se zajišťují velmi obtížně. Elektrická pevnost je silně závislá na řadě činitelů, jimiž jsou tloušťka, struktura, homogenita materiálu, obsah nečistot, vlhkost, tvar elektrického pole, jeho frekvence, teplota izolantu a jeho okolí, soubor okolností předcházející průrazu. V případě nehomogenního pole je tedy elektrická pevnost izolantů konvenční⁹ veličinou. [4]

1.4 Elektrická vodivost plyných izolantů

O plynech nacházejících se ve slabém elektrickém poli při nízkých teplotách se hovoří jako o výborných izolantech. To je způsobeno především velkou vzdáleností mezi molekulami a slabou vzájemnou interakcí mezi nimi, což způsobuje malá koncentrace volných nosičů elektrického náboje. Vzdálenost molekul může být v tomto případě až stokrát větší než jejich vlastní rozměry. Volné nosiče nábojů v plynech vznikají ionizací. Ionizační činidla jsou v těchto případech zejména elektrického původu nebo ve formě kosmického a radioaktivního záření. Ionizace je proces osvobozující elektron z molekuly plynu se současnou produkcí kladného iontu. Nabité částice, elektrony i ionty se mohou vlivem elektrického pole v plynu pohybovat prakticky volně. Vzájemné působení mezi molekulami plynu je velice slabé. K ionizaci atomu plynu dojde tehdy, když pohltí dostatečně velké množství – tzv. ionizační energie. K ionizaci dochází nejčastěji následujícími způsoby. [4]

1.4.1 Nárazová ionizace

Při nárazové ionizaci volný elektron s dostatečnou rychlostí naráží na neutrální molekulu a vytváří nový elektron a kladný iont, které získávají potřebnou kinetickou energii vlivem působení elektrického pole nebo vlivem vysoké teploty (tzv. tepelná

⁷ tj. takové pole, jehož elektrická intenzita má v každém bodě stejný směr a velikost. Siločáry jsou tedy navzájem rovnoběžné.

⁸ V nehomogenním elektrickém poli není hustota indukčních čar stejná, intenzita není konstantní.

⁹ dohodnutá, sjednaná, smluvní, obvyklá

ionizace). Náraz nemusí být přímo fyzická srážka. Ionizaci vyvolá také vzájemné působení silových polí částic při blízkém průletu, což má za následek vychýlení jejich drah.

Pro ionizaci neutrální částice musí platit:

$$\frac{1}{2}mv^2 \geq W_i \quad (1.2)$$

V případě, že narážející částice je elektron a má stejnou hmotnost jako částice zasažená, platí:

$$\frac{1}{2}mv^2 \geq 2W_i \quad (1.3)$$

kde W_i je ionizační energie (J)

m je hmotnost ionizující částice (kg)

v je rychlost ionizující částice (m.s⁻¹)

Nárazovou ionizaci plynu můžou zapříčinit i rychlé α a β částice radioaktivních látek. Plyn radon, vyskytující se ve vzduchu, je jedním z hlavních ionizačních činidel. Radon se rozpadá a v jeho okolí nastává ionizace. Nárazová ionizace je nejdůležitější proces při přeskoku v plynech. [4]

Energie, kterou získá elektron v elektrickém poli, závisí na intenzitě pole E a na dráze mezi dvěma srážkami. Pokud dosáhne tato energie velikost dle rovnice (1.2), elektron při srážce ionizuje. Počet dvojic nosičů vytvořených elektronem na dráze 1 m ve směru pole je tzv. ionizační číslo α . Townsend při teoretickém výpočtu ionizačního čísla předpokládal tato zjednodušení:

- 1) Elektron ionizuje plyn tehdy, je-li jeho kinetická energie větší než ionizační práce plynu nebo se jí alespoň rovná. Pravděpodobnost ionizace pod uvedenou mezí je tedy nula, nad ní jedna.
- 2) Při každé srážce odevzdá elektron celou svou kinetickou energii.
- 3) Elektrony se pohybují jen ve směru pole.

Ionizační číslo závisí na energii získané elektronem na jeho střední volné dráze λ , tato energie je tedy $eE\lambda$. Střední počet srážek na jednotce délky je $1/\lambda$, takže uvážíme-li, že e^{10} je konstanta, můžeme psát

$$\alpha = \frac{f(E\lambda)}{\lambda} \quad (1.4)$$

protože střední volná dráha λ je nepřímo úměrná tlaku p , lze také psát

$$\frac{\alpha}{p} = F\left(\frac{E}{p}\right) \quad (1.5)$$

aby elektron, který se pohybuje v homogenním poli, při srážce ionizoval molekulu, musí podle předpokladu 1) platit pro jeho energii, kterou získal na své dráze x

$$eEx \geq W_i = eU_i \quad (1.6)$$

musí tedy překonat dráhu

$$x \geq \frac{U_i}{E} \quad (1.7)$$

kde U_i je ionizační napětí (pro vzduch $U_i = 25$ V)

¹⁰ e je elementární náboj - nejmenší možný elektrický náboj jedné samostatné částice (C)

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

$$e^{-\frac{x}{\lambda}} = e^{-\frac{U_i}{\lambda E}} \quad (1.8)$$

Tato pravděpodobnost je odvozena z předpokladu, že dostatečně velké N_0 elektronů pohybujících se ve směru osy x , vstoupí do plynu rovinou kolmou k ose x v místě $x = 0$. Bylo definováno $1/\lambda$ jako střední počet srážek elektronu na délkové jednotce. Pokud proběhne N elektronů dráhu x bez kolize, dojde ke zmenšení počtu elektronů na dráze dx , které se ještě nesrazily, o $-dN = N \cdot (1/\lambda) \cdot dx$. Z toho vyplývá řešení ve tvaru

$$N = N_0 \cdot e^{-\frac{x}{\lambda}} \Rightarrow \frac{N}{N_0} = e^{-\frac{x}{\lambda}} \quad (1.9)$$

Násobí-li se střední počet volných drah na jednotku délky pravděpodobností, že volná dráha stačí na ionizaci, dostaneme ionizační číslo

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

Dosadí-li se ještě (za předpokladu konstantní teploty) $1/\lambda = Ap$, je

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

kde A a $B = AU_i$ jsou konstanty závislé na druhu plynu a na teplotě. [1]

1.4.2 Fotoionizace

Fotoionizace vzniká působením záření na hmotu. Neutrální částice je ionizována pohlčením fotonu¹¹. Fotoionizace je způsobena krátkovlnným zářením (gama, kosmické

¹¹ Foton je elementární částice, základní "jednotka" světelného a jiného elektromagnetického záření, má nulovou hmotu, nemá elektrický náboj a nerozpadá se samovolně ve volném prostoru.

záření, Rentgenovo záření, viditelné světlo), které je absorbováno atomem nebo molekulou. Když překročí hranici odpovídající ionizačnímu napětí, vygeneruje jeden nebo více elektronů (fotoelektrony). Intenzitu světelného paprsku zvyšuje (ovlivňuje) počet fotonů ve světelném paprsku. Fotoionizace probíhá při splnění podmínky:

$$hf \geq W_i \quad (1.12)$$

kde $f = c/\lambda$ a odtud plyne délka vlny, při níž může nastat ionizace

$$\lambda \leq \frac{hc}{W_i} \quad (1.13)$$

h je Planckova konstanta $h = 6,625 \cdot 10^{-34}$ (Js)

f je kmitočet záření (Hz)

c je rychlost světla ve vakuu $c = 3 \cdot 10^8$ (m.s⁻¹)

λ je vlnová délka (m)

W_i je ionizační práce neutrální částice plynu (eV)

Při fotoionizaci je možná i postupná ionizace. Nabuzený atom plynu vyzáří kvantum energie (foton), která může ionizovat jiný atom, jehož ionizační práce je menší než energie fotónu. [3] [4]

1.4.3 Tepelná ionizace

Podmínkou vzniku tepelné ionizace je vysoká teplota plynu. Mohou nastat tyto případy:

- I. Ionizace při srážkách mezi molekulami plynu s velkou kinetickou energií.
- II. Fotoionizace tepelným zářením plynu.
- III. Ionizace srážkami molekul plynu s elektrony vzniklými při předešlých jevech.

[1]

1.4.4 Povrchová ionizace

Během povrchové ionizace se elektrony uvolňují z povrchu elektrod. Aby se elektrony uvolnily, je třeba jim dodat tzv. výstupní práci.

Tuto práci lze elektronu dodat:

- ohříváním elektrody
- bombardováním povrchu kovu částicemi s dostatečnou energií
- ozařováním kovu krátkovlnným zářením (vnější fotoelektrický jev)
- působením silného vnějšího elektrického pole

V tomto případě záleží na vlastnostech kovu, ze kterého jsou elektrody vyrobeny, a z toho vyplývá, že vodivost není charakteristickou pro daný plyn mezi elektrodami. [1]
[4]

1.5 Zánik nosičů náboje

K zániku nosičů náboje plynu dochází neutralizací na elektrodách či rekombinací.

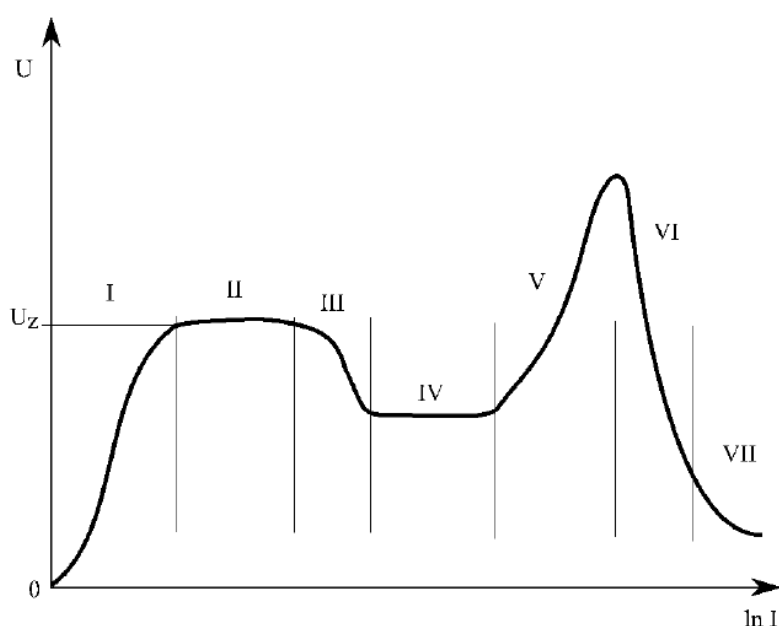
Při neutralizaci dopadají volné nosiče elektrického náboje na elektrodu s opačnou polaritou a neutralizují se, tzn., stane se z nich neutrální atom. Zpět do prostoru se vrací jako neutrální částice.

Dalším způsobem zániku volných nosičů náboje je rekombinace. Je to proces opačný k ionizaci. Při rekombinaci spojením dvou opačně nabitých částic vznikají částice elektricky neutrální. Nejčastějším případem je zachycení elektronu iontem a vytvoření neutrálního atomu. K většímu počtu rekombinací dochází se snižující se relativní rychlostí částic. [15]

2 Výboje v plynech

Výboje vznikající vlivem vnějšího ionizačního činidla (např. zdroj záření) ve slabém elektrickém poli nazýváme nesamostatné výboje. Při zániku vnějšího ionizačního činidla zaniká i nesamostatný výboj.

Dále existují samostatné výboje, kterým ke vzniku a udržení stačí dostatečně silné elektrické pole a nepotřebují vnější ionizační činitele. Elektrické pole vytvoří dostatečný počet iontů a elektronů, které uvede do pohybu a zajistí samostatné udržení proudu.



Obr. 2.1 V-A charakteristika; různé druhy výbojů [9]

Volt-ampérová charakteristika na Obr. 2.1 znázorňuje jednotlivé fáze elektrických výbojů.

- I. oblast Znázorňuje nesamostatný výboj, při kterém prochází jen malé proudy. Zvětšováním přiloženého napětí dosáhne hodnoty tzv. zápalného napětí U_z ¹².
- II. oblast Urychlené elektrony a ionty, které dopadají na katodu, z ní uvolňují dostatečný počet elektronů k zajištění udržení samostatného výboje. Tyto výboje se projevují šuměním, syčením a praskáním. Nazýváme je Townsendovy výboje.

¹² V tomto stavu je elektrické pole dostatečně silné pro urychlení elektronů, ty narážejí do neutrálních částic nebo iontů a mohou uvolňovat další elektrony do objemu výboje.

- III. oblast Je charakteristická pro vznik koróny.
- IV. oblast Znázorňuje výboj nazývaný jako normální doutnavý výboj. Při těchto výbojích je energie a hustota proudu nízká a katoda i plyn zůstávají chladné.
- V. oblast Elektrický výboj, pro který je charakteristická vyšší proudová hustota a vyšší teplota katody.
- VI. oblast Vystihuje průběh jiskrových výbojů, které se objevují, tečou-li v plynech velké proudy. Zapalují se při silném elektrickém poli s intenzitou $E \sim 10^6 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$.
- VII. oblast Jiskrový kanál má vysokou vodivost a po propojení obou elektrod se sníží napětí mezi nimi na 10 až 100 V. V případě, že je proudový zdroj dostatečně výkonný, dojde k vytvoření obloukového výboje.

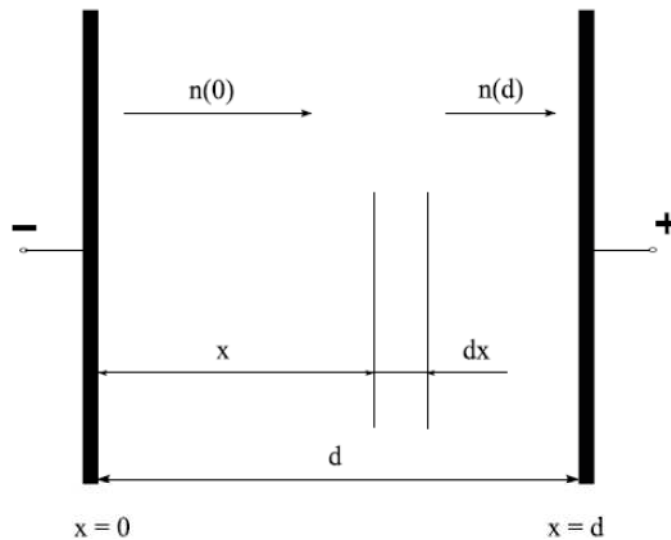
[9]

2.1.1 Townsendovy výboje – nesamostatné výboje

Výzkumem nesamostatných výbojů se zabýval irský fyzik J. E. S. Townsend, který zkoumal elektrodové uspořádání deska – deska, vyplněné plynným dielektrikem s homogenním časově neproměnným elektrickým polem (viz. Obr. 2.2). Tyto výboje vznikají při nízkých tlacích a malé hustotě proudu. Působením vnějšího ionizačního činidla vzniká volný elektron. Kinetickou energii získává vlivem vnějšího elektrického pole jednotlivých srážek s neutrálními molekulami. Dochází ke srážkám pružným i nepružným. Vlivem nepružných srážek dochází k nárazové ionizaci molekul, v některých případech dochází k přechodu do excitovaného stavu¹³. Během pružných srážek elektronu s neutrálními molekulami k ionizaci nedochází. Elektrony jen změny směr pohybu a při tom se nesníží jejich energie. Protože jde o velký počet srážek, rychlost pohybujícího se elektronu se ustálí na konstantní hodnotě. Poté lze uvažovat, že na jednotkové dráze bude působením tohoto elektronu vznikat stejný počet ionizačních srážek, označovaný jako Townsendův ionizační činitel α ¹⁴. Proud v Townsendových oblastech zmizí, jakmile přestane působit vnější ionizační činidlo, jsou to tedy výboje nesamostatné. [4]

¹³ Excitovaný stav je fyzikální jev, kdy elektrony v elektronovém obalu atomu jsou přeneseny do vyšších energetických hladin, než je normální stav. Příkladem je fotoelektrický jev, vyvolaný dopadem fotonu. Vzniká přijetím energie z okolí.

¹⁴ Určuje pravděpodobnost ionizace neutrální molekuly a je dán počtem volných iontů a elektronů, které v homogenním poli vytvoří jeden elektron nárazovou ionizací na jednotkové dráze ve směru intenzity působícího elektrického pole.



Obr. 2.2 Uspořádání k Townsendově teorii [4]

Při zkoumání nesamostatných výbojů předpokládáme, že z 1 m^2 katody je účinkem vnějšího ionizačního činidla emitován n_0 elektronů za sekundu. Nárazovou ionizací se bude jejich počet při průletu mezi elektrodami zvětšovat. Počet elektronů, které proletí za sekundu působením elektrického pole ekvipotenciální plochou 1 m^2 ve vzdálenosti x od katody, budiž n . Na dráze dx se vytvoří při srážkách dn nových elektronů. Při zanedbání rekombinace a difúze, je $dn = \alpha n dx$ a po integraci

$$n = n_0 e^{\alpha x} \quad (2.1)$$

Počet elektronů, které doletí za 1 sekundu na 1 m^2 anody, je

$$n_a = n_0 e^{\alpha d} \quad (2.2)$$

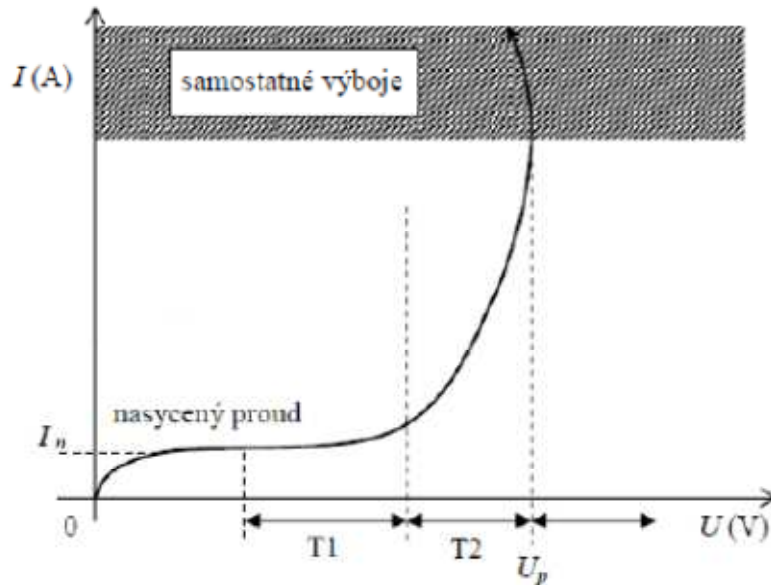
Násobíme-li obě strany této rovnice nábojem elektronu, dostáváme proudovou hustotu na anodě

$$J_a = J_0 e^{\alpha d} \quad (2.3)$$

kde J_0 je proudová hustota příslušná emisi elektronů z katody.

V uvažovaném poli každý elektron, jakmile získá kinetickou energii pro ionizaci, uvolní nárazem nový elektron a zároveň i kladný iont. Směrem k anodě roste počet elektronů lavinovitě. V lavině vyvolané jedním elektronem emitovaným z katody je po

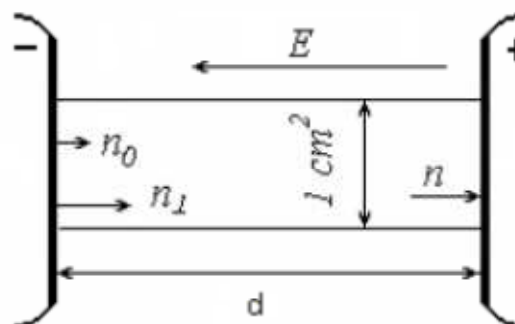
proběhnutí vzdálenosti elektrod e^{ad} elektronů. Lavina je výboj nesamostatný, neboť zanikne, jakmile přestane působit vnější ionizační činidlo. Jestliže budeme napětí dále zvyšovat až ke kritické hodnotě U_p , proud se zvětší velmi rychle a vznikne samostatný výboj (viz. Obr. 2.3). [1]



Obr. 2.3 Závislost výbojového proudu na přiloženém stejnosměrném napětí [5]

2.1.2 Samostatné výboje

V oblasti vyšších napětí (T2 na Obr. 2.3) ukazují experimenty značnou odchylku od teoretických výsledků odvozených pro oblast T1.



Obr. 2.4 Rozložení elektrod u samostatného výboje [5]

Mějme opět dvě rovinné elektrody ve vzdálenosti d a mezi nimi elektrické pole s intenzitou E v plynu s tlakem p (Obr. 2.4). Při dostatečně velkém poměru E/p probíhá elektronová ionizace. Zvýšení proudu je dáno přítomností kladných iontů a fotonů. Kladné

ionty i fotony uvolňují elektrony při kolizi s molekulami plynu a dopadem na katodu. Uvažujme, že za ustálených poměrů je n_0 elektronů emitováno za sekundu z 1 m^2 katody vnějším ionizačním činidlem. Počet elektronů dopadajících za sekundu na 1 m^2 anody označíme n . Dále každý kladný iont uvolní z katody průměrně γ nových elektronů, n_1 je počet elektronů uvolněných každou sekundu z 1 m^2 katody ionizačním činidlem i bombardováním dohromady. Počet kladných iontů, které vznikají mezi elektrodami v ustáleném stavu za sekundu, je $n - n_1$. Pro elektrony vystupující z katody lze psát

$$n_1 = n_0 + \gamma(n - n_1) \quad (2.4)$$

Úpravou získáme tvar

$$n_1 = \frac{n_0 + \gamma n}{1 + \gamma} \quad (2.5)$$

Podle rovnice (2.2) je počet elektronů dopadajících na anodu

$$n = \frac{n_0 + \gamma n}{1 + \gamma} e^{\alpha d} \quad (2.6)$$

odkud

$$n = \frac{n_0 e^{\alpha d}}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)} \quad (2.7)$$

a po vynásobení nábojem elektronu dostaneme proudovou hustotu u anody

$$J = \frac{J_0 e^{\alpha d}}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)} \quad (2.8)$$

Výraz (2.8) má smysl, pokud je jeho jmenovatel větší než nula. V celém prostoru mezi elektrodami uvažujeme stejnou hustotu.

Na rozhraní katody a plynu probíhají ještě jiné emisní jevy (např. fotoionizace), než předpokládal Townsend, které jsou zohledněny v experimentálně zjištěném ionizačním čísle γ . Roste-li intenzita elektrického pole, roste i proudová hustota dle rovnice (2.8),

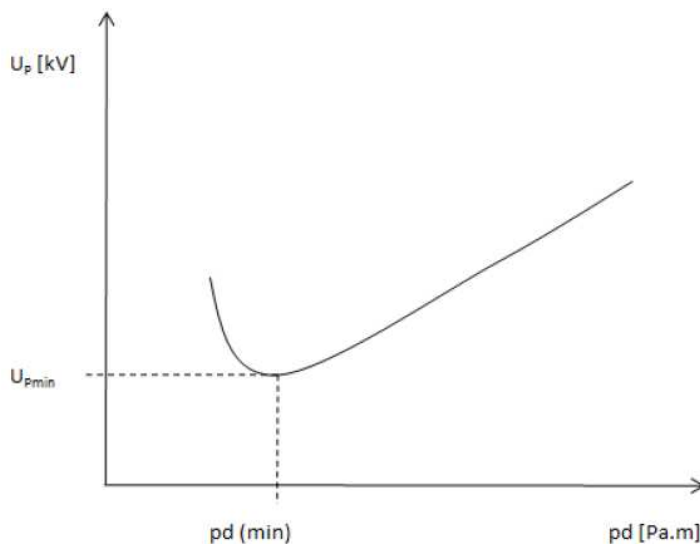
výboj ale ještě není samostatný, protože přestane-li působit vnější ionizační činidlo (tj. když $J_0 = 0$), přestane procházet proud mezi elektrodami. Pro určitou velikost intenzity pole však nastane přechod od nesamostatného výboje k samostatnému výboji. K tomuto zlomu dojde, je-li splněna podmínka samostatného výboje

$$\gamma(e^{\alpha d} - 1) = 1 \quad (2.9)$$

Proud poté prochází i bez vlivu vnějšího činidla. Samostatného výboje můžeme dosáhnout dvěma způsoby. Změnou velikosti napětí při konstantní vzdálenosti nebo za stálého napětí změnou vzdálenosti elektrod. V případě, že je splněna podmínka (2.9), neplatí již rovnice (2.8), protože se ustaví pochody jiného druhu. [1]

2.1.2.1 Přeskokové napětí v homogenním elektrickém poli – Paschenův zákon

Závislost přeskokového napětí na tlaku a vzdálenosti mezi elektrodami se nazývá Paschenův zákon. Grafickým znázorněním tohoto vztahu je experimentálně zjištěná tzv. Paschenova křivka, která je zobrazena na Obr. 2.5.



Obr. 2.5 Paschenova křivka [11]

Přeskokové napětí v homogenním poli může být stanoveno z podmínky samostatného výboje rovnice (2.9), kterou lze psát ve tvaru

$$\alpha d = \ln \left(1 + \frac{1}{\gamma} \right) \quad (2.10)$$

Podle rovnice (1.5) je α/p funkcí E/p . Také γ závisí na poměru E/p , neboť je funkcí energie, kterou v průměru získá kladný iont na volné dráze před katodou. Platí $\alpha/p = F(E/p)$ a $\gamma = G(E/p)$. Dále platí $E = U/d$, kde U je napětí mezi elektrodami. Rovnici (2.10) můžeme psát

$$pd \cdot F \left(\frac{U}{pd} \right) = \ln \left[1 + \frac{1}{G \left(\frac{U}{pd} \right)} \right] \quad (2.11)$$

Při napětí, které splňuje tuto podmínku, se vytvoří samostatný výboj a v homogenním poli nastane přeskok. Napětí označujeme U_p . Z rovnice (2.11) vyplývá, že v homogenním poli při konstantní teplotě závisí přeskokové napětí na součinu tlaku a vzdálenosti elektrod. Zvětší-li se vzdálenost n -krát a současně zmenšíme tlak n -krát (nebo naopak), přeskokové napětí se nezmění.

Předpokládáme-li ionizační číslo γ konstantní a dosadíme-li do rovnice (2.10) za α podle rovnice (1.11), dostáváme místo rovnice (2.11)

$$Apd \cdot e^{-\frac{Bpd}{U}} = \ln \left(1 + \frac{1}{\gamma} \right) \quad (2.12)$$

z toho

$$U_p = \frac{Bpd}{\ln \frac{Apd}{\ln \left(1 + \frac{1}{\gamma} \right)}} \quad (2.13)$$

kde A a B jsou konstanty typické pro každý plyn.

Z Obr. 2.5 je zřejmá existence minimální hodnoty přeskového napětí (tzv. Paschenovo minimum pd_{min}), pod kterým není přeskok možný. Získáme ho derivací rovnice (2.13) podle pd a položíme-li tuto rovnici nule:

$$\ln \frac{Apd}{\ln \left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)} = 1 \quad (2.14)$$

Z toho plyne

$$(pd)_{min} = \frac{e \ln \left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)}{A} \quad (2.15)$$

a

$$U_{p min} = B(pd)_{min} \quad (2.16)$$

nebo

$$E_{p min} = Bp_{min} \quad (2.17)$$

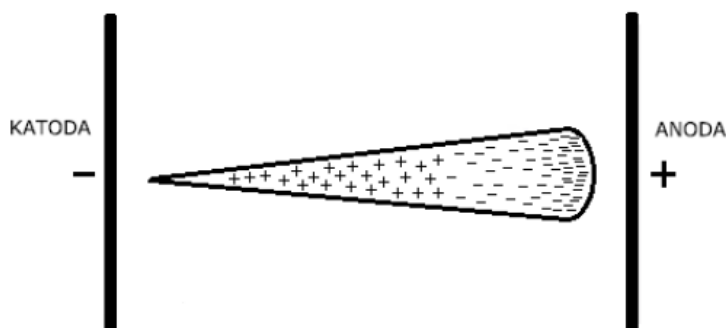
kde $E_{p min}$ je intenzita elektrického pole, při níž nastává přeskok za nejpříznivějších podmínek pro ionizaci v prostoru mezi elektrodami. [1] [4]

2.1.2.2 Přeskovové napětí v nehomogenním elektrickém poli

V nehomogenním elektrickém poli můžeme pozorovat počáteční výboj. Tento výboj je zpravidla částečný a nerozšíří se po celé vzdálenosti mezi elektrodami. Další zvyšování přiloženého napětí vede k přeskoku při hodnotě přeskového napětí U_p , které je větší než napětí počáteční. V homogenním poli $U_0 = U_p$. Stanovení počátečního napětí v nehomogenním poli je mnohem složitější než v homogenním poli. Tato úloha je obtížná zejména ve značně nehomogenních polích, v nichž se projevují prostorové náboje. Polarita elektrod má v tomto případě významnou roli. U nehomogenních elektrických polí složitějšího charakteru se pro určování počátečního napětí využívají vzorce sestavené z experimentálních pokusů. [1]

2.1.3 Kanálové výboje – striméry

Výše zmíněná Townsendova teorie elektrického výboje vysvětluje procesy vyvolané kladnými ionty na katodě, avšak nevysvětluje krátkou dobu výstavby jiskry (asi 10^{-7} s) v homogenním poli při velké vzdálenosti elektrod a atmosférickém tlaku. Rychlost kladných iontů je přibližně 10^3 m.s⁻¹, a z toho vyplývá, že za dobu výstavby žádný kladný iont neproběhne vzdálenost mezi elektrodami. To vedlo k hledání nového mechanismu, podle kterého elektronová lavina, vytvořená jedním elektronem, po vytvoření dostatečného prostorového náboje přechází v kanálový výboj. Výboj se šíří k oběma elektrodám velkou rychlostí. Průběh šíření laviny byl pozorován při pokusech ve Wilsonově mlžné komoře.



Obr. 2.6 Zjištěný tvar laviny [5]

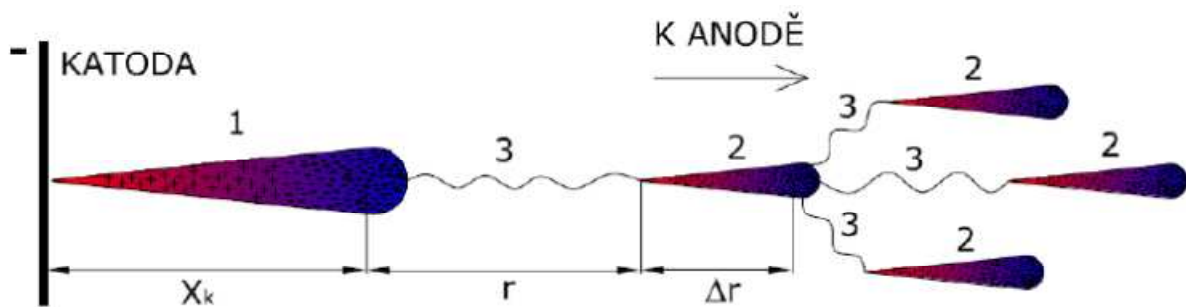
Přestoupí-li napětí hodnotu podmínky samostatného výboje, vyvíjí se kanálový výboj, který se šíří z čela laviny k anodě i katodě asi desetkrát větší rychlostí než původní lavina. Během pokusů vycházelo z kanálu směřujícího ke katodě tmavomodré světélkování. Podle něho se výbojový kanál anglicky nazývá „streamer“. U nás bylo přijato fonetické pojmenování strimér. [1]

2.1.3.1 Kanálové výboje v homogenním poli

K přechodu stadia laviny do striméru dojde, když se v čele prvotní laviny nahromadí dostatečně velký prostorový náboj. Lavina přechází ve strimér, je-li výboj schopen samostatně se dále rozvíjet bez vnějšího ionizačního činidla, takže podmínku pro vytvoření striméru lze pokládat za podmínku pro samostatný výboj.

Vznik striméru závisí na pochodech v čele prvotní laviny. V počáteční fázi nárůstu laviny je objemová hustota elektronů i kladných iontů ještě tak malá, že není třeba přihlížet k deformaci pole prostorovými náboji. Mechanismus šíření striméru postupujícího

k anodě je znázorněn na Obr. 2.7. Proběhne-li lavina určitou vzdálenost x_k , vzroste hustota elektronů v čele laviny na kritickou hodnotu a intenzita ultrafialového záření vznikajícího v čele laviny se zvětší do té míry, že se může fotoionizací uvolnit elektron v určité vzdálenosti r před čelem laviny, a to v oblasti elektrického pole zesíleného prostorovým nábojem laviny. Vzniklý elektron se vlivem působení elektrického pole rychle pohybuje k anodě, kde dochází k nárazové ionizaci a vzniká sekundární lavina. Mezi čelem prvotní a sekundární laviny vznikne prostor vyplněný elektrony prvotní laviny a kladnými ionty sekundární laviny, které vytvoří kanál dobře vodivého plazmatu. Sekundární lavina vysílá fotony, které rozvíjejí pochod dále a následně dojde k vytvoření striméru. Když strimér dosáhne anody, dojde k propojení vzdálenosti od první laviny k anodě kanálem vodivého plazmatu. Posledním stádiem kanálového výboje je vytvoření dalšího kanálu směrem ke katodě.



Obr. 2.7 Mechanismus rozvíjení strimér směrem k anodě
(1 – primární lavina, 2 – sekundární lavina, 3 – vyzáření fotonu) [5]

V obecném případě homogenního elektrického pole vzniká strimér v prostoru mezi elektrodami a roste na obě strany. Dostihnou-li oba konce striméru elektrody, neutralizují se náboje čel a mezi elektrodami se vytvoří spojení v podobě vodivého vlákna. Tím dochází k přeskoku. [1] [2]

2.1.3.2 Kanálové výboje v nehomogenním poli

Názorným případem kanálového výboje v nehomogenním poli je výboj mezi deskou a hrotem. V tomto případě je intenzita elektrického pole největší v okolí hrotu, kde při určitém počátečním napětí vzniká výboj. Jednotlivé laviny výboje zde zanechávají kladné ionty, které vytvářejí oblast kladného prostorového náboje v okolí hrotu.

V případě, že je hrot kladný, působí kladný prostorový náboj jako prodloužení hrotu. Tím dochází ke zvětšení intenzity elektrického pole před prostorovým nábojem ve směru ke katodě, čímž jsou vytvořeny výhodné podmínky pro lavinové pochody, které při zvýšení napětí přecházejí ve strimér.

V zapojení elektrod se záporným hrotem se vlivem menšího kladného prostorového náboje v jeho okolí zmenšuje intenzita elektrického pole před kladným prostorovým nábojem. To zhoršuje podmínky pro vytvoření laviny a výboj může zhasnout. K opětovnému zapálení výboje dochází až po rozptýlení prostorového náboje před hrotem. Striméry se mohou vytvořit až při napětí výrazně vyšším, než je napětí počáteční. [1]

2.2 Koróna

Koróna je neúplný samostatný výboj vznikající v nehomogenním poli u elektrod s malým poloměrem zakřivení, kde vzniká velká intenzita elektrického pole.

Zvyšováním napětí vzroste intenzita do takové míry, že začne docházet k nárazové ionizaci. Jestliže dosáhne napětí na elektrodách tzv. počátečního napětí koróny¹⁵, vznikne v okolí elektrody s malým poloměrem zakřivení svítící vrstva. Její vznik je doprovázen zvukovými projevy, jako je šum a praskání. Korónující vrstva se vytvoří jen v blízkém okolí elektrody.

Pokud zvyšujeme napětí na elektrodách a dosáhneme počátečního napětí koróny, dojde ke zvýšení proudu. Další zvyšování napětí pak způsobuje rychlý růst proudu a svítící vrstva kolem elektrody se rozšiřuje a svítí stále jasněji. Při dalším zvyšování přiloženého napětí přechází korónový výboj plynule v trsový a následně jiskrový výboj. Přestože mechanismus koróny při kladné a záporné polaritě se podstatně liší, vzniká v obou případech koróna při téměř totožné kritické hodnotě intenzity pole na povrchu elektrod. Při koróně se bez ohledu na polaritu na povrchu elektrody udržuje stálá intenzita pole, potřebná k udržení ionizace, a ve vnější oblasti koróny se nachází prostorový náboj téhož znaménka, jaké má příslušná elektroda. Protože se prostorový náboj od elektrody vzdaluje,

¹⁵ Počáteční napětí koróny je napětí, při kterém je možné pozorovat prostřednictvím určené fyzikální veličiny vznik koróny.

musí se náboje doplňovat z oblasti ionizace. Tak vzniká proud koróny, který způsobuje ztráty energie. Kromě ztrát v důsledku pohybu iontů jsou značné ztráty vyvolány ionizací ve svítícím obalu. [1] [2] [3] [4]

2.2.1 Kladná koróna

Uvažujme uspořádání elektrod kladný hrot a záporná deska. Při dostatečně velkém napětí dochází k nárazové ionizaci. Tvoří se volné elektrony a dochází k lavinovému šíření elektronů směrem k hrotu. K desce jsou přitahovány pomalé kladné ionty, které v blízkosti hrotu vytvoří kladný prostorový náboj. Následkem toho dojde ke zmenšení intenzity elektrického pole v okolí hrotu, přestanou se šířit laviny elektronů a dojde ke zhasnutí výboje. K jeho obnovení dojde, až když se kladné ionty vzdálí od hrotu a intenzita pole se vrátí na hodnotu potřebnou pro vznik ionizace. Díky tomu má korónový výboj a proud pulsní charakter. [2] [3] [4]

2.2.2 Záporná koróna

Záporná koróna (uspořádání se záporným hrotem) sice vzniká přibližně při stejné intenzitě pole na povrchu elektrod, ale výsledný průběh intenzity je odlišný, a to díky jinému rozložení náboje mezi elektrodami. Laviny elektronů vznikají za stejného napětí jako u kladné koróny. Elektrony, které se rychle pohybují směrem k desce, za sebou zanechávají v okolí hrotu kladný prostorový náboj, tvořený kladnými ionty, které se k hrotu pohybují pomaleji. Elektrony, které se vzdálí z oblasti s velkou intenzitou pole, jsou pohlcovány neutrálními molekulami a vznikají záporné ionty. Ty tvoří záporný prostorový náboj. Kladný prostorový náboj způsobuje zvýšení intenzity elektrického pole, záporný naopak její pokles v blízkosti hrotu a způsobuje uhasnutí koróny. Když se záporný prostorový náboj vzdálí od hrotu směrem k desce, dojde opět k nárazové ionizaci a následnému vzniku výboje. I v tomto případě má korónový výboj pulsní charakter. [2] [3] [4]

2.3 Trsový výboj a sršení

Tento druh výbojů vzniká u elektrod v nehomogenním poli, ve kterých je elektrické pole značně divergentní. To může být vytvořeno uspořádáním s dvěma hroty, koulemi či válci. U elektrod s hladkým povrchem je nehomogenita způsobena zrnky prachu. Téměř všechna zařízení používaná v technice vysokého napětí lze převést na vyjmenované tvary. Trsový výboj téměř vždy předchází jiskrovému výboji.

Trsový výboj se pro dané uspořádání vytvoří překročením kritické hodnoty napětí mezi elektrodami. Výboj je obvykle doprovázen charakteristickým praskotem a modře svítícím trsem paprsků. Tvar tohoto výboje je dán polaritou. Probíhá v něm velká nárazová ionizace a rekombinace. Trsy výboje se neustále objevují a zase zmizí. Když dojde k ustálení výboje, hovoří se o sršení. [1]

2.4 Jiskrový výboj

Jiskrový výboj vzniká v homogenním poli nebo poli blížícímu se homogennímu, mezi hladkými čistými elektrodami (např. koule – koule). Jakmile přiložené napětí překročí počáteční napětí samostatného výboje, vzniká jiskrový výboj. Jiskra vzniká bez předběžného výboje. V nehomogenním poli se jiskra vyvine z trsového výboje stále se zvyšujícím napětím. Velikost napětí, při kterém se z trsového výboje stane jiskrový, se nazývá napětí jiskry. Jiskrové výboje mohou vznikat jako produkt elektrostatického náboje¹⁶. Jedná se o krátkodobé samostatné výboje. Jiskrové výboje vznikají při atmosférickém tlaku a jsou podobně jako koróna doprovázeny akustickými a světelnými projevy. K nejznámějším jiskrovým výbojům bezpochyby patří blesk. [1] [9]

¹⁶ Př.: nabitý člověk si sundá svetr z umělých vláken a dotkne se uzemněného předmětu.

3 Vliv polarity elektrod na velikost přeskokového napětí

Při dané vzdálenosti mezi elektrodami závisí průrazné napětí na tvaru elektrického pole (homogenní, nehomogenní, souměrné, nesouměrné), na době působení napětí, na polaritě elektrody s menším poloměrem zakřivení, na atmosférických podmínkách, tlaku aj. V této práci jsou zkoumány výboje při normálních atmosférických podmínkách¹⁷ a při stejnosměrném napětí, které roste plynule od nuly až k průrazu.

V případě, že je jedna z elektrod rovinná a druhá má tvar tyče (hrotu s různým poloměrem zakřivení), má kromě tvaru na velikost průrazného napětí podstatný vliv také polarita hrotu. Odhad velikosti napětí v silně nehomogenním poli a při velkých vzdálenostech má praktický význam. V praxi¹⁸ se velmi často při velkých vzdálenostech elektrod používá čistě vzduchové izolace. Uspořádání tyč – rovina se vyznačuje značně nesouměrným polem a dá se předpokládat, že vliv polarity bude největší.

Je-li tyč kladná, zesilují kladné ionty, tvořící se v blízkosti tyče, původně slabé elektrické pole s malou intenzitou. To napomáhá vytvoření striméru, který při dosažení anody způsobí průraz.

Naopak v případě uspořádání se zápornou polaritou tyče dochází ke zpomalení pohybu elektronů kladnými ionty v blízkosti hrotu, a tím se zabraňuje rozvíjení lavin elektronů. Slabé pole v blízkosti kladně nabitě roviny zabraňuje, aby se z ní rozvinuly kladné striméry. Proto bude při stejném doskoku průrazné napětí mnohem vyšší než u předešlého zapojení s kladnou tyčí.[2]

¹⁷ Tj. tlak 101,3 kPa, teplota 20 °C, absolutní vlhkost 11 g/m³

¹⁸ Např.: na základě průrazných napětí se volí vzdálenosti mezi fázovými vodiči vedení, mezi fázovými vodiči a zemními lany, ocelovými stožáry, apod.

4 Vliv nevodivé bariéry vložené do nehomogenního pole na velikost přeskového napětí

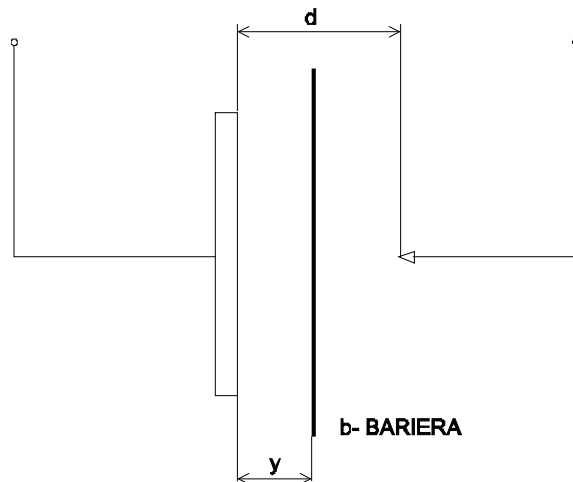
V nehomogenním poli můžeme podstatně zvýšit velikost elektrické pevnosti vložením nevodivé bariéry¹⁹ z tenkého dielektrika²⁰ kolmo k siločárám elektrického pole mezi elektrody. Zvýšení elektrické pevnosti vložením nevodivé bariéry je způsobeno vytvořením elektrického náboje na bariéře a následným ovlivněním rozložení elektrického pole, nikoliv však elektrickou pevností bariéry. Tento vliv je zanedbatelný.

Na Obr. 4.1 je znázorněné uspořádání hrot - deska s pevnou doskokovou vzdáleností mezi elektrodami d , mezi něž je umístěna papírová nevodivá bariéra ve vzdálenosti γ od deskové elektrody. Při zvětšování napětí na elektrodách dochází k ionizaci. Vzniklé elektrony či ionty jsou urychlovány elektrickým polem směrem k deskové elektrodě. Při kladné polaritě hrotu rychle se pohybující elektrony bariérou proletí, ale pomalé kladné ionty se zachytí na jejím povrchu. V případě záporné polarity hrotu se k desce pohybují záporné ionty, které vznikají spojením elektronů s neutrálními částicemi. Z toho vyplývá, že na povrchu bariéry umístěné v určité vzdálenosti od hrotu se zachycují částice polarity shodné s polaritou hrotu. Ionty postupně nabíjejí bariéru, čímž se elektrické pole mezi bariérou a deskovou elektrodou stává homogenním. Intenzita elektrického pole mezi bariérou a hrotem je poměrně malá a prochází malý proud, který vyrovnává úbytek nábojů z bariéry, způsobený difúzí, rekombinací apod.

Dalším zvětšováním napětí se zvětšuje i náboj zachycený na bariéře. Tím dochází také ke zvětšení intenzity pole mezi bariérou a deskou, až dojde k přeskoku. Z toho vyplývá, že k přeskoku dochází v prostoru s téměř homogenním polem mezi bariérou a deskou v doskokové vzdálenosti γ , z čehož je zřejmé, že velikost průrazného napětí v podstatě nezávisí na polaritě hrotu.

¹⁹ Název „bariéra“ se používá pro izolační přehradu zamezující nebo znesnadňující průraz.

²⁰ Lepenka, papír, apod.



Obr. 4.1 Uspořádání hrot - deska s nevodivou bariérou

Velikost přeskovového napětí se mění s polohou bariéry. V případě, že je bariéra umístěna velmi blízko desky, je průrazné napětí dáno vzdáleností hrot – bariéra, nikoliv jako u výše zmiňovaného vzdáleností bariéra – deska, a proto se přibližováním bariéry k desce její vliv snižuje. Je-li bariéra velmi blízko hrotu, její vliv je také malý, protože při dostatečně vysokém napětí vzniká ionizace i na druhé straně bariéry směrem k desce a výboj se může neomezeně rozvinout směrem k desce. Nejvýhodnější poloha bariéry je v určité malé vzdálenosti (cca 5% doskokové vzdálenosti mezi elektrodami d) od elektrody s velkou křivostí (hrotu), nikoliv však v těsné blízkosti. [2] [3]

5 Matematický model rozložení intenzity elektrického pole

K vytvoření matematického modelu rozložení intenzity elektrického pole jsem využila komerční software COMSOL Multiphysics. Je to univerzální rozvíjející se program, který umožňuje modelování a simulaci různých fyzikálních jevů. Výhodou programu je přehledná struktura vytvořeného modelu, kde na pracovní ploše máme k dispozici náhled na model a také na postup při jeho vytváření.

Pracovní postup při modelování úlohy lze popsat několika základními kroky. Nejprve jsem zvolila, že chci řešit elektrický model. Poté jsem vytvořila geometrii modelu odpovídající měřenému uspořádání. Zadávala jsem přesné rozměry elektrod a jejich vzdálenosti. Protože jsem měla rotačně symetrickou úlohu, v modelu byla zobrazena pouze polovina. V následujícím kroku jsem nadefinovala, že elektrody jsou umístěny ve vzduchu. K tomu jsem použila knihovnu programu s předdefinovanými vlastnostmi prostředí. Materiál elektrod nebylo nutné zadávat z důvodu předpokladu rovnoměrného rozložení elektrického potenciálu. Elektrický potenciál byl zadán pouze na povrchu elektrod. Dále jsem pokračovala generováním sítě. Trojúhelníkovou síť jsem zvolila extra jemnou a v oblasti mezi elektrodami jsem hustotu sítě ještě zvětšila. Následný krok již spočíval ve vygenerování výsledných zvolených grafů a zobrazení vypočtených hodnot.

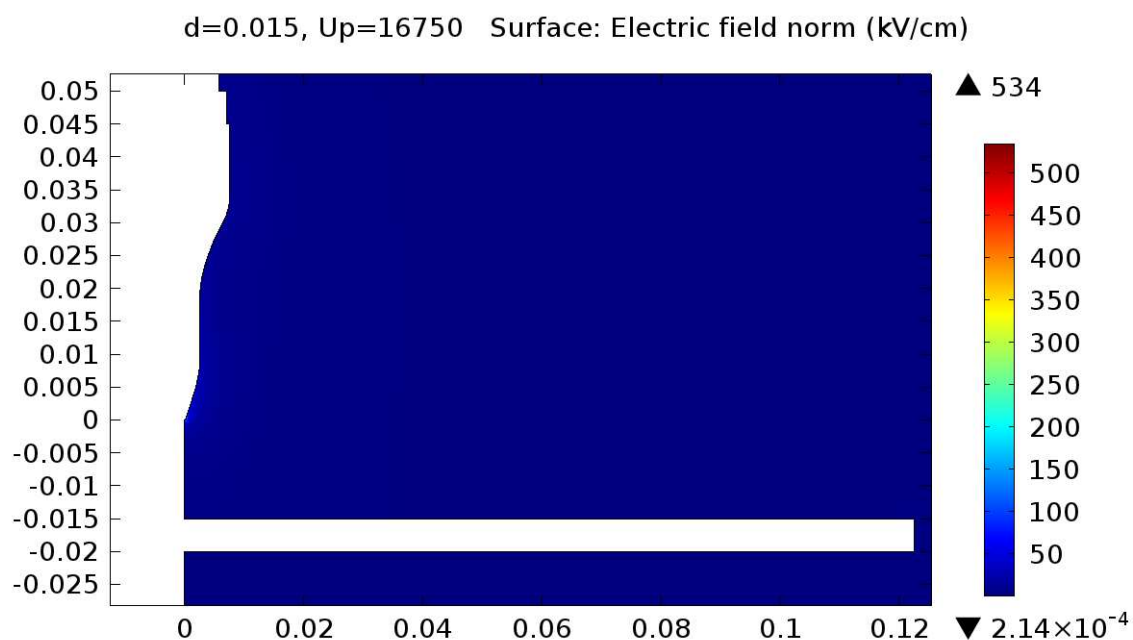
V následující tabulce jsou uvedeny hodnoty intenzity elektrického pole pro jednotlivé typy elektrod a pro různé hodnoty přeskokového napětí. Obrázky Obr. 5.1 až Obr. 5.4 reprezentují výsledné rozložení velikosti intenzity elektrického pole jednotlivých typů elektrod v doskokové vzdálenosti 15 mm. V části příloha B jsou uvedeny grafy pro jednotlivé elektrody a všechny měřené doskokové vzdálenosti. Jsou zde závislosti rozložení velikosti intenzity elektrického pole a rozložení elektrického potenciálu.

Tab. 5.1 Přeskokové napětí jednotlivých elektrod pro různé vzdálenosti

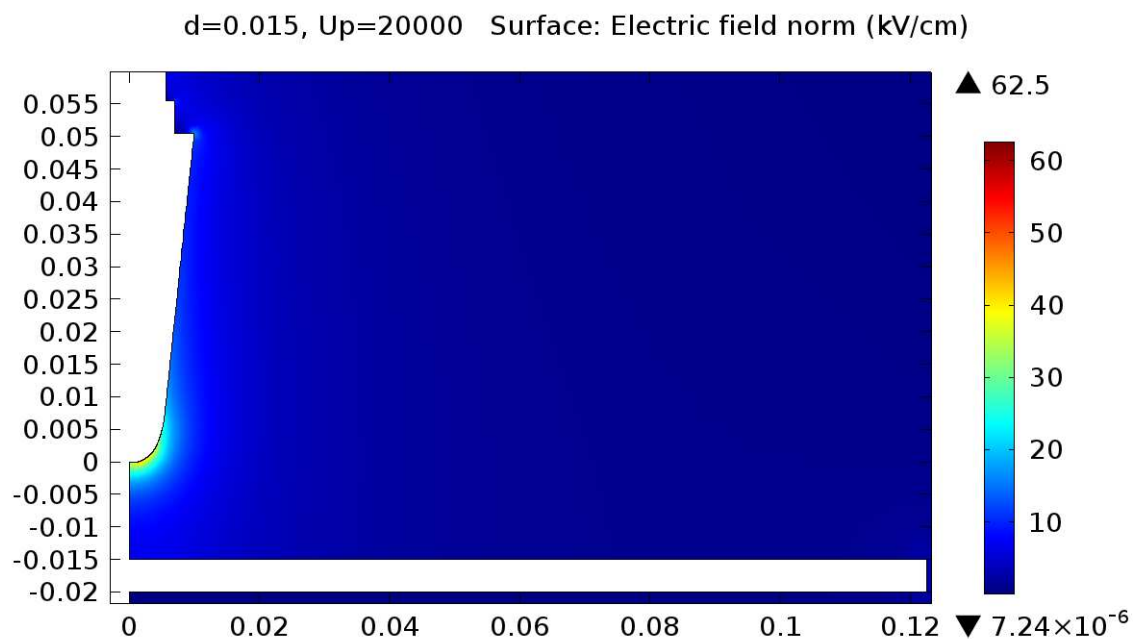
Vzdálenost elektrod	Přeskokové napětí U_p (kV)			
d (mm)	Tvar hrotu (uspořádání deska - hrot, s kladnou polaritou hrotu)			
	ostrý hrot	hrot kužel	hrot polokoule	hrot koule
15	16,75	20	29,5	35,875
30	23,75	25,875	38,75	54,5
50	33,25	33,75	46,875	68,625

Tab. 5.2 Intenzita elektrického pole jednotlivých elektrod pro různé vzdálenosti

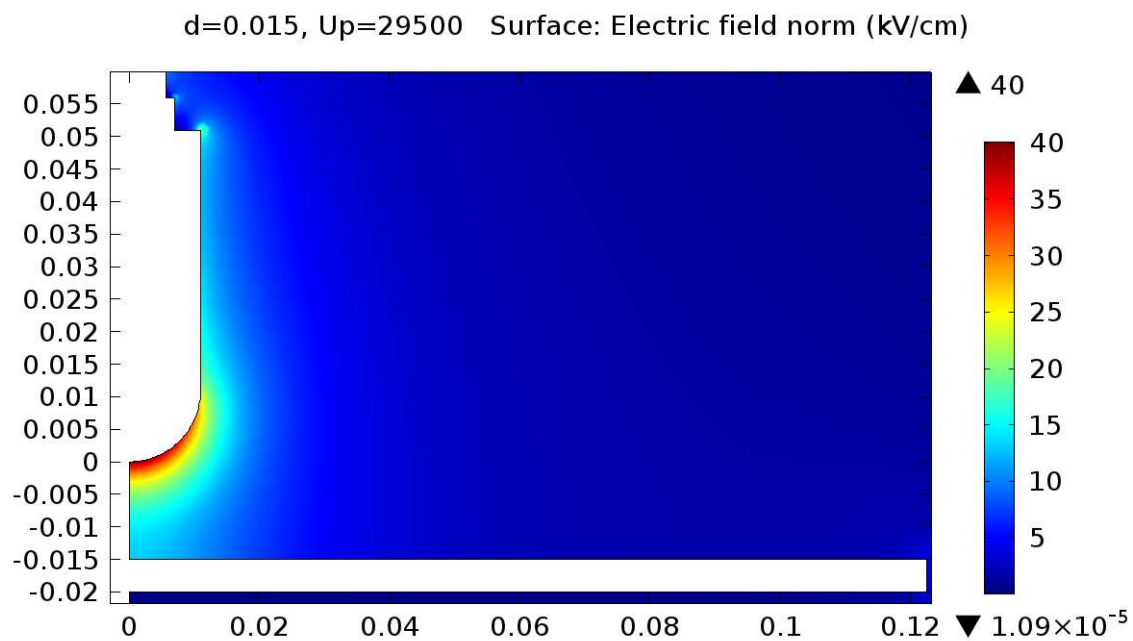
Vzdálenost elektrod	Intenzita elektrického pole ($\text{kV}\cdot\text{cm}^{-1}$)			
d (mm)	Tvar hrotu (uspořádání deska - hrot, s kladnou polaritou hrotu)			
	ostrý hrot	hrot kužel	hrot polokoule	hrot koule
15	524,38	61,435	40,049	34,315
30	628,63	64,576	39,876	34,713
50	784,31	73,719	40,97	34,72



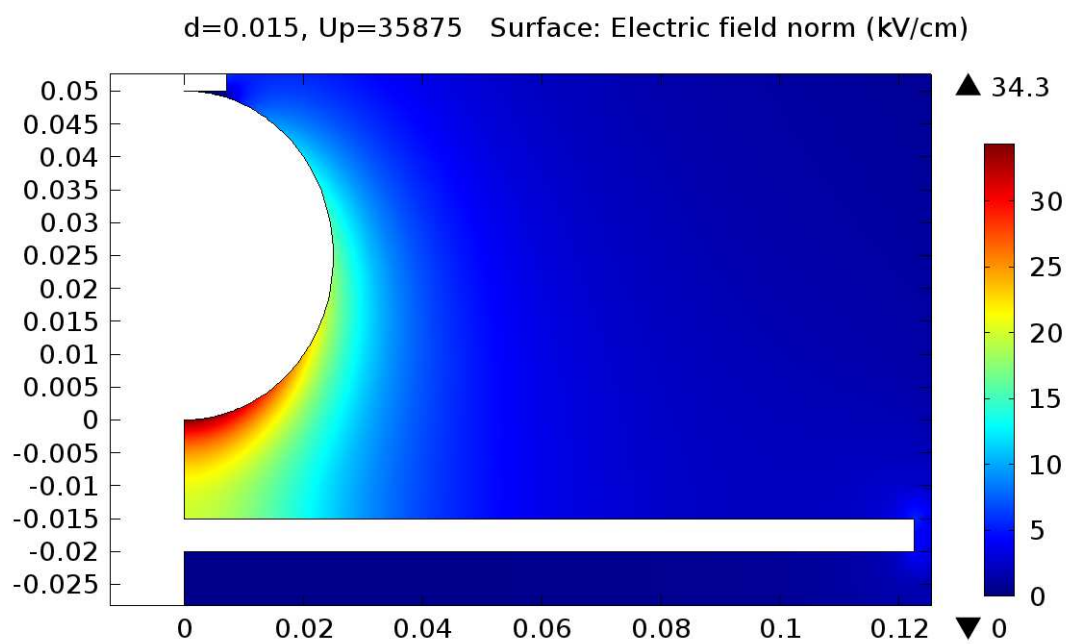
Obr. 5.1 Ostrý hrot - rozložení intenzity elektrického pole



Obr. 5.2 Kuželový hrot - rozložení intenzity elektrického pole



Obr. 5.3 Polokulový hrot - rozložení intenzity elektrického pole



Obr. 5.4 Kulový hrot - rozložení intenzity elektrického pole

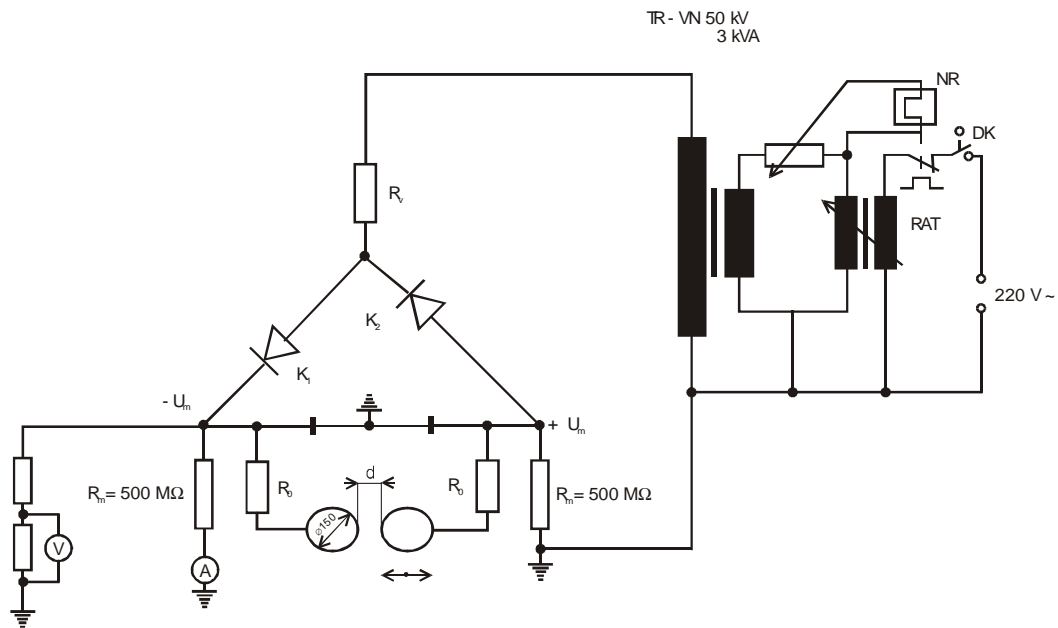
6 Měření

Cílem měření bylo vyšetřit dielektrické vlastnosti vzduchu v nehomogenním poli, které bylo vytvořeno hrotem²¹ (různých poloměrů viz. Tab. 6.1) proti rovinné desce s průměrem 24,5 cm, pro obě polaritu hrotu. Jednalo se zejména o zmapování velikosti přeskokového napětí a pozorování projevů koróny, která předchází výbojům mezi elektrodami. Dále jsem zjišťovala vliv nevodivé bariéry, vložené mezi elektrody, na změnu velikosti přeskokového napětí v závislosti na poloze bariéry, stejně jako v předešlém případě pro obě polaritu hrotu. Pro ucelenější výsledek by bylo zapotřebí větší množství hodnot a zvolení drobnějšího kroku při zvyšování doskokové vzdálenosti. Jednalo se tedy o orientační měření, které sloužilo k ověření teoretických předpokladů.

6.1 Schéma zapojení

Schéma zapojení je na Obr. 6.1. Zdrojem stejnosměrného napětí je usměrňovač-zdvojovač napájený z transformátoru 50 kV, 3 kVA přes ochranný vodní odpor R_v . VN transformátor je napájen regulačním autotransformátorem RAT s ručním pohonem umístěným na ovládacím panelu. Výstupní napětí usměrňovače je symetrické vůči zemi $\pm U_m$ (U_m – amplituda napětí na transformátoru). Zdvojené stejnosměrné napětí je vyhlazeno kondenzátory. Měřicí obvod s VN odporem $500 \text{ M}\Omega$ měří polovinu zdvojeného napětí a to se zobrazuje pomocí mikroampérmetru. Měřicí kulové jiskřiště je připojeno na zdvojené napětí přes ochranné odpory R_o . V tomto případě jsou obě elektrody jiskřiště na vysokém potenciálu, a proto je použito horizontální uspořádání elektrod. Pro měření s bariérou se na jiskřiště připojuje posuvný rám s napnutou bariérou z tenkého papíru. [3]

²¹ Hrot = tyč se zakončením o různých poloměrech zakřivení



Obr. 6.1 Schéma zapojení měřícího obvodu [3]

6.2 Postup měření

Z časových důvodů bylo měření jednotlivých provedení rozděleno do dvou měření. Během prvního měření byly změřeny hodnoty pro jednotlivá uspořádání deska – hrot a koule - koule. Jednotlivé tvary hrotů jsou vyobrazeny v Tab. 6.1. Během druhého měření byly získány hodnoty pro uspořádání ostrý hrot – ostrý hrot a deska – ostrý hrot s vloženou nevodivou bariérou. Během měření byly zaznamenány atmosférické podmínky v laboratoři, které byly v obou případech velmi podobné. Teplota v laboratoři byla 25,9°C, vlhkost 22% a tlak 97,1 kPa.




Po překontrolování zapojení úlohy dle Obr. 6.1 jsem zapnula hlavní ovládací pult. Po provedení nezbytných úkonů, jako je zpuštění NN a VN obvodu a nastavení doskokové vzdálenosti, jsem regulačním autotransfornátorem plynule zvyšovala napětí až do přeskočení. V okamžiku přeskočení jsem odečetla a zaznamenala výchylku mikroampérmetru. Z předchozích kalibračních měření bylo zjištěno, že velikost jednoho dílku mikroampérmetru přibližně odpovídá 1 kV v měřeném obvodu. Během měření bez nevodivé bariéry jsem pro každou vzdálenost naměřila deset hodnot, ze kterých jsem vyškrtla nejvyšší a nejnižší hodnotu jako chybu měření, a celkový výsledek byl počítán z osmi hodnot. Mezi jednotlivými přeskočeními jsem nechávala časovou prodlevu kvůli obnově vzduchu přibližně 20 sekund. V dalším kroku jsem pomocí kalibrované měřky nastavila elektrody na novou vzdálenost a měření jsem pro novou hodnotu opět desetkrát



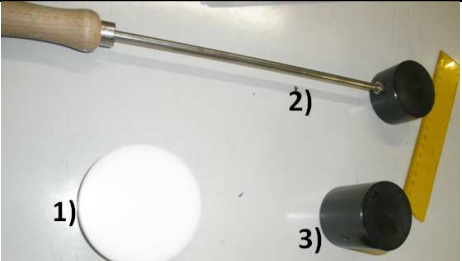

opakovala. Poté jsem zaměnila polaritu elektrod a pro všechny doskokové vzdálenosti celý proces opakovala. Tímto způsobem jsem proměřila všechny typy hrotů. Měření s papírovou nevodivou bariérou jsem prováděla pouze pro ostrý hrot proti desce v konstantní doskokové vzdálenosti 50 mm. Do jiskřiště se vložila nevodivá bariéra, která se skládala z nosného rámu a svitku papíru, který se dal převíjet. Pro představu je zapojení na obrázku Obr. 6.3. Možnost převíjení papíru je důležitá, protože při výbojích dochází k průboji papíru a to může ovlivňovat měření. Během měření několikrát došlo i ke vznícení papírové bariéry mezi elektrodami a výměna byla nutná. Postup měření byl stejný jako v předešlých případech. Toto měření jsem pro každou vzdálenost provedla jen dvakrát.

6.3 Laboratoř a použité přístroje

Měření bylo provedeno v laboratoři vysokého napětí Západočeské univerzity v Plzni. Přístroje použité při měření jsou uvedeny v tabulce (Tab. 6.1).

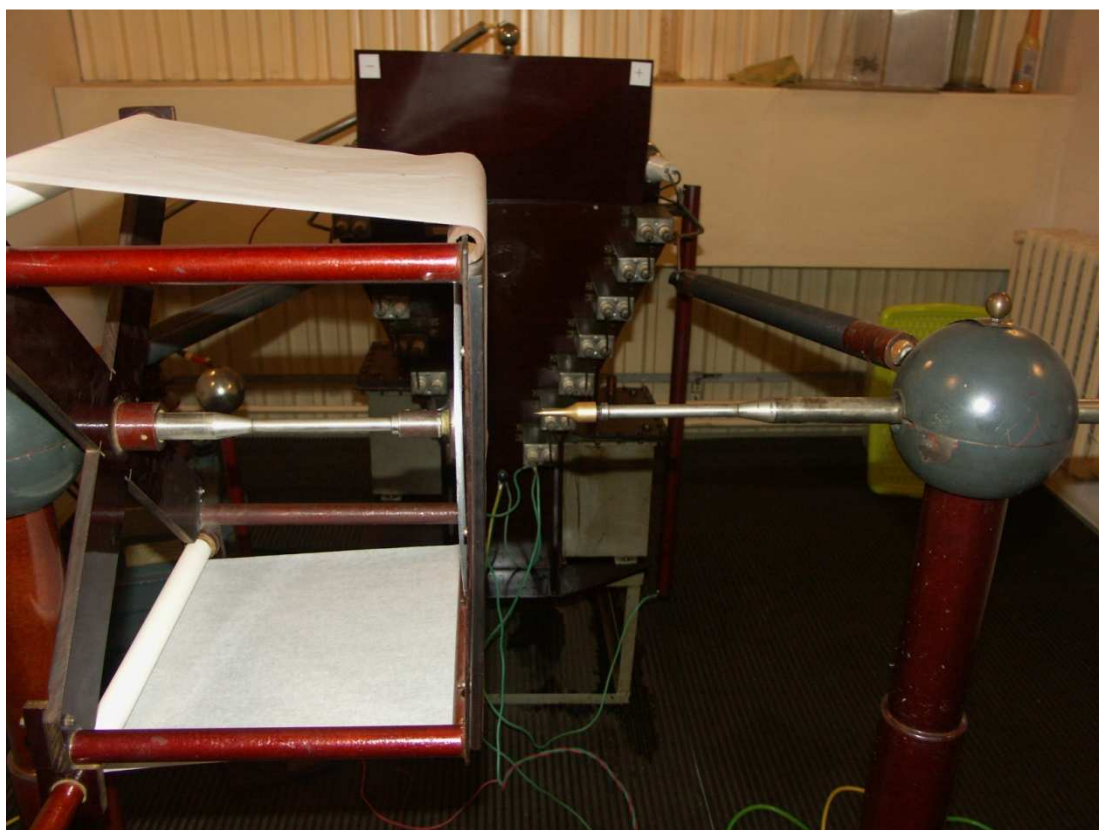
Tab. 6.1 Použité přístroje a zařízení

Typ přístroje	Název přístroje	Hlavní parametry	Vizualizace
Transformátor	TUR – S Typ – PEO 3/50	U = 50 kV S = 3 kVA	
Vysokonapěťový odpor	Tesla TR 131	R = 500 MΩ (5 x 100 MΩ v sérii)	
Magnetoelektrický mikroampérmetr	Metra Blansko	Třída přesnosti – 1	

Hlavní ovládací panel	
Hroty různých tvarů použité při měření	<p>1) Koule 2) Ostrý hrot 3) Kuželový hrot 4) Polokulový hrot</p>  <p>1) 2) 3) 4)</p>
Použité měrky	<p>1) 15 mm 2) 30 mm 3) 50 mm</p>  <p>1) 2) 3)</p>
Nevodivá bariéra – papírová	



Obr. 6.2 Laboratoř vysokého napětí s přístrojovým vybavením



Obr. 6.3 Uspořádání deska - ostrý hrot s vloženou nevodivou bariérou

6.4 Zpracování naměřených výsledků

Měřený obvod byl zapojen dle schématu na Obr. 6.1. Naměřené hodnoty jsou v tabulkách hodnot označeny písmenem d pro vzdálenost mezi elektrodami, písmenem y pro vzdálenost nevodivé bariéry od hrotu a U_p označuje velikost přeskokového napětí. Z jednotlivých hodnot přeskokového napětí je spočítán celkový průměr.

6.4.1 Koule - koule

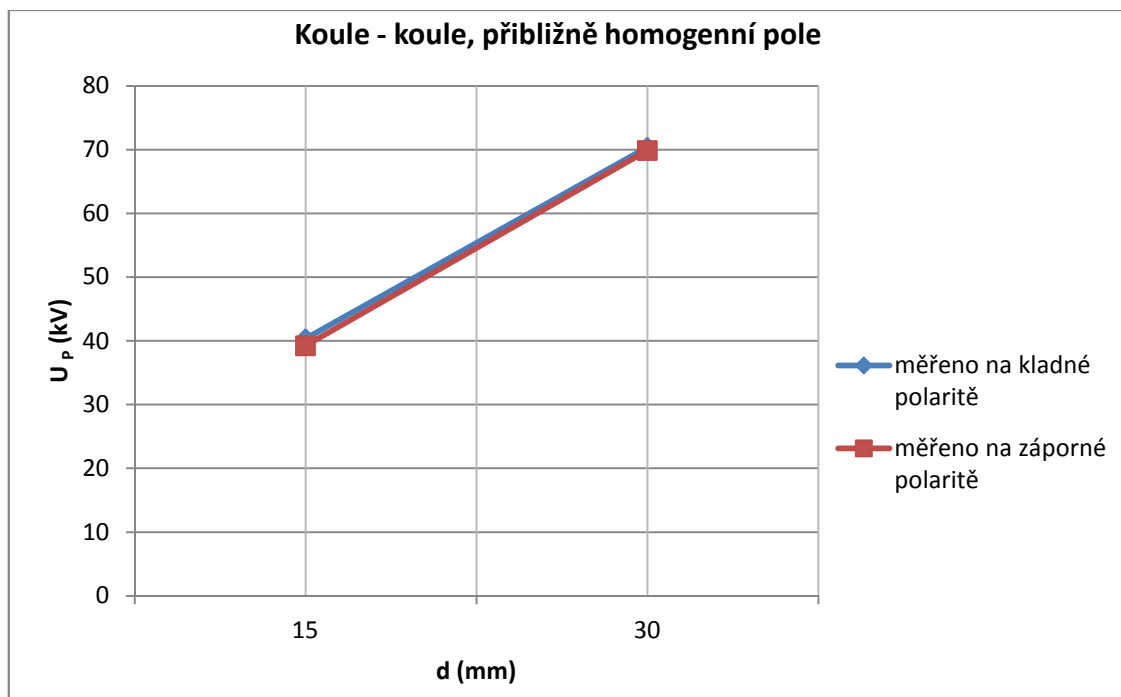
Nejprve jsem proměřila uspořádání koule – koule, které představuje homogenní pole. Měření jsem provedla na obou polaritách zapojení. Z výsledků, které jsou graficky znázorněny na Obr. 6.4, vyplývá, že rozdíl při měření na kladné nebo záporné polaritě zapojení je maximálně o 1,125 kV na 40 kV a o 0,5 kV na 70 kV. Z důvodu zanedbatelné odchylky měření na rozdílných polaritách zapojení jsem se rozhodla další měření provádět pouze na záporné polaritě zapojení.

Tab. 6.2 Koule - koule, měřeno na kladné polaritě

<u>koule - koule</u>									
d (mm)	měřeno na kladné polaritě								
	U_{p1} (kV)	U_{p2} (kV)	U_{p3} (kV)	U_{p4} (kV)	U_{p5} (kV)	U_{p6} (kV)	U_{p7} (kV)	U_{p8} (kV)	U_p (kV)
15	41	41	41	40	40	40	40	40	40.375
30	70	71	70	71	70	70	70	71	70.375

Tab. 6.3 Koule - koule, měřeno na záporné polaritě

<u>koule - koule</u>									
d (mm)	měřeno na záporné polaritě								
	U_{p1} (kV)	U_{p2} (kV)	U_{p3} (kV)	U_{p4} (kV)	U_{p5} (kV)	U_{p6} (kV)	U_{p7} (kV)	U_{p8} (kV)	U_p (kV)
15	39	39	39	39	39	40	39	40	39.25
30	70	70	69	70	70	70	70	70	69.875



Obr. 6.4 Koule - koule, přibližně homogenní pole

6.4.2 Deska - koule

V zapojení s kulovou elektrodou bylo díky jejímu tvaru rozložení pole ze všech čtyř variant měřených hrotů nejbližší poli homogennímu. Na obrázku (Obr. 6.5) můžeme vidět grafické znázornění výsledků pro obě polarity napětí hrotu. Z výsledných křivek je patrné, že se elektrické pole pro obě polarity chová téměř jako homogenní a velikosti přeskových napětí jsou prakticky shodné.

U záporné polarity hrotu bylo při vzdálenosti 50 mm přeskové napětí 67,125 kV. Koróna se projevovala slabým šumem již od 35 kV, poté následoval lehký praskot a bez vizuálních projevů nastal přeskok.

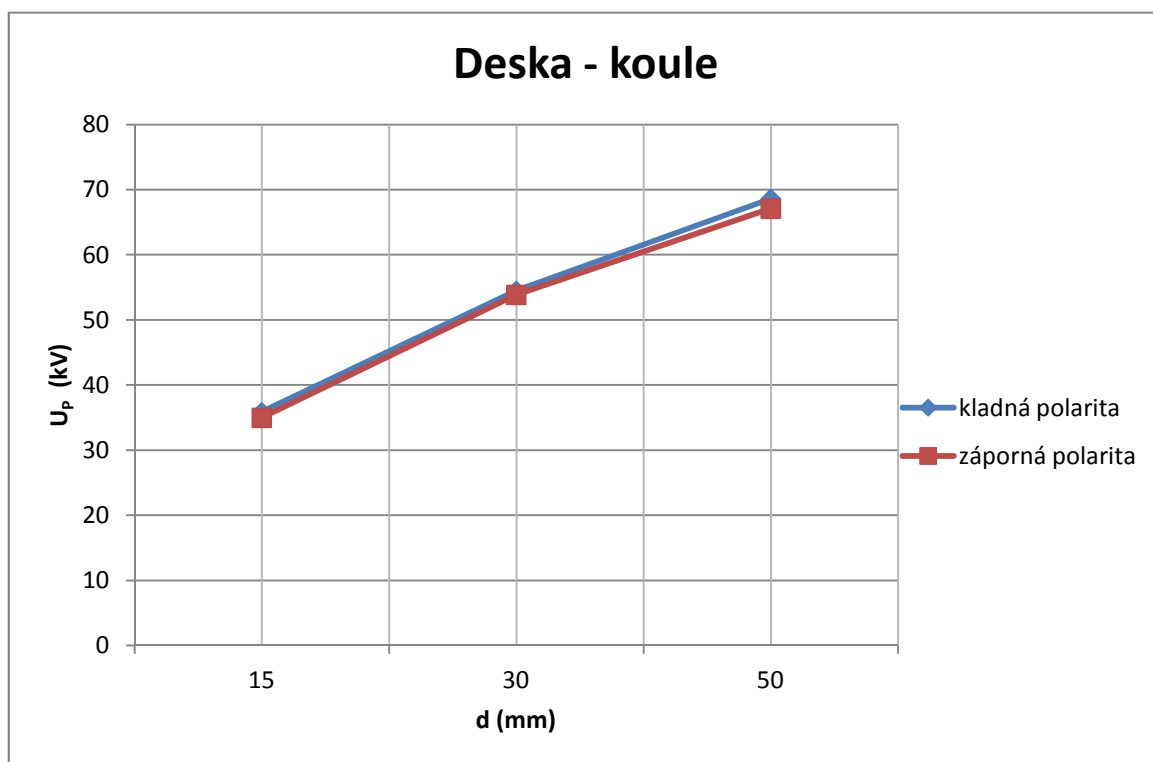
U kladné polarity bylo ve vzdálenosti 50 mm počáteční napětí koróny 68,625 kV. Koróna byla slyšet v podobě slabého šumu od 30 kV, pak bez dalších projevů nastal přeskok.

Tab. 6.4 Deska - koule

deska (+) - koule (-)									
d (mm)	měřeno na záporné polaritě								
	U_{P1} (kV)	U_{P2} (kV)	U_{P3} (kV)	U_{P4} (kV)	U_{P5} (kV)	U_{P6} (kV)	U_{P7} (kV)	U_{P8} (kV)	U_P (kV)
15	35	35	35	35	35	35	35	35	35
30	53	54	54	54	54	54	54	54	53.875
50	67	67	67	67	68	67	67	67	67.125

Tab. 6.5 Deska - koule

deska (-) - koule (+)									
d (mm)	měřeno na záporné polaritě								
	U_{P1} (kV)	U_{P2} (kV)	U_{P3} (kV)	U_{P4} (kV)	U_{P5} (kV)	U_{P6} (kV)	U_{P7} (kV)	U_{P8} (kV)	U_P (kV)
15	36	36	36	36	36	36	35	36	35.875
30	54	54	55	54	54	55	55	55	54.5
50	69	69	68	68	68	69	69	69	68.625



Obr. 6.5 Deska - koule

6.4.3 Deska – ostrý hrot

Zapojení s ostrým hrotem vytvořilo oproti předcházejícímu případu s koulí ze všech čtyř variant uspořádání elektrod nejvíce nehomogenní pole, kde jsme mohli nejlépe pozorovat projevy koróny. Koróna byla patrná jak akustickými projevy v podobě sršení a praskání, tak vizuálně modro-fialovým obalem špičky hrotu. Velikost její intenzity závisela zejména na přiloženém napětí, vzdálenosti a polaritě elektrod.

V případě zapojení se záporným hrotem došlo k přeskoku v průměru při napětí 70,25 kV. Projevy koróny byly ve vzdálenosti elektrod 50 mm zřetelné. Počáteční napětí koróny jsem pozorovala již při 32 kV. Nejprve se vytvořil svítící obal špičky hrotu, který přešel ve svítící bod na vrcholu hrotu. Vizuální projevy byly doprovázeny slabým šuměním. Po zvýšení napětí přibližně na 65 kV již bylo slyšet hlasité praskání. Při dalším zvyšování došlo k přeskoku.

U varianty s kladným hrotem nebyly projevy koróny tolik zřejmé jako u zapojení se záporným hrotem. Ve vzdálenosti 50 mm bylo výsledné přeskové napětí 33,25 kV. Akustické projevy koróny v podobě šumění a praskání nebyly příliš výrazné, ale vizuálně byla koróna slabě patrná.

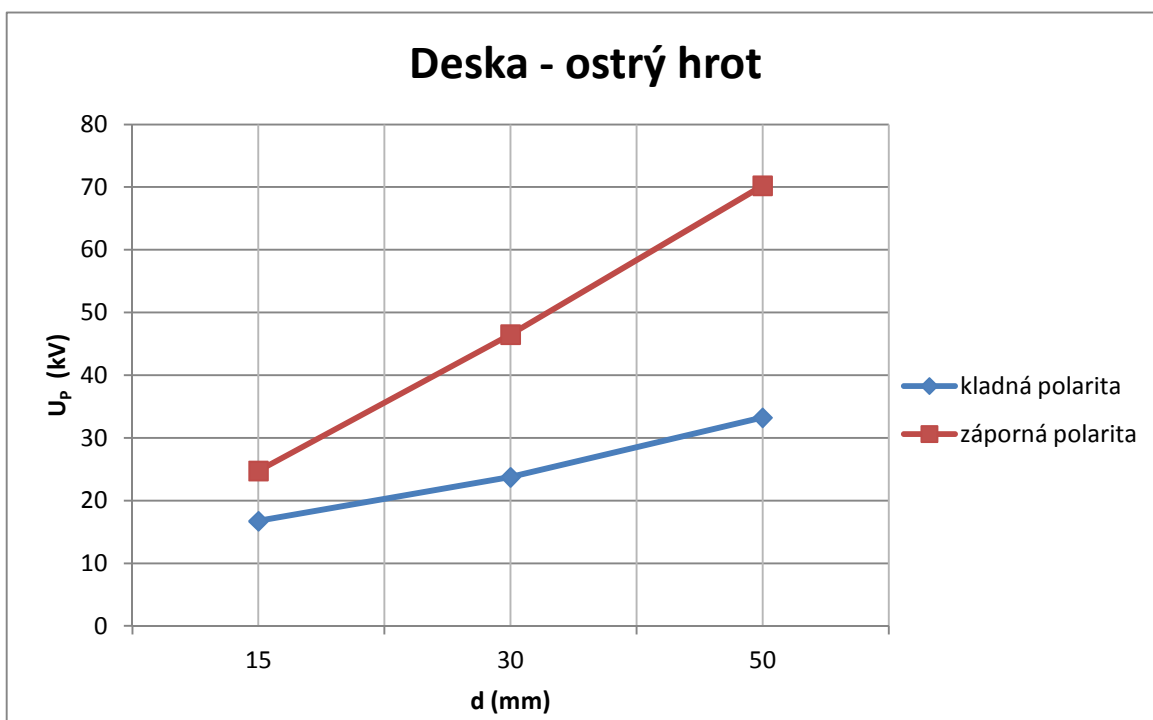
Se zvětšující se vzdáleností elektrod se projevil vliv polarity na velikost přeskové napětí. Z grafu na Obr. 6.6 je patrné, že u ostrého hrotu se zápornou polaritou je díky rozložení elektrického pole mezi elektrodami přeskové napětí mnohem větší než s kladnou polaritou. Toto zjištění potvrzuje teoretický předpoklad o prostorovém náboji u záporné polarity hrotu.

Tab. 6.6 Deska - ostrý hrot

deska (+) - ostrý hrot (-)									
d (mm)	měřeno na záporné polaritě								
	U_{P1} (kV)	U_{P2} (kV)	U_{P3} (kV)	U_{P4} (kV)	U_{P5} (kV)	U_{P6} (kV)	U_{P7} (kV)	U_{P8} (kV)	U_P (kV)
15	25	25	24	24	25	25	25	25	24.75
30	46	46	46	47	47	46	47	47	46.5
50	68	70	71	71	70	71	70	71	70.25

Tab. 6.7 Deska - ostrý hrot

deska (-) - ostrý hrot (+)									
d (mm)	měřeno na záporné polaritě								U_p (kV)
	U _{p1} (kV)	U _{p2} (kV)	U _{p3} (kV)	U _{p4} (kV)	U _{p5} (kV)	U _{p6} (kV)	U _{p7} (kV)	U _{p8} (kV)	
15	17	16	17	17	17	16	17	17	16.75
30	23	23	24	23	22	24	25	26	23.75
50	32	31	32	33	34	34	35	35	33.25



Obr. 6.6 Deska - ostrý hrot

6.4.4 Ostrý hrot – ostrý hrot

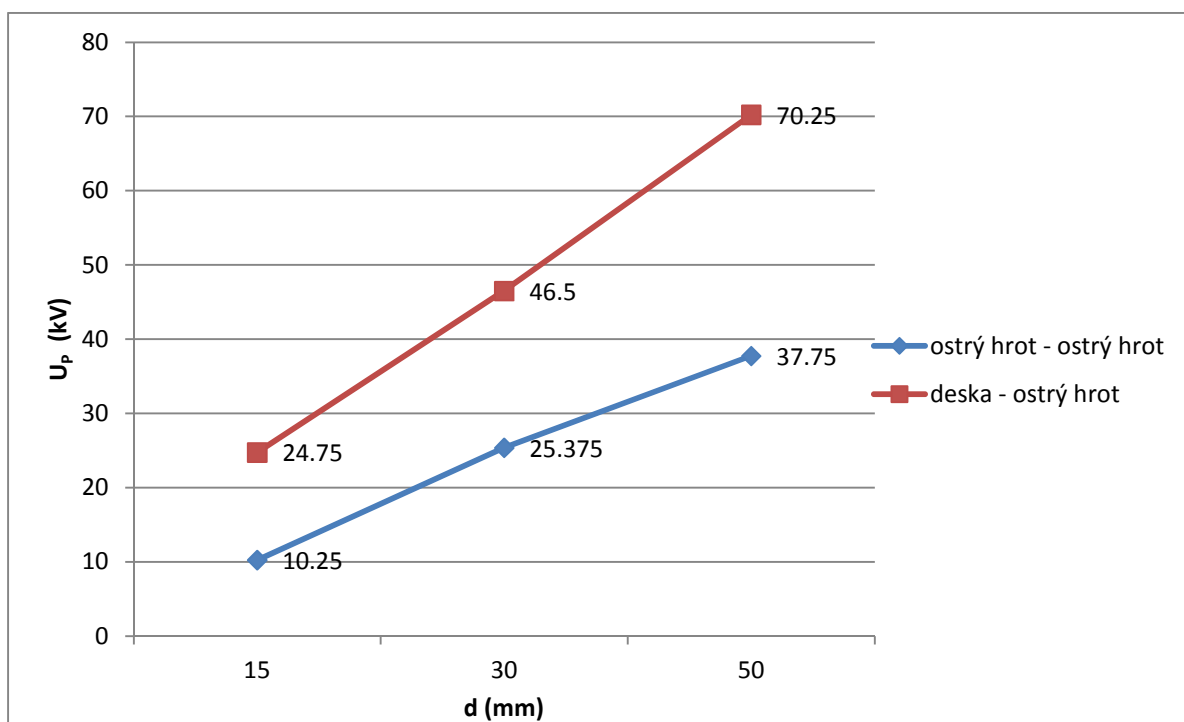
Následně jsem provedla měření uspořádání ostrý hrot – ostrý hrot. Pro toto měření jsem použila dva téměř shodné očíslované ostré hroty. Ostrý hrot s číslem jedna je ostrý hrot použitý ve všech ostatních měřených uspořádáních s ostrým hrotem. Toto uspořádání jsem měřila pouze v zapojení se záporným ostrým hrotem č. 1 a výsledky porovnávala s uspořádání deska – ostrý hrot (č. 1) se záporným hrotem. Výsledky měření jsou graficky znázorněny na Obr. 6.7. Velikost přeskokového napětí v uspořádání ostrý hrot – ostrý hrot by měla být poloviční oproti zapojení deska – ostrý hrot. Z naměřených hodnot je vidět, že napětí je skutečně téměř poloviční. Maximální odchylka je 2,625 kV. To je způsobené tím, že hroty nejsou dokonale stejné.

Tab. 6.8 Ostrý hrot - ostrý hrot

ostrý hrot (č. 2+) - ostrý hrot (č. 1 -)									
d (mm)	měřeno na záporné polaritě								
	U_{P1} (kV)	U_{P2} (kV)	U_{P3} (kV)	U_{P4} (kV)	U_{P5} (kV)	U_{P6} (kV)	U_{P7} (kV)	U_{P8} (kV)	U_P (kV)
15	11	10	10	11	10	9	10	11	10.25
30	26	25	25	25	26	25	26	25	25.375
50	38	37	38	39	37	37	39	37	37.75

Tab. 6.9 Deska - ostrý hrot

deska (+) - ostrý hrot (-)									
d (mm)	měřeno na záporné polaritě								
	U_{P1} (kV)	U_{P2} (kV)	U_{P3} (kV)	U_{P4} (kV)	U_{P5} (kV)	U_{P6} (kV)	U_{P7} (kV)	U_{P8} (kV)	U_P (kV)
15	25	25	24	24	25	25	25	25	24.75
30	46	46	46	47	47	46	47	47	46.5
50	68	70	71	71	70	71	70	71	70.25



Obr. 6.7 Porovnání uspořádání ostrý hrot - ostrý hrot a deska - ostrý hrot

6.4.5 Deska – ostrý hrot s vloženou nevodivou bariérou

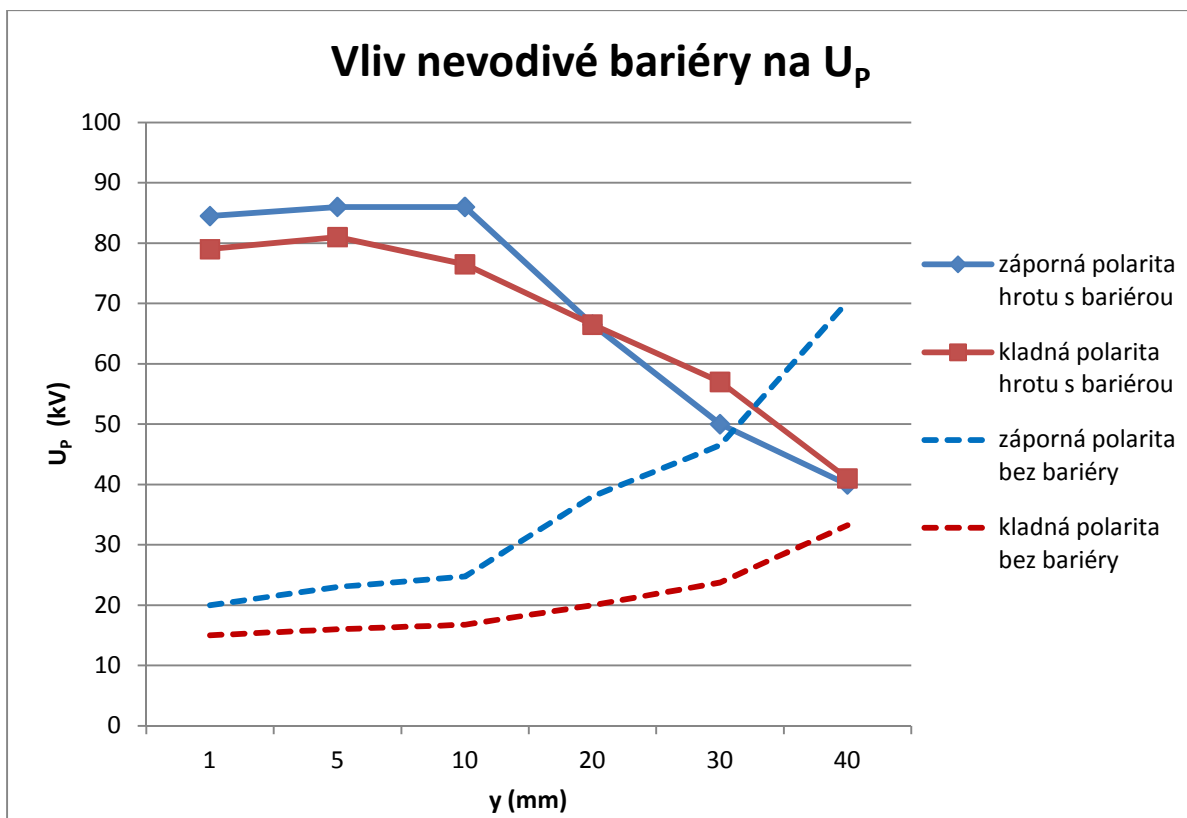
Dále jsem porovnávala průběhy přeskokového napětí obou polarit ostrého hrotu s vloženou nevodivou bariérou. Výsledné naměřené hodnoty jsou zobrazeny na Obr. 6.8. Průběhy přeskokového napětí zapojení bez dielektrické bariéry jsou znázorněny tečkovanou čarou pro obě polaritu hrotu. Plná čára s bodovými značkami naznačuje průběhy přeskokového napětí po vložení nevodivé papírové bariéry.

Porovnáním průběhů obou polarit hrotu s vloženou nevodivou bariérou dostáváme ověření předpokladu. Polarita hrotu v silně nehomogenním poli neovlivní výsledné přeskokové napětí, pokud je do tohoto pole vložena bariéra. Je to dáno takřka homogenním polem, které se vytvoří mezi deskovou elektrodou a tenkou dielektrickou bariérou. Obě křivky vykazují stejný trend pro shodné vzdálenosti. Můžeme tvrdit, že jde o totožné průběhy. Přestože jsou průběhy podobné, nedošlo ke stejnému zlepšení elektrické pevnosti.

Podle teoretických předpokladů je největší účinek bariéry ve vzdálenosti 5% od hrotu z celkové vzdálenosti mezi elektrodami. V našem případě by měla být největší elektrická pevnost vzduchu ve vzdálenosti bariéry 2,5 mm od hrotu. Mnou provedená měření se lehce lišila od teorie, ale potvrdila předpoklad, že vložená bariéra zvyšuje přeskokové napětí v poloze blízké hrotu, ale ne v těsné blízkosti. U záporné polaritu hrotu se maximální přeskokové napětí drželo v 10 – 20 % celkové vzdálenosti elektrod a u kladné polaritu bylo maximum v 10 %.

Tab. 6.10 Deska - ostrý hrot s vloženou nevodivou bariérou

deska (+) - ostrý hrot č. 1 (-)				deska (-) - ostrý hrot č.1 (+)			
měřeno na záporné polaritě, vzdálenost elektrod 50 mm							
y (mm)	U_{P1} (kV)	U_{P2} (kV)	U_p (kV)	y (mm)	U_{P1} (kV)	U_{P2} (kV)	U_p (kV)
1	85	84	84,5	1	80	78	79
5	86	86	86	5	84	78	81
10	88	84	86	10	76	77	76,5
20	65	68	66,5	20	66	67	66,5
30	49	51	50	30	56	58	57
40	38	42	40	40	41	41	41



Obr. 6.8 Porovnání přeskovového napětí uspořádání deska - ostrý hrot bez a s vloženou nevodivou bariérou pro obě polaritu

6.4.6 Deska – kužel

Elektroda ve tvaru kužele byla svými rozměry mezi ostrým hrotem a polokoulí. Grafické znázornění výsledných průběhů napětí pro obě polaritu můžeme vidět na Obr. 6.9. Z grafu jasně vyplývá, že u záporné polaritu hrotu má vzduch vyšší elektrickou pevnost. Tento fakt se shoduje i s teoretickými předpoklady.

U zapojení záporné polaritu kuželového hrotu jsem pozorovala velmi jasné projevy koróny. Během zvyšování napětí a doskokové vzdálenosti byly projevy koróny zřetelnější než u zapojení kladné polaritu. Ve vzdálenosti 50 mm bylo přeskovové napětí 63,75 kV. Počáteční napětí, při kterém byl slyšet silný šum a praskot, bylo 30 kV. Při dalším zvyšování napětí se na konci hrotu objevila koróna formou světelného obalu vrcholu, který přešel v jasný svítící bod. Objevovali se trsové výboje, které v tomto případě měly větší délku než u zapojení kladné polaritu hrotu. Byly doprovázeny hlasitým praskáním a sršením.

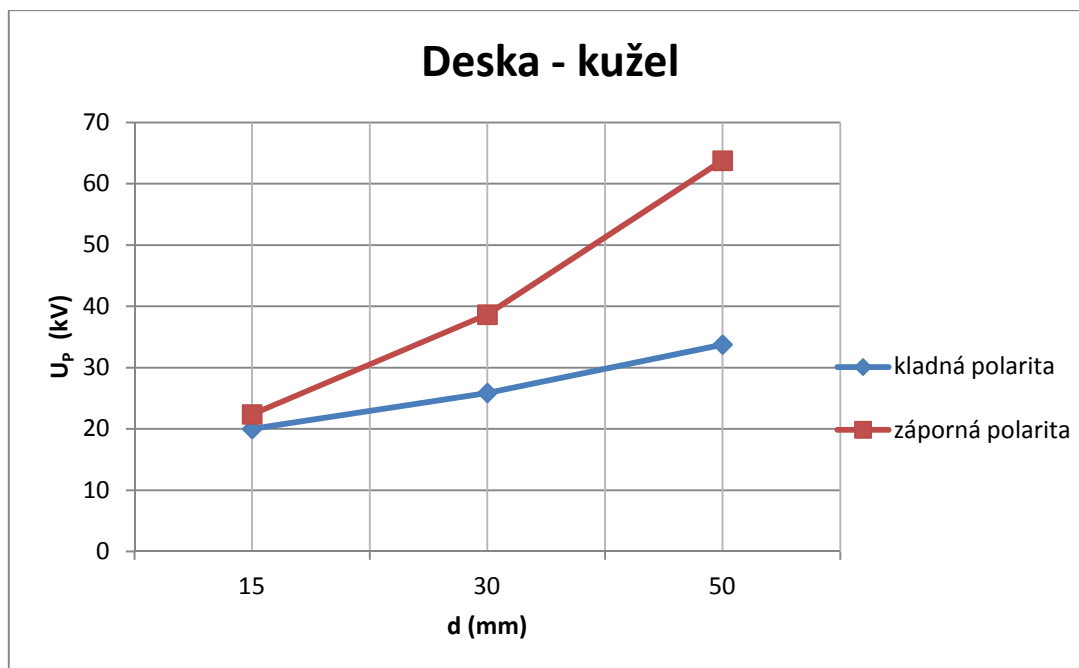
Během měření na zapojení kladné polaroty hrotu se při vzdálenosti 50 mm a napětí 30 kV začínaly objevovat modrofialové trsové výboje, vycházející z vrcholu kužele. Při zvýšení napětí výboje postupně uhasínaly a pozorovala jsem korónu, která se projevovala jako slabě svítící obal vrcholku hrotu. Žádný výrazný šum nebo praskot nebyl slyšet. Přeskové napětí bylo 33,75 kV. Ve dvou případech měření mělo přeskové napětí zvýšenou velikost na 39 kV a 49 kV. Okolo 30 kV bylo slyšet šumění, ale k přeskovu došlo až při výraznějším zvýšení napětí. Tento jev si lze vysvětlit jako stabilizaci výboje korónou.

Tab. 6.11 Deska - kužel

deska (+) - kužel (-)									
d (mm)	měřeno na záporné polaritě								
	U_{P1} (kV)	U_{P2} (kV)	U_{P3} (kV)	U_{P4} (kV)	U_{P5} (kV)	U_{P6} (kV)	U_{P7} (kV)	U_{P8} (kV)	U_P (kV)
15	23	23	23	23	22	21	20	24	22.375
30	38	39	38	39	39	39	39	38	38.625
50	63	62	65	64	63	64	65	64	63.75

Tab. 6.12 Deska - kužel

deska (-) - kužel (+)									
d (mm)	měřeno na záporné polaritě								
	U_{P1} (kV)	U_{P2} (kV)	U_{P3} (kV)	U_{P4} (kV)	U_{P5} (kV)	U_{P6} (kV)	U_{P7} (kV)	U_{P8} (kV)	U_P (kV)
15	20	20	20	20	20	20	20	20	20
30	26	26	26	26	26	25	26	26	25.875
50	30	49	30	31	31	30	30	39	33.75



Obr. 6.9 Deska - kuželový hrot

6.4.7 Deska – polokoule

U varianty s hrotem ve tvaru polokoule jsem vypořizovala rozložení elektrického pole blížící se homogennímu. Výsledné průběhy napětí v zapojení se zápornou i kladnou polaritou jsou uvedeny v grafu na Obr. 6.10. Z grafu je patrné, že v porovnání obou polarit se elektrické pole ve vzdálenostech 15 mm a 30 mm blíží poli homogennímu. Rozdílná velikost přeskokového napětí je patrná ve vzdálenosti 50 mm. Projevuje se nehomogenita a odlišné rozložení prostorového náboje. Stejně jako v předešlých případech byla elektrická pevnost větší u varianty zapojení se záporným hrotem.

V zapojení se záporným hrotem ve tvaru polokoule bylo výsledné přeskokové napětí ve vzdálenosti elektrod 50 mm, 51,125 kV. Během měření jsem při tomto zapojení pozorovala výrazné projevy koróny v podobě hlasitého sršení a viditelných trsových výbojů vycházejících z povrchu elektrody.

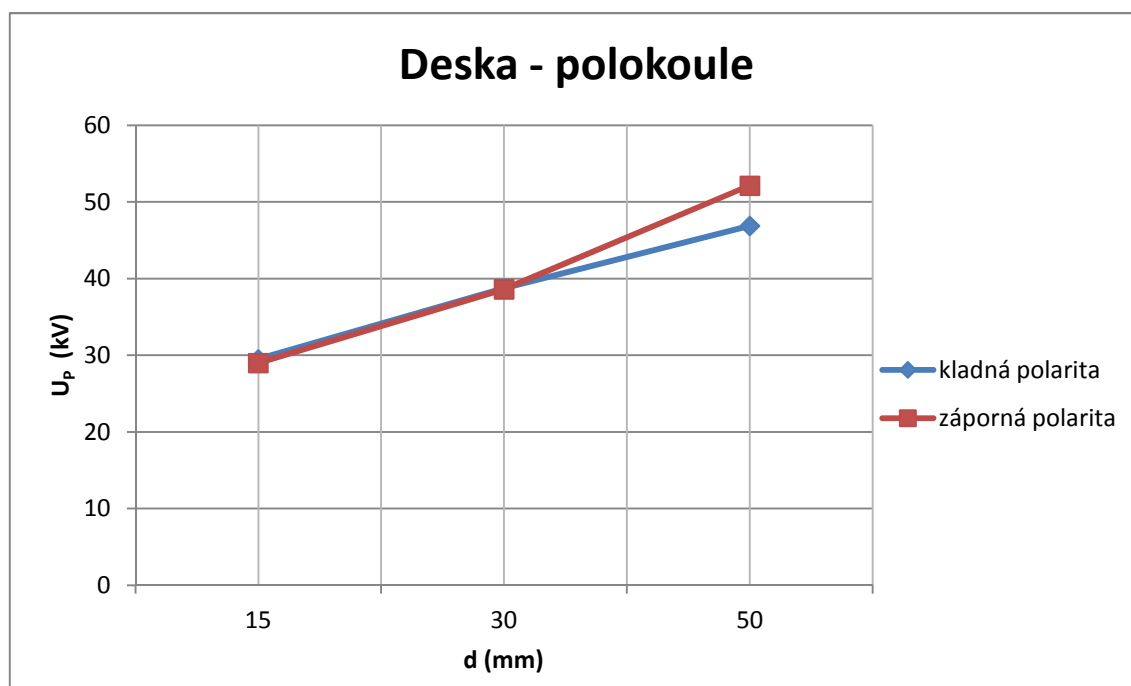
Ve vzdálenosti elektrod 50 mm, v zapojení s kladnou polaritou hrotu, bylo výsledné přeskokové napětí 46,875 kV. Projevy koróny byly oproti předchozímu zapojení vizuálně nepozorovatelné a slabý praskot byl slyšet těsně před samotným přeskokem.

Tab. 6.13 Deska - polokoule

deska (+) - polokoule (-)									
d (mm)	měřeno na záporné polaritě								
	U_{P1} (kV)	U_{P2} (kV)	U_{P3} (kV)	U_{P4} (kV)	U_{P5} (kV)	U_{P6} (kV)	U_{P7} (kV)	U_{P8} (kV)	U_P (kV)
15	29	29	29	29	29	29	29	29	29
30	39	39	38	38	39	39	38	39	38.625
50	53	51	51	52	53	53	52	52	52.125

Tab. 6.14 Deska - polokoule

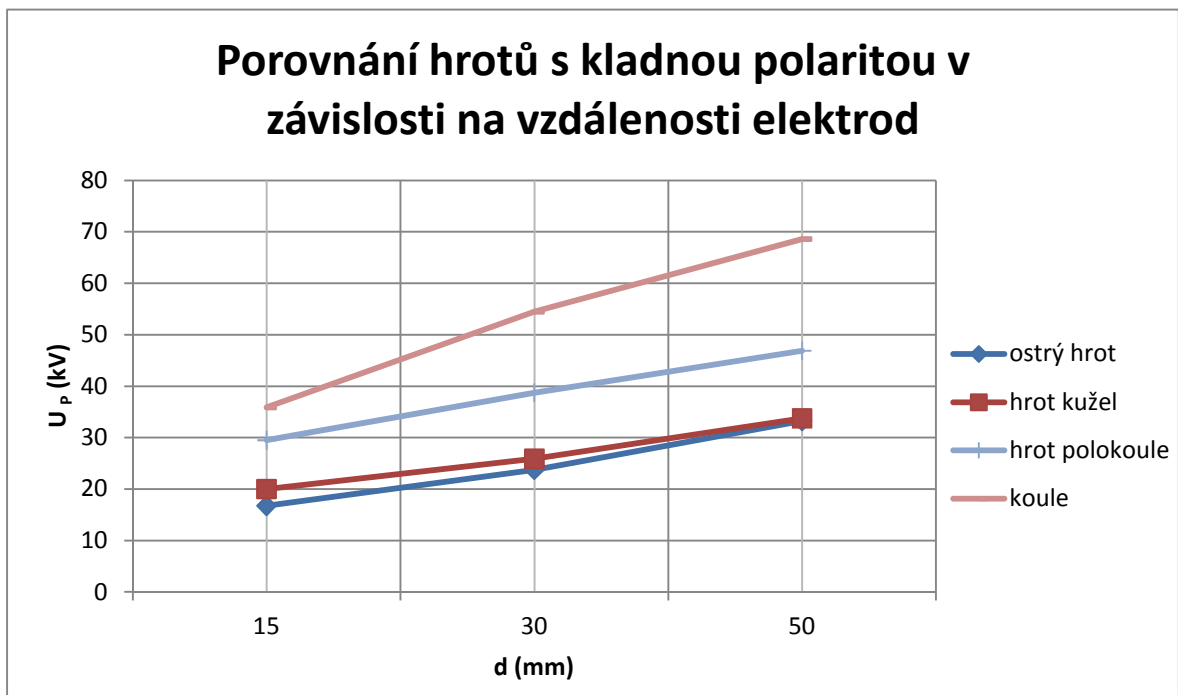
deska (-) - polokoule (+)									
d (mm)	měřeno na záporné polaritě								
	U_{P1} (kV)	U_{P2} (kV)	U_{P3} (kV)	U_{P4} (kV)	U_{P5} (kV)	U_{P6} (kV)	U_{P7} (kV)	U_{P8} (kV)	U_P (kV)
15	29	29	30	30	29	30	30	29	29.5
30	39	39	39	38	39	39	39	38	38.75
50	46	47	47	47	47	47	47	47	46.875



Obr. 6.10 Deska - polokulový hrot

6.4.8 Porovnání přeskovového napětí v závislosti na polaritě a vzdálenosti elektrod

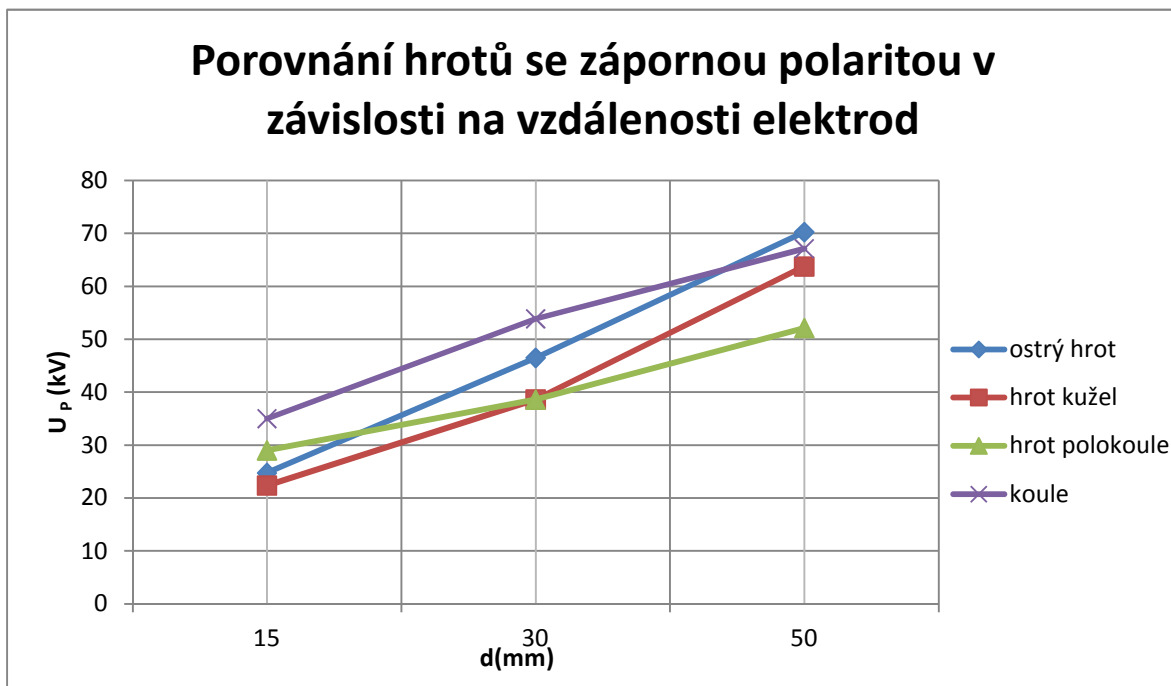
Na následujícím obrázku (Obr. 6.11) jsou pro porovnání zobrazeny průběhy přeskovového napětí všech čtyř měřených elektrod s kladnou polaritou. Dle teoretických předpokladů se na základě tvarů hrotů očekávalo, že kulová elektroda bude mít největší průrazné napětí. Elektroda ve tvaru polokoule by měla mít průrazné napětí o něco menší, pak by měla následovat velikost napětí kuželové elektrody a nejnižší průrazné napětí by mělo být v zapojení elektrod s ostrým hrotem. Z grafu jasně vidíme, že mnou provedená měření se s těmito předpoklady shodují.



Obr. 6.11 Porovnání velikosti přeskovového napětí hrotů s kladnou polaritou v závislosti na vzdálenosti elektrod

Na obrázku (Obr. 6.12) jsou graficky znázorněny a porovnány výsledky naměřených hodnot pro hroty v zapojení se zápornou polaritou. V uspořádání se zápornou polaritou měla koróna mnohem znatelnější projevy než v případě kladného hrotu. Podle teorie by nejsilnější projev koróny měl být u zapojení s ostrým hrotem a mít největší

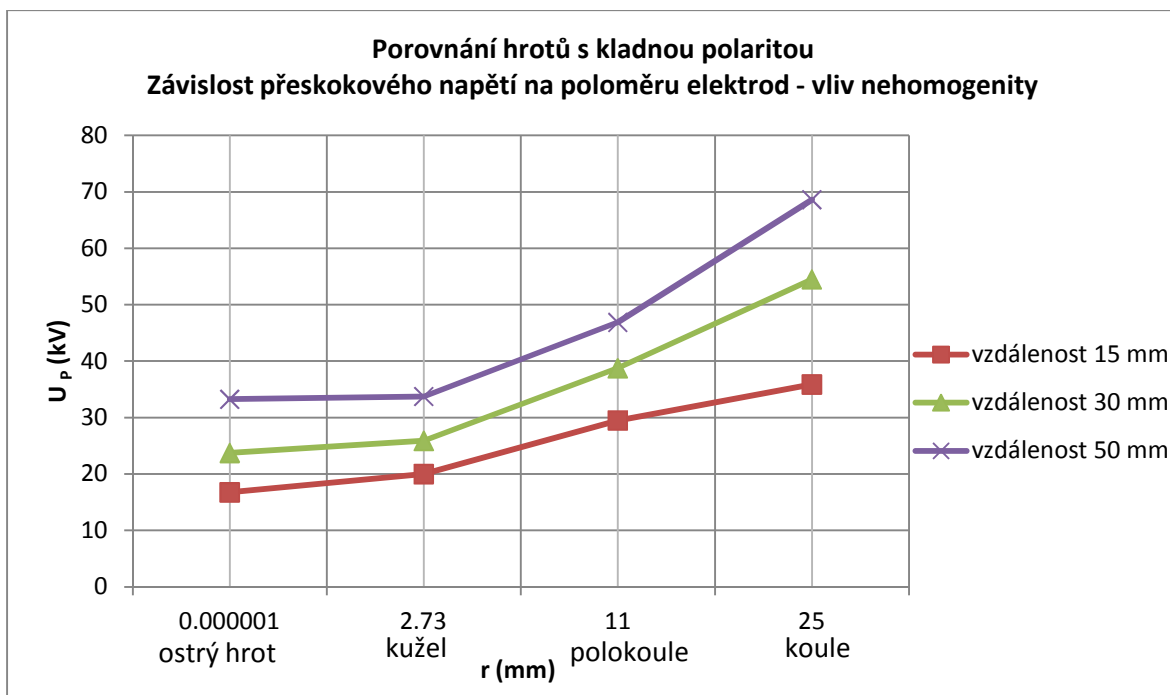
přeskokové napětí. Naměřené hodnoty se shodují s předpoklady, ale mým subjektivním hodnocením byly projevy koróny jak vizuální, tak svou hlasitostí, nejintenzivnější během měření uspořádání s kuželovým hrotem. Zvýšené hodnoty přeskokového napětí ostrého hrotu si můžeme vysvětlit jako vliv prostorového náboje, který se nahromadí kolem hrotu a tím fiktivně zvětšuje poloměr zakřivení elektrody.



Obr. 6.12 Porovnání velikosti přeskokového napětí hrotů se zápornou polaritou v závislosti na vzdálenosti elektrod

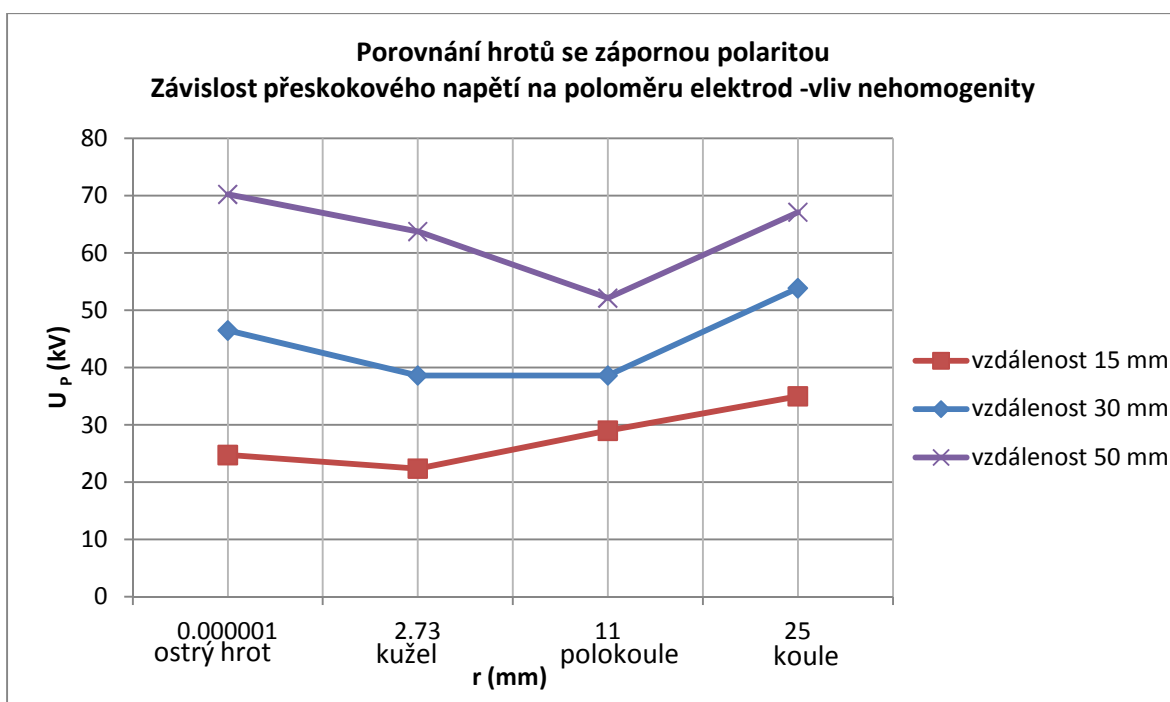
6.4.9 Porovnání přeskokového napětí v závislosti na polaritě a poloměru elektrod

Na následujícím obrázku (Obr. 6.13) jsou porovnány jednotlivé hroty s kladnou polaritou. Jedná se o závislost velikosti přeskokového napětí na velikosti zakřivení hrotové elektrody. Z grafu jasně vyplývá, že velikost přeskokového napětí roste úměrně se zvětšujícím se poloměrem zakřivení hrotu. To je způsobeno rozdílnou nehomogenitou elektrického pole. Čím blíže je pole poli homogennímu, tím je větší elektrická pevnost vzduchu mezi elektrodami. Z toho vyplývá, že nejnižší přeskokové napětí je u ostrého hrotu a nejvyšší na kulové elektrodě, což se měřením potvrdilo.



Obr. 6.13 Porovnání hrotů s kladnou polaritou v závislosti na poloměru elektrod - nehomogenity

Na obrázku (Obr. 6.14) je graficky znázorněna závislost přeskovového napětí na poloměru elektrod pro zapojení se zápornou polaritou hrotů. Dle teoretických předpokladů by měly mít křivky stejný průběh jako v předešlém případě. V grafu ovšem vidíme, že velikost přeskovového napětí ostrého hrotu není nejnižší a u elektrody ve tvaru kužele vzrostla velikost přeskovového napětí ve vzdálenosti 50 mm nad přeskové napětí hrotu ve tvaru polokoule. To si můžeme vysvětlit jako vliv prostorového náboje, který se nahromadí kolem ostrého hrotu a tím fiktivně zvětšuje poloměr zakřivení elektrody, tudíž dojde k přeskoku až při vyšších hodnotách napětí.



Obr. 6.14 Porovnání hrotů se zápornou polaritou v závislosti na poloměru elektrod - vliv nehomogenity

Závěr

Cílem mé diplomové práce bylo ověřit dielektrické vlastnosti vzduchu v nehomogenním poli měřením.

V první části práce jsem sepsala získané poznatky dané problematiky z oblasti vedení proudu v plynech, zejména ve vzduchu. Nejprve jsem stručně popsala složení vzduchu a dielektrické vlastnosti plynů. Dále jsem se zaměřila na popis elektrické pevnosti, která charakterizuje izolační vlastnosti plynů. Následně je uvedena elektrická pevnost, která znázorňuje schopnost daného materiálu (v našem případě plynu), vést elektrický proud. Zmínila jsem také zánik nosičů náboje. V druhé kapitole jsem popsala nejdůležitější typy výbojů, které se v plynech objevují. Významným druhem výboje pro tuto práci jsou výboje korónou. Na konci teoretické části jsem uvedla vliv polarity elektrod a vliv vložené nevodivé bariéry na přeskokové napětí.

Teoretická část byla doplněna o výpočet intenzity elektrického pole a jeho grafické znázornění. Výsledky zjištěné výpočtem korespondují s výsledky experimentu. Rozsah práce neumožňoval podrobnější analýzu rozložení intenzity elektrického pole a ani to nebylo předmětem zkoumání této práce. Výpočet neřešil komplexní problematiku. Byl dán pouze geometrií elektrod a nebyl brán v úvahu prostorový náboj. Výsledky slouží k prvotní orientaci v problematice nehomogenního pole. Důraz při analyzování této problematiky byl kladen na praktickou část, která je popisována následně.

V praktické části podrobně popisuji provedená měření a porovnávám jednotlivé výsledky s teoretickými předpoklady. Výsledky měření z větší části potvrdily teoretické předpoklady dielektrických vlastností vzduchu v nehomogenním poli. Drobné nesrovnalosti, které se rozcházejí s teorií, se dají vysvětlit různými pochody v elektrickém poli, které jsou závislé na mnoha faktorech, a ty jsou rozebrány v této práci. V neposlední řadě může být měření ovlivněno chybou lidského faktoru, kterou teorie neuvažuje.

Výsledky získané v této diplomové práci by mohly být přínosem v technice vysokého napětí z hlediska navrhování elektrických přístrojů a zařízení. Chceme-li využít nevodivou bariéru kvůli zlepšení elektrické pevnosti, je na základě mých poznatků důležité

její umístění do ideální vzdálenosti. Potom nezáleží na polaritě elektrod, u obou polarit dochází ke stejným průběhům elektrické pevnosti. Problematika techniky vysokého napětí je natolik rozsáhlá, že je třeba sledovat její další vývoj v návaznosti na nové objevy nejen v oblasti vysokého napětí, ale i jiných vědních oborech (vývoj technologií, druhy materiálů, diagnostika, atd.) a provádět další měření.

Seznam literatury a informačních zdrojů

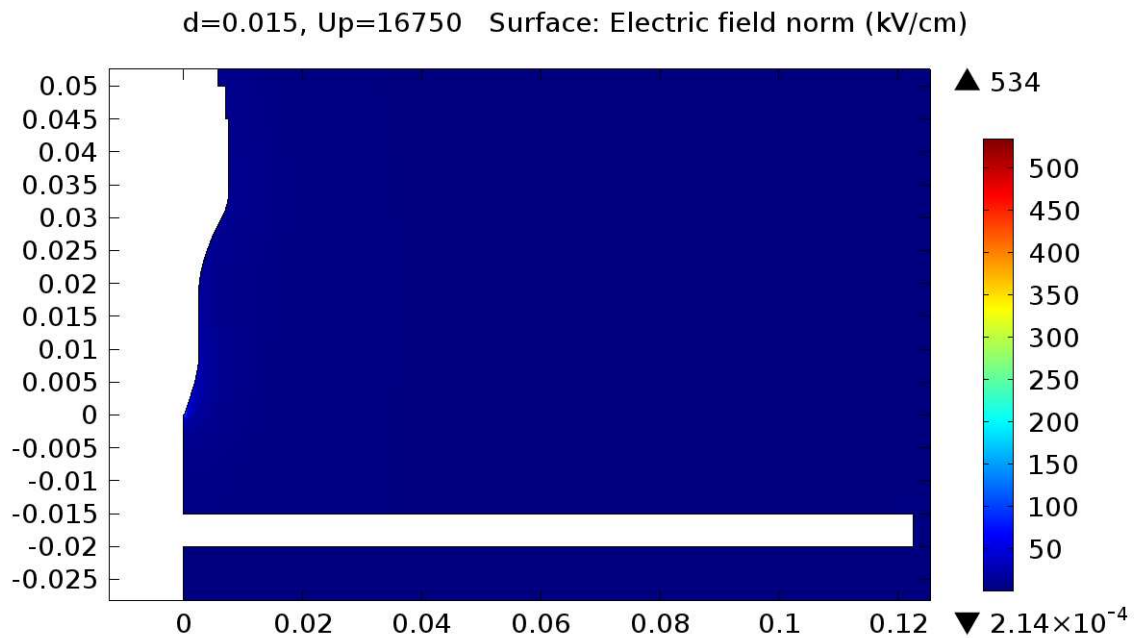
- [1] VEVERKA, Antonín. *Technika vysokého napětí*. 3. přeprac. vyd. Praha/ Bratislava: SNTL/ALFA, 1982. 304 s.
- [2] AKOPJAN, A. A., BUTKEVIČ, G. V., DMOCHOVSKAJA, L. F., KUCHARKIN, E. S., LEBEDEV, G. A., RAZEVIČ, D. V., SERGEEV, A. S., SIROTINSKIJ, L. I. *Technika vysokého napětí 1*. Praha: SNTL, 1956. 449 s.
- [3] LAURENC, Jiří. *Portal.zcu.cz*. [online]. [cit. 28.3.2016]. Předmět TVN. Dostupné z: <https://portal.zcu.cz/portal/studium/courseware/kee/tvn/prednasky.html>
- [4] MENTLÍK, Václav. *Dielektrické prvky a systémy*. 1. vyd. Praha: BEN – technická literatura, 2006. 235 s. ISBN 80-730-0189-6.
- [5] WEISER, Roman. *Dielektrické vlastnosti vzduchu v nehomogenním poli*. Plzeň, 2013. Diplomová práce (Ing.). Západočeská univerzita v Plzni, fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Miroslav Hromádka.
- [6] PowerWiki. *Vysokonapěťové zkušebnictví. Izolační systémy a jejich charakteristiky*. [online]. [cit. 8.4.2016]. Dostupné z: https://www.powerwiki.cz/attach/VNZ/VNZ_4-Izolacni_systemy.pdf
- [7] Kolektiv. *Vzduch*. In: Wikipedia. [online]. [cit. 25.3.2016]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Vzduch>.
- [8] MENTLÍK, Václav, PIHERA, Josef, POLANSKÝ, Radek, PROSR, Pavel a TRNKA, Pavel. *Diagnostika elektrických zařízení*. 1. vyd. Praha: BEN – technická literatura, 2008. 439 s. ISBN 978-80-7300-232-9.
- [9] KUBEŠ, Pavel. *Impulzní silnoprůdné výboje a jejich diagnostika* [online]. Praha: ČVUT, Fakulta elektrotechnická, 2004. [cit. 18.4.2016]. Studijní text pro doktorské studium. Dostupné z <http://www.aldebaran.cz/studium/vyboje.pdf>.
- [10] KUČEROVÁ, Eva. *Elektrotechnické materiály*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2002. 174 s. ISBN 80-7082-940-0.
- [11] VILHELM, Lukáš. *Elektrická pevnost plynného izolantu s izolační bariérou v elektromagnetickém poli*. Plzeň, 2013. Diplomová práce (Ing.). Západočeská univerzita v Plzni, fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Petr Martínek.
- [12] ELEKTRINA. *Výboje v plynech – fyzikální základy*. SKUPINA ČEZ [online]. [cit. 17.4.2016]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/edee/content/microsites/elektrina/fyz8.htm>.

- [13] REGNER, Martin. *Návrh vysokofrekvenčního transformátoru pro laboratorní účely*. Plzeň, 2014. Bakalářská práce (Bc.) Západočeská univerzita v Plzni, fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Jakub Souček.
- [14] HELLER, V. *Výboje v plynech*. Univerzity J. E. Purkyně Ústí nad Labem, přírodovědecká fakulta. [online]. [cit. 29.3.2016]. Dostupné z: http://physics.ujep.cz/~heller/PSP_A_soubory/04-Vyboje_v_plynech.pdf
- [15] Zpracoval kolektiv autorů Encyklopedického institutu Československé akademie věd pod vedením hlavní redakce České encyklopedie. *Ilustrovaný encyklopedický slovník*. 1. vyd. Praha: ACADEMIA, 1980
- [16] LINDNER, M. *Daylight corona discharge imager*. In: High Voltage Engineering. Eleventh International Symposium on (Conf. Publ. No. 467). IET. [online]. Page(s): 349 - 352 vol.4. 23 Aug 1999-27 Aug 1999, London. [cit. 3.4.2016]. ISSN: 0537-9989. Dostupné z: DOI 10.1049/cp:19990864.
- [17] REN, Chengyan. *Polarity effect on corona discharge of needle/plane electrodes and audible noise under DC voltage*. In: IEEE 11th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM). IEEE. [online]. Page(s): 784 – 787. 19-22 July 2015, Sydney, NSW. [cit. 3.4.2016]. ISSN: 2160-9225. Dostupné z: DOI 10.1109/ICPADM.2015.7295389
- [18] CHANG, J. S., *Corona discharge processes*. In: IEEE Transactions on Plasma Science (Volume:19 , Issue: 6). IEEE. [online]. Page(s): 1152 – 1166. Dec 1991. [cit. 3.4.2016]. ISSN: 0093-3813. Dostupné z: DOI 10.1109/27.125038

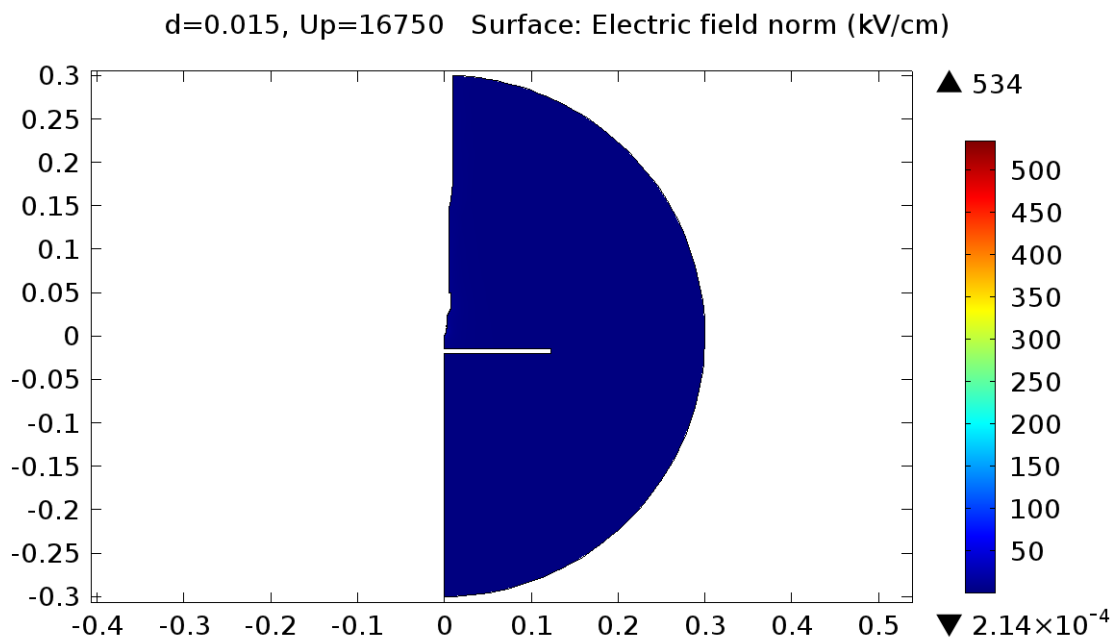
Přílohy

Příloha A – matematický model rozložení intenzity elektrického pole

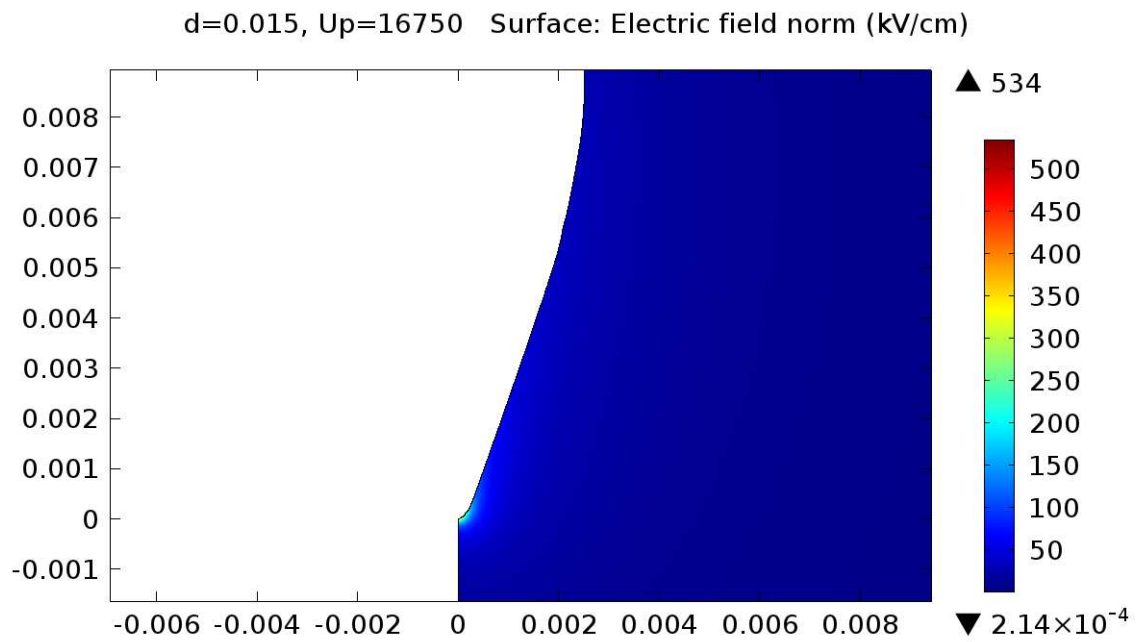
Ostrý hrot



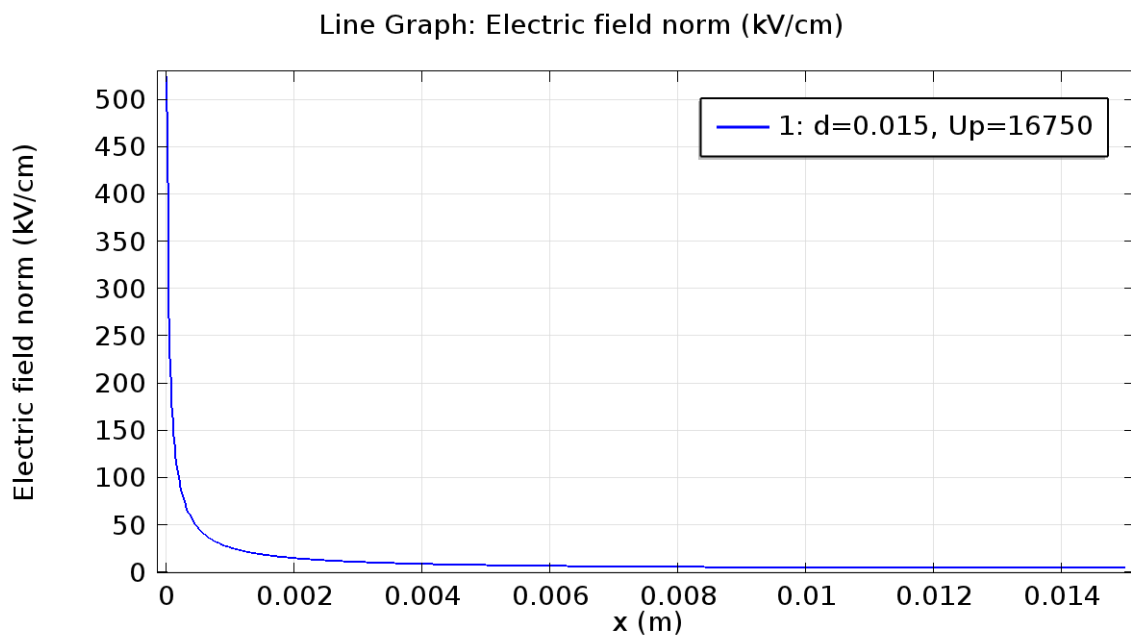
Obr. 0. 1 Detail ostrého hrotu - Rozložení intenzity elektrického pole, vzdálenost mezi elektrodami 15 mm, přeskovkové napětí 16,75 kV, intenzita pole 524,38 kV/cm



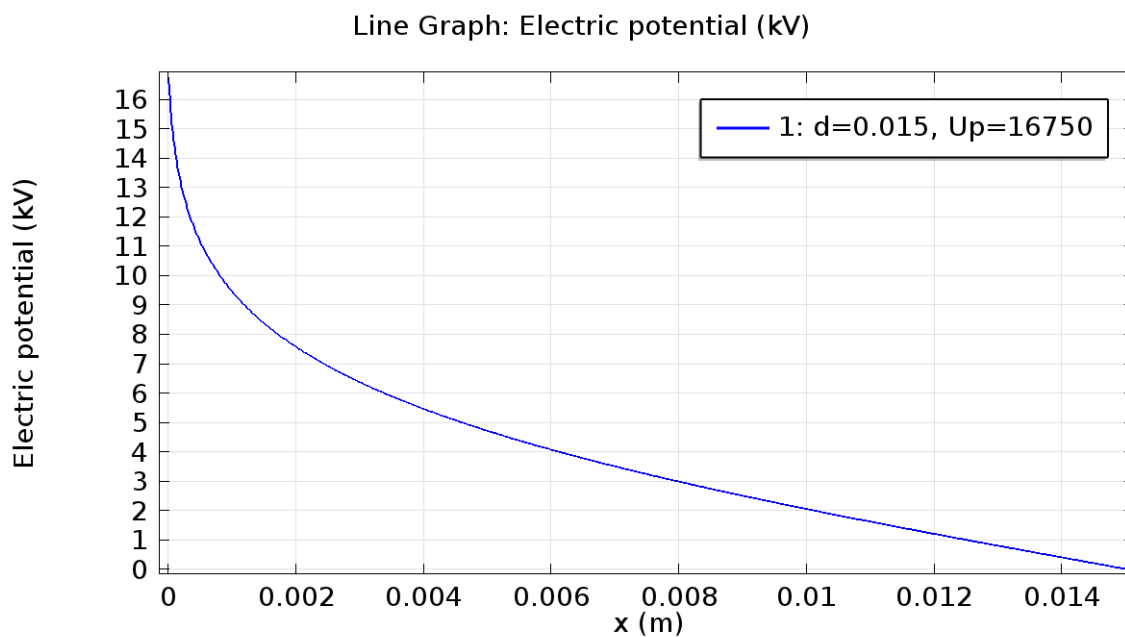
Obr. 0. 2 Ostrý hrot - Rozložení intenzity elektrického pole, vzdálenost mezi elektrodami 15 mm, přeskovkové napětí 16,75 kV, intenzita pole 524,38 kV/cm



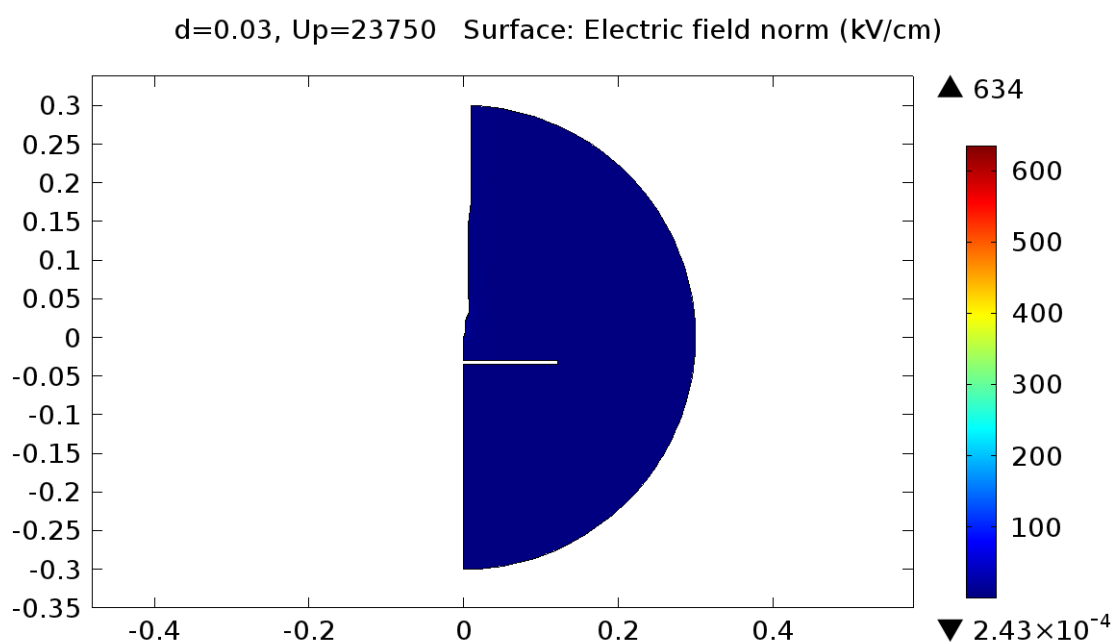
Obr. 0. 3 Detail špičky ostrého hrotu - Rozložení intenzity elektrického pole, vzdálenost mezi elektrodami 15 mm, přeskokové napětí 16,75 kV, intenzita pole 524,38 kV/cm



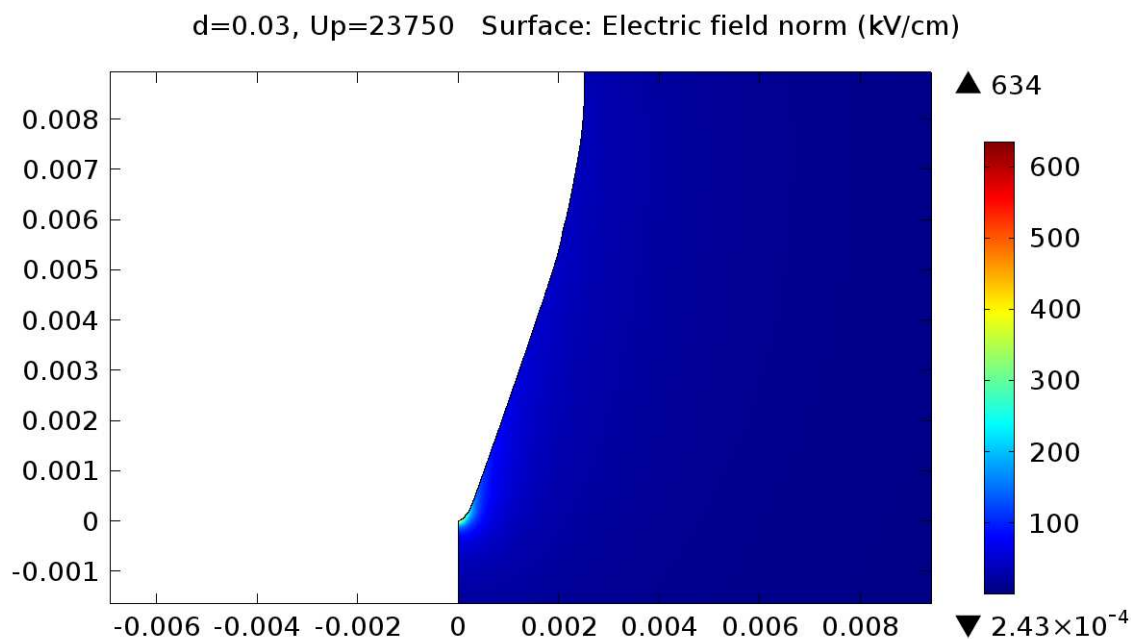
Obr. 0. 4 Ostrý hrot - Průběh intenzity elektrického pole, vzdálenost mezi elektrodami 15 mm, přeskokové napětí 16,75 kV, intenzita pole 524,38 kV/cm



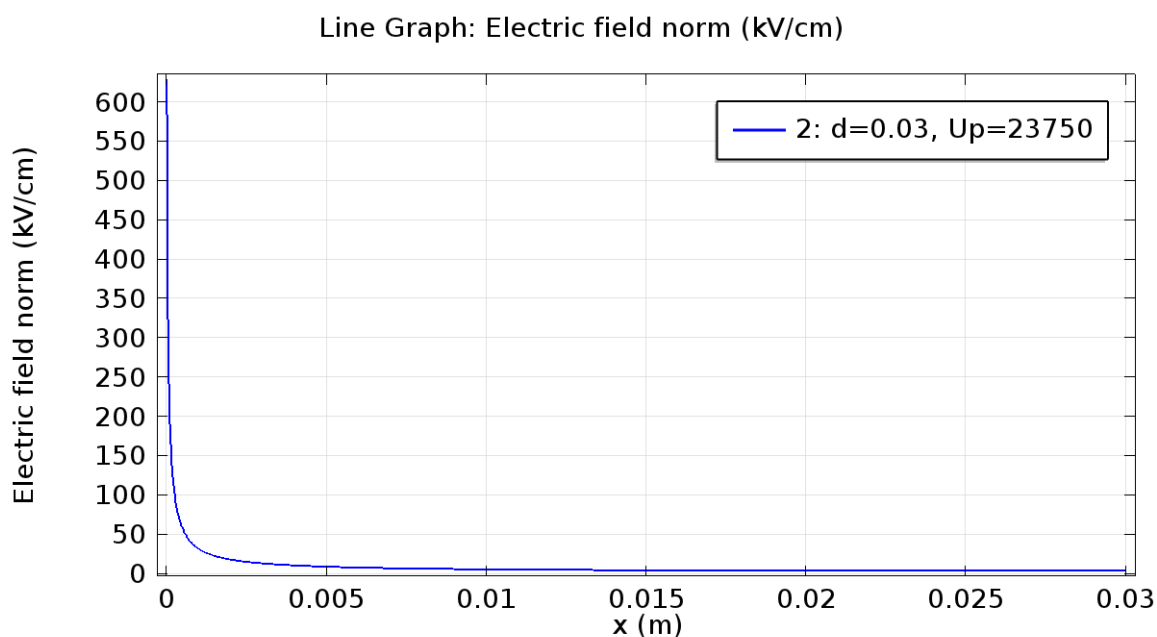
Obr. 0. 5 Ostrý hrot – Rozložení elektrického potenciálu, vzdálenost mezi elektrodami 15 mm, přeskové napětí 16,75 kV, intenzita pole 524,38 kV/cm



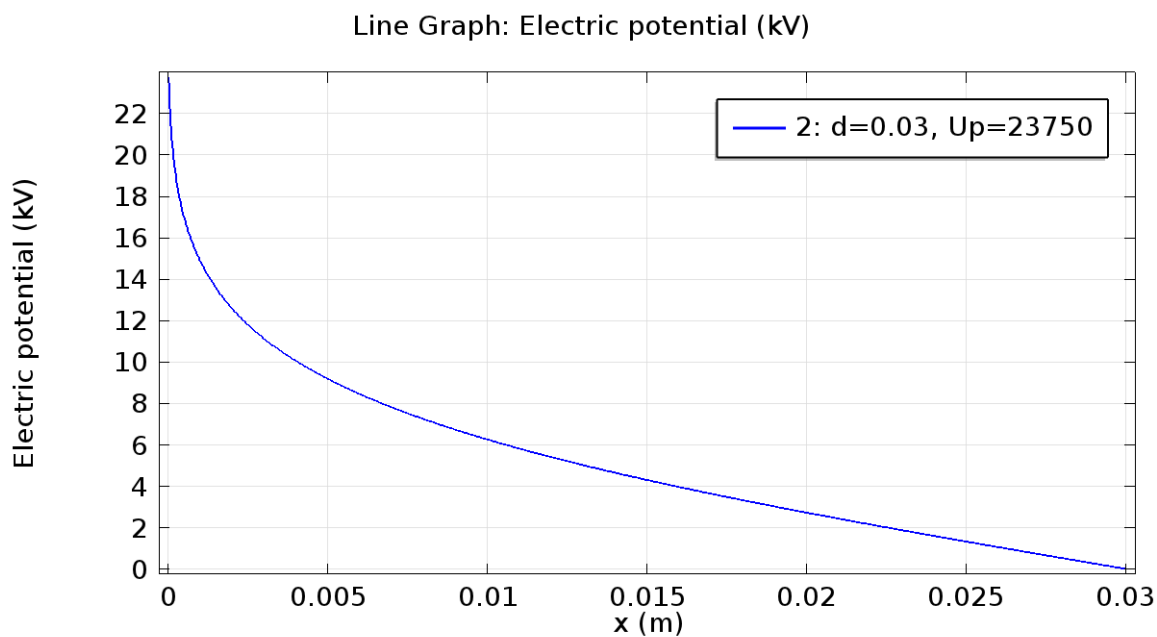
Obr. 0. 6 Ostrý hrot - Rozložení intenzity elektrického pole, vzdálenost mezi elektrodami 30 mm, přeskové napětí 23,75 kV, intenzita pole 628,63 kV/cm



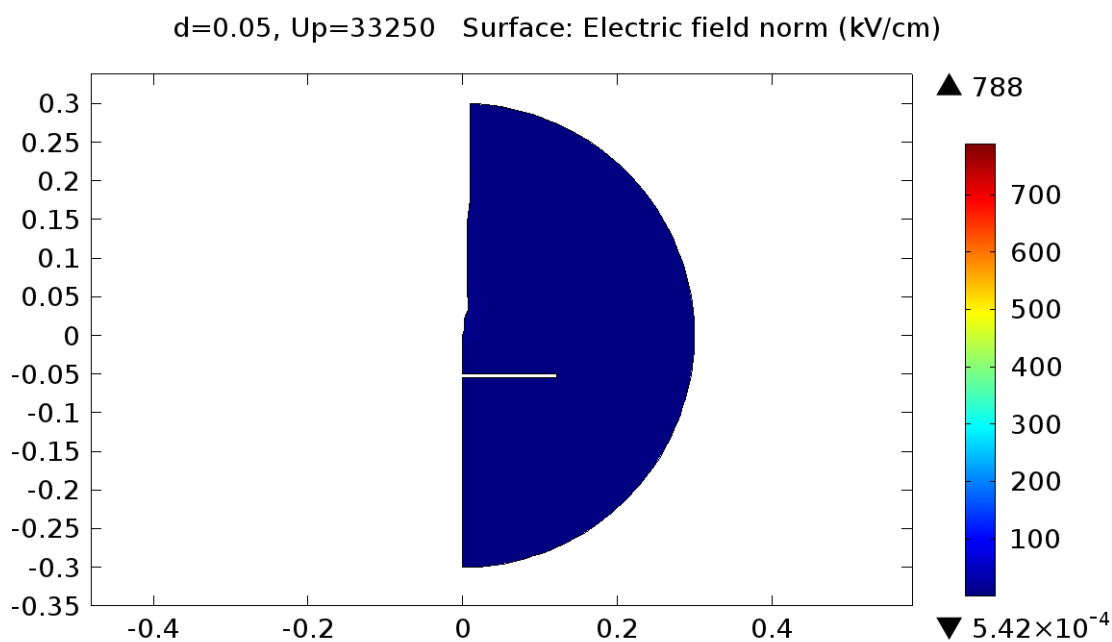
Obr. 0. 7 Detail špičky ostrého hrotu - Rozložení intenzity elektrického pole, vzdálenost mezi elektrodami 30 mm, přeskokové napětí 23,75 kV, intenzita pole 628,63 kV/cm



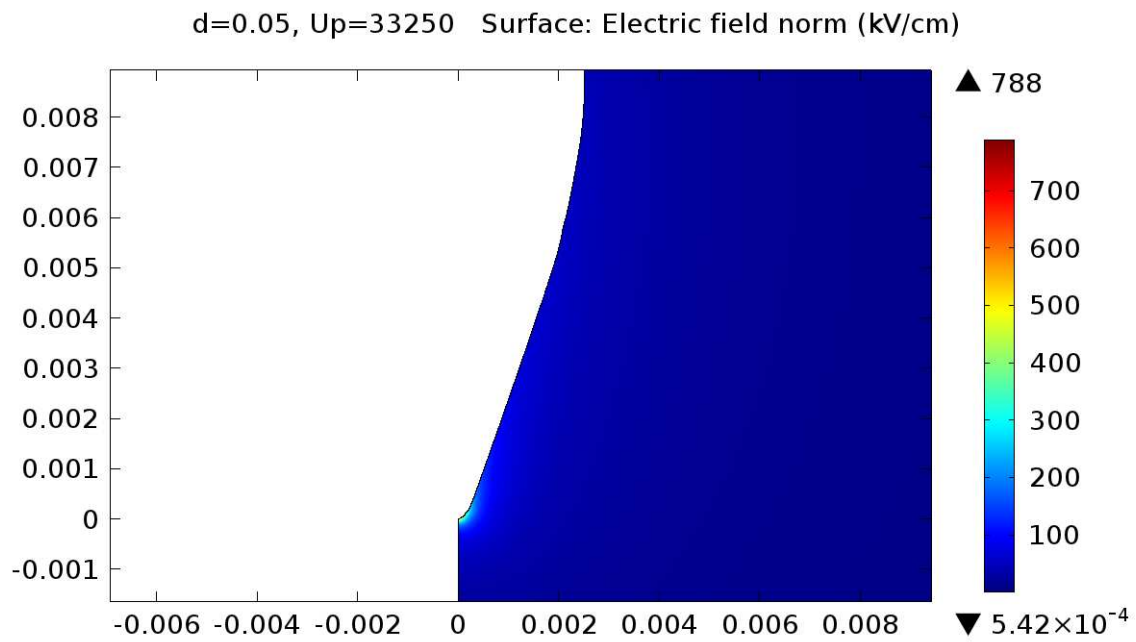
Obr. 0. 8 Ostrý hrot - Průběh intenzity elektrického pole, vzdálenost mezi elektrodami 30 mm, přeskokové napětí 23,75 kV, intenzita pole 628,63 kV/cm



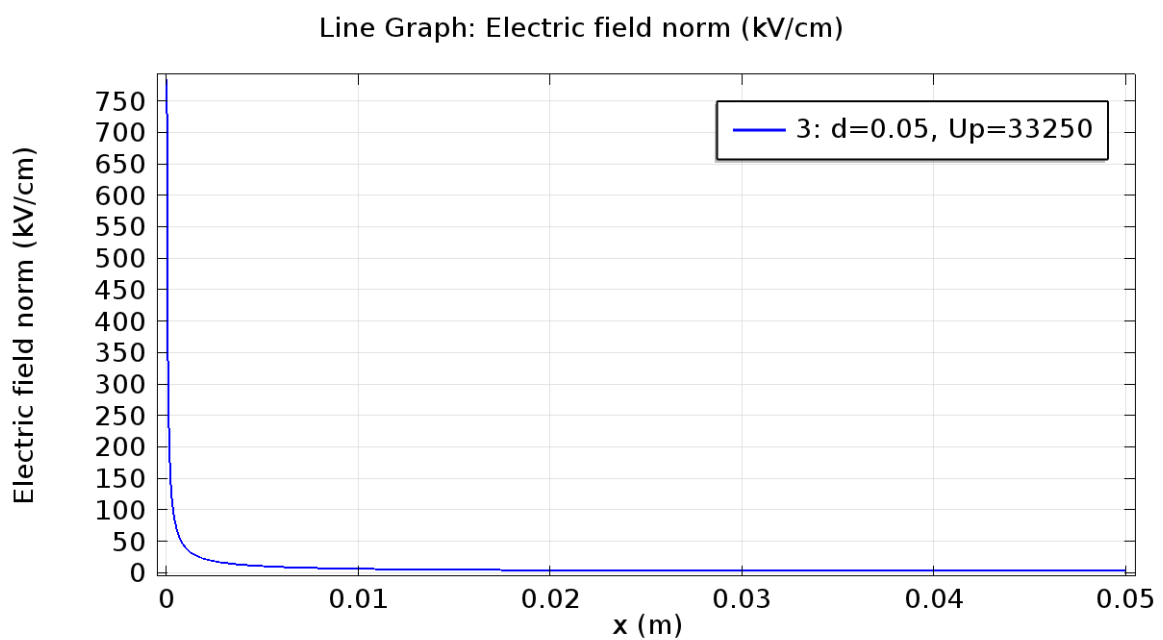
Obr. 0. 9 Ostrý hrot - Rozložení elektrického potenciálu, vzdálenost mezi elektrodami 30 mm, přeskové napětí 23,75 kV, intenzita pole 628,63 kV/cm



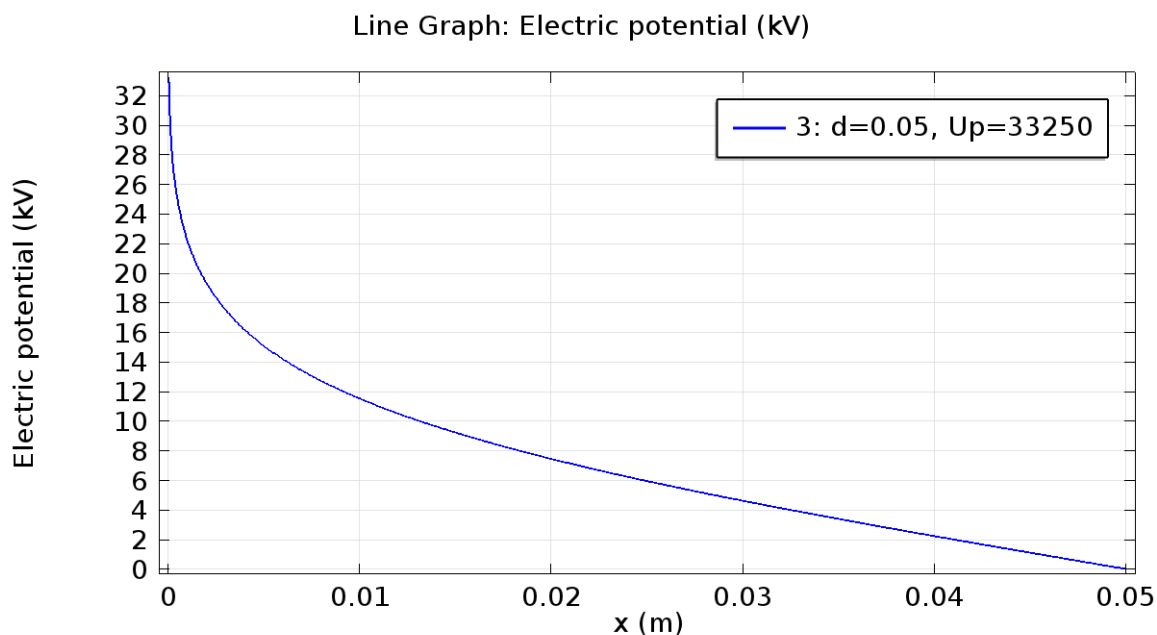
Obr. 0. 10 Ostrý hrot - Rozložení intenzity elektrického pole, vzdálenost mezi elektrodami 50 mm, přeskové napětí 33,25 kV, intenzita pole 784,31 kV/cm



Obr. 0. 11 Detail špičky ostrého hrotu - Rozložení intenzity elektrického pole, vzdálenost mezi elektrodami 50 mm, přeskové napětí 33,25 kV, intenzita pole 784,31 kV/cm

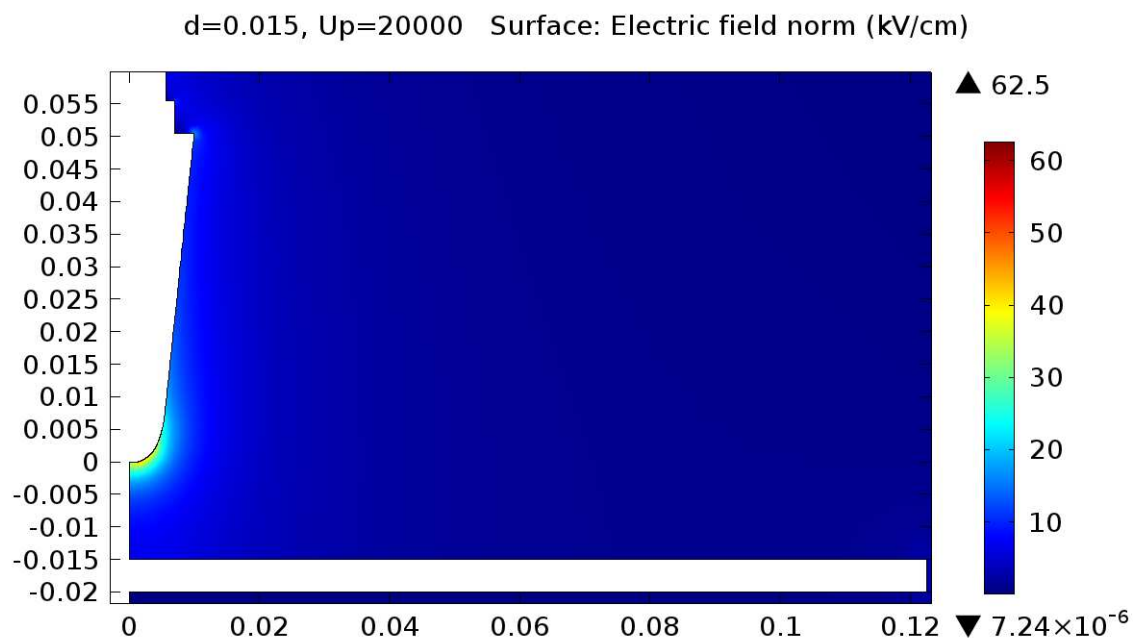


Obr. 0. 12 Ostrý hrot - Průběh intenzity elektrického pole, vzdálenost mezi elektrodami 50 mm, přeskové napětí 33,25 kV, intenzita pole 784,31 kV/cm

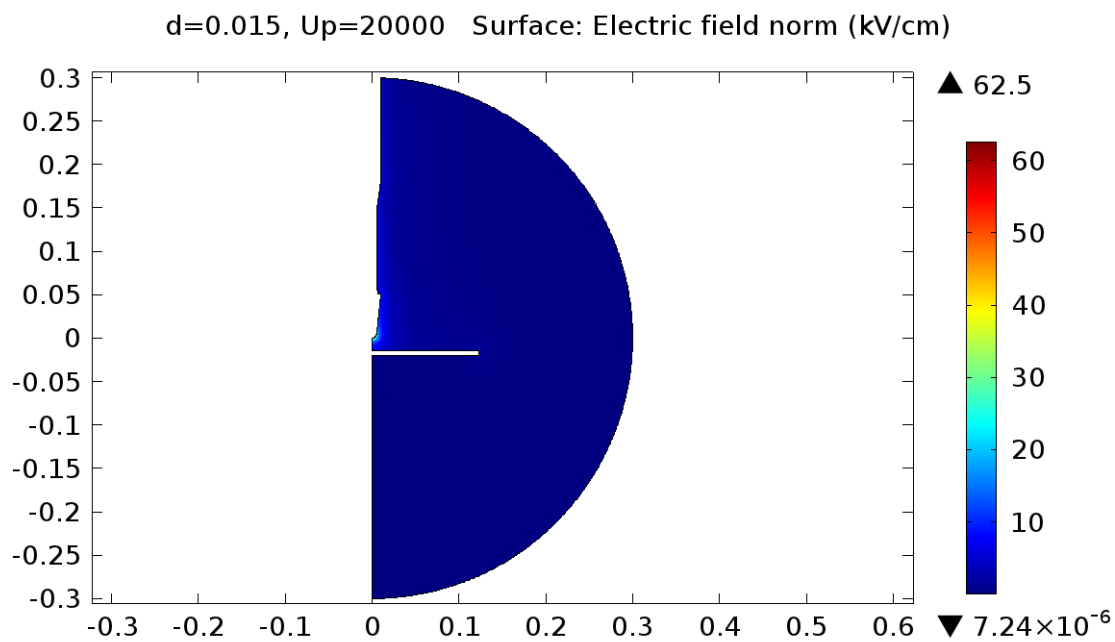


Obr. 0. 13 Ostrý hrot - Rozložení elektrického potenciálu, vzdálenost mezi elektrodami 50 mm, přeskové napětí 33,25 kV, intenzita pole 784,31 kV/cm

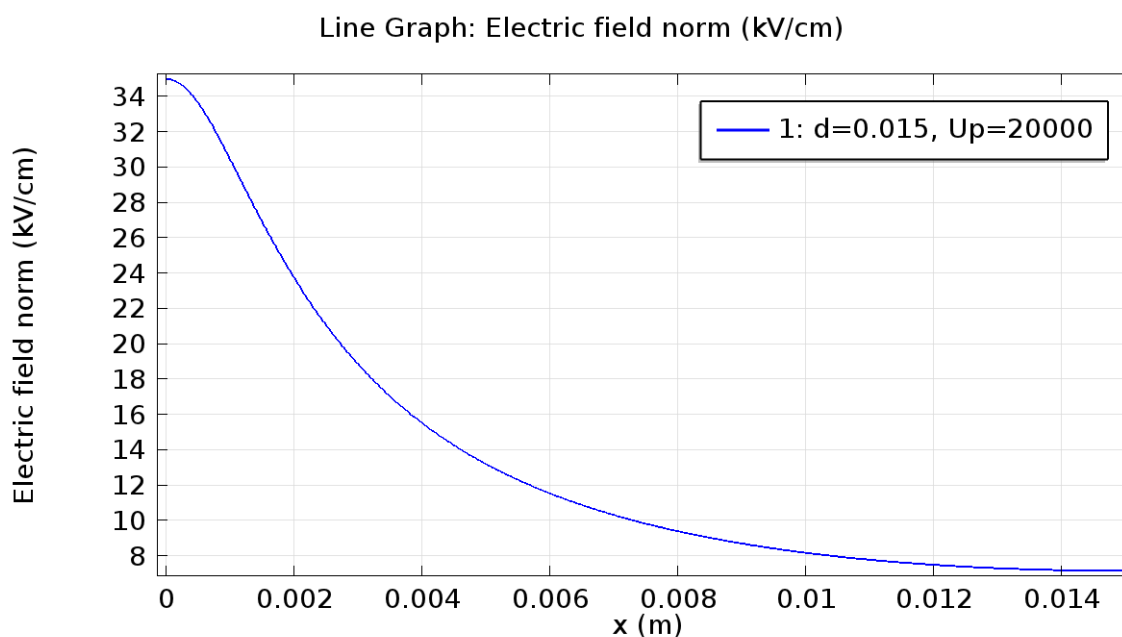
Kuželový hrot



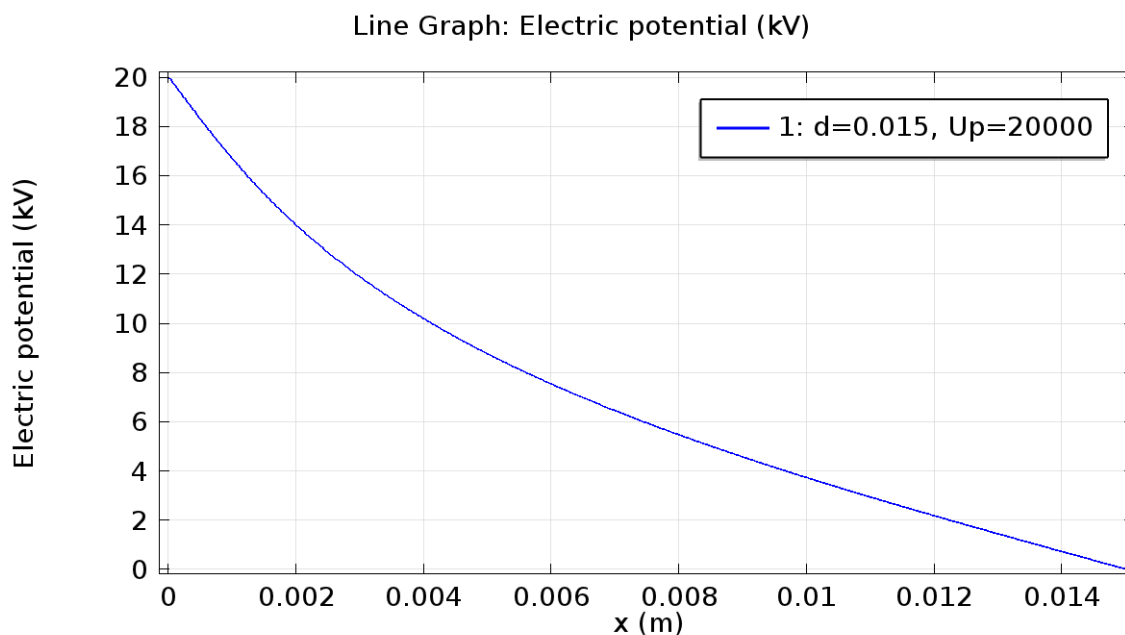
Obr. 0. 14 Detail kuželového hrotu - Rozložení intenzity elektrického pole, vzdálenost mezi elektrodami 15 mm, přeskové napětí 20 kV, intenzita pole 61,435 kV/cm



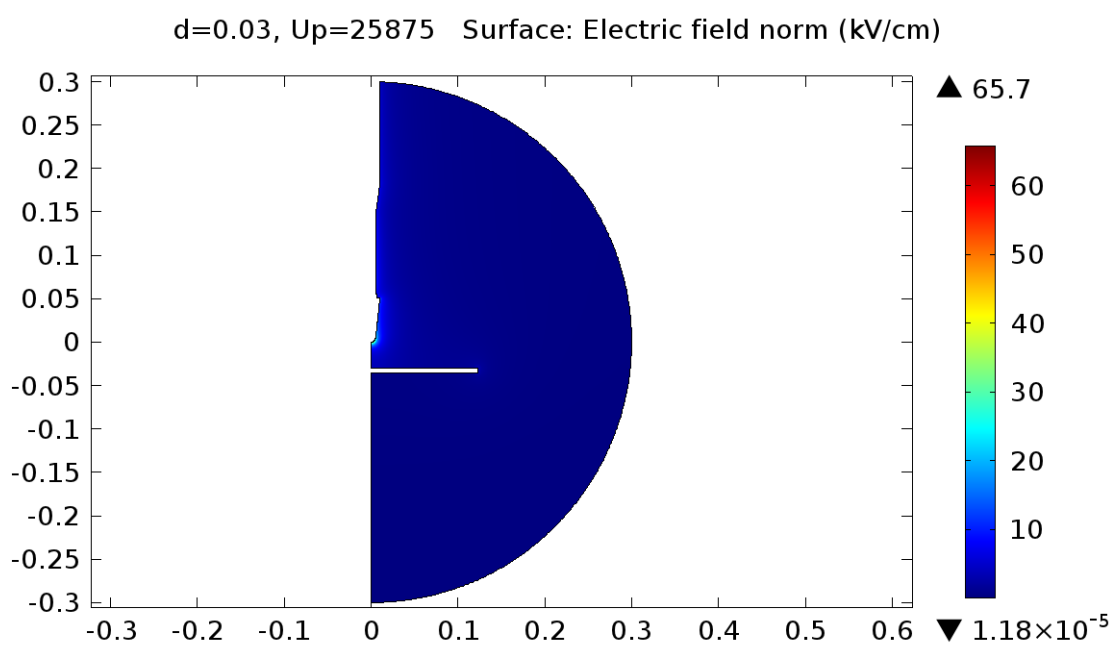
Obr. 0. 15 Kuželový hrot - Rozložení intenzity elektrického pole, vzdálenost mezi elektrodami 15 mm, přeskové napětí 20 kV, intenzita pole 61,435 kV/cm



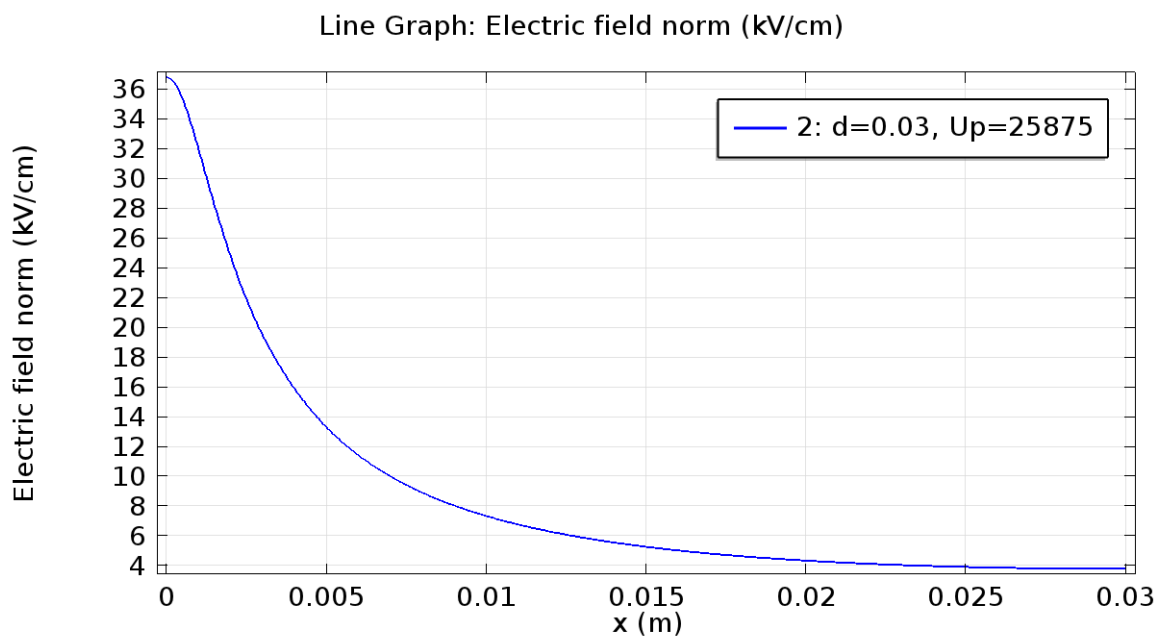
Obr. 0. 16 Kuželový hrot - Průběh intenzity elektrického pole, vzdálenost mezi elektrodami 15 mm, přeskové napětí 20 kV, intenzita pole 61,435 kV/cm



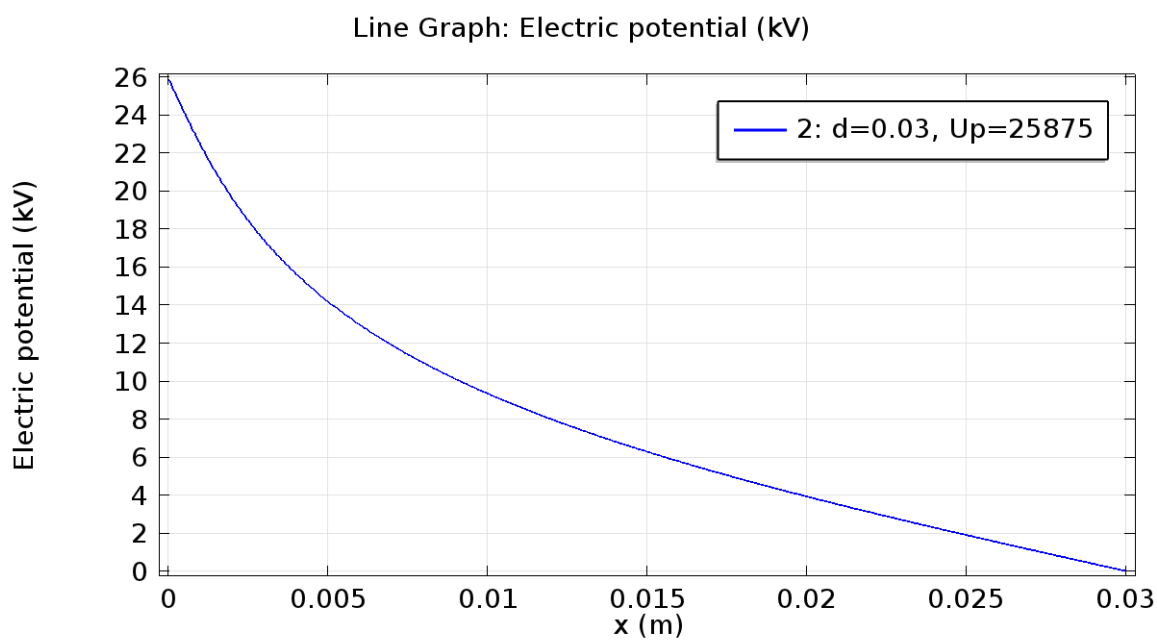
Obr. 0. 17 Kuželový hrot - Rozložení elektrického potenciálu, vzdálenost mezi elektrodami 15 mm, přeskokové napětí 20 kV, intenzita pole 61,435 kV/cm



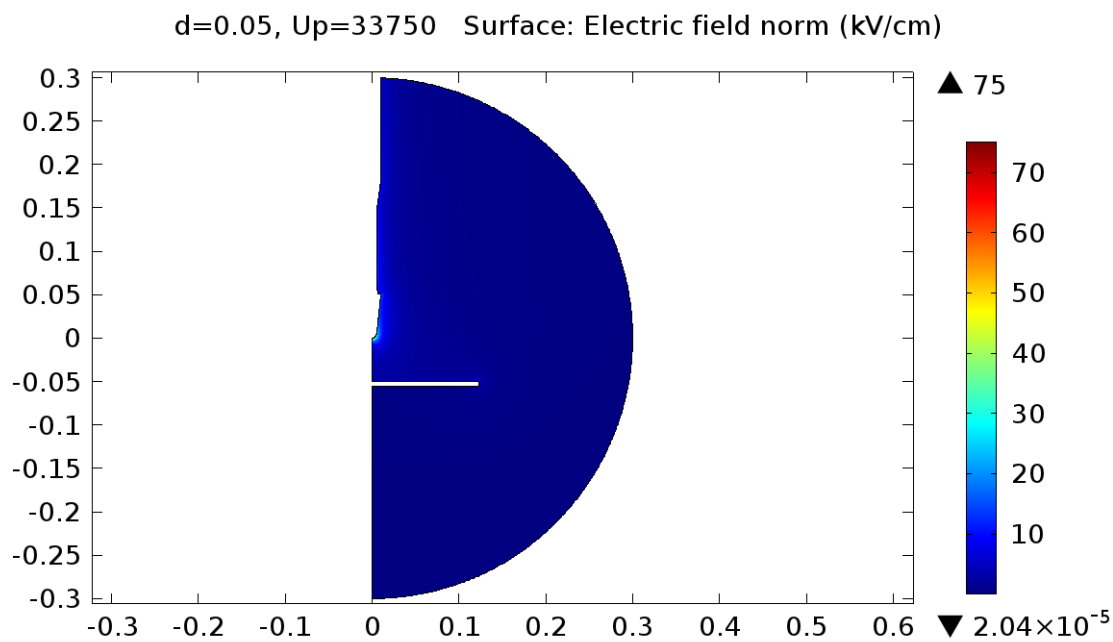
Obr. 0. 18 Kuželový hrot - Rozložení intenzity elektrického pole, vzdálenost mezi elektrodami 30 mm, přeskokové napětí 25,875 kV, intenzita pole 64,576 kV/cm



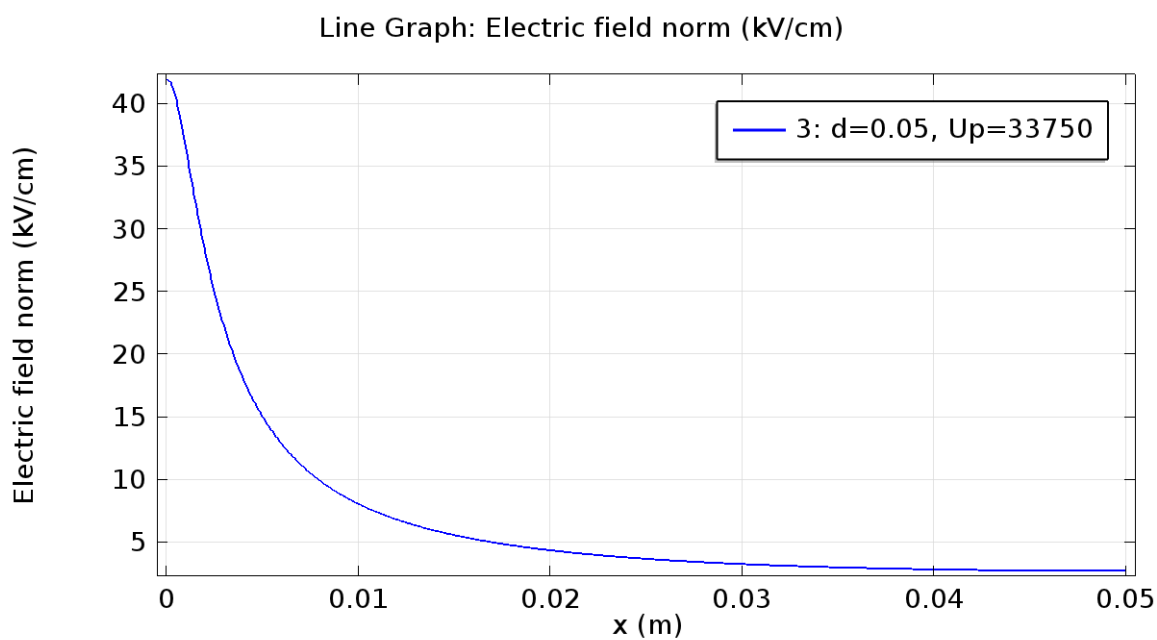
Obr. 0. 19 Kuželový hrot - Průběh intenzity elektrického pole, vzdálenost mezi elektrodami 30 mm, přeskové napětí 25,875 kV, intenzita pole 64,576 kV/cm



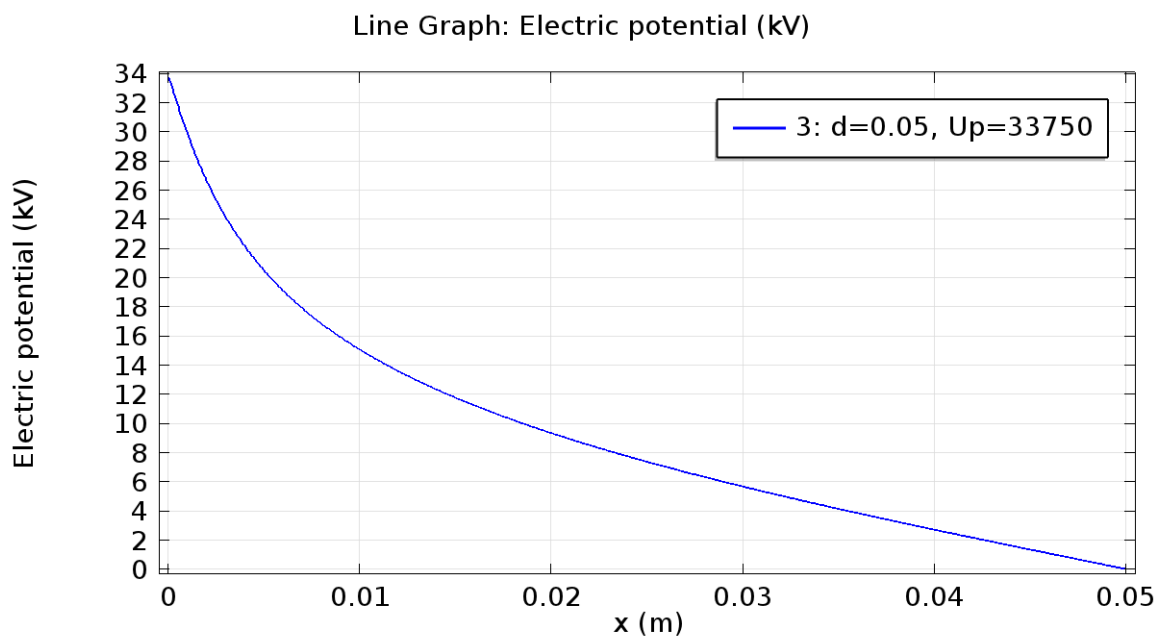
Obr. 0. 20 Kuželový hrot - Rozložení elektrického potenciálu, vzdálenost mezi elektrodami 30 mm, přeskové napětí 25,875 kV, intenzita pole 64,576 kV/cm



Obr. 0. 21 Kuželový hrot - Rozložení intenzity elektrického pole, vzdálenost mezi elektrodami 50 mm, přeskové napětí 33,75 kV, intenzita pole 73,719 kV/cm

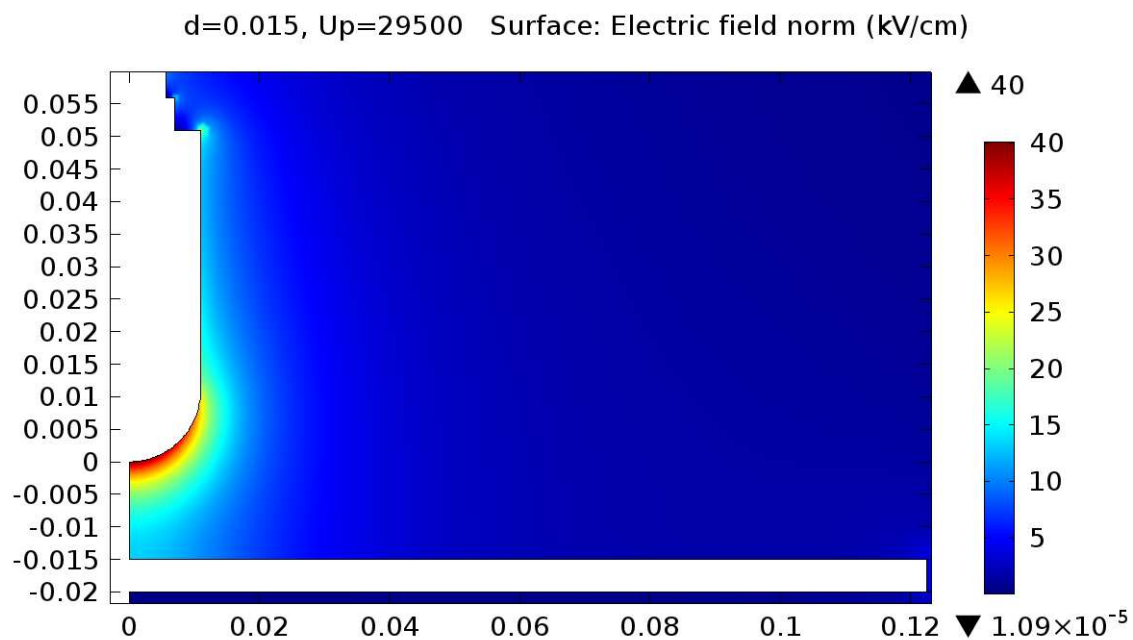


Obr. 0. 22 Kuželový hrot - Průběh intenzity elektrického pole, vzdálenost mezi elektrodami 50 mm, přeskové napětí 33,75 kV, intenzita pole 73,719 kV/cm

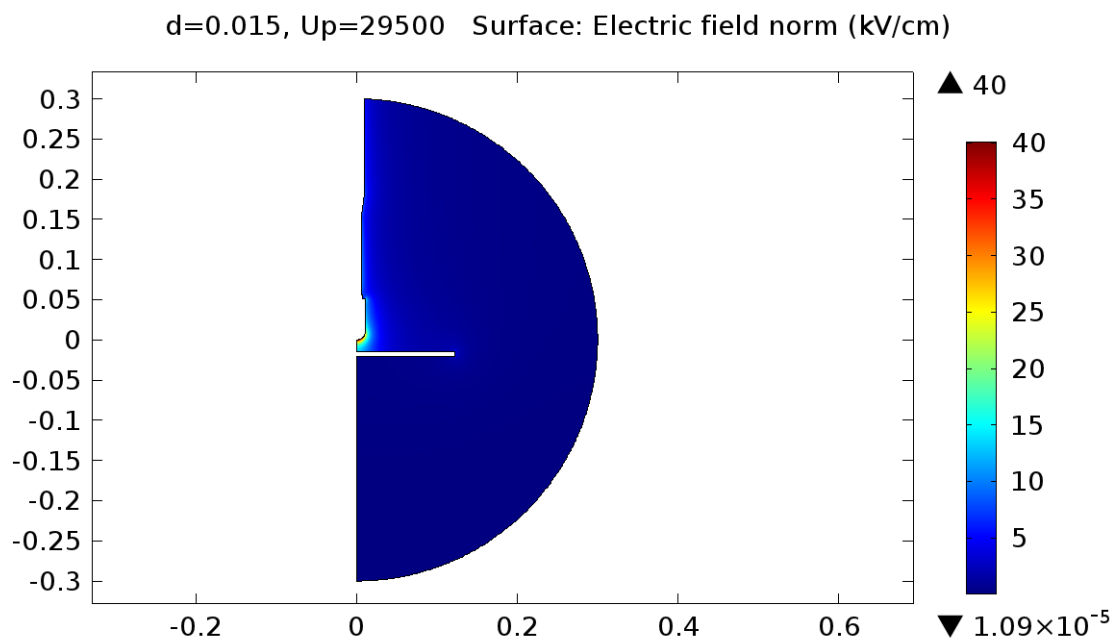


Obr. 0. 23 Kuželový hrot - Rozložení elektrického potenciálu, vzdálenost mezi elektrodami 50 mm, přeskové napětí 33,75 kV, intenzita pole 73,719 kV/cm

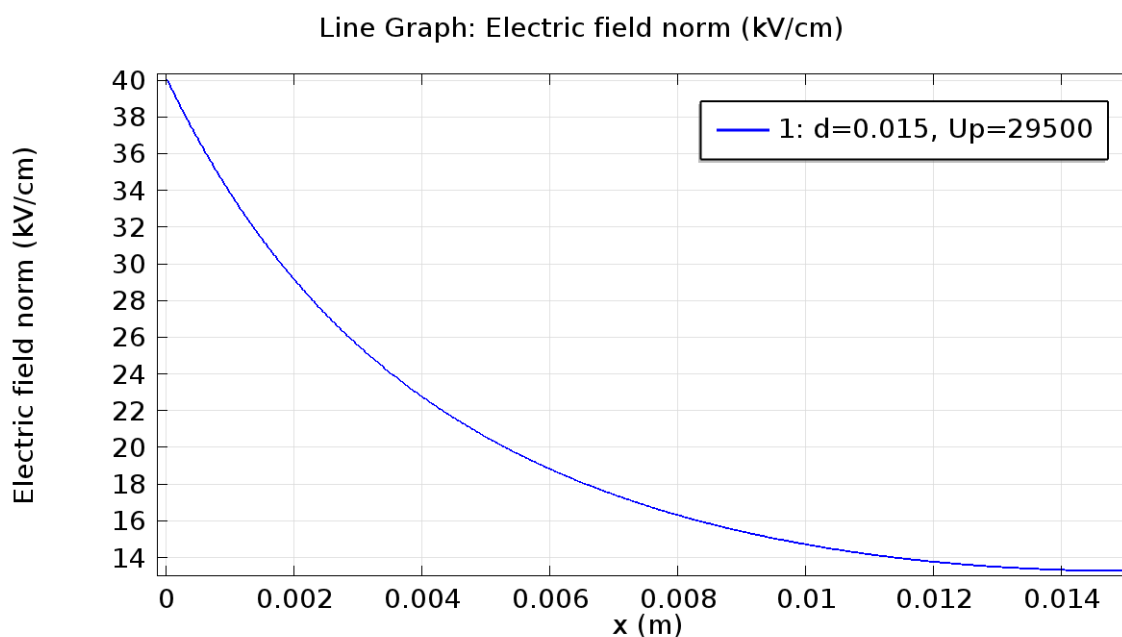
Polokoule



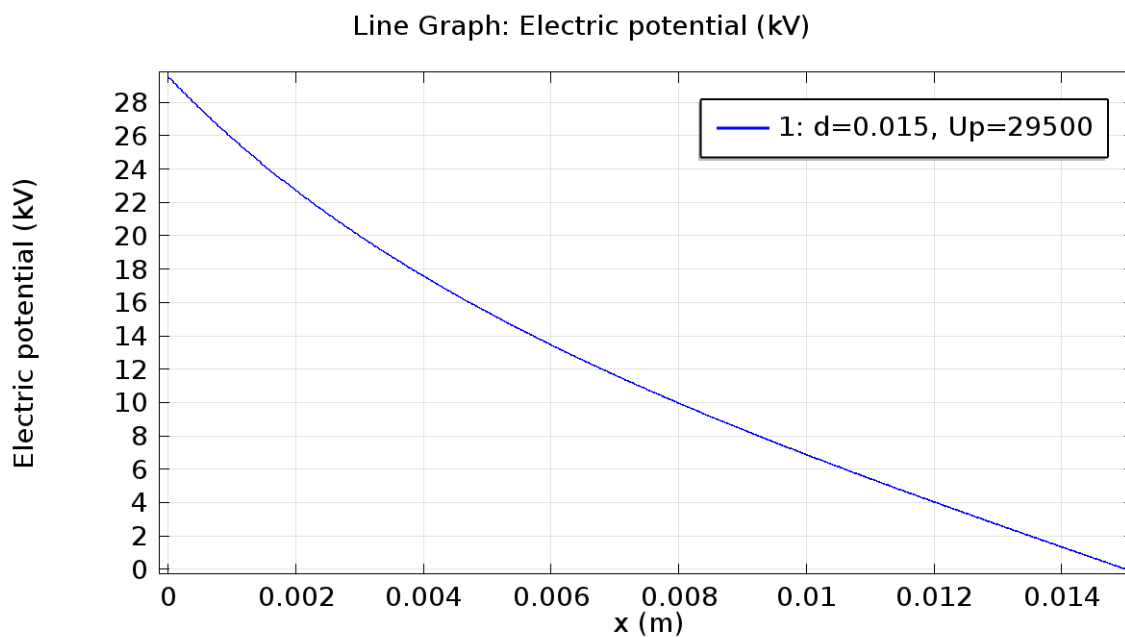
Obr. 0. 24 Detail polokulového hrotu - Rozložení intenzity elektrického pole, vzdálenost mezi elektrodami 15 mm, přeskové napětí 29,5 kV, intenzita pole 40,049 kV/cm



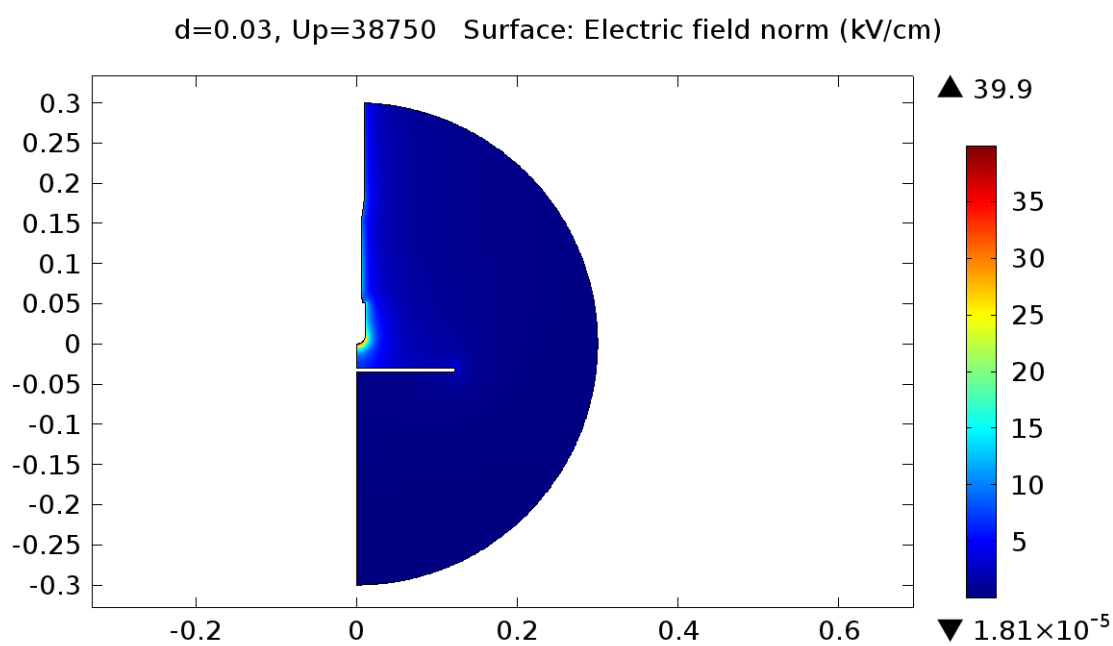
Obr. 0. 25 Polokoule - Rozložení intenzity elektrického pole, vzdálenost mezi elektrodami 15 mm, přeskové napětí 29,5 kV, intenzita pole 40,049 kV/cm



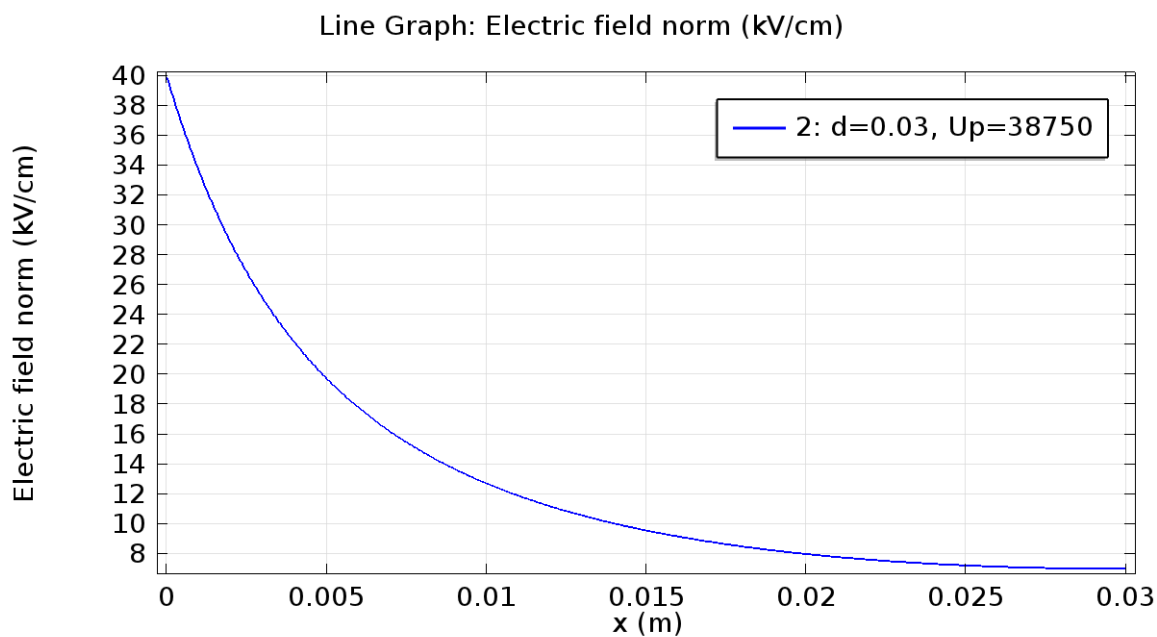
Obr. 0. 26 Polokoule - Průběh intenzity elektrického pole, vzdálenost mezi elektrodami 15 mm, přeskové napětí 29,5 kV, intenzita pole 40,049 kV/cm



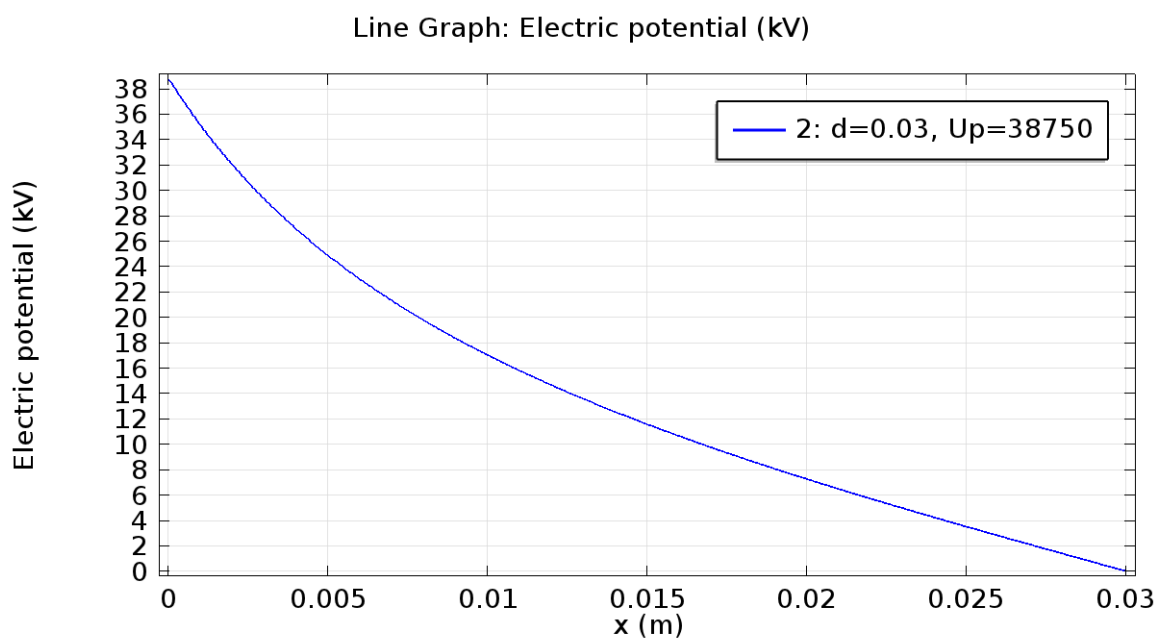
Obr. 0. 27 Polokoule - Rozložení elektrického potenciálu, vzdálenost mezi elektrodami 15 mm, přeskové napětí 29,5 kV, intenzita pole 40,049 kV/cm



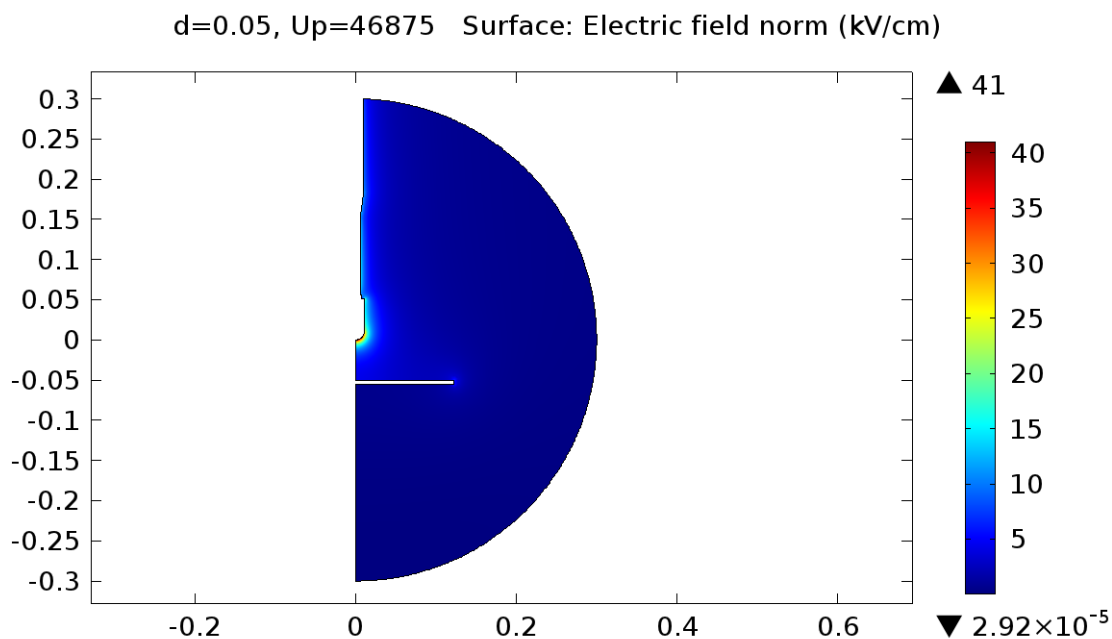
Obr. 0. 28 Polokoule - Rozložení intenzity elektrického pole, vzdálenost mezi elektrodami 30 mm, přeskové napětí 38,75 kV, intenzita pole 39,876 kV/cm



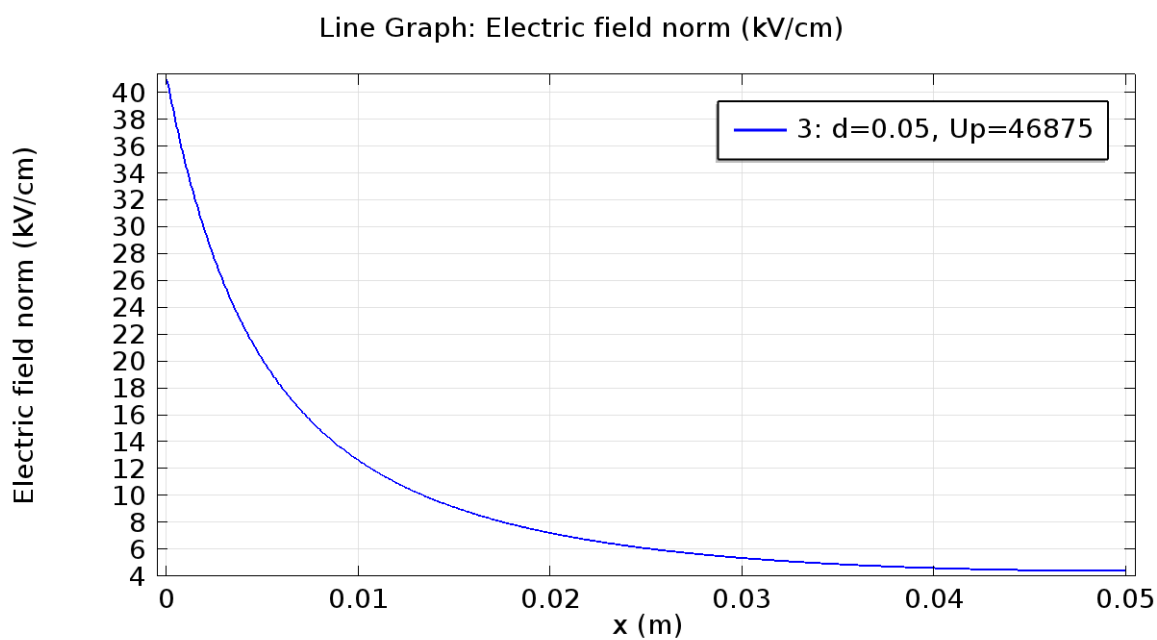
Obr. 0. 29 Polokoule - Průběh intenzity elektrického pole, vzdálenost mezi elektrodami 30 mm, přeskové napětí 38,75 kV, intenzita pole 39,876 kV/cm



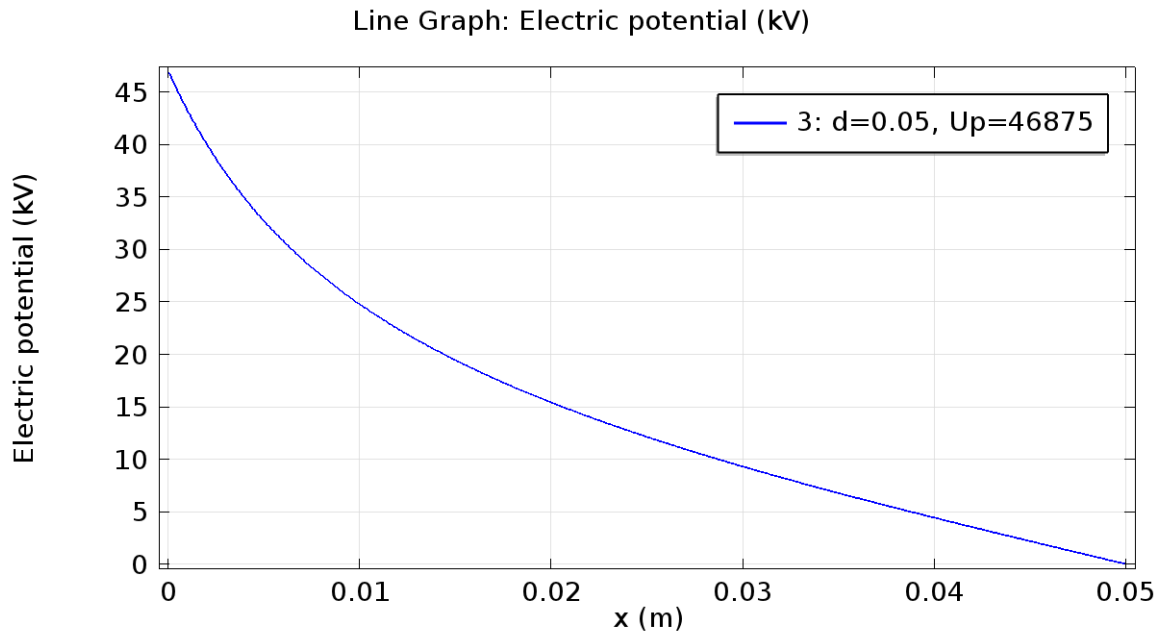
Obr. 0. 30 Polokoule - Rozložení elektrického potenciálu, vzdálenost mezi elektrodami 30 mm, přeskové napětí 38,75 kV, intenzita pole 39,876 kV/cm



Obr. 0. 31 Polokoule - Rozložení intenzity elektrického pole, vzdálenost mezi elektrodami 50 mm, přeskové napětí 46,875 kV, intenzita pole 40,97 kV/cm

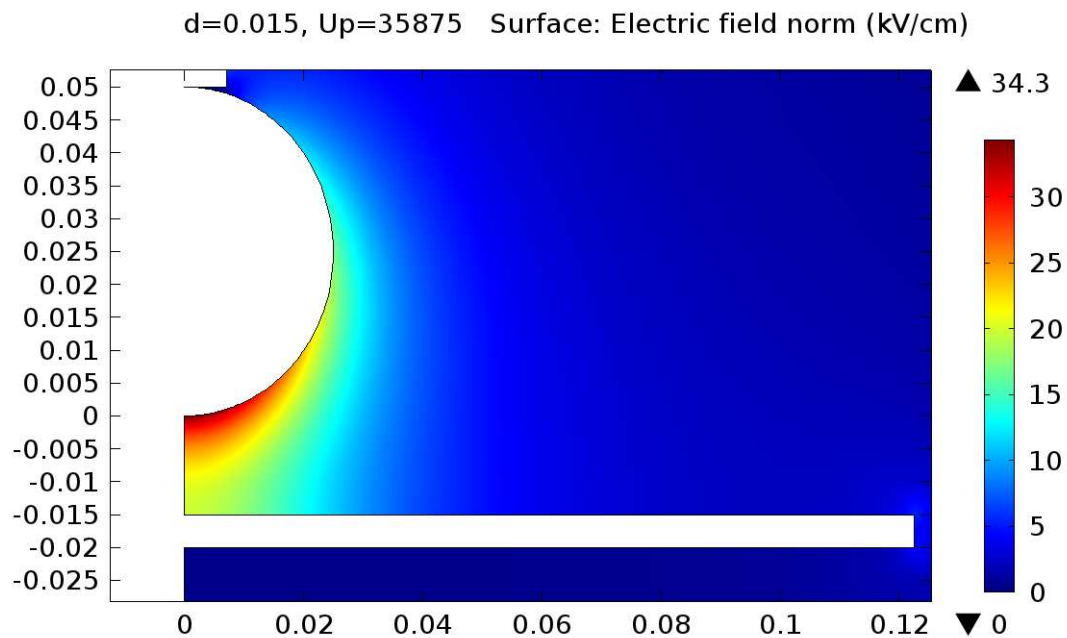


Obr. 0. 32 Polokoule - Průběh intenzity elektrického pole, vzdálenost mezi elektrodami 50 mm, přeskové napětí 46,875 kV, intenzita pole 40,97 kV/cm

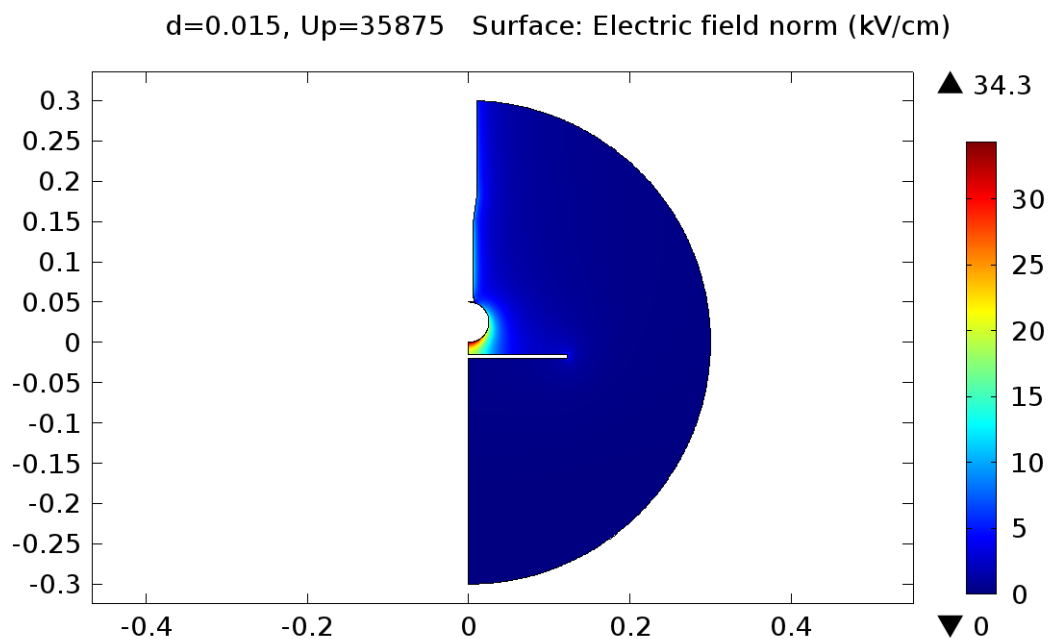


Obr. 0. 33 Polokoule - Rozložení elektrického potenciálu, vzdálenost mezi elektrodami 50 mm, přeskové napětí 46,875 kV, intenzita pole 40,97 kV/cm

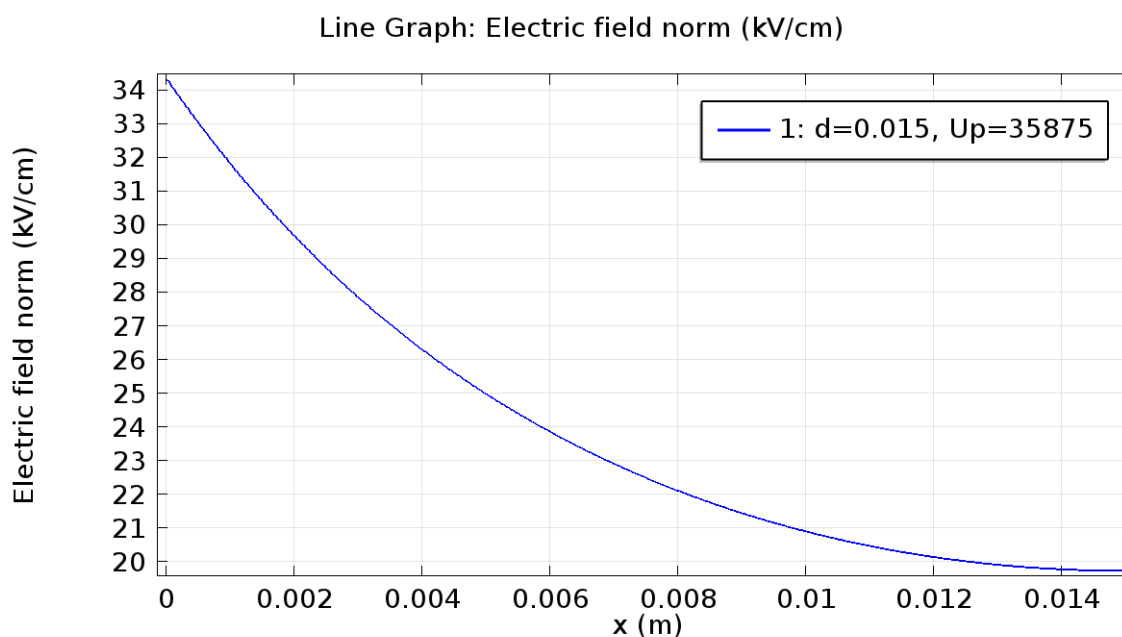
Koule



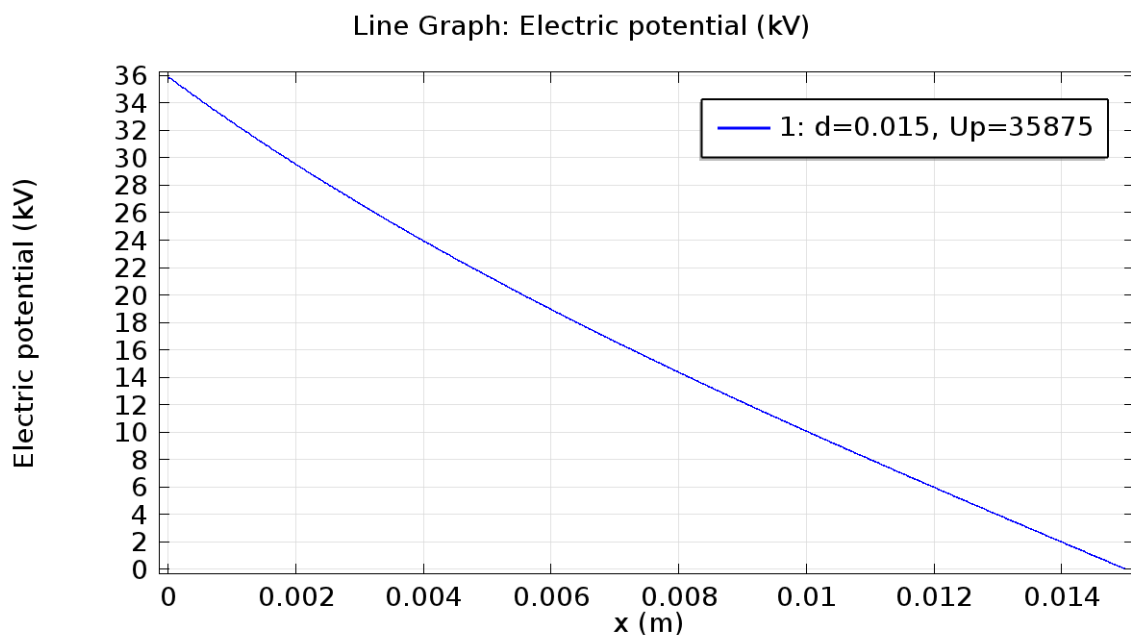
Obr. 0. 34 Detail kulového hrotu - Rozložení intenzity elektrického pole, vzdálenost mezi elektrodami 15 mm, přeskové napětí 35,875 kV, intenzita pole 34,315 kV/cm



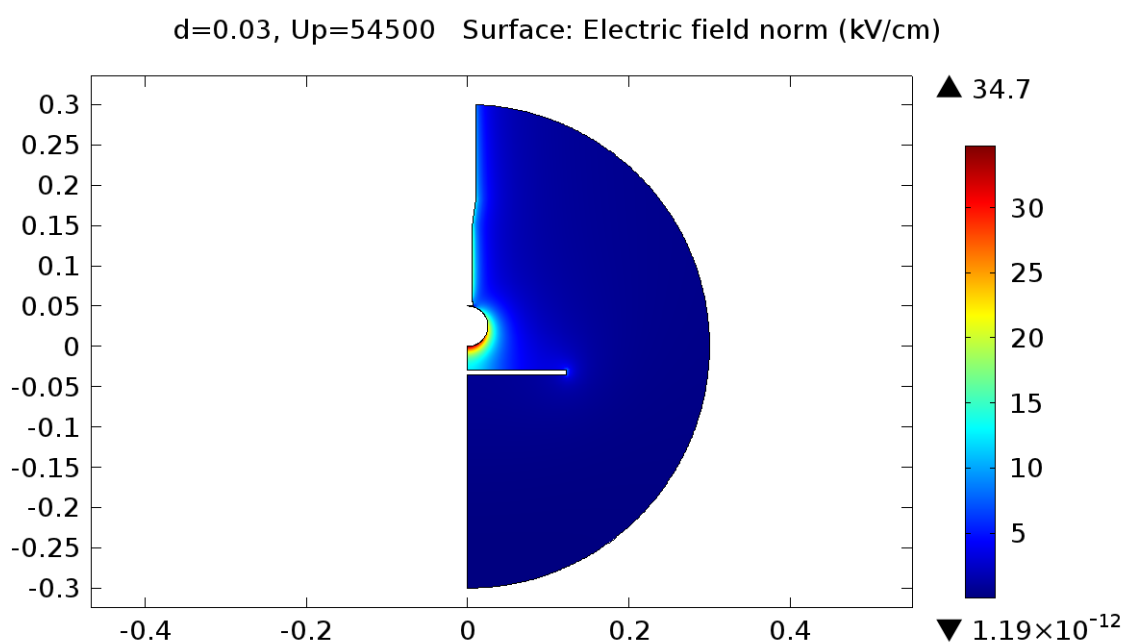
Obr. 0. 35 Koule - Rozložení intenzity elektrického pole, vzdálenost mezi elektrodami 15 mm, přeskové napětí 35,875 kV, intenzita pole 34,315 kV/cm



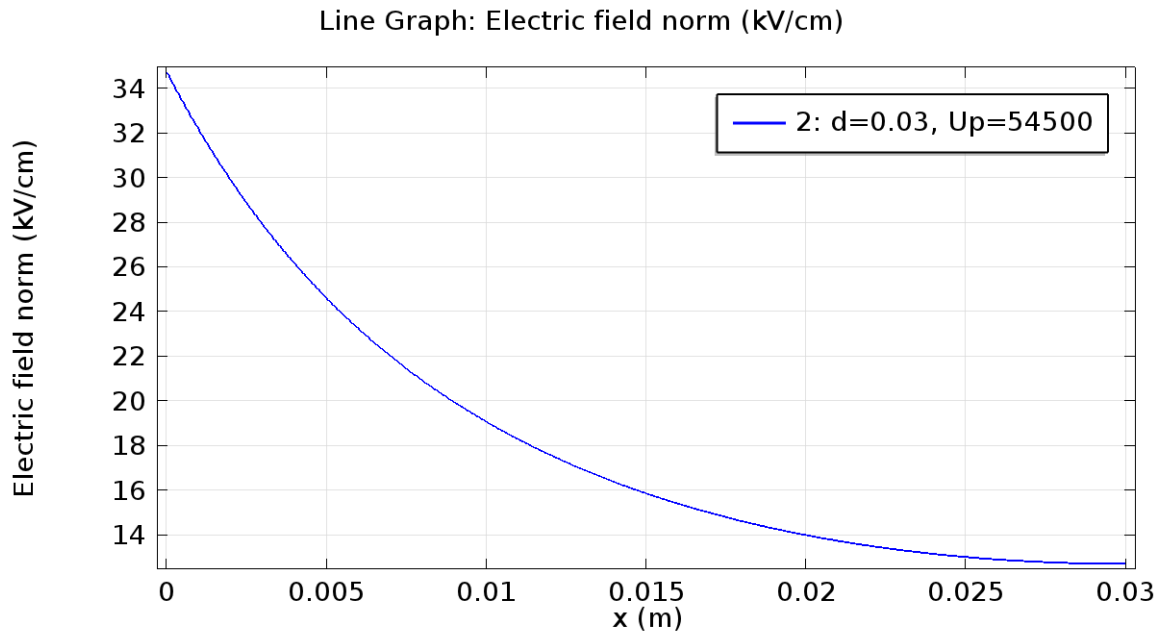
Obr. 0. 36 Koule - Průběh intenzity elektrického pole, vzdálenost mezi elektrodami 15 mm, přeskové napětí 35,875 kV, intenzita pole 34,315 kV/cm



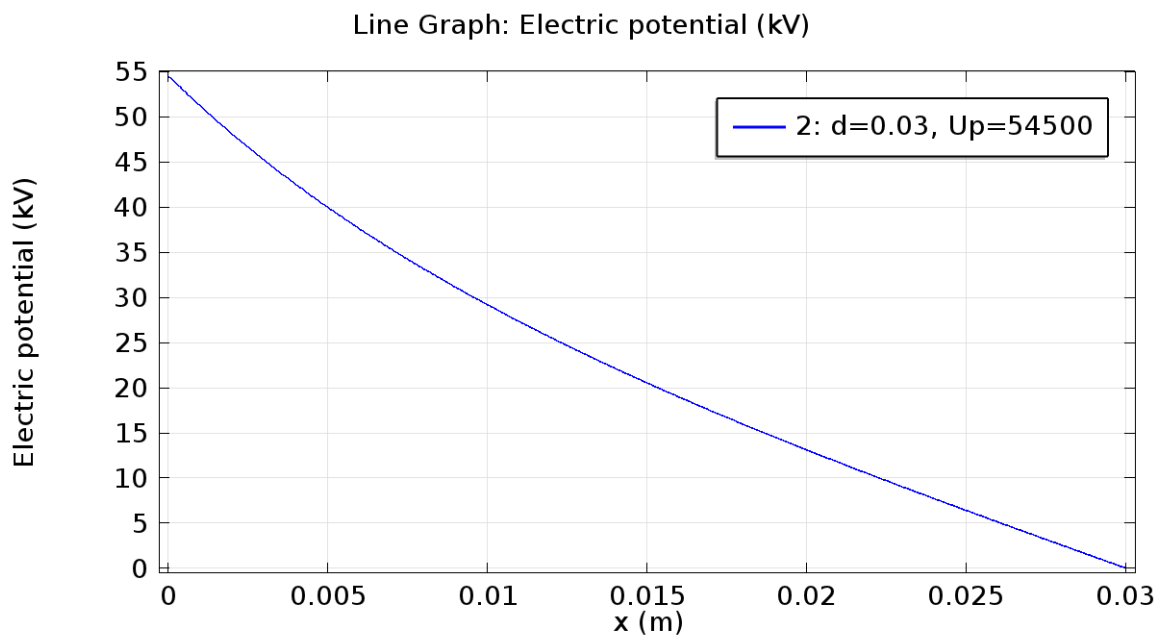
Obr. 0. 37 Koule - Rozložení elektrického potenciálu, vzdálenost mezi elektrodami 15 mm, přeskové napětí 35,875 kV, intenzita pole 34,315 kV/cm



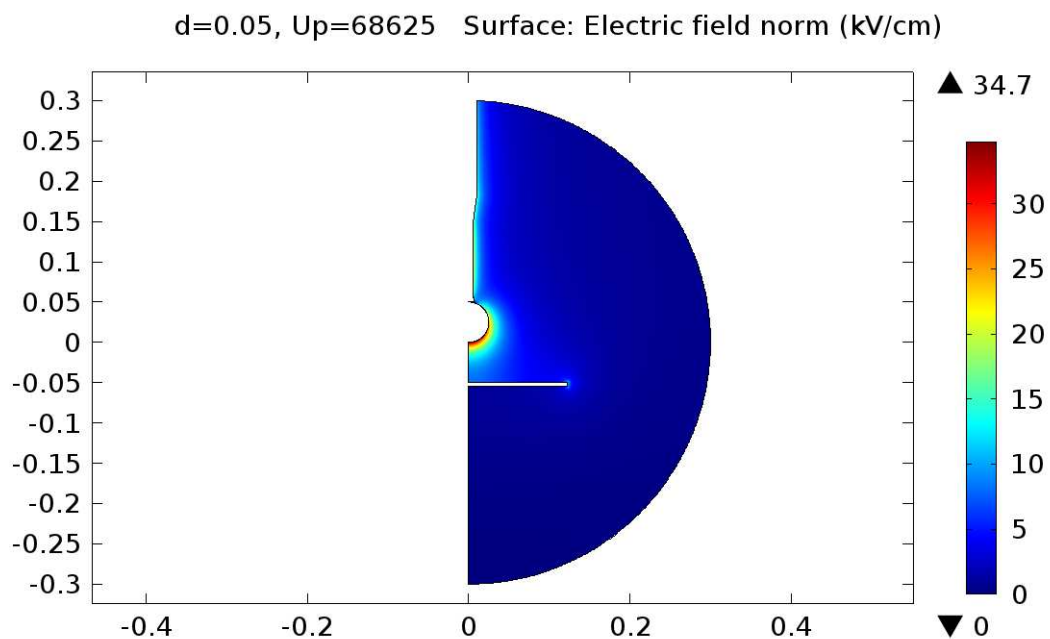
Obr. 0. 38 Koule - Rozložení intenzity elektrického pole, vzdálenost mezi elektrodami 30 mm, přeskové napětí 54,5 kV, intenzita pole 34,713 kV/cm



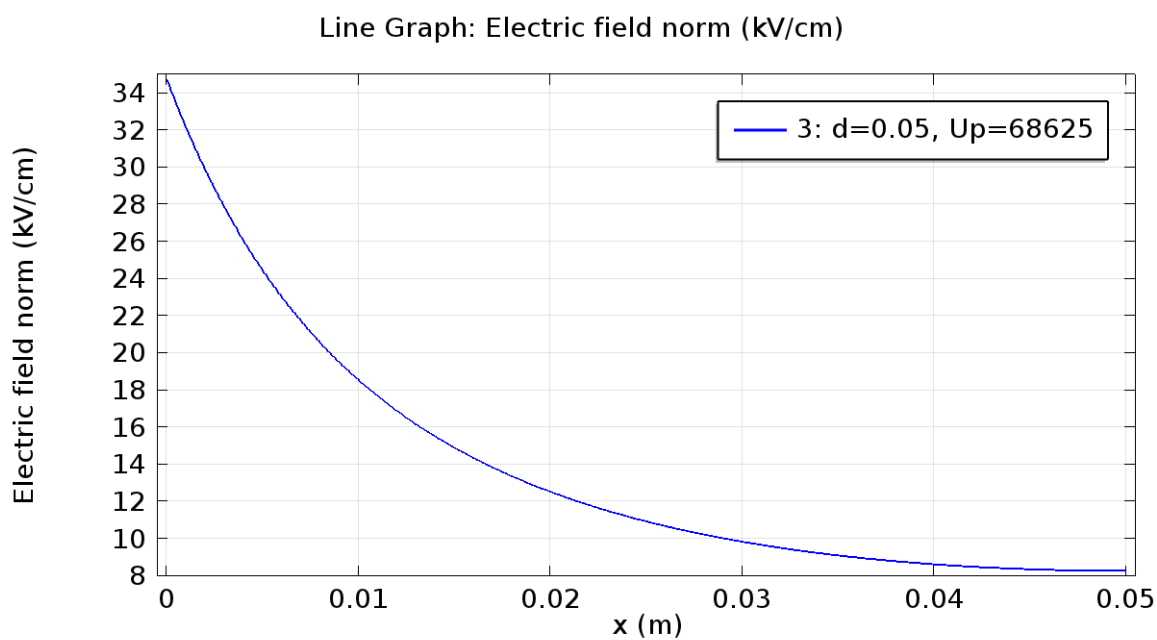
Obr. 0. 39 Koule - Průběh intenzity elektrického pole, vzdálenost mezi elektrodami 30 mm, přeskové napětí 54,5 kV, intenzita pole 34,713 kV/cm



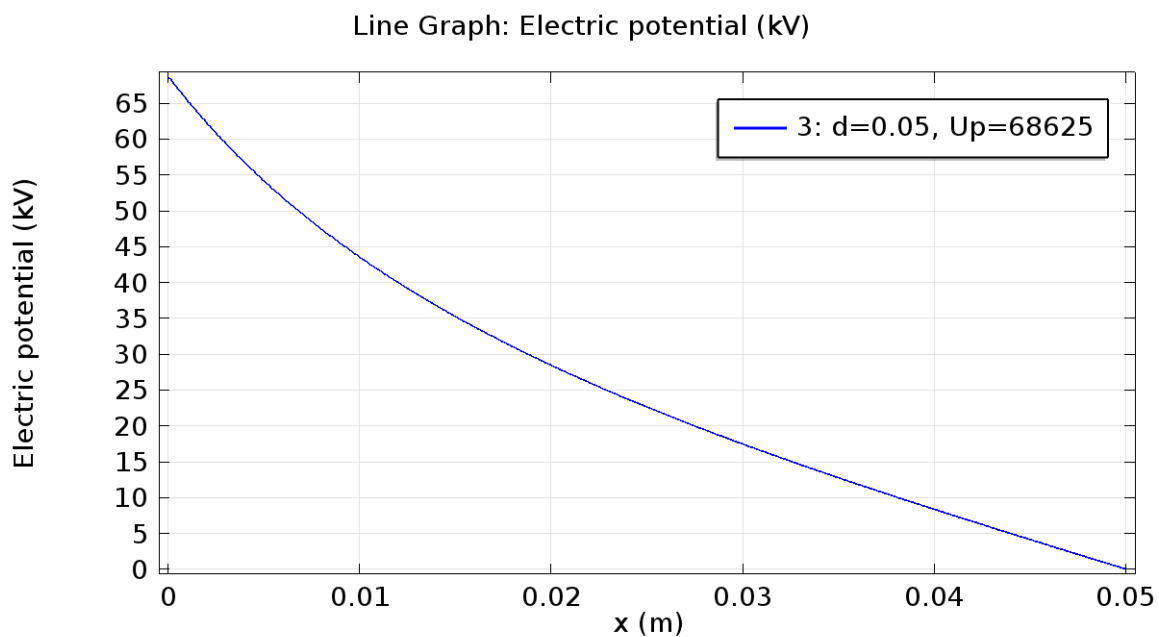
Obr. 0. 40 Koule - Rozložení elektrického potenciálu, vzdálenost mezi elektrodami 30 mm, přeskové napětí 54,5 kV, intenzita pole 34,713 kV/cm



Obr. 0. 41 Koule - Rozložení intenzity elektrického pole, vzdálenost mezi elektrodami 50 mm, přeskové napětí 68,625 kV, intenzita pole 34,72 kV/cm

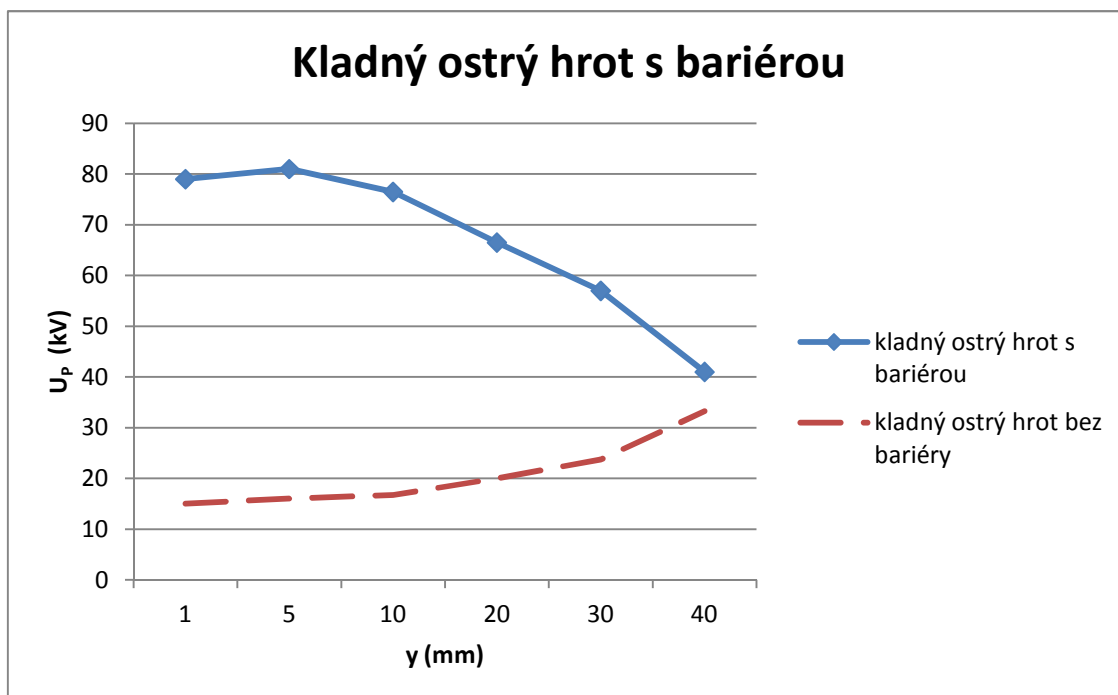


Obr. 0. 42 Koule - Průběh intenzity elektrického pole, vzdálenost mezi elektrodami 50 mm, přeskové napětí 68,625 kV, intenzita pole 34,72 kV/cm

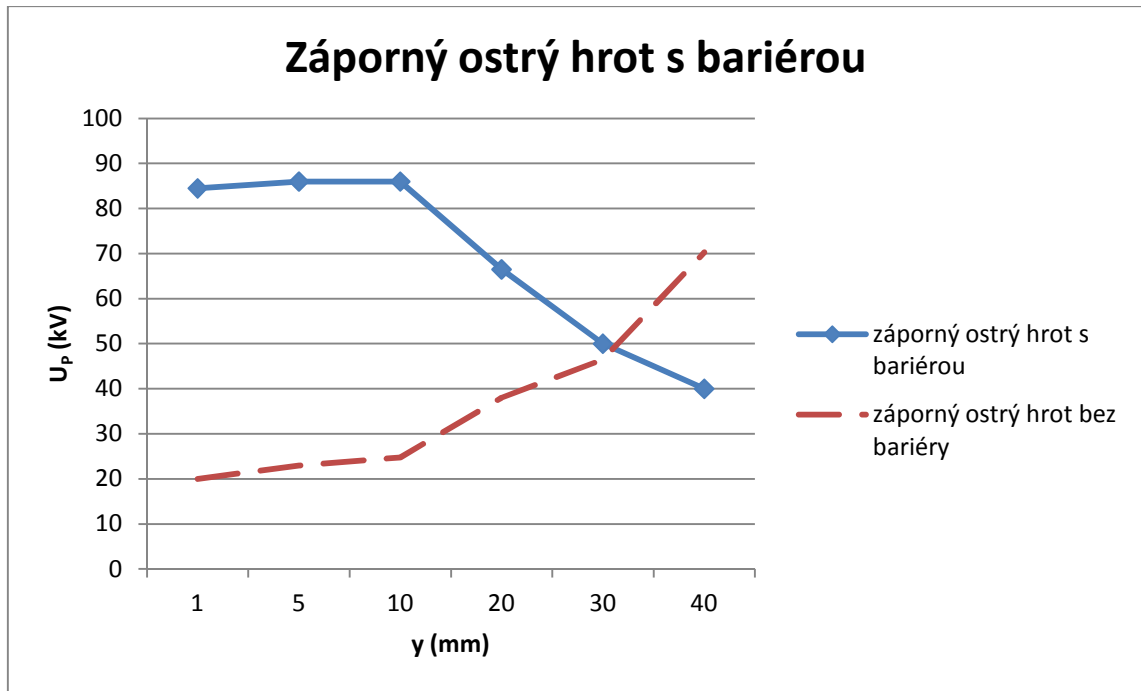


Obr. 0. 43 Koule - Rozložení elektrického potenciálu, vzdálenost mezi elektrodami 50 mm, přeskokové napětí 68,625 kV, intenzita pole 34,72 kV/cm

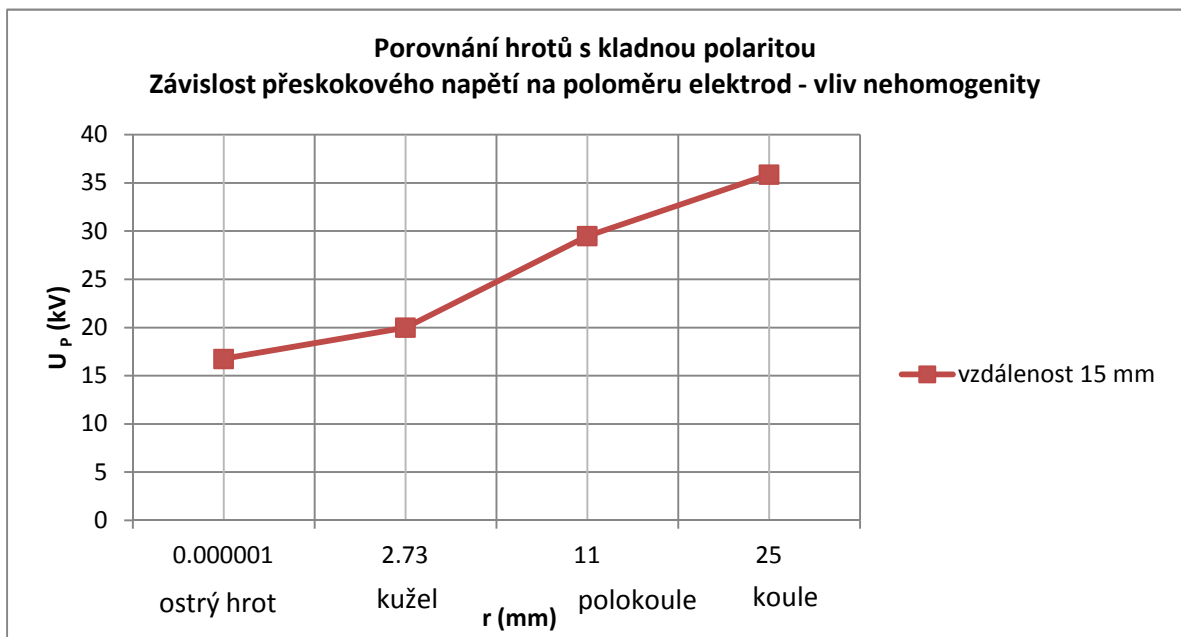
Příloha B - grafy



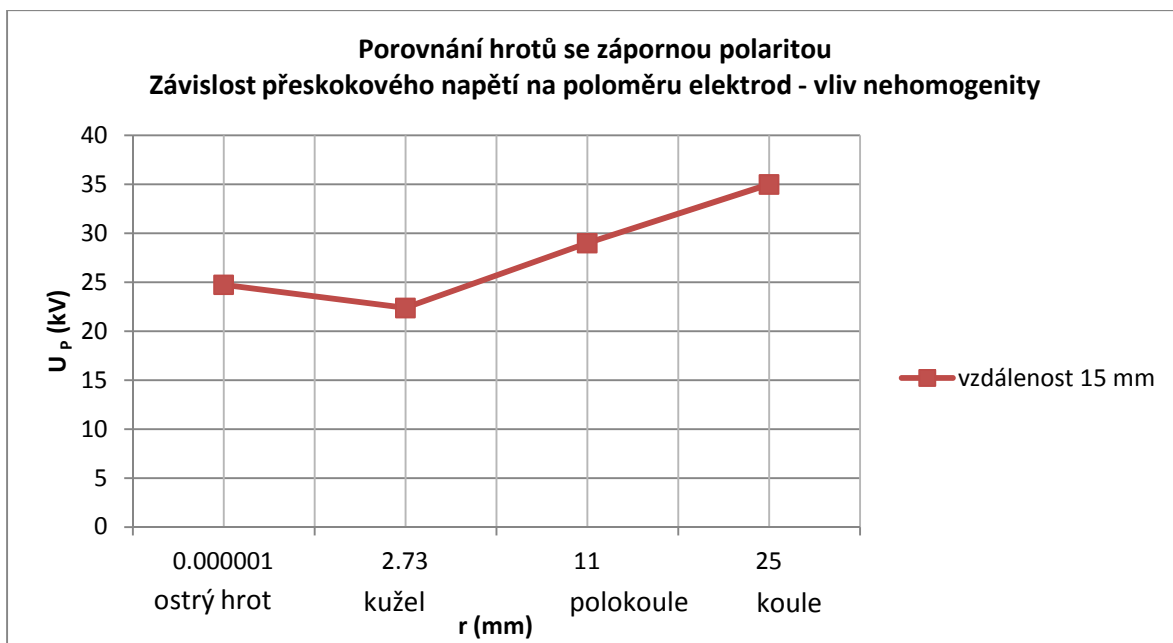
Obr. 0. 44 Kladný ostrý hrot - s vloženou nevodivou bariérou a bez ní



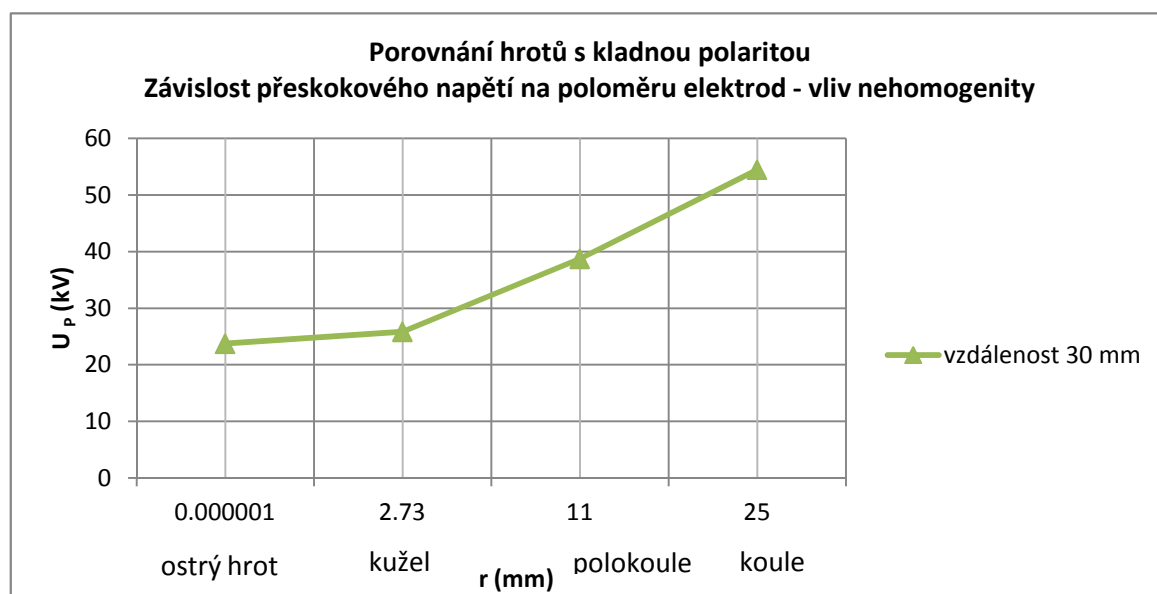
Obr. 0. 45 Záporný ostrý hrot - s vloženou nevodivou bariérou a bez ní



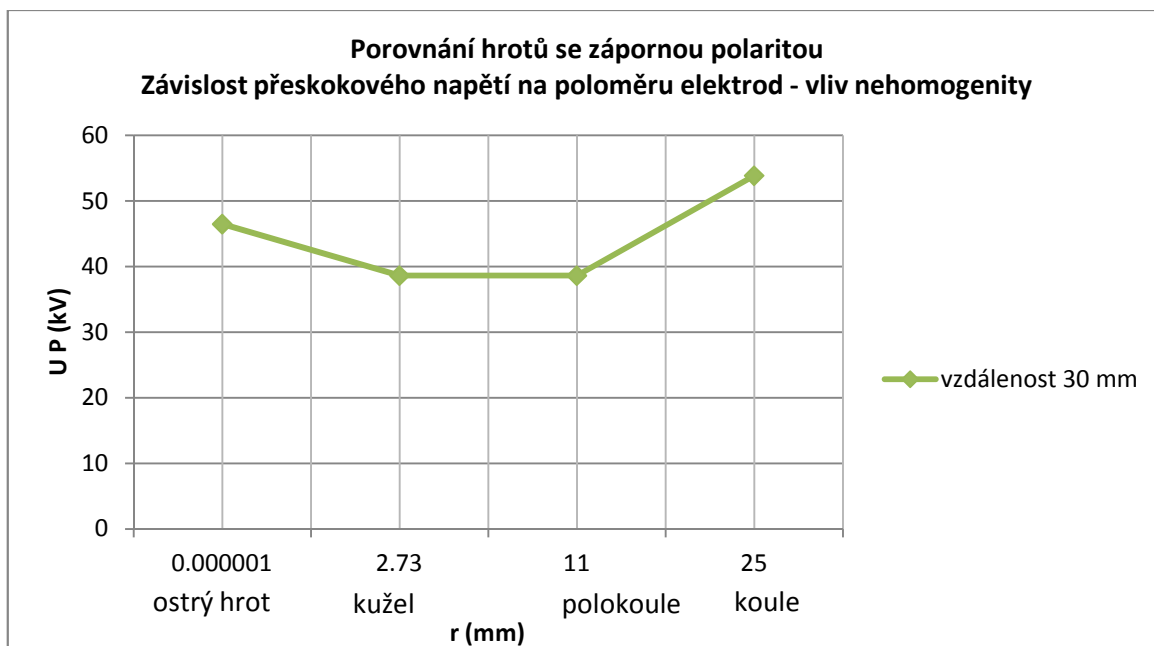
Obr. 0. 46 Porovnání hrotů s kladnou polaritou, závislost přeskovového napětí na poloměru elektrod - vliv nehomogenity, doskovová vzdálenost 15 mm



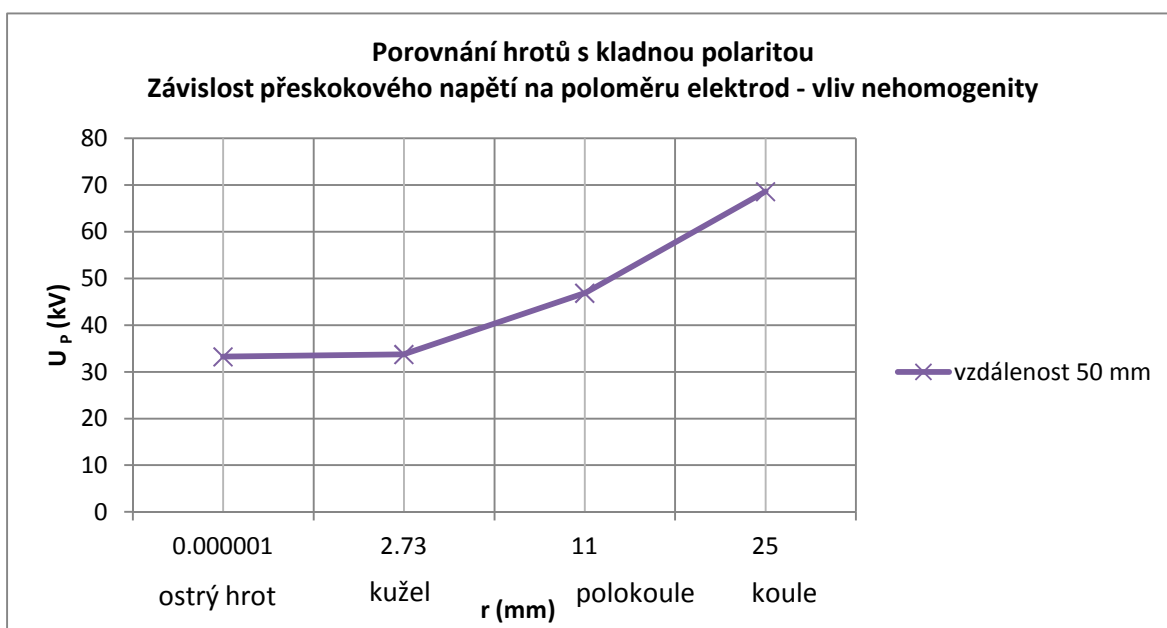
Obr. 0. 47 Porovnání hrotů se zápornou polaritou, závislost přeskovového napětí na poloměru elektrod - vliv nehomogenity, doskovová vzdálenost 15 mm



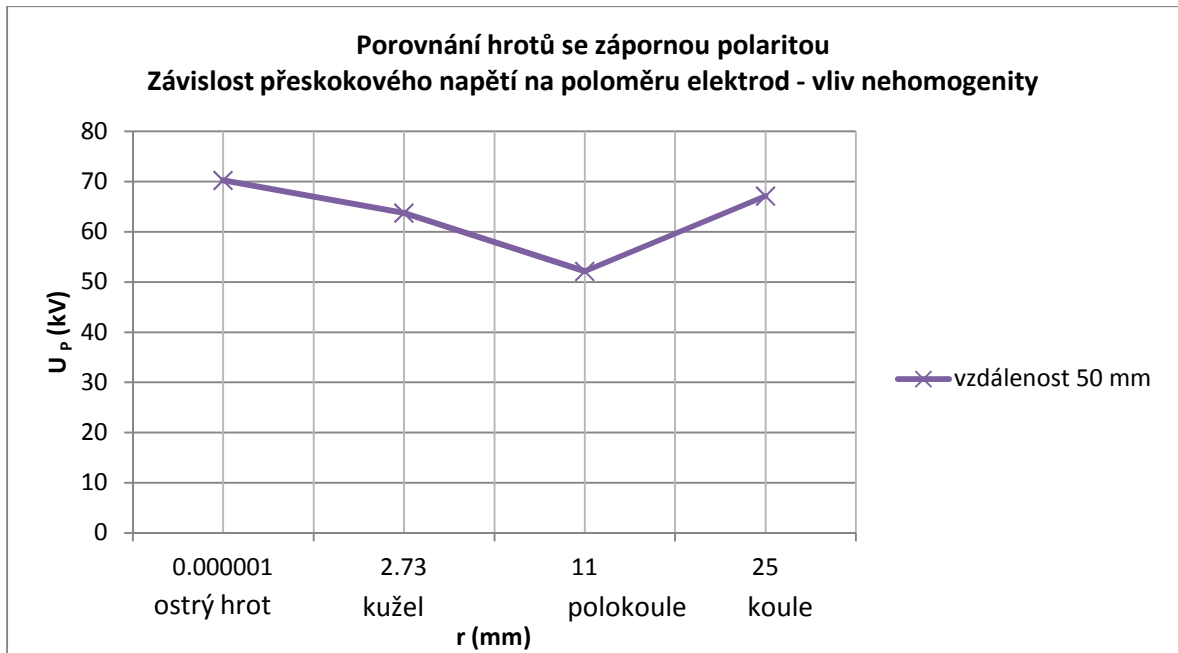
Obr. 0. 48 Porovnání hrotů s kladnou polaritou, závislost přeskovového napětí na poloměru elektrod - vliv nehomogenity, doskovová vzdálenost 30 mm



Obr. 0. 49 Porovnání hrotů se zápornou polaritou, závislost přeskovového napětí na poloměru elektrod - vliv nehomogenity, dosková vzdálenost 30 mm



Obr. 0. 50 Porovnání hrotů s kladnou polaritou, závislost přeskovového napětí na poloměru elektrod - vliv nehomogenity, dosková vzdálenost 50 mm

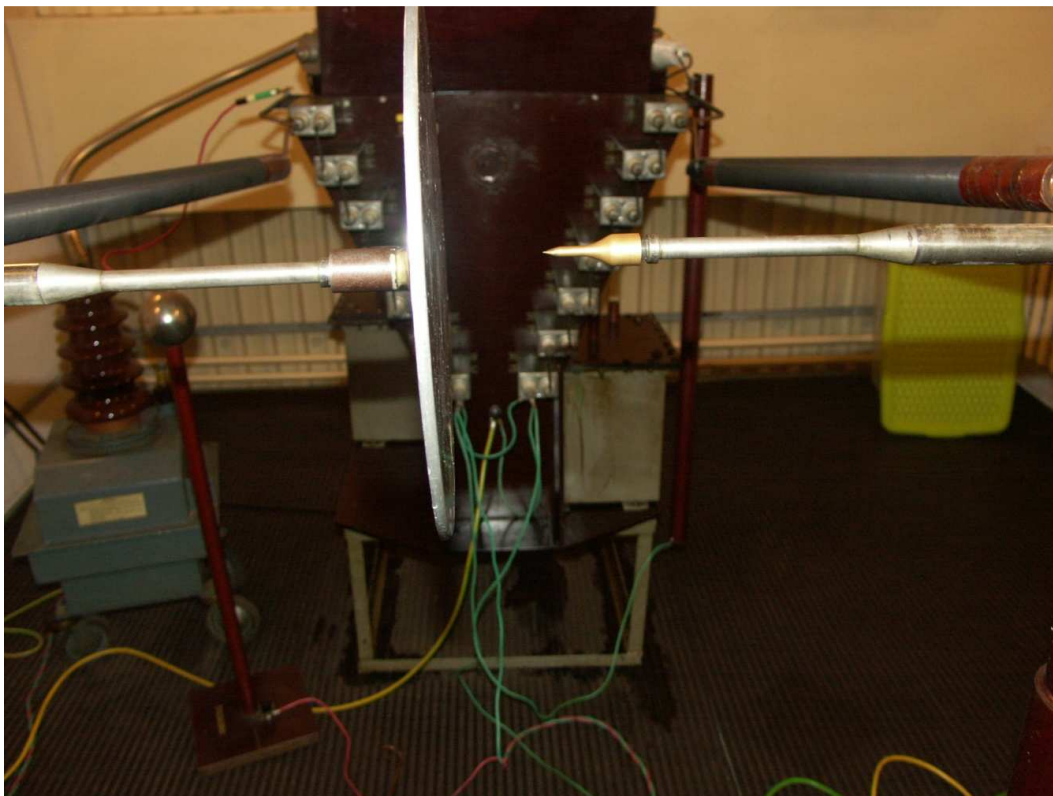


Obr. 0. 51 Porovnání hrotů se zápornou polaritou, závislost přeskovového napětí na poloměru elektrod - vliv nehomogenity, doskoková vzdálenost 50 mm

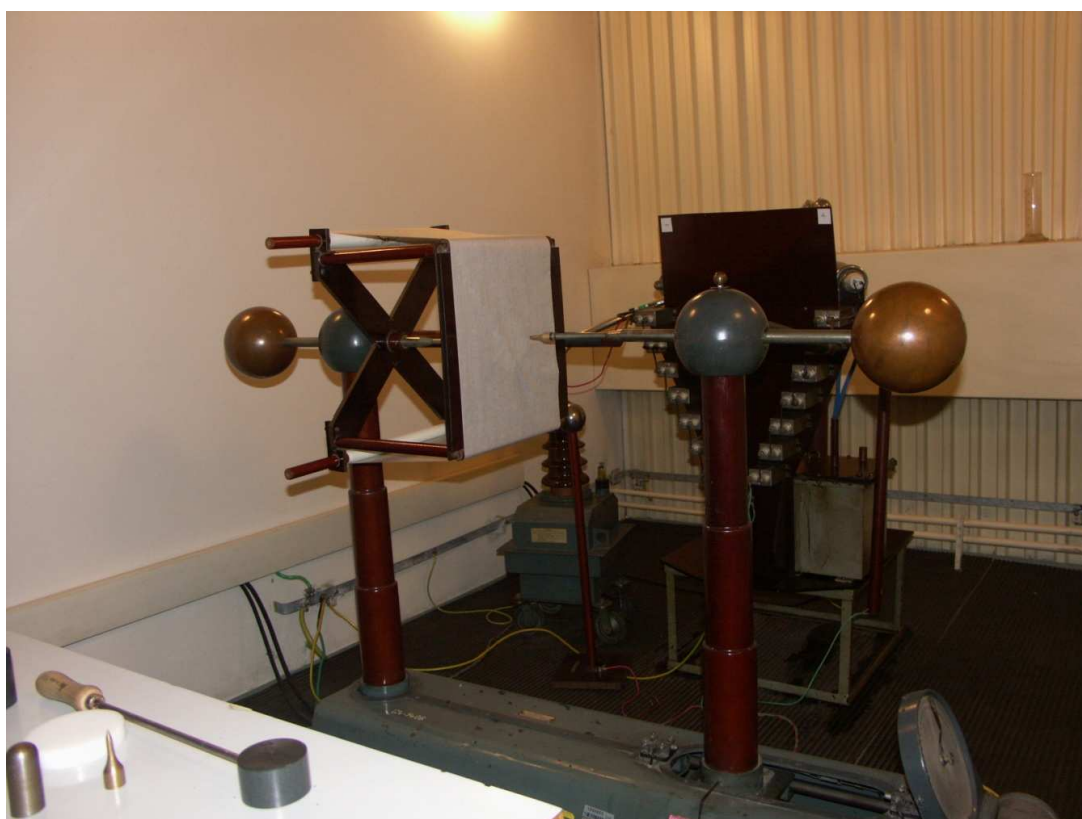
Příloha C - fotodokumentace



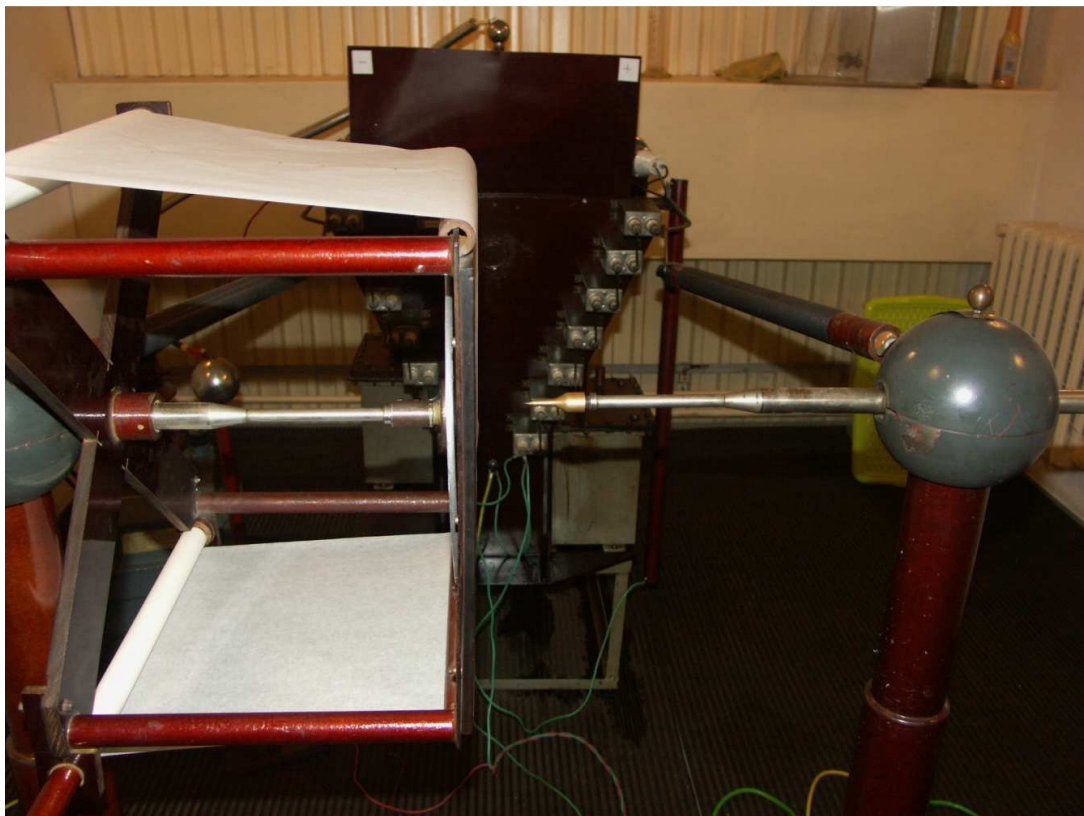
Obr. 0. 52 Uspořádání koule - koule



Obr. 0. 53 Uspořádání deska - ostrý hrot



Obr. 0. 54 Uspořádání deska - ostrý hrot s vloženou nevodivou bariérou



Obr. 0. 55 Detail uspořádání deska - ostrý hrot s vloženou nevodivou bariérou