



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

# NÁVRH ULOŽENÍ VYSOKONAPĚŤOVÝCH ELEKTROD PROJEKČNÍ SESTAVY ELEKTRONOVÉHO MIKROSKOPU NA IZOLAČNÍ TYČE

DESIGN OF PLACING HIGH VOLTAGE ELECTRODES OF THE PROJECTION SET OF ELECTRON MICROSCOPE  
ON INSULATING RODS

## DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Ondřej Pavlas

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Edita Hejátková

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Mikroelektronika**

Ústav mikroelektroniky

**Student:** Bc. Ondřej Pavlas

**ID:** 174233

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2019/20

## NÁZEV TÉMATU:

### Návrh uložení vysokonapěťových elektrod projekční sestavy elektronového mikroskopu na izolační tyče

#### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhnete optimální konfigurace vysokonapěťového izolátoru mezi dvěma rotačně symetrickými kovovými díly. Součástí řešení je i návrh optimálního zakončení kovových dílů a jejich přechod na izolátor. Dalšími parametry jsou tvar izolátoru a jeho povrch. Výchozí průměr je 4mm a napětí 20 a 40kV. Izolátor je umístěn ve vakuu alternativně na vzduchu. Povrchy izolátoru jsou variantně "lazura", broušení s výsledným povrchem s  $R_a=0,4\mu\text{m}$  a  $R_a=0,8\mu\text{m}$ . Návrh musí být podpořen simulací ve vhodném MKP programu a rešerší informací z dostupných zdrojů. Cílem je stanovit minimální nezbytnou izolační vzdálenost pro uvedené podmínky. Návrh je cílen do prostoru s tlakem běžným pro vnitřní prostory mikroskopů. Cílem je navrhnout ideální odizolování elektrod. Součástí práce bude i reálný test a měření. Pokud to nebude z časových důvodů možné lze reálné měření provést na zjednodušeném modelu."

#### DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

**Termín zadání:** 3.2.2020

**Termín odevzdání:** 7.8.2020

**Vedoucí práce:** Ing. Edita Hejátková

**Konzultant:** Ing. Tomáš Bejdák, Delong Instruments a.s.

**doc. Ing. Lukáš Fucík, Ph.D.**  
předseda oborové rady

#### UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Vysoké učení technické v Brně / Technická 3058/10 / 616 00 / Brno

## **ABSTRAKT**

Předkládaná diplomová práce se ve své první části zaměřuje na problematiku dějů, které probíhají v dielektrických materiálech a na jevy na povrchu reálného izolátorů umístěného v elektrickém poli. Na tuto rešerši navazuje výběr a posouzení vhodných keramických materiálů pro samotný návrh sestavy kov – keramika. Největší důraz je kladen na návrh optimální konfigurace izolátoru a elektrod, který je podpořen simulacemi z programu s metodou konečných prvků. Nakonec jsou provedeny vysokonapěťové testy vyrobené sestavy pro měření svodových proudů výrobkem.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

dielektrikum, elektrotechnická keramika, vysoké napětí, elektrická pevnost, izolační vzdálenost, svodový proud

## **ABSTRACT**

In it's first part, this presented master's thesis focuses on the problematics of actions taking place in dielectric materials and phenomenons on the surface of real insulators placed in electric field. This research is followed by selection and rating of appropriate ceramic materials for the actual design of the metal – ceramic assembly. The greatest emphasis is given to design of the optimal configuration of the insulator and electrode, which is supported by simulations from the software that implements finite element method. Eventually, the high voltage tests of the assembly used for measuring leakage currents are performed.

## **KEYWORDS**

dielectric, electrotechnical ceramics, high voltage, dielectric strength, insulation distance, leakage current

PAVLAS, O. *Návrh uložení vysokonapěťových elektrod projekční sestavy elektronového mikroskopu na izolační tyče*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav mikroelektroniky, 2020. 68 s., Diplomová práce. Vedoucí práce: Ing. Edita Hejátková

# Prohlášení autora o původnosti díla

**Jméno a příjmení studenta:** *Ondřej Pavlas*

**VUT ID studenta:** *174 233*

**Typ práce:** *Diplomová práce*

**Akademický rok:** *2019/20*

**Téma závěrečné práce:** *Návrh uložení vysokonapěťových elektrod  
projekční sestavy elektronového mikroskopu  
na izolační tyče*

*Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.*

*Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.*

V Brně dne: **7. srpna 2020**

.....  
Podpis autora

# OBSAH

<b>1 Dielektrika</b>	<b>2</b>
1.1 Pojmy dielektrikum a izolant .....	2
1.2 Pásový model vodivosti izolantů .....	3
<b>2 Fyzikální děje v izolantech</b>	<b>5</b>
2.1 Dielektrická polarizace .....	5
2.1.1 Klasifikace polarizačních mechanismů .....	5
2.2 Elektrická vodivost tuhých izolantů .....	9
2.2.1 Vnitřní elektrická vodivost tuhých izolantů.....	10
2.2.2 Povrchová elektrická vodivost tuhých izolantů .....	11
2.3 Dielektrické ztráty .....	13
2.3.1 Ztráty v dielektriku .....	13
2.4 Ztrátový činitel.....	14
2.5 Elektrická pevnost.....	16
2.6 Průraz izolantu .....	17
2.6.1 Tepelný průraz .....	18
2.6.2 Čistě elektrický průraz .....	18
2.6.3 Elektrochemický průraz – stárnutí izolantů .....	20
<b>3 Tepelné vlastnosti izolantů a dielektrik</b>	<b>21</b>
3.1 Tepelné namáhání a stárnutí izolantu. ....	21
<b>4 Povrchy izolantů</b>	<b>23</b>
4.1 Vliv vlhkosti na elektrické vlastnosti izolantu.....	23
4.2 Navlhavost .....	24
4.2.1 Vodní kapka na povrchu izolátoru.....	25
<b>5 Keramické materiály</b>	<b>26</b>
5.1 Vybrané vlastnosti keramiky .....	27
5.2 Mechanické vlastnosti keramiky .....	28
5.2.1 Pevnost.....	28
5.2.2 Pružnost .....	28
5.2.3 Tvrdost.....	28
5.3 Tepelné vlastnosti keramiky .....	29

5.3.1	Tepelná odolnost.....	29
5.3.2	Teplotní roztažnost .....	29
5.3.3	Měrné teplo .....	29
5.3.4	Tepelná vodivost.....	30
5.4	Elektrické vlastnosti keramiky.....	30
5.5	Konstrukční keramika.....	30
5.5.1	Oxidová konstrukční keramika.....	31
5.5.2	Korundová keramika na bázi $Al_2O_3$ .....	31
5.5.3	Keramika na bázi $ZrO_2$ .....	32
<b>6</b>	<b>Výběr materiálu pro návrh</b>	<b>33</b>
6.1	Vliv příměsí $Al_2O_3$ na její vlastnosti.....	33
6.1.1	Ceramtec .....	33
6.1.2	CSceramic .....	35
6.2	Porovnání různých 99,5% $Al_2O_3$ .....	35
6.3	Zirkoniová keramika $ZrO_2$ .....	37
<b>7</b>	<b>Návrh geometrie sestavy</b>	<b>38</b>
7.1	Geometrické parametry elektrody .....	40
7.1.1	Minimální vzdálenost mezi elektrodami.....	40
7.1.2	Vzdálenost mezi lektroou a izolátorem .....	41
7.1.3	Velikost poloměru vnitřní hrany elektrody.....	41
7.2	Kosená hrana.....	42
7.3	Pravoúhlé zahloubení.....	47
7.3.1	Hrany pravoúhlého zahloubení elektrody.....	48
7.3.2	Kontakt vodič - izolátor .....	50
7.3.3	Nejlepší model .....	52
<b>8</b>	<b>Napětové testy</b>	<b>56</b>
8.1	Sestava ve vakuu.....	57
8.2	Sestava ve vzduchu .....	60
<b>9</b>	<b>Závěr</b>	<b>62</b>
	<b>Seznam symbolů, veličin a zkratek</b>	<b>65</b>
	<b>Seznam obrázků</b>	<b>66</b>



# ÚVOD

Zažíváme dobu stále rychlejšího technologického progresu. S neustále výkonnějšími, výpočetně rychlejšími a přesnějšími aplikacemi elektrotechniky přicházejí pochopitelně stále se navyšující požadavky na preciznost návrhu, výběr materiálů a technologii výroby.

Poruchy a závady způsobené nedokonalostmi návrhu vedou v nejlepším případě ke značným finančním ztrátám, které jsou o to větší, čím náročnější daná aplikace je. Proto je bezchybná funkce produktů vždy na prvním místě. Velkou pozornost při návrhu sestavy vysokonapěťových elektrických zařízení je třeba věnovat jeho izolační a vodivé části stejně tak jako jevům, kterými se tyto části vzájemně ovlivňují.

Předkládaná diplomová práce si klade za cíl realizaci vhodné a spolehlivé konfigurace přechodu mezi vysokonapěťovým izolátorem a vodivými díly. Pro dobrou spolehlivost a životnost elektronického přístroje pracujícího s napětím několika desítek kilovoltů, je nejdříve nutné vybrat vhodný materiál izolátoru s požadovanými elektrickými, tepelnými nebo mechanickými vlastnostmi.

Dalším krokem k realizaci je návrh tvaru a povrchu vodivých částí navrhnuté sestavy s vyšetřením elektrického namáhání sestavy pro konkrétní modifikace geometrie za pomoci programu disponujícího metodou konečných prvků. Posledním krokem práce je testování vyrobené sestavy pro provoz pod vysokým napětím v prostoru s tlakem běžným pro vnitřní prostory elektronových mikroskopů.

# 1 DIELEKTRIKA

## 1.1 Pojmy dielektrikum a izolant

Dielektrikum je chápáno v souvislosti se schopností elektrickou energii akumulovat, zatímco izolant ve vztahu izolovat dvě odlišné vodivé části s různým potenciálem. Ideální dielektrikum (izolant) obsahuje pouze vázané elektrické náboje, zatímco reálné dielektrikum (izolant) obsahuje, jak vázané, tak i volné elektrické náboje. Přiložením elektrického pole dochází k určitým základním fyzikálním dějům uvnitř dielektrika. K těmto základním fyzikálním dějům patří.

- dielektrická polarizace
- elektrická vodivost
- dielektrické ztráty
- elektrický výboj

Základní elektrické veličiny pro tyto fyzikální jevy jsou:

- relativní permitivita
- vnitřní rezistivita
- povrchová rezistivita
- ztrátový činitel
- elektrická pevnost

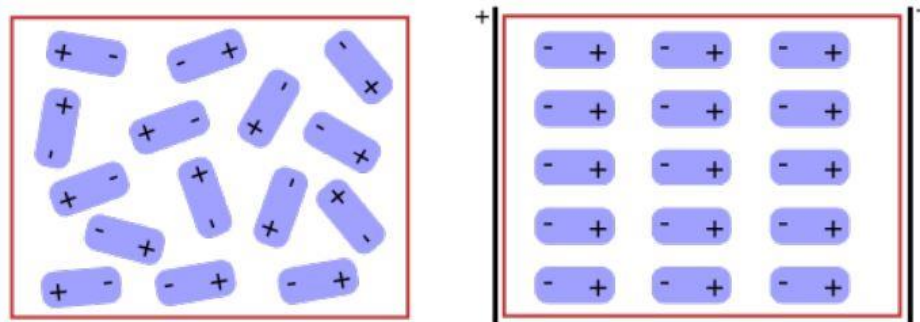
Pojem dielektrikum je tedy používán ve vztahu s polarizovatelností částic a následně se schopností látky akumulovat po přiložení elektrického pole elektrickou energii (např. kondenzátor).

Název izolant je užíván ve vztahu se schopností dané látky vzájemně izolovat vodivé části s různým potenciálem. Každý izolant je současně dielektrikem, avšak ne všechna dielektrika jsou izolanty. K dielektrikům se řadí i čtené látky s vlastnostmi polovodičů (Ge, Si).

Vlastnosti dielektrik závisí na chemickém stavu, složení, skupenství a struktuře. Jsou složena z atomů, molekul a iontů. Molekuly jsou v tomto případě klasifikovány podle způsobu uspořádání vázaných nábojů, a to na molekuly nepolární (neutrální) a polární (dipólové).

### **Molekuly neutrální (nepolární)**

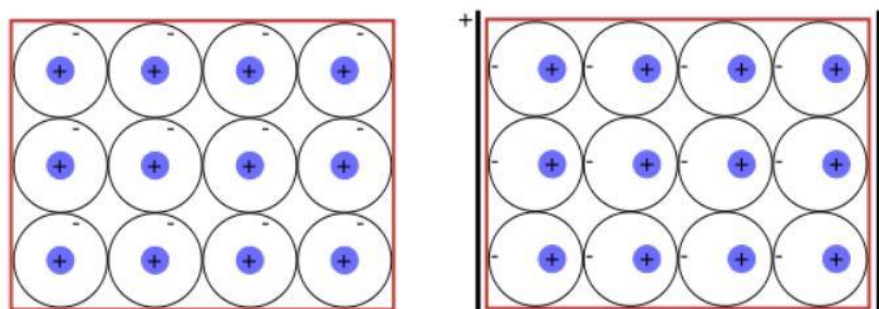
Jejich stavba je zcela symetrická, vázané elektrické náboje jsou rozloženy souměrně a jejich těžiště splývají. Pokud je vložíme do blízkosti nenulového elektrického pole, vznikne díky působení toho to pole v jejich molekulách nesymetrie (obr.1.1). Nepolární molekula vytvoří elektrický dipól a nabude indukovaný elektrický moment.



Obrázek 1.1 Schéma nepolárního dielektrika v elektrickém poli

### Molekuly dipólové (polární)

Jejich stavba je nesymetrická; vyznačují se (i v nepřítomnosti elektrického pole) stálým elektrickým momentem. V přítomnosti elektrického pole se dipólové molekuly stáčí do směru pole (obr. 1.2). Tím získají přídavný (indukovaný) dipólový moment, který se vektorově skládá se stálým dipólovým momentem. [1]



Obrázek 1.2 Schéma polárního dielektrika v elektrickém poli

## 1.2 Pásový model vodivosti izolantů

Izolanty jsou látky, které na rozdíl od kovů neobsahují volně pohyblivé elektrony a jiné volné nosiče náboje (např. ionty), a proto nevedou elektrický proud. Skládají se z atomů, molekul nebo iontů, které obsahují elementární částice. Tyto částice s elektrickým nábojem jsou vázány na určitá místa mřížky izolantu, z nichž se nemohou za normálních podmínek působením elektrického pole vzdálit. Proto se může v izolantech udržet elektrické pole.

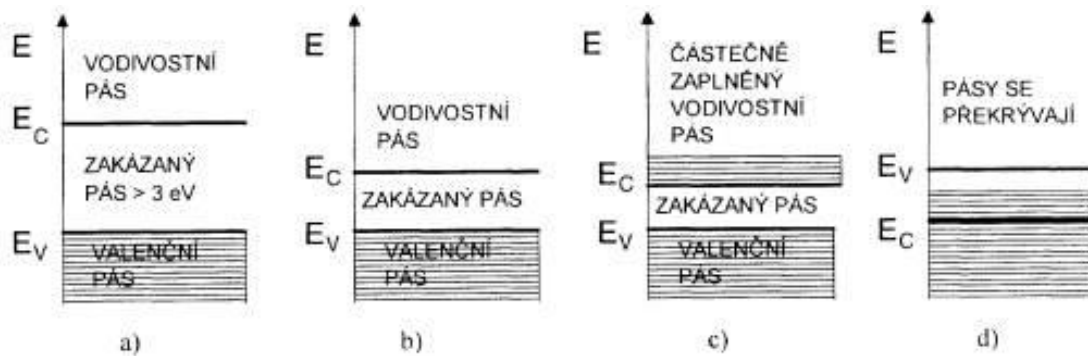
V technické praxi se neseťkáváme s izolanty absolutně nevodivými, tedy ideálními. Ideálním izolantem může být pouze absolutní vakuum, popř. technický izolant v blízkosti teploty 0 K (absolutní nuly). Za normálních podmínek nejsou technické izolanty nikdy dokonalé. Obsahují vždy malé množství kladných nebo záporných iontů

a elektronů, které nejsou vázány v molekule a mohou se působením vnějšího elektrického pole pohybovat.

Ideální izolant je tedy látka absolutně nevodivá, neobsahuje žádné nosiče elektrického náboje, v praxi se nevyskytuje, ale používá se pro zjednodušení výpočtů.

Reálný izolant je pak materiál, kde se vyskytuje malý počet nosičů elektrických nábojů. Když vložíme takovou látku do elektrického pole, vede nepatrný elektrický proud.

V případě izolantů a vlastních polovodičů je poslední pás dovolených energií (valenční pás) zaplněný a od nejbližšího prázdného (vodivostního) pásu oddělený zakázaným oborem energií (obr. 1.3). Tento pás zakázaných energií je široký několik eV, takže při obvyklých intenzitách elektrického pole a při obvyklých teplotách nemohou elektrony z plně obsazeného pásu přeskočit do pásu prázdného. [1]



Obrázek 1.3 Energetické pásy izolantů (a), vlastních polovodičů (b), nevlastních polovodičů (c) a vodičů (d)

## 2 FYZIKÁLNÍ DĚJE V IZOLANTECH

### 2.1 Dielektrická polarizace

Dielektrická polarizace je fyzikální jev, při němž se působením vnějšího i vnitřního elektrického pole přemisťují (posouvají) elektricky vázané náboje dielektrika ze svých rovnovážných poloh do nových na malé omezené vzdálenosti, a obsahuje-li látka dipólové molekuly, natáčejí se (orientují se) tyto molekuly do směru pole. Výjimečně jsou i volné náboje v dielektriku příčinou polarizace. Mírou polarizace v látce je vektor polarizace  $P$  ( $C \cdot m^{-2}$ ) a relativní permitivita  $\epsilon_r$  (-). Polarizovatelnost  $\alpha$  vyjadřuje schopnost polarizace látky; je základní fyzikální vlastností dielektrik. S polarizovatelností souvisí permitivita  $\epsilon_r$ .

Při působení elektrického pole se často v dielektrické látce nevyskytuje pouze jedna polarizace, ale několik druhů polarizačních mechanismů najednou. Slabší mechanismy bývají překryty silnějšími. Zpravidla se rozdělují na jevy s rychlým průběhem (pružné polarizace) a jevy s pomalým průběhem (relaxační polarizace).

#### Pružné polarizace

Vyznačují se extrémně krátkou dobou trvání; proběhnou prakticky okamžitě, pružně a bez ztrát energie. Nejsou závislé na kmitočtu v celém rozsahu kmitočtů používaných v elektrotechnice

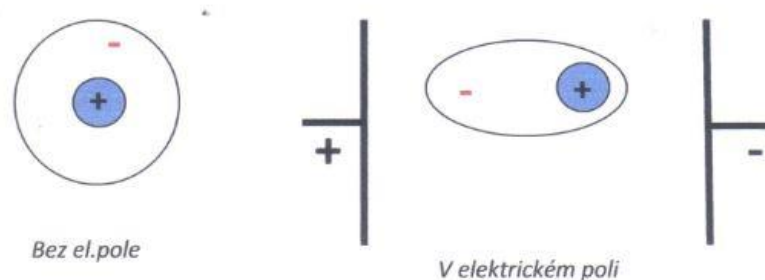
#### Relaxační polarizace

Vyznačují se tím, že po přiložení elektrického pole přibývá polarizace pomalu a obdobně - polarizace pomalu ubývá po odpojení pole. Doby, potřebné k ustálení těchto jevů, jsou relativně dlouhé. Časový průběh jejich doznívání je exponenciální, charakterizovaný časovou konstantou  $\tau$ (s), tzv. relaxační dobou. Pomalé polarizace jsou značně závislé na teplotě. Jsou vždy provázány ztrátami energie v dielektriku, které se tím ohřívá. Relaxační doba je definována dobou, za niž po odstranění elektrického pole poklesne úroveň polarizace v látce na  $1/e$  násobek původní hodnoty. Některé látky (polární dielektrika, např. voda) obsahují elektrické dipóly i bez působení vnějšího elektrického pole. Jejich směr je ale chaotický a při polarizaci dojde pouze k uspořádání dipólů do jednoho směru. Taková polarizace se nazývá orientační polarizace. [1] [2]

### 2.1.1 Klasifikace polarizačních mechanismů

#### Polarizace elektronová

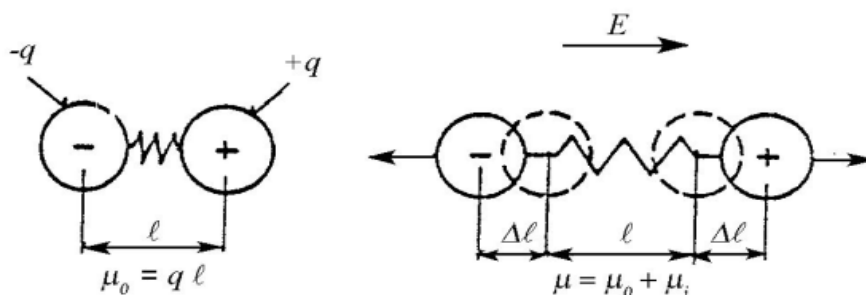
- Vyskytuje se u všech dielektrik.
- Probíhá beze ztrát, nezávisí na teplotě.
- Doba ustavení:  $10^{-16}$  -  $10^{-14}$  s.



Obrázek 2.1 Podstata elektronové polarizace

### Polarizace iontová (pružná)

- Vyskytuje se u iontových krystalů.
- Probíhá beze ztrát, je závislá na teplotě.
- Doba ustavení:  $10^{-13}$  -  $10^{-12}$  s.



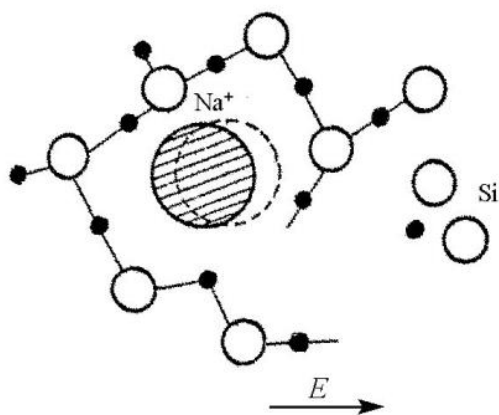
Obrázek 2.2 Podstata iontové polarizace

### Polarizace dipólová

- Vyskytuje se u polárních látek.
- Je provázena ztrátami energie v dielektriku, je závislá na teplotě a na kmitočtu.
- Doba ustavení:  $10^{-12}$  -  $10^{-8}$  s u látek nízkomolekulárních; u makromolekulárních látek a mnoho řádů vyšší.

### Polarizace iontová-relaxační

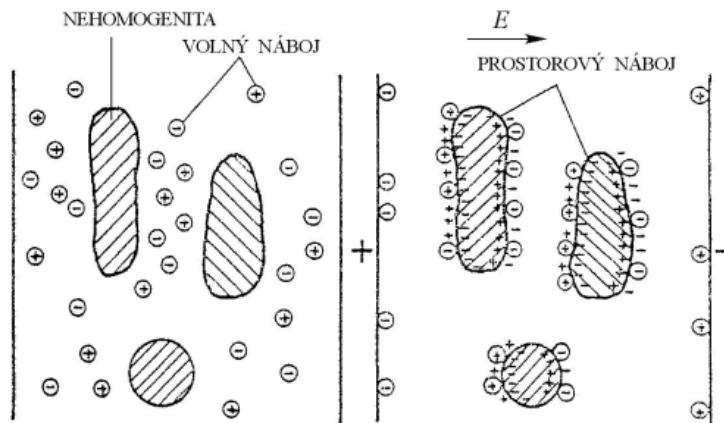
- Vyskytuje se v iontových látkách s netěsným uložením iontů (anorganická skla, keramika).
- Je provázena ztrátami energie v dielektriku, je závislá na teplotě a na kmitočtu.
- Doba ustavení:  $10^{-12}$  -  $10^{-8}$  s.



Obrázek 2.3 Podstata iontové-relaxační polarizace

### Polarizace mezivrstvodá (migrační)

- Vyskytuje se u látek s makroskopickými nehomogenitami (látky s částicovými či vláknitými plnivy, lamináty, pórovité a pěnové materiály, znečištěné látky).
- Nejpomalejší polarizační mechanismus, podmíněný pohybem volných elektrických nábojů, projevující se pouze v oblasti velmi nízkých kmitočtů. Je provázen ztrátami energie v látce a je závislý na teplotě.



Obrázek 2.4 Podstata vzniku mezivrstvodé polarizace

### Polarizace samovolná (spontánní)



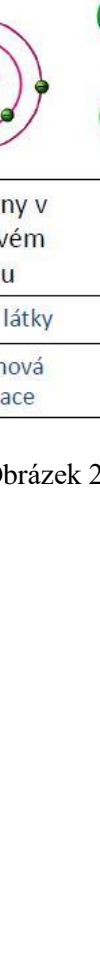
- Vyskytuje se v látkách feroelektrických, vyznačujících se tzv. doménovou strukturou.
- Je provázena ztrátami energie v látce, je závislá na kmitočtu a na intenzitě elektrického pole; výrazně je závislá na teplotě.
- Domény - makroskopické oblasti, v nichž jsou všechny částice plně - spontánně polarizovány v důsledku působení vnitřních výměnných sil.

## Polarizace trvalá (permanentní)

- Vyskytuje se u některých polárních látek s malou elektrickou vodivostí.
- Elektrety - permanentně zpolarizovaná tělesa.

## Polarizace rezonanční

- Vyskytuje se u všech dielektrik: vzniká následkem rezonance vlastních (tepelných) kmitů částic s elektrickým nábojem s kmity vnějšího elektrického pole.
- Projevuje se v optickém spektru kmitočtů. [1] [2]

Úroveň látky	Atomová úroveň	Chemické vazby (Krystalická struktura)	Molekulová úroveň
			
Druh vázaných částic s nábojem	Elektrony v atomovém obalu	Vázaný Kationt Aniont	Slabě vázaný kationt ve struktuře
Představitelé	Všechny látky	Iontové krystaly	Alkalická skla
Polarizační mechanismus	Elektronová polarizace	Iontová polarizace	Polarizace Iontová-relaxační

Obrázek 2.5 Přehled typů polarizací

## 2.2 Elektrická vodivost tuhých izolantů

Jev elektrická vodivost je vlastně pohyb volných nebo slabě vázaných nábojů v elektrickém poli. Je závislá na druhu nosičů náboje (velikosti náboje, driftové pohyblivosti) a na jejich koncentraci.

Z elektroizolačního pohledu potřebujeme, aby izolační materiály byly bez volných nosičů elektrického náboje, znečištění a příměsí. Avšak - jak bylo již zmíněno - každý reálný izolant obsahuje určité množství volných nosičů elektrického náboje. S tím musí být počítáno při výběru vhodného izolačního materiálu pro konkrétní reálné použití.

K hodnocení materiálů z hlediska elektrické vodivosti se v praxi využívá hodnot měrného elektrického odporu (rezistivity)  $\rho$  [ $\Omega \cdot \text{m}$ ] a měrné elektrické vodivosti (konduktivity)  $\gamma$  [ $\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$ ]. Měrný, na jednotku objemu přepočítaný odpor nebo vodivost, je vhodný z hlediska porovnávání materiálů mezi sebou. Rezistivita a konduktivita mají mezi sebou nelineární vztah. Tento vztah vypadá takto:

$$\gamma = \frac{l}{\rho}$$

Číselně tento vztah můžeme vyjádřit tak, že hodnota rezistivity je rovna odporu krychle o hraně 1 m daného materiálu, při protékání proudu mezi jejími dvěma protilehlými stěnami. Pro ploché vzorky, při předpokladu homogenního pole, musíme vyjádřit měrný elektrický odpor. Měrný elektrický odpor vypočteme:

$$\rho = R \frac{S}{h}$$

kde  $S$  je plocha elektrod [ $\text{m}^2$ ],  $h$  znázorňuje tloušťku vzorku [ $\text{m}$ ] a  $R$  je hodnota změřeného tzv. izolačního elektrického odporu [ $\Omega$ ]. Izolační odpor materiálu je hodnota okamžitého odporu, vypočítaná pomocí přiloženého napětí a procházejícího proudu:

$$R = \frac{U}{I}$$

Pomocí izolačního odporu nelze materiály porovnávat, zatímco pomocí hodnot rezistivity to možné je.

Dalším pohledem na elektrickou vodivost je rozdělení podle typu nosičů elektrického náboje. Jedná se o elektrickou vodivost elektronovou, děrovou, protonovou, iontovou a elektroforetickou. V prvních případech se elektrický náboj přenáší prostřednictvím elementárních částic nebo iontů, v případě elektroforetické vodivosti se elektrický náboj přenáší většími skupinami částic. Za normálních podmínek

se mezi nejčastější volné nosiče elektrického náboje řadí vlastní ionty, popřípadě ionty příměsí a nečistot.

Ke vzniku a pohybu volných nosičů náboje v látkách velmi záleží na skupenství látky. Jak se mění skupenství, tak se mění i vzdálenost jednotlivých částic látky, které na sebe mohou působit.

Při normálních podmínkách, to znamená ve slabých elektrických polích a normálních teplotách, je konduktivita pevných izolantů velmi malá. Pevné izolanty mohou mít dva typy elektrické vodivosti, z nichž jedna převládá. Vodivost může být buď elektronová, nebo iontová. V reálném použití převládá iontová vodivost, elektronová vodivost se vyskytuje až při zvýšených hodnotách intenzity elektrického pole  $10^1 - 10^2 \text{ kV}\cdot\text{mm}^{-1}$ . Při poruše se zvyšuje koncentrace slabě vázaných iontů, která má za následek zvětšování elektrické vodivosti izolantů.

Elektrickou vodivost dielektrických látek můžeme rozdělit podle povahy na vnitřní a povrchovou, přičemž povrchovou vodivost lze pozorovat pouze u tuhých látek. [1]

### 2.2.1 Vnitřní elektrická vodivost tuhých izolantů

Tento druh vodivosti závisí na chemickém složení a struktuře látek, defektech vnitřního uspořádání a na druhu a obsahu nečistot a příměsí.

Dochází při něm k přemísťování volných nosičů náboje vlivem elektrického pole j obdobně jako u difuze. Je zde značná závislost vnitřní konduktivity na teplotě, která je podmíněna především výraznou teplotní změnou koncentrace nosičů

Pro jeden druh mechanismu vnitřní konduktivity platí:

$$\gamma = Ae^{-\frac{b}{T}}$$

Při výskytu dvou, resp. více druhů mechanismů vodivosti se objeví v závislosti

$$\ln \gamma = \ln A - \frac{b}{T}$$

#### Iontové krystalické látky

Základem iontových krystalických látek jsou kladné a záporné ionty, které se nacházejí v uzlech mřížky. V ideální mřížce je pohyb iontů nemožný. K elektrické vodivosti těchto látek je zapotřebí vzájemné výměně kladných a záporných iontů. Takto vzniklá elektrická vodivost je velmi energeticky náročná. V reálných krystalech lze naměřit určitou měřitelnou elektrickou vodivost, což dokazuje existenci ještě jiné možnosti pohybu iontů krystalem. Jednou z možností je, že ionty získají dostatečnou energii k opuštění svého místa v uzlu mřížky při svých tepelných kmitech. Při této

možnosti přeskočí ionty do tzv. intersticiální polohy (meziuzlová poloha) a tím vznikne vždy jedna vakance (volné místo ve struktuře). Tato porucha se nazývá Frenkelova porucha.

Aby iont přešel do intersticiální polohy, potřebuje energii přibližně 1 - 2 eV. Iont, který se dostal do intersticiální polohy, kmitá a tím získává díky tepelným fluktuacím dostatečnou energii k přemístění se do jiného mezimřížkového prostoru. K přechodu z jedné intersticiální polohy do druhé potřebuje iont asi 0,15 eV. Pohyblivost těchto intersticiálních iontů přispívá k elektrické vodivosti krystalu látky. Další porucha, která se podílí na elektrické vodivosti krystalů, je tzv. Schottkyho porucha. Dochází k ní, když se v krystalové mřížce nachází stejný počet volných míst po kladných a záporných iontech. V tomto případě způsobuje elektrickou vodivost pohyb vakancí, to je přechod sousedních iontů do blízkého volného místa. Energie potřebná k přechodu vakancí je asi 0,4 eV. V krystalech se nacházejí i další poruchy struktury mřížky. Vznikají při tepelných a mechanických namáháních krystalu.

### **Anorganické amorfní látky**

Mezi tyto představitele patří hlavně různé druhy skel. Vlivem různých druhů skel se liší i jejich elektrická vodivost a to v rozsahu  $10^{-3}$ - $10^{17}$  S·m<sup>-1</sup>. Nejmenší elektrickou vodivost mají skla čistě křemičitá (SiO<sub>2</sub>) a skla boritá (B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). V technických sklech se přidáním dalších oxidů upravují mechanické vlastnosti.

Nejen že se upraví mechanické vlastnosti, ale dojde i ke změně elektrických vlastností. Elektrické vodivosti skel umožňují slabě vázané ionty, které se pohybují vlivem vnějšího elektrického pole. Stejně jako u krystalických izolantů může být elektrická vodivost anorganických amorfních látek závislá na intenzitě elektrického pole.

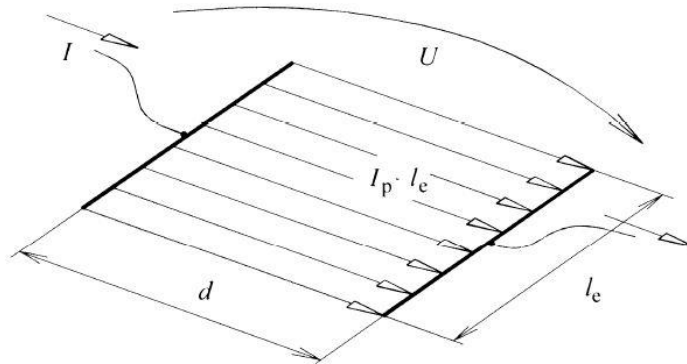
### **Organické amorfní látky**

Mezi organické amorfní látky můžeme zařadit syntetické makromolekulární látky. V praxi se nejvíce používají polymerní materiály, jako například polyethylen, polystyren, polytetrafluorethylen a další. Tyto materiály se vyznačují malou elektrickou vodivostí, která je menší než  $10^{-17}$  S·m<sup>-1</sup>. Předpokládá se, že elektrická vodivost v organických amorfních látkách má iontový charakter. Elektrická vodivost polymerů je silně závislá na čistotě a stupni polárnosti. V nepolárních makromolekulárních izolantech elektrickou vodivost způsobují nečistoty. V polárních makromolekulárních izolantech ji způsobují jednak nečistoty a také disociované molekuly vlastního izolantu. Elektrická vodivost polymerních izolantů je citlivá na přítomnost vody. Přítomnost vody zhoršuje izolační vlastnosti materiálů. [1] [2]

#### **2.2.2 Povrchová elektrická vodivost tuhých izolantů**

Měrnou povrchovou elektrickou vodivost  $\gamma_p$  lze zjistit pomocí tekoucího proudu na povrchu izolantu  $I_p$  a intenzity elektrického pole  $E$  (obr. 2.6) vztahem:

$$\gamma_p = \frac{I_p}{E}$$



Obrázek 2.6 Proud tekoucí po povrchu izolantu

Povrchovou elektrickou vodivost můžeme hodnotit pomocí měrného povrchového elektrického odporu:

$$\rho_p = R_p \frac{l_e}{E}$$

kde hodnota  $R_p$  ukazuje povrchový elektrický odpor materiálu, který je naměřený mezi rovnoběžnými elektrodami,  $l_e$  je délka elektrod na povrchu a  $d$  je vzdálenost mezi elektrodami. Povrchovou elektrickou vodivost izolantů způsobují pohybující se volné nosiče elektrického náboje, které vznikají disociací molekul nečistot na povrchu izolantu. Disociace je velmi podporována adsorbovanou vlhkostí. Z toho je patrné, že povrchová vodivost izolantu souvisí s relativní vlhkostí okolí. Povrchovou vodivost určuje i intenzita adsorbování vlhkosti daného materiálu. Nejvýraznější je adsorbce u materiálů s iontovým charakterem vazeb, nejmenší je u nepolárních látek.

Povrchová vlhkost má na elektrický odpor významný vliv, protože k podstatné elektrické vodivosti vody stačí i velmi tenký vodní film k tomu, aby se objevila značná povrchová vodivost. Velikost povrchové vodivosti určuje hlavně tloušťka tohoto filmu, ta ale závisí na vlastnostech tuhé látky. Z toho důvodu je povrchová vodivost posuzována jako specifická vlastnost materiálu.

Rozhodující vliv na velikost povrchové vodivosti mají tyto faktory:

#### **relativní vlhkost prostředí**

S klesající teplotou relativní vlhkost atmosféry stoupá, tím stoupá i tloušťka adsorbovaného vodního filmu. Ohřátím se vodní film z povrchu odpaří a povrchová vodivost klesne.

## **schopnost látky odpuzovat nebo vázat vodu**

Tato schopnost látky závisí na struktuře a povaze látky. Podle chování k vodě se rozlišují:

- Látky hydrofobní, které vodu odpuzují a vodou se nesmáčejí.
- Látky hydrofilní, které vodu přitahují, vodou se smáčejí.

## **čistota a hladkost povrchu látky.**

Nečistoty usazené na povrchu izolantu značně zvětšují povrchovou vodivost látek hydrofilních. Čím hladší a lesklejší je povrch, tím má látka vyšší povrchovou rezistivitu. U látek hydrofobních je snížení povrchové rezistivity znečištěním povrchu poměrně malé. [1] [2]

## **2.3 Dielektrické ztráty**

Ideální izolant má nulovou elektrickou vodivost, ale protože ideální izolant neexistuje, je zřejmé, že ten reálný, tedy technický izolant, bude mít určitou, zpravidla velice malou elektrickou vodivost. Dále obsahuje nečistoty, příměsi a má určitou vlhkost, což znamená, že přiložené elektrické pole způsobí vznik nestacionárních přesunů uvnitř dielektrika. Tyto pochody vedou ke ztrátám energie v dielektriku. Ztráty v dielektriku představují celkovou energii, rozptýlenou v dielektriku v časové jednotce při vložení materiálu do elektrického pole. Ztráty se vyskytují při působení, jak stejnosměrného, tak i střídavého elektrického pole, jsou provázány zahříváním dielektrika a jsou také příčinou změny fázového úhlu mezi napětím a proudem. [1]

### **2.3.1 Ztráty v dielektriku**

V dielektriku působí několik druhů ztrát, které jsou rozdílné svým fyzikálním základem. Tyto ztráty se navzájem sčítají. Z pohledu fyzikální podstaty se v dielektriku rozlišují vodivostní ztráty, ztráty polarizační a ionizační ztráty.

#### **Vodivostní ztráty**

Vyskytují se u všech druhů dielektrik a jsou podmíněny ohmickou vnitřní a povrchovou vodivostí dielektrika. Vznikají při stejnosměrném i střídavém napětí a jejich důsledkem je degradace energie elektrického pole v Joulovo teplo. Fyzikální podstata ztrát - srážky volných nosičů nábojů s kmitajícími částicemi, které tvoří strukturu látky.

#### **Polarizační ztráty**

Mají významný podíl na celkové výši ztrát. Jsou podmíněny polarizačními pochody v dielektriku. Velikost těchto ztrát a jejich teplotní a kmitočtové závislosti vycházejí z druhu vyskytujících se polarizací.

U elektronové a iontové polarizace se polarizační ztráty prakticky nevyskytují.

Naopak velkými ztrátami, značně závislými na teplotě a na kmitočtu, je provázána polarizace dipólová a iontová relaxační. Zvláštní druh ztrát (značných) představují ztráty feroelektrik, charakterizovaných vnitřní doménovou strukturou.

Tři typy závislostí  $P = F(E)$  :

U dielektrik s deformačními polarizacemi (u bezztrátových dielektrik) je závislost lineární, v dielektriku s pomalými (relaxačními) polarizacemi má závislost tvar elipsy a u feroelektrik (seignettoelektrik) je závislost v oblasti pod Curieho bodem zobrazena hysterezní smyčkou.

Plocha opsaná ve druhém a třetím případě křivkami je úměrná velikosti dielektrických ztrát za jednu periodu střídavého pole.

Ke ztrátám polarizací patří ještě tzv. rezonanční ztráty, které se v dielektriku vyskytují až při kmitočtech odpovídajících kmitočtu světelného spektra a jsou charakterizovány silnou selektivností při určitém kmitočtu.

### **Ionizační ztráty**

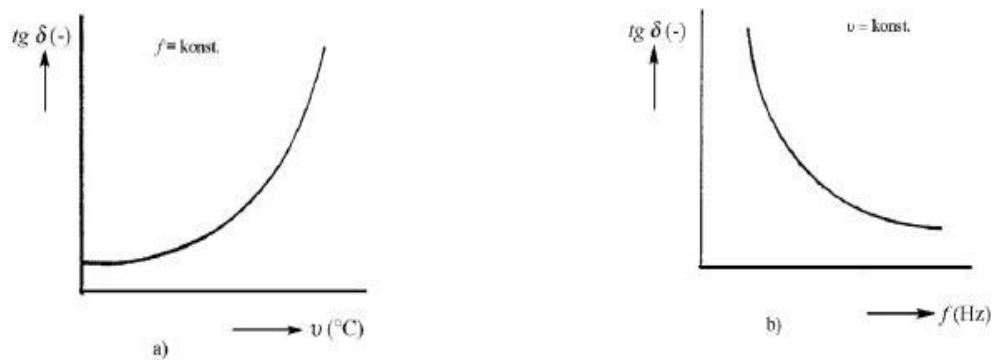
Vyskytují se u plynů, a dále u tuhých, resp. kapalných dielektrik, které obsahují plynové vměstky. Podmínkou vzniku ztrát je překročení tzv. prahu ionizace daného plynu.

Velikost dielektrických ztrát vyjadřují:

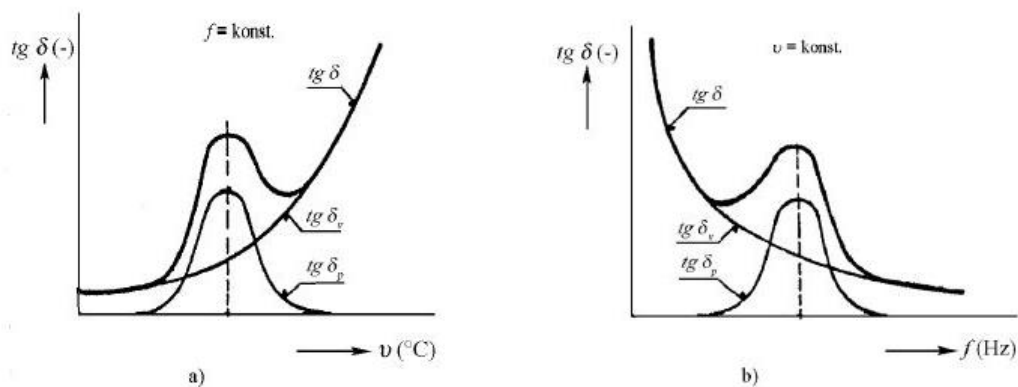
- ztrátový úhel ( $\delta$ ),
- ztrátový činitel ( $\text{tg } \delta$ ),
- ztrátové číslo ( $\epsilon'' = \epsilon' \cdot \text{tg } \delta$ ) a
- měrné dielektrické ztráty (ztrátový výkon  $P_z$  vztažený na jednotkový objem látky). [1]

## **2.4 Ztrátový činitel**

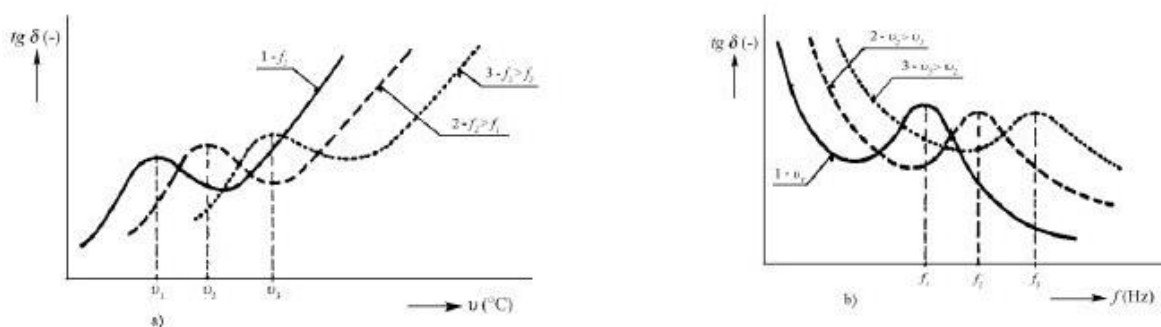
Ztrátový činitel je nejdůležitější veličinou z výše uvedených. Hlavní faktory, ovlivňující ztrátový činitel, jsou teplota a kmitočet přiloženého elektrického pole (u všech dielektrik). U feroelektrik je to pak ještě intenzita elektrického pole.



Obrázek 2.7 Teplotní (a) ( $f = \text{konst.}$ ) a kmitočtová (b) ( $T = \text{konst.}$ ) závislost ztrátového činitele nepolárního dielektrika



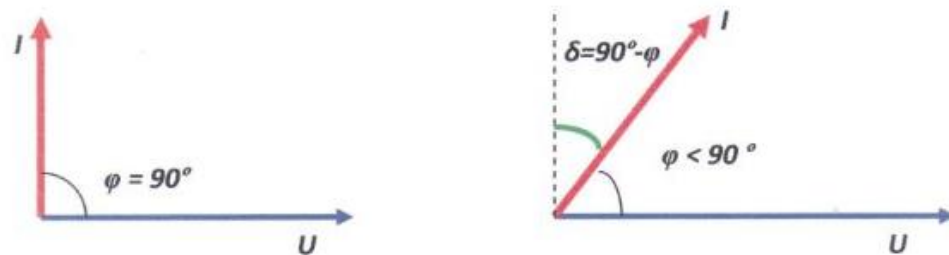
Obrázek 2.8 Teplotní (a) ( $f = \text{konst.}$ ) a kmitočtová (b) ( $T = \text{konst.}$ ) závislost ztrátového činitele polárního dielektrika



Obrázek 2.9 Vliv změny kmitočtu, resp.teploty na průběhy teplotní (a), resp.kmitočtové (b) závislosti ztrátového činitele polárního dielektrika

Ztrátové dielektrikum můžeme z důvodů výpočtu ztrátového výkonu  $P_Z$  a ztrátového činitele  $tg\delta$  nahradit ekvivalentním náhradním zapojením. Pro tato náhradní

zapojení se pak kreslí fázový diagram napětí a proudů, v němž je ztrátový úhel  $\delta$  mírou nedokonalosti dielektrika. [1]



Obrázek 2.10 Fázorové diagramy ideálního a skutečného kondenzátoru – vysvětlení ztrátového činitele

## 2.5 Elektrická pevnost

Elektrická pevnost je veličina, která charakterizuje schopnost izolantu oddělovat místa s různým elektrickým potenciálem. Izolant si v elektrickém poli zachovává svoje izolační vlastnosti jen do určité hraniční intenzity elektrického pole. Tato hranice se nazývá kritická mez. Po překročení této hranice dochází k rychlému nárůstu volných nosičů náboje, díky kterému klesá rezistivita materiálu a stoupá proud protékající materiálem. Po tomto zvýšení proudu nastává výboj, který způsobí, že mezi izolovanými místy vznikne dokonale vodivý kanál a protékající proud je v podstatě omezen jen rezistivitou napájecího zdroje a odporem přívodů.

Hodnota elektrické pevnosti také závisí na tvaru elektrického pole, který je dán tvarem elektrod, přiložených k materiálu. Dále závisí na homogenitě materiálu, jeho obsahu nečistot, teplotě a frekvenci přiloženého napětí.

Elektrické pole způsobuje polarizaci dielektrika. Při zvětšení intenzity elektrického pole se zvětšuje koncentrace volných nábojů a jejich pohyblivost. Pokud budeme intenzitu elektrického pole dále zvětšovat, dojde k tzv. průrazu dielektrika. Dielektrikum přestane oddělovat místa s různým potenciálem, vytvoří se vodivý kanálek, kterým mohou procházet značné proudy (omezujícím faktorem je pouze impedance zdroje a přívodů k elektrodám).

Průraz dielektrika označuje výboj vzniklý v pevných materiálech. U plynů a kapalin mluvíme o přeskoce. V pevných materiálech způsobí průraz nevratné změny struktury. Elektrická pevnost  $E_p$  tedy udává velikost průrazného napětí  $U_f$  lineárně přepočítaného na tloušťku dielektrika  $d$ . [1] [7]



Obrázek 2.11 Elektrická pevnost  $U_p$  v závislosti na výkonu rozptýleném v materiálu

V bodě P platí  $dI/dU \rightarrow \infty$  - průraz izolantu

$$E_p = \frac{U_d}{d}$$

kde:  $U_p$  - průrazné napětí,  
 $E_p$  - elektrická pevnost,  
 $d$  - tloušťka vrstvy izolantu

## 2.6 Průraz izolantu

Průraz izolantu je fyzikální děj, při kterém dochází k výboji. Výboj vzniká, pokud dojde k překročení kritického gradientu elektrického pole. Je to náhlý jev, při kterém dojde k vytvoření dokonale vodivé cesty uvnitř izolantu. Průrazem vytvořená vodivá cesta je nevratná. Při zjišťování vlastností látky na jednom vzorku nelze provést více než jednu zkoušku. To s sebou nese větší finanční náročnost, protože je potřeba více vzorků.

Elektrické výboje se dělí na:

- samostatné a nesamostatné
- vysokotlaké a nízkotlaké
- ustálené a neustálené
- úplné a částečné.

Průraz v tuhých izolantech způsobí trvalé zhoršení elektroizolačních vlastností, u plyných nebo kapalných izolantů je toto zhoršení jen dočasné. U tuhých izolantů rozlišujeme několik druhů činitelů, které ovlivňují míru elektrické pevnosti. Jsou to: teplota, tloušťka izolantu, charakter a druh elektrického pole, jeho kmitočet, doba působení elektrického pole a vliv částečných výbojů v plynových dutinkách. [1] [6]

U tuhých izolantů lze rozeznat tři typy průrazů:

tepelný průraz

čistě elektrický průraz

elektrochemický průraz

### **2.6.1 Tepelný průraz**

Historicky byl jako první z výše tří zmíněných průrazů popsán průraz tepelný a to v roce 1922. Princip je následovný: Jelikož izolant nemá nekonečný odpor, tak jím protéká malý proud. Tento proud ohřívá izolant a tím dále klesá jeho odpor. Uplatňují se zde Joulovy ztráty. Proud izolantem ale není ve všech místech stejný a je větší ve více tepelně namáhaných místech.

Pokud napětí dosáhne takové hodnoty, při které protékající proud vytváří tolik tepla, které už není izolant schopen odvádět do okolí, teplota se velmi rychle zvyšuje, až dojde k roztavení látky nebo k jejímu zuhelnatění. Při dostatečně nízkých napětích se ustaví dynamická rovnováha mezi teplem vytvořeným a teplem odvedeným z izolantu. Příčiny tepelného průrazu jsou tři.

První příčinou je, že pokud přiložíme napětí tak vysoké, že nemůže dojít k ustavení výše zmíněné dynamické rovnováhy. Toto je nejčastější příčina tepelného průrazu. Další příčinou je, že pokud máme špatný odvod tepla od izolantu nebo izolant s nízkou hodnotou bodu tavení, tak než dojde k ustavení dynamické rovnováhy, dojde k elektrickému průrazu. Poslední příčinou tepelného průrazu je situace, kdy nerovnoměrným ohřevem izolantu se původní homogenní elektrické pole stává nehomogenním, což může vést k průrazu izolantu

Elektrická pevnost izolantu při tepelném průrazu je závislá na teplotě a frekvenci přiloženého napětí. Se stoupajícími hodnotami obou veličin elektrická pevnost klesá. Protože vznik tepelného průrazu souvisí s tvorbou a akumulováním tepla v izolantu, tak závisí na délce působení elektrického pole. [7]

### **2.6.2 Čistě elektrický průraz**

S růstem kvality izolantů se zvyšoval jejich odpor, a snižovaly se jejich dielektrické ztráty. Došlo tedy k takové situaci, že při běžně používaném napětí nemohlo dojít k tak velkému tepelnému namáhání, aby došlo ke splnění podmínky pro vznik tepelného průrazu izolantu. Začal tedy vstupovat do popředí jiný mechanismus průrazu. Byl to průraz čistě elektrický. Čistě elektrický průraz se zkoumá na homogenním materiálu v homogenním elektrickém poli pomocí rázového napětí. Díky tomu nemůže dojít k tepelnému průrazu. Rychlost růstu průrazového kanálu je v rozmezí od  $10^5$ - $10^6$  m.s<sup>-1</sup>.

Na základě existujících informací a experimentů převládá názor, že při tomto průrazu hrají rozhodující roli volné elektrony. K tomuto závěru vedou poznatky o způsobu vzniku a orientaci průrazového kanálu v krystalové mřížce a velké rychlosti jeho vzniku. Dále v existující závislosti elektrické pevnosti na tloušťce vzorku, což dokazuje, že dochází k nárazové ionizaci.

Ačkoliv se izolanty od ostatních látek liší tím, že nemají volné nosiče náboje, tak je tento předpoklad jen pro zjednodušení. Ve skutečnosti by tyto vlastnosti měl izolant jen při teplotách blízkých se absolutní nule, a pouze pokud by byl dokonalým krystalem. Ve skutečnosti nemají reálné izolanty dokonalou strukturu a následkem toho mají mezi základní hladinou a vodivostním pásem poruchové hladiny, které ulehčují přechod elektronů do vodivostního pásu. Při teplotách vyšších, než je absolutní nula, se vlivem tepelné ionizace dostává určitý počet elektronů do vodivostního pásma. Tento počet je ale tak malý, že se neprojeví na elektrické vodivosti izolantu. Mimo tepelné ionizace se na tvorbě volných elektronů mohou podílet i vnější činitelé. Jsou to záření, které působí na pevný izolant podobně jako na plyny a účinky silného elektrického pole. To snižuje potenciální bariéry a tím ulehčuje studenou emisi elektronů z katody do izolantu nebo umožňuje elektronům tunelovým efektem přejít z valenčního do vodivostního pásu v krystalové mřížce. Tento jev se nazývá vnitřní emise nebo také emise polem. Počet takto uvolněných elektronů vzrůstá se ze zvyšující se intenzitou elektrického pole.

Chování elektronů určují tyto činitelé:

- Elektrické pole, které elektrony urychluje.
- Interakce se strukturou izolantu, při které elektrony ztrácí část své získané energie.
- Vzájemné interakce elektronů mezi sebou.
- Ionizace a rekombinace, které uvolňují a zachytávají elektrony ve valenčním pásmu nebo v poruchových hladinách.

K vysvětlení elektrického průrazu v pevných izolantech na základě existence volných elektronů lze rozdělit do dvou skupin. V první teorii je předpoklad, že koncentrace volných elektronů je malá, neboli malá hustota volných elektronů. Druhá teorie je založena na opaku, na velké hustotě volných elektronů.

V případě malé koncentrace elektronů v látce je pravděpodobnost vzájemné srážky elektronů daleko menší, než je pravděpodobnost srážky elektronu se strukturou izolantu. Díky tomuto předpokladu můžeme zanedbat vliv vzájemných srážek elektronů. K průrazu izolantu dojde kvůli prudkému vzrůstu počtu volných elektronů, ke kterému dochází, když intenzita elektrického pole dosáhne úrovně elektrické pevnosti. Při tomto nárůstu počtu volných elektronů dochází také k nárůstu elektrického proudu, který protéká izolantem. Rostoucí proud způsobuje nárůst energie, která se přeměňuje v izolantu na teplo. To má následek, že teplota izolantu se zvýší natolik, že se poruší jeho struktura roztavením nebo dojde k chemické destrukci.

Pokud je koncentrace volných elektronů v izolantu velká, tak jsou rozhodující vzájemné srážky elektronů a jejich výměna energie. Elektrické pole urychluje volné elektrony a ty se poté srážejí s jinými elektrony, kterým předávají část své energie. Díky tomu nemůže žádný z elektronů získat rychlost a energii výrazně větší, než mají okolní volné elektrony. Tímto se energie rozdělí mezi všechny volné elektrony a ty jsou v tepelné rovnováze. Hovoříme o tzv. teplotě kolektivu volných elektronů. Z tohoto výrazu pochází i název této teorie, která se nazývá Teorie kolektivního průrazu. Pokud je vzájemná výměna energie mezi elektrony větší, než je výměna mezi elektrony a strukturou izolantu, tak dochází ke zvyšování elektronové teploty v porovnání s teplotou izolantu. Po určité době se však teploty vyrovnávají a dochází ke vzniku rovnováhy

mezi oběma teplotami. Tato rovnováha se však může ustavit pouze tehdy, pokud bude elektronová teplota stoupat do určité mezní hodnoty. Pokud bude tato mezní hodnota překročena, dochází k nekontrolovatelnému růstu teploty, dokud nedojde k průrazu izolantu. Jako se liší podmínky vzniku obou průrazů, tak se liší i stopy po průrazu. Při elektrickém průrazu je v izolantu úzký kanál, ale po tepelném průrazu bývá na místě s nejhoršími podmínkami pro odvod tepla poškozená větší část od působení tepla. [7]

### 2.6.3 Elektrochemický průraz – stárnutí izolantů

Při aplikaci izolantů na dané případy jsou rozhodující zejména jeho vlastnosti s ohledem na odolnost proti elektrickému namáhání. Při působení provozních činitelů pozorujeme v materiálech změny, které jsou buď vratné, nebo nevratné.

Pokud se jedná o vratné změny, k nim dochází při krátkodobém nebo málo intenzivním působení provozních činitelů. Tyto změny nejsou trvalé, proto nejsou pro funkci daného materiálu zpravidla kritické. Vliv těchto změn můžeme pomocí vhodných opatření snížit na přípustnou mez. V případě nevratných změn je důležité kromě intenzity také doba působení činitele. Následky působení činitele jsou trvalého charakteru a většinou jsou následkem chemických změn v izolantu.

Výzkumu vlivu stárnutí izolantů se věnuje velká pozornost. Zejména v souvislosti se vznikem tepelného průrazu. K selhávání izolantu dochází i přes to, jestliže se zamezí vzniku tepelného průrazu a pokud je izolant provozován na hodnotách napětí nižších, než na které byl dimenzován a testován při jeho zkouškách. Velký vliv na selhání izolantů mají částečné výboje, které nastávají v plynech obsažených v dutinkách pevných izolantů. Vzniku těchto dutinek se dá při výrobě velice špatně zabránit, i když se izolace vyrábí velice pečlivě. Částečné výboje jsou rozdělovány podle místa jejich výskytu.

Vnější částečné výboje jsou výboje v plynných izolantech v okolí elektrod s malým poloměrem nebo velkým zakřivením. Jsou to například doutnavé a korónové výboje.

Vnitřní částečné výboje jsou výboje, které vznikají v plynech, které jsou obklopené pevným či kapalným dielektrikem. Jsou to například výboje v plynných dutinkách pevného dielektrika.

Povrchové částečné výboje. Nacházejí se zpravidla v okolí elektrod na rozhraní pevného a plynného dielektrika. Jsou to například klouzavé výboje na výstupu vinutí z drážky u točivých strojů, průchodkách apod. [7]

#### Činitele ovlivňující velikost elektrické pevnosti

- druh, tloušťka a homogenita izolantu
- vlhkost, obsah nečistot
- tvar elektrického pole, kmitočet a průběh napětí
- doba působení napětí na izolant
- teplota izolantu i okolí, odvod tepla
- předchozí děje v izolantu → nelze pokládat za materiálovou konstantu.

## 3 TEPELNÉ VLASTNOSTI IZOLANTŮ A DIELEKTRIK

Izolanty musí být schopny plnit svou funkci v často velkých rozmezech teplot. Tyto teploty mohou být způsobené okolním prostředím, ale teplotu izolantu můžou zvýšit i ztráty elektrického zařízení, kterého je izolace součástí. Je proto velmi důležité vybírat vhodné materiály, které mají vyhovující vlastnosti v celém rozsahu teplot.

### 3.1 Tepelné namáhání a stárnutí izolantu.

Tepelná odolnost izolantů není důležitá pouze z technického hlediska, ale i z hlediska ekonomického. Tepelná odolnost totiž omezuje maximální teplotu celého zařízení a tím omezuje i využití celého zařízení. Maximální teplota, kterou můžeme připustit bez ohrožení funkce izolace, se označuje jako krátkodobá tepelná odolnost, na rozdíl od trvalé tepelné odolnosti, která se označuje jako odolnost vůči tepelnému stárnutí. Při výběru vhodného materiálu je rozhodující nižší hodnota z obou dvou, proto nelze při navrhování izolace přihlížet jen k jedné z nich.

Tepelné namáhání izolantu vede k zhoršení jeho elektrických a mechanických vlastností. Dochází k narušení struktury, popř. i tvaru izolantu a hlavně k rychlejšímu stárnutí, které se projevuje zejména u organických izolantů.

Trvalá tepelná odolnost je vyjádřena maximálně přípustnou teplotou, při které může izolace pracovat přiměřeně dlouhou dobu. Podle této vlastnosti se izolanty rozdělují do teplotních tříd. Na stárnutí závisí doba života izolantu a tím i doba elektrického zařízení s ohledem na jeho spolehlivost a bezpečnost. Pro posuzování tepelných vlastností materiálu používáme několik veličin:

***Měrný vnitřní a měrný povrchový odpor  $\rho_v, \rho_p$  [ $\Omega \cdot m$ ].***

U izolantů je v rozmezí  $10^6$  až  $10^{18}$   $\Omega \cdot m$ . Čím větší je rezistivita, tím lepší je izolant. (viz. Elektrická vodivost)

***Měrná tepelná vodivost  $\lambda$  [ $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ]***

Je měřítkem schopnosti izolantu převádět teplo ve směru tepelného spádu. Hustota ustáleného a stejnorodého tepelného toku je množství tepla prošlého za jednotkový čas jednotkovou plochou kolmou ke směru toku.

Gradient teploty je pokles teploty na malé délce ve směru tepelného toku na jednotku tloušťky. Pro určitou tloušťku desky je součinitel tepelné vodivosti definován vztahem.

Součinitel tepelné vodivosti je tedy množství tepla procházejícího zkoušenou deskou jednotkové plochy a tloušťky za 1 s při teplotním gradientu  $1 K \cdot m^{-1}$ . Např. u elektrických strojů izolace odvádí teplo vzniklé ztrátami ve vinutí. Měrná vodivost vzduchu je  $0,025 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ , slídy  $0,36 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ , asfaltu  $0,9 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ .

### ***Součinitel teplotní vodivosti $a$ [ $m^2 \cdot s^{-1}$ ]***

Dielektrických a elektricky izolačních materiálů je v průmyslu zastoupena celá řada. Různé skupiny se od sebe mohou výrazně lišit, ale všechny vykazují nějakou úroveň teplotní roztažnosti. Ta se stanovuje jako změna lineárních anebo objemových rozměrů.

Součinitel teplotní vodivosti udává rychlost vyrovnání teplotního rozdílu na dvou protilehlých stěnách krychle o straně 1 m. Je definován poměrem tepelné vodivosti k měrnému teplu vztaženému na jednotku objemu.

### ***Teplotní součinitel délkové roztažnosti $\lambda$ [ $K^{-1}$ ]***

Udává poměrnou změnu délky látky při jejím ohřátí o  $1^\circ C$ . U křemenného skla je  $0,5 \cdot 10^{-6} K^{-1}$ , u polyamidů  $100 \cdot 10^{-6} K^{-1}$ .

### ***Měrná tepelná kapacita [ $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ]***

Je definována jako množství tepla, kterým se teplota definované hmoty zvýší o 1 K. Protože se jedná o teplotně závislou konstantu, je nezbytné vymežit teplotní oblast, pro kterou daná hodnota platí. Polymerní materiály, které udržují vlhkost, je důležité nejprve vysušit.

Měrné teplo se stanovuje pomocí směšovacího kalorimetru (Regnaultův, elektrický), kdy se vzorek zkoušeného materiálu, například granule, o dané hmotnosti vytemperuje v termostatu na danou teplotu a vloží se do kalorimetru o rozdílné teplotě. Kalorimetr obsahuje určité množství média (voda) o známém měrném teplu. Vzorek předá část svého tepla kalorimetru a po vyrovnání teplot platí vztah určující měrné teplo

Při posuzování a vybírání materiálů pro vlastní návrh nelze vzít v úvahu pouze hodnoty známých tepelných fyzikálních veličin, ale vždy je nutné uvažovat i jakou roli bude izolant v konkrétní aplikaci plnit a jakému tepelnému namáhání bude daná aplikace v určitém prostředí vystavena.

Co se týče měrné tepelné vodivosti. V některých aplikacích bude zapotřebí, aby elektricky izolační materiál teplo od namáhaných živých částí teplo odváděl, jinde bude třeba teplo izolovat. Pokud uvažujeme teplotní součinitel délkové roztažnosti. Některé sestavy kladou veliký důraz na geometrickou přesnost a neměnnost během funkce ve velkých teplotních rozdílech, jinde bude možné roztažnost díky rozsahu teplot nebo geometrii soustavy zcela zanedbat. [4]

## 4 POVRCHY IZOLANTŮ

Stabilní povrchové úpravy keramických materiálů slouží ke zvýšení odolnosti vůči vlivu korozních prostředí bez ztráty užitečných vlastností. Předpokladem pro užívání povrchových vrstev na keramických výrobcích je jejich odolnost při kontaktu s vodou, alkalickými i kyselými roztoky a dalšími agresivními médii. Nejčastější příčinou degradace glazurní vrstvy je koroze amorfni fáze vlivem vodných roztoků či par kyselin a zásad. Chemické působení prostředí může změnit vzhled i vlastnosti glazovaných povrchů několika způsoby, velmi často dochází k ztrátě lesku, méně k vzniku defektů a tvorbě korozních produktů.

Dalším původem degradace je vznik defektů vzniklých vlivem interakce glazura – střepová hmota nebo povrchových vad způsobených vlastnosti samotné skelné vrstvy. Defekty glazur často vedou až k znehodnocení dané glazury a tedy i keramického výrobku. Jednotlivé typy poruch a působící faktory se projeví buď ihned po výpalu, nebo během užívání a skladování výrobku.

### 4.1 Vliv vlhkosti na elektrické vlastnosti izolantu

Při posuzování elektroizolačních vlastností většiny izolantů má významný vliv jejich chování ve styku s vodní parou, popřípadě s plyny a s kapalinami, zejména s vodou. Pro působení vody rozlišujeme dva základní pojmy, navlhavost a nasákavost. Při styku materiálu s vodní parou dochází k navlhavosti – hygroskopičnosti, zatímco při ponoření materiálu do vody se mluví o nasákavosti.

Mimořádně zhoršující vliv vlhkosti na elektrické vlastnosti (zmenšování elektrického odporu, zvyšování ztrátového činitele a pokles elektrické pevnosti) mnohých, a to právě nejrozšířenějších izolantů je důsledkem toho, že se u izolantů stanovuje množství vody, které do nich pronikne za definovaných podmínek. Skutečností je, že rozhodující není množství pohlcené vlhkosti, ale navlhnutím vyvolané zhoršení elektrických vlastností, které jsou u různých izolantů při stejném obsahu vody různé.

U většiny pevných i kapalných izolantů se elektrické vlastnosti méně či více zhoršují. To je způsobeno vysokou permitivitou vody a vysokým stupněm disociace, který způsobuje vysokou vodivost vody. Hlavním ze zdrojů vlhkosti je atmosféra. Ve vzduchu je za normálních podmínek vždy obsaženo určité množství vodních par. Absolutní vlhkost vzduchu je hmota vody v podobě páry v jednotce objemu. Jednotkou absolutní vlhkosti je  $\text{g/m}^3$ . Absolutní vlhkost není rozhodující z hlediska působení vlhkosti na pevné a kapalné izolanty, ale rozhodující je tlak vodních par. Absolutní vlhkost není nekonečná, je omezená stavem, kdy se dosáhne nasycení vodních par.

Vlhkost vzduchu se nejčastěji charakterizuje relativní vlhkostí, která je udávána v procentech. Relativní vlhkost je poměr tlaku par ve vzduchu k tlaku nasycených par za stejné teploty, nebo absolutní vlhkost vzduchu k absolutní vlhkosti vzduchu nasyceného vodními parami při stejné teplotě. Jestliže se v prostoru, kde je stálá absolutní vlhkost, zvětšuje teplota, relativní vlhkost klesá. V opačném případě, kdy se snižuje teplota, relativní vlhkost stoupá až k 100 %. Při dalším snižování teploty část vodních par kondenzuje.

Při nízké relativní vlhkosti vzduchu se na povrchu pevného izolantu adsorbují vrstvy vody, jejíž tloušťka se zvětšuje s relativní vlhkostí vzduchu. Adsorbování vrstvy vody má za následek snížení povrchového odporu izolantu. Adsorpce vody nemusí probíhat pouze na povrchu materiálu. Pokud je materiál např. pórovitý, vláknitý atd., adsorpce probíhá i v pórech a na povrchu vláken. V tomto případě se zhorší povrchový odpor i vnitřní odpor izolantu.

## 4.2 Navlhavost

Navlhavost je schopnost látek přijímat vlhkost z okolního prostředí. Základním fyzikálním jevem při navlhavosti je adsorpce (proces probíhající na povrchu tuhé látky) molekul vody. Adsorpce samotná je důsledkem působení adsorpčních sil mezi sorbentem (látkou přijímající vodní páru) a sorbendem (sorbovaná látka – vodní pára).

Navlhávání je dlouhodobý proces, při němž se v látce, uložené v prostředí o dané stálé relativní vlhkosti a stálé teplotě, zvyšuje postupně počáteční malý obsah vlhkosti v jednotkovém objemu látky. Tento obsah se pak asymptoticky blíží rovnovážnému stavu vlhkosti v látce, který odpovídá dané relativní vlhkosti okolního prostředí. Rychlost navlhávání je funkcí tlaku vodních par ve vzduchu. [5]

Úroveň rovnovážné vlhkosti látky ovlivňují:

- struktura a povaha látky
- relativní vlhkost prostředí
- teplota

Vlhkost látky je dána množstvím vody, které je obsaženo v jednotkovém objemu látky, za definovaných vnějších podmínek v %:

$$\psi = \frac{m - m_0}{m_0} 100$$

kde  $m$  je hmotnost navlhnuté látky a  $m_0$  je hmotnost dokonale vysušené látky.

Navlhavost je definována, v případě rovnovážné vlhkosti při normální teplotě vzduchu s relativní vlhkostí  $\varphi = 100 \%$ , jako:

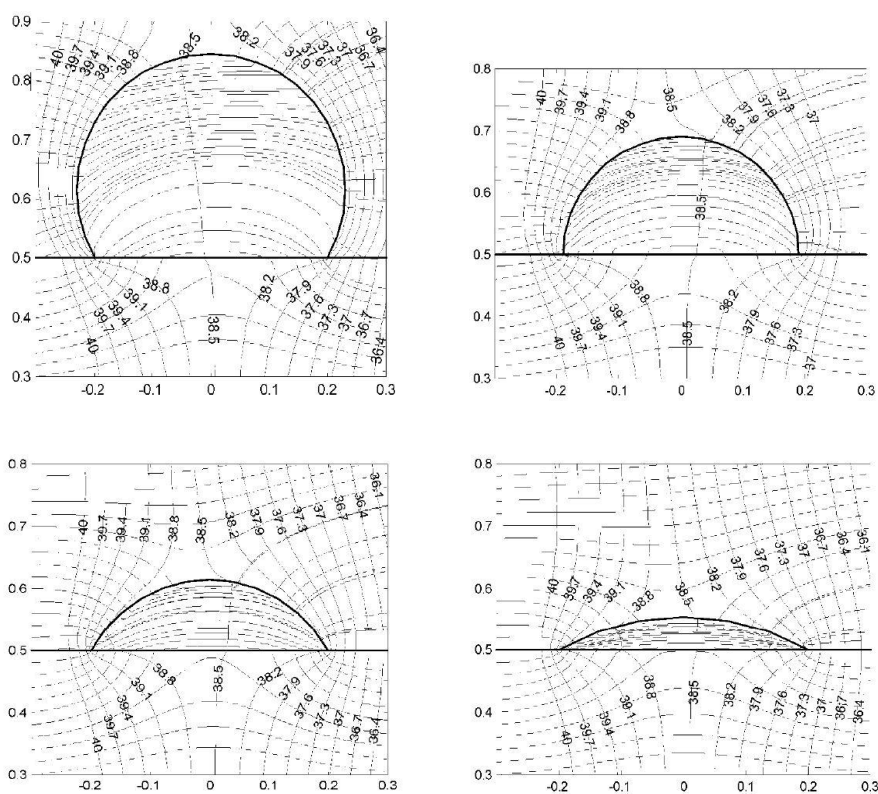
$$\psi^* = \frac{m^* - m_0}{m_0} 100$$

kde  $m^*$  je hmotnost navlhle látky. [5]

## 4.2.1 Vodní kapka na povrchu izolátoru

V praxi můžeme navlhávání identifikovat jako usazování malých kapek vody na povrchu nebo v pórech izolátoru. Čím jsou vodní kapky vedle sebe blíže, tím větší měrou je zvýšena hodnota elektrického pole. Velikost kapek přitom závisí zejména na vlhkosti okolí izolátoru a na době, po kterou je povrch tomuto prostředí vystaven. A to tak, že čím větší je objem vodního tělesa na povrchu izolátoru, tím více dochází na tomto místě ke zvýšení hodnoty elektrického pole. Podle různé hydrofobicity povrchu izolátoru se mění i kontaktní úhel vodní kapky, která povrch smáčí. Pro porovnání jsou uvedeny čtyři typické hodnoty kontaktního úhlu a to 120, 90, 60 a 30 stupňů. Průměr kruhové kontaktní plochy následující ukázky je všude stejný 4 mm. Relativní permitivita vodní kapky je 80 a její konduktivita je považována za nulovou.

Na obrázku 4.1 je pohled na ekvipotenciální plochy a siločáry elektrického pole kolem kapky pro tyto čtyři případy. Oblasti s rozdílným potenciálem jsou na obrázku 15 odděleny plnou čarou, čárkovaná je pro vyznačení siločar elektrického pole. Z obrázku lze pozorovat, přímou závislost mezi velikostí kontaktního úhlu a mírou zkreslení ekvipotenciálních ploch. Nejvyšší hodnoty elektrického pole na povrchu kapky získáme při smáčecím úhlu 120°, naopak nejmenší při úhlu 30°.



Obrázek 4.1 Ekvipotenciální plochy a siločáry kolem vodní kapky s kontaktním úhlem 120, 90, 60 a 30 stupňů.

Lze tedy říci, že hodnota elektrického pole se zvětšuje s kontaktním úhlem vodní kapky. Tato závislost je téměř lineární. Ačkolí v praxi není tvar kapky nikdy sférický, lze podle kontaktního úhlu odhadnout zvětšení elektrického pole na povrchu izolátoru.

## 5 KERAMICÉ MATERIÁLY

Stěžejní oblastí této diplomové práce jsou elektricky izolační materiály. Pro jejich vlastnosti a dostupnost na trhu budou dále uvažovány pouze izolátory z keramických materiálů. Konkrétně bude blíže zkoumána a testována keramika oxidová, pro svoje dobré elektrické, tepelné a mechanické vlastnosti. Tato kapitola má tedy za úkol přiblížit dělení, složení, vlastnosti nebo povahu keramických materiálů.

Keramika se vyznačuje dobrými elektroizolačními vlastnostmi, časovou stálostí vlastností a odolností proti vysokým teplotám, proti náhlým změnám teploty, chemickým a povětrnostním vlivům a vlhkosti. Keramika má značnou tvrdost. Obvykle bývá křehká. Její mechanická pevnost v tlaku je většinou o řád větší než mechanická pevnost v tahu. Vzhledem k smrštění při výpalu je obtížné keramické součásti vyrábět s větší rozměrovou přesností bez dodatečného obrábění – broušení.

Tvárlivé suroviny pro výrobu keramických materiálů kaolín a jíly dávají ve spojení s vodou tvárnou látku. Tyto suroviny jsou základem klasických křemičitanových keramik jako porcelán, kamenina a mullitová keramika. K důležitým přírodním netvárlivým surovinám patří křemen (ostřivo) a živec (tavivo). K chemicky připraveným surovinám patří např. oxid uhličitý, oxidy Al, Ti, Zr, Sn, Zn. K pomocným surovinám patří voda, vodní sklo, lisovací oleje, škrob, cement, soda, pryskyřice.

Tradiční výroba je založena na použití jemných plastických zemin, jako je kaolín a různé jíly. Sem patří především keramika silikátová, jejímiž hlavními představiteli jsou porcelán, kamenina, šamot, horečnaté materiály a další. Vlastnosti těchto látek jsou do značné míry dány užitými přírodními surovinami z konkrétního naleziště. U technické keramiky potřebujeme naproti tomu pro dosažení určité vlastnosti přesné a neměnné složení. Důležitá je zejména keramika oxidová a neoxidová. Oxidová keramika je tvořena úplně nebo převážně jedním oxidem. Nejznámější je slinutý korund  $Al_2O_3$ , velký technický význam má také  $ZrO_2$ ,  $MgO$ ,  $BeO$  a další. Neoxidová keramika zahrnuje karbidy, nitridy, boridy aj. Pro konstrukční aplikace za vysokých teplot je významný především karbid křemíku  $SiC$  a nitrid křemíku  $Si_3N_4$ . V novější době se přechází i k vytváření složitějších materiálů.

Struktura keramických materiálů je obecně heterogenní, polykrystalická a polyfázová. Je proto nutné sledovat vždy jednak charakter a vzájemné uspořádání různých fází (makrostrukturu), jednak uspořádání částic hmoty v jednotlivých fázích (mikrostrukturu, resp. krystalovou strukturu). Keramika obsahuje zpravidla více krystalických fází a často i fáze skelné, vzniklé roztavením taviv a sklotvorných složek. Kromě toho bývá přítomno větší nebo menší množství pórů. Mezi hlavní znaky mikrostruktury patří typy přítomných fází, resp. rozdělení jejich velikosti, tvar zrn a vzájemná orientace, spojení zrn mezi sebou, popř. vzájemný vztah zrn a skelné fáze, dále velikost a tvar pórů, jejich rozmístění apod.

Z makroskopického hlediska se keramické materiály jeví jako homogenní, s vlastnostmi stejnými ve všech směrech. Tato izotropie je způsobena tím, že jednotlivá krystalická zrna jsou navzájem uspořádána náhodně. Jde o materiál polykrystalický, s krystaly různých druhů, jejichž vlastnosti mechanické, tepelné a jiné se navzájem liší. Uvnitř jednotlivých zrn se tyto vlastnosti liší i v různých směrech téhož krystalu.

Důsledkem toho může být mimo jiné vznik různých pnutí mezi jednotlivými krystalky, tzv. mikronapětí, která ovlivní zejména mechanické vlastnosti. Význam má i velikost krystalických zrn, jejich orientace a způsob spojení nebo zabudování do základní hmoty. Zde se značně projevuje přítomnost skelné fáze. Vlastnosti skel se všeobecně liší od vlastností krystalických látek a navíc mají i odlišný teplotní průběh (např. plynulé měknutí při ohřevu), přičemž rozdíly jsou i mezi jednotlivými druhy skel. Důležité jsou i póry, které se v keramickém střepu uplatňují zcela specifickými vlastnostmi (nulová hmotnost a tuhost, tepelná vodivost atd.). Výrobky konstrukční keramiky jsou zhotovovány z čistých surovin, vynikají nízkou pórovitostí a nízkým podílem amorfní fáze. [4]

## 5.1 Vybrané vlastnosti keramiky

Vlastnosti keramických materiálů jsou většinou závislé na jejich struktuře, která úzce souvisí s vlastnostmi výchozích látek (surovin) a použitou technologií (zpracování, tvarování). Struktura je značně ovlivněna:

- iontovou distribucí tj. krystalickou nebo amorfní strukturou (mikrostrukturou),
- velikosti části,
- distribucí zrn,
- přítomností různých fází.

Keramika může obsahovat různě orientované krystaly jedné fáze. Pokud však systém obsahuje více jak jednu fázi je obsah krystalů různého složení a většinou obsahuje skelnou fázi. Distribuce pórů je většinou podél hranic a uvnitř zrn, mikrotrhliny jsou obvykle podél hranic zrn. Individuální krystal má anizotropní mechanické vlastnosti.

Příprava keramiky vede k náhodné orientaci zrn a z makroskopického hlediska mechanické vlastnosti keramiky jsou tedy izotropní. Ovšem na mikroskopické stupnici, keramické vlastnosti jsou silně nehomogenní, částečně důsledkem orientaci zrn a také jako výsledek přítomnosti několika fází s odlišnými vlastnostmi. Z hlediska struktury a defektu mohou být mechanické vlastnosti keramiky rozděleny na dvě skupiny:

První skupina zahrnuje vlastnosti mikroskopických oblasti a závisí na jejich objemu. Tyto vlastnosti zahrnují hlavně elastické vlastnosti.

Druhá skupina zahrnuje vlastnosti, které jsou vysoce strukturně senzitivní způsobené přímo strukturními defekty, buď krystalickou strukturou (dislokace) nebo mikrostrukturou (mikrotrhliny). Tyto vlastnosti zahrnují plastickou deformaci a pevnost. Pochopení těchto vlastností je založeno na znalostech reálné struktury keramiky s jejími defekty a mikroskopických procesů, které v systému vznikají. [8]

## 5.2 Mechanické vlastnosti keramiky

### 5.2.1 Pevnost

Pevnost keramických materiálů může být ovlivněna přítomností fyzické vady v materiálu, jako jsou škrábance, vnitřní cizorodými látkami a krystaly s abnormálním růstem zrn. Větší keramické komponenty mají tendenci mít větší vnitřní vady, srovnání s menšími. Hlavní rozdíl mezi kovy/plasty a keramikou je, že pevnost keramiky je významně ovlivněna změnami během výroby a výrobních procesů, zatímco pevnost kovů a plastů je určena vnitřními vlastnostmi materiálu. Skutečná pevnost materiálu je nižší než vyjádřena hodnota, protože napětí je koncentrováno v defektech (trhlinách) místo v materiálu. Snižování pevnosti je ovlivněno zvyšováním defektu v materiálu. Pevnost je klasifikována: na pevnost v ohybu, tahu, tlaku, smyku, krutu. Za normální teploty dochází u keramických materiálů ke křehkému lomu. Je to lom nestabilní. Křehký lom probíhá při nepatrné plastické deformaci materiálu tělesa, která je zpravidla lokalizována v oblasti okolí trhliny. Vlastnosti trhliny závisí na způsobu, jakým vznikla. Mechanická pevnost keramiky v oblasti křehkého chování je především závislá na hodnotě Youngova modulu pružnosti a dále na měrné lomové energii, homogenitě materiálu a teplotním napětí. [8]

### 5.2.2 Pružnost

Pokročilé keramické materiály mají vysokou tuhost, která je definována pružností vzorku po jeho zatížení. Materiály, které vykazují menší pružnou deformaci při zatížení, mají vyšší tuhost. Až do kritického namáhání tahovou nebo tlakovou silou se keramické těleso chová podle Hookova zákona, to znamená, že deformace je přímo úměrná napětí. Mechanické vlastnosti keramiky porovnáním s kovy je často omezeno poměrně nízkou mechanickou pevností a křehkostí. Za normální teploty se při působení vnější síly u keramických těles projevuje relativně nízká vratná deformace a po překročení jejich pevnosti dochází ke křehkému lomu. Uvedený vztah je pro izotropní materiál, ale je možné je použít i pro polykrystalické keramické materiály. Mechanická pevnost keramiky je ovlivněna proměnnými a to především mikrostrukturou materiálu, vnitřní teplotní napětí, stav materiálu, teplota, relativní vlhkost, působící síly na těleso. Důležitou veličinou je mechanická pevnost v tahu nebo v tlaku. Youngův modul pružnosti ovlivňují faktory pórovitost a množství a mechanické vlastnosti jednotlivých fází. Pevnost v tlaku je mnohonásobně vyšší než pevnost v tahu. [8]

### 5.2.3 Tvrdost

Tvrdost keramiky se stanovuje podle Vickerse. Tvrdost podle Vickerse (obr. 2) se vyjadřuje bezrozměrně je určena poměrem vlačovací síly  $F$  a povrchu vtisku. Do materiálu se vtláčeje pod zatížením silou  $F$  (působí kolmo na povrch vzorku) diamantový pravidelný čtyřboký jehlan o daném vrcholovém úhlu mezi protilehlými stěnami po danou dobu. Následně se změří střední délka u obou úhlopříček vtisku. Důsledkem extrémní tvrdosti se zvyšuje odolnost proti opotřebení. Tvrdost oxidu hlinitého keramiky je téměř třikrát vyšší než u nerezové oceli, karbidu křemíku je čtyřikrát tvrdší než nerezová ocel. Tato extrémní tvrdost je jedním z mnoha unikátních vlastností pokročilé keramiky využívanou v moderních technologiích. [8]

## 5.3 Tepelné vlastnosti keramiky

Mezi základní tepelné vlastnosti materiálu, které jsou ovlivněny teplem a to jak, teplem tak teplotou patří specifická tepelná kapacita, teplotní roztažnost, tepelná vodivost a teplotní vodivost. [8]

### 5.3.1 Tepelná odolnost

Tepelná odolnost je schopnost materiálu odolávat vysokým teplotám, a teplotním šokům. Běžná keramika, včetně cihel a dlaždic, jsou dobře známé pro svou schopnost odolávat vysokým teplotám. Nicméně pokročilé keramiky jsou tepelně mnohem odolnější např. oproti běžné keramice a oproti kovům. Zatímco hliník začne tát na přibližně 660°C, ale korundová keramika na bázi  $\text{Al}_2\text{O}_3$  začíná s tavením nad 2000°C. Tyto žáruvzdorné vlastnosti keramiky jsou měřeny při teplotách, při kterých dochází k tavení materiálu. Odolnost proti náhlým změnám je schopnost materiálu odolávat náhlým změnám teploty. Například nitridu křemíku má vynikající odolnost proti tepelnému šoku, proto se  $\text{Si}_3\text{N}_4$  je tedy vhodný pro aplikace, kde jsou extrémní změny teplot. [8]

### 5.3.2 Teplotní roztažnost

Teplotní roztažnost definuje rozměrové změny materiálu při jeho zahřívání. Tyto změny mohou být vratné nebo nevratné (trvalé):

- vratné jsou způsobeny změnami vzdálenosti atomů v tuhé látce v důsledku přírůstků tepelné energie (vzdálenosti se zvětšují), vratné rozměrové změny stanovením teplotní roztažnosti,
- nevratné rozměrové změny vznikají jako důsledek slinovacích procesů a nevratných fázových přeměn, nevratné změny se zjistí stanovením trvalých délkových změn v žáru.

Materiál expandující v závislosti na změně teploty má koeficient tepelné roztažnosti. Koeficient poměru tepelné roztažnosti udává, kolik materiálu se rozšiřuje o 1°C v závislosti na nárůstu teploty. Pokročilá keramika má nízký koeficient tepelné roztažnosti. Tedy deformační hodnoty, s ohledem na změny teploty. Koeficienty tepelné roztažnosti závisí na pevnosti vazby mezi atomy, které tvoří materiály. Kovalentní materiály, jako je diamant, karbid křemíku a nitrid křemíku mají silné vazby mezi atomy, což vede k nízkému koeficientu tepelné roztažnosti. Naopak materiály, jako například ušlechtilé oceli mají slabší vazby mezi atomy, což má za následek vyšší koeficienty tepelné roztažnosti. [8]

### 5.3.3 Měrné teplo

Měrné teplo (specifická tepelná kapacita) je definována jako množství tepla potřebné k ohřátí hmotnostní jednotky materiálu o jednotku teplotního rozdílu a vyjadřuje se v  $\text{J}\cdot\text{g}\cdot\text{K}^{-1}$ . Znalost hodnot specifické tepelné kapacity je potřebná při výpočtech akumulovaného tepla ve vyzdívkách a při výpočtech nestacionárního přestupu tepla vyzdívkami. Specifická tepelná kapacita závisí na fázovém složení, přičemž jde o aditivní veličinu, to znamená, že můžeme specifickou tepelnou kapacitu vícefázové

soustavy vypočítat ze specifických tepelných kapacit jednotlivých fází. [8]

### 5.3.4 Tepelná vodivost

Definuje se jako hustota tepelného toku při daném teplotním gradientu a vyjadřuje se koeficientem tepelné vodivosti  $\lambda$  ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ), definovaným jako množství tepla  $Q$  v joulech (J), které projde za časovou jednotku (s) jednotkovou vrstvou materiálu (m) s jednotkovým průřezem ( $\text{m}^2$ ) při jednotkovém rozdílu teplot (K). Koeficient tepelné vodivosti představuje velmi důležitou fyzikální konstantu keramických, potřebnou k výpočtům přestupu tepla žáruvzdornými vyzdívkami, k výpočtům přípustných rychlostí ohřevu, nebo chlazení žáruvzdorných staviv a při posuzování odolnosti proti náhlým teplotním změnám. Tepelná vodivost bezpórovitých krystalických látek se zvyšující se teplotou většinou klesá, oproti tomu tepelná vodivost sklovitých látek roste. Tepelná vodivost heterogenních soustav obsahujících krystalické a skelné fáze a póry závisí hlavně na pórovitosti a na fázovém složení. Pórovitost výrazně snižuje tepelnou vodivost, a to hlavně při nízkých teplotách. [8]

## 5.4 Elektrické vlastnosti keramiky

S rozvojem elektrotechniky se plně projevily přednosti keramických materiálů ve srovnání s ostatními materiály. Jsou odolné proti ionizujícímu záření, chemickým činidlům, náhlým změnám teplot, jsou nehořlavé a jsou mechanicky stabilní. Vykazují interval relativní permitivity o 4 řády vyšší než ostatní dielektrika. Své elektrické a magnetické vlastnosti si uchovávají do vyšších teplot než prakticky všechny ostatní materiály. Elektrické vlastnosti a magnetické vlastnosti keramiky je možno ovlivňovat chemickým složením a uspořádáním jejich mikrostruktury.

Vodivost keramických dielektrik, je funkcí chemického složení a mikrostruktury materiálů. Svou roli hraje nejen obsah, velikost, ale i orientace jednotlivých fází v materiálech. Podstatný vliv na elektrickou vodivost keramického materiálů má jeho základních fáze, matrix. Pokud je jeho spojovací fází, určuje elektrickou vodivost materiálů bez ohledu na vodivost fáze dispergované. Elektrická vodivost keramických materiálů je závislá na teplotě.

Elektrický náboj v dielektriku se obvykle vrátí do původního stavu, jakmile se odstraní vnější napájení. Dielektrika, které splňují tuto podmínku, jsou nazývána paraelektrické. Zatímco dielektrika, které zůstanou polarizována (zbytková polarizace) i po odstranění vnějšího elektrického napětí jsou nazývána feroelektrika. Piezoelektrické materiály vytvářejí napětí, jsou-li krystaly deformovány silou, zatímco pyroelektrika vytvářejí napětí, jsou-li použity krystal s teplem. Působením tepla se nabíjí povrch tělesa se spontánní polarizací. [8]

## 5.5 Konstrukční keramika

Konstrukční keramika je mnohými autory označována také jako technická keramika. Oba pojmy úspěšně zahrnují skupiny materiálů, které nahrazují ostatní materiály všude tam, kde je potřeba použít materiály se specifickými vlastnostmi. Konstrukční keramické materiály se používají v řadě technických aplikací, především v extrémních

podmínkách, kde pro své vysoce specifické vlastnosti mohou nahradit tradiční materiály s kratší užitnou životností. Vlastnosti konstrukční keramiky vycházejí z chemického a fázového složení, z charakteru vazeb. Poznání vlastností vedlo k zlepšení mechanických a lomových vlastností to té míry, že se začaly využívat v podmínkách tahových napětí při zachování tradičních vlastností, jako jsou žáruvzdornost, tvrdost, otěruvzdornost a chemická odolnost.

Tento typ keramik vyniká vysokými pevnostmi během působení vysokých teplot, nízkým koeficientem tření a nízkou hustotou. Na základě těchto vlastností lze tyto materiály aplikovat do řady odvětví a to např. vysoko a nízko teplotní aplikace ve strojírenství, metalurgii, energetice, chemii, robotika a dalších. [8]

### 5.5.1 Oxidová konstrukční keramika

Oxidovou keramikou se míní materiály tvořené jedním oxidem nebo směsí několika málo oxidů. Společným znakem těchto materiálů je, že základní výchozí látkou je syntetický práškový oxid.

Příprava směsí probíhá suchým či mokřým mletím, kde musí být minimální příměs nečistot. Tvarování se provádí suchým lisováním, plastickým způsobem s použitím organických plastifikátorů, nebo litím ze suspenze do sádrových či polymerních forem. Kromě těchto tradičních způsobů se oxidové směsi tvarují izostatickým lisováním tzv. horkým litím pod tlakem či injekčním vstřikováním aj. Slinování vytvarovaných těles probíhá při teplotách obvykle vyšších než 1300°C, většinou vyšších než 1500°C.

Oxidová keramika má vysokou pevnost, tvrdost, odolnost vůči korozi a je velmi dobrým elektrickým izolátorem. Používá se při obrábění litiny, řezné pláty k obrábění kovů, jako konstrukční materiál pro součásti vysokoteplotních zařízení, tavící kelímky, izolátory zapalovacích svíček pro motory aj. [8]

### 5.5.2 Korundová keramika na bázi $\text{Al}_2\text{O}_3$

V oblasti technické keramiky převažují výrobky z oxidové keramiky a to až 70% světového trhu. Oxid hlinitý -  $\text{Al}_2\text{O}_3$  - je jedním z nejdůležitějších a nejvíce průmyslově využívaným keramickým materiálem. Má bohatou polymorfii, v konstrukční i tradiční keramice se používá především polymorfní  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  (korund).

K výborným fyzikálním vlastnostem tohoto materiálu bezesporu patří tvrdost za zvýšených teplot, nízká tepelná vodivost, odolnost proti korozi. Hodnoty vybraných mechanických vlastností čistého  $\text{Al}_2\text{O}_3$  jsou: bod tání 2054°C, hustota 3,5 - 4,0 g·cm<sup>-3</sup>, pevnost v ohybu 150- 500 MPa, lomová houževnatost 3,5 - 4,5 MPa, modul pružnosti 200-400 MPa. Je používána v mnoha aplikacích, které vyžadují vysokou otěruvzdornost, vysokou tvrdost, chemickou odolnost (velmi dobrá odolnost proti kyselinám a zásadám). Používá se při vysokých teplotách. Nevýhodou je slabší odolnost vůči teplotním šokům, a relativní vysoká křehkost. Je nejpoužívanější používanou keramikou. Výrobky z oxidu hlinitého se uplatňují jako bioimplantáty, iontové vodiče, polovodičové zařízení, trysky, izolace, součásti odolné proti opotřebení, těla svíček ve spalovacích motorech, řezné nástroje, otěrové části (např. vodiče textilních vláken), filtry a membrány, substráty pro elektronické obvody, pancéřování aj. V monokrystalické formě se  $\text{Al}_2\text{O}_3$  využívá díky svým optickým vlastnostem na výrobu syntetických drahokamů a pro laserové aplikace. [8]

### 5.5.3 Keramika na bázi $ZrO_2$

Dalším nejrozšířenějším materiálem, po slinutém korundu, je keramika ze  $ZrO_2$ . Oxid zirkoničitý má mezi oxidovými keramikami nezastupitelné místo pro svůj vysoký bod tání  $2710^\circ C$  a jedinečnou strukturu, která umožňuje transformační zhouževnatění. Při výrobě je nejdůležitější surovinou minerál  $ZrSiO_4$ .

Jednotlivé modifikace  $ZrO_2$  se výrazně liší svou hustotou. Nejdůležitější je přeměna tetragonální fáze na monoklinickou, která je podstatou tzv. transformačně zpevněné keramiky. Transformace čistého oxidu zirkoničitého z tetragonální na monoklinickou strukturu je martenzitická a je spojena s objemovým nárůstem asi 9%, takže je prakticky nemožné připravit keramické díly z čistého oxidu zirkoničitého. Tato přeměna není vázána na jednu teplotu (je atermální), bezdifúzní a je spojena s velkou změnou objemu a tvaru zrn  $ZrO_2$ . Proto se tento oxid částečně stabilizuje asi 10 mol% jiných žáruvzdorných oxidů. Tak velká změna objemu zrn v keramickém materiálu vede ke vzniku trhlin. To je možné dosáhnout stabilizací vysokoteplotní modifikace  $ZrO_2$ . Praktický význam má stabilizace kubické modifikace přísadkou oxidu yttritého, vápenatého a hořečnatého v množství 5 - 15 hmot. % V závislosti na přísadce jiného materiálu lze dosáhnout různých materiálových vlastností. "Keramická ocel" s názvem Zirconia je dotována yttriem tvořit ultra-jemnou konstrukci se submikronovými zrny vykazující výborné pevnosti v ohybu. Přídavek  $MgO$  v této keramice vykazuje menší pevnosti a hrubší mikrostrukturu.

Oxid zirkoničitý je nejvíce odolný materiál ze všech materiálů z oxidové keramiky. Zirkonová keramika vykazuje excelentní chemickou a korozní odolnost, výbornou lomovou houževnatostí, odolnost proti opotřebení a nízkou tepelnou vodivost. Pevnosti částečně zhouževnatěného oxidu dosahují hodnot 1000 MPa. Obecné aplikace zahrnují tlakové ventily, bioimplantáty, části ložisek a válců, kuchyňské nože, součásti pro chemický a důlní průmysl. Nevýhodou je špatná odolnost k teplotním rázům, způsobená nízkou tepelnou vodivostí. Chemická stabilita je velmi dobrá, proto se keramika ze  $ZrO_2$  používá při tavení žáruvzdorných kovů a speciálních slitin. Zvláštností je poměrně vysoká elektrická vodivost, především v kombinaci s  $Y_2O_3$ . [8]

## 6 VÝBĚR MATERIÁLU PRO NÁVRH

Jako první krok návrhu, než bude řešena problematika geometrie soustavy izolátoru a vodivých částí, povrchů a samotné chování soustavy za provozu při zátěži, je třeba vyřešit otázku materiálu izolátoru.

Izolátor a vodivé části musí být schopné pracovat ve vakuu ale i ve vzduchu pod napětím až 40kV. Proto bylo z dostupných zdrojů vybráno několik druhů oxidové keramiky různých výrobců. Níže jsou porovnávány keramické materiály  $Al_2O_3$  s různým procentuelním zastoupením nečistot a  $ZrO_2$  s různými příměsemi.

### 6.1 Vliv příměsí $Al_2O_3$ na její vlastnosti

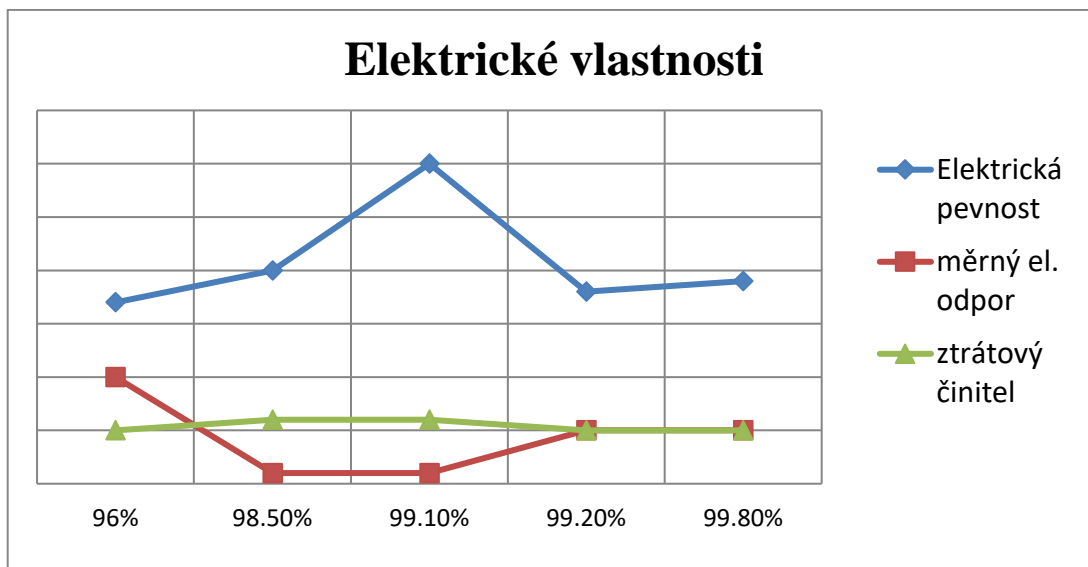
Příměsí keramických materiálů nepochybně ovlivňují vlastnosti izolátorů. Pozorováním mechanických, tepelných a elektrických parametrů lze rychle dojít k závěru, že závislosti velikostí daných veličin na úrovni čistoty materiálu  $Al_2O_3$  nejsou lineární. Některé vlastnosti keramiky dokonce nevykazují s klesajícím objemem příměsí znaky přímé úměrnosti.

#### 6.1.1 Ceramtec

Společnost Ceramtec nabízí ve svém sortimentu produktů mimo jiné izolační součásti z materiálu  $Al_2O_3$  s různým zastoupením příměsí, tedy s čistotou materiálu od 96% do 99,8%.

Tabulka 6.1 Vliv množství příměsí na vlastnosti  $Al_2O_3$  (Ceramtec)

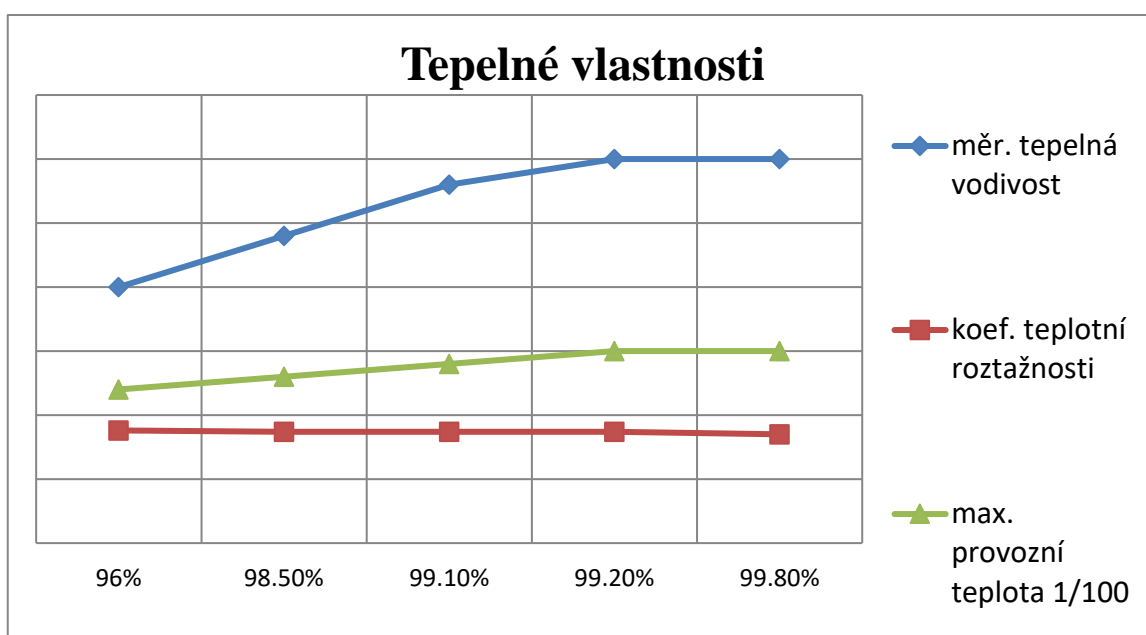
$Al_2O_3$	Parametry	96%	98,50%	99,10%	99,20%	99,80%
jednotky	Mechanické					
gm/cc	Hustota	3,75	3,83	3,82	3,95	3,96
%	Pórovitost	0	0	0	0	0
Mpa	Pevnost v tahu	310	390	300	470	630
Gpa	Young. modul elasticity	350	320	360	390	406
-	Poissonova konstanta	0,23	0,22	0,23	0,23	0,23
Mpa	Pevnost v tlaku	2500	2000	2000	4000	4000
kg/mm <sup>2</sup>	Tvrдость	1620	1600	1700	2110	2000
	Tepelné					
°C	Max. provozní teplota	1200	1300	1400	1500	1500
W/m*°K	Měr. tepelná vodivost	20	24	28	30	30
10 <sup>-6</sup> /°C	Koef. tep. roztažnosti	8,8	8,7	8,7	8,7	8,5
J/kg*°K	Měr. tepelná kapacita	900	900	900	900	900
	Elektrické					
kV/mm	Elektrická pevnost	17	20	30	18	19
at 1 Mhz	Elektrická konstanta	8	9	9	9	9
at 9 GHz	Ztrátový činitel	5,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	5,00E-03	5,00E-03
Ω*cm	Měrný el. odpor	1,00E+15	1,00E+14	1,00E+14	5,00E+14	5,00E+14



Obrázek 6.1 Graf závislosti elektrických vlastností na příměsi

Pokud uvažujeme důležité elektrické parametry, jako je elektrická pevnost, měrný elektrický odpor a ztrátový činitel (obr. 6.1), je patrné, že nelze jednoznačně určit ve všech ohledech elektricky nejlepší materiál. Pro názornost a jednoduchost porovnání mezi sebou byly hodnoty veličin normovány.

Elektricky nejpevnější a tedy nejodolnější proti průrazu bude z vybraných materiálů  $\text{Al}_2\text{O}_3$  s koncentrací 99,10%. Ten však zároveň vykazuje nejmenší měrný elektrický odpor. Rozhodující bude tedy výběr aplikace, pro kterou bude materiál použit, podle velikosti přiloženého napětí k izolátoru a izolovanému proudu.



Obrázek 6.2 Graf závislosti tepelných vlastností na příměsi

Závislosti tepelných parametrů jasně demonstrují, že s rostoucí čistotou materiálu roste i maximální teplota, ve které může izolátor pracovat (obr. 6.2). Navíc materiál s menším podílem příměsí bude na změnu teploty reagovat nejmenší změnou svého objemu. S čistotou roste i tepelná vodivost materiálu. Zde přichází na řadu rozhodnutí, v jaké aplikaci má izolátor pracovat. Konkrétněji jestli je třeba teplo od namáhané části odvádět, nebo naopak izolovat.

## 6.1.2 CSceramic

Materiál  $\text{Al}_2\text{O}_3$  od společnosti CSceramic vykazuje podobné trendy závislosti vlastností na množství příměsí. Jejich zastoupení tentokrát roste až na 6% a podle předpokladu významně ovlivňují chování materiálu v různých aplikacích (tab. 6.2).

Tabulka 6.2 Vliv množství příměsí na vlastnosti  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (CSceramic)

	$\text{Al}_2\text{O}_3$ CSceramic	94%	96,00%	99,50%
	Mechanické			
gm/cc	Hustota	3,69	3,72	3,89
%	Pórovitost	0	0	0
Mpa	Pevnost v tahu	330	345	379
Gpa	Youngův modul elasticity	300	300	375
-	Poissonova konstanta	0,21	0,21	0,22
Mpa	Pevnost v tlaku	2100	2100	2600
kg/mm <sup>2</sup>	Tvrdość	1170	1100	1440
	Tepelné			
°C	Max. provozní teplota	1700	1700	1750
W/m*°K	Měr. tepelná vodivost	18	25	35
10 <sup>-6</sup> /°C	Koef. Teplotní roztažnosti	8,1	8,2	8,4
J/kg*°K	Měrná tepelná kapacita	880	880	880
	Elektrické			
kV/mm	Elektrická pevnost	16,7	14,6	16,9
at 1 Mhz	Elektrická konstanta	9,1	9	9,8
at 9 GHz	Ztrátový činitel	-	-	-
Ω*cm	Měrný el. odpor	1,00E+14	1,00E+14	1,00E+14

Oxid hlinitý od CSceramic vykazuje pro všechny hodnoty příměsí větší odolnost pro teplotní namáhání, hůře vede teplo (kromě 99,5%) a má nepatrně menší teplotní roztažnost. Elektrická pevnost nedosahuje takových hodnot jako u Ceramtec a měrný elektrický odpor je až o řád nižší. Pro velké napěťové zatížení se tedy zdá být vhodnější produkt firmy Ceramtec, naopak vyšší teplotní odolnost slibuje keramika od CSceramic.

## 6.2 Porovnání různých 99,5% $\text{Al}_2\text{O}_3$

Při hledání vhodného materiálu bohužel nenačítáme vždy na stejnou kvalitu a identické hodnoty parametrů. Jako vzorky pro porovnávání jsou vybrány čtyři materiály

identického chemického složení s uváděnou stejnou, velmi nízkou, hodnotou příměsí 0,5% nebo méně.

Porovnávané materiály uvedené v tabulce 6.3, jsou vybrány od společností Ceramtec, CSceramic, Kyocera a Ming Rui. Hodnoty některých informací jsou zveřejněny pouze jako přibližné nebo je výrobce vůbec neuvádí.

Tabulka 6.3 Porovnání různých materiálů 99,5% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 99,5%	Ceramtec	CSceramic	Kyocera	Ming Rui
	Mechanické				
gm/cc	Hustota	3,96	3,89	>3,9	3,9
%	Pórovitost	0	0	0	0
Mpa	Pevnost v tahu	630	379	350	400
Gpa	Youngův modul elasticity	406	375	380	300
-	Poissonova konstanta	0,23	0,22	0,22	0,23
MPa	Pevnost v tlaku	4000	2600	3500	2800
kg/mm <sup>2</sup>	Tvrdość	2000	1440	1760	(HV)23,7
	Tepelné				
°C	Max. provozní teplota	1500	1750	1950	1700
W/m*°K	Měr. tepelná vodivost	30	35	34,9	32
10 <sup>-6</sup> /°C	Koef. tep. roztažnosti	8,5	8,4	8,2	-
J/kg*°K	Měrná tepelná kapacita	900	880	900	-
	Elektrické				
kV/mm	Elektrická pevnost	19	16,9	>30	14
at 1 Mhz	Elektrická konstanta	9	9,8	-	-
at 1 kHz	Ztrátový činitel	GHz) 5*10 <sup>-3</sup>	-	GHz)20*10 <sup>-4</sup>	-
Ω*cm	Měr.el.odpor (rezistivita)	5*10 <sup>14</sup>	>10 <sup>14</sup>	1,00E+16	>10 <sup>14</sup>

### Mechanické vlastnosti

Všichni zástupci vykazují téměř totožnou hustotu a nulovou pórovitost, důležitou kvůli navlhání. Výrazně se však liší v aspektech pevností v tahu i tlaku. Stejně tak je významný i rozdíl v tvrdostech materiálů, a to až o 25%. Mechanicky nejtvrďší, nejpevnější a elasticky nejtužší materiál nabízí Ceramtec.

### Tepelné vlastnosti

Maximální provozní teplota všech vzorků šplhá k nebo až nad 1500 °C. Kyocera nabízí materiál s největší odolností vůči maximální teplotě (1950 °C). Všechny materiály mají velmi podobnou tepelnou kapacitu a tepelnou konduktivitu. Jejich koeficienty teplotní roztažnosti se také liší pouze nepatrně.

## Elektrické vlastnosti

Elektricky zdaleka nejpevnější a proti průrazu nejodolnější materiál nabízí Kyocera s hodnotou průrazného napětí přesahující až 30kV/mm. Tento materiál také disponuje nejvyšší rezistivitou. Informace nejsou kompletní, ale z těch, které výrobci udávají, se jako nejvhodnější materiál izolátoru pro aplikace ve velmi silném elektrickém poli zdá být Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> od společnosti Kyocera.

## 6.3 Zirkoniová keramika ZrO<sub>2</sub>

Jako druhý vhodný zástupce byl vybrán materiál ZrO<sub>2</sub> používaný též hojně pro elektrotechnické aplikace. Všechny tři vybrané typy obsahují více než 99,7% ZrO<sub>2</sub>. Rozdíl je ale v jejich příměsi. Jako příměsové materiály jsou použity sloučeniny MgO, Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> a Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(alumina) v různých poměrech. Tabulka 6.4 tedy ukazuje závislost parametrů materiálu na typu příměsi.

Tabulka 6.4 Porovnání různých materiálů 99,7% ZrO<sub>2</sub>

	Mechanické	ZrO <sub>2</sub> , MgO	ZrO <sub>2</sub> , Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Alu	ZrO <sub>2</sub> , Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Alu
gm/cc	Hustota	5,7	5,6	6
%	Pórovitost	0	0	0
Mpa	Pevnost v tahu	500	400	1000
Gpa	Youngův modul elasticity	125	200	200
-	Poissonova konstanta	0,21	-	0,3
Mpa	Pevnost v tlaku *10	2000	2000	2200
kg/mm <sup>2</sup>	Tvrdość *10	1220	1400	1420
	Tepelné			
°C	Max. provozní teplota	900	1700	1000
W/m*°K	Měr. tepelná vodivost	3	2,5	2,5
10 <sup>-6</sup> /°C	Koef. Teplotní roztažnosti	10,4	10,5	10,5
J/kg*°K	Měrná tepelná kapacita	400	400	400
	Elektrické			
kV/mm	Elektrická pevnost	-	-	-
at 1 Mhz	Elektrická konstanta	-	-	-
at 9 GHz	Ztrátový činitel	-	-	-
Ω*cm	Měrný el. odpor	1,00E+11	1,00E+11	5,00E+10

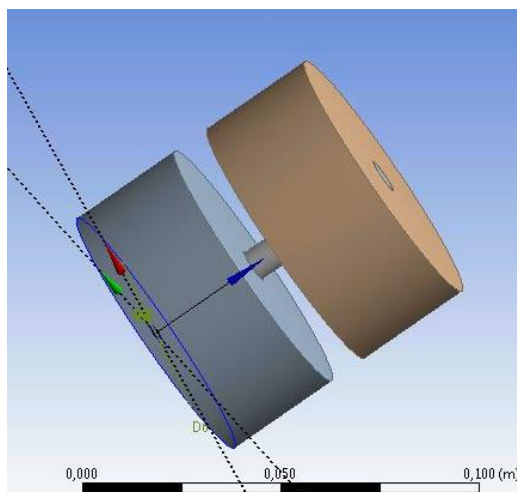
Příměsi velmi významně ovlivňují některé parametry těchto materiálů. Zejména rozdíl maximální provozní teploty je až 800°C. Zirkoniová keramika podle uváděných údajů vykazuje až o řád nižší tepelnou vodivost než Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, přibližně poloviční teplotní kapacitu a mírně vyšší teplotní roztažnost. Z elektrických vlastností je k dispozici pouze měrný elektrický odpor, který se pohybuje přibližně o tři řády níže, než měrný elektrický odpor materiálu Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Z toho důvodu je pro tuto aplikaci keramika na bázi Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> vhodnější.

## 7 NÁVRH GEOMETRIE SESTAVY

Pro vyšetření chování elektrického pole sestavy byl použit program s metodou konečných prvků Agros 2D, který disponuje možností statické elektrické analýzy. Účelem simulace rozložení intenzity elektrického pole je zkoumání kritických oblastí sestavy a možnost odhalení elektricky nejvíce namáhaných míst, pro zamezení rizika elektrického výboje mezi elektrodami a dočasného nebo dokonce trvalého poškození izolátoru potažmo celého zařízení. Zvolenými výchozími hodnotami materiálových vlastností pro teplotu 20°C v prováděných simulacích jsou:

- permitivita vakua  $\epsilon_0 = 8,85419 \cdot 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$
- relativní permitivita vzduchu  $\epsilon_{\text{vzduchu}} = 1,00054$
- relativní permitivita  $\text{Al}_2\text{O}_3$   $\epsilon_{\text{Al}_2\text{O}_3} = 25$

Jednoduchá výchozí sestava se skládá ze dvou částí – vodivé a izolační. Vodivou část prezentují dva kovové rotačně symetrické segmenty s různým potenciálem, tedy dvě elektrody. Mezi nimi je umístěna izolační část, a sice keramický izolátor v podobě tyče o průřezu 4 mm (obr. 7.1).

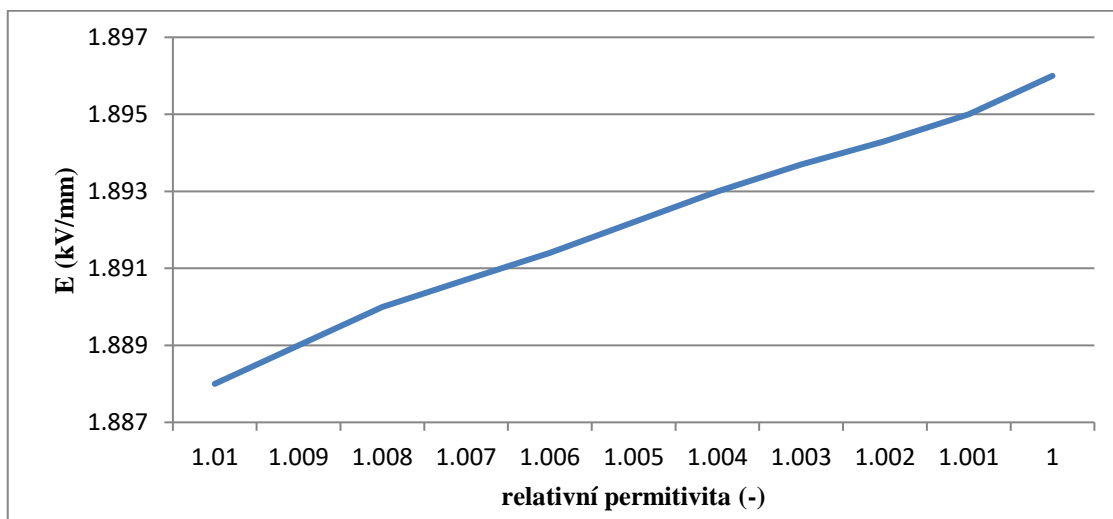


Obrázek 7.1 Výchozí geometrie simulované sestavy

Vzhledem ke konfiguraci sestavy nezávisí její funkčnost pouze na vlastnostech materiálu izolátoru. Z náhledu na sestavu na obrázku 7.1 je zřejmé, že se jedná o případ, kdy od sebe elektrody nejsou zcela odděleny izolátorem – tzn. izolátor nevyplňuje celý prostor mezi elektrodami a tedy izolační schopnost se neposuzuje pouze podle izolačních vlastností keramiky.

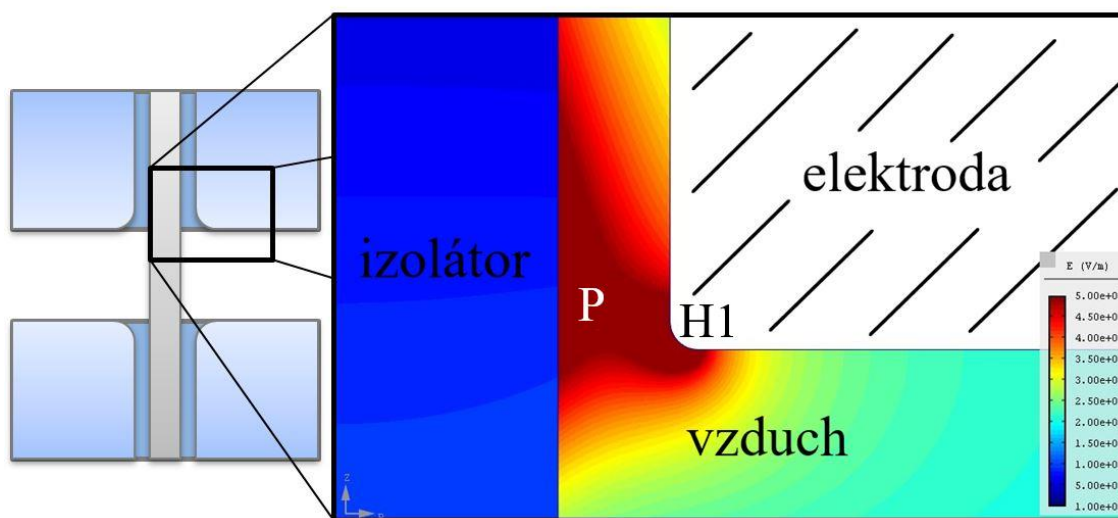
Izolační schopnost je závislá také na vlastnostech prostředí, ve kterém je sestava umístěna. Vzduch a vakuum budou svojí rozdílnou látkovou hustotou způsobovat jiné rozložení elektrických sil. Permitivita tohoto prostředí závisí také na dalších faktorech, jako jsou vlhkost nebo jiné nečistoty. Protože vzduch, potažmo vakuum zastupují velkou měrou podíl na objemu izolační vrstvy, je jejich schopnost odolávat lavinové ionizaci důležitým parametrem pro mezní funkčnost celé sestavy.

Na obrázku 7.2 je zobrazena závislost maximální hodnoty intenzity elektrické energie podél povrchu izolátoru na permitivitě prostředí, ve kterém je sestava umístěna. S klesající permitivitou prostředí hodnota intenzity lineárně roste, jak je z obrázku na první pohled patrné. Napětí na elektrodách, pro které byly simulace prováděny, je 20 kV. Pro toto napětí se hodnota intenzity při snížení permitivity o 0,01 zvýší přibližně o 9 V/mm.



Obrázek 7.2 Graf závislosti maximální hodnoty intenzity elektrického pole na relativní permitivitě plynného prostředí

První kritickým místem sestavy je oblast mezi izolátorem a vnitřní hranou elektrody *H1*, na obrázku 7.3 pojmenovaná jako oblast *P*. Obrázek je 7.3 nabízí detail na pohled v řezu sestavou. Protože je sestava rotačně symetrická podle osy tyče izolátoru, můžeme si představit, že má tato oblast *P* v trojrozměrném prostoru tvar prstence, který se ohraničen zevnitř izolační tyčí a zvenčí elektrodou. Na obrázku 7.3 lze pozorovat rozmístění intenzity elektrického pole v řezu sestavy v okolí zaoblené hrany elektrody *H1*.



Obrázek 7.3 Pohled na rozložení intenzity elektrického pole v kritické oblasti u vnitřního rohu elektrody

Vhodný návrh modifikace geometrie vnitřní hrany elektrody *HI* je předpokladem pro správnou funkčnost sestavy a zamezení vzniku elektrického výboje mezi elektrodami vzduchem nebo po povrchu izolátoru. Mezi nejvýznamnější parametry ovlivňující rozložení elektrického pole a maximální hodnotu intenzity pole patří vedle materiálových vlastností také zejména minimální vzdálenost mezi elektrodami, vzdálenost mezi elektrodou a izolátorem a poloměr hrany *HI* elektrody.

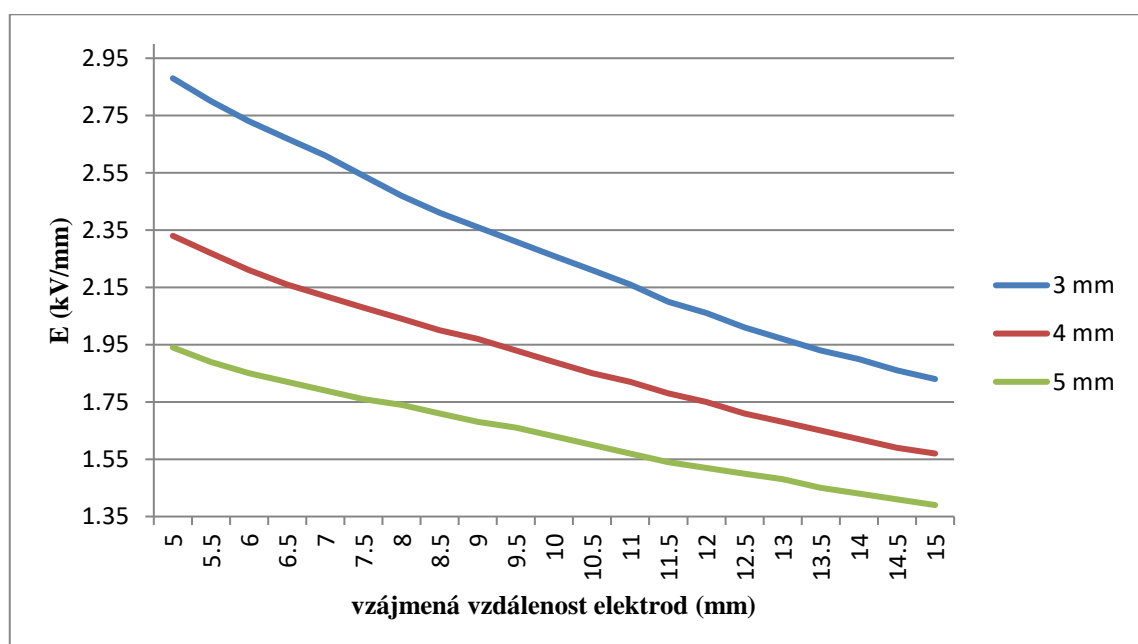
## 7.1 Geometrické parametry elektrody

### 7.1.1 Minimální vzdálenost mezi elektrodami

Dvě elektrody s různým potenciálem kolem sebe vytvářejí silové elektrické pole a na sebe tak působí elektrickými silami. Velikost síly, jakou působí jedna elektroda na druhou, můžeme odvodit ze vztahu pro vzájemné silové působení dvou bodových nábojů  $Q_1$  a  $Q_2$ :

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1 Q_2}{r^2}$$

Z rovnice je patrné, že svojí roli ve výsledné velikosti elektrické síly hraje vzdálenost těchto nábojů, zastoupena konstantou  $r$ . Na obrázku 7.4 je graficky znázorněno, jak vzájemná vzdálenost elektrod ovlivňuje intenzitu elektrického pole v kritické oblasti *P* (obr. 7.3) po povrchu izolátoru. Simulace byly prováděny pro tři různé hodnoty minimální vzdálenosti mezi elektrodou a tyčí.

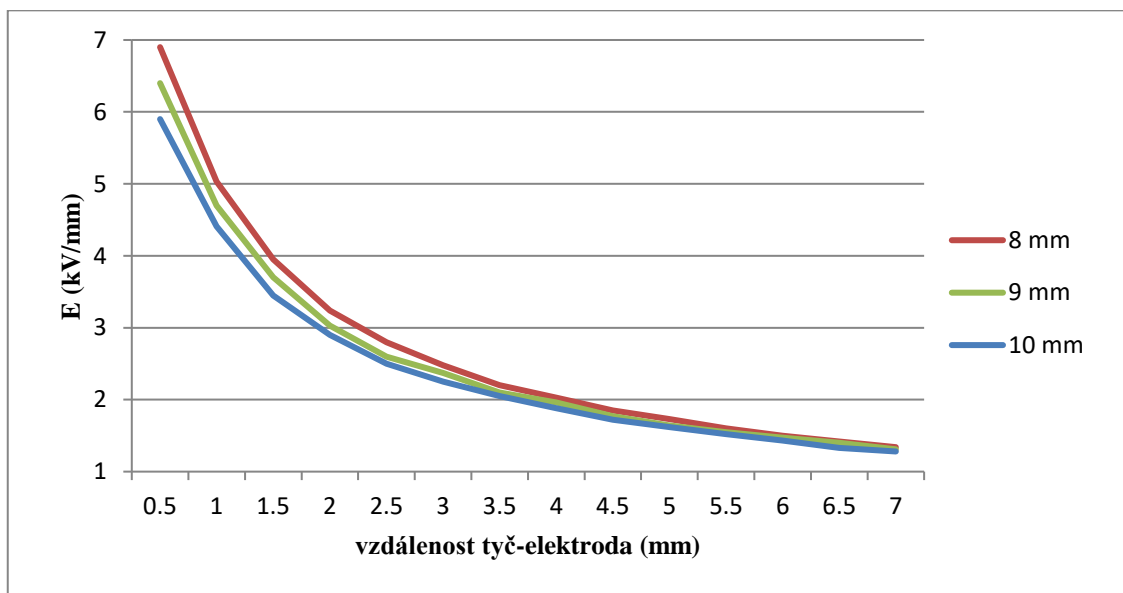


Obrázek 7.4 Graf závislosti maximální hodnoty intenzity elektrického pole na povrchu izolátoru na minimální vzdálenosti vnitřních stěn elektrod

Z průběhů křivek je patrné, že se zvyšující se vzdáleností mezi elektrodami klesá hodnota intenzity a to v trendu podobajícím se lineárnímu. Strmost klesání je tím větší, čím nižší je minimální vzdálenost mezi elektrodami a izolační tyčí. Pro vzdálenost izolátor-elektroda 3 mm je v grafu rychlost změny největší, pro vzdálenost 5 mm naopak nejmenší.

### 7.1.2 Vzdálenost mezi elektrodou a izolátorem

Velikost intenzity elektrického pole v kritických prstencích (oblast *P* na obrázku 7.3) u vnitřní hrany *HI* elektrody je ovlivněna mimo materiálových vlastností také vzdáleností mezi touto hranou a povrchem izolátoru. Křivky této závislosti jsou vyneseny do grafu na obrázku 7.5. Simulace byly provedeny pro tři různé minimální vzdálenosti mezi elektrodami.



Obrázek 7.5 Graf závislosti maximální hodnoty intenzity elektrického pole na povrchu izolátoru na minimální vzdálenosti mezi elektrodou a izolátorem

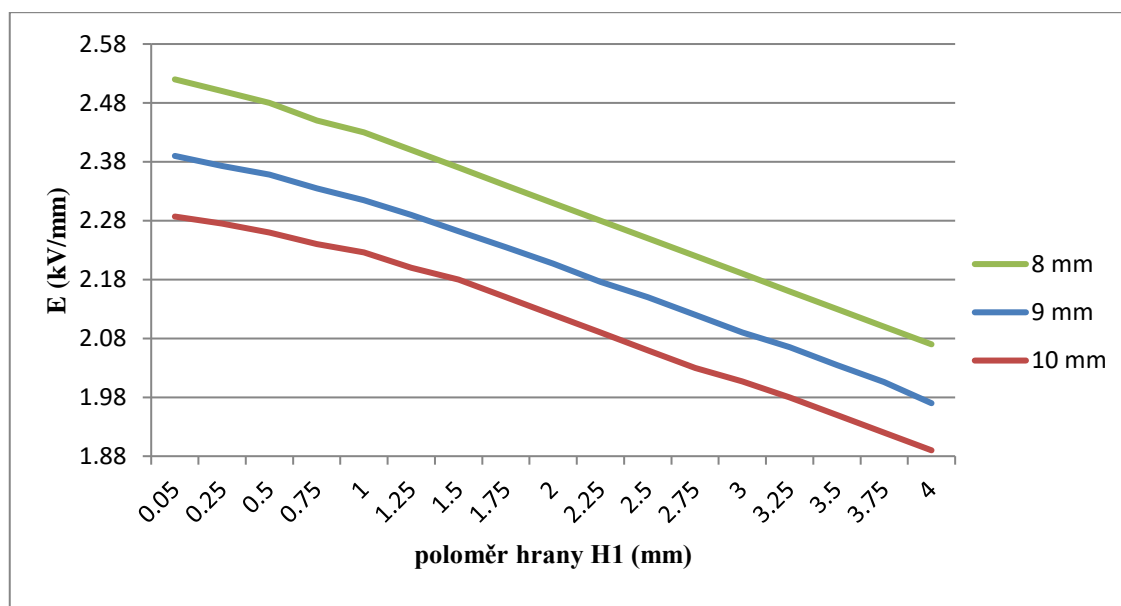
Se zvyšující se vzdáleností mezi elektrodou a izolátorem maximální hodnota elektrické intenzity exponenciálně klesá. Strmost tohoto trendu je opět přímo úměrná vzdálenosti mezi elektrodami – čím jsou elektrody blíže, tím prudší je pokles hodnoty intenzity pole.

### 7.1.3 Velikost poloměru vnitřní hrany elektrody

Mezi dvěma ideálně plochými a rovnoběžnými plochami elektrod s rozdílným potenciálem můžeme pozorovat elektrické pole se siločárami kolnými k těmto plochám. Každá nerovnost na těchto plochách pak znamená zakřivení siločar a změnu hustoty energie v okolí těchto nerovností. Takové zakřivení vždy ovlivňuje hodnotu

intenzity elektrického pole tím více, čím je deformace roviny radikálnější. Pokud je plochý povrch záporně nabitě elektrody deformován směrem k ploše s vyšším elektrickým potenciálem, dochází v okolí této deformace k prudkému navýšení intenzity elektrického pole mezi elektrodami. To samé platí pro kladně nabitou elektrodu s modifikací povrchu směrem k nižšímu elektrickému potenciálu.

Kritická oblast  $P$  sestavy je tak silně ovlivněna poloměrem hrany  $H1$  elektrody, kolem které dochází k rapidnímu nárůstu hodnoty intenzity elektrického pole. Na obrázku 7.6 je graficky znázorněna závislost maximální intenzity pole této oblasti na velikosti poloměru hrany  $H1$  elektrody pro tři různé vzájemné vzdálenosti elektrod.



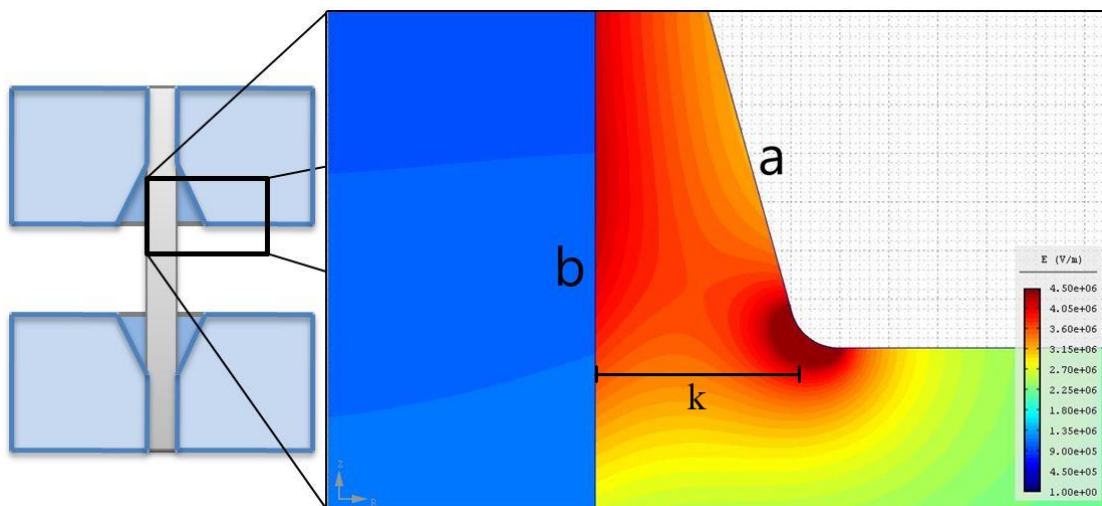
Obrázek 7.6 Graf závislosti maximální hodnoty intenzity elektrického pole na povrchu tyče na velikosti poloměru rohu elektrody

Se zvětšujícím se poloměrem hrany  $H1$  se snižuje maximální hodnota intenzity na povrchu izolátoru. Změna hodnoty je konstantní pro všechny tři simulované typy sestavy se vzdáleností elektrod 8 mm, 9 mm a 10 mm. Pokles intenzity je pro napětí 20 kilovoltů při zmenšení poloměru hrany o 1 mm přibližně 0,9 kV/mm.

## 7.2 Kosená hrana

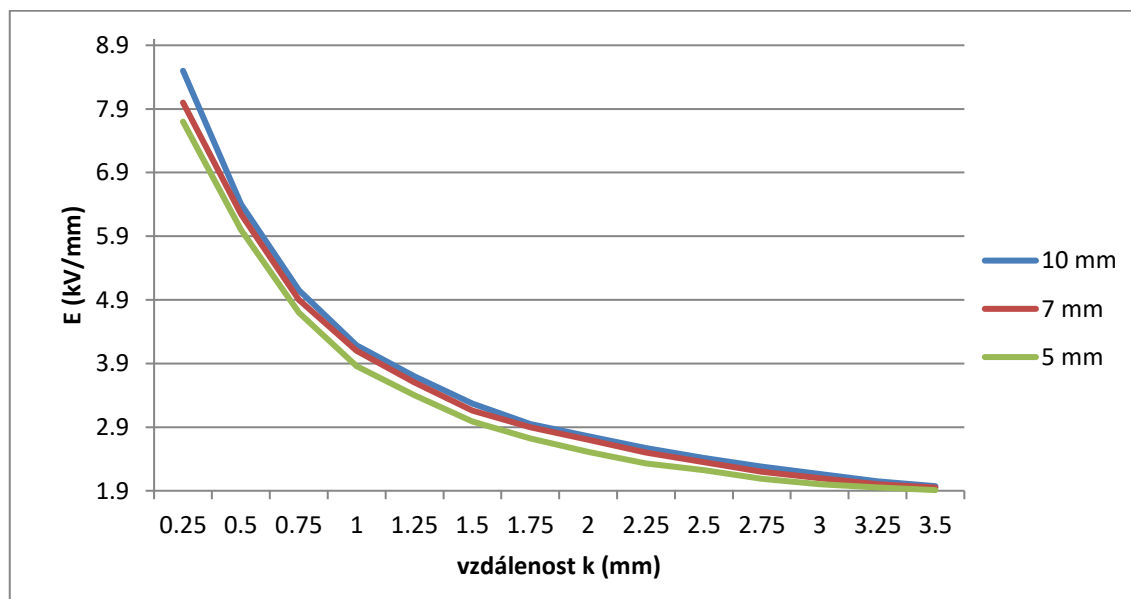
Cílem návrhu je nalezení takové modifikace tvaru elektrody, při které bude sestava pod zátěží vykazovat nejlepší elektrické vlastnosti, zejména ve vztahu ke schopnosti zabránit průrazu izolantem mezi elektrodami. Tyto geometrické modifikace se musí pohybovat do poloměru 6 mm od osy, kolem které je sestava rotačně symetrická.

Prvním typem je modifikace se zkosenou hranou. Elektrody jsou ve výchozí podobě sestavy v těsném kontaktu s izolační tyčí. Zkosením kontaktní stěny tak dosáhneme zvětšení vzdálenosti mezi izolátorem a kritickým rohem elektrody. Na obrázku 7.7 je pohled v řezu sestavou se zkosenou hranou, na plochu protínající osu souměrnosti sestavy.



Obrázek 7.7 Pohled na rozložení intenzity elektrického pole v kritické oblasti u vnitřního rohu elektrody

Prvním parametrem modifikace s koseným rohem je míra odklonu plochy elektrody (plocha *a*) od tyče (plocha *b*) určená na obrázku vzdáleností *k*. Na obrázku 7.8 je graficky vyobrazena závislost maximální hodnoty intenzity elektrického pole po povrchu tyče na vzdálenosti hrany elektrody od tyče *k* pro tři různé hodnoty zahloubení při konstantní vzájemné vzdálenosti elektrod 10 mm s poloměrem vnější hrany 0,5 mm.



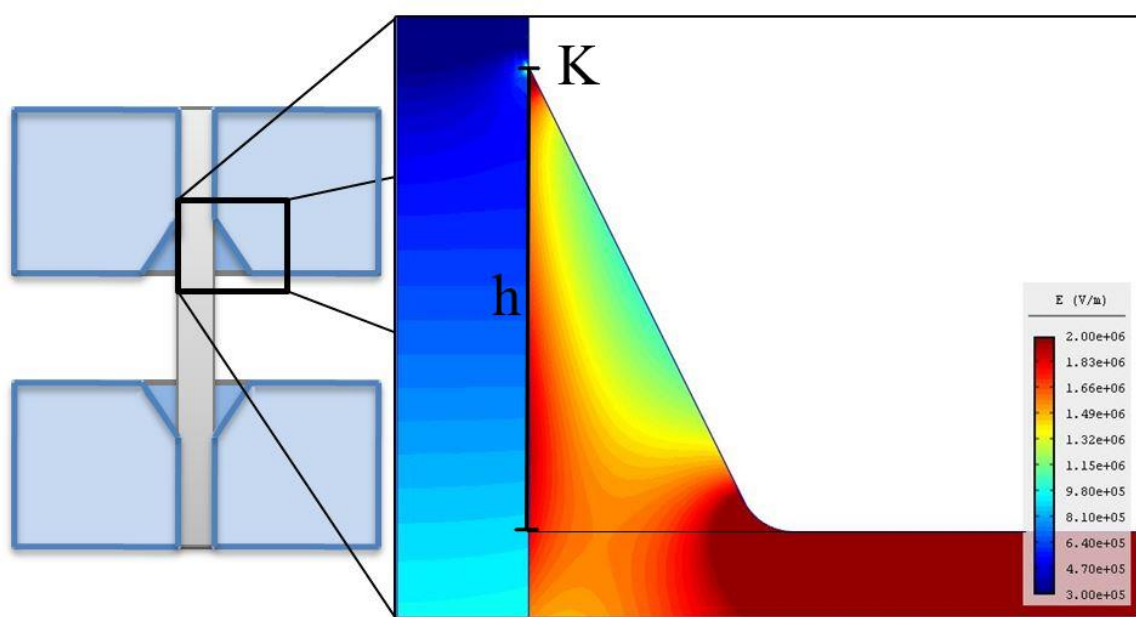
Obrázek 7.8 Graf závislosti maximální hodnoty intenzity elektrického pole na vzdálenosti hrany elektrody od tyče

Z průběhu křivek je patrné, že s klesající vzdáleností *k* mezi izolátorem a hranou elektrody roste hodnota intenzity po povrchu tyče exponenciálně. Nejvyšší hodnoty nabývá při maximální povolené vzdálenosti 3,5 mm (s 0,5mm rohem).

Při vzdálenosti blížící se nule, by se hodnota elektrické intenzity limitně blížila k nekonečnu. Tento závěr koreluje s pozorovanými výsledky v grafu na obrázku 7.5, matematicky ho lze vyjádřit jako:

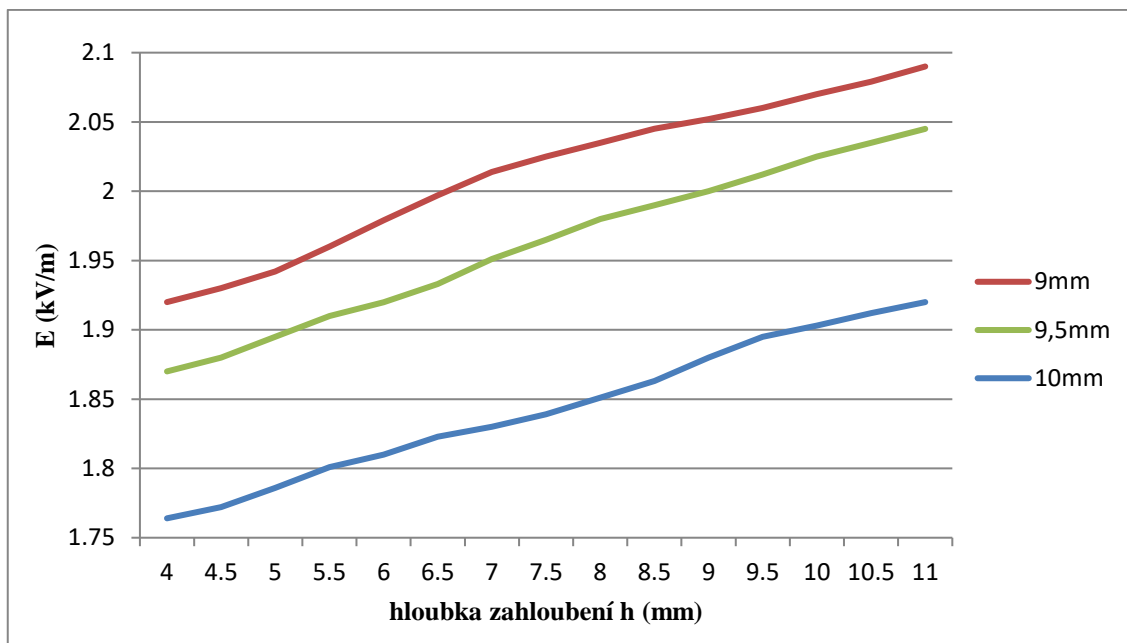
$$\lim_{k \rightarrow 0} E = \infty$$

Kde  $k$  je délka normály mezi povrchem izolátoru a hranou elektrody. Dalším parametrem je hloubka výřezu  $h$ , vyznačená na obrázku 7.9. Jde o vzdálenost mezi kontaktem izolátoru s elektrodou (bod  $K$ ) a prodlouženou plochou v rovině vnitřní stěny elektrody. (viz. obr. 7.9)



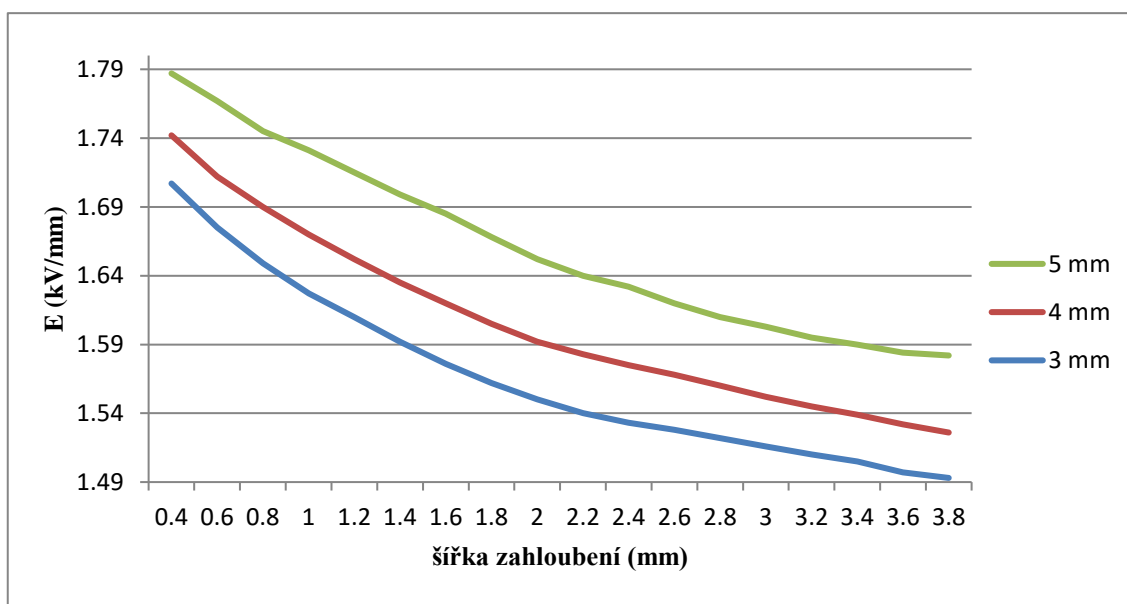
Obrázek 7.9 Pohled na rozložení intenzity elektrického pole v kritické oblasti u vnitřního rohu elektrody s parametrem hloubky výřezu  $h$

Na obrázku 7.10 jsou v grafu vyneseny křivky závislosti maximální hodnoty intenzity po povrchu tyče na hloubce zahloubení  $h$  pro rozdílné vzájemné vzdálenosti elektrod – 9 mm, 9,5 mm a 10 mm. Konstantní je pro tyto tři závislosti šířka zahloubení  $k$  (z obrázku 7.7) i poloměr hrany elektrody. Maximální hodnota intenzity elektrického pole roste úměrně se zvětšující se hloubkou zahloubení. Z grafu lze vidět, že strmost stoupání intenzity při zvyšování hloubky zahloubení  $h$  je pro různé vzdálenosti elektrod téměř totožná. Nelineární je změna hodnoty při změně vzdálenosti elektrod. Hodnota intenzity se mění více, pokud je výchozí vzájemná vzdálenost elektrod vyšší.



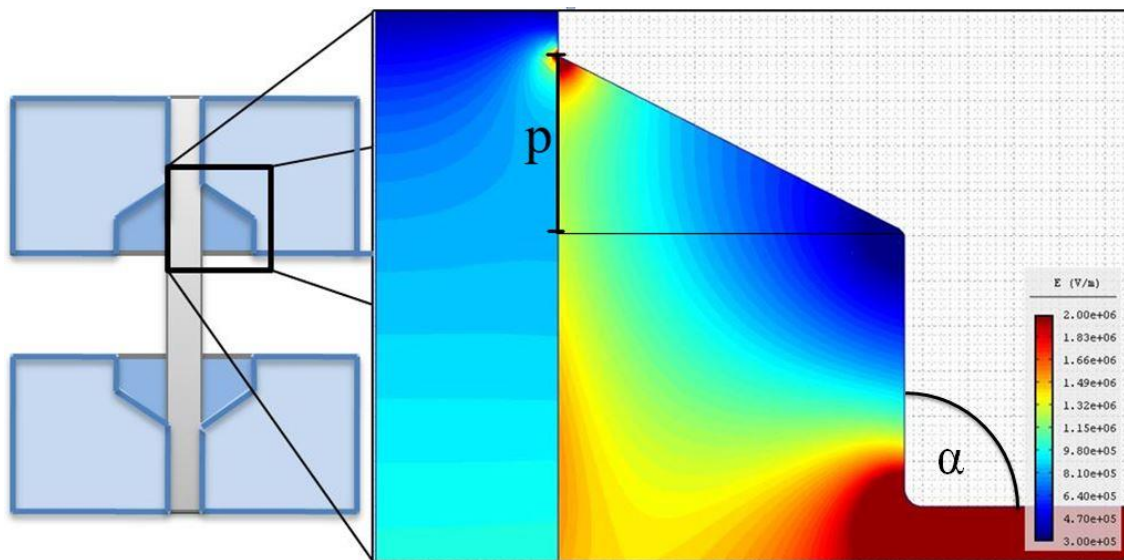
Obrázek 7.10 Graf závislosti maximální hodnoty intenzity elektrického pole na hloubce zahloubení kosené hrany

Další úpravou geometrie pro snížení maximální hodnoty intenzity je vytvoření výřezu zvětšováním šířky zahloubení v rovině kolmé k plášti tyče, která prochází bodem kontaktu izolátoru a elektrody. Na obrázku 7.11 je zobrazen graf závislosti maximální hodnoty intenzity elektrického pole na šířce zahloubení právě v této rovině. Konstantní je vzdálenost elektrod, minimální vzdálenost vnitřní hrany elektrody a izolátoru a poloměr hrany 0,2 mm. Parametrem je hloubka zahloubení.



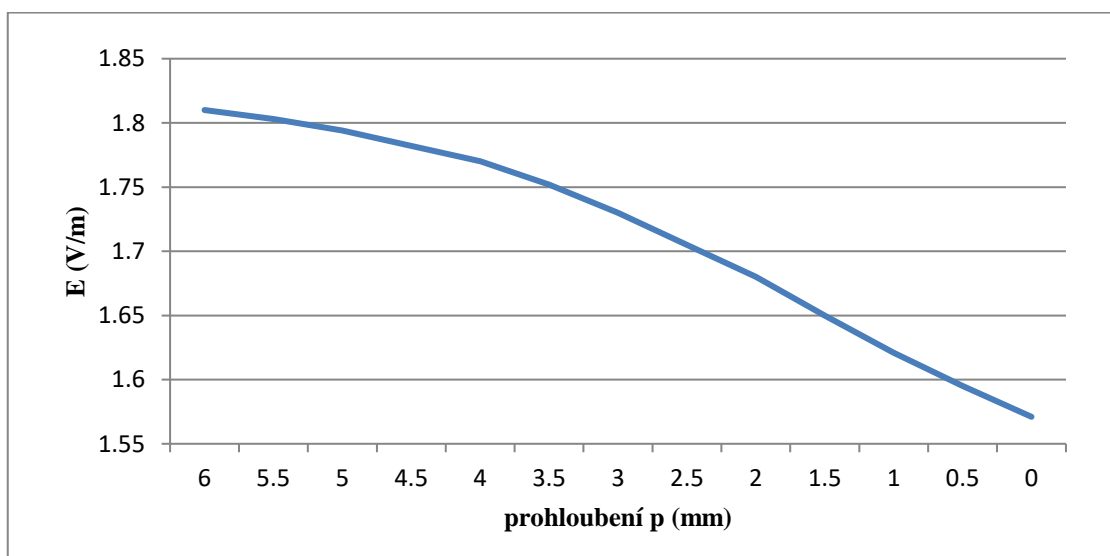
Obrázek 7.11 Graf závislosti maximální hodnoty intenzity elektrického pole na minimální šířce zahloubení kosené hrany

Se zvyšující se minimální šířkou zahloubení klesá maximální hodnota intenzity. Jako v předchozím bodě platí, že průběhy křivek jsou pro různé hloubky zahloubení velmi podobné. Nejnižší hodnoty intenzity na povrchu tyče bylo dosaženo při maximální povolené šířce zahloubení (úhel  $\alpha$  na obrázku 7.12 je pravý). Kombinací předchozích bodů lze vytvořit modifikaci s dalším prohloubením podél izolátoru. Na obrázku 7.12 je toto prohloubení pojmenováno písmenem  $p$ .



Obrázek 7.12 Pohled na rozložení intenzity elektrického pole v kritické oblasti u vnitřního rohu elektrody s parametrem dalšího prohloubení  $p$

Na obrázku 7.13 je graficky zobrazen průběh závislosti maximální hodnoty intenzity na prodloužení zahloubení  $p$ . Nejnižší maximální hodnoty bylo při předchozích simulacích dosaženo pro největší šířku zahloubení a nulovém dalším prohloubení  $p$  s kosenou stěnou.

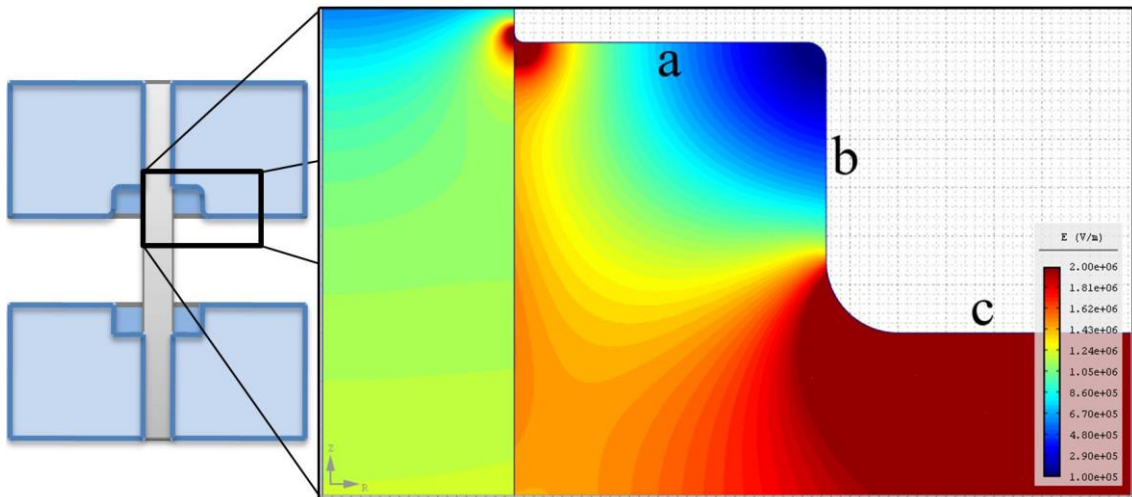


Obrázek 7.13 Graf závislosti maximální hodnoty intenzity elektrického pole na velikosti dalšího prohloubení  $p$

. Z těchto měření lze vyvodit závěr, že ideálním tvarem geometrie elektrody v oblasti vnitřní hrany, bude zahloubení s maximální povolenou šířkou po celé své hloubce a nulovým dalším prohloubením, tedy se třemi na sebe kolnými stěnami.

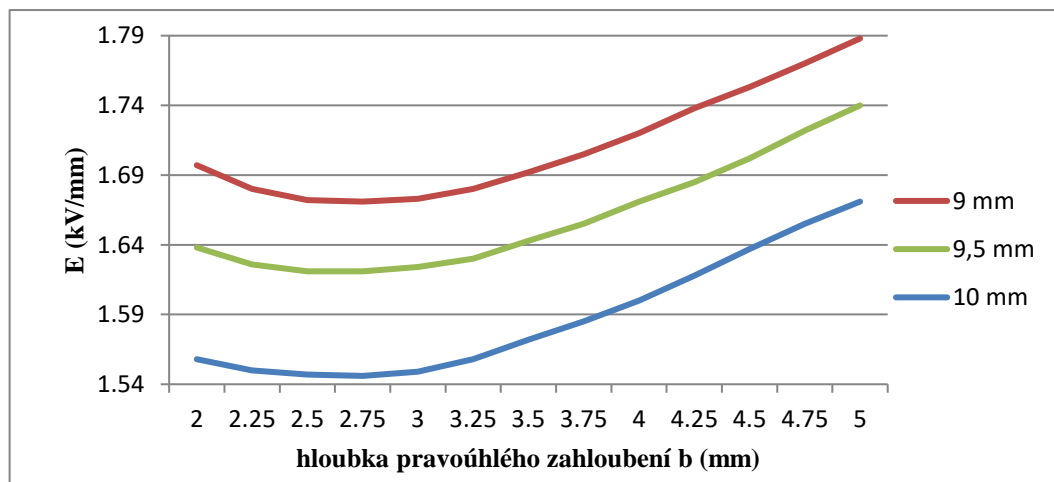
### 7.3 Pravoúhlé zahloubení

Výsledkem předchozích simulací je modifikace geometrie pojmenovaná „pravoúhlé zahloubení“. Řez sestavou v detailu vnitřního kontaktu elektrody s tyčí je zobrazen na obrázku 7.14.



Obrázek 7.14 Pohled v řezu na rozložení intenzity pole modifikace tvaru elektrody s názvem Pravoúhlé zahloubení

Pro vzájemnou polohu stěn elektrody označených na obrázku  $a, b$  a  $c$  platí, že  $b$  je kolmá na stěny  $a$  i  $c$  a zároveň  $a$  je rovnoběžná s  $c$ . Rozměrem, který zbývá určit, je hloubka pravoúhlého zahloubení, respektive délka strany  $b$  (obr 7.14). Na obrázku 7.15 je graf závislosti maximální hodnoty intenzity pole na hloubce tohoto zahloubení  $b$ .

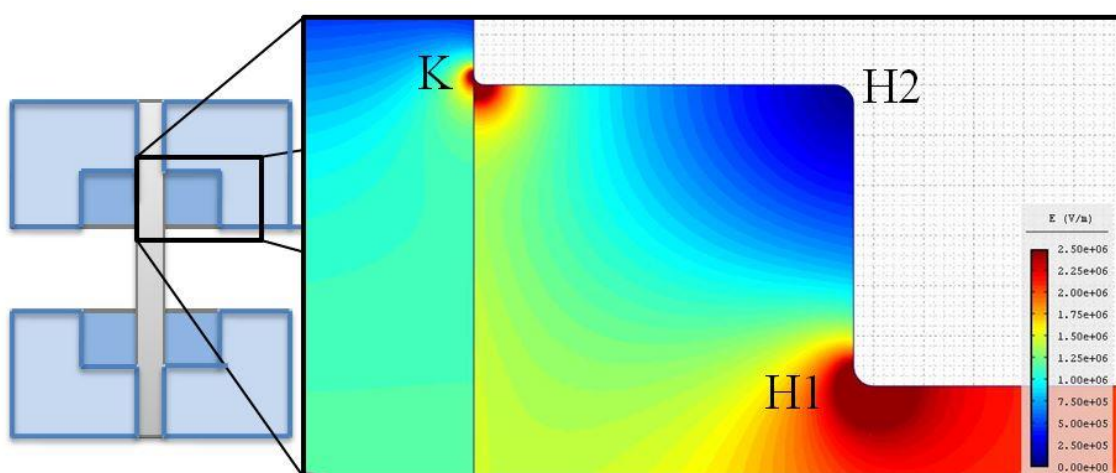


Obrázek 7.15 Graf závislosti maximální hodnoty intenzity elektrického pole po povrchu izolátoru na hloubce pravoúhlého zahloubení  $b$

Simulace pro zjištění závislosti intenzity pole na hloubce zahloubení byla provedena pro sestavu s poloměrem vnějšího hrany  $H1$  0,5 mm. Pro tyto rozměry bylo nejnižší hodnoty intenzity na povrchu tyče v kritickém bodě dosaženo pro hloubku zahloubení  $b = 2,75$  mm. Právě velikost poloměrů hran elektrody je dalším faktorem, který ovlivňuje chování buzeného elektrického pole v sestavě.

### 7.3.1 Hrany pravoúhlého zahloubení elektrody

Vnitřní a vnější roh elektrody pravoúhlého zahloubení jsou další prvky silně ovlivňující rozložení intenzity elektrického pole uvnitř sestavy. Na obrázku 7.16 je znázorněno, o které hrany elektrody se jedná. Jejich poloměry jsou nenulové, platí  $r_{H1}=0,2$  mm a  $r_{H2}=0,2$  mm.

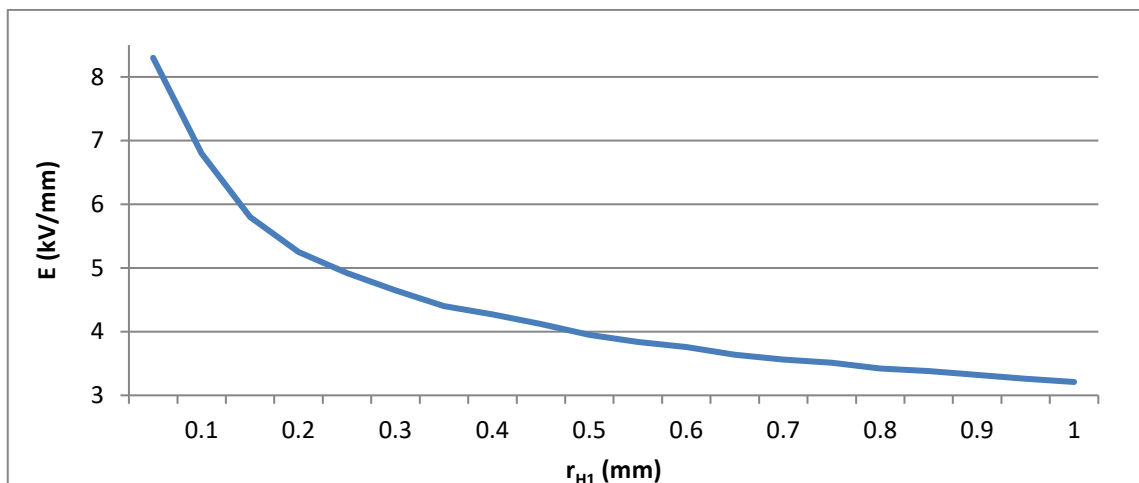


Obrázek 7.16 Hrany pravoúhlého zahloubení elektrody H1 a H2

Při zmenšování poloměru hrany  $H1$  dochází k prudkému nárůstu intenzity pole v jejím okolí. Tato hrana se tak stává oblastí s nejvyšší hodnotou intenzity elektrického pole na povrchu elektrody.

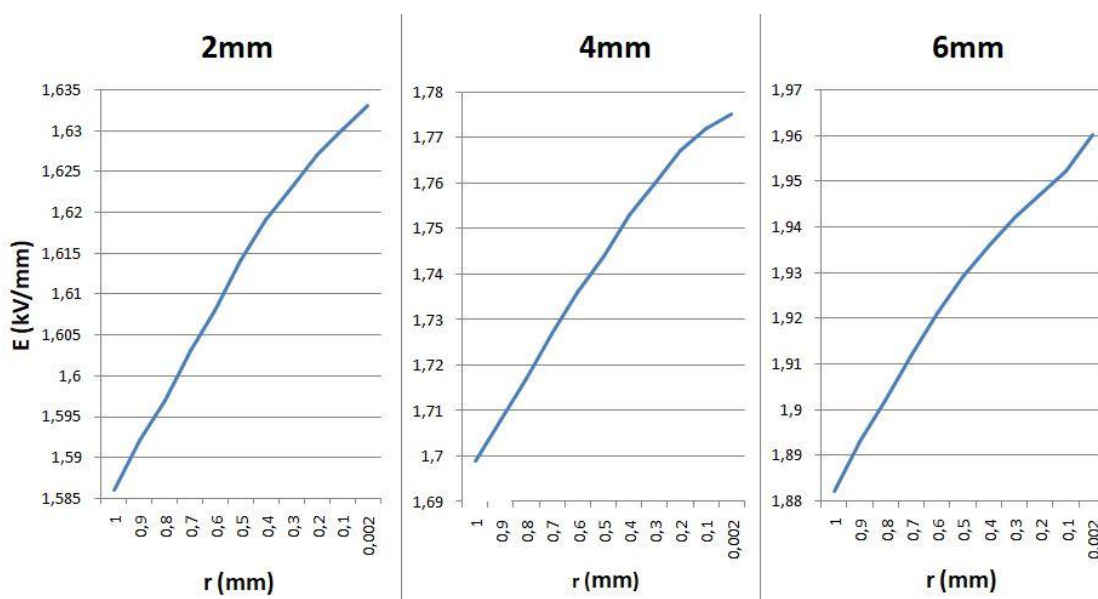
Aby bylo zamezeno nežádoucím fyzikálním jevům v okolí této hrany, je třeba sledovat, aby se maximální hodnota intenzity v blízkosti hrany  $H1$  pohybovala v intervalu do 5 kV/mm. Při vyšších hodnotách by mohlo docházet k příliš velkému silovému působení na molekuly vzduchu, což by mohlo vést až k výboji zejména za přispění nedokonalosti technologie povrchu elektrody nebo čistoty prostředí.

Na obrázku 7.17 je graficky vynesena závislost maximální intenzity v okolí hrany  $H1$ , na velikosti poloměru hrany  $r_{H1}$  při konstantní hloubce, šířce zahloubení i vzdálenosti elektrod.



Obrázek 7.17 Graf závislosti maximální hodnoty intenzity elektrického pole v okolí hrany H1 na velikosti jejího poloměru

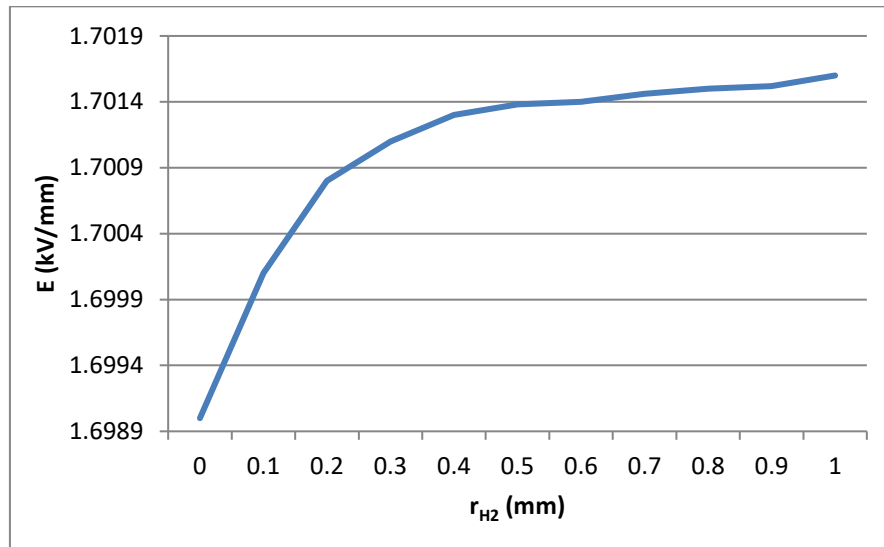
Z grafu je patrné, že se snižujícím se poloměrem  $r_{H1}$  hodnota intenzity zvětšuje exponenciálně. Při poloměrech nižších než desetina milimetru, je změna velmi prudká, pro napětí 20 kV je v řádu jednotek kilovoltů na milimetr. Na obrázku 7.18 je zobrazena závislost mezi změnou poloměru hrany  $H1$  a maximální hodnotou intenzity elektrického pole uvnitř zhloubení na povrchu izolátoru pro tři různé hloubky zhloubení 2 mm, 4 mm a 6 mm.



Obrázek 7.18 Graf závislosti maximální hodnoty intenzity elektrického pole po povrchu izolátoru na velikosti poloměru hrany H1

Mezi poloměrem hrany  $H1$  a velikostí intenzity na povrchu tyče je závislost od nuly do jednoho milimetru téměř lineárního charakteru. Změna hodnoty není tak rapidní, jako tomu bylo v okolí hrany samotné. V tomto případě v intervalu od 0,02 mm do 1 mm přibližně 0,05 kV/m pro hloubku zhloubení 2 mm, a 0,08 kV/mm pro zhloubení 6 mm. Tedy změna o dva řády menší.

Na obrázku 7.19 je zobrazena závislost maximální hodnoty intenzity elektrického pole po povrchu izolátoru na poloměru hrany  $H2$  elektrody uvnitř pravoúhlého zahloubení.



Obrázek 7.19 Graf závislosti maximální hodnoty intenzity elektrického pole po povrchu izolátoru na velikosti poloměru hrany vnitřního rohu elektrody  $H2$

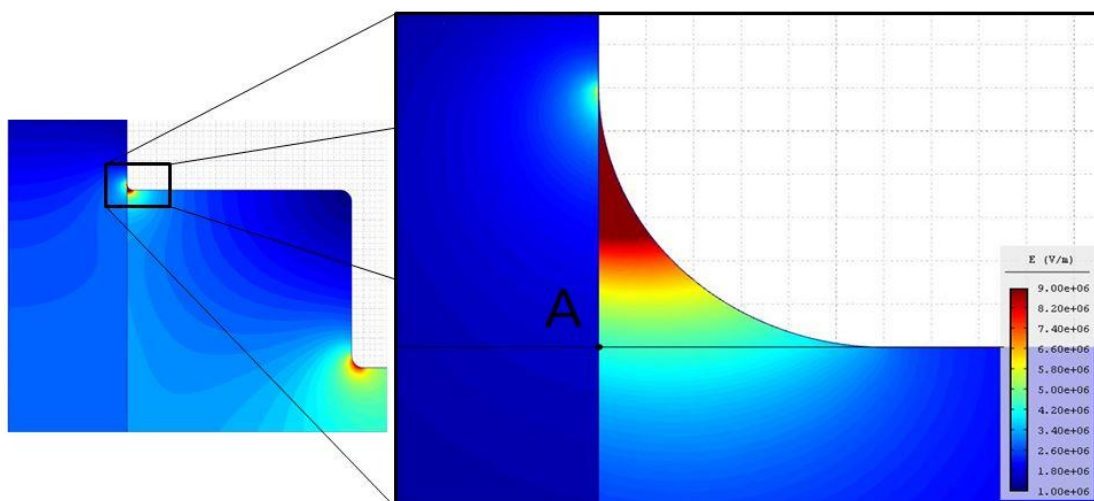
Při největší změně závislosti je v intervalu jednoho milimetru poloměru hrany změna intenzity na povrchu tyče menší než 0,003 kV/mm (pro napětí 20 kV). Lze říci, že závislost maximální hodnoty intenzity elektrického pole v kritickém bodě po povrchu tyče na velikosti poloměru hrany  $H2$  je vzhledem k rozměrovým mezím oproti dalším geometrickým parametrům téměř zanedbatelná.

### 7.3.2 Kontakt vodič – izolátor

Poslední a zároveň nejvíce kritickou oblastí sestavy je místo vnitřního kontaktu elektrody a tyče izolátoru (bod  $K$  na obrázku 7.16). Vzhledem k relativně vysoké permitivitě keramiky a malé vzdálenosti od nabitě elektrody, je nejbližší okolí styku vodiče s izolátorem místem s nejvyššími hodnotami intenzity elektrické energie.

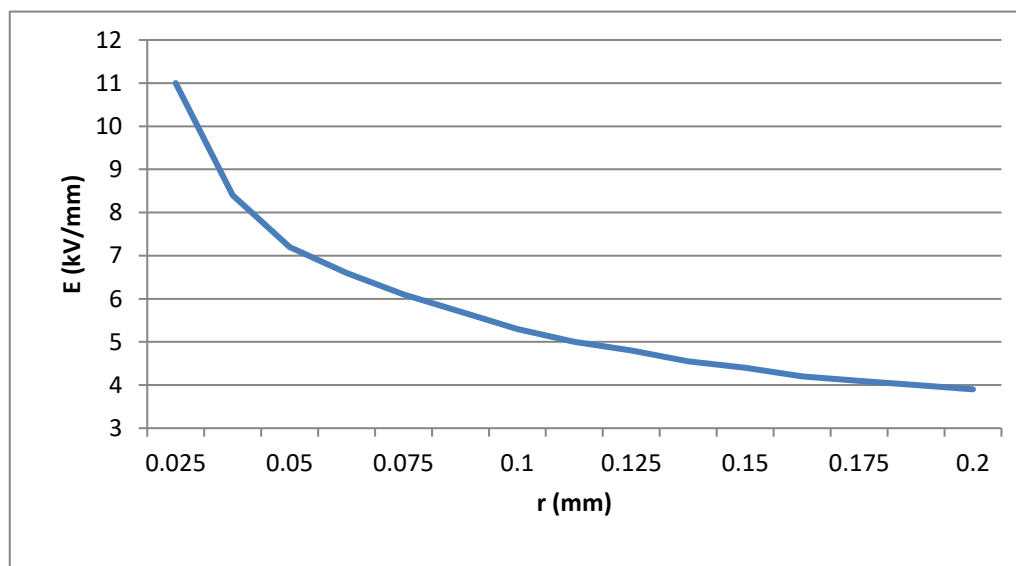
Během simulací v programu s metodou konečných prvků je třeba hledět na omezené možnosti výpočtu. Při nekonečně malých rozměrech rohu se bude vypočtená hodnota intenzity elektrického pole vždy blížit nekonečnu pro napětí vyšší než 0 V.

Také, pokud je poloměr hrany elektrody nulový, bude se hodnota intenzity v bodě kontaktu blížit nekonečnu. Hodnota intenzity byla odečítána z bodu původního kontaktu elektrody s izolátorem při nulovém poloměru hrany. Na obrázku 7.20 je detail v řezu na oblast vnitřního kontaktu s nenulovým poloměrem hrany. Bod  $A$  na obrázku značí bod, ve kterém byla hodnota intenzity odečítána.



Obrázek 7.20 Detail oblasti kontaktu elektrody s izolátorem

Od vyznačené roviny procházející bodem A se hodnota intenzity směrem k místu úplného kontaktu zvyšuje až k nekonečnu. Na obrázku 7.21 je graficky vynesena závislost velikosti intenzity elektrického pole měřená v bodě A (podle obr. 7.20) na velikosti poloměru hrany elektrody v oblasti kontaktu izolační tyče s elektrodou (bod K na obr 7.16).



Obrázek 7.21 Graf závislosti hodnoty intenzity elektrického pole v bodě A na velikosti poloměru hrany elektrody v oblasti kontaktu elektrody s izolační tyčí

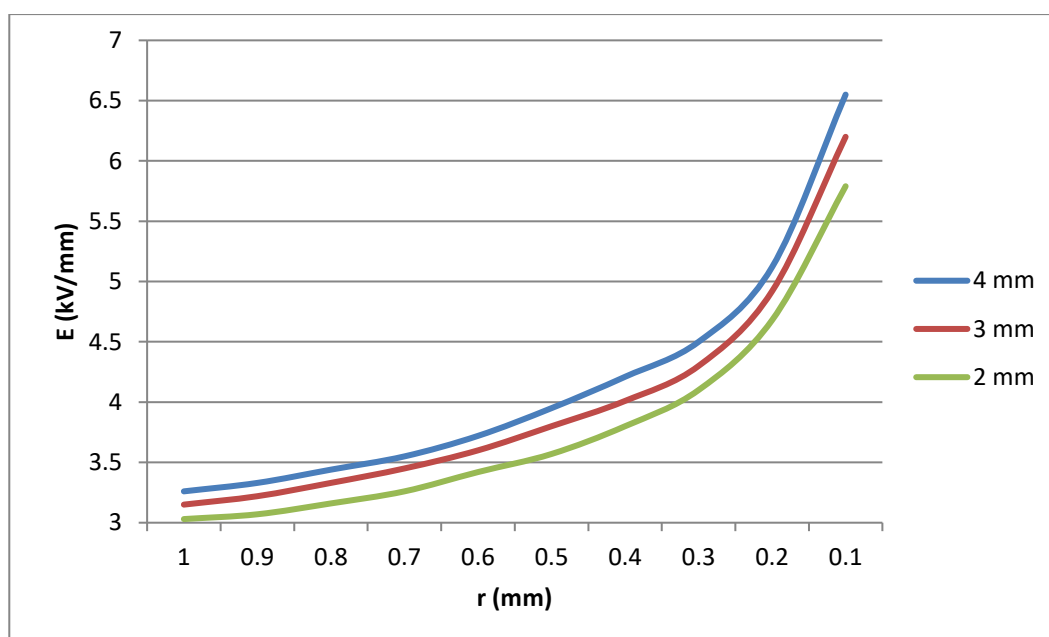
Z průběhu křivky je patrné, že se zmenšujícím se poloměrem hrany se hodnota intenzity v původním bodě kontaktu exponenciálně zvětšuje. Pod hranicí jednoho milimetru je pro napětí 20 kV změna vyšší než 40 kV/mm na změnu poloměru hrany o jeden milimetr.

### 7.3.3 Nejlepší model

Posledním krokem návrhu je sestavení nejlepší geometrické konfigurace podle předchozích kapitol. Toho má být dosaženo spojením vhodných rozměrů pravoúhlého zahloubení s odpovídajícími poloměry vnější a vnitřní hrany  $H1$  a  $H2$  elektrody a nakonec i kontaktu elektrody s izolátorem.

Poloměr hrany  $H2$  elektrody má na rozložení elektrického pole uvnitř pravoúhlého zahloubení zanedbatelný vliv v porovnání se změnou rozměrů nebo poloměru hrany  $H1$ . Stejná změna poloměru  $r_{H2}$  vyvolá téměř o tři řády menší rozdíl hodnot intenzity podél tyče, než tatáž změna poloměru  $r_{H1}$ . S přihlédnutím na tuto závislost (obr. 7.19) a technologii procesu je výsledný poloměr  $r_{H2}$  zvolen 0,2 mm.

Velikost poloměru hrany  $r_{H1}$  je ovlivněna maximálními rozměry pro modifikace elektrody, to je 6 mm a maximální povolenou hodnotou intenzity pole na povrchu elektrod - 5 kV/mm. Při zvětšování poloměru hrany  $r_{H1}$  se zároveň zmenšuje šířka zahloubení elektrody, což způsobuje nárůst intenzity v celém prostoru zahloubení. To se projeví zejména na povrchu izolátoru, kde hraje snížení intenzity díky rozšíření zahloubení větší roli, než zvětšení poloměru hrany  $H1$  elektrody. Proto je třeba najít takový poloměr hrany  $r_{H1}$ , při kterém bude šířka zahloubení co možná největší a hodnota v kritickém místě u povrchu elektrody nepřesáhne stanovenou mez. Na obrázku 7.22 je znázorněna závislost intenzity pole v okolí hrany  $H1$  na velikosti poloměru této hrany pro tři různé hloubky pravoúhlého zahloubení.

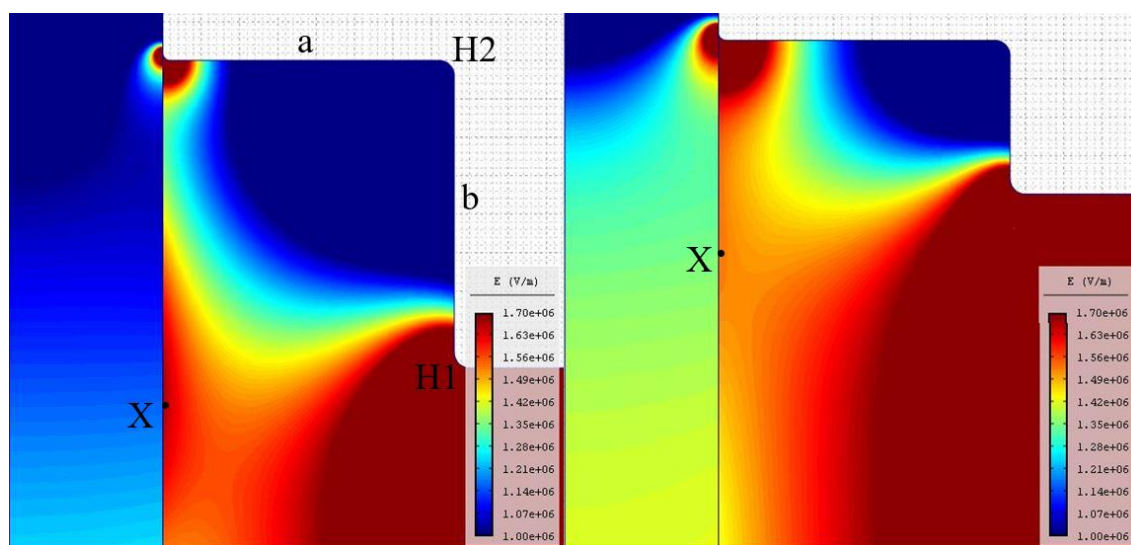


Obrázek 7.22 Graf závislosti hodnoty intenzity elektrického pole v okolí hrany  $H1$  na velikosti jejího poloměru  $r_{H1}$

Se snižujícím se poloměrem hrany intenzita v jeho okolí exponenciálně stoupá. Pokud zvětšujeme hloubku, oddaluje se tak oblast hrany  $H2$  s nízkou intenzitou, která tak méně působí na oblast hrany  $H1$  a maximální hodnota kolem této hrany se tak zvyšuje.

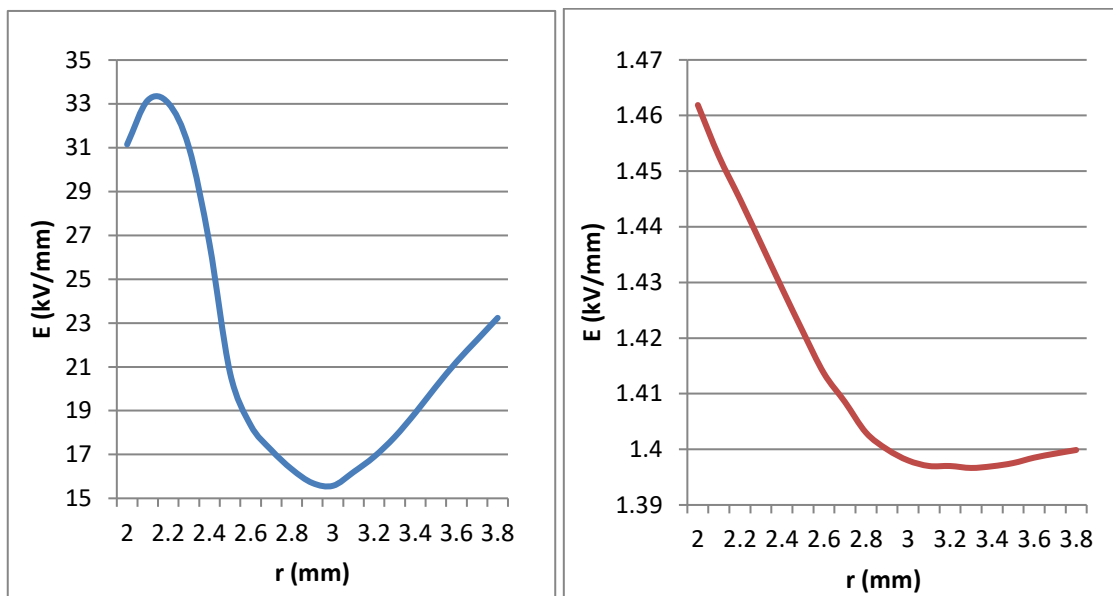
Nakonec je třeba zvolit vhodnou hloubku zahroubení. Při snižování hloubky klesá maximální hodnota oblasti kolem hrany  $H1$  elektrody, avšak velmi rychle roste maximální hodnota intenzity podél tyče vlivem přibližujícího se kontaktu k otevřenému kraji zahroubení. Růst objemu oblasti vysoké intenzity v okolí kontaktu je spojen s problematikou vnitřního rohu zahroubení. Tato oblast zahroubení plní funkci elektrostatického stínu, kdy v této oblasti výrazně klesá hodnota intenzity pole. Zároveň ovlivňuje nejen kritické místo kolem hrany  $H1$  elektrody, ale i u kontaktu mezi elektrodou a izolační tyčí. Důležitějším parametrem než velikost poloměru hrany  $r_{H2}$  je poměr délek stran  $a$  a  $b$ , vyznačených na obrázku 7.23.

Na obrázku 7.23 je znázorněno rozložení intenzity elektrického pole uvnitř pravoúhlého zahroubení pro dva různé případy. Hloubka zahroubení elektrody vlevo je 4 mm a vpravo pouze 2 mm. V obou případech je totožná šířka zahroubení 3,8 mm s poloměrem hrany  $r_{H1}$  o velikosti 0,2 mm. V levém případě je tedy poměr stran  $a$  a  $b$  menší než napravo. Nastává zde jev, který lze pojmenovat jako tlumení oblasti vysoké intenzity v okolí kontaktu, kdy je působením vnitřní hrany zahroubení umenšován nárůst intenzity po tyči v těsné blízkosti kontaktu (na obrázku je červená oblast blízko styku vlevo menší než vpravo). Na druhou stranu však můžeme vlevo pozorovat vyšší hodnoty intenzity na povrchu tyče v okolí bodu  $X$ , který značí další lokální maximum intenzity elektrického pole na povrchu tyče.



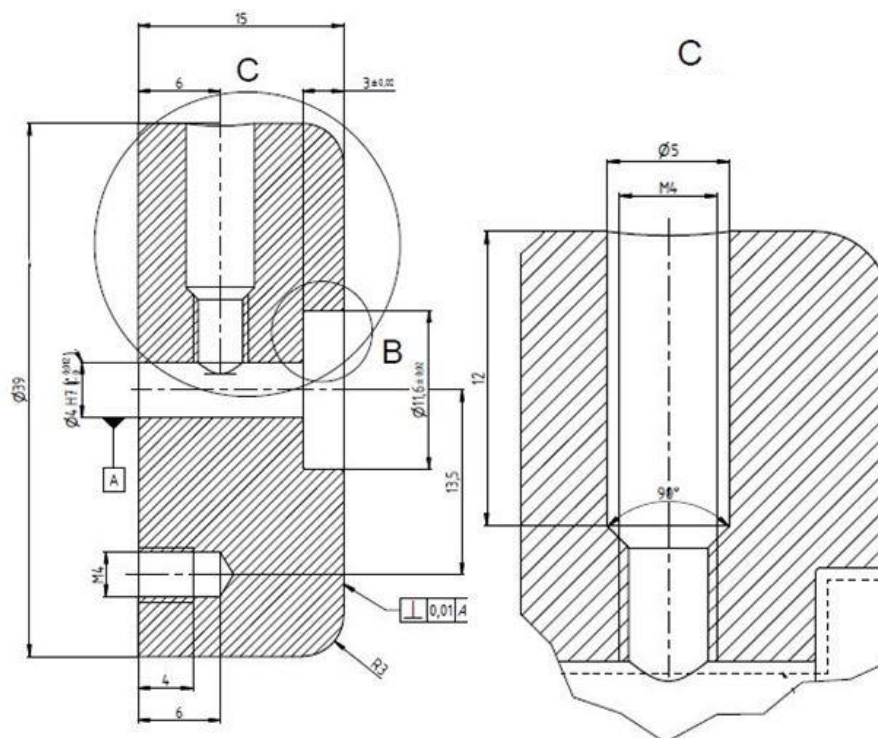
Obrázek 7.23 Rozložení intenzity pole pro dvě různé hloubky pravoúhlého zahroubení

Nelze tak tedy analyticky určit nejvhodnější hloubku pouze podle maximální hodnoty intenzity elektrického pole v kritické oblasti podél tyče (okolí bodu  $X$ ). Na obrázku 7.24 je graficky vynesena závislost velikosti povrchu tyče izolátoru s větší intenzitou pole na povrchu než 1,48 kV/mm na hloubce (vlevo), a závislost průměrné intenzity elektrického pole na povrchu tyče na 1 mm její délky. Z průběhu prvního grafu lze snadno rozpoznat silný vliv vysoké intenzity v okolí kontaktu při hloubce menší než 3 mm a následně prudký nárůst způsobený zvětšováním kritické oblasti lokálního maxima (kolem bodu  $X$  na obr. 7.23). V grafu napravo můžeme vidět prudký pokles průměrné hodnoty intenzity na 1 mm délky izolátoru až po hloubku zahroubení 3,1 mm. Při dalším zvyšování hloubky začíná křivka průměrné hodnoty pozvolna stoupat.



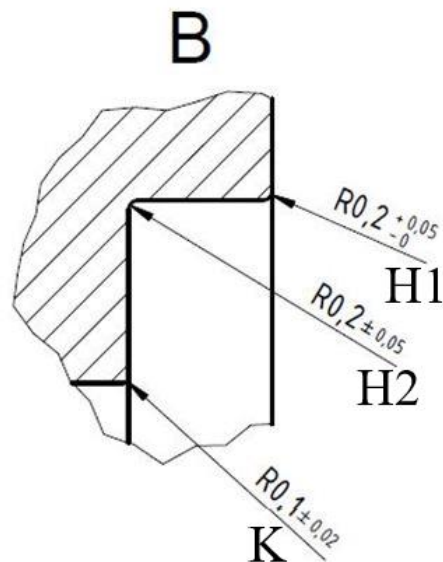
Obrázek 7.24 Závislost povrchu izolátoru s větší intenzitou než 1,48 kV/mm (vlevo) a závislost průměrné hodnoty intenzity na povrchu tyče na 1 mm její délky na hloubce pravoúhlého zahloubení.

Na obrázku 7.25 je vlevo schéma elektrody, vpravo pak větší detail (C). Jako nejlepší hloubka zahloubení byla zvolena hodnota 3 mm, při které vykazovala sestava nejpriznivější hodnoty elektrické intenzity po povrchu izolátoru.



Obrázek 7.25 Schéma elektrody podle modelu s nejlepšími výsledky (vlevo) s detailem C (vpravo)

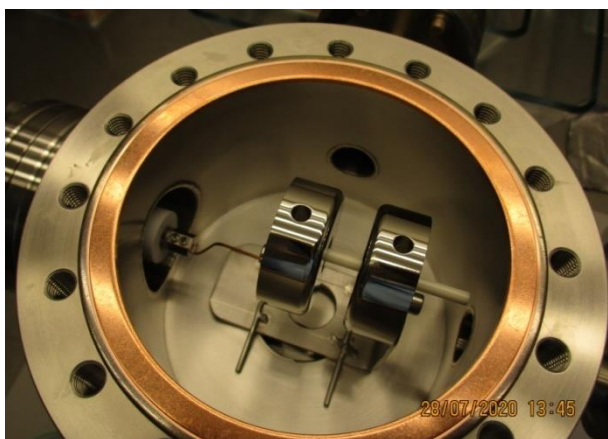
Na obrázku 7.26 je pohled na detail (B) pravoúhlého výřezu elektrody. Tolerance pro výrobu je největší u poloměru hrany  $r_{H2}$ , jejíž změna nemá příliš signifikantní dopad na rozložení pole uvnitř zhloubení. Nepřesnost poloměru hrany  $r_{H1}$  je však tolerována pouze v kladných hodnotách. Ostřejší hrana by mohla mít dramatický dopad na funkčnost sestavy v důsledku prudkého zvětšení intenzity v jeho okolí a po povrchu tyče.



Obrázek 7.26 Detail B pravoúhlého zhloubení vnitřní stěny elektrody

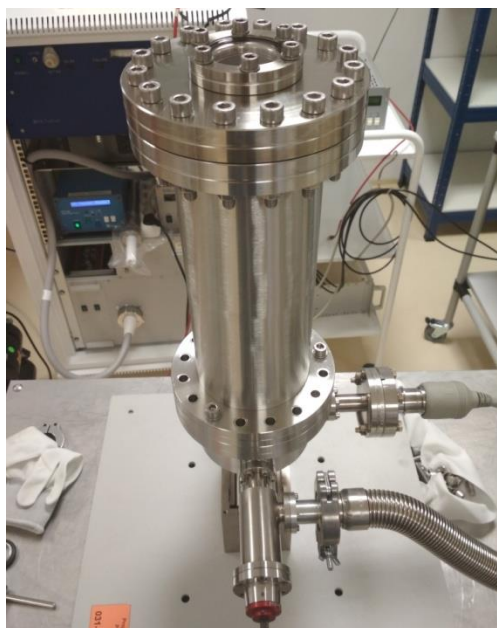
## 8 NAPĚŤOVÉ TESTY

Pro zkoušku elektrické výdrže sestavy byly provedeny napěťové testy za účelem sledování velikosti svodového proudu mezi elektrodami. Testy byly prováděny v čistých prostorách pracovišť a výrobek byl umístěn v ochranné komoře z důvodu možnosti využití vakuové pumpy a zamezení efektu nežádoucích vlivů (uložení výrobku na obrázku 8.1). Vzhledem k tomu, že se jedná o testy svodových proudů izolační části zařízení, kde lze očekávat velmi nízké hodnoty protékajícího proudu, je čistota a omezení vlivu vnějších faktorů prvním klíčovým faktorem pro správný průběh testu.



Obrázek 8.1 Pohled na uložení výrobku do otevřené komory

Vzduch uvnitř komory byl pro měření svodových proudů sestavou ve vakuu odčerpán na hodnotu tlaku až  $3,5 \mu\text{Pa}$ . Na obrázku 8.2 je klimatická komora s připojeným odsáváním vzduchu a sondou pro měření tlaku uvnitř komory.



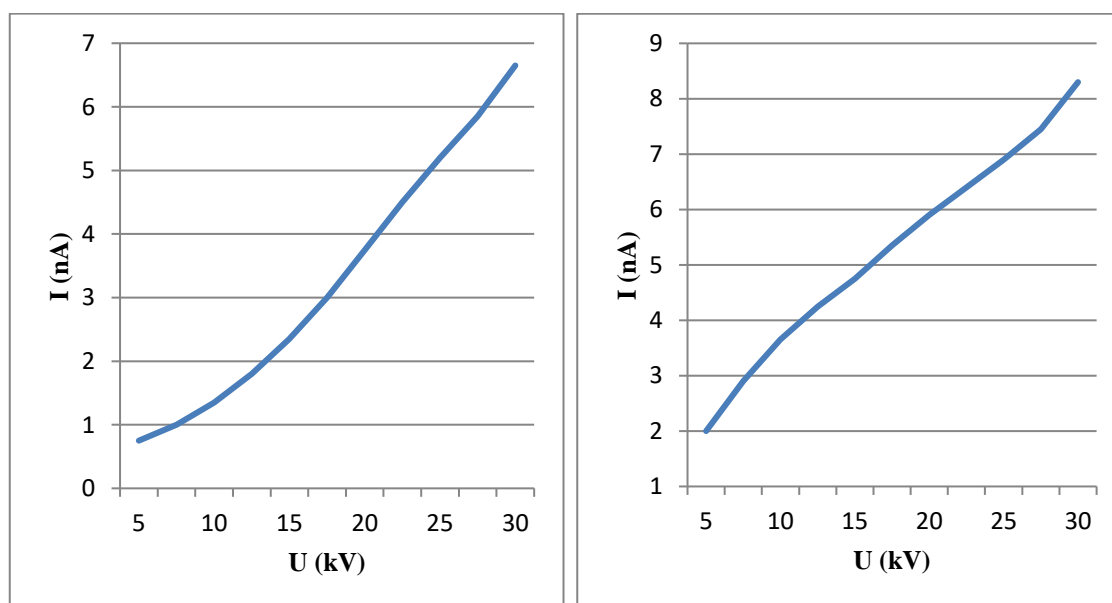
Obrázek 8.2 Pohled na uzavřenou komoru

Pokud je při měření připojena ke komoře sonda pro měření tlaku, můžeme nejen neustále kontrolovat hodnotu tlaku vzduchu uvnitř, ale zároveň můžeme dostávat další informaci o tom, k čemu uvnitř komory dochází z elektrického hlediska. Při prudkém navýšení svodového proudu mezi elektrodami dochází k ionizaci molekul vzduchu a následnému přesunu nabitých částic. Tato zvýšená ionizace se následně projeví změnou tlaku, kterou lze díky sondě detekovat.

## 8.1 Sestava ve vakuu

Byly provedeny testy pro tři různé vzájemné vzdálenosti elektrod a to 10 mm, 9 mm a 7 mm. Vzhledem k provozním možnostem pracoviště mohlo být měření provedeno pouze pro napětí do 30 kV. Hodnoty napětí a proudu byly nastavovány a detekovány pomocí HV testeru se sériovým odporem 30 M $\Omega$ . Vzorkovací perioda protékajícího proudu je 1s. Díky této diskretizaci signálu dochází k jisté míře zkreslení, která je však s přihlédnutím k účelu testů téměř zanedbatelná. Graficky vynášená výsledná hodnota svodového proudu je tak aritmetickým průměrem hodnot navzorkovaného signálu.

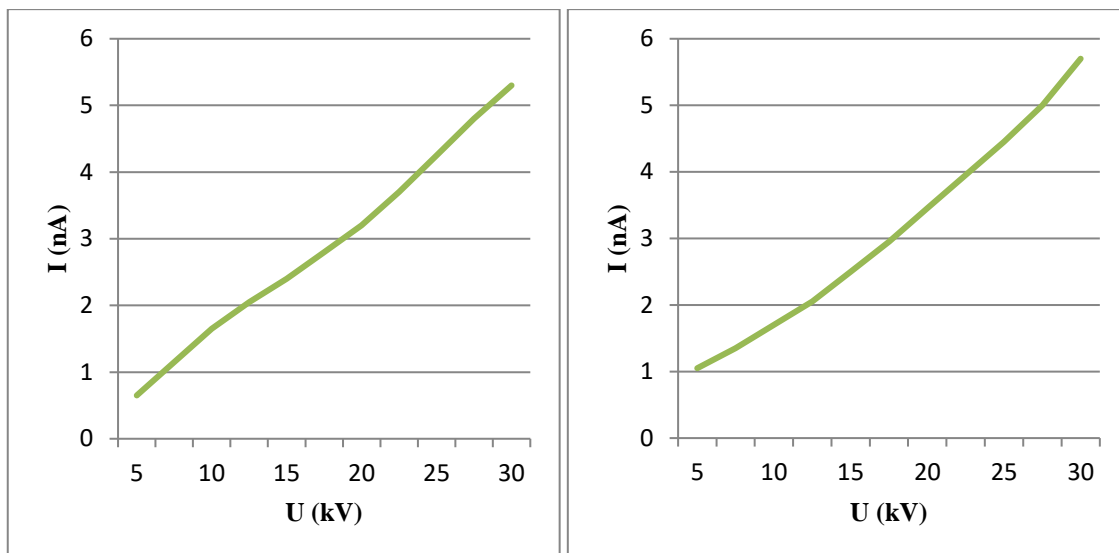
Na obrázku 8.3 je graficky znázorněn průběh závislosti svodového proudu sestavou na přiloženém napětí. Graf vpravo je pro případ, kdy byla připojena sonda měření hodnoty vakua uvnitř komory. Vzájemná vzdálenost elektrod je 10 mm.



Obrázek 8.3 Grafy závislosti svodového proudu na přiloženém napětí pro vzájemnou vzdálenost elektrod 10 mm

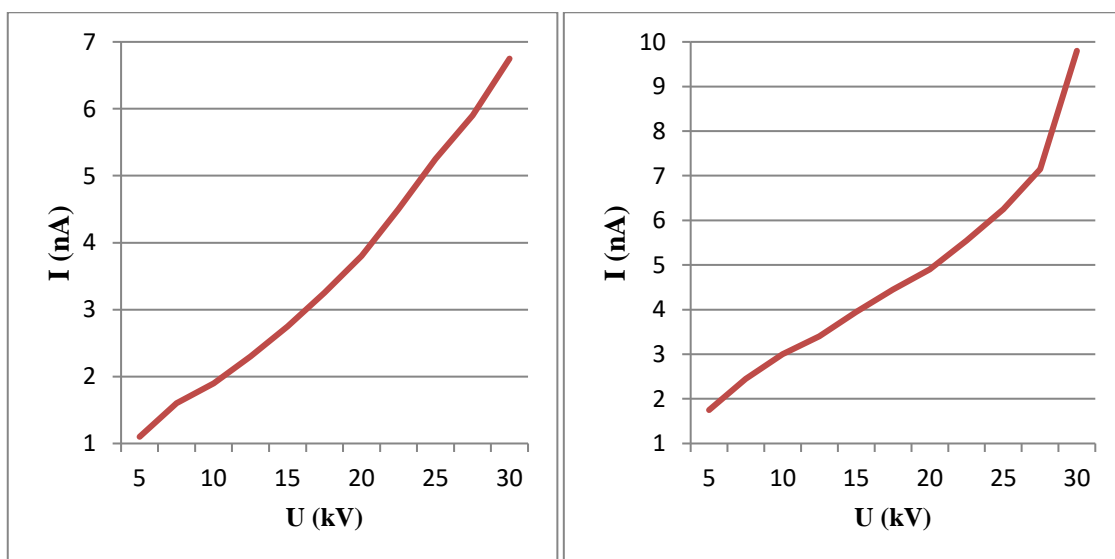
Z grafů je patrné, že v celém rozsahu napětí se hodnoty procházejícího proudu pohybují v jednotkách nanoampérů. V obou případech můžeme mluvit o lineární závislosti s patrnou mírou zkreslení způsobenou metodou měření a vnějšími vlivy. Při měření, kdy byla připojena sonda pro sledování tlaku uvnitř komory, byl detekován proud větší. Pro napětí 30kV je rozdíl proudů asi 1, 65 nA. Tento rozdíl proudů je

způsobený vlivem kovového zakončení sondy uvnitř komory, které se tak stává dalším nezanedbatelným faktorem nepřímo ovlivňujícím průchod proudu mezi elektrodami sestavy. Na obrázku 8.4 můžeme pozorovat průběhy křivek grafů závislosti svodového proudu sestavou na napětí. Tentokrát je vzájemná vzdálenost elektrod 9 mm.



Obrázek 8.4 Grafy závislosti svodového proudu na přiloženém napětí pro vzájemnou vzdálenost elektrod 9 mm

Vlevo opět průběh závislosti bez a vpravo s připojenou sondou pro měření tlaku uvnitř komory. V obou případech můžeme při zanedbání nepřesností měření a vnějších vlivů označit oba průběhy za lineární. Vliv připojené sondy lze pozorovat v grafu vpravo, kde je hodnota oproti měření s odpojenou sondou při napětí 30 kilovoltů vyšší o 0,4 nA. A konečně, na obrázku 8.5 je graficky znázorněna závislost proudu na napětí pro sestavu se vzájemnou vzdáleností elektrod 7 mm.



Obrázek 8.5 Grafy závislosti svodového proudu na přiloženém napětí pro vzájemnou vzdálenost elektrod 7 mm

Průběh závislosti bez připojené sondy (vlevo) je opět lineární s mírnými odchylkami způsobenými nepřesnostmi měření a vnějšími vlivy. Hodnoty proudu opět nepřesahují jednotky nanoampérů, při maximálním zatížení byl naměřen proud 6,75 nA. Výsledky měření s připojenou sondou (vpravo) korelují s předchozími výsledky s větší vzdáleností elektrod. To ovšem platí pouze pro napětí do 25kV, kde byla hodnota proudu vyšší o 1,25 nA. Při napětí vyšším než 25 kV již začalo docházet k nezanedbatelnému kolísání hodnot svodového proudu. Po sobě jdoucí hodnoty navzorkovaného signálu s periodou vzorkování 1 sekunda se lišily až o 15 nA. Tyto výkyvy hodnot neustaly po celou dobu účinku přiloženého napětí a jsou součástí výsledné hodnoty proudu vynesené do grafu, kde lze pro napětí nad 25 kV sledovat prudký nárůst proudu (obr 8.5 vpravo). Hodnota svodového proudu je tak při napětí 30 kV vyšší o 3,15 nA.

Při všech měřeních hraje svou roli doba ustálení. Hodnoty měřeného proudu navzorkovaného signálu mírně kolísají. Při dostatečně dlouhé době dojde k ustálení těchto hodnot. V tabulce 8.1 jsou naměřené hodnoty svodového proudu sestavou během první minuty a po pěti minutách měření, kdy bylo dosaženo větší míry ustálení proudu. Napětí na elektrodách je 30 kV, během měření byla připojena sonda pro kontrolu tlaku uvnitř komory.

Tabulka 8.1 Hodnoty maximálního naměřeného proudu pro napětí 30 kV

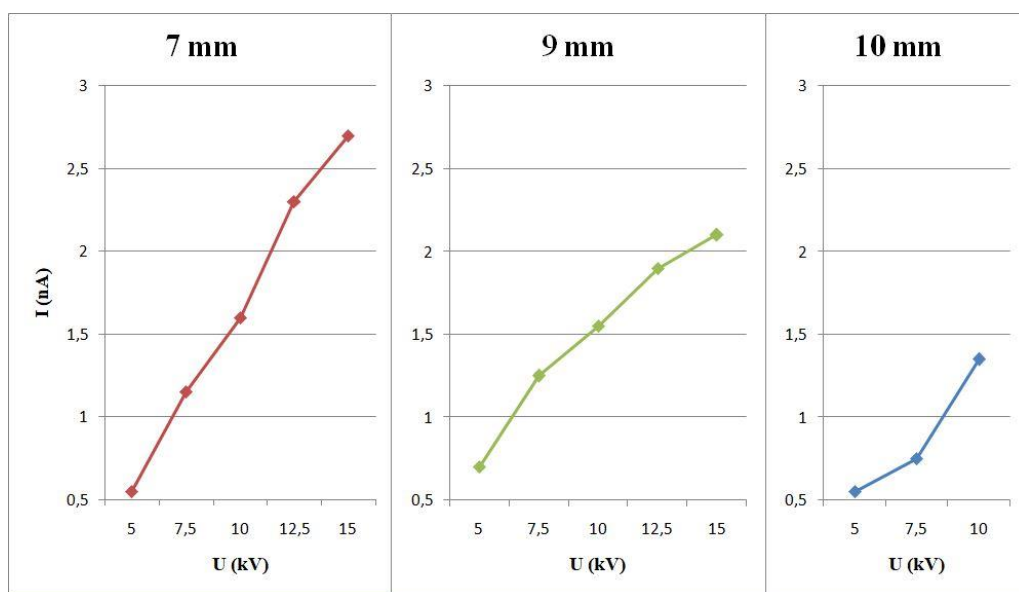
	10 mm	9 mm	7 mm
Během 1. minuty	8,3 nA	5,7 nA	6,75 nA
Po pěti minutách	5,3 nA	2,6 nA	5,1 nA

Z tabulky lze vyčíst, že již po pěti minutách došlo k velmi znatelnému snížení proudu. K tomuto snižování dochází pozvolna a je zaregistrovatelné až po dobu několika desítek minut či hodin. Také lze při porovnání proudu sestavami s různými vzdálenostmi pozorovat, že při největší vzdálenosti byla hodnota svodového proudu nejvyšší. Očekávané hodnoty proudu při největší vzdálenosti elektrod by naopak měli být nejnižší. Každé měření bylo prováděno v jiný den kvůli několikahodinovému odčerpávání vzduchu z komory. Proto byl vliv vnějších podmínek vždy jiný. Měření pro vzdálenost elektrod 10 mm bylo prováděno s odstupem dvou dní, proto lze vyvodit závěr, že při tomto měření bylo dosaženo vyšších hodnot proudu právě působením vnějších vlivů nebo nečistot na povrchu sestavy.

Pro vzdálenost 10 mm došlo k ustálení pozvolna bez náhlých výkyvů měřených hodnot vyšších než 2 nA. Při ustalování proudu pro vzdálenost elektrod 9 mm došlo po minutě pozvolného snižování k výboji o hodnotě 17 nA, který byl patrně způsoben přítomností nečistoty. K další změně vyšší než 2 nA již nedošlo. Pro vzdálenost 7 mm nedošlo k ustálení hodnot proudu ve stejné míře jako pro předchozí vzdálenosti. Během pozvolného snižování bylo zaznamenáno několik výbojů proudu s hodnotou řádově v desítkách nanoampérů.

## 8.2 Sestava ve vzduchu

Podobně jako v předchozí podkapitole, bylo provedeno měření závislosti svodových proudů na napětí pro případ, kdy byla komora zavzdušněna. Tlak vzduchu uvnitř komory byl tedy atmosférický a sondy pro monitorování tlaku již nebylo třeba. Na obrázku 8.6 je graficky znázorněna závislost svodového proudu sestavou ve vzduchu na přiloženém napětí pro 3 vzájemné vzdálenosti elektrod - 7 mm, 9 mm a 10 mm.



Obrázek 8.6 Grafy závislosti svodového proudu na přiloženém napětí pro různé vzájemné vzdálenosti elektrod sestavy uložené ve vzduchu

Se zvyšujícím se napětím roste hodnota svodového proudu velmi podobně jako při měření ve vakuu. Změna ovšem nastává při překročení kritické hodnoty napětí, kdy začíná docházet k dramatické skokové změně svodového proudu sestavou. Při atmosférickém tlaku je množství molekul uvnitř komory řádově mnohem vyšší. Tudíž je vzduch mnohem méně odolný vůči ionizaci než vakuum a snáze se z molekul uvolňují ionty, které potom dalším působením pole putují k elektrodám. Při zavzdušnění se také zvýší vliv okolní vlhkosti, teploty nebo nečistot ve vzduchu.

V tabulce 8.2 můžeme vidět, při jakém mezním napětí  $U_m$  došlo v těchto třech případech konfigurace sestavy ke skokovému zvýšení svodového proudu.

Tabulka 8.2 Mezní napětí a proudy pro umístění ve vzduchu

	10 mm	9 mm	7 mm
Mezní napětí $U_m$	16,7 kV	15,4 kV	14,9 kV
Svodový proud I	58 $\mu$ A	59,9 $\mu$ A	68 $\mu$ A

Mezi vzdáleností elektrod a hodnotou mezního napětí platí přímá úměrnost. Pro vzdálenost elektrod 7 mm bylo při napětí 14.9 kV dosaženo hodnoty svodového proudu až 68  $\mu\text{A}$ . K dalšímu zvyšování napětí nad mez  $U_m$  již nedošlo z důvodu zamezení trvalého poškození keramické tyče izolátoru. Při mezním napětí  $U_m$  byly zaznamenány proudové špičky v řádech desítek a stovek mikroampérů. Tak vysoké výkyvy proudů by při provozu způsobovaly zkrácení doby životnosti sestavy a jsou v praxi pro správné fungování zařízení nepřijatelné.

## 9 ZÁVĚR

V první části této diplomové práce byla provedena rešerše s cílem porozumění mechanismů v oblasti fyzikálních jevů v izolátorech, jako je například dielektrická polarizace, pevnost a průraz izolantu. Dále je probírána problematika povrchu izolátorů. Zejména vliv vlhkosti na jejich elektrické vlastnosti a problém navlhavosti. Stručně je zmíněno tepelné namáhání a stárnutí izolantů a dielektrik.

Následuje rozbor keramických materiálů vhodných pro elektrotechnické aplikace a posuzování jejich tepelných, mechanických a zejména elektrických vlastností. Posuzovány byly keramické materiály  $\text{Al}_2\text{O}_3$  a  $\text{ZrO}_2$  dostupné na trhu od různých výrobců. Byl vybrán nejvhodnější keramický materiál  $\text{Al}_2\text{O}_3$  pro izolační část sestavy.

Sedmá kapitola je zaměřena na vytvoření nejlepší možné modifikace výchozí geometrie elektrod sestavy podle výsledků ze simulací v programu s metodou konečných prvků. Nejdříve byly zkoumány vlivy základních geometrických parametrů sestavy, jako je vzájemná minimální vzdálenost elektrod, velikost poloměru vnitřní hrany elektrody a minimální vzdálenost mezi izolátorem a elektrodou. Dále bylo simulováno rozložení pole v modelu s kosenou stěnou elektrody a pravoúhlým zahloubením. Velká pozornost byla věnována geometrickým parametrům pravoúhlého zahloubení, jako jsou šířka a hloubka, poloměry hran elektrody  $H_1$  a  $H_2$  a konečně oblast kontaktu mezi elektrodou a izolační tyčí.

Pro zvolení nejvhodnějšího modelu bylo nejdůležitější rozložení intenzity elektrického pole uvnitř pravoúhlého zahloubení elektrody, zejména pak v oblasti kontaktu a podél povrchu izolátoru. Model elektrody s nejlepšími výsledky rozložení intenzity elektrického pole byl poté s vhodně zvolenými tolerancemi rozměrů a úpravou povrchu vyroben.

Osmá kapitola práce je věnována napěťovým testům tohoto výrobku. Testy byly prováděny v čistých prostorách a sestava byla uložena v klimatické komoře pro kontrolu tlaku vakua uvnitř komory a co největšímu zamezení vlivů vnějších jevů. Výsledné hodnoty svodových proudů byly sestaveny z navzorkovaného signálu HV testeru s vzorkovací periodou 1 s. Pro vzájemnou vzdálenost elektrod 10 mm vzrostla hodnota svodového proudu pro maximální napětí 30 kV po částečném ustálení na 5,3 nA.

Pro vzájemnou vzdálenost 9 mm vzrostla tato hodnota pouze na 2,6 nA. Vzhledem k velikostem měřeného proudu, časovým odstupem měření a možnosti vlivu vnějších faktorů lze dojít k závěru, že při prvním měření bylo dosaženo menší míry čistoty se zapojením dalších vnějších faktorů (vliv zapojení testovací sestavy, počasí, přípravy vzorku). Hodnoty velikosti proudu pro obě tyto vzájemné vzdálenosti elektrod jsou však v praxi přijatelné. Při těchto měřeních nebyly detekovány konstantní výkyvy hodnot svodového proudu, které by znamenaly nežádoucí míru nárazové ionizace.

Při testování pro vzájemnou vzdálenost elektrod 7 mm byla naměřena maximální hodnota proudu po částečném ustálení 5,1 nA. Avšak při překročení napětí 25 kV byly pozorovány výkyvy po sobě zaznamenaných hodnot větší než 5 nA a detekována byla i řada výkyvů o hodnotě až několika desítek nanoampérů. Vzhledem ke konstantnímu výskytu těchto výbojů lze předpokládat, že by pro aplikace nad 25 kV nebyla tato vzdálenost v praxi vhodná.

Po provedení testů v prostorách s tlakem běžným pro vnitřní prostory elektronových mikroskopů byly provedeny testy s umístěním sestavy ve vzduchu. Pro všechny tři testované konfigurace sestavy bylo určeno mezní napětí, při kterém se hodnota svodového proudu dramaticky zvýšila. Pro minimální vzdálenost elektrod 7 mm bylo toto napětí 14,9 kV a hodnota proudu 68  $\mu$ A.

Podle simulací se podařilo vytvořit model, který pro dvě vzájemné vzdálenosti elektrod 10 mm a 9 mm vykazoval během testů elektrickou odolnost srovnatelnou s výrobky používaným v praxi, kde se hodnota svodového proudu pohybuje v intervalu jednotek nanoampérů. Pro vzdálenost 7 mm byly při zátěži nad 25 kV detekovány konstantní výkyvy proudu, jejichž velikost není v praxi pro použití v aplikacích elektronových mikroskopů již tolerována, a tudíž byla překročena vhodná izolační vzdálenost testované sestavy.

# LITERATURA

- [1] Jiráček, J., Aufratura, R., Liedermann, K., a spol. *Materiály a technická dokumentace: Přednáškové texty: Interní texty UETE Vysokého učení technického v Brně.*
- [2] Rozsivalová, Z., Vaněk J., Křivák, P., *Materiály a technická dokumentace.: Laboratorní cvičení: Interní texty UETE Vysokého učení technického v Brně.*
- [3] Liedermann, K., Polsterová, H., Rozsivalová, Z., *Klimatotechnologie: Interní texty UETE Vysokého učení technického v Brně.*
- [4] Drápala, J., Kurša, M., *Elektrotechnické materiály: Studijní materiály, Vysoká škola báňská – technická univerzita Ostrava.*
- [5] Janošek, M.: *Působení vlhkosti na vlastnosti izolačních materiálů vystavených tepelnému a elektrickému namáhání, Diplomová práce, Brno 2008.*
- [6] Mentlík, V. *Dielektrické prvky a systémy.* Plzeň BEN, 2006. ISBN 80-7300-189-6.
- [7] Palko, R.: *Teoretický rozbor elektrického průrazu, Diplomová práce, Vysoké učení technického v Brně 2012.*
- [8] Vlček, J., Ovčáčiková, H.: *Speciální keramické materiály: Studijní materiály pro studijní obor Tepelná technika a keramické materiály, Fakulty metalurgie a materiálového inženýrství, Vysoká škola báňská – technická univerzita Ostrava.*
- [9] Kyocera datasheet oside ceramics. Dostupné z: <https://kyocera-solutions.de/en/downloads/frialit-degussit-high-performance-ceramics>
- [10] <https://www.ceramtec.com/ceramic-materials/aluminum-oxide/>
- [11] [https://www.csceramic.com/alumina-industrial-parts\\_c53](https://www.csceramic.com/alumina-industrial-parts_c53)
- [12] <https://www.machiningceramicparts.com/products.html>
- [13] <https://publi.cz/books/353/06.html>
- [14] <https://www.dps-az.cz/cad-cam-cae/id:10027/analyza-svodoveho-proudu-na-dps>
- [15] [http://webfyzika.fsv.cvut.cz/PDF/prednasky/elektricke\\_pole\\_vodice\\_dielektrika.pdf](http://webfyzika.fsv.cvut.cz/PDF/prednasky/elektricke_pole_vodice_dielektrika.pdf)
- [16] [https://physics.mff.cuni.cz/kfpp/skripta/kurz\\_fyziky\\_pro\\_DS/display.php/elmag/1\\_4](https://physics.mff.cuni.cz/kfpp/skripta/kurz_fyziky_pro_DS/display.php/elmag/1_4)
- [17] <http://kf-lin.elf.stuba.sk/KrempaskyFyzika/19.pdf>
- [18] <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/222-elektricke-pole-elektricka-intenzita>
- [19] [https://physics.mff.cuni.cz/kfpp/skripta/kurz\\_fyziky\\_pro\\_DS/display.php/elmag/1\\_2](https://physics.mff.cuni.cz/kfpp/skripta/kurz_fyziky_pro_DS/display.php/elmag/1_2)

## SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

$\varepsilon^*$ [-]	komplexní permitivita
$\varepsilon'$ [-]	relativní permitivita
$\varepsilon''$ [-]	ztrátové číslo
$\varepsilon_s$ [-]	statická permitivita
$\varepsilon_\infty$ [-]	optická permitivita
$\rho_v$ [ $\Omega$ m]	vnitřní rezistivita
$\rho_p$ [ $\Omega$ ]	povrchová rezistivita
$b, B$ [-]	materiálové konstanty
$E_P$ [ $V\ m^{-1}$ ]	elektrická pevnost
$f$ [Hz]	kmitočet
$j$ [-]	imaginární jednotka
$m$ [kg]	hmotnost
$n$ [ $m^{-3}$ ]	koncentrace nosičů elektrického náboje
$P$ [ $C\ m^{-2}$ ]	vektor polarizace
$q$ [C]	elementární elektrický náboj
$t$ [hodin/r]	doba života izolace
$T$ [K]	absolutní teplota
$tg\delta$ [-]	ztrátový činitel
$\delta$ [°]	ztrátový úhel
$\gamma_v$ [ $S\ m^{-1}$ ]	vnitřní konduktivita
$\gamma_p$ [ $S\ m^{-1}$ ]	povrchová konduktivita
$P_z$ [W]	ztrátový výkon
$\vartheta$ [°C]	teplota
$\mu$ [ $m^2V^{-1}s^{-1}$ ]	driftová pohyblivost
$\tau$ [s]	relaxační doba
$m$ [-]	materiálová konstanta
$m$ [kg]	hmotnost
$m_0$ [kg]	hmotnost dokonale vysušené látky
$m^*$ [kg]	hmotnost navlhle látky
$\psi$ [%]	vlhkost

# SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1.1	Schéma nepolárního dielektrika v elektrickém poli .....	3
Obrázek 1.2	Schéma polárního dielektrika v elektrickém poli .....	5
Obrázek 1.3	Energetické pásy izolantů, (vlastních a nevlastních) polovodičů a vodičů .....	5
Obrázek 2.1	Podstata elektronové polarizace.....	5
Obrázek 2.2	Podstata iontové polarizac .....	6
Obrázek 2.3	Podstata iontové-relaxační polarizace .....	7
Obrázek 2.4	Podstata vzniku mezivrstvé polarizace.....	7
Obrázek 2.5	Přehled typů polarizací .....	8
Obrázek 2.6	Proud tekoucí po povrchu izolantu .....	12
Obrázek 2.7	Teplotní /a)/ ( $f = \text{konst.}$ ) a kmitočtová /b)/ ( $T = \text{konst.}$ ) závislost ztrátového činitele nepolárního dielektrika.....	15
Obrázek 2.8	Teplotní /a)/ ( $f = \text{konst.}$ ) a kmitočtová /b)/ ( $T = \text{konst.}$ ) závislost ztrátového činitele polárního dielektrika .....	15
Obrázek 2.9	Vliv změny kmitočtu, resp.teploty na průběhy teplotní /a)/, resp. kmitočtové /b)/ závislosti ztrátového činitele polárního dielektrika.....	15
Obrázek 2.10	Fázorové diagramy ideálního a skutečného kondenzátoru – vysvětlení ztrátového činitele.....	16
Obrázek 2.11	Elektrická pevnost $U_p$ v závislosti na výkonu rozptýleném v materiálu .	16
Obrázek 4.1	Ekvipotenciální plochy a siločáry kolem vodní kapky s kontaktním úhlem 120, 90, 60 a 30 stupňů .....	25
Obrázek 6.1	Graf závislosti elektrických vlastností na příměsi .....	34
Obrázek 6.2	Graf závislosti tepelných vlastností na příměsi .....	34
Obrázek 7.1	Výchozí geometrie simulované sestavy.....	38
Obrázek 7.2	Graf závislosti maximální hodnoty intenzity elektrického pole na relativní permitivitě plynného prostředí .....	39
Obrázek 7.3	Pohled na rozložení intenzity elektrického pole v kritické oblasti u vnitřního rohu elektrody .....	39
Obrázek 7.4	Graf závislosti maximální hodnoty intenzity elektrického pole na povrchu izolátoru na minimální vzdálenosti vnitřních stěn elektrod.....	40
Obrázek 7.5	Graf závislosti maximální hodnoty intenzity elektrického pole na povrchu izolátoru na minimální vzdálenosti mezi elektrodou a izolátorem .....	41
Obrázek 7.6	Graf závislosti maximální hodnoty intenzity elektrického pole na povrchu tyče na velikosti poloměru rohu elektrody. ....	42

Obrázek 7.7	Pohled na rozložení intenzity elektrického pole v kritické oblasti u vnitřního rohu elektrody .....	43
Obrázek 7.8	Graf závislosti maximální hodnoty intenzity elektrického pole na vzdálenosti hrany elektrody od tyče .....	43
Obrázek 7.9	Pohled na rozložení intenzity elektrického pole v kritické oblasti u vnitřního rohu elektrody s parametrem hloubky výřezu $h$ .....	44
Obrázek 7.10	Graf závislosti maximální hodnoty intenzity elektrického pole na hloubce zahloubení kosené hrany .....	45
Obrázek 7.11	Graf závislosti maximální hodnoty intenzity elektrického pole na minimální šířce zahloubení kosené hrany.....	45
Obrázek 7.12	Pohled na rozložení intenzity elektrického pole v kritické oblasti u vnitřního rohu elektrody s parametrem dalšího prohloubení $p$ .....	46
Obrázek 7.13	Graf závislosti maximální hodnoty intenzity elektrického pole na velikosti dalšího prohloubení $p$ .....	46
Obrázek 7.14	Pohled v řezu na rozložení intenzity pole modifikace tvaru elektrody s názvem Pravoúhlé zahloubení.....	47
Obrázek 7.15	Graf závislosti maximální hodnoty intenzity elektrického pole po povrchu izolátoru na hloubce pravoúhlého zahloubení $b$ .....	47
Obrázek 7.16	Hrany pravoúhlého zahloubení elektrody $H1$ a $H2$ .....	48
Obrázek 7.17	Graf závislosti maximální hodnoty intenzity elektrického pole v okolí hrany $H1$ na velikosti jejího poloměru .....	49
Obrázek 7.18	Graf závislosti maximální hodnoty intenzity elektrického pole po povrchu izolátoru na velikosti poloměru hrany $H1$ .....	40
Obrázek 7.19	7.19 Graf závislosti maximální hodnoty intenzity elektrického pole po povrchu izolátoru na velikosti poloměru hrany vnitřního rohu elektrody $H2$ .....	50
Obrázek 7.20	Detail oblasti kontaktu elektrody s izolátorem .....	51
Obrázek 7.21	Graf závislosti hodnoty intenzity elektrického pole v bodě $A$ na velikosti poloměru hrany elektrody v oblasti kontaktu elektrody s izolační tyčí..	51
Obrázek 7.22	Graf závislosti hodnoty intenzity elektrického pole v okolí hrany $H1$ na velikosti jejího poloměru $r_{H1}$ .....	52
Obrázek 7.23	Rozložení intenzity pole pro dvě různé hloubky pravoúhlého zahloubení .....	53
Obrázek 7.24	Závislost povrchu izolátoru s větší intenzitou než $1,48$ kV/mm (vlevo) a závislost průměrné hodnoty intenzity na povrchu tyče na $1$ mm její délky na hloubce pravoúhlého zahloubení. ....	54
Obrázek 7.25	Schéma elektrody podle modelu s nejlepšími výsledky (vlevo) s detailem $C$ (vpravo) .....	54
Obrázek 7.26	Detail $B$ pravoúhlého zahloubení vnitřní stěny elektrody .....	55

Obrázek 8.1	Pohled na uložení výrobku do otevřené komory .....	56
Obrázek 8.2	Pohled na uzavřenou komoru .....	56
Obrázek 8.3	Grafy závislosti svodového proudu na přiloženém napětí pro vzájemnou vzdálenost elektrod 10 mm .....	57
Obrázek 8.4	Grafy závislosti svodového proudu na přiloženém napětí pro vzájemnou vzdálenost elektrod 9 mm .....	58
Obrázek 8.5	Grafy závislosti svodového proudu na přiloženém napětí pro vzájemnou vzdálenost elektrod 7 mm. ....	58
Obrázek 8.6	Grafy závislosti svodového proudu na přiloženém napětí pro různé vzájemné vzdálenosti elektrod sestavy uložené ve vzduchu .....	59

## SEZNAM TABULEK

Tabulka 6.1	Vliv množství příměsi na vlastnosti $Al_2O_3$ (Ceramtec) .....	33
Tabulka 6.2	Vliv množství příměsi na vlastnosti $Al_2O_3$ (CScermic).....	35
Tabulka 6.3	Porovnání různých materiálů 99,5% $Al_2O_3$ .....	36
Tabulka 6.4	Porovnání různých materiálů 99,7% $ZrO_2$ .....	37
Tabulka 8.1	Hodnoty maximálního naměřeného proudu pro napětí 30 kV .....	59
Tabulka 8.2	Mezní napětí a proudy pro umístění ve vzduchu .....	60

