

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra elektroenergetiky a ekologie

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Teoretický rozbor elektrického průrazu

vedoucí práce: Doc. Ing. Pavel Trnka, Ph.D.

autor: Radek Palko

2012

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Radek PALKO**
Osobní číslo: **E10N0197P**
Studijní program: **N2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu: **Teoretický rozbor elektrického průrazu**
Zadávací katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

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


1. Popište fyzikální procesy v elektrických izolantech při působení silného elektrického pole.
2. Popište vznik průrazu v elektrických izolacích pevného a kapalného skupenství.
3. Popište principy přenosu elektrického náboje v elektroizolačních materiálech.
4. Popište vznik prostorového náboje v elektroizolačních systémech.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího
Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran
Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:


1. Záliš, K. : Částečné výboje v izolačních systémech elektrických strojů, Academia, 2005
2. Internetové databáze, elektronické informační zdroje
3. Normy IEC, EN, ČSN, IEEE
4. Sirotinskij : Technika vysokého napětí, SNTL, 1956
5. Mentlík, V. : Dielektrické prvky a systémy, BEN, 2006

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Pavel Trnka, Ph.D.**
Katedra technologií a měření

Datum zadání diplomové práce: **17. října 2011**
Termín odevzdání diplomové práce: **11. května 2012**


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




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

V Plzni dne 17. října 2011

Anotace

Tato diplomová práce se zabývá problematikou dějů, které nastávají v dielektrikách po jejich vložení do elektrického pole. V další části jsou popsány teorie přeskoků, průrazů a pohybů náboje v plynných, pevných a kapalných izolantech. Na tuto část navazuje samotný experiment, ve kterém se zjišťovala závislost hodnoty přeskokového napětí na měnících se podmínkách na povrchu izolantu.

Klíčová slova

Dielektrikum, polarizace, elektrický přeskok, elektrický průraz, elektrická vodivost, povrchová rezistivita

Abstrakt

The master's thesis deals with the problems of the processes which happen in dielectrics when put into electric field. Further there are described theories of discharge, breakdown and motion of a charge in gaseous, solid and liquid insulants. This part is followed by the experiment itself, in which the dependence of the discharge voltage's value on the changing conditions of the insulant's surface was being measured.

Key words

Dielectric, polarization, electrical flashover, electrical breakdown, electrical conductivity, surface resistivity

Prohlášení

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

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

V Plzni dne

.....

podpis autora

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové Doc. Ing. Pavlu Trnkovi, Ph.D. za cenné rady, připomínky a trpělivost při vedení mé diplomové práce.

Obsah

Úvod	8
1 Fyzikální procesy v elektrických izolantech	9
1.1 Silné elektrické pole	9
1.2 Elektrický náboj	10
1.3 Charakteristika izolantu a dielektrika	11
1.4 Polarizace a její mechanismy	13
1.4.1 Deformační polarizace	15
1.4.2 Relaxační polarizace	18
1.4.3 Migrační polarizace	21
2 Principy přenosu elektrického náboje v elektroizolačních materiálech	25
2.1 Elektrická vodivost plyných izolantů	25
2.2 Elektrická vodivost kapalných izolantů	27
2.3 Elektrická vodivost pevných izolantů	28
2.3.1 Povrchová vodivost pevných izolantů	31
2.4 Elektrická pevnost	33
2.4.1 Elektrická pevnost plyných izolantů	34
2.4.2 Elektrická pevnost kapalných izolantů	38
2.4.3 Elektrická pevnost pevných izolantů	41
2.4.4 Kombinace pevného a plyného izolantu	47
3 Vliv materiálu, jeho povrchu a tvaru elektrod na velikost přeskokového napětí	49
3.1 Měření povrchové rezistivity	51
3.2 Měření hodnoty přeskokového napětí	54
4 Závěr	63
Použitá literatura	64
Seznam příloh	66

Úvod

Všechna elektrická zařízení se skládají ze dvou hlavních komponentů. Z vodivých materiálů, které obstarávají přenos elektrické energie a z dielektrik, které se starají o to, aby byly elektricky odděleny ty části, které nemají být na stejném potenciálu. Na kvalitě dielektrika, použitého v elektrickém zařízení, silně závisí jeho spolehlivost a životnost. Dielektrikum je tedy kritickou částí všech elektrických zařízení, bez kterého by nemohla fungovat. Na vývoj a pochopení dějů uvnitř dielektrik se tedy vynakládá značné úsilí.

V této práci jsou vysvětleny polarizační děje, probíhající uvnitř dielektrika po jeho vložení do elektrického pole. Jelikož žádné dielektrikum není ideální, má i své negativní vlastnosti. Ty jsou rozebrány v další části této práce. Je zde popsán nežádoucí přenos elektrického náboje neboli elektrická vodivost uvnitř všech tří skupenství dielektrika. Další důležitou vlastností dielektrika je elektrická pevnost, které je věnována další kapitola.

Velký vliv na parametry dielektrika má jeho vlhkost. Protože není většinou dielektrikum používáno v ideálních a neměnných podmínkách, tak se často mění vlivem vzdušné vlhkosti, i jeho povrchová rezistivita. Popřípadě se vlivem různých, často i meteorologických vlivů, mění i jeho povrch. Právě vliv vlhkosti a povrchu dielektrika na hodnotě přeskokového napětí byl cílem zkoumání v této práci. Byly zhotoveny testovací vzorky osmi různých izolačních materiálů. Nejdříve se vzorky změřily v jejich výchozím stavu, kdy byly skladovány za běžných podmínek (v době jejich tvorby byla teplota 23 °C a vlhkost vzduchu 60 %). U vybraných vzorků byl posléze měněn jejich povrch. V další fázi experimentu byly vzorky ponořeny na 120 h do deionizované vody, aby do sebe absorbovaly vlhkost. Vzorky byly dále vloženy na 120 h do pece, aby byly zjištěny jejich vlastnosti v ideálních podmínkách bez absorbované vlhkosti. Měřítkem pro absorbovanou vlhkost byla povrchová rezistivita vzorků.

1 Fyzikální procesy v elektrických izolantech

Dielektrikum je látka, která má specifické vlastnosti. Pokud je dielektrikum vloženo do elektrického pole, tak uvnitř něj probíhá mnoho fyzikálních procesů. Tyto procesy a jeho vlastnosti jsou popsány v následujících kapitolách.

1.1 Silné elektrické pole

Nejdříve je potřeba si nadefinovat, co znamená silné elektrické pole. Přesná definice silného elektrického pole však neexistuje. Pro každý izolant je tato hranice položena na jiné úrovni. V běžných hladinách elektrického pole probíhají v izolantech jen polarizační jevy a toto pole nemá zásadní vliv na jejich životnost. Jejich životnost ovlivňují jiné faktory než je elektrické stárnutí. Například tepelné stárnutí nebo chemické stárnutí. Pokud ovšem stoupne hodnota elektrického pole nad určitou, u každého izolantu rozdílnou kritickou mez, tak se elektrické stárnutí stane významným faktorem ovlivňujícím životnost izolantu. Překročením této meze se v izolantu začínají dít degradační mechanismy díky tomu, že je překročena tzv. aktivační energie. Její hodnota je závislá na objemu materiálu. Tato hodnota není pro jeden izolační materiál vždy stejná. Klesá se zvyšující se hodnotou teploty. Například u kabelu typu XLPE (zesítěný polyetylén) byla zjištěna tato aktivační energie $1,95-2,1 \cdot 10^{-19}$ J. Kritická hodnota elektrického pole pro tento kabel je 9-12 kV/mm při 22 °C. Zdálo by se, že tato energie má za následek roztržení vazby C-C v materiálu a jeho následnou degradaci. Ovšem energie, potřebná k roztržení této vazby, je téměř dvojnásobná. Během zkoumání, proč stačí poloviční energie na roztržení vazby, se přišlo na to, že jsou při elektrickém stárnutí v materiálu přítomny volné radikály. Přítomnost volných radikálů v polyetylenu tedy znamená, že se rychleji porušují vazby mezi atomy uhlíku. Při elektrickém stárnutí jsou tyto volné radikály v látce dále emitovány. Při intenzitě pod 10 kV/mm, nebyly v polyetylenu nalezeny žádné volné radikály. Pod touto mezí lze tedy předpokládat, že není polyetylen vystavován žádnému elektrickému stárnutí.

Přesný mechanismus vlivu elektrického stárnutí ovšem není v dnešní době objeven. Jsou známy pouze údaje zjištěné výzkumem a z nich jsou používány dva empiricky odvozené modely:

Mocninný model:

$$\tau_E = k \cdot E^{-n} \quad (1)$$

Exponenciální model:

$$\tau_E = e^{-bE} \quad (2)$$

kde τ_E je doba života (h),

E je intenzita elektrického pole [kV.mm-1]

k , n , b empiricky zjištěné konstanty

Zvláště exponenciální model poskytuje poměrně přesné výsledky při výpočtech životnosti izolantu. Tyto modely ovšem fungují pouze při vysokých intenzitách elektrického pole. Při nižších intenzitách selhávají. Toto má zřejmě důvod v tom, že při nižších intenzitách elektrického pole už se elektrické stárnutí neprojevuje. Existuje tedy určitá prahová intenzita, od které se začíná elektrické stárnutí projevovat. U každého materiálu je tato hodnota jiná a musí se experimentálně zjistit. Velikost elektrického namáhání také závisí na parametrech přiloženého napětí. Jinak se chová dielektrikum při namáhání sinusovým napětím a jinak při namáhání napěťovými pulzy. Namáhání napěťovými pulzy se projevuje například při řízení elektrických stojů pomocí měničů kmitočtu.

Během elektrického namáhání jsou hlavním činitelem degradace izolantu povrchové a částečné výboje. Tomuto tématu je věnována část kapitoly 2.4.3.3 [1] [2] [3].

1.2 Elektrický náboj

Elektrický náboj je skalární fyzikální veličina, která vyjadřuje schopnost působit vzájemnou elektrickou silou vzájemně mezi dvěma tělesy. Elektrický náboj může být kladný nebo záporný. Proto mohou být síly buď přitažlivé nebo odpudivé. Tělesa, která nesou kladný nebo záporný elektrický náboj nazýváme kladně nebo záporně nabitá tělesa. Značka elektrického náboje je Q a jednotka je C (Coulomb). Náboj jednoho coulombu projde průřezem vodiče za jednu sekundu při proudu jednoho ampéru. Stálými nositeli elektrického náboje jsou elementární částice. Nejmenšími stabilními částicemi s elektrickým nábojem jsou protony a elektrony. Protony jsou kladné a elektrony jsou záporné. Elementární náboj se značí e a má hodnotu $1,602 \cdot 10^{-19}$ C [4] [5] [6].

1.3 Charakteristika izolantu a dielektrika

Dielektrikum je látka, která je navenek elektricky neutrální, ale po vložení do elektrického pole se v ní vytvoří vlastní vnitřní elektrické pole. Tato látka má tedy schopnost se polarizovat. Díky této vlastnosti je dielektrikum aktivní prvek.

Naproti tomu izolant je materiál s malou elektrickou vodivostí a s velkou elektrickou pevností. Má zabránit průchodu proudu mezi dvěma místy s rozdílným elektrickým potenciálem. Izolant je tedy pasivní látka, která má za úkol zabránit průchodu proudu mezi dvěma prostředími.

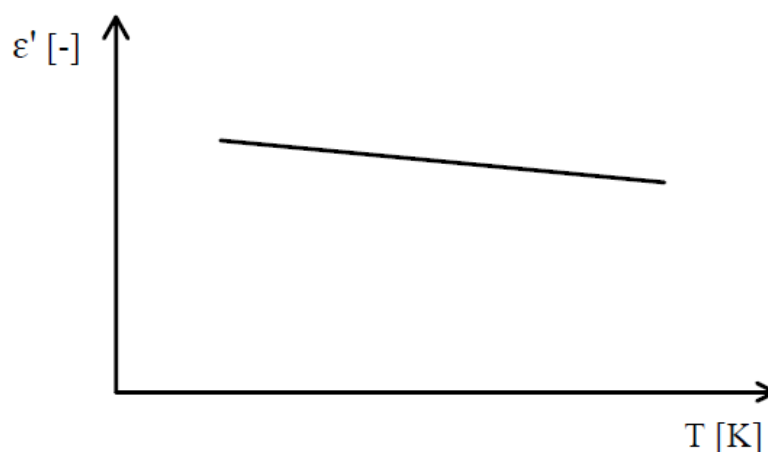
Každý izolant je dielektrikem, naopak ne každé dielektrikum může být izolantem.

Tabulka 1 Rozdělení izolačních materiálů [7]

Plynné izolanty	Vzduch Ostatní plyny	
Kapalné izolanty	Přírodní izolační oleje rostlinné	Kabelové Transformátorové a spínačové Kondenzátorové
	Minerální oleje	získané z ropy, poškozují životní prostředí
	Syntetické izolační kapaliny	Polymeráty nenasycených uhlovodíků Chlorované uhlovodíky Fluorované uhlovodíky Organické étery Tekuté silikonové polymery
Tuhé ústojné izolanty	Přírodní pryskyřice Vosky, bitumeny, kompaudy Elektroizolační laky Dřevo, papír, lepenka Textilní izolanty Izolanty na bázi celulózy Termosety Kaučuky	
Tuhé neústojné izolanty	Přírodní minerály Lakované izolanty Plátované elektroizolační materiály	

Dielektrika se dělí na dvě skupiny. První skupina jsou **polární dielektrika**. Tato skupina látek se vyznačuje tím, že ve svém objemu obsahují permanentní elektrické dipólové momenty i bez působení vnějšího elektrického pole. V tomto stavu jsou ovšem dipólové momenty orientovány nahodile a z vnějšího hlediska nemá látka žádný dipólový moment. Dipólový moment se objeví až po vložení látky do vnějšího elektrického pole, kdy se permanentní dipólové momenty stočí ve směru elektrického pole. Tato vlastnost je dána vnitřní strukturou látek. Nositeli těchto dipólů jsou molekuly, které nemají těžiště kladných a záporných nábojů ve stejném bodě. Zda je látka polární či nepolární také závisí na typu vazby mezi atomy. Když má látka iontovou vazbu, tak je zpravidla polární. Pokud je molekula tvořena dvěma ionty, tak je vždy polární, ale pokud je tvořena z více iontů, tak její polárnost závisí pouze na vzájemné orientaci jednotlivých vazeb mezi ionty. Výsledný dipólový moment je u složité molekuly s více vazbami dán vektorovým součtem všech dipólových momentů.

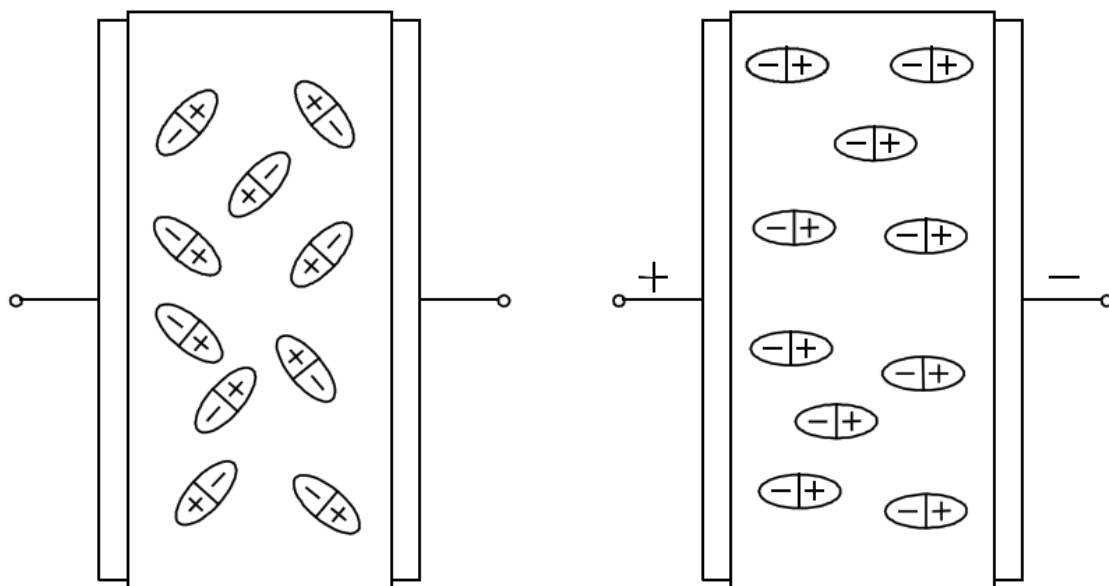
Druhá skupina dielektrik jsou **nepolární dielektrika**. Jsou to dielektrika, jejichž atomy nebo molekuly nemají vlastní dipólové momenty. Po vložení těchto látek do vnějšího elektrického pole probíhá polarizace rozdílnými mechanismy. Síly vnějšího pole způsobí to, že se těžiště kladného a záporného náboje navzájem posunou a tím vznikne vnitřní indukovaný dipólový moment. Nepolární látky mají velmi malou teplotní závislost relativní permitivity na teplotě [8] [9] [10].



Obr. 1 Teplotní závislost relativní permitivity [11]

1.4 Polarizace a její mechanismy

Hlavní vlastností dielektrika je jeho schopnost polarizovat se. Polarizaci dielektrika objevil Johann Carl Wilcke. V izolantu nejsou volné nosiče elektrického náboje. Po vložení do elektrického pole proto nedojde k jejich přeskupení na povrch. Nosiče elektrického náboje obou polarit jsou vázány v atomech, molekulách či krystalových mřížkách izolantu. Jejich polohy se však mohou mikroskopicky posunout a původně neutrální atomy se změnit na dipóly, nebo polární molekuly či polární krystalové buňky. V obou případech budou dipóly většinou orientovány souhlasným nábojem od vnějšího nabitého tělesa a budou tak zeslabovat výsledné pole v izolantu. Tento jev se nazývá polarizací dielektrika. Mírou polarizace v látce je vektor polarizace P [$C \cdot m^{-2}$] a relativní permitivita ϵ_r [-]. Polarizovatelnost α vyjadřuje schopnost polarizace látky. Je to základní fyzikální vlastnost dielektrik. S polarizovatelností souvisí permitivita ϵ_r .



Obr. 2 Model polarizace dielektrika po přiložení elektrického pole [10]

Na dielektriku lze nahlížet dvěma způsoby. Prvním z nich je makroskopické hledisko. V tomto případě nahlížíme na dielektrikum pouze jako na objekt s určitými rozměry a zkoumáme jen jeho vnější projevy polarizačních dějů. Pokud je dielektrikum vloženo do

elektrického pole, tak se na jeho povrchu objeví elektrický vázaný náboj. Dielektrikum tím získá jako celek dipólový moment. Na základě tohoto můžeme definovat vektor polarizace.

$$\vec{P} = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{M}}{\Delta V} \quad (3)$$

Kde $\Delta \vec{M}$ dipólový moment objemového elementu ΔV
 ΔV objemový element látky [m^3]

Pro vektor elektrické indukce platí

$$\vec{D} = \varepsilon \cdot \vec{E} \quad (4)$$

Kde ε permitivita dielektrika $\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r$ ($\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$)

Po vložení dielektrika do deskového kondenzátoru se zvětší velikost náboje na elektrodách podle vztahu

$$Q = Q_0 + Q_p \quad (5)$$

Kde Q_0 původní velikost náboje na elektrodách
 Q_p vázaný náboj na povrchu dielektrika

Jedním z nejdůležitějších parametrů při makroskopickém pohledu na dielektrikum, je relativní permitivita ε_r . Relativní permitivita nám říká, kolikrát se zvýší kapacita deskového kondenzátoru po vložení dielektrika, oproti stejnému kondenzátoru, jehož dielektrikum tvoří pouze vakuum.

$$C = \varepsilon_r \cdot C_0 \quad (6)$$

Kde ε_r relativní permitivita dielektrika
 C_0 kapacita deskového kondenzátoru, který má jako dielektrikum vakuum
 $C_0 = \varepsilon_0 \cdot \frac{S}{d}$

Druhým pohledem na dielektrikum je mikroskopické hledisko. V tomto případě nahlížíme na dielektrikum jako na látku, která se skládá z podřízených elementů. Sledujeme pohyb nosičů náboje uvnitř tohoto dielektrika a jeho chování na úrovni jeho struktury. Polarizace z makroskopického hlediska se projevuje orientací stávajících nebo nově vzniklých dipólových momentů.

Veličina, která charakterizuje polarizační jevy z tohoto hlediska, je polarizovatelnost α . Pro velikost indukovaného dipólového momentu platí vztah

$$\vec{\mu} = \alpha \cdot \vec{E}_L \quad (7)$$

Kde \vec{E}_L elektrická intenzita lokálního pole

α polarizovatelnosť

Pomocí polarizovatelnosti lze vyjádřit vektor polarizace dielektrika

$$\vec{P} = n \cdot \alpha \cdot \vec{E}_L \quad (8)$$

Kde n koncentrace indukovaných dipólových momentů [m^{-3}]

Pro makroskopické hledisko je tedy nejdůležitější veličinou relativní permitivita. Pro makroskopické hledisko musíme poznat souvislost mezi lokálním elektrickým polem E_L a středním makroskopickým elektrickým polem E . Lokální pole je intenzita elektrického pole přímo v místě konkrétního dipólového momentu.

O tom, jak bude polarizace probíhat, rozhoduje stavba a struktura daného dielektrika. Všeobecně dochází v dielektrikách k více polarizačním mechanismům najednou. Výsledek je dán superpozicí jednotlivých polarizací [10] [12].

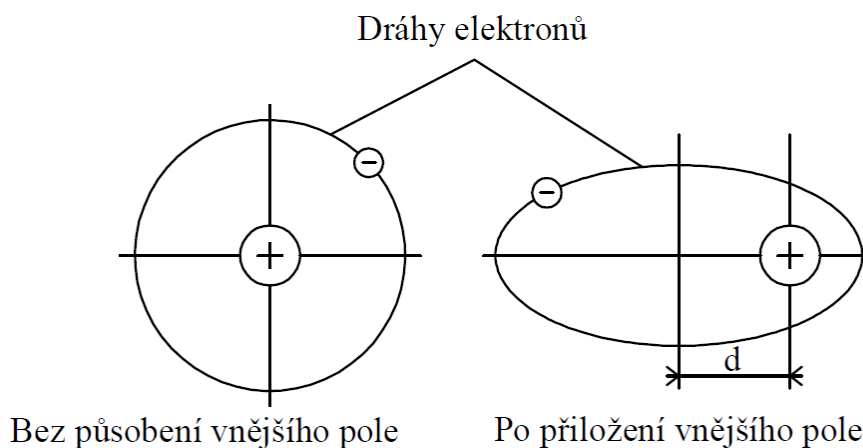
1.4.1 Deformační polarizace

Deformační polarizace je druh polarizace, při které jsou obvykle nosičem elektrického náboje elektron, iont nebo stálý dipól, který je ovšem pevně zakotvený ve struktuře látky. Nosič je vázaný tak silně, že se při působení elektrického pole může posunout pouze o malou vzdálenost. Díky těmto vlastnostem se deformační polarizaci říká také pružná polarizace. I přes malý posun však může být ovlivnění relativní permitivity značné, protože se posunuje velké množství nosičů. Díky pevné vazbě je ustálení polarizace velice rychlé. Stejně tak i po skončení působení elektrického pole se nosiče vrátí do původních poloh. Deformační polarizace nejsou závislé ani na teplotě a ani na frekvenci. S pevností pevné vazby souvisí i další vlastnost, že jsou tyto polarizace bezetrátové [8] [10] [11].

1.4.1.1 Elektronová polarizace

V klidovém stavu bez vnějšího elektrického pole, jsou těžiště kladného i záporného náboje v jednom bodě a tudíž není atom nijak polarizovaný a nemá žádný dipólový moment. Po přiložení elektrického pole začnou na jádro a na elektronový obal působit elektrostatické síly opačného směru. Díky malé volnosti elektronů dojde k jejich malému posunutí vůči jádru. Tím dojde k deformaci elektronového obalu a k posunutí těžiště záporného náboje od těžiště kladného náboje. Nejvýrazněji se posunou elektrony ve valenční vrstvě, protože jsou nejslaběji vázány. Vzájemným posunutím těžišť získá atom indukovaný dipólový moment. Jeho velikost je dána velikostí vnitřního lokálního pole a polarizovatelností látky.

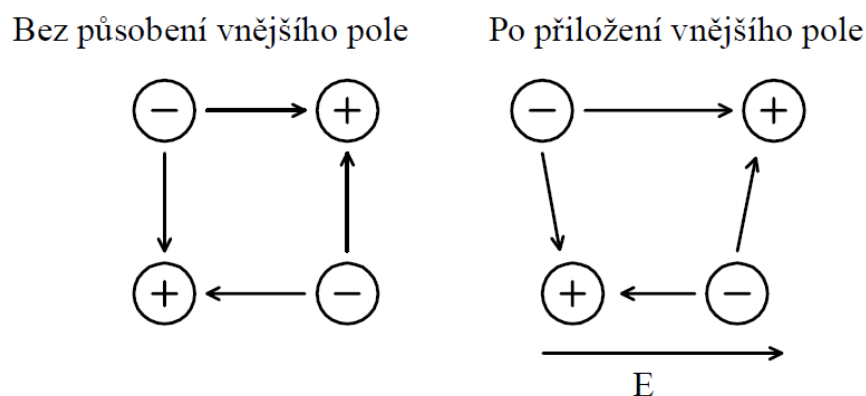
Protože je posuv minimální, tak je rychlost ustálení polarizace velice vysoká – řádově od 10^{-16} ÷ 10^{-13} s. Z rychlosti ustálení vyplývá, že není frekvenčně závislá. Díky tomu, že polarizace probíhá uvnitř atomů, tak není ovlivněna tepelným pohybem atomů. Proto není závislá na teplotě. K této polarizaci dochází vždy u všech látek v každém skupenství [8] [10] [11].



Obr. 3 Elektronová polarizace [8]

1.4.1.2 Iontová polarizace

Stavebními prvky látek, ve kterých probíhá iontová polarizace, jsou ionty, které tvoří iontové krystaly. Tyto krystaly jsou vázány iontovou vazbou. Díky tomu mají tyto látky dipólové momenty i bez vnějšího elektrického pole. Po vložení do elektrického pole dojde k pružnému posunutí iontů. K pružnému posunutí dojde proto, že jsou ionty vázány v krystalové mřížce silně. Toto posunutí způsobí změnu velikosti i směru jednotlivých dipólů. Doby ustálení se pohybují v rozmezí $10^{-13} \div 10^{-12}$ s. Tato polarizace je také frekvenčně nezávislá a bezeztrátová. Je teplotně závislá [8] [10] [11].



Obr. 4 Iontová polarizace [8]

1.4.1.3 Polarizace pružně vázaných dipólových momentů

Tato polarizace se vyskytuje v pevných látkách, ve kterých jsou molekuly vázány pružnými vazbami, ale jsou stále dostatečně silné na to, aby docházelo jen k malým posuvům. Při působení vnějšího elektrického pole opět dojde ke změně velikosti a směru dipólů. Tato polarizace je tedy v podstatě shodná s iontovou polarizací. Doby ustálení se pohybují v rozmezí $10^{-12} \div 10^{-8}$ s. Je teplotně nezávislá a bezeztrátová [8] [10].

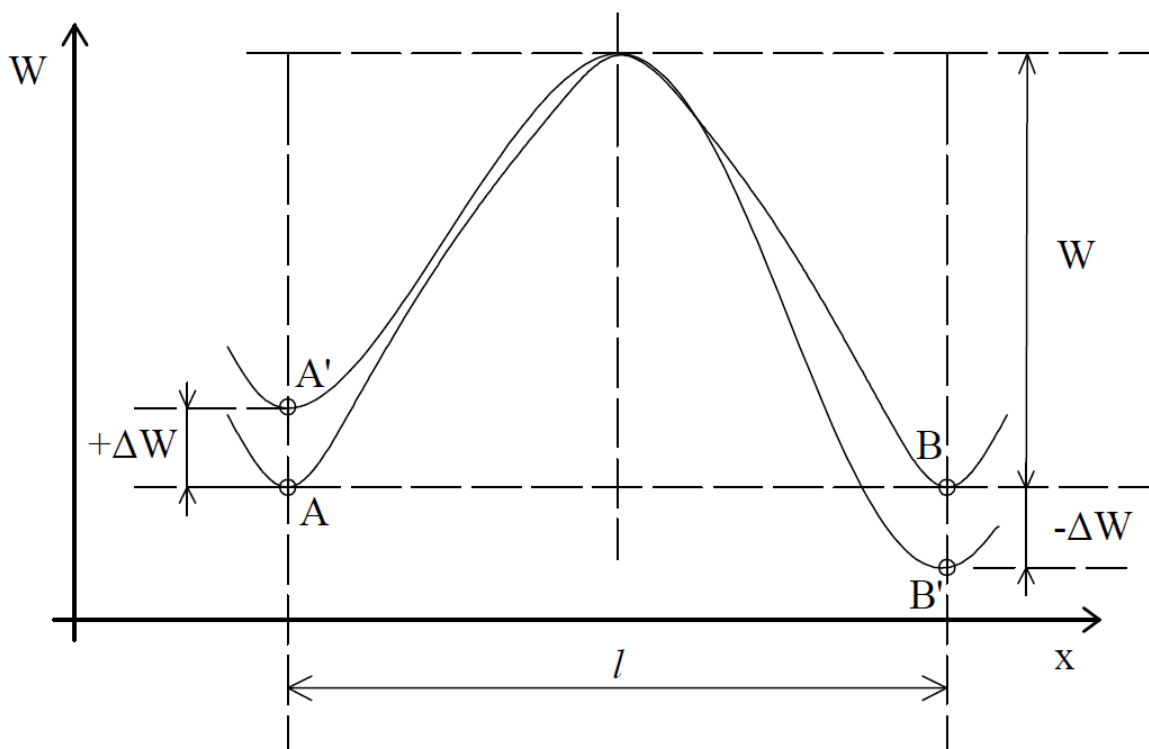
1.4.2 Relaxační polarizace

Relaxační polarizace se od deformačních liší jak delšími časy, potřebných k ustálení polarizace, tak i formou. Pro tyto polarizace jsou charakteristické relaxační pochody. Na polarizaci se podílejí slabě vázané částice, jako jsou molekuly plyných a kapalných dielektrik. Ionty jsou však v těchto molekulách vázány silně. Tyto polarizace jsou silně teplotně závislé, protože díky tepelnému pohybu mohou částice snadno překonávat potenciálové bariéry. Tento pohyb nosičů je však chaotický, a tak nedochází k polarizaci. Po vložení do elektrického pole se změni velikosti potenciálových bariér tak, že některé polohy jsou pro částice energeticky výhodnější. V této poloze bude tudíž více nosičů a rozložení náboje se stane nerovnoměrné. Tím vznikne v jednotce objemu dipólový moment. Dochází tedy k relaxační polarizaci. Tento děj však nenastává okamžitě po přiložení elektrického pole. Čas ustálení je silně závislý na okolních jevech. Časová konstanta těchto jevů se nazývá relaxační doba. Relaxační polarizace jsou na rozdíl od deformačních polarizací ztrátové [8] [10].

1.4.2.1 Iontová relaxační polarizace

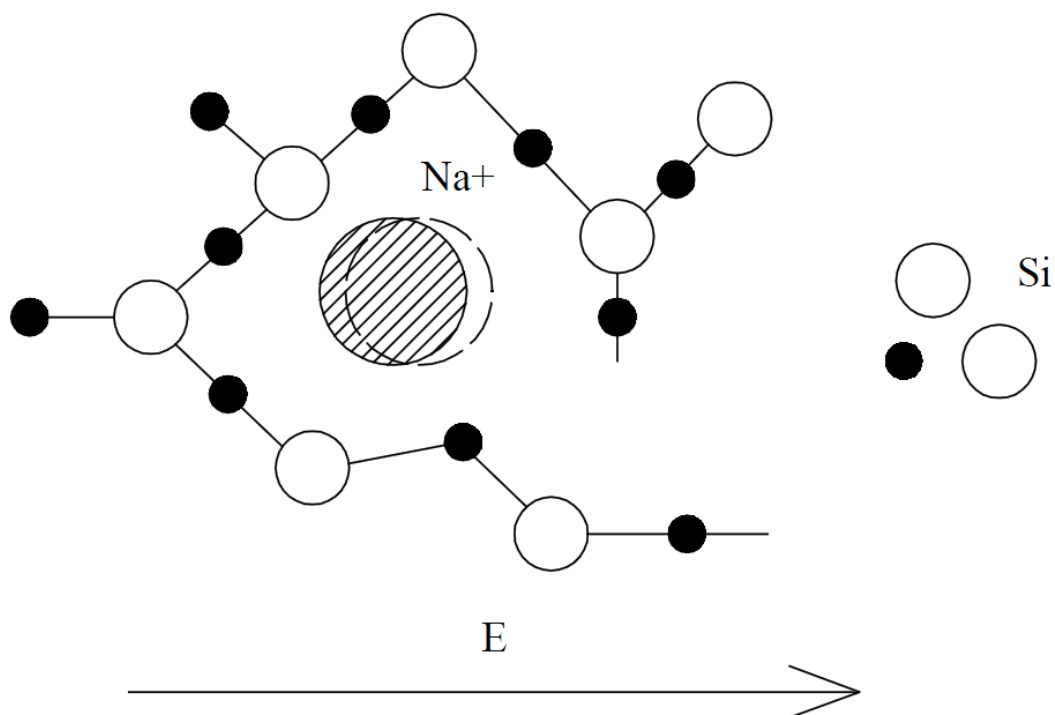
Iontovou relaxační polarizaci lze pozorovat v iontových látkách, které jsou složeny z iontů, nebo obsahují k sousedním stavebním částicím slabě vázané molekuly a atomy nečistot, nebo příměsí. Jsou to např. anorganická skla, keramika.

Pro popis této polarizace se používá matematický model tzv. dvojitě potenciálové jámy. Principem této teorie je předpoklad, že nosiče obou polarit kmitají tepelným pohybem mezi dvěma různými energeticky shodnými polohami. V prostředí bez působení elektrického pole jsou obě polohy A i B na stejné energetické hladině a pro přechod mezi hladinami musí překonat stejnou energetickou hladinu. Proto jsou pravděpodobnosti pro přechody mezi oběma hladinami stejné. Díky tomu je rozložení náboje rovnoměrné a látka se chová neutrálně.



Obr. 5 Princip dvojité potenciálové jámy [8]

Po přiložení elektrického pole dojde k posunutí energetických hladin do nových poloh. Tím se změní hloubky potenciálových bariér. Když je částice v poloze, která má nižší potenciálovou bariéru, tak je pro ni jednodušší přestoupit do polohy druhé. V druhé poloze má naopak před sebou větší potenciálovou bariéru. Díky tomu je pravděpodobnost přestupu částic z polohy s menší potenciálovou bariérou do polohy s větší potenciálovou bariérou větší než naopak. To způsobí, že náboj nebude rozložen rovnoměrně a látka bude polarizována. Tento děj však trvá delší dobu a proto je tato polarizace frekvenčně závislá. Dále je také velice teplotně závislá a ztrátová [8] [10] [11].



Obr. 6 Podstata iontové relaxační polarizace u anorganického skla [11]

1.4.2.2 Dipólová relaxační polarizace

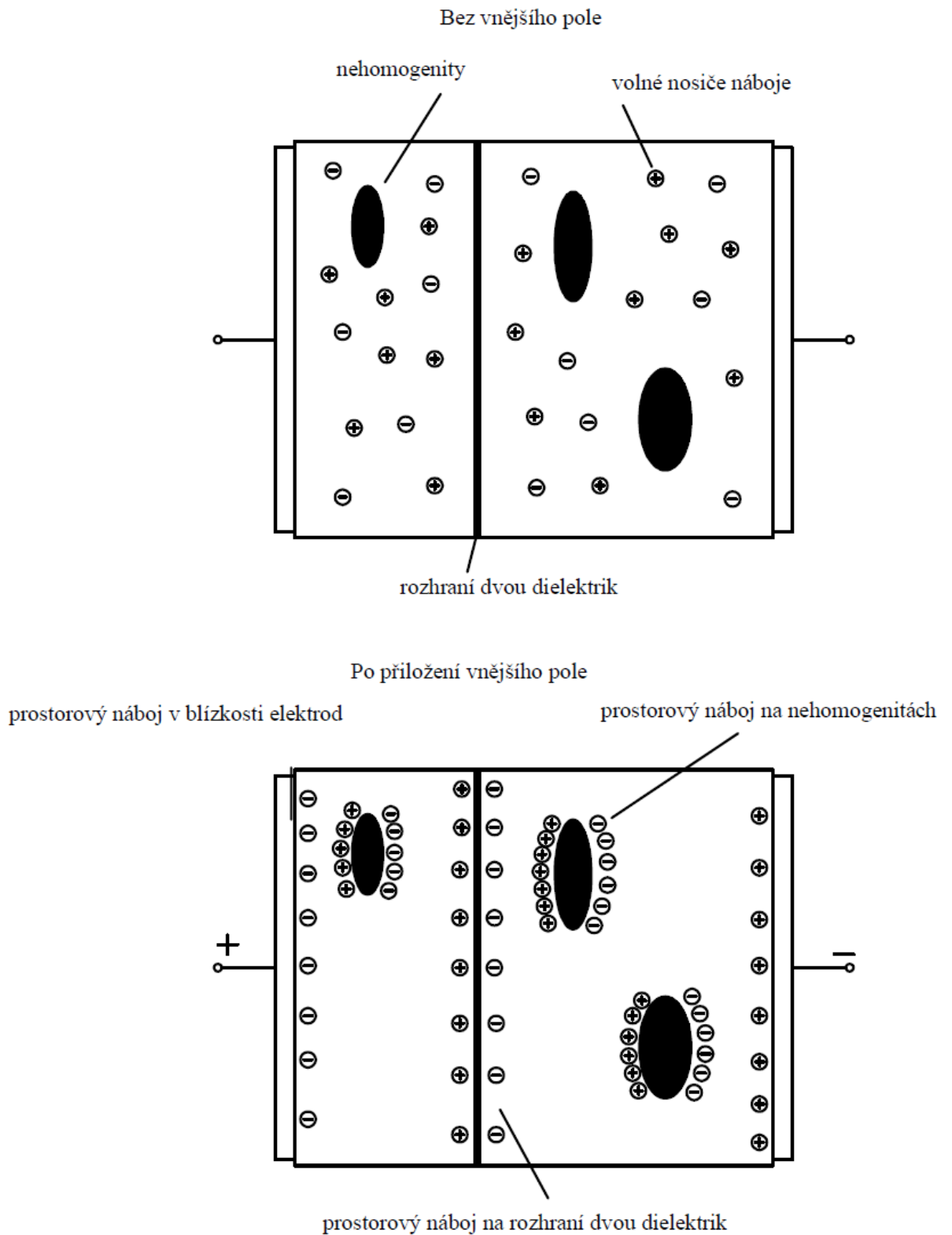
Dipólová relaxační polarizace se vyskytuje u polárních látek. Tyto látky mají dipólové molekuly vázány tak slabě, že se v elektrickém poli mohou velice snadno natáčet do směru odpovídajícího směru siločar pole. Tomuto natáčení však silně brání tepelný pohyb částic. Proto se této polarizaci někdy říká tepelná orientační polarizace. Je velmi silně teplotně závislá a je i ztrátová.

Bez přiloženého elektrického pole jsou dipóly natočeny zcela náhodně a chaoticky. Z vnějšího pohledu je výsledný dipólový moment nulový. Po vložení do elektrického pole se začne situace uvnitř látky měnit a lze to popsat opět pomocí modelu dvojité potenciálové jámy. Ovšem místo dvou energetických poloh uvažujeme dvě možné orientace permanentních dipólových momentů. Bez působení elektrického pole jsou pravděpodobnosti všech směrů natočení stejné a látka se chová z vnějšího pohledu neutrálně. Po přiložení elektrického pole jsou orientace dipólů ve směru orientace elektrického pole energeticky výhodnější než ostatní směry orientace. Po ustálení polarizace je tedy většina momentů natočena do tohoto směru a z vnějšího pohledu se látka jeví jako polarizovaná. Při zvyšování teploty roste tepelný pohyb

molekul, který působí proti vlivu vnějšího elektrického pole a tím dochází k zeslabení polarizace [8] [10].

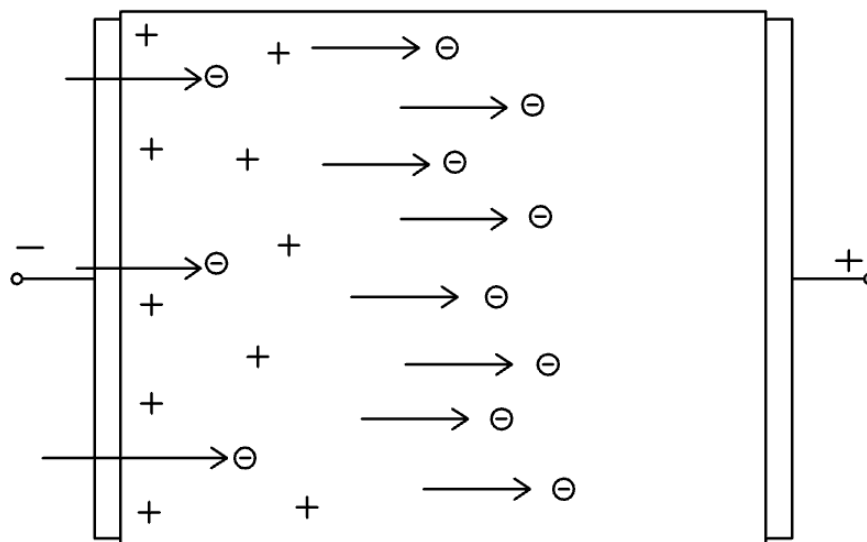
1.4.3 Migrační polarizace

Tato polarizace se vyznačuje tím, že se na ní podílí také volné nosiče elektrického náboje. Je to tedy polarizace migrační, nebo polarizace vznikající prostorovým nábojem. Nutnou podmínkou pro vytvoření prostorového náboje je, aby látka obsahovala makroskopické nehomogenity a volné nosiče elektrického náboje. Na těchto nehomogenitách se zachytávají migrující volné nosiče a tím se mění rozložení náboje uvnitř látky. Z vnějšího pohledu se to jeví, jako kdyby byla látka polarizovaná. Za nehomogenity považujeme nečistoty, praskliny, bublinky, ale patří sem i rozhraní dvou látek. Na tomto rozhraní se nosiče zachytí, protože v každé látce mají nosiče jinou pohyblivost. Migrační polarizace je nejpomalejší a ztrátová. Na rozdíl od dřívějších dob, kdy se migrační polarizace považovala jen za okrajovou, se v dnešní době ukazuje, že prostorový náboj velice ovlivňuje chování dielektrik namáhaných v elektrickém poli. Svým vlivem převyšuje všechny ostatní polarizace. Nejvíce se účinky prostorového náboje projevují u vysokonapětových zařízení a to buď u stejnosměrného napětí, nebo u nízkých frekvencí. Velký vliv má také prostorový náboj u rázového namáhání. Další zájem o pozorování vlivu prostorového náboje vyvolává v dnešní době stále se zvyšující používání kompozitních a vrstvených materiálů, které jsou nehomogenními látkami. Pro vznik prostorového náboje je jednou z podmínek přítomnost volných nosičů náboje, jejichž hlavním zdrojem jsou u polymerních materiálů elektrody přiléhající k materiálu. Pokud se jedná o extrakci elektronů na anodě, tak hovoříme o vstřikování děr. Aby mohl elektron opustit katodu, musí překonat energetickou bariéru danou velikostí výstupní práce kovu, ze kterého je katoda vyrobena. Proto velikost a tvar prostorového náboje závisí kromě na vlastním polymeru také na tvaru a materiálu elektrod. Také částečné výboje mohou být zdrojem vstřikování elektronů do polymerů. Při částečných výbojích jsou stěny dutinek bombardovány elektrony s energií $20 \div 25$ eV. Tato energie je už dostatečná k tomu, aby elektrony pronikly do izolantu a vytvořily prostorový náboj.



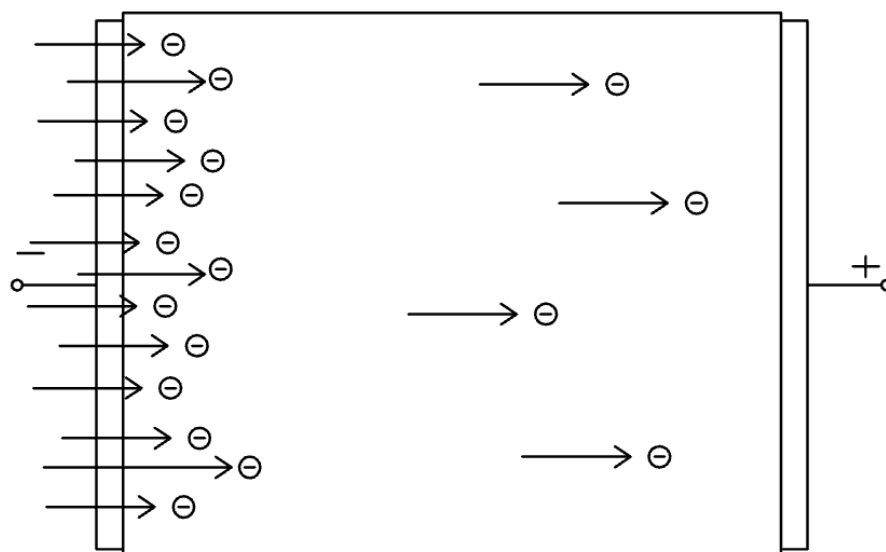
Obr. 7 Tvorba prostorového náboje [10]

Vlivem vstřikování náboje z elektrod vznikají dva druhy prostorového náboje. Prvním z nich je stav, kdy je rychlost pohybu elektronů v látce větší, než je rychlost emitování elektronů z katody. To má za následek nedostatek elektronů v blízkosti katody a vytváření kladného prostorového hetero-náboje. Kladný náboj v blízkosti katody způsobuje zesilování elektrického pole působícího na katodu. Vlivem zesílení tohoto pole dochází ke zvýšení emise elektronů z katody a to má za následek zmenšení kladného prostorového náboje a tento děj trvá, dokud nedojde k ustálení. V blízkosti anody vzniká také tenká vrstva hetero-náboje.



Obr. 8 Vytvoření hetero náboje uvnitř dielektrika [8]

V druhém případě vzniku prostorového náboje je situace opačná. Do látky se dostává z katody více elektronů, než je schopna odvést (absorbovat). V blízkosti katody se tedy hromadí elektrony a vzniká zde přebytek záporného náboje. Jedná se tedy o homo-náboj. Homo se nazývá z toho důvodu, že má polaritu shodnou s polaritou elektrody. Tento náboj způsobuje zmenšení intenzity elektrického pole působícího na katodu. Tím dochází ke snížení úrovně vstřikování elektronů do látky, dokud nedojde k ustavení rovnováhy.



Obr. 9 Vytvoření homo náboje uvnitř dielektrika [8]

Velký vliv na rozložení prostorového náboje mají hodnoty přiloženého napětí a teplota. Se zvyšujícím se napětím se mění jak rozložení prostorového náboje, tak i mechanismus jeho vzniku. Při nízkém napětí, kdy je vliv vstříkávání elektronů z katody minimální, se na tvorbě prostorového náboje podílejí především nosiče náboje, které jsou disociované v určitém objemu látky. Vliv vstříkávání elektronů se začne více projevovat až se zvyšujícím se napětím. Velký vliv na rozložení prostorového náboje má rozhraní dvou dielektrik. Na tomto rozhraní dochází k mnohem intenzivnějšímu formování prostorového náboje, než v blízkosti elektrod. Proto se této vlastnosti věnuje značná pozornost při zkoumání. Jedná se nehomogenity nežádoucí, ale i nehomogenity způsobené složením dielektrika, například kompozity [8] [10] [11] [13].

2 Principy přenosu elektrického náboje v elektroizolačních materiálech

Pro potřeby v elektrotechnice by bylo žádoucí, pokud bychom měli k dispozici ideální izolanty, které by neměly žádné volné nosiče elektrického náboje a žádné příměsi či nečistoty. V reálném světě má však každý izolant tyto nežádoucí vlastnosti. Proto musíme počítat s tím, že žádný izolant nemá nulovou vodivost a nekonečný odpor. Abychom mohli různé izolanty mezi sebou porovnávat, zavedla se jednotka měrného elektrického odporu (rezistivity ρ [$\Omega \cdot m$]) a měrné elektrické vodivosti (konduktivity γ [$S \cdot m^{-1}$]).

Elektrická vodivost

- elektronová (v elektrických polích o velmi vysoké intenzitě)
- iontová (ionty příměsí, nečistot; ionty vlastní látky)

Další hledisko, které se používá pro porovnávání, je rozdělení podle typu nosičů elektrického náboje. První skupina je, kdy je náboj přenášen prostřednictvím elementárních částic, nebo iontů. Tyto vodivosti jsou elektronová, děrová, protonová a iontová. Další je vodivost elektroforetická. Tu způsobují větší skupiny částic, např. koloidní částice. Za normálních podmínek jsou nejčastějšími volnými nosiči elektrického náboje vlastní ionty vzniklé disociací látky, popřípadě ionty příměsí a nečistot. Mechanismus spočívá v pohybu volných nebo slabě vázaných elektrických nábojů v elektrickém poli. Závisí na druhu nosičů elektrického náboje (velikosti náboje, driftové pohyblivosti) a jejich koncentraci [8] [10] [11].

2.1 Elektrická vodivost plynných izolantů

Plyny jsou při normálních teplotách a ve slabých elektrických polích velmi dobrými izolanty, protože obsahují pouze malé množství volných nosičů elektrického náboje. Tyto volné nosiče elektrického náboje vznikají převážně působením kosmického a radioaktivního záření, kterým se také říká ionizační činitelé. Pokud by se podařilo odstranit toto záření, tak by se z plynu stal téměř ideální izolant, protože energie potřebná k vytvoření volného náboje v plynu přesahuje tepelnou energii při pokojové teplotě více jak stonásobně, takže je disociace molekul plynu takřka nulová. Při ionizaci plynu dochází k uvolňování elektronů z neutrálních

atomů plynu. Záporné ionty mohou vznikat také zachytáváním volných elektronů k neutrálním atomům a molekulám plynu. Pokud je přítomno elektrické pole, tak se díky jeho působení mohou volné nosiče pohybovat v plynu téměř neomezeně, protože vzájemné působení mezi molekulami plynu je velmi malé.

Ionizaci plynů způsobují nejčastěji tyto tři mechanismy:

Prvním z mechanismů je nárazová ionizace. Při nárazové ionizaci se neutrální částice ionizují srážkou s elektronem nebo iontem. Tyto částice mají dostatečnou kinetickou energii, kterou získaly urychlením díky působení elektrického pole nebo vlivem vysoké teploty. Aby byla splněna ionizace, tak musí být splněna tato podmínka:

$$W_i \geq \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad (9)$$

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

Hlavním ionizačním činitelem v atmosféře je radon. Při jeho rozpadání v jeho okolí probíhají procesy nárazové ionizace.

Dalším z mechanismů je fotoionizace. Neutrální částice je ionizována pohlcením fotonu. Na tomto mechanismu se podílí gama, Rentgenovo a kosmické záření. Pro tuto ionizaci platí podmínka:

$$W_i \geq h \cdot \nu \quad (10)$$

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

Třetím mechanismem je povrchová ionizace. Při této ionizaci se uvolňují elektrony z povrchu elektrod. Energií pro uvolnění elektronu z elektrody je buď tepelná energie, nebo různé ionizující záření, působící na elektrodu. V případě tohoto mechanismu je proud, tekoucí plynem závislý na materiálu elektrod a tudíž není závislý na plynu.

Výboje v plynech jsou rozděleny na dva druhy. Ve slabých elektrických polích se jedná o výboje nesamostatné, které vznikají za pomoci výše uvedených mechanismů a v silných elektrických polích o výboje samostatné.

Při ionizaci plynu se mění koncentrace volných nosičů náboje. Tento děj se popisuje podle koeficientu generace g . Je definován jako počet vznikajících párů volných nosičů

náboje na jednotku objemu. V elementárním objemu dV za čas dt vznikne dN párů volných nosičů náboje:

$$dN = g \cdot dV \cdot dt \quad (11)$$

Kromě vzniku volných nosičů náboje dochází také k jejich zániku. Volné nosiče mohou zaniknout buďto rekombinací nebo zánikem na elektrodách (neutralizací). Při neutralizaci dopadnou volné nosiče náboje na elektrodu opačné polarizace a tam odevzdají nebo přijmou náboj a vrátí se do prostoru mezi elektrodami jako neutrální částice. Podmínkou je ale možnost přenosu energie mezi částicí a elektrodou. Právě díky těmto částicím lze měřit proud, protékající plynným izolantem mezi elektrodami. Naopak při rekombinaci zanikají volné nosiče tak, že se částice s opačnou polaritou srazí a tím vznikne neutrální atom nebo molekula. Pravděpodobnost rekombinace je větší, čím jsou rekombinující částice déle v bezprostřední blízkosti, tj. čím je jejich relativní rychlost menší.

Rekombinace a ionizace probíhají současně a jsou přímo úměrné s koncentrací iontových par v plynu. Konstantou úměrnosti je koeficient rekombinace r . Pokud se jedná o iontovou rekombinaci, tak lze vyjádřit podle vztahu:

$$R = r \cdot n_+ \cdot n_- \quad (12)$$

Kde	R	počet rekombinovaných iontů v jednotce objemu za jednotku času [s ⁻¹ .m ⁻³]
	r	koeficient rekombinace [m ³ .s ⁻¹]
	n ₊ ,n ₋	koncentrace kladných a záporných iontů [m ⁻³]

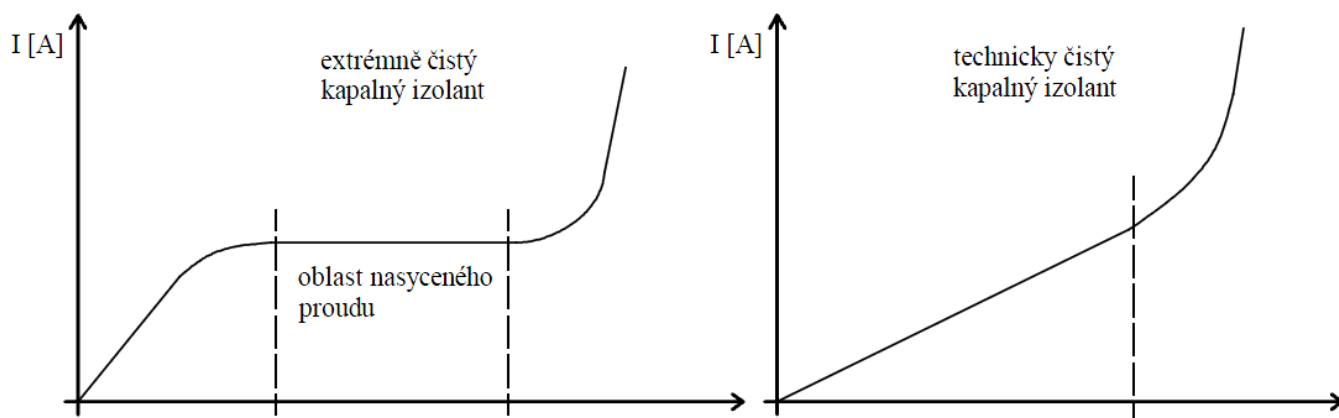
2.2 Elektrická vodivost kapalných izolantů

Kapalné izolanty jsou buď nepolární kapaliny (čisté nízkomolekulové uhlovodíky) s permitivitou okolo 2,0 ÷ 2,4, nebo polární kapaliny jako jsou minerální oleje s permitivitou 2,5 ÷ 6. V kapalinách, na rozdíl od plynů, panují rozdílné podmínky. Mají těsnější uspořádání molekul a tím mohou mezimolekulové síly, které mají kratší dosah ovlivňovat okolní částice. Tato vlastnost způsobuje omezení pohybu molekul a vede to ke vzniku pevnějších, ale nestabilních neustále se měnících uspořádání. Těmto uspořádáním se říká klastry. Další vlastností kapalin je to, že se mohou její jednotlivé částice posouvat. Kapalina je tedy schopna přizpůsobit svůj tvar nádobě, nebo může téci. Všechny tyto vlastnosti ovlivňují elektrickou

vodivost, ať přímo, či nepřímo. Z těchto důvodů se pro studium kapalných izolantů rozlišují dva druhy kapalin.

První z nich je kapalina, která se nazývá extrémně čistý kapalný izolant. Tyto kapaliny se vyznačují velmi nízkou elektrickou vodivostí $\gamma = 10^{-14} \div 10^{-15} \text{ S.m}^{-1}$. Tato vodivost vzniká díky ionizaci neutrálních molekul například zářením, dále disociací vlastních molekul, tepelnou excitací elektronů a emisí elektronů z katody.

Druhá skupina kapalných izolantů se nazývá technicky čisté izolanty. Jejich elektrická vodivost se pohybuje v hodnotách $\gamma = 10^{-11} \div 10^{-12} \text{ S.m}^{-1}$. Tato zvýšená hodnota konduktivity je způsobena zvýšenou koncentrací volného nosiče elektrického náboje. Závisí na druhu příměsí, velikosti a stupni jejich disociace. V těchto kapalinách existují dva typy vodivosti. Iontová a elektroforetická



Obr. 10 Voltampérové charakteristiky kapalných izolantů [8]

2.3 Elektrická vodivost pevných izolantů

Jelikož je konduktivita pevných izolantů za běžných teplot a s malým přiloženým napětím velice malá, je složité zkoumat jejich problematiku.

V pevných izolantech se vyskytují dva druhy vodivosti. Elektronová a iontová elektrická vodivost. Oba mechanismy se vyskytují současně, ale na základě daných podmínek jeden z nich převládá nad druhým. Za běžných podmínek se uplatňuje jen vodivost iontová. Elektronová jen velmi zřídka. Až u silného elektrického pole s hodnotami v rozmezí $10^{-1} \div 10^{-2} \text{ kV.mm}^{-1}$ se začne uplatňovat elektronová vodivost.

K vysvětlení iontové vodivosti se využívá Faradayova zákona, který má však určité omezení s iontovou vodivostí a platí plně jen pro elektrolyty. Faradayův zákon říká, že množství látky vyloučené při elektrolýze je úměrné hodnotě množství prošlého náboje a ekvivalentní hmotnosti příslušných iontů. Izolantem však procházejí velmi malé proudy a proto je množství látky vyloučené na elektrodách velmi malé a obtížně zjištělné. Tento způsob důkazu iontové vodivosti je použitelný jen u anorganických skel a mnohdy jen za vyšších teplot. Například u polymerních izolantů, které mají vodivostní proudy ještě o několik řádů nižší je tato metoda nepoužitelná.

Elektronový mechanismus vodivosti lze dokázat u pevných izolantů Hallovým jevem. Prochází-li vzorkem proud a kolmo na jeho směr působí magnetické pole, tak se na stěnách, které jsou rovnoběžné s proudem látky, objeví potenciál - tzv. Hallovo napětí.

Samotný popis elektrické vodivosti pevných izolantů je velmi složitý, tak proto vycházíme z určitých zjednodušení o pohybu iontů, ze kterých jsme vycházeli při popisu elektrické vodivosti kapalin. Pro popis pohybu iontů, které vznikly disociací neutrálních molekul, se používá stejný vztah, jako je použit u kapalného izolantu. Byl odvozen na základě modelu dvojité potenciálové jámy

$$b = \frac{f_0 \cdot q \cdot l^2}{6 \cdot k \cdot T} \cdot e^{-\frac{W}{kT}} \quad (13)$$

a dosazen do vztahu pro konduktivitu

$$\gamma = n \cdot q \cdot b \quad (14)$$

Tato teorie o pohyblivosti volných iontů v pevných izolantech je plně ponechána. Avšak ne ve všech látkách s iontovými vazbami se ionty můžou podílet na elektrické vodivosti. Proto se pevné látky rozdělují na tři skupiny:

- Iontové krystalické látky
- Anorganické amorfní látky
- Organické amorfní látky

Iontové krystalické látky jsou tvořeny kladnými a zápornými ionty, které jsou navzájem vázány v uzlech mřížky. Pokud je tato mřížka ideální, tak se v ní ionty nemohou pohybovat. Elektrická vodivost je možná jen v případě, že se kladné a záporné ionty postupně vyměňují mezi sebou. Toto je děj velice energeticky náročný. Reálná látka má však určitou elektrickou vodivost, tak se na ní musí podílet jiný mechanismus. Tento mechanismus popsal Frenkel.

Principem tohoto zákona je, že ionty svým tepelným pohybem získají dostatečnou energii k tomu, aby opustily své místo v mřížce a zaujaly tzv. intersticiální polohu. Intersticiální poloha částice je stav, kdy částice leží mimo pravidelný bod mřížky. Tato porucha doprovází vakanci, kdy se iont uvolní z mřížky a unikne na jiné místo a intersticiální iont zůstane v mezi uzlové poloze. Této poruše se říká Frankelova porucha. Rovnovážnou koncentraci Frankelových poruch n_F ovlivňuje teplota krystalu podle vztahu:

$$n_F = N_F \cdot e^{-\frac{W_F}{2 \cdot kT}} \quad (15)$$

Kde N_F počet normálních mřížkových uzlů [m^{-3}]
 W_F energie potřebná pro přechod iontu do intersticiální polohy. Určuje se rozdílem energií iontu v mřížce a v intersticiální poloze. Pohybuje se v hodnotách mezi $1 \div 2$ eV.

Iont, který je v intersticiální poloze, stále kmitá a pokud by tepelným pohybem získal dostatečnou energii, tak by mohl opustit svojí polohu a přesunout se na jiné místo v mezi mřížkovém prostoru. Energie iontu potřebná k opuštění intersticiální polohy je přibližně 0,15 eV a je tedy mnohem menší než energie potřebná pro opuštění iontu z jeho normální polohy. Tento fakt je důležitý k tomu, aby ionty v intersticiální poloze přispívaly k elektrické vodivosti.

Kromě Frankelových poruch se mohou na elektrické vodivosti reálných pevných izolantů podílet také jiné poruchy. Jsou to Schotkyho poruchy. Je to stav, když se v krystalické mřížce materiálu nachází stejný počet volných míst po kladných a záporných iontech, které opustily svá místa v mřížce a usadily se na povrchu krystalu, kde vytvořily novou vrstvu krystalu. Koncentrace těchto poruch je určena vztahem:

$$n_S = \beta \cdot N_S \cdot e^{-\frac{W_S}{2 \cdot kT}} \quad (16)$$

Kde N_S celkový počet iontových párů [m^{-3}]
 W_S energie potřebná k odtrhnutí jednoho kladného a záporného iontu z uzlu v mřížce krystalu [J]
 β koeficient zohledňující změnu frekvence vlastních kmitů iontů v blízkosti vakančních uzlů mřížky

V tomto případě je elektrická vodivost způsobená pohybem vakancí. Jedná se o přechody sousedních iontů do blízkého sousedního volného místa. K tomuto přechodu je potřeba energie asi 0,4 eV.

Mezi další poruchy krystalické mřížky patří sekundární poruchy, které jsou způsobené přítomností cizích atomů. Tyto atomy mají jiný iontový poloměr, nebo jinou valenci, než ionty základní mřížky. Díky tomu je porušena pravidelnost mřížky. Při růstu krystalu, při jeho tepelném nebo mechanickém namáhání se tvoří v krystalech další poruchy mřížky. Při přechodu z monokrystalu na polykrystal se elektrická vodivost většinou zvětšuje, protože ionty na hranicích krystalů jsou vázány slaběji a mohou tedy jednodušeji migrovat.

Teplotní závislost konduktivity iontových krystalických látek můžeme popsat pro koncentraci nosičů elektrického náboje n vztahem:

$$n = N \cdot e^{-\frac{W_0}{2 \cdot kT}} \quad (17)$$

Kde N počet všech iontů v jednotce objemu [m^{-3}]
 W_0 příslušná aktivační energie [J]

2.3.1 Povrchová vodivost pevných izolantů

Kromě vnitřní elektrické vodivosti se u pevných izolantů uplatňuje i povrchová vodivost. Měrná povrchová vodivost je definována vztahem:

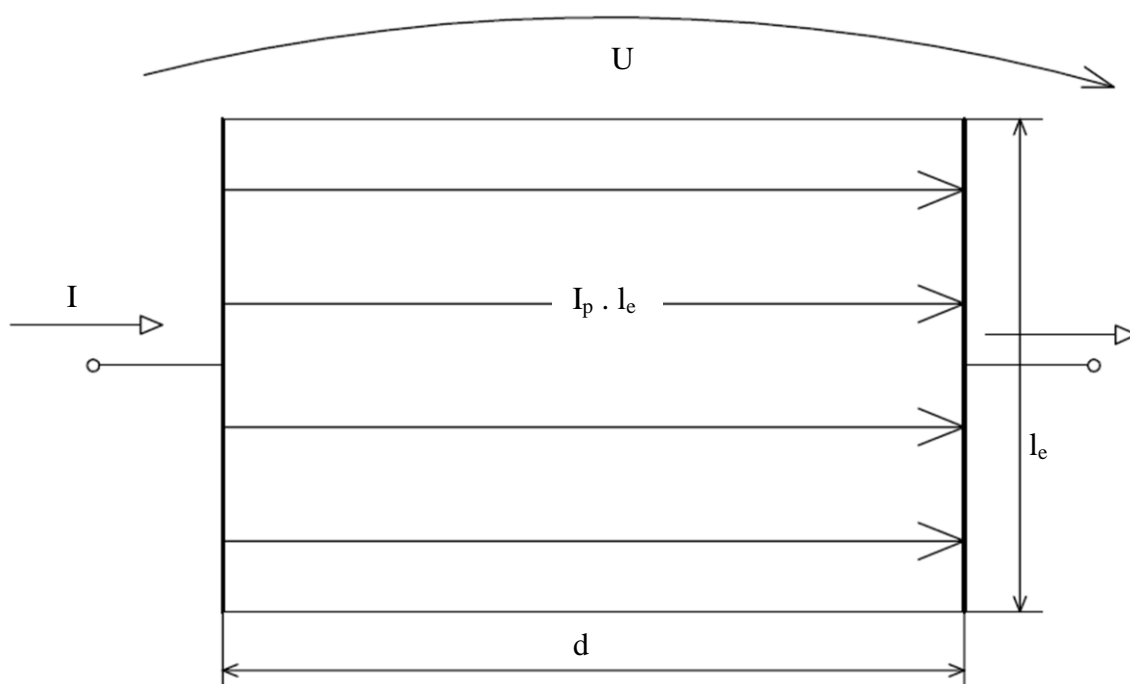
$$\gamma_P = \frac{I_P}{E} \quad (18)$$

Kde I_P proud tekoucí po povrchu izolantu
 E intenzita elektrického pole

Pokud budeme předpokládat prostorové uspořádání podle obr. 11, tak lze výše uvedený vztah upravit do tvaru:

$$\gamma_P = \frac{I}{l_e} \cdot \frac{d}{U} = \frac{I}{U} \cdot \frac{d}{l_e} \quad (19)$$

Kde I celkový proud tekoucí po povrchu izolantu [A]
 U napětí na elektrodách [V]
 d vzdálenost elektrod [m]
 l_e délka elektrod na povrchu izolantu [m]



Obr. 11 Povrchová elektrická vodivost pevného izolantu [10]

Povrchovou elektrickou vodivost způsobují především disociované molekuly nečistot, vyskytující se na povrchu izolantu. Disociace nečistot je silně závislá na absorbované vlhkosti. Povrchová vodivost izolantu je tedy závislá na relativní vlhkosti vzduchu. Proto se v posledních 15 letech začaly používat nekeramické izolátory, které mají tu vlastnost, že jsou hydrofobní a tím pádem se na jejich povrchu nezadržuje voda a proudy unikající po povrchu izolantu jsou menší než u keramických a skleněných izolantů. Množství absorbované vlhkosti závisí na struktuře povrchu izolantu. Nejvíce vlhkosti pohltní materiály, které mají iontový charakter vazeb (jsou to například anorganická skla), protože přitažlivé síly mezi ionty a molekulami vody jsou větší než přitažlivé síly mezi dvěma molekulami vody. Naopak u nepolárních látek je to opačně. Povrchovou vodivost mohou způsobovat také vlastní ionty, vylouhované adsorbovanou vodou na povrch. Tato vlastnost se projevuje nejvíce u skel. Ty mají povrchovou vodivost vyšší než objemovou [8] [10] [14].

2.4 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. Mechanismy těchto jevů se výrazně liší podle skupenství izolantu a podle prostředí, ve kterém se izolant nachází. Po odeznění vlastního výboje se projeví a uplatní procesy, které mají ve finálním důsledku výrazné degradační účinky. Na rozsah účinků má vliv struktura materiálu a výkon zdroje, který ovlivňuje maximální proud protékající skrz daný materiál. 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.

Podle skupenství také rozlišujeme, zda se jedná o průraz nebo o přeskok. O přeskok se jedná, pokud dojde k výboji v plynných a kapalných izolantech. Při přeskoku dochází k výraznému poklesu napětí na elektrodách a nárůstu proudu mezi nimi. Toto zhoršení izolačních vlastností je ale pouze dočasné, protože se plyny a kapaliny dokáží regenerovat. Naproti tomu průraz můžeme pozorovat u izolantů pevných. I zde pozorujeme pokles napětí a zvýšení proudu, ale na rozdíl od plynných a kapalných izolantů nemají pevné izolanty schopnost regenerace. Jedná se tedy o jev nevratný.

Elektrická pevnost je charakterizována napětím U_P [kV], přiloženým k materiálu a tloušťkou samotného materiálu d [mm] podle vztahu:

$$E_P = \frac{U_P}{d} [kV \cdot mm^{-1}] \quad (20)$$

Podle SI soustavy by měly být jednotky $V \cdot m^{-1}$, ale tyto jednotky se v praxi nepoužívají, protože materiály mívají tloušťky v řádech mm. Zkoušky na elektrických izolantech lze provádět buď pomocí napětí, které se rovnoměrně zvyšuje tak, aby došlo k průrazu mezi 10. – 20. S. V tomto případě je potřeba udělat pár experimentálních měření, kvůli zvolení rychlosti stoupaní napětí. Další je zkouška při stupňovitě zvyšovaném napětí [10] [8] [15].

2.4.1 Elektrická pevnost plynných izolantů

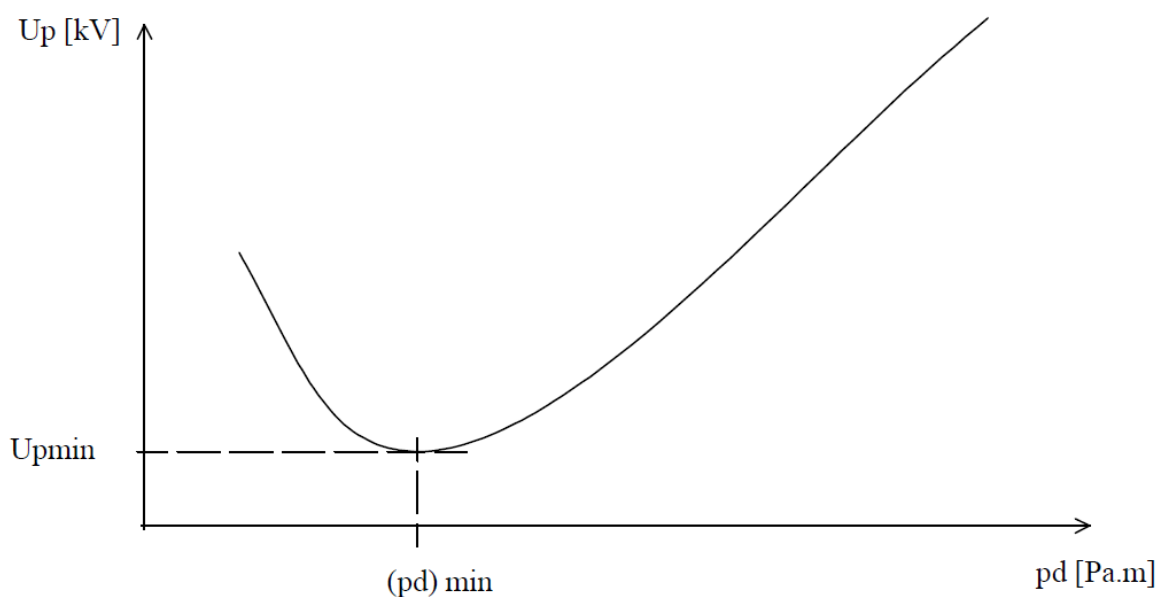
Aby v plnu vznikaly nesamostatné výboje, potřebují ionizační činitel. Pokud ustane působení ionizačního činitele, tento výboj zaniká. Pro vznik samostatného výboje je potřeba, aby bylo dosaženo velké intenzity elektrického pole pomocí odpovídajícího napětí mezi elektrodami. To způsobí vytvoření volných nosičů elektrického náboje a jejich pohyb.

První teorii o nesamostatných výbojích popsal S. Townsend. Předpoklad pro tuto teorii je takový, že uspořádání deskového kondenzátoru a pole mezi nimi je homogenní, časově neproměnné. Mezi těmito elektrodami se pohybuje elektron, který byl vlivem vnějšího ionizačního činitele uvolněn z katody. Jeho urychlení je způsobeno elektrickým polem. Při tomto pohybu se sráží s neutrálními molekulami a některé po nepružné srážce s nimi ionizuje. Při pružné srážce k ionizaci nedochází. Dochází pouze ke změně směru elektronu. Počet srážek je velký a proto se rychlost elektronu po nějakém čase ustálí na určité konstantní hodnotě. Díky tomu lze očekávat, že na jednotkové dráze bude vznikat stejný počet srážek. Tento počet se značí α a je nazýván Townsendův ionizační činitel. Určuje pravděpodobnost ionizace neutrální molekuly. Počet volných nosičů náboje roste se vzdáleností od katody exponenciálně. Jeden emitovaný elektron vytvoří lavinu o počtu $e^{\alpha \cdot d}$. Protože je v této lavině i emitovaný elektron, tak počet vytvořených elektronů je roven $e^{\alpha \cdot d} - 1$. Stejný počet je i vytvořených kladných iontů. V porovnání s elektrony mají kladné ionty malou rychlost na to, aby způsobovali nárazovou ionizaci, proto se tato ionizace zanedbává. Přesto se však kladné ionty na ionizaci nepřímo podílejí. Narážejí do katody a způsobují emisi elektronů, které ionizují neutrální částice v plynu. Tento příspěvek je charakterizován ionizačním součinitelem γ .

Pro vznik samostatného výboje je potřeba splnit podmínku $\gamma \cdot (e^{\alpha \cdot d} - 1) = 1$. Této podmínce se někdy říká Townsendova podmínka. Pokud je splněna, tak se výboj udrží i když ustanou vnější ionizační činitelé. Napětí, při kterém vzniká samostatný výboj, se nazývá počáteční napětí výboje. V případě, že je elektrické pole homogenní, je toto napětí totožné s přeskokovým napětím.

Elektrony se mohou také zachytávat k neutrálním částicím a vytvářet tak záporné ionty. Ty jsou však natolik pomalé, že nemohou přispět k ionizaci. Tím se ztratí elektron, který nepřispěje k ionizaci plynu. Proto se zachytáváním zvýší hodnota napětí, pro vznik samostatného výboje. Nejvíce zachytávají elektrony elektronegativní plyny jako je SF_6 . Proto se hojně využívá jako izolační plyn.

Velikost průrazného napětí ovšem nezávisí pouze na vzdálenosti elektrod, ale také na tlaku plynu. Toto zjistil experimentálně už S. Paschen v roce 1889. Přeskokové napětí je funkcí součinu tlaku plynu a vzdálenosti elektrod. Lze to zjednodušeně vysvětlit na příkladu. Pokud se n -krát zvětší tlak plynu a zároveň se n -krát zmenší vzdálenost mezi elektrodami, tak se hodnota přeskokového napětí nezmění. Pro vzduch je nejmenší přeskokové napětí 330 V při 760 Pa.mm. Pro každý plyn je toto minimum jiné. Na obr. 12 vidíme Paschenovu křivku.



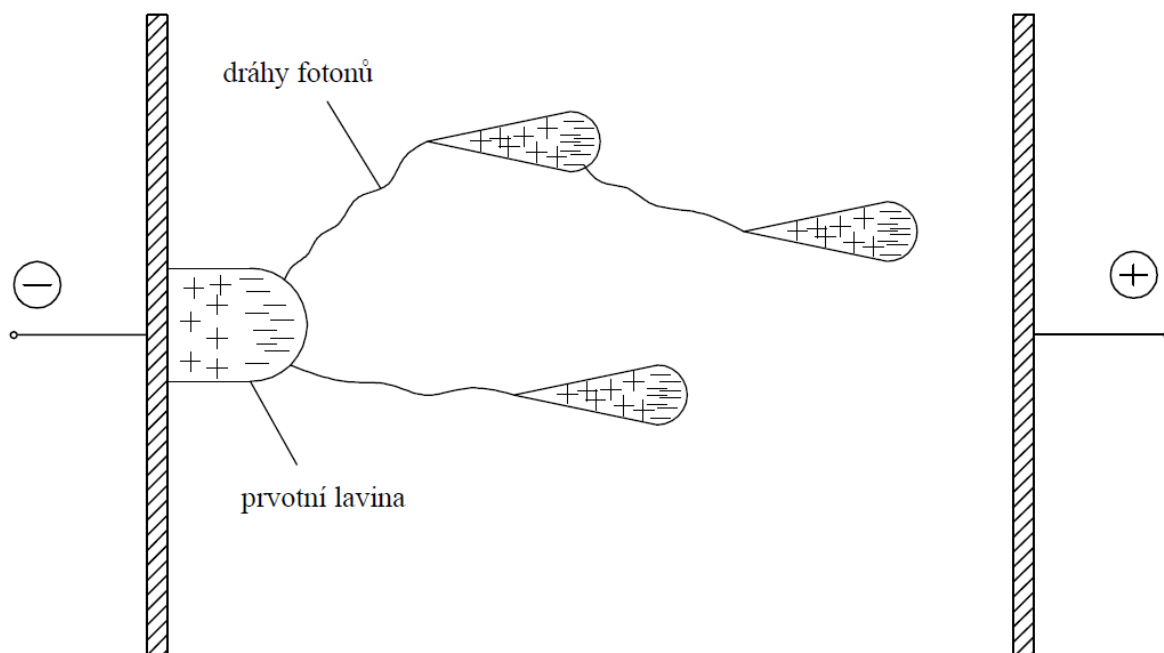
Obr. 12 Paschenova křivka [10]

Průběh Paschenovi křivky lze vysvětlit tak, že budeme předpokládat neměnicí se vzdálenost elektrod a měnit se bude jen tlak. V levé části křivky, při nízkém tlaku, mají elektrony emitované z elektrod tak dlouhé volné dráhy, že nemusí vůbec narazit do žádné částice a ionizovat jí. Proto je potřeba vysoké napětí, které by stačilo na vytvoření dostatečného počtu elektronů, které vytvoří elektronovou lavinu. V oblasti vysokých tlaků je potřeba také velmi vysoké napětí, aby došlo k průrazu plynu. Zde jsou naopak volné dráhy elektronů natolik krátké, že elektrony se srazí s neutrálními částicemi ještě dříve, než získají dostatečnou energii k ionizaci této částice. Obě tyto krajní části Paschenovi křivky jsou pro přeskok energeticky nevýhodné. Paschenův zákon počítá s tím, že tyto děje probíhají v homogenním poli. Pokud je pole nehomogenní, tak Paschenův zákon přestává platit. Zůstává však platit obecnější zákon podobnosti. Tento zákon říká, že závislost proudu

tekoucího plynným izolantem na napětí se nezmění při lineární změně elektrodového systému, když se změní zároveň tlak plynu v opačném poměru.

Teorie založené na výbojích vyvolaných díky kladným iontům dopadajících na katodu vysvětlují mnoho zákonitostí. Avšak nejsou schopné vysvětlit krátké časy výstavby jiskry v homogenním poli (řádově 10^{-6} – 10^{-7} s) při větších vzdálenostech (10^{-2} m). Při intenzitách, kdy dochází k přeskokům, se elektrony pohybují rychlostí 10^7 m.s⁻¹ a kladné ionty zhruba 100x pomaleji. V roce 1926 zjistil Rogowsky při svých pozorováních, že aby platila Townsendova teorie, při níž způsobují ionizaci kladné ionty, dopadající na katodu, tak by výstavba jiskry musela trvat přibližně dvojnásobnou dobu. Musí se tedy uplatňovat jiný mechanismus. Další pozorování vedlo k vypracování jiné teorie tzv. kanálové, nebo streamerové teorie přeskoků, objevenou Raetherem (1939), Meekem (1940) a dalšími.

Za postupující lavinou elektronů, vyvolanou nárazovou ionizací zůstávají kladné ionty, které jsou v porovnání s pohybem elektronů téměř nehybné. Tyto ionty vytvářejí prostorový náboj, který deformuje původní homogenní vnější elektrické pole. V oblasti čela působí pole prostorového náboje proti působení vnějšího pole a oslabuje ho. Před a za čelem ovšem dochází ke zvýšení intenzity elektrického pole. To má za následek zvýšení rychlosti elektronů a následně i nárazové ionizaci před čelem laviny, což způsobuje zvýšenou tvorbu prostorového náboje. Oba tyto děje se navzájem podporují a zrychlují postup čela laviny. Největší zásluhu na urychlení přemostění celé vzdálenosti mezi elektrodami má však fotoionizace. Fotoionizace vzniká při srážkách většího počtu elektronů s molekulami plynu. Díky fotoionizaci vznikají nové laviny v místech, kam ještě primární lavina nedoputovala. Tyto laviny se spojují do úzkého ionizovaného kanálu, tvořeného ionizovanou plazmou. Vzniká tzv. streamer. Tento streamer se nazývá katodový streamer, protože roste směrem od katody k anodě.

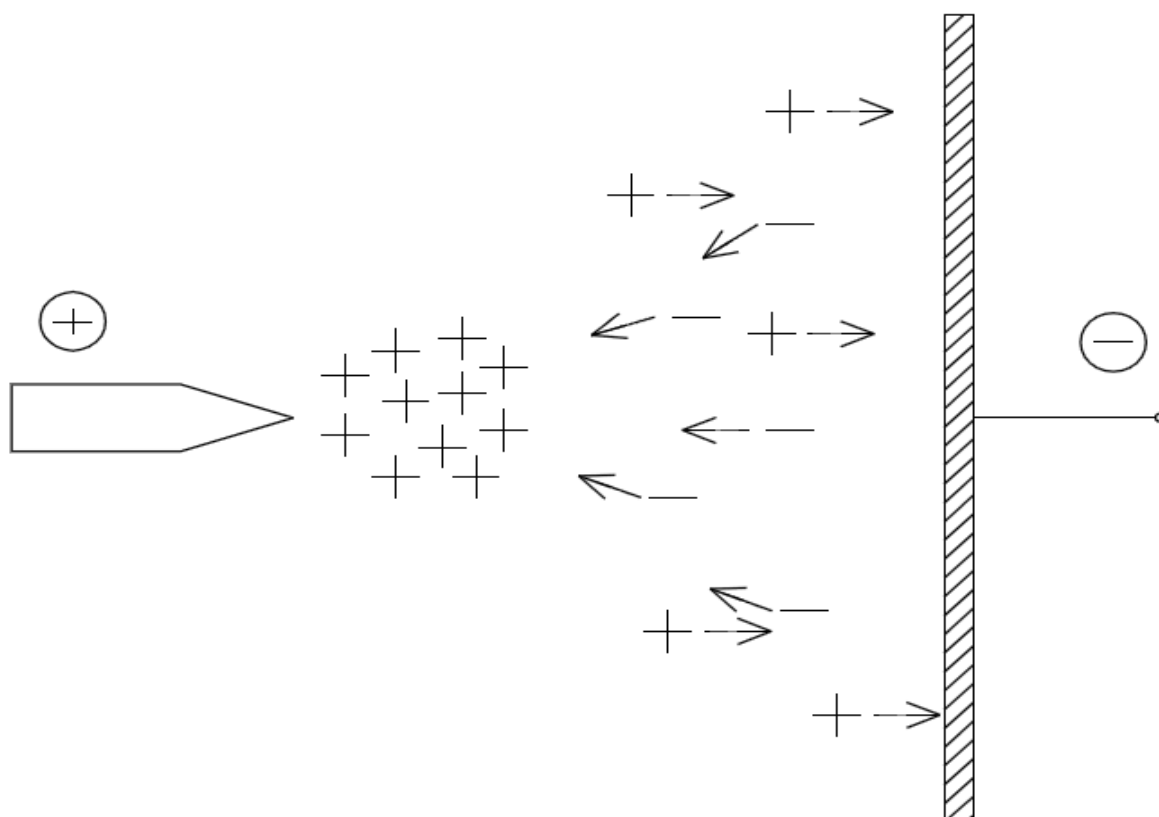


Obr. 13 Vznik kanálového výboje [10]

Zatím jsme se zabývali pouze výboji v homogenním poli. V reálném světě se ovšem vyskytuje i pole nehomogenní. V nehomogenním poli se uplatňují jiné mechanismy. Nejvýraznější odlišností od homogenního pole je vznik koróny. Koróna je částečný samostatný výboj, který vzniká v místech s vysokou intenzitou elektrického pole – elektrody s malým poloměrem zakřivení, hroty atd. Korónu doprovází akustické projevy, jako je šum a praskot.

Uspořádání elektrod, kde je hrot proti desce, je příkladem uspořádání, při kterém vzniká silně nehomogenní pole. U hrotu je intenzita elektrického pole nejsilnější. Vznikají zde volné elektrony a kladné ionty. Elektrony, které mají vysokou pohyblivost, za sebou zanechávají u hrotu kladné ionty a vzniká zde prostorový náboj, který deformuje elektrické pole.

Pokud je na hrotu kladný potenciál, kladné ionty způsobí rozložením prostorového náboje to, jako by elektroda zaujímala celý prostor tohoto náboje. Díky tomu vznikají dvě odlišné situace. V první situaci se poloměr hrotu jakoby zvětší a tím se zmenší intenzita elektrického pole. V druhém případě se potenciály obou elektrod k sobě přiblíží, a proto se zvýší intenzita elektrického pole, tím se snižuje velikost přeskokového napětí.



Obr. 14 Prostorový náboj tvořící se v blízkosti hrotu [10]

Pokud je na hrot připojen záporný potenciál, vytváří se v jeho blízkosti kladný prostorový náboj, který ovšem díky zkreslení prostorovým nábojem způsobuje to, že je intenzita mezi kladným a záporným potenciálem menší, než v případě opačných polarit hrotu a desky. Díky tomu je přeskokové napětí vyšší, než v předešlém případě. Toto napětí může být vyšší až o několik desítek procent, než v předchozím případě [8] [10] [16].

2.4.2 Elektrická pevnost kapalných izolantů

Kapalné izolanty jsou používány hlavně jako izolační oleje v transformátorech, vysokonapěťových kondenzátorech nebo jako impregnanty pro zlepšení vlastností savých izolantů, jako je třeba papír. V transformátorech oddělují potenciál mezi živými vodiči, jádrem a krytem transformátoru. Zde plní olej také funkci odvodu tepla k chlazení transformátoru.

Kapalné izolanty mají dvě hlavní vlastnosti: elektrická pevnost a elektrická vodivost. Další důležité vlastnosti jsou viskozita, tepelná stabilita, specifická hmotnost, bod vzplanutí atd. V níže uvedené tabulce jsou vybrané parametry vybraných izolačních olejů:

Tabulka 2 Parametry vybraných izolačních olejů [16]

parametr	Transformátorový olej	Kondenzátorový olej	Kabelový olej	Silikonový olej
relativní permitivita (při 50 Hz)	2,2 ÷ 2,3	2,1	2,3 ÷ 2,6	2,7 ÷ 3,0
elektrická pevnost (při 20 °C)	12 kV/mm	18 kV/mm	25 kV/mm	35 kV/mm
Tan δ (při 50 Hz)	10^{-3}	$2,5 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-3}$	10^{-3}
Tan δ (při 1 kHz)	$5 \cdot 10^{-4}$	10^{-4}	10^{-4}	10^{-4}
rezistivita [$\Omega \cdot \text{cm}^{-1}$]	$10^{-12} \div 10^{-13}$	$10^{-13} \div 10^{-14}$	$10^{-12} \div 10^{-13}$	$2,5 \cdot 10^{14}$
specifická hmotnost [$\text{t} \cdot \text{m}^{-3}$]	0,89	0,89	0,93	1,0 ÷ 1,1

Jedním z nejdůležitějších faktorů, které ovlivňují elektrickou pevnost například transformátorového oleje, je obsah jemných vodních kapiček a nečistot. Přítomnost 0,01 % vody v oleji snižuje jeho elektrickou pevnost na 20 % z původní hodnoty elektrické pevnosti. Proto by měl být kladen velký důraz na udržení co nejmenší vlhkosti v oleji. Hlavním hlediskem při výběru kapalného dielektrika je jeho chemická stabilita. Kapalné izolanty umožnily také zmenšit rozměry přístrojů, které je využívají. V případě transformátorů umožnily dokonce vyrobit takové typy, které by se vzduchovým izolačním systémem ani nešly vyrobit. Např. 765 kV transformátor.

Elektrická pevnost kapalin je složitá záležitost. Ve skutečnosti je jejich chování poměrně nevyrovnané. Žádné dva vzorky oleje, pořízené z téže nádoby se nebudou chovat stejně. Nashromážděných experimentálních materiálů je mnoho, nicméně výsledky jsou nejednoznačné. Některé výsledky se značně liší, jiné jsou dokonce protichůdné. Díky tomu vzniklo mnoho teorií, které lze ovšem aplikovat pouze pro omezený okruh pozorování. Velká skupina výsledků byla získána za podmínek, které znemožňují jejich zobecnění. Na tomto faktu se podílí to, že v kapalinách závisí výboj na mnoha vlivech, které jsou náhodné a velice špatné kontrolovatelné. Přesto se však výboje v kapalných izolantech vyznačují určitými charakteristickými rysy:

- Elektrická pevnost kapalin je vyšší, než u plynů.
- Mechanismus přeskočků může mít různý charakter.

- Výboj se většinou začíná tvořit v místech se zvýšenou koncentrací nečistot (největší podíl na tom mají bublinky a pevné nečistoty).
- U technicky čistých kapalin se ve VA charakteristice nevyskytuje oblast nasyceného proudu.
- Na velikost přeskokového napětí má za určitých okolností vliv materiál a povrch elektrod.

Mezi vlivy, které znesnadňují měření, patří přítomnost různých druhů příměsí, znečištění elektrod a jejich tvar, rozložení elektrického pole, napětí, tlak, teplota a další. Proto je snaha tyto vlivy co nejvíce eliminovat, aby byla experimentální metoda co nejpřesnější. Aby se odstranily mechanické a jiné nečistoty, stopy vody a rozpuštěné plyny, které zmenšují elektrickou pevnost, tak se zkoušená kapalina několikrát destiluje, filtruje a zbavuje plynů v uzavřené skleněné soustavě, ve které jsou uzavřeny i elektrody pro zkoušení elektrické pevnosti. Takto ošetřené kapaliny se nazývají extrémně čisté kapalně izolanty. Tyto izolanty mají konduktivitu v řádech menších než $10^{-14} \text{ S.m}^{-1}$ a jejich elektrická pevnost je $80 \div 100 \text{ kV/mm}$. Takováto pevnost je srovnatelná s pevností kvalitních pevných izolantů a je přibližně 5x až 10x větší než je elektrická pevnost technicky čistých kapalných izolantů. Elektrody jsou nejčastěji kulové a mají velký průměr v poměru s jejich vzdáleností. Také povrchu elektrod je věnována velká pozornost. Jejich povrch se leští, zbavuje se nečistot a tenké oxidační vrstvy. Před samotným měřením se také provede určitý počet průrazů, aby se povrch s dalšími průrazy tolik neměnil. Pro omezení poškození elektrod při průchodu proudu se používá zařízení, které automaticky odpojí napětí pár milisekund po průrazu. Pro výzkum se nejčastěji používají n-hexan a jiné lineární nenasyčené uhlovodíky, nebo zkapalněné helium, argon a dusík.

Jedna z teorií říká, že jakmile je elektron vstříknut do kapaliny z katody, získává pohybovou energii z elektrického pole, které je utvořeno mezi elektrodami. Předpokládá se, že některé elektrony získají více energie, než by mohli ztratit během srážky s jinou molekulou. Tyto elektrony mají dostatečnou energii, aby mohly vyrazit další elektron a tím zahájit lavinu. Podmínkou pro zahájení laviny je, že získaná energie elektronu se musí rovnat energii ztracené během ionizace molekuly. Jeto dáno vztahem:

$$e\lambda E = Chv \quad (21)$$

Kde λ střední volná dráha elektronu
 E intenzita elektrického pole

C	konstanta
hv	energie ionizace

[8] [10] [16]

2.4.3 Elektrická pevnost pevných izolantů

Na rozdíl od izolantů plynných a kapalných dojde při překročení elektrické pevnosti k nevratnému ději, který se nazývá průraz. 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.

V pevných látkách obecně rozlišujeme tři způsoby průrazu pevných izolantů. Tepelný průraz, čistě elektrický průraz a elektrochemický průraz.

2.4.3.1 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 Jouleovy 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.

2.4.3.2 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 $10^5 \div 10^6 \text{ m.s}^{-1}$.

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 činitele:

- 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 nejhorsími podmínkami pro odvod tepla poškozená větší část od působení tepla [8] [10] [16].

2.4.3.3 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 působením 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.

Za vznik výbojové činnosti v dutince může elektrické namáhání plynu, které je opačné k poměru permitivit plynu a okolního izolantu. Vzduch má permitivitu přibližně 1 a je tedy namáhán ϵ_r -krát (relativní permitivita pevného izolantu) více, než pevný izolant. Jelikož je elektrická pevnost vzduchu v dutince vždy menší, než je elektrická pevnost pevného izolantu, dochází k průrazu v dutince při menším napětí, než je průrazné napětí pevného izolantu. K průrazu plynu v dutince dojde tehdy, když je velikost napětí taková, jaká je hodnota průrazného napětí plynu podle Paschenova zákona.

$$U_z = \frac{Bpd}{\ln \frac{Apd}{\ln(1 + \frac{1}{\gamma_e})}} \quad (22)$$

Kde	A	[m ² /J], B [m ² /C] jsou konstanty (jsou závislé na teplotě)
	P	tlak plynu [Pa]
	d	vzdálenost [m]
	γ_e	součinitel udávající počet elektronů vzniklých na katodě působením jednoho elektronu z prostoru mezi elektrodami

Výraz $\ln\left(1 + \frac{1}{\gamma_e}\right)$ je přibližně konstantní. Napětí, při kterém nastane průraz plynu v dutince, se nazývá zápalné napětí. V materiálu nedochází k přeskoku ve všech dutinkách současně, ale postupně při různých hodnotách napětí. Výboj v plynu způsobí jeho ionizaci a neutrální molekuly se rozloží na kladné a záporné ionty. Tyto ionty mají směr pohybu opačný, než je směr působení elektrického pole. Ionty se hromadí na stěnách dutinky a jejich náboje vytváří elektrické pole, které má opačnou polaritu, než vnější elektrické pole. To způsobuje, že je vnější pole částečně kompenzováno. Výboj v dutince hoří tak dlouho, dokud se na jejích stěnách nezachytí tolik iontů, že způsobí pokles napětí pod hodnotu zhasacího napětí. Pokud klesne hodnota napětí pod tuto hodnotu, tak výboj v dutince zaniká. Jestliže se přiložené napětí stále zvyšuje, tak výboj může znovu nastat, pokud se opět překročí hodnota zápalného

napětí výboje. Když už se napětí nebude dále zvyšovat, tak náboj, který je nahromaděný na stěnách dutinky bude postupně odváděn izolantem. Rychlost tohoto děje závisí na povrchovém odporu dutinky a na vnitřním odporu izolantu. Tyto vlastnosti ovlivňují rychlost, s jakou se budou opakovat dva po sobě jdoucí výboje. U nekvalitních izolantů to může být i po čase menším, než je 1 s. U výborných izolantů to může být až několik hodin. Toto platí v případě přiloženého stejnosměrného napětí. Pokud je přiloženo napětí střídavé, tak se výše popsané děje opakují stejně pro obě polaritu napětí.

Výbojová činnost v dutinkách má za následek selhávání dlouhodobě namáhaných izolací provozním napětím. Je to způsobeno tím, že výboj způsobuje degradaci izolantu a to buď přímými účinky, nebo nepřímými účinky. Na degradaci izolantu částečnými výboji se mohou podílet tyto procesy:

- Vliv bombardování povrchu izolantu ionty a elektrony – přímé účinky.
- Chemické působení rozloženého plynu vzniklého při výboji.
- Účinky záření uvolňovaného při výboji.
- Účinky lokálního zvýšení gradientu na konci výbojového kanálu.

Tyto účinky však nepůsobí na všechny látky stejně. U anorganických látek jsou tyto účinky minimální. V porovnání s nimi jsou organické izolanty na působení výše zmíněných procesů velice náchylné. Proto se zkoumání životnosti izolantů zaměřuje na organické izolanty.

Bombardování povrchu organického izolantu způsobuje jeho erozi a tím dochází ke zvětšování dutinky a úbytku izolačního materiálu. Vlastní materiál se rozkládá na nízkomolekulární plyn. Ultrafialové záření vznikající při výboji má větší energii a způsobuje tím rychlejší degradaci materiálu. Výboj způsobuje rozklad plynu v dutince na aktivní dusík, atomární kyslík a ozón. Tyto látky jsou mnohem více reaktivní než původní vzduch. Způsobují tedy opět rychlejší oxidaci. Pokud by byly ve vzduchu obsaženy i molekuly vody, mohla by voda reagovat přes oxidy dusíku až k tvorbě kyselin.

Experimentální studie prokázaly, že znečištění na povrchu izolantu snižuje hydrofóbnost materiálu a zároveň podporuje povrchové jiskření. Tím se zvyšují úniky proudu po povrchu izolantů. Kombinované účinky ultrafialového záření a povrchového jiskření způsobují stárnutí a erozi polymerů.

Výbojový kanál má vysokou teplotu a způsobuje zahřívání izolantu a může dojít až k jeho zuhelnatění. Produkované teplo může při silné výbojové činnosti způsobit ohřev izolantu tak velký, že má stejné účinky jako dielektrické ztráty. To dále snižuje elektrickou pevnost izolantu kvůli většímu riziku tepelného průrazu.

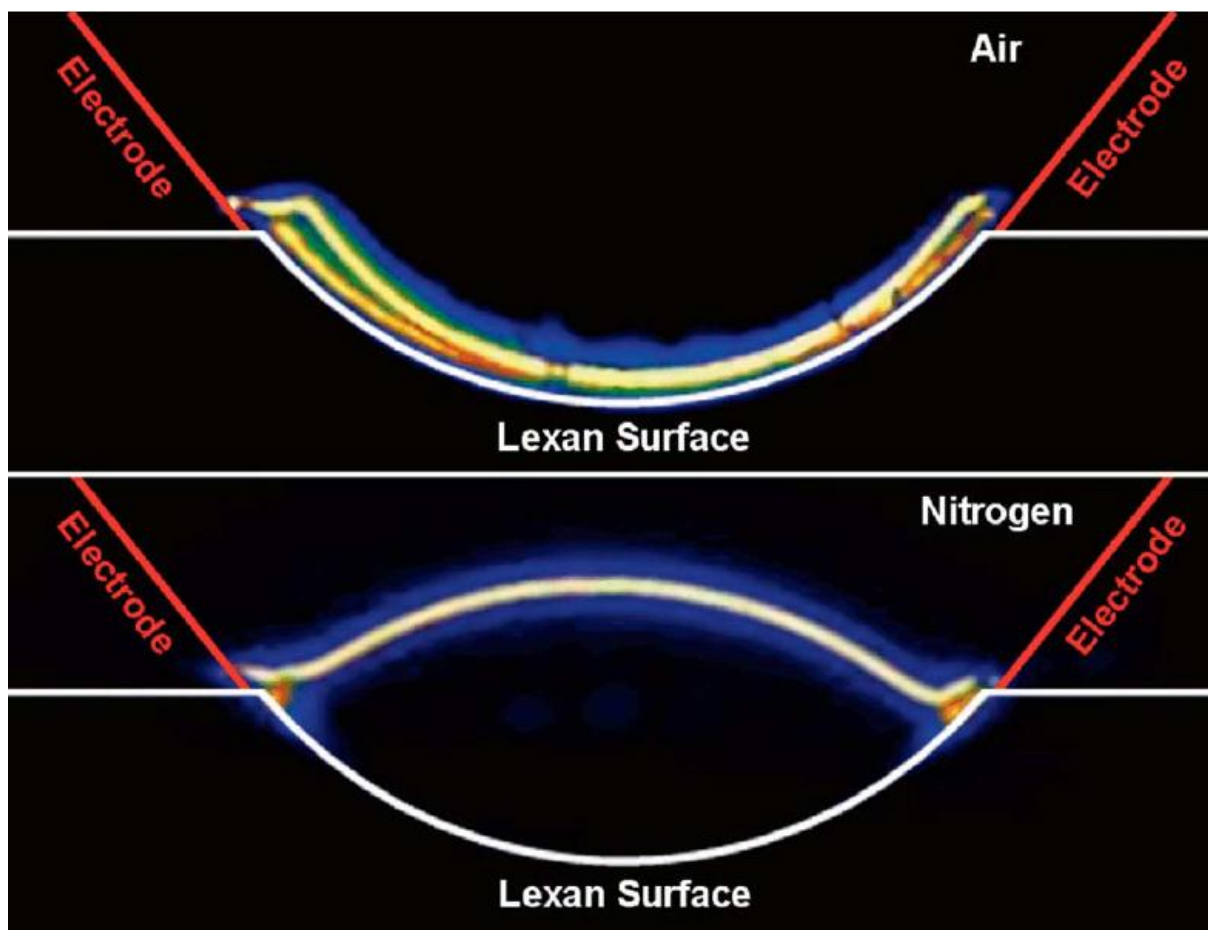
Výboj také způsobuje, díky jeho elektrickému poli, které se na jeho konci podobá elektrickému poli vytvářenému hrotem to, že jeho pole je velmi nehomogenní. Jeho hodnota tedy lokálně dosahuje velmi vysokých hodnot. Tam, kde je překročena hodnota průrazu izolantu, nastává mikroskopický průraz, který vytváří malé kanály, které zmenšují funkční tloušťku izolantu. Tyto mikro průrazy se nepravidelně opakují a tím se prodlužují výbojové kanály v izolantu. V izolantu rostou stromečkové útvary a postupně můžou překlenout celou šířku izolantu a může dojít k celkovému průrazu [8] [10] [14] [16] [15].

2.4.4 Kombinace pevného a plynného izolantu

Vzduch se jako izolant hojně využívá pro jeho dobré izolační vlastnosti. Ovšem nikdy se v žádném zařízení nedá použít pouze vzduch jako jediný izolant. Jako nosné prvky a prvky, které udržují nejmenší vzdálenost mezi dvěma místy s rozdílným potenciálem, se používají pevné izolanty. Kromě těchto mechanických důvodů se pevné izolanty používají jako elektrické bariéry, pro zvýšení hodnoty přeskokového napětí.

V případě elektrické bariéry je směr elektrického pole přibližně kolmý na tuto bariéru a tangenciální složka elektrické intenzity je zanedbatelná. Při všech uspořádáních, kdy je pevný izolant používán jako konstrukční prvek, má elektrické pole tangenciální složku ve směru rozhraní plynného a kapalného izolantu. Tato složka ovlivňuje velikost napětí, při kterém nastává průraz plynného izolantu. Ideální se zdá uspořádání, kdy je pevný izolant kolmo mezi elektrodami. Při tomto uspořádání se zdá, že velikost přeskokového napětí bude stejná, jako kdyby byl mezi elektrodami jen plynný izolant. Ve skutečnosti bude toto napětí nižší, protože ho ovlivňuje povrch izolantu, odchylka od kolmosti k elektrodám nebo nedokonalý dotek pevného izolantu a elektrod.

Je známo, že vývoj oblouku postupuje podél elektrických siločar. Ovšem v experimentu na obr. 15 výboj ve vzduchu postupuje přednostně po povrchu izolantu. Ve spodní části tohoto obrázku je zobrazen výboj v prostředí čistého dusíku. Zde už výboj kopíruje směr siločar elektrického pole.



Obr. 15 Přeskoky mezi elektrodami ve vzduchu a v dusíku, převzato z [17]

Rozdíl mezi těmito dvěma oblouky mají nejspíše za následek dva mechanismy. Prvním z nich je zvýšená fotoemise vzhledem k vyšší intenzitě UV záření ve vzduchu. Druhý mechanismus je absorpce elektronů povrchem izolantu z důvodu nedostatku energie pro sekundární elektronovou emisi. Tento mechanismus se stává dominantní při nedostatku UV záření. O tom, který z těchto dvou mechanismů bude dominantní, rozhoduje přítomnost kyslíku.

Při uspořádání elektrod při experimentu se výboj šíří po povrchu izolantu díky přítomnosti kyslíku ve vzduchu. Tento povrchový výboj je rozdělen do tří fází. Jsou to počáteční fáze, fáze rozvoje (růstu) výboje a poslední fáze. V první fázi nastává emise elektronů. Místo, odkud jsou elektrony emitovány, je rozhraní mezi izolantem, elektrodou a plynem. Zde vzniká povrchový výboj. Pro fázi rozvoje je více teorií, ty se podobají přeskokům v plynných izolantech, které jsou popsány v kapitole 2.4.1. V poslední části povrchový výboj v plynu zanikne vybitím pomocí desorpce náboje povrchem izolantu. V našem experimentu k tomuto zániku nedochází, protože při výboji se automaticky odpojí zdroj napětí a výboj zanikne z důvodu nedostatku energie [10] [17] [18].

3 Vliv materiálu, jeho povrchu a tvaru elektrod na velikost přeskokového napětí

V tomto experimentu jsem se zaměřil na zkoumání různých vlivů na hodnotu přeskokového napětí u vybraných izolačních materiálů. Jako ovlivňující vlivy jsem si vybral povrch materiálu, jeho povrchovou rezistivitu a vlhkost. V poslední části jsem experimentálně ověřil, zda při lineární změně vzdálenosti elektrod se mění lineárně i hodnota přeskokového napětí. Jako zkoumané izolační materiály byly zvoleny níže vypsane materiály. V tabulce 3 je uveden popis jednotlivých vzorků, jejich vlastnost a úpravy. Tato tabulka je platná pro všechny grafy a tabulky v této práci.

Kartit (pentinax)	Je vyroben z celulózového papíru, který slouží jako výztuž. Jako pojivo je použito modifikované fenolické živice. Má vysokou elektrickou a mechanickou pevnost. Používá při stavbě transformátorů ve formě izolačních mezistěn, různých konstrukčních prvků, krytů a vložek.
LAMPLEX FR4	Deska z tvrzené skleněné tkaniny impregnovaná epoxidovou pryskyřicí, používaná pro výrobu plošných spojů.
Relastik	Izolační materiál pro Resin Rich izolační systémy. Epoxy-novolaková pojivová báze s nosnou polyesterovou (PET) fólií. Používaný u točivých strojů.
Relanex	Izolační materiál pro Resin Rich izolační systémy. Epoxy-novolaková pojivová báze a nosná skleněná tkanina. Používaný u točivých strojů.
Lesklá lepenka Fassmann	Lesklý papír používaný jako izolace v točivých strojích. Jeho lesklý povrch zabraňuje absorbování vzdušné vlhkosti.
Transformátorová lepenka	Papírová izolace, která má do jejího povrchu vytlačené otvory kvůli lepší nasákavosti materiálu. Používá se v transformátorech, kde papír do sebe nasákne olej a tím se dále zlepší jeho vlastnosti.
Sklotextit FR4	Vrstvený materiál vyrobený z upravené nealkalické skelné tkaniny jako výztuže a epoxidové živice jako pojiva. Kromě dobrých mechanických a elektroizolačních vlastností jsou desky samozhášivé. Používá se na výrobu součástek s dobrými mechanickými a elektrotechnickými vlastnostmi, pro elektrická zařízení při vyšších teplotách nebo ve

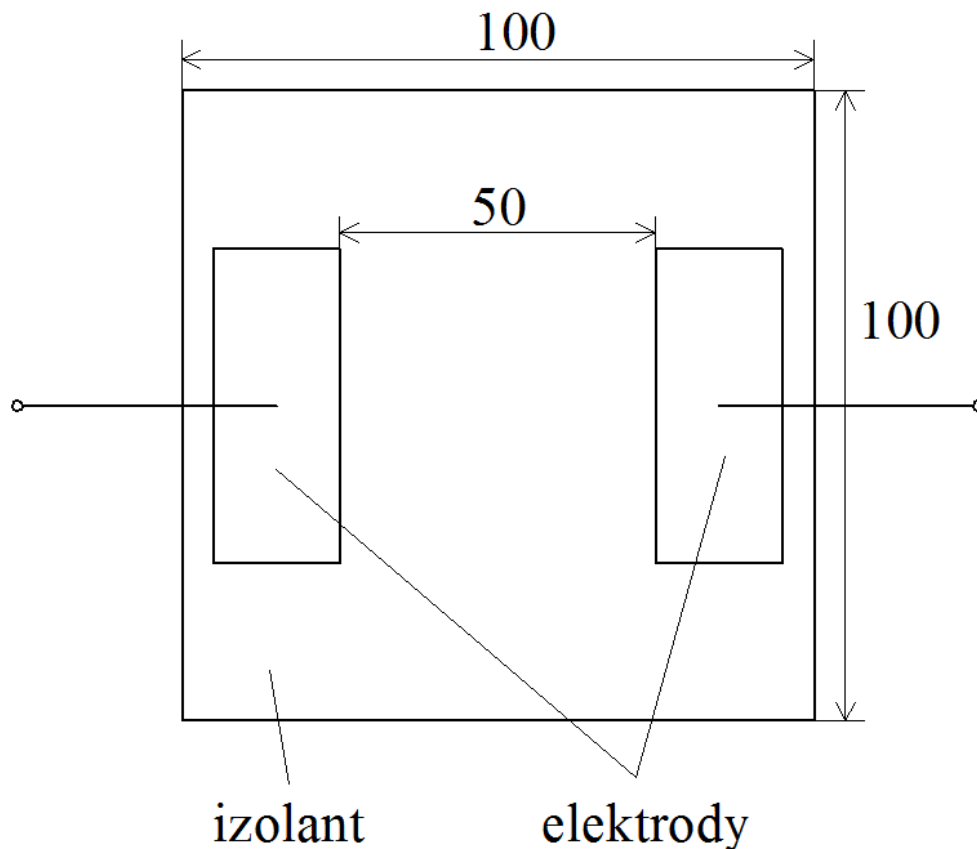
vlhkém prostředí, při namáhaných elektroizolačních součástkách, jako kostry, tělesa přístrojů, skříňových částí rozveden, transformátorů, rozvaděčů, elektrických strojů.

Teflonová folie Teflon – Polytetrafluorethylen. Patří do skupiny termoplastů. Teplota tání PTFE je přibližně 327 °C, ale jeho vlastnosti se mění již při teplotě 260 °C, nad teplotou 350 °C nastává rozklad, hoří při 500-560 °C. Je to samozhášivý nehořlavý polymer s velkým uplatněním na trhu [19].

Tabulka 3 Popis jednotlivých vzorků

Vzorek 1 čistý	Kartit s původním povrchem temperovaný v běžném prostředí
Vzorek 1 zrnitost 40	Kartit s povrchem zdrsňeným pomocí smirnového papíru o hrubosti 40
Vzorek 1 vysušený	Kartit po 120 h v peci při 50 °C
vzorek 1 mokrý	Kartit po 120 h v deionizované vodě
Vzorek 1 kulaté elektrody	Kartit s pozměněnými zakulacenými elektrodami
Vzorek 1 ostré elektrody	Kartit s pozměněnými ostrými elektrodami
Vzorek 2 čistý	LAMPLEX FR4 s původním povrchem temperovaný v běžném prostředí
Vzorek 2 zrnitost 40	LAMPLEX FR4 s povrchem zdrsňeným pomocí smirkového papíru o hrubosti 40
Vzorek 2 vysušený	LAMPLEX FR4 po 120 h v peci při 50 °C
Vzorek 2 čistý mokrý	LAMPLEX FR4 po 120 h v deionizované vodě
Vzorek 2 zrnitost 40 mokrý	LAMPLEX FR4 po 120 h v deionizované vodě se zdrsňeným povrchem
Vzorek 3 čistý	Relastik s původním povrchem temperovaný v běžném prostředí
Vzorek 3 zrnitost 40	Relastik s povrchem zdrsňeným pomocí smirkového papíru o hrubosti 40
Vzorek 3 kulaté elektrody	Relastik s pozměněnými zakulacenými elektrodami
Vzorek 4 čistý	Transformátorová lepenka s původním povrchem temperovaný v běžném prostředí
Vzorek 4 ostré elektrody	Transformátorová lepenka s pozměněnými ostrými elektrodami
Vzorek 5 čistý	Lesklá lepenka Fassmann s původním povrchem temperovaný v běžném prostředí
Vzorek 6 čistý	Relanex s původním povrchem temperovaný v běžném prostředí
Vzorek 6 zrnitost 40	Relanex s povrchem zdrsňeným pomocí smirkového papíru o hrubosti 40
Vzorek 6 vysušený	Relanex po 120 h v peci při 50 °C
Vzorek 6 čistý mokrý	Relanex po 120 h v deionizované vodě
Vzorek 7 čistý	Sklotextit FR4 s původním povrchem temperovaný v běžném prostředí
Vzorek 7 zrnitost 40	Sklotextit FR4 s povrchem zdrsňeným pomocí smirkového papíru o hrubosti 40
Vzorek 7 vysušený	Sklotextit FR4 po 120 h v peci při 50 °C
Vzorek 7 mokrý	Sklotextit FR4 po 120 h v deionizované vodě
Vzorek 7 zrnitost 40 mokrý	Sklotextit FR4 po 120 h v deionizované vodě se zdrsňeným povrchem
Vzorek 8 čistý	Teflonová folie s původním povrchem temperovaný v běžném prostředí

Vzorky byly zhotoveny jako destičky o rozměrech 10 x 10 cm. Protože se měřila povrchová rezistivita a závislost povrchu na přeskokovém napětí, tak nebyla tloušťka těchto vzorků důležitá. Nejprve se změřila povrchová rezistivita všech vzorků, protože při měření přeskokového napětí byly na vzorek nalepeny samolepící elektrody, jejichž lepidlo bylo vodivé, takže by byla ovlivněna hodnota povrchového odporu.



Obr. 16 Testovací vzorek

3.1 Měření povrchové rezistivity

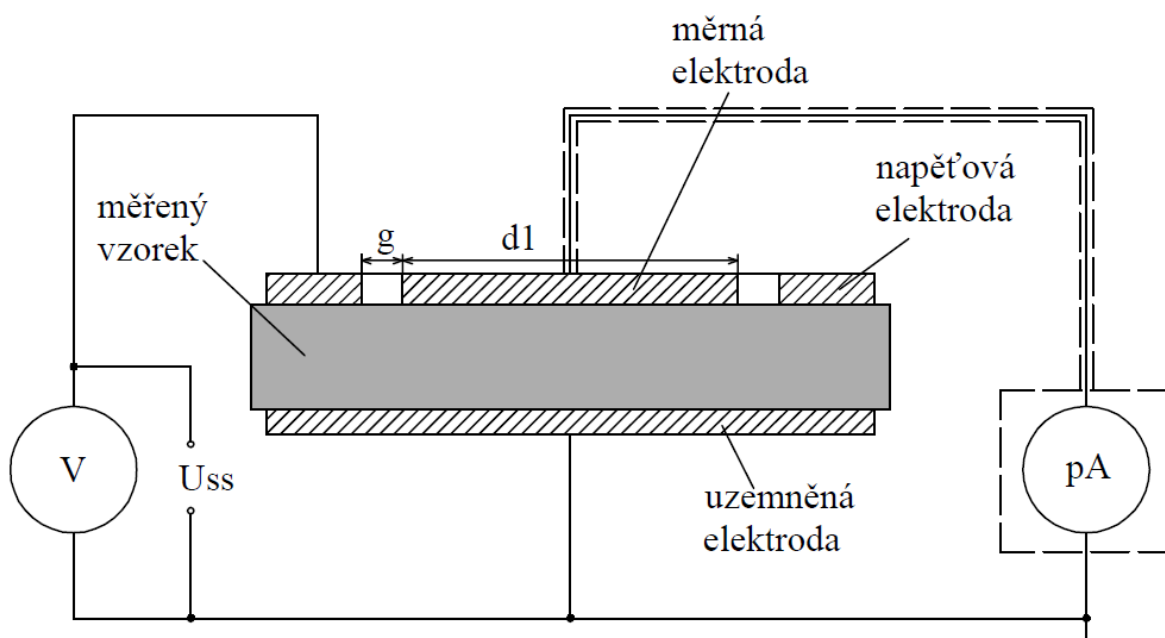
Pro měření povrchového odporu se využívá metody pro měření velmi velkých odporů. V tomto případě jsou proudy protékající izolantem velmi malé. Pokud má zařízení nedokonalou izolaci, tak mohou proudy protékat i skrz tuto izolaci, popřípadě mohou po izolaci téci svodové proudy. Oba tyto proudy mohou výrazně ovlivnit měření. Proto je nutné celé zařízení důkladně stínit a zemnit. Svodový proud potom neprotéká přes pikoampérmetr, ale zatěžuje pouze napájecí zdroj. Na obr. 17 je schéma tříelektrodového systému pro měření povrchového odporu izolantu. Měří se proud protékající po povrchu izolantu mezi elektrodami. Proud, který protéká izolací je sveden na zem mimo pikoampérmetr. Pikoampérmetr a přívody k němu jsou uzemněny. Měřením získáme proud, z něhož určíme

hodnoty odporu. Pro možnosti vzájemného porovnání materiálů mezi sebou jsou zavedeny hodnoty, které vylučují rozměry vzorků. Jedná se o rezistivitu. Rezistivita je dána vztahem:

$$\rho_s = R_s \frac{B}{g} \quad (23)$$

Kde R_s povrchový odpor [Ω]
 B efektivní obvod měrné elektrody $B = \pi \cdot (d_1 + g)$ [m]
 V našem případě: $B = \pi \cdot (0,05 + 0,003) = 0,167$ m

[20] [21]



Obr. 17 Schéma zapojení pro měření povrchového odporu;
 rozměry: $d_1=50$ mm, $g=3$ mm [20]

Měřeno bylo 8 vzorků o rozměrech 10x10 cm.

Nejprve byla změřena povrchová rezistivita vzorků, které byly skladovány v běžném prostředí (při zhotovování vzorků byla teplota vzduchu 23 °C a vlhkost 60 %). Potom byly vybrány 4 vzorky, které byly ponořeny na 120 h do deionizované vody, vloženy do pece, také na 120 h, při teplotě 45 °C a nakonec byl jejich povrch zdrsněn smirkovým papírem o

hrubosti 40. Nebyly vybrány všechny vzorky z toho důvodu, že by například lepenky po ponoření nasákly mnoho tekutiny. U všech vzorků byla změřena jejich povrchová rezistivita.

Tabulka 4 Povrchová rezistivita čisté vzorky

Vzorek	1	2	3	4	5	6	7	8
I [A]	$1,29 \cdot 10^{-9}$	$1,27 \cdot 10^{-11}$	$9,03 \cdot 10^{-11}$	$1,92 \cdot 10^{-9}$	$2,03 \cdot 10^{-8}$	$6,30 \cdot 10^{-11}$	$9,15 \cdot 10^{-11}$	$4,32 \cdot 10^{-10}$
R [Ω]	$3,88 \cdot 10^{11}$	$3,94 \cdot 10^{13}$	$5,54 \cdot 10^{12}$	$2,60 \cdot 10^{11}$	$2,46 \cdot 10^{10}$	$7,94 \cdot 10^{12}$	$5,46 \cdot 10^{12}$	$1,16 \cdot 10^{12}$
ρ [$\Omega \cdot m$]	$2,16 \cdot 10^{13}$	$2,19 \cdot 10^{15}$	$3,08 \cdot 10^{14}$	$1,45 \cdot 10^{13}$	$1,37 \cdot 10^{12}$	$4,42 \cdot 10^{14}$	$3,04 \cdot 10^{14}$	$6,44 \cdot 10^{13}$

Tabulka 5 Povrchová rezistivita zdrsnění brusným papírem o hrubosti 40

Vzorek	1	2	3	6	7
I [A]	$2,01 \cdot 10^{-9}$	$6,02 \cdot 10^{-12}$	$2,13 \cdot 10^{-10}$	$7,32 \cdot 10^{-11}$	$7,89 \cdot 10^{-10}$
R [Ω]	$2,49 \cdot 10^{11}$	$8,31 \cdot 10^{13}$	$2,35 \cdot 10^{12}$	$6,83 \cdot 10^{12}$	$6,33 \cdot 10^{11}$
ρ [$\Omega \cdot m$]	$1,38 \cdot 10^{13}$	$4,62 \cdot 10^{15}$	$1,31 \cdot 10^{14}$	$3,80 \cdot 10^{14}$	$3,53 \cdot 10^{13}$

Tabulka 6 Povrchová rezistivita vzorky ponořené na 120 h

Vzorek	1	2	6	7
I [A]	$9,10 \cdot 10^{-5}$	$7,25 \cdot 10^{-11}$	$5,13 \cdot 10^{-9}$	$4,68 \cdot 10^{-9}$
R [Ω]	$5,49 \cdot 10^6$	$6,89 \cdot 10^{12}$	$9,75 \cdot 10^{10}$	$1,07 \cdot 10^{11}$
ρ [$\Omega \cdot m$]	$3,06 \cdot 10^8$	$3,84 \cdot 10^{14}$	$5,43 \cdot 10^{12}$	$5,95 \cdot 10^{12}$

Tabulka 7 Povrchová rezistivita vzorky sušené po dobu 120 h

Vzorek	1	2	6	7
I [A]	$1,23 \cdot 10^{-12}$	$3,10 \cdot 10^{-13}$	$1,31 \cdot 10^{-11}$	$3,12 \cdot 10^{-11}$
R [Ω]	$4,07 \cdot 10^{14}$	$1,61 \cdot 10^{15}$	$3,82 \cdot 10^{13}$	$1,60 \cdot 10^{13}$
ρ [$\Omega \cdot m$]	$2,26 \cdot 10^{16}$	$8,98 \cdot 10^{16}$	$2,12 \cdot 10^{15}$	$8,92 \cdot 10^{14}$

Z naměřených a vypočítaných hodnot v tabulkách je zřejmé, že největší vliv na povrchovou rezistivitu má vlhkost. Po zdrsnění vzorků na hrubost 40 se povrchová rezistivita téměř neměnila a zůstala ve stejném řádu jako původní vzorky. Ovšem po ponoření vzorků do deionizované vody klesla povrchová rezistivita až o několik řádů. Povrchovou elektrickou vodivost způsobují především disociované molekuly nečistot, vyskytující se na povrchu izolantu. Tuto disociaci způsobuje v největší míře právě absorbovaná vlhkost v materiálu. Tuto teorii dokazují také výsledky měření vysušených vzorků, kdy po 120 h v peci neměly v sobě vzorky téměř žádnou vlhkost. Tyto vzorky měly povrchovou rezistivitu větší minimálně o dva řády, než vzorky namočené. Absorpce vlhkosti je závislá na pórovitosti materiálu a na jeho vazbách. Nejvíce vlhkosti pohltní materiály s iontovou vazbou.

Nejsilnějším faktorem, který ovlivňuje povrchovou rezistivitu izolantů, je tedy relativní vlhkost vzduchu, ze kterého následně izolant absorbuje molekuly vody.

3.2 Měření hodnoty přeskokového napětí

V druhé části experimentu byla změřena závislost velikosti přeskokového napětí na materiálu, jeho povrchu, tvaru elektrod a jejich vzdálenosti. Materiály i vzorky byly zvoleny stejné jako při měření povrchové rezistivity.

Vzorky měly rozměry 10 x 10 cm a vzdálenost mezi obdélníkovými elektrodami byla 50 mm, viz obr. 16. Elektrody byly zhotoveny pomocí samolepící měděné folie 3M, která byla nastříhána na požadovaný rozměr a přilepena na izolant. Jedna elektroda byla napojena za zkušební zdroj napětí a druhá byla uzemněná. Nejprve jsem změřil přeskokové napětí na čistých vzorcích, každý jsem proměřil 10x. Zvyšování napětí na vzorcích probíhalo rychlostí 700 V/s. Tato hodnota byla zjištěna pokusně tak, aby docházelo k přeskoku mezi 10. – 20. s měření.

U vybraných materiálů byl také změněn jejich povrch pomocí smirkového papíru o hrubosti 40 a následně byly opět změřeny hodnoty přeskokového napětí.

Tabulka 8 Přeskokové napětí vzorků v normálním prostředí

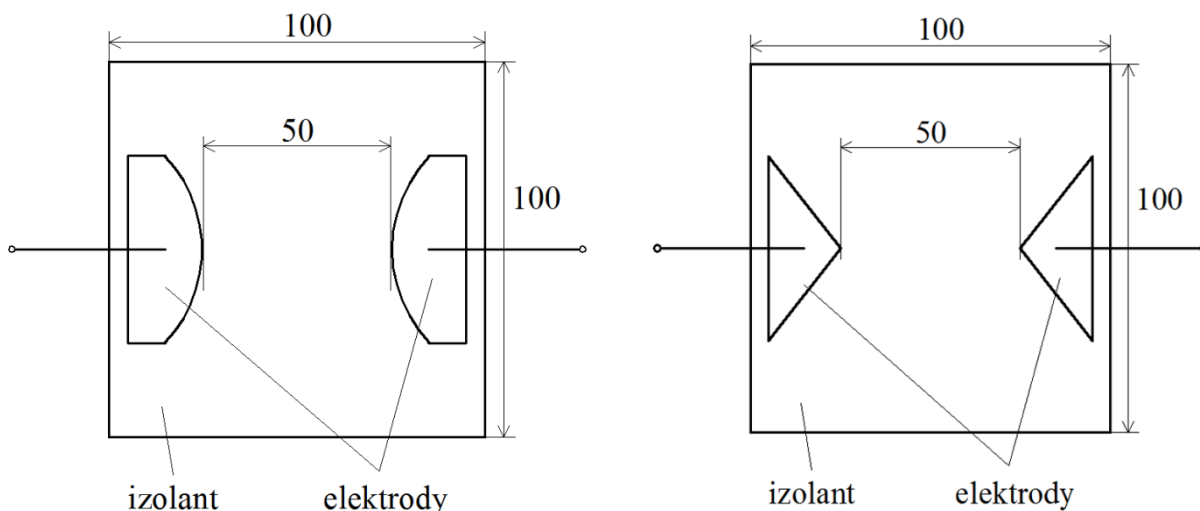
Materiál	Přeskokové napětí [kV]	Rozptyl	Variační koeficient [%]	Směrodatná odchylka	El. pevnost [kV/mm]
Vzorek 1 čistý	30,06	1,18	3,6	1,09	0,601
Vzorek 1 zrnitost 40	29,64	0,94	3,3	0,97	0,593
Vzorek 2 čistý	31,53	0,38	2	0,62	0,631
Vzorek 2 zrnitost 40	31,68	0,47	2,2	0,68	0,634
Vzorek 3 čistý	29,64	1,41	4	1,19	0,593
Vzorek 3 zrnitost 40	31,19	0,54	2,4	0,74	0,624
Vzorek 4 čistý	29,17	0,50	2,4	0,71	0,583
Vzorek 5 čistý	32,29	1,18	3,4	1,09	0,646
Vzorek 6 čistý	29,93	0,77	2,9	0,88	0,599
Vzorek 6 zrnitost 40	29,71	1,10	3,5	1,05	0,594
Vzorek 7 čistý	30,70	2,36	5	1,54	0,614
Vzorek 7 zrnitost 40	30,36	1,67	4,3	1,29	0,607
Vzorek 8 čistý	28,04	0,36	2,1	0,60	0,561

Jak je z naměřených výsledků patrné, tak se přeskokové napětí u původních a zdrsněných vzorku příliš nezměnilo. Nedá se tedy usuzovat, že by takováto změna povrchu materiálu měla nějaký větší vliv na přeskokové napětí při těchto podmínkách měření.

U vybraných vzorků jsem změnil tvar elektrod podle obr. 18 a ponechal jejich původní vzdálenost 50 mm.

Tabulka 9 Přeskokové napětí - pozměněný tvar elektrod

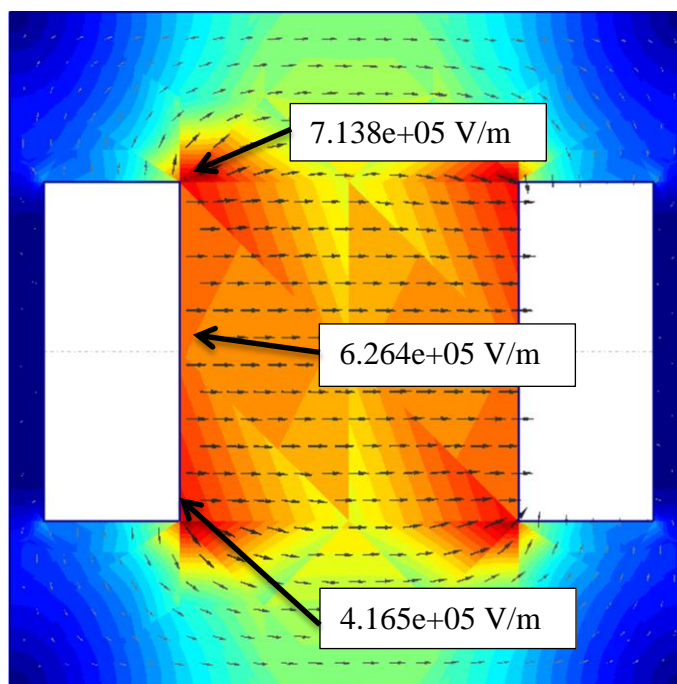
Materiál	Přeskokové napětí [kV]	Rozptyl	Variační koeficient [%]	Směrodatná odchylka	El. pevnost [kV/mm]
Vzorek 1 kulaté elektrody	30,35	0,95	3	0,98	0,607
Vzorek 1 ostré elektrody	27,59	0,45	2,4	0,67	0,552
Vzorek 3 kulaté elektrody	34,93	2,79	5	1,67	0,699
Vzorek 4 ostré elektrody	37,26	1,62	3,4	1,27	0,745



Obr. 18 Vzorky s pozměněným tvarem elektrod

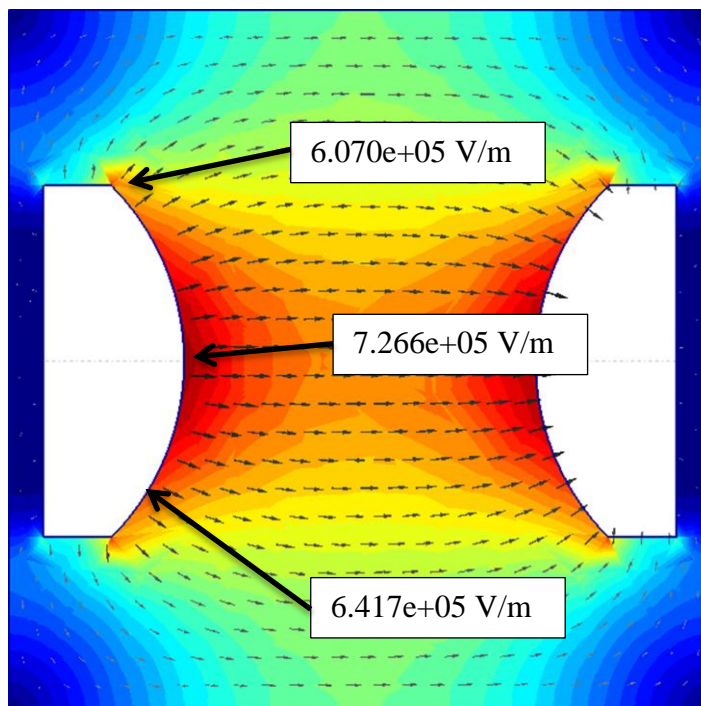
Měření potvrdilo původní předpoklad, který předpokládal, že u kulatých elektrod se zvýší přeskokové napětí. Zvětšené přeskokové napětí bylo způsobeno tím, že díky tvaru elektrody se na ní plynule rozložila intenzita elektrického napětí a nevznikla žádná místa, kde by byla intenzita výrazně větší než na jiných místech. Naopak při použití ostrých elektrod se potvrdil předpoklad, že bude přeskokové napětí nižší než v případě kulatých, nebo obdélníkových elektrod. Na toto měření, jsem pro vzorek 1 - Kartit vytvořil simulaci v programu Agros2d, pro ověření rozložení intenzity elektrického pole okolo elektrod. Vytvořil jsem všechny 3 elektrodové systémy a změřil, jak je rozložena intenzita elektrického

pole na elektrodě. Program Agros2d bohužel neumožňuje přesné vymodelování vzorků ve 2D souřadnicích, proto jsem vymodeloval situaci, kdy byly elektrody pouze ve vzduchu a nebyly přilepeny na povrch izolantu. Díky tomu jsou zobrazené číselné hodnoty odlišné od reálných hodnot. Tato simulace ukazuje pro ilustraci, jak ovlivňuje tvar elektrod rozložení elektrického pole. Toto rozložení bude u měřeného vzorku podobné, avšak s jinými hodnotami.



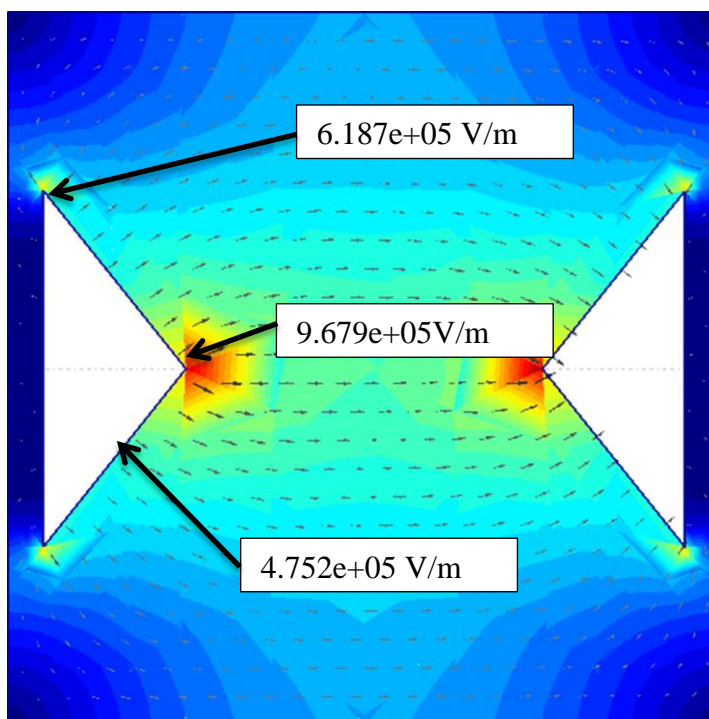
Obr. 19 Rozložení intenzity elektrického pole u vzorku s obdélníkovými elektrodami pomocí Agros2d

Na obr. 19 je vzorek s obdélníkovými elektrodami. Zde byla největší elektrická intenzita v rozích elektrod. Při experimentu z těchto rohů přeskakoval výboj na druhou elektrodu.



Obr. 20 Rozložení intenzity elektrického pole u vzorku se zakulacenými elektrodami pomocí Agros2d

Na obr 20 je vzorek se zakulacenými elektrodami. Zde je intenzita rozložena nejvíce rovnoměrně. Přeskové napětí bylo v tomto případě nejvyšší.



Obr. 21 Rozložení intenzity elektrického pole u vzorku s ostrými elektrodami pomocí Agros2d

Podle obr 21 je zřejmé, že nejméně homogenní pole je při tomto uspořádání elektrod. Přeskokové napětí bylo v tomto případě nejnižší.

Pouze u vzorku 4, transformátorové-lepenky, došlo k opačnému jevu, při použití ostrých elektrod. Přeskokové napětí se nesnížilo, ale naopak se zvětšilo přibližně o 5 kV. Předpokládám, že tento výsledek má za následek jev, který je blíže popsán v kapitole 2.4.1 a je zobrazen na obr.14. Rozložení elektrod zde sice není hrot-deska, nýbrž hrot-hrot, ale patrně se v okolí kladného hrotu vytvořil kladný prostorový náboj, který jakoby zdeformoval tvar hrotu a zvětšil jeho poloměr. Tím se původně nehomogenní pole zhomogenizovalo a to mělo za následek zvětšení přeskokového napětí.

V dalším měření byly vybrané vzorky ponořeny na 120 h do deionizované vody. Ty samé materiály jsem také vložil na 120 h do pece na vysušení.

Tabulka 10 Přeskokové napětí po ponoření na 120 h

materiál	Přeskokové napětí [kV]	Rozptyl	Variační koeficient [%]	Směrodatná odchylka	El. pevnost [kV/mm]
vzorek 1	27,55	0,72	3	0,85	0,551
Vzorek 2 čistý	29,16	0,56	3	0,75	0,583
Vzorek 2 zrnitost 40	31,55	0,59	2,4	0,77	0,631
Vzorek 6 čistý	29,93	0,77	2,9	0,88	0,599
Vzorek 7 čistý	26,80	0,14	1,4	0,37	0,536
Vzorek 7 zrnitost 40	26,74	1,46	4,5	1,21	0,535

Tabulka 11 Přeskokové napětí po vysušení po dobu 120 h

materiál	Přeskokové napětí [kV]	Rozptyl	Variační koeficient [%]	Směrodatná odchylka	El. pevnost [kV/mm]
Vzorek 1 vysušený	33,46	1,42	3,60	1,19	0,669
Vzorek 2 vysušený	33,08	0,76	2,60	0,87	0,661
Vzorek 6 vysušený	34,65	0,55	2,10	0,74	0,693
Vzorek 7 vysušený	32,52	0,32	1,70	0,57	0,650

Jak je patrné z tabulek 9. a 10., tak nejvíce přeskokové napětí ovlivnila vlhkost materiálu. U mokrého materiálu kleslo přeskokové napětí celkem výrazně. Pouze u hrubého vzorku 2 - LAMPLEXU FR4, ponořeného na 120 h do deionizované vody bylo přeskokové napětí na stejné úrovni jako u vzorku který byl skladován v normálních podmínkách. Může to být z toho důvodu, že povrch materiálu nebyl rovnoměrně zdrsňen a mohly se na něm vytvořit místa s menší a větší povrchovou vodivostí. Díky tomu se mohlo změnit rozložení

prostorového náboje, který změnil tvar elektrického pole, a změnila se tím hodnota přeskokového napětí. U vysušených vzorků se naopak přeskokové napětí zvýšilo. Rozdíl přeskokových napětí mezi vysušenými a vlhkými vzorky se pohybuje okolo 5 kV.

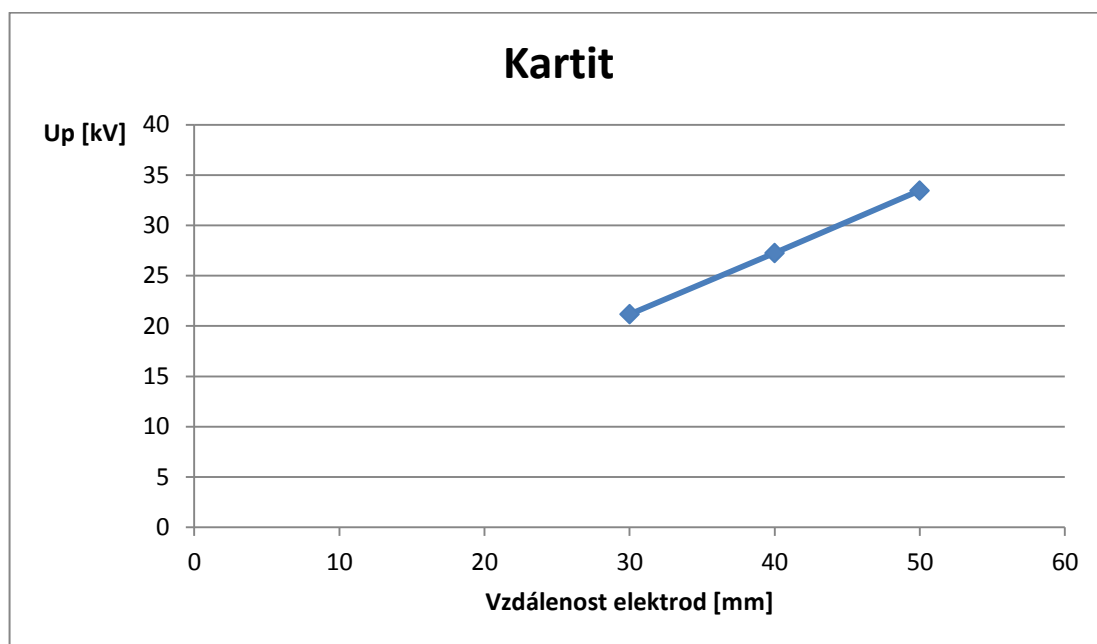


Obr. 22 Graf přeskokových napětí zkoušených vzorků

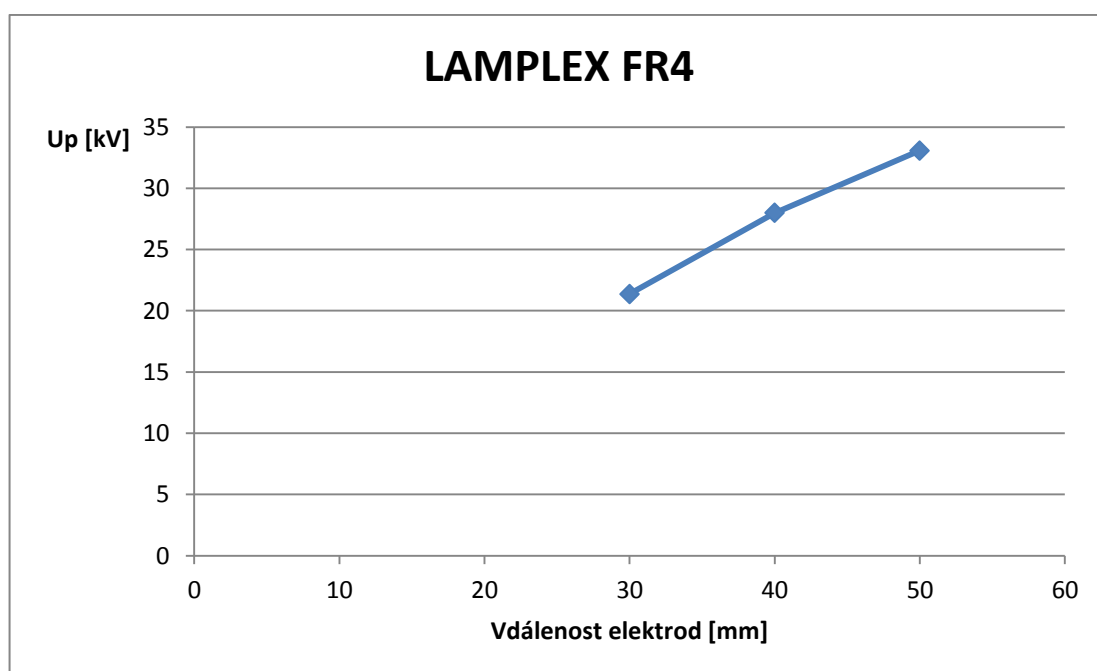
Dále byla změřena závislost velikosti přeskokového napětí na měnící se vzdálenosti elektrod.

Tabulka 12 Přeskokové napětí při změněné vzdálenosti elektrod

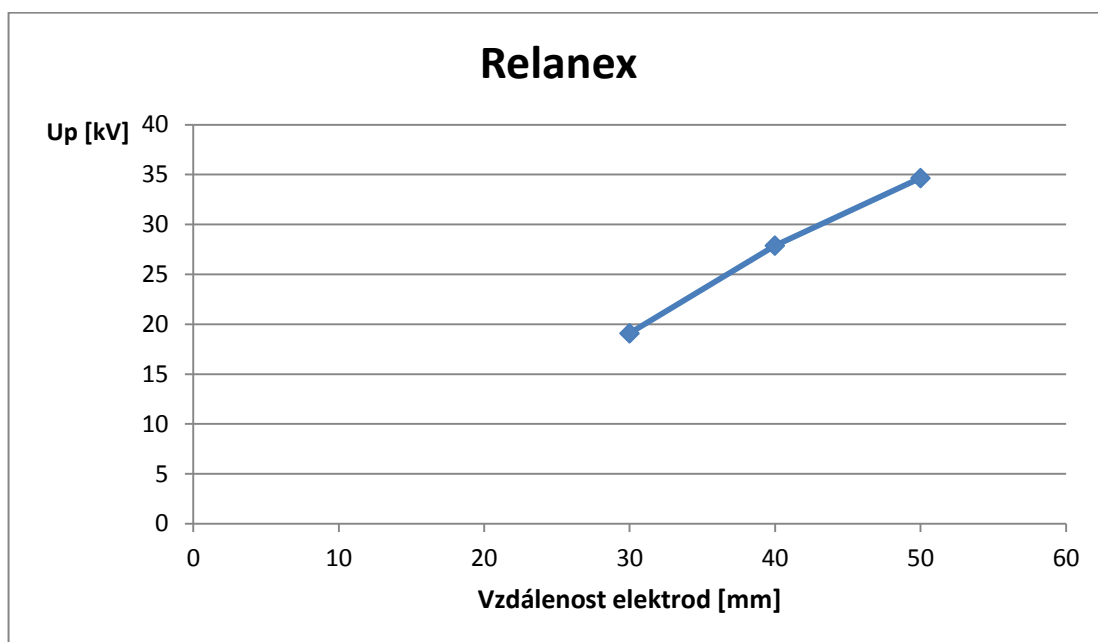
Materiál	Přeskokové napětí [kV]	Rozptyl	Variační koeficient [%]	Směrodatná odchylka	El. pevnost [kV/mm]
vzorek 1 - 4 cm	27,26	3,48	7	1,87	0,682
Vzorek 1 - 3 cm	21,17	1,17	5,1	1,08	0,706
Vzorek 2 - 4 cm	27,99	1,1	3,7	1,05	0,700
Vzorek 2 - 3 cm	21,37	0,13	1,7	0,36	0,712
Vzorek 6 - 4 cm	27,88	6,5	9,1	2,55	0,697
Vzorek 6 - 3 cm	19,09	0,31	2,9	0,55	0,636
vzorek 7 - 4 cm	27,76	0,55	2,7	0,74	0,694
vzorek 7 - 3 cm	20,54	0,93	4,7	0,96	0,685



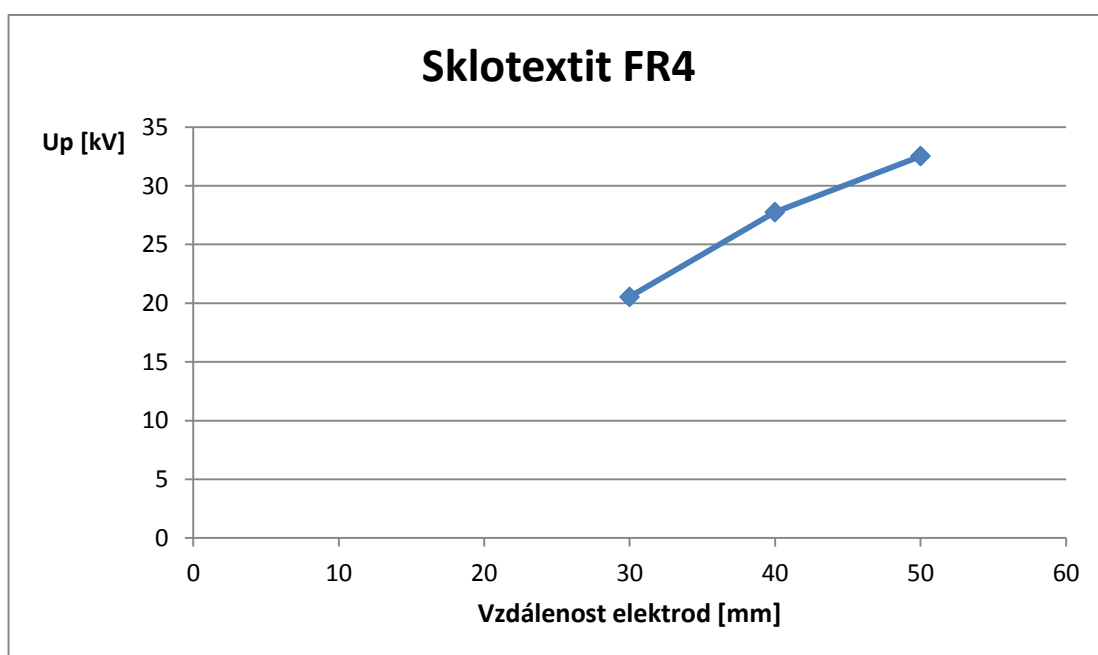
Obr. 23 Graf závislosti přeskovového napětí na vzdálenosti elektrod - Kartit



Obr. 24 Graf závislosti přeskovového napětí na vzdálenosti elektrod - Lamplex FR4



Obr. 25 Graf závislosti přeskovového napětí na vzdálenosti elektrod - Relanex



Obr. 26 Graf závislosti přeskovového napětí na vzdálenosti elektrod - Sklotextit FR4

Z naměřených hodnot byly vytvořeny grafy závislosti přeskovového napětí na vzdálenosti elektrod. Měření dokázalo předpoklad, že pokud se zvětší vzdálenost elektrod

například dvojnásobně, přeskokové napětí nebude také dvojnásobné, ale bude menší. Přeskokové napětí se vzdáleností neroste lineárně. S tímto faktem se musí počítat při návrzích izolačních systémů.

4 Závěr

V první části této diplomové práce byla shrnuta obecná problematika, týkající se problematiky dielektrik. Byly zde popsány fyzikální jevy, probíhající uvnitř dielektrik, při působení silného elektrického pole. Dále zde byly popsány polarizace dielektrik i jejich negativní vlastnosti jako je elektrická vodivost.

V druhé experimentální části byla tato diplomová práce zaměřena na zkoumání závislosti velikosti přeskokového napětí na povrchu izolantu a jeho povrchové vodivosti, ovlivněné absorbovanou vlhkostí. Vybráno bylo 8 různých izolačních materiálů a z nich následně zhotoveny stejné vzorky. Jako první se u vzorků změřila povrchová rezistivita. Potom byly na vzorky připevněny elektrody pro měření závislosti přeskokového napětí. Nejdříve byly změřeny vzorky, které byly vystaveny běžnému prostředí laboratoře (podmínky jsou popsány v kapitole 3.1). Hodnoty přeskokových napětí se i přes rozdílné materiály nijak výrazně nelišily. Hlavním důvodem je, že přeskok probíhal hlavně vzduchem, takže hodnota přeskokového napětí byla z největší části závislá na vzdálenosti elektrod. Dále se u vybraných vzorků změnil jejich povrch pomocí smirkového papíru o hrubosti 40. Ani zde se ovšem neměnily nijak zásadně hodnoty povrchových rezistivit a přeskokových napětí. Po těchto měřeních přišlo na řadu ponoření vybraných vzorků do deionizované vody a vložení stejných materiálů do pece. V obou případech na 120 h. Po změření povrchových rezistivit se naměřené výsledky značně lišily od vzorků skladovaných v běžném prostředí. U namočených vzorků klesla rezistivita zpravidla minimálně o jeden řád. Na přeskokovém napětí se tato vlastnost projevila tak, že jeho hodnota klesla. Pouze u materiálu LAMPLEX FR4 byla tato hodnota téměř stejná. Může za to zřejmě rozložení prostorového náboje na povrchu izolantu, které jakoby pozměnilo tvar elektrod a změnilo rozložení intenzity elektrického pole. Předposledním předmětem měření byla změna tvaru elektrod. Zde se potvrdily teoretické předpoklady, že u zakulacených elektrod bude přeskokové napětí nejvyšší a u elektrod ostrých naopak nejnižší. Pouze v jednom případě došlo při použití ostrých elektrod ke zvětšení přeskokového napětí. Bylo to zřejmě z důvodu vytvoření prostorového náboje před ostrým zakončením elektrody. Poslední část měření měla dokázat, že s rostoucí vzdáleností elektrod nestoupá přeskokové napětí lineárně, což bylo dokázáno. Pouze u Kartitu se tato závislost zdá být podle grafu lineární. Je to ovšem z toho důvodu, že se vzdálenosti elektrod neměnily o větší část z důvodu velikosti vzorků.

U elektrických izolací je ještě mnoho neprobádaných problematik, jako je elektrické stárnutí izolanů a působení silného elektrického pole na izolanty. Na izolanty jsou v dnešní době kladeny velké nároky, a proto je potřeba se touto problematikou dále zabývat.

Použitá literatura

- [1] **Trnka, Pavel.** *Elektrické a kombinované stárnutí izolačních materiálů.* Plzeň : FEL ZČU Plzeň.
- [2] **Mentlík, Václav, a další.** *Sledování změn výbojové činnosti namáhaných variant izolačního systému.* Plzeň : FEL ZČU Plzeň.
- [3] **Crine, J.P.** *A Molecular Model for the.* 2007. Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena.
- [4] Elektrický náboj. *Wikipedie.* [Online] 17. leden 2012. [Citace:]
http://cs.wikipedia.org/wiki/Elektrick%C3%BD_n%C3%A1boj.
- [5] **Hofmann, J. a Urbanová, M.** Fyzika I str. 204. *vydavatelstvi.vscht.cz.* [Online] 2005. [Citace: 17. leden 2012.] http://vydavatelstvi.vscht.cz/knihy/uid_ekniha-001/pages-img/204.html.
- [6] **Lank, Vladimír a Vondra, Miroslav.** *Fyzika v kostce.* 2007. ISBN 978-80-253-0228-6.
- [7] **Poláček, Dušan a kolektiv.** *Elektrotechnické tabulky.* Montanex, 1996. ISBN 80-85780-48-8.
- [8] **Mentlík, Václav.** *Dielektrické prvky a systémy.* Plzeň : BEN, 2006. ISBN 80-7300-189-6.
- [9] **Hofmann, J. a Urbanová, M.** Fyzika I str. 227. *vydavatelstvi.vscht.cz.* [Online] 2005. [Citace: 17. leden 2012.] http://vydavatelstvi.vscht.cz/knihy/uid_ekniha-001/pages-img/227.html.
- [10] **Artbauer, Ján.** *Izolanty a izolácie.* Alfa, 1969.
- [11] **Jiráček, Josef, a další.** *Materiály a technická dokumentace.*
- [12] Elektrostatika. *Wikipedie.* [Online] 17. leden 2012.
http://cs.wikipedia.org/wiki/Elektrick%C3%A1_polarizace#Polarizace_dielektrika.
- [13] **Shindo, Kimio.** *FORMATION AND DESTRUCTION OF POLARIZATION.* Shiga-Ken : Shiga University of Medical Science, 1994.
- [14] **Shah, Mirresh.** *Signature Analysis of Flash Over Voltage Phenomena on Contaminated.* Menlo Park, USA : Rat chern Cayoration.
- [15] **Mentlík, Václav.** *Diagnostika elektrických zařízení.* Praha : BEN - technická literatura, 2008. ISBN 978-80-7300-232-9 .
- [16] Breakdown Mechanism of Gaseous, Liquid and Solid Materials. [Online] [Citace: 15. únor 2012.] <http://www.newagepublishers.com/samplechapter/000357.pdf>.
- [17] **Krile, J., a další.** *Imaging of Dielectric Surface Flashover.* [IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE] APRIL 2005.

- [18] **Miller, H. Craig.** *Surface Flashover of Insulators.* [IEEE Transactions on Electrical Insulation] General Electric, October 1989.
- [19] Polytetrafluorethylen. [Online] [Citace: 21.. březen 2012.]
[http://cs.wikipedia.org/wiki/Polytetrafluorethylen.](http://cs.wikipedia.org/wiki/Polytetrafluorethylen)
- [20] *Elektrotechnická měření.* Praha : BEN, 2004. ISBN 80-7300-022-9.
- [21] **Mentlík, Václav.** *Diagnostika izolantů.* Plzeň, 1986.
- [22] **Jandora, Radek.** radek.jandora.sweb.cz. [Online] [Citace: 26. únor 2012.]
[http://radek.jandora.sweb.cz/f07.htm.](http://radek.jandora.sweb.cz/f07.htm)
- [23] **Barták, Alexandr, a další.** *Diagnostika poruch izolací elektrických strojů.* Praha : SNTL, 1984.

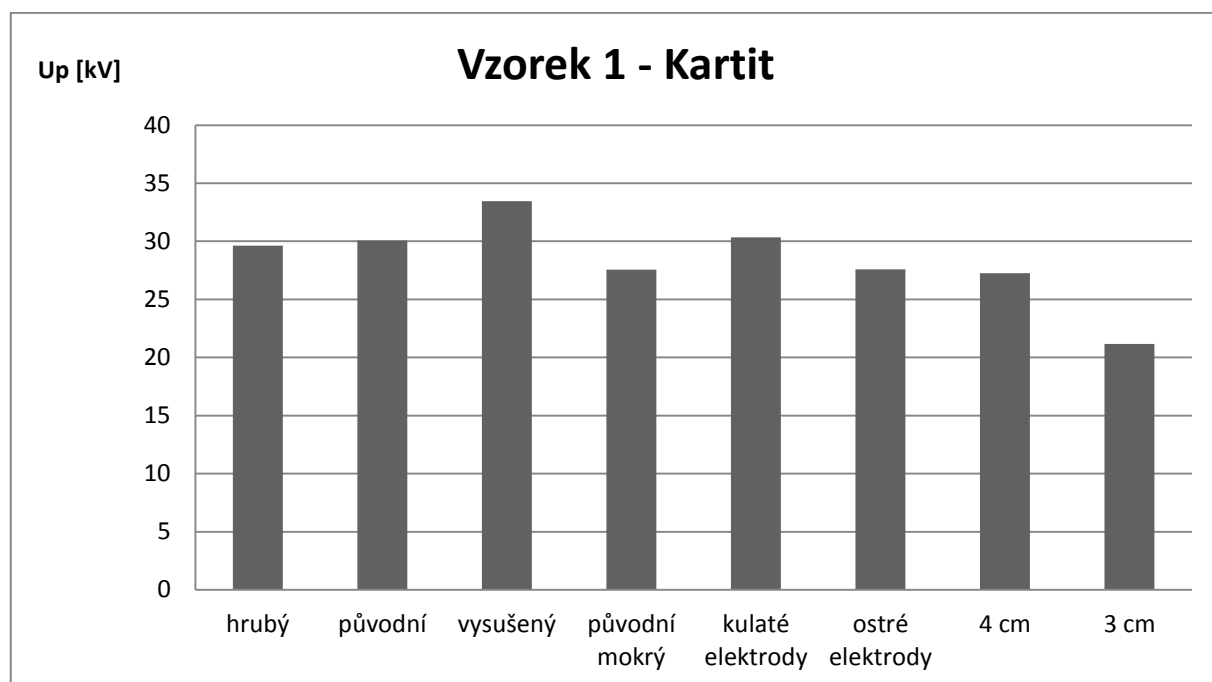
Seznam příloh

- Příloha 1 naměřené hodnoty a grafy
Příloha 2 Fotografie přeskoků, vzorků a měřicí soustavy

Příloha 1

Tabulka 13 Naměřené hodnoty - Kartit

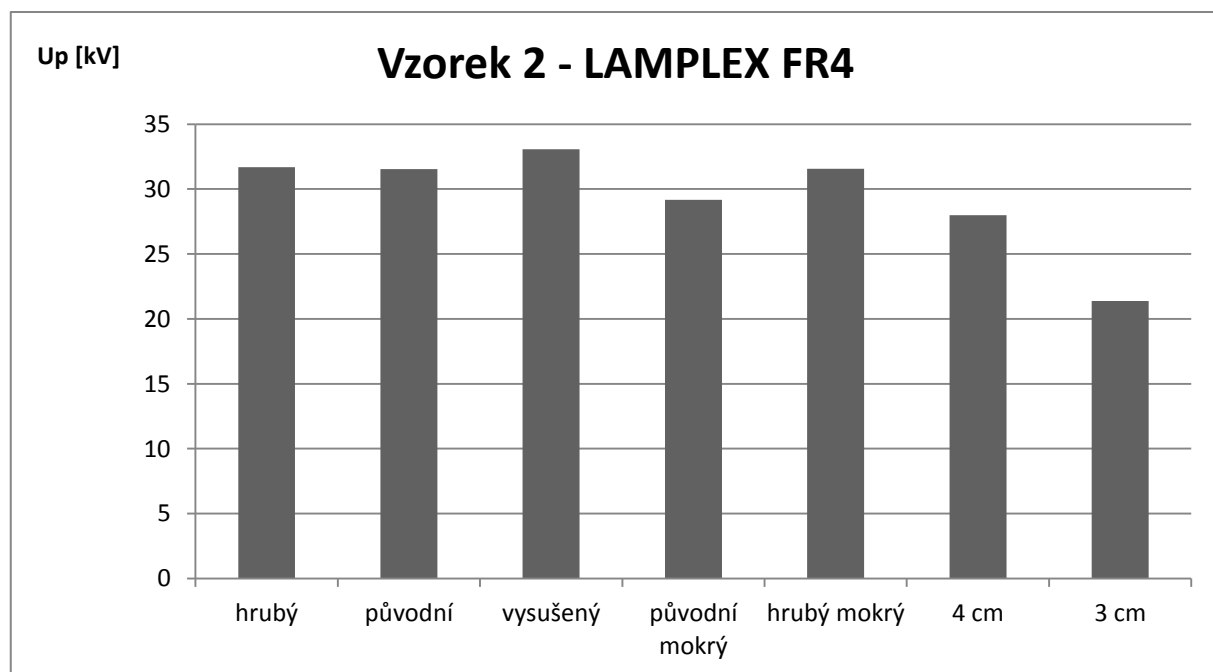
měření	hrubý	původní	vysušený	původní mokrá	kulatý	ostré	4 cm	3 cm
1	30,01	31,46	31,1	28,35	30,34	26,58	22,94	21,53
2	29,22	30,42	32,96	29,67	29,81	26,5	28,71	22,1
3	30,55	30,03	33,86	27,14	30,08	27,42	29,62	22,44
4	28,12	31,17	31,81	27,82	31,53	28,44	26,62	22,35
5	30,88	28,97	34,74	26,84	31,85	28,79	27,76	19,76
6	31,38	29,06	34,74	27,61	29,8	27,78	26,95	22,08
7	29,16	28,1	34,63	26,78	30,18	27,55	29,79	21,53
8	29,02	30,78	33,59	26,93	31,6	27,72	27,32	20,42
9	29,09	31,26	34,23	27,08	29,81	27,59	26,29	19,66
10	28,93	29,34	32,95	27,25	28,52	27,53	26,63	19,79
průměr	29,64	30,06	33,46	27,55	30,35	27,59	27,26	21,17
rozptyl	0,94	1,18	1,42	0,72	0,95	0,45	3,48	1,17
variační koeficient	0,03	0,04	0,04	0,03	0,03	0,02	0,07	0,05
směrodatná odchylka	0,97	1,09	1,19	0,85	0,98	0,67	1,87	1,08
el. pevnost [kV/mm]	0,593	0,601	0,669	0,551	0,607	0,552	0,682	0,706



Obr. 27 Graf hodnot přeskovového napětí – Kartit

Tabulka 14 Naměřené hodnoty - LAMPLEX FR4

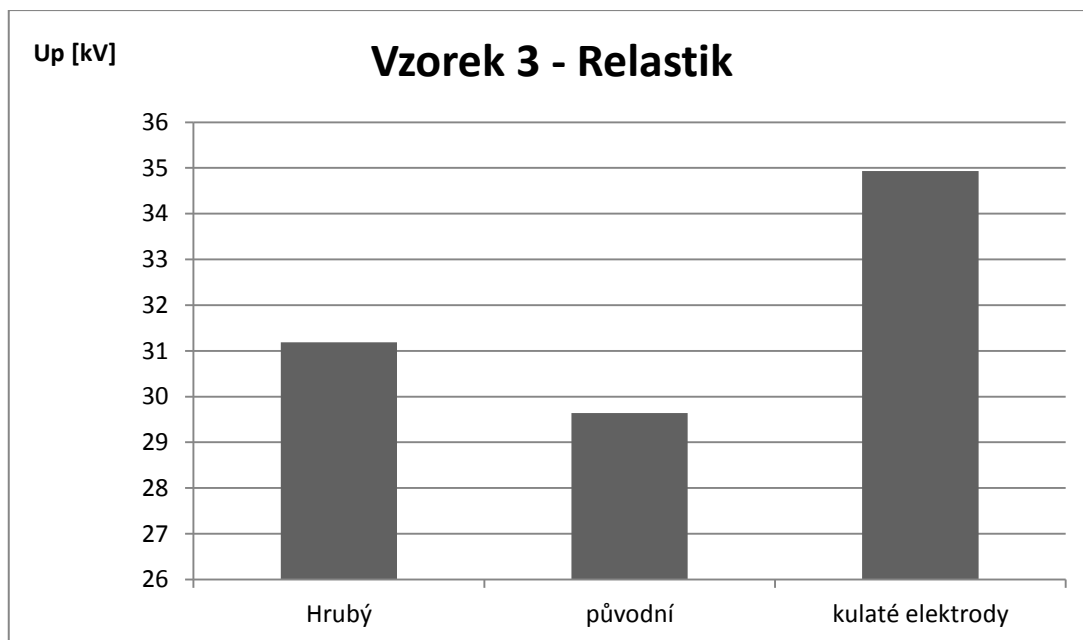
měření	hrubý	původní	vysušený	původní mokrý	hrubý mokrý	4 cm	3 cm
1	31,06	31,63	31,17	28,48	32,85	27,77	21,55
2	31,22	31,97	32,53	28,74	31,84	30,44	21,33
3	32,32	32,2	32,36	30,24	30,7	27,63	20,76
4	31,9	32,26	34,27	30,12	31,11	28,71	20,95
5	31,27	31,11	33,73	29,17	31,96	28,95	21,02
6	31,95	30,32	32,68	29,81	31,97	27,61	21,42
7	32,03	31,6	33,66	29,81	31,9	27,69	21,59
8	31,32	31,29	33,42	28,18	30,23	27,35	22,05
9	33,1	32,14	33,89	28,97	30,77	26,56	21,52
10	30,63	30,8	33,05	28,12	32,21	27,17	21,55
průměr	31,68	31,53	33,08	29,16	31,55	27,99	21,37
rozptyl	0,47	0,38	0,76	0,56	0,59	1,10	0,13
variační koeficient	0,02	0,02	0,03	0,026	0,02	0,04	0,02
směrodatná odchylna	0,683	0,616	0,870	0,752	0,771	1,048	0,357
el. pevnost [kV/mm]	0,634	0,631	0,662	0,583	0,631	0,700	0,712



Obr. 28 Graf hodnot přeskokového napětí – Kuprextit

Tabulka 15 Naměřené hodnoty - Relastik

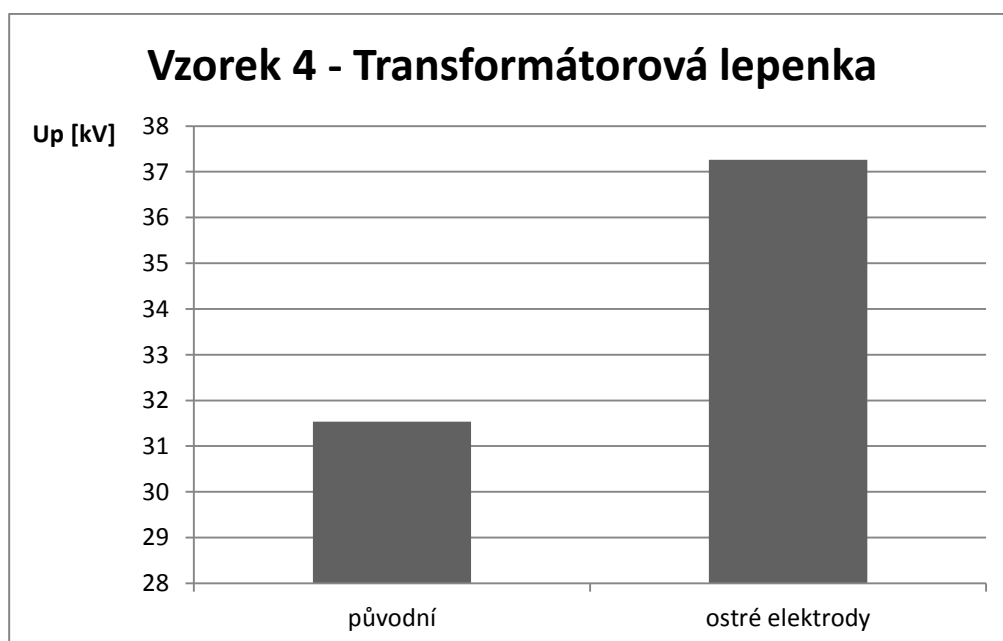
měření	hrubý	původní	kulaté elektrody
1	31,92	28,92	36,72
2	32,22	31,37	37,55
3	31,05	27,76	34,91
4	30,99	30,18	33,68
5	31,18	30,45	33,36
6	29,99	29,76	36,02
7	32,21	28,3	35,68
8	30,08	28,23	35,9
9	30,97	30,95	31,87
10	31,25	30,44	33,62
průměr	31,19	29,64	34,93
rozptyl	0,54	1,41	2,79
variační koeficient	0,02	0,04	0,05
směrodatná odchylka	0,74	1,19	1,67
el. pevnost [kV/mm]	0,624	0,593	0,699



Obr. 29 Graf hodnot přeskovového napětí – Relastik

Tabulka 16 Naměřené hodnoty - Transformátorová lepenka

měření	původní	ostré
1	31,63	37,97
2	31,97	34,42
3	32,2	36,62
4	32,26	37,56
5	31,11	38,49
6	30,32	37,71
7	31,6	37,7
8	31,29	39,18
9	32,14	36,1
10	30,8	36,85
průměr	31,53	37,26
rozptyl	0,38	1,62
variační koeficient	0,020	0,034
směrodatná odchylka	0,616	1,272
el. pevnost [kV/mm]	0,631	0,745



Obr. 30 Graf hodnot přeskokového napětí – Transformátorová lepenka

Tabulka 17 Naměřené hodnoty - Lesklá lepenka

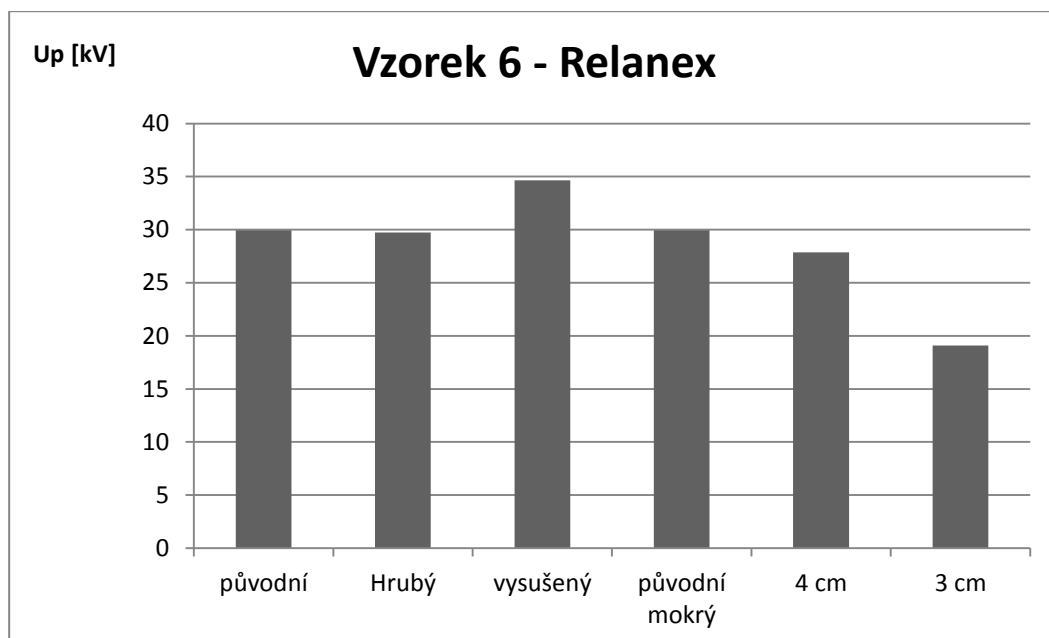
měření	původní
1	34,01
2	32,01
3	31,55
4	34,49
5	32,07
6	31,63
7	32,53
8	31,47
9	32,35
10	30,81
průměr	32,29
rozptyl	1,18
variační koeficient	0,03
směrodatná odchylka	1,09
el. pevnost [kV/mm]	0,646



Obr. 31 Graf hodnot přeskovového napětí – Lesklá lepenka

Tabulka 18 Naměřené hodnoty - Relanex

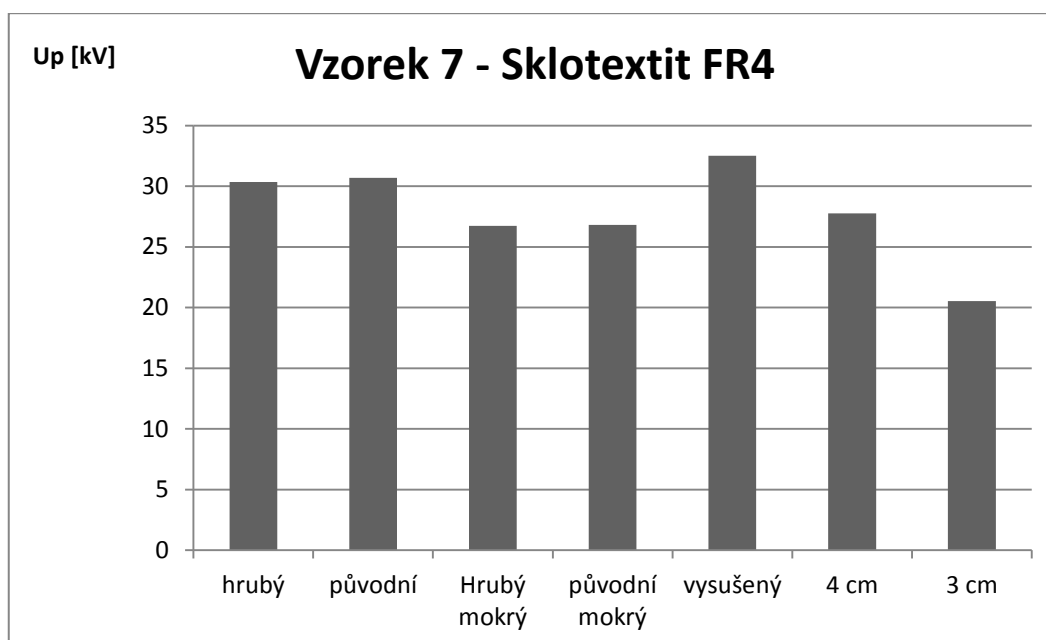
měření	původní	hrubý	vysušený	původní mokrý	4 cm	3 cm
1	30,65	27,68	35,09	30,65	25,69	18,83
2	31,36	28,66	34,13	31,36	23,3	18,68
3	29,64	29,29	35,09	29,64	30,55	19,2
4	30,42	28,87	33,32	30,42	29,38	18,24
5	30,51	30,79	35,23	30,51	28,33	20,06
6	28,65	30,56	34,27	28,65	29,08	19,54
7	29,7	29,74	34,92	29,7	24,51	18,95
8	29,39	30,59	34,19	29,39	26,91	19,48
9	30,53	31,2	36,1	30,53	31,51	19,54
10	28,47	29,92	34,2	28,47	29,53	18,34
průměr	29,93	29,73	34,65	29,93	27,88	19,09
rozptyl	0,77	1,10	0,55	0,77	6,50	0,31
variační koeficient	0,029	0,035	0,021	0,029	0,091	0,029
směrodatná odchylna	0,88	1,05	0,74	0,88	2,55	0,55
el. pevnost [kV/mm]	0,599	0,595	0,693	0,599	0,697	0,636



Obr. 32 Graf hodnot přeskovového napětí – Relanex

Tabulka 19 Naměřené hodnoty - Sklotextit FR4

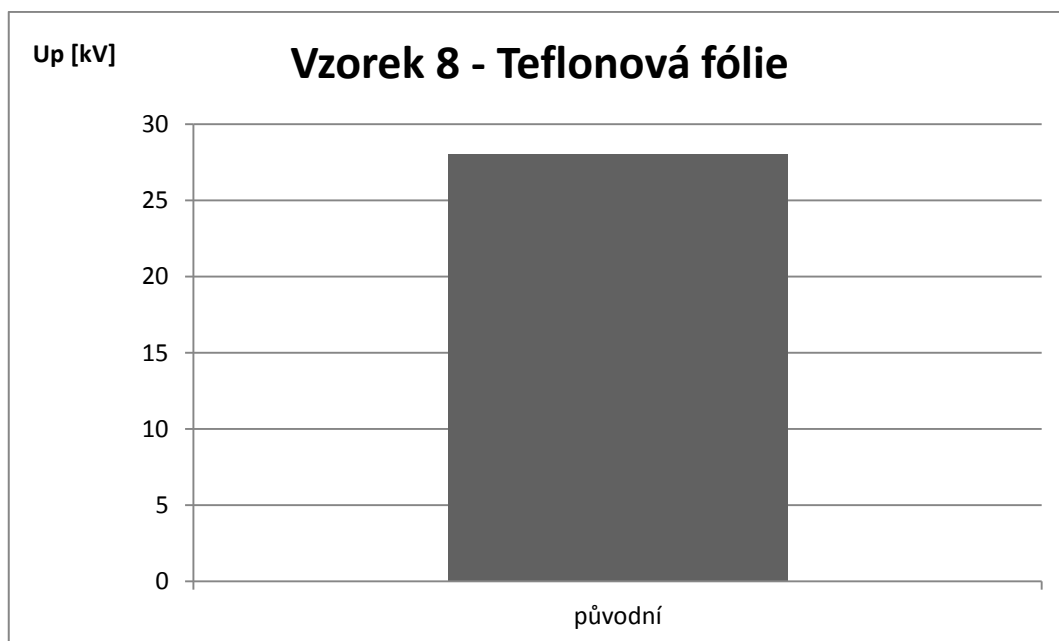
měření	hrubý	původní	hrubý mokry	původní mokry	vysušený	4 cm	3 cm
1	30,05	27,61	24,77	26,59	32,1	29,2	21,56
2	31,44	30,34	25,08	27,32	32,63	26,56	18,49
3	31,22	29,49	26,19	26,91	31,85	28,5	20,67
4	32,05	30,54	26,29	26,33	33,26	27,35	20,8
5	31,44	29,62	26,34	26,81	32,76	27,06	19,71
6	29,74	31,08	27,93	27,18	32,93	28,42	21,13
7	28,84	32,47	28,99	27,4	32,06	28,05	21,4
8	30,84	32,38	27,25	26,42	31,92	27,56	20,73
9	27,58	30,48	27,21	26,58	32,15	27,53	19,44
10	30,37	32,96	27,3	26,45	33,57	27,39	21,49
průměr	30,36	30,70	26,74	26,80	32,52	27,76	20,54
rozptyl	1,67	2,36	1,46	0,14	0,32	0,55	0,93
variační koeficient	0,043	0,050	0,045	0,014	0,017	0,027	0,047
směrodatná odchylna	1,29	1,54	1,21	0,37	0,57	0,74	0,96
el. pevnost [kV/mm]	0,607	0,614	0,535	0,536	0,650	0,694	0,685



Obr. 33 Graf hodnot přeskokového napětí – Kompozit

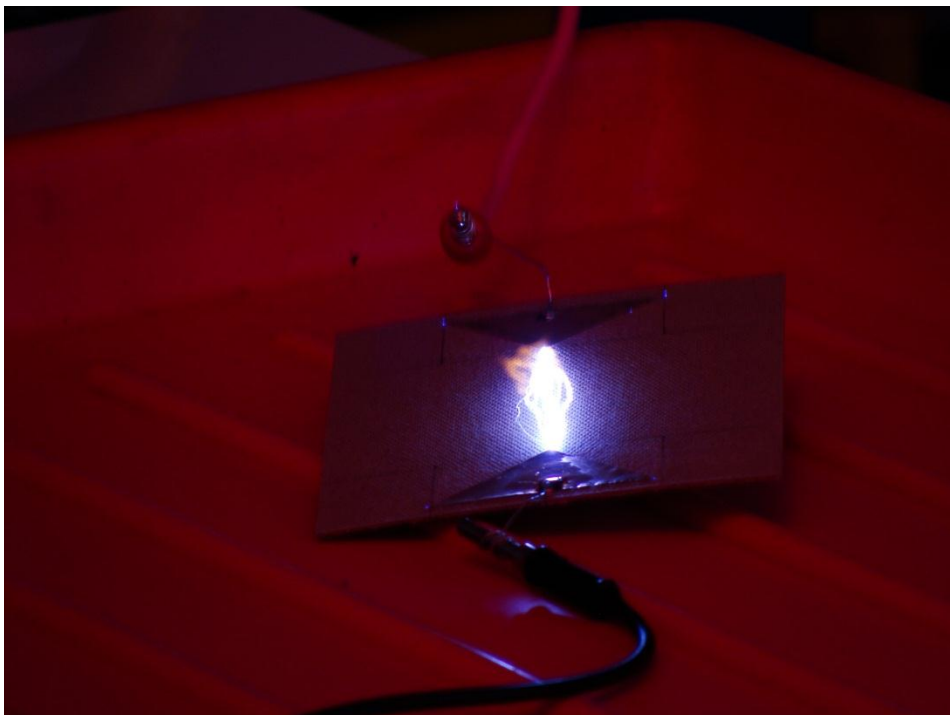
Tabulka 20 Naměřené hodnoty – Teflonová fólie

měření	původní
1	27,72
2	28,49
3	28,45
4	29,4
5	28,44
6	27,71
7	27,41
8	27,63
9	27,55
10	27,58
průměr	28,04
rozptyl	0,36
variační koeficient	0,021
směrodatná odchylka	0,60
el. pevnost [kV/mm]	0,561

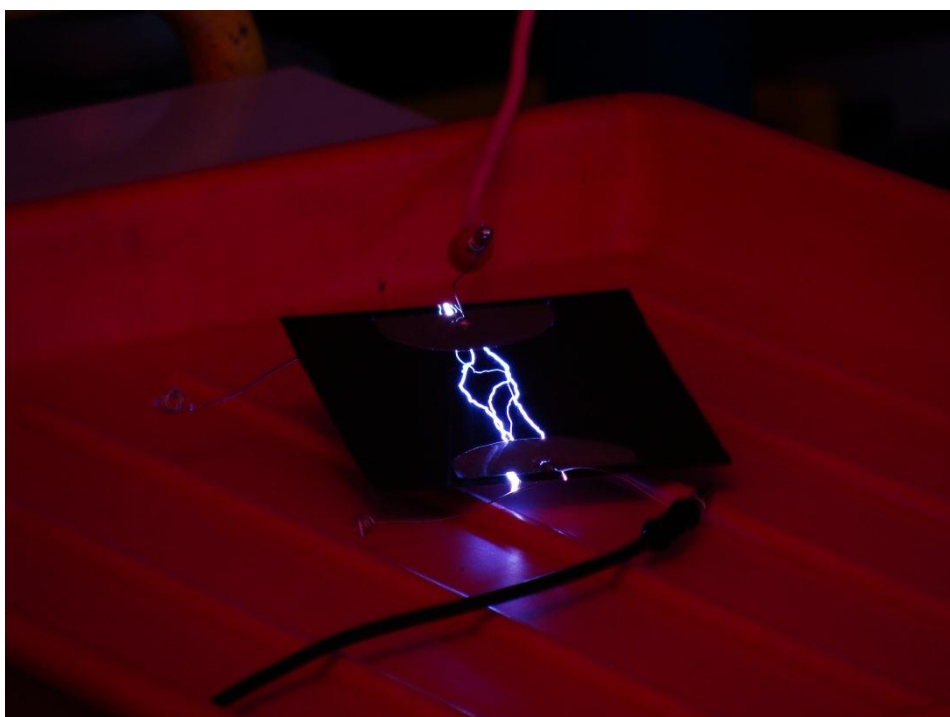


Obr. 34 Graf hodnot přeskovového napětí – Teflon

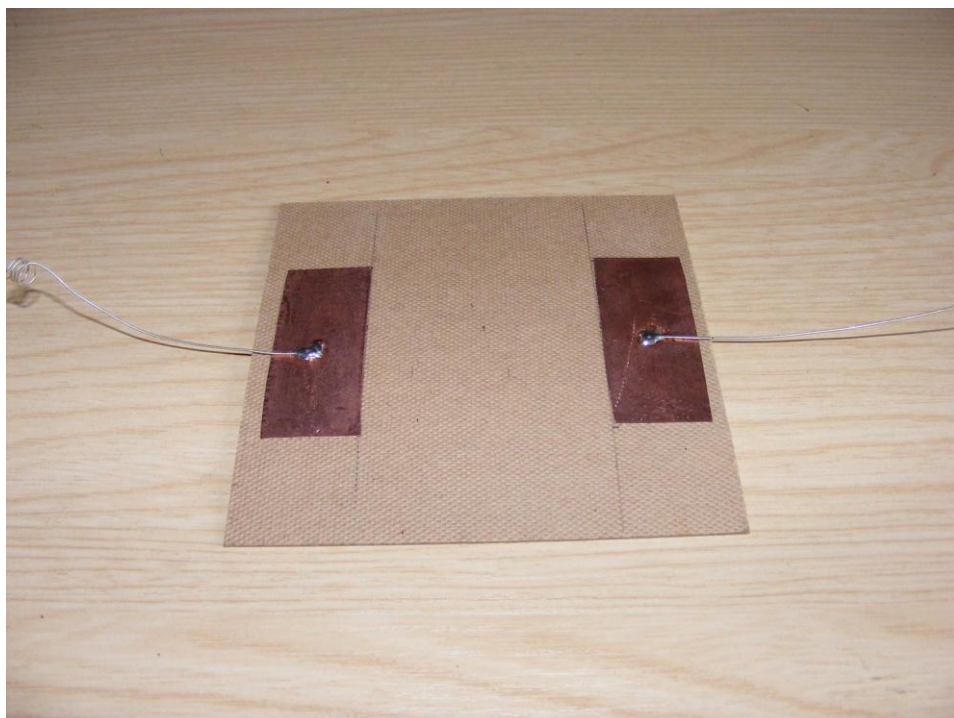
Příloha 2



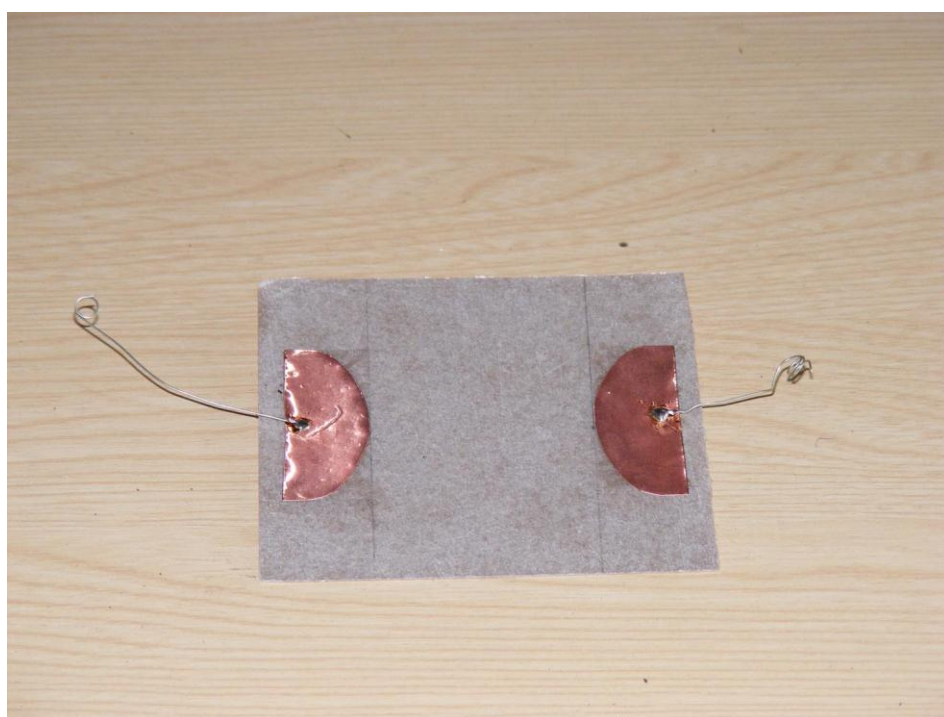
Obr. 35 Výboj na testovacím vzorku při použití ostrých elektrod



Obr. 36 Nežádoucí výboj, který přeskočil i přes zadní stranu vzorku



Obr. 37 Vzorek s obdélníkovými elektrodami



Obr. 38 Vzorek se zakulacenými elektrodami



Obr. 39 Měřicí pracoviště



Obr. 40 Měřící zařízení