

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ**

# **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Polarizace a polarizační mechanismy nehomogenních  
dielektrických materiálů**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2016/2017

**ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**  
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **David NOVÁK**  
Osobní číslo: **E14B0110P**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**  
Název tématu: **Polarizace a polarizační mechanismy nehomogenních dielektrických materiálů**  
Zadávající katedra: **Katedra technologií a měření**

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

1. Uveďte rozdělení dielektrických látek a základní hlediska na polarizaci dielektrika.
2. Popište polarizační mechanismy a děje probíhající v dielektrickém materiálu při jeho interakci s vnějším elektrickým polem.
3. Posuďte vliv nehomogenit obsažených v dielektrickém materiálu na jeho chování při působení vnějšího elektrického pole.
4. Popište moderní způsoby detekce prostorového náboje zachyceného v nehomogenním dielektriku.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah kvalifikační práce: **30 - 40 stran**

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. Mentlík, V. Dielektrické prvky a systémy. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2006, 235 s. ISBN 80-7300-189-6.
2. Kao, K. Dielectric phenomena in solids: with emphasis on physical concepts of electronic processes. Boston: Academic Press, c2004, xvii, 581 p. ISBN 0123965616.
3. Ahmed, N. H.; Srinivas, N. N., Review of space charge measurements in dielectrics, Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on , vol.4, no.5, pp.644,656, Oct 1997.
4. Elektronické informační zdroje (databáze IEEE Xplore apod.).

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jaroslav Hornak**


Regionální inovační centrum elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: **14. října 2016**

Termín odevzdání bakalářské práce: **8. června 2017**

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



  
Doc. Ing. Aleš Hamáček, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2016

## **ABSTRAKT**

Předkládaná bakalářská práce se zabývá studiem chování nehomogenních dielektrik ve vnějším elektrickém poli. Velká pozornost je věnována aktuální problematice nanokompozitních dielektrik. V práci jsou uvedeny jednotlivé rozdělení dielektrických látek, základní hlediska na jejich polarizaci, popis a důsledky jednotlivých mechanismů během působení vnějšího elektrického pole. Záměrem práce je posouzení vlivu nanostrukturizace dielektrických materiálů na rozložení prostorového náboje, přičemž jsou zhodnoceny i další elektrické vlastnosti různých nanokompozitních dielektrik. Druhým záměrem práce je sestavení rešerše zavedených a moderních metod pro odhalování prostorového náboje.

## **Klíčová slova**

Dielektrikum, polarizace, prostorový náboj, nanokompozitní dielektrika, nanoplniva, metody odhalování prostorového náboje, změny elektrických vlastností.

## **ABSTRACT**

The translated Bachelor thesis elaborates on the study of behaviour of non-homogenous dielectrics in the outer electric field. Great attention is focused on the current problematic of nanocomposite dielectrics. Individual distribution of dielectric substances is stated in the thesis, along with basic standpoints on their polarization, description and consequences of individual mechanisms taking place while under impact of the outer electric field. The first aim of the thesis is to assess the effects of nanostructured dielectric materials on the distribution of the space charge, wherein other electrical characteristics of different nanocomposite dielectrics are evaluated, too. The second purpose of the thesis is to assemble a research of applied and modern methods of revealing the space charge.

## **Keywords**

Dielectric, polarization, space charge, nanocomposite dielectrics, nanofillers, space charge measurement methods, change of electrical properties.

## **Prohlášení**

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

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

.....

Podpis

V Plzni dne 07. 06. 2017

David Novák

## **Poděkování**

Tímto bych chtěl poděkovat panu Ing. Jaroslavu Hornakovi za odborné vedení a rovněž za praktické rady při zpracování této bakalářské práce.

# OBSAH

<b>OBSAH</b> .....	<b>8</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>10</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>12</b>
<b>1 CHARAKTERISTIKA A DĚLENÍ DIELEKTRIK</b> .....	<b>14</b>
1.1 KLASIFIKACE LÁTEK.....	14
1.2 DIELEKTRIKA A IZOLANTY.....	15
1.3 INTERAKCE ELEKTRICKÉHO POLE A DIELEKTRIK.....	16
1.3.1 Makroskopické hledisko .....	16
1.3.2 Mikroskopické hledisko .....	18
1.4 NEHOMOGENNÍ DIELEKTRIKA .....	19
<b>2 POLARIZAČNÍ MECHANISMY DIELEKTRIK</b> .....	<b>21</b>
2.1 DEFORMAČNÍ POLARIZACE .....	21
2.1.1 Elektronová polarizace.....	22
2.1.2 Iontová polarizace .....	22
2.1.3 Polarizace pružně vázaných dipólových momentů .....	23
2.2 RELAXAČNÍ POLARIZACE .....	23
2.2.1 Dipólová relaxační polarizace .....	23
2.2.2 Iontová relaxační polarizace.....	24
2.3 SPONTÁNNÍ POLARIZACE .....	24
<b>3 MIGRAČNÍ POLARIZACE A PROSTOROVÝ NÁBOJ</b> .....	<b>26</b>
3.1 MIGRAČNÍ POLARIZACE .....	26
3.2 Kladný a záporný prostorový náboj.....	28
3.3 Účinky prostorového náboje na dielektrický podsystem .....	28
<b>4 VLIV NANOPLNIV NA ELEKTRICKÉ VLASTNOSTI DIELEKTRIK.....</b>	<b>29</b>
4.1 ROZLOŽENÍ PROSTOROVÉHO NÁBOJE.....	29
4.2 RELATIVNÍ PERMITIVITA .....	32
4.3 ZTRÁTOVÝ ČINITEL.....	32
4.4 ELEKTRICKÁ PEVNOST .....	33
4.5 VNITŘNÍ REZISTIVITA .....	34



4.6	ODOLNOST PROTI ČÁSTEČNÝM VÝBOJŮM .....	35
<b>5</b>	<b>METODY MĚŘENÍ ROZLOŽENÍ PROSTOROVÉHO NÁBOJE .....</b>	<b>36</b>
5.1	SKUPINA AKUSTICKÝCH METOD.....	36
5.1.1	<i>Metoda elektroakustického pulzu PEA.....</i>	<i>36</i>
5.1.2	<i>Metoda šíření tlakové vlny PI-PWP .....</i>	<i>39</i>
5.1.3	<i>Metoda laserem indukovaného tlakového pulzu LIPP .....</i>	<i>40</i>
5.2	SKUPINA TEPELNÝCH METOD.....	41
5.2.1	<i>Metoda tepelného pulzu TPM.....</i>	<i>41</i>
5.2.2	<i>Metoda tepelného skoku TSM.....</i>	<i>42</i>
5.2.3	<i>Metoda modulace intenzity laserového záření L IMM.....</i>	<i>44</i>
5.3	OSTATNÍ METODY .....	45
5.3.1	<i>Elektrooptické mapování prostorového náboje.....</i>	<i>45</i>
5.3.2	<i>Fotokonduktivní metoda .....</i>	<i>46</i>
5.3.3	<i>Metoda neuspořádaného akustického pulzu.....</i>	<i>46</i>
5.3.4	<i>Metoda laserem generované akustické vlny .....</i>	<i>46</i>
5.3.5	<i>Metoda akustické sondy.....</i>	<i>46</i>
5.3.6	<i>Spektroskopická metoda.....</i>	<i>46</i>
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>47</b>
	<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ .....</b>	<b>49</b>

## ÚVOD

Nedílnou součástí každého elektrického systému je jeho izolační podsystem, u kterého jsou nejvyšší požadavky kladeny na vysokou spolehlivost. Aby bylo takové spolehlivosti dosaženo, je nutné držet krok se současným materiálovým výzkumem, který přináší stále nové inovace. Současné izolační systémy sestávají z více složek, převážně kompozitních materiálů se složitou vnitřní strukturou, jež obsahuje četná strukturální rozhraní a nehomogenity. Přes výborné funkční vlastnosti těchto materiálů se u nich vyskytují jevy, které mohou následně degradovat vlastnosti celého elektrického systému. Jedním z těchto jevů je fenomén akumulace prostorového náboje na vnitřních rozhraních dielektrických materiálů. Vlivem tohoto fenoménu je deformována intenzita elektrického pole uvnitř materiálu, což vede k jeho nerovnoměrnému namáhání a následnému urychlení stárnutí. Z tohoto důvodu jsou dvě snahy – vytvořit spolehlivou diagnostickou metodu pro jeho měření a dále vytvoření takového materiálu, jež bude zmíněný fenomén redukovat.

V úvodní části práce jsou obecně charakterizovány dielektrické látky, jejich dělení, včetně hledisek posuzování polarizačních jevů. Dále jsou charakterizována nehomogenní dielektrika a uvedeny jejich konkrétní příklady, jež mohou být perspektivní pro současné izolační systémy.

Následující část se zabývá konkrétními mechanismy, jež se v dielektrických materiálech mohou odehrávat. Pro tyto mechanismy byla uvedena charakteristika a podmínky jejich vzniku. Velká pozornost je věnována polarizaci nehomogenních dielektrik a fenoménu prostorového náboje, přičemž byly zhodnoceny i účinky na izolační systémy.

Stěžejní část práce má přiblížit účinky způsobené nanostrukturizací dielektrických materiálů. Záměrem bylo zhodnotit změny vlastností jako je - rozložení prostorového náboje, relativní permitivita, ztrátový činitel, elektrická pevnost, vnitřní rezistivita a odolnost vůči částečným výbojům.

V závěru práce jsou popsány metody odhalování prostorového náboje, přičemž největší důraz byl kladen na metody akustické a tepelné. Pro některé perspektivní metody byly navíc uvedeny i různé modifikace. V závěru kapitoly jsou uvedeny metody, jež jsou používány pouze okrajově.

Cílem práce bylo charakterizovat chování nehomogenních dielektrik ve vnějším elektrickém poli, charakterizovat prostorový náboj společně s jeho důsledky. Pro tento

fenomén rovněž sestavit podrobný přehled používaných metod pro jeho měření. Posledním záměrem bylo posouzení vlivu implementace nehomogenit (nanočástic) na různé elektrické vlastnosti dielektrik.

## SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symboly konstant		
Symbol	Základní jednotka	Význam
$C_0$	[F]	kapacita ideálního kondenzátoru
$C_x$	[F]	kapacita reálného kondenzátoru
$\vec{D}$	[C·m <sup>-2</sup> ]	vektor elektrická indukce
$\vec{d}$	[m]	orientovaná vzdálenost posunutí nábojů
$\vec{E}$	[V·m <sup>-1</sup> ]	vektor intenzity elektrického pole
$\vec{E}_L$	[V·m <sup>-1</sup> ]	intenzita lokálního pole
$E_p$	[V·m <sup>-1</sup> ]	elektrická pevnost
$\Delta\vec{M}$	[C·m]	dipólový moment objemového elementu
$\vec{n}$	[m <sup>-3</sup> ]	počet indukovaných dipólových momentů
$\vec{P}$	[C·m <sup>-2</sup> ]	vektor polarizace
$q$	[C]	velikost náboje
$T_g$	[°C]	teplota skelného přechodu
$\text{tg } \delta$	[-]	ztrátový činitel
$\Delta\vec{V}$	[m <sup>3</sup> ]	objemový element látky
$\alpha$	[F·m <sup>2</sup> ]	polarizovatelnost
$\gamma$	[S·m <sup>-1</sup> ]	konduktivita
$\epsilon$	[F·m <sup>-1</sup> ]	permitivita
$\epsilon_0$	[F·m <sup>-1</sup> ]	permitivita vakua
$\epsilon_r$	[-]	relativní permitivita
$\kappa$	[-]	dielektrická susceptibilita
$\vec{\mu}$	[C·m <sup>-2</sup> ]	indukovaný dipólový moment částice
$\rho_v$	[Ω·m]	vnitřní rezistivita
$\tau$	[s]	relaxační doba

### Chemické názvosloví

Zkratka	Význam
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	oxid hlinitý
epoxid	epoxidové pryskyřice
EVA	etylenvinylacetát

LDPE	nízko-hustotní polyethylén
LiNbO <sub>3</sub>	niobičnan lithný
PA	polyamid
PE	polyethylén
PEN	polyethylénnaftalát
PET	polyethyléntereftalát
PVDF	polyvinylidenfluorid
PP	polypropylén
SiO <sub>2</sub>	oxid křemičitý
TiO <sub>2</sub>	oxid titaničitý
XLPE	sít'ovaný polyetylén
ZnO	oxid zinečnatý

<b>Anglické zkratky</b>
-------------------------

<b>Zkratka</b>	<b>Původní znění</b>	<b>Český význam</b>
PEA	Pulse Electro Acoustic Method	Pulzní elektroakustická metoda
PWP	Pulse Wave Propagation Method	Metoda šíření tlakové vlny
PI-PWP	Piezoelectric Induced Pressure Wave Propagation method	Metoda šíření piezoelektricky indukované tlakové vlny
LIPP	Laser Induced Pressure Pulse Method	Metoda šíření laserem indukovaného pulzu
TPM	Thermal Pulse Method	Metoda tepelného pulzu
TSM	Thermal Step Method	Metoda tepelného skoku
LIMM	Laser Intensity Modulation Method	Metoda modulace intenzity laserového záření
FLIMM	Focused LIMM	Ohnisková LIMM

# 1 CHARAKTERISTIKA A DĚLENÍ DIELEKTRIK

## 1.1 Klasifikace látek

Látky klasifikujeme z hlediska jejich struktury, druhu vazeb, jimiž jsou tvořeny a v neposlední řadě dle jejich skupenství. Další podstatnou klasifikací jsou vlastnosti nosičů elektrických nábojů (iont, elektron), které jsou nosiče elementárního náboje  $q$  [C]. Tyto nosiče mohou být volné nebo vázané, což následně udává charakter dané látky. Volné nosiče se mohou materiálem volně pohybovat a během působení elektrického pole se podílejí na elektrické vodivosti. U vázaných nosičů dohází během působení vnějšího elektrického pole k určité změně pozic vůči jejich rovnovážným polohám. Tyto nosiče se dále nepodílejí na elektrické vodivosti. [1, 2] Různá koncentrace volných nosičů v elektrickém poli vykazuje různou konduktivitu  $\gamma$  [ $S \cdot m^{-1}$ ], podle které lze látky dělit na:

- Vodiče  $\gamma > 10^5$  [ $S \cdot m^{-1}$ ],
- Polovodiče  $10^{-8} < \gamma < 10^5$  [ $S \cdot m^{-1}$ ],
- Izolanty  $\gamma > 10^{-9}$  [ $S \cdot m^{-1}$ ]. [1, 3]

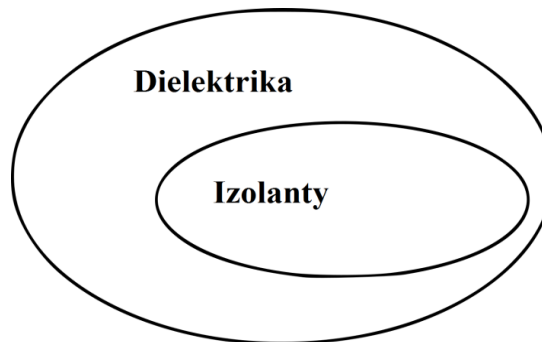
Je patrné, že reálný izolant obsahuje určité množství volných nosičů náboje, tudíž je nutné předpokládat jistou elektrickou vodivost. Rozdělení látek podle zmíněného vzniku a skupenství je analogicky rozděleno v *Tabulce 1*, kde jsou všechny tučně označené látky izolanty, respektive dielektrika. [1]

*Tabulka 1: Rozdělení látek podle vzniku a skupenství (převzato z [1])*

Reagující prvky	Skupenství		
	tuhé	kapalné	plynné
nekov - nekov	<b>vazba kovalentní izolant polovodič</b>	<b>vazba kovalentní izolant</b>	<b>vazba kovalentní izolant</b>
nekov - kov	<b>vazba iontová izolant polovodič</b>	vazba iontová vodič II. tř.	<b>vazba iontová izolant</b>
kov - kov	vazba kovová vodič I. tř.	vazba kovová vodič I. a II. tř.	<b>žádná vazba jednotlivé molekuly izolant</b>

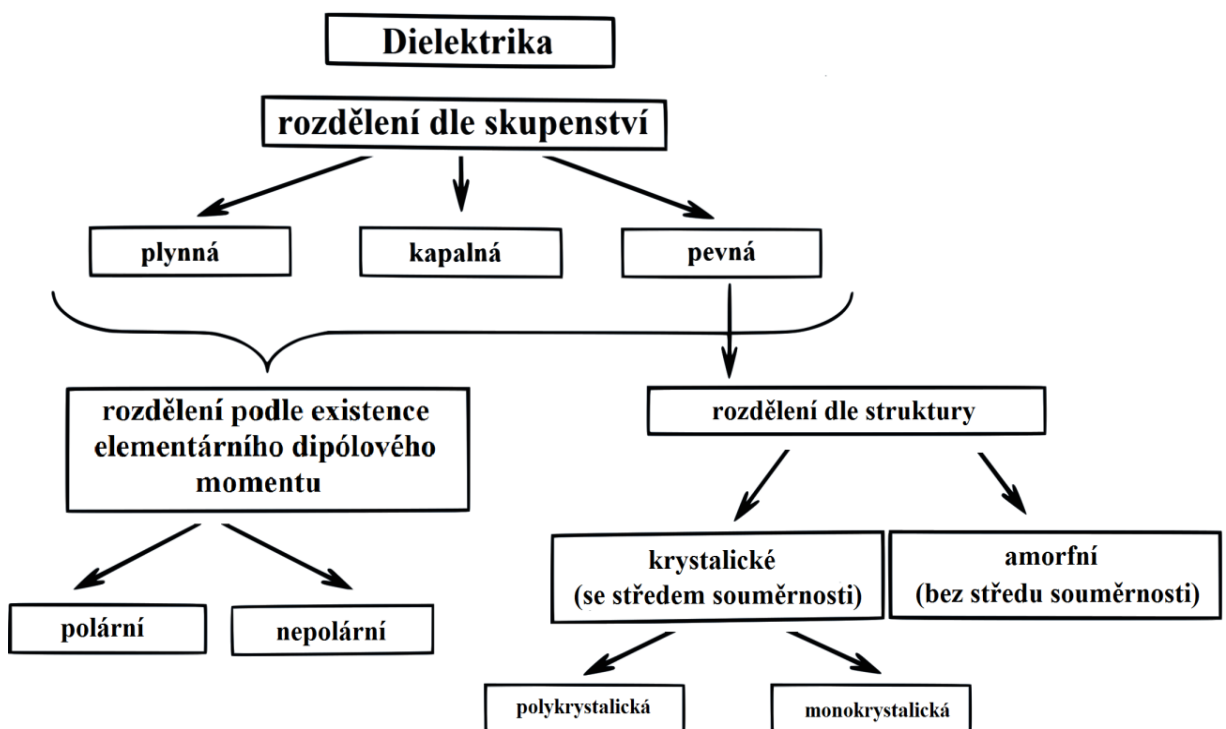
## 1.2 Dielektrika a izolanty

Dielektrikum lze označit za obecnější pojem než izolant. Každý izolant je dielektrikum, nikoliv obráceně, viz *Obr. 1*. Za izolant lze označit materiál používaný k vzájemnému odizolování dvou míst, neboli zamezení průchodu proudu dvou elektrických prvků o různém potenciálu. Dielektrikum je látka, která má navíc schopnost polarizace ve vnějším elektrickém poli, tedy schopnost tvorby vlastního vnitřního elektrického pole. [1–3]



Obrázek 1: Dielektrika – izolanty (převzato z: [1])

Dielektrika dále dělíme dle skupenství, struktury a uspořádání, viz *Obr. 2*. Pevné dielektrika lze navíc dělit podle vnitřní stavby, což má své opodstatnění zejména při posuzování speciálních dielektrik. [1]

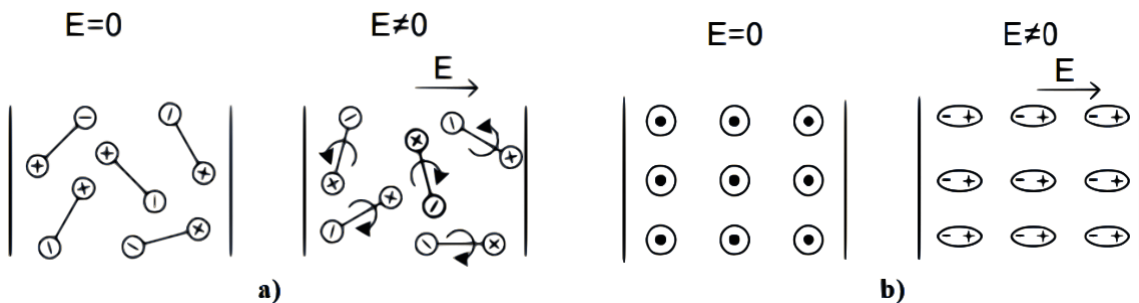


Obrázek 2: Klasifikace dielektrik (převzato z [1])

Dielektrika můžeme dále posuzovat dle jejich polárnosti na polární a nepolární, přičemž tato vlastnost závisí na jejich vnitřní struktuře. [1, 4]

**Polárním dielektrikem** (Obr. 3a) rozumíme látku, jejíž molekuly mají náboje rozloženy tak, že látka celkově vykazuje vlastnosti elektrického dipólu. Tyto látky mají navíc vlastní permanentní elektrický dipólový moment i bez působení vnějšího elektrického pole. [1, 4]

**Nepolárním dielektrikem** (Obr. 3b) rozumíme látku, jejíž molekuly nemají vlastní elektrické dipólové momenty. Síly vnějšího pole způsobují prostorové přerozdělení kladného a záporného náboje tak, že atomy nebo molekuly získávají ve vnějším poli elektrický dipólový moment. [1, 4, 5]



Obrázek 3: Chování dielektrik ve vnějším elektrickém poli - a) polární látky  
b) nepolární látky [5]

### 1.3 Interakce elektrického pole a dielektrik

Po vložení dielektrika do elektrického pole se v něm začínají odehrávat děje, které nazýváme polarizační jevy. Na tyto jevy lze nahlížet z makroskopického hlediska nebo z mikroskopického hlediska. [1]

#### 1.3.1 Makroskopické hledisko

Z tohoto hlediska přistupujeme k dielektriku jako k objektu daných rozměrů a hodnotíme pouze vnější projevy polarizačních jevů. Výsledkem polarizace je vznik elektrického vázaného náboje na povrchu dielektrika. Z tohoto důvodu je zaveden vektor polarizace  $\vec{P}$  [ $\text{C}\cdot\text{m}^{-2}$ ], který charakterizuje polarizované dielektrikum. Tento vektor definuje rovnice (1), kde  $\Delta\vec{M}$  [ $\text{C}\cdot\text{m}$ ] je dipólový moment objemového elementu a  $\Delta V$  [ $\text{m}^3$ ] je objemový element látky. [1–3, 6, 7]

$$\vec{P} = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta\vec{M}}{\Delta V} \quad (1)$$



Mezi intenzitou elektrického pole  $\vec{E}$  [ $\text{V}\cdot\text{m}^{-1}$ ] ovlivňující dielektrikum a vektorem polarizace platí vztah (2), kde  $\kappa$  [-] je dielektrická susceptibilita (koeficient polarizace) a  $\epsilon_0$  je permitivita vakua ( $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F}\cdot\text{m}^{-1}$ ). [1, 5]

$$\vec{P} = \kappa \cdot \epsilon_0 \cdot \vec{E} = (1 - \epsilon_r) \cdot \epsilon_0 \cdot \vec{E} \quad (2)$$

Vektor elektrické indukce je popsán vztahy (3) a (4).

$$\vec{D} = \epsilon_0 \cdot \vec{E} + \vec{P} \quad (3)$$

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

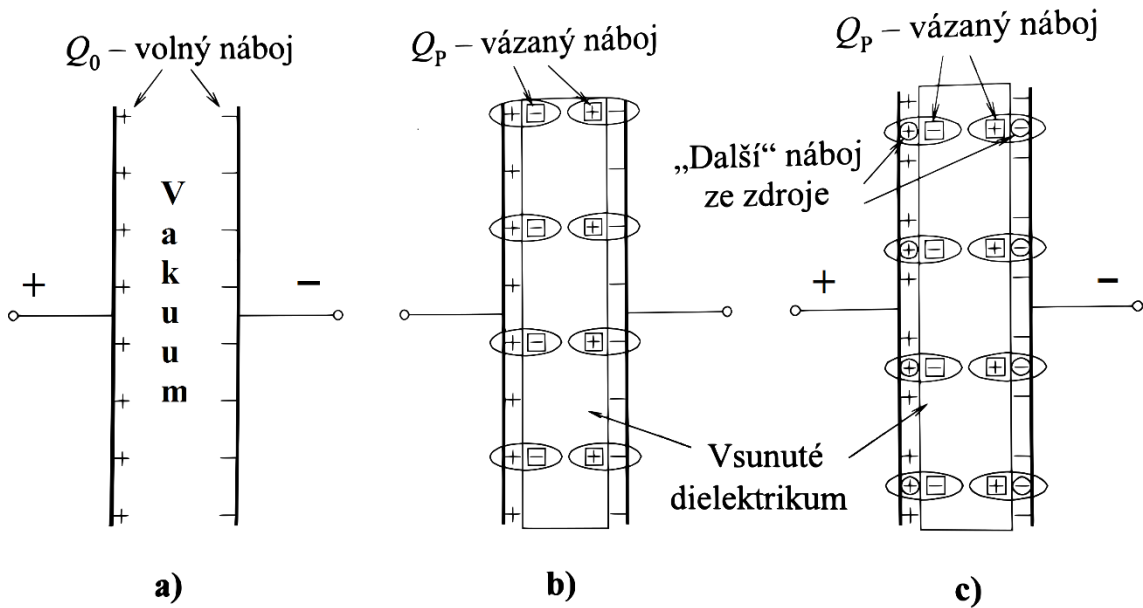
Po dosazení (2), (4) do (3) a následné matematické úpravě dostáváme vztah (5) pro relativní permitivitu  $\epsilon_r$ . Pro makroskopické posuzování dielektrika je relativní permitivita nejdůležitější veličinou, jejíž pomocí lze hodnotit míru polarizace. Relativní permitivita je definována poměrem kapacity reálného kondenzátoru  $C_x$  a kapacitou kondenzátoru s vakuem mezi elektrodami  $C_0$ .

$$\epsilon_r = 1 + \kappa \quad (5)$$

Makroskopický přístup zřetelněji demonstruje kondenzátor na *Obr. 4*. V prvním případě (*Obr. 4a*) je dielektrikum vakuum. Po připojení stejnosměrného napětí „přitečou“ na elektrody volné náboje. Velikost volného náboje je následně úměrný velikosti napětí zdroje a kapacitě kondenzátoru.

V druhém případě (*Obr. 4b*) je zdroj napětí odpojen a dále je vloženo mezi elektrody dielektrikum o relativní permitivitě  $\epsilon_r$ . Vlivem elektrického pole nabitého kondenzátoru dochází k polarizaci dielektrika. Tudíž dochází k vytvoření vázaného náboje, jehož následkem je pokles intenzity elektrického pole, neboť dochází k určité „neutralizaci“ volných nábojů na elektrodách.

Třetí případ (*Obr. 4c*) je stejný jako předchozí případ, jen je připojeno stejnosměrné napětí, díky kterému nenastává pokles intenzity elektrického pole, i přes vznik vázaných nábojů. Důvodem jest zdroj napětí, který vyrovnává úbytky vzniklé vznikem vázaných nábojů. [1, 7]



Obrázek 4: Dielektrikum ve vnějším elektrickém poli – a) nabitý kondenzátor před vsunutím dielektrika b) Kondenzátor se vsunutým dielektrikem c) Kondenzátor se vsunutým dielektrikem, navíc připojený ke zdroji napětí (převzato z [1])

### 1.3.2 Mikroskopické hledisko

U tohoto hlediska se posuzují příčiny dějů nastávající u makroskopického přístupu. Hodnotí se polarizační jevy odehrávající se na strukturální úrovni látky. Veličinu popisující polarizační jevy z tohoto hlediska nazýváme - polarizovatelnost  $\alpha$  [ $F \cdot m^2$ ], jež udává míru elektrizování. Polarizace se projevuje vznikem dipólových momentů, respektive orientací permanentních dipólových momentů. [1, 7]

Nové dipólové momenty v dielektriku vznikají vychýlením původně splývajících těžišť kladných a záporných nosičů náboje vůči jejich rovnovážným stavům. Tento jev je nejčastěji vyvoláván vnějším elektrickým polem a po jeho odeznění, indukované dipólové momenty zanikají. Pro velikost elementárního dipólového momentu platí vztah:

$$\vec{\mu} = \alpha \cdot \vec{E}_L = q \cdot \vec{d}, \quad (6)$$

kde  $\vec{\mu}$  je dipólový moment,  $\alpha$  [ $F \cdot m^2$ ] je polarizovatelnost,  $\vec{E}_L$  [ $V \cdot m^{-1}$ ] je intenzita lokálního pole respektující vzájemné interakce částic,  $q$  [C] je velikost náboje a  $\vec{d}$  [m] je orientovaná vzdálenost posunutí nábojů. [1, 7]

Při orientaci již existujících dipólových momentů mluvíme o dielektriku, jež obsahuje různou měrou pevně vázané dipólové momenty na základě svých chemických vazeb. Nejsou závislé na vnějším elektrickém poli, respektive se při jeho působení souhlasně orientují a částečně mění svou velikost. [1, 7]

Vektor polarizace lze vyjádřit pomocí polarizovatelnosti  $\alpha$  následovně:

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

kde  $n$  [ $\text{m}^{-3}$ ] je počet indukovaných dipólových momentů. [1, 7] Intenzita lokálního pole  $\vec{E}_L$  je odvozena z Lorenzova lokálního pole, které respektuje souvislost mezi makroskopickým a mikroskopickým přístupem, dle vztahu (8). [1]

$$\vec{E}_L = \frac{\epsilon_r + 2}{3} \cdot \vec{E} \quad (8)$$

## 1.4 Nehomogenní dielektrika

Nehomogenním dielektrikem rozumíme materiál, který sestává z dvou a více složek nebo fází o jiných chemických a fyzikálních vlastnostech [4]. Kvůli neustálému zvyšování nároků na materiálové vlastnosti se tyto materiály běžně používají. Výsledné vlastnosti materiálu jsou dány synergií jednotlivých složek [8, 9]. V těchto kompozitních materiálech mohou přes své vynikající vlastnosti vznikat nežádoucí jevy, které mohou negativním způsobem ovlivňovat funkčnost celého izolačního systému. Z tohoto důvodu se tyto materiály dále modifikují, aby byly tyto nežádoucí jevy potlačeny, eventuálně byly vylepšeny jejich stávající funkční vlastnosti v nejširším slova smyslu.

Nejběžnějším základem těchto materiálů bývá – polyethylén (PE) [10], polyamid (PA) [11, 12], polypropylén (PP), kopolymer EVA [13], epoxidové pryskyřice [8, 9, 14, 15], síťovaný polyetylén (XLPE) [16, 17], silikonová pryž [18] a další.

Současným trendem je použití nanočásticových plniv, jako jsou  $\text{SiO}_2$  [8–10, 17],  $\text{Al}_2\text{O}_3$  [14],  $\text{TiO}_2$  [14–16],  $\text{ZnO}$  [14], vrstevnaté silikáty<sup>1</sup>- (např. montmorillonit) [13] a dalších jiných částic.

Vhodnou kombinací těchto komponent, lze docílit úprav vlastností (mechanické, elektrické, tepelné) pro konkrétní praktické využití. Nejdůležitějšími sledovanými elektrickými vlastnostmi jsou - elektrická pevnost ( $E_p$ ), vnitřní rezistivita ( $\rho_v$ ), relativní permitivita ( $\epsilon_r$ ), ztrátový činitel ( $\text{tg } \delta$ ), změna rozložení prostorového náboje, odolnost proti částečným výbojům nebo polarizační indexy. [8, 9, 19]

---

<sup>1</sup> Vrstevnatý silikát – Skupina silikátových minerálů, mezi které patří například slída, jílové minerály nebo mastek.

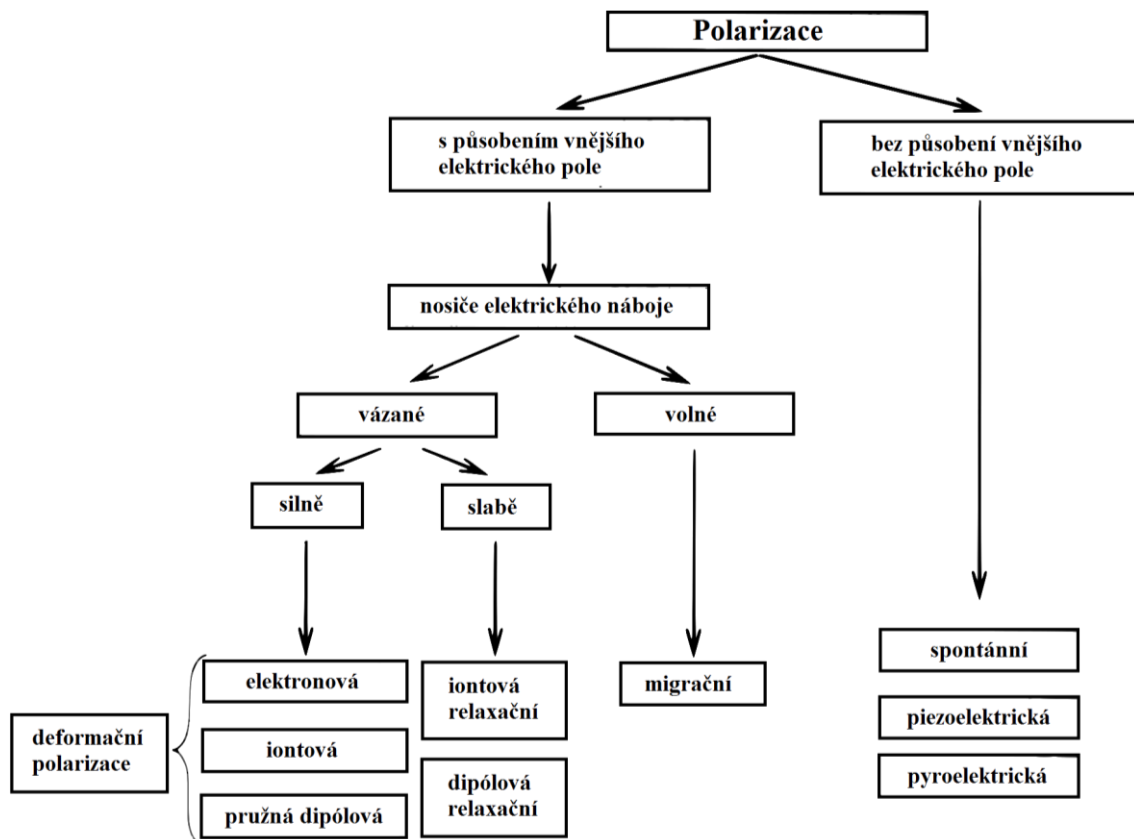
V *Tabulce 2.* se nachází přehled některých testovaných či používaných nanokompozitů, které jsou výběrem z různých pramenů literatury. Základ reprezentuje základní dielektrikum, plnivo reprezentuje složku, která je v určitém hmotnostním podílu v matici dispergována.

*Tabulka 2: Výběr testovaných nanokompozitů z různých pramenů literatury*

Základ	Plnivo	Velikost	Plnění (% hm.)	Literatura
LDPE	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		<10%	[10, 20, 21]
	TiO <sub>2</sub>		2%	
	SiO <sub>2</sub>	14nm	2%	
XLPE	SiO <sub>2</sub>	12nm	5%	[16, 17]
		23nm	5%	
PA	vrstevnatý silikát	1nm	2, 4, 6%	[12]
PP	vrstevnatý silikát		6%	[13, 22]
	organosilikát		2-4%	
EVA	vrstevnatý silikát		2-6%	[13, 22]
Epoxidové pryskyřice	TiO <sub>2</sub>	38nm	10%	[8, 9, 14, 15, 21, 23]
	SiO <sub>2</sub>	12nm	5%	
	vrstevnatý silikát		5%	
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		5%	
	SiO <sub>2</sub>	10nm	1%	
Silikonová pryž	SiO <sub>2</sub>	15nm	5-10%	[18]

## 2 POLARIZAČNÍ MECHANISMY DIELEKTRIK

Polarizace je děj, který v dielektriku nastává po jeho vložení do vnějšího elektrického pole, eventuálně bez jeho působení. Existuje řada mechanismů polarizací (Obr. 5), které se v dielektriku projevují na základě jejich vnitřní struktury a stavby. Lze říct, že v jednotlivých dielektrikách nastává polarizací více. Výsledný průběh polarizace je roven superpozicí jednotlivých polarizačních mechanismů. Tyto polarizační mechanismy jsou v následujících podkapitolách popsány. [1, 7]



Obrázek 5: Rozdělení polarizačních mechanismů (převzato z [1])

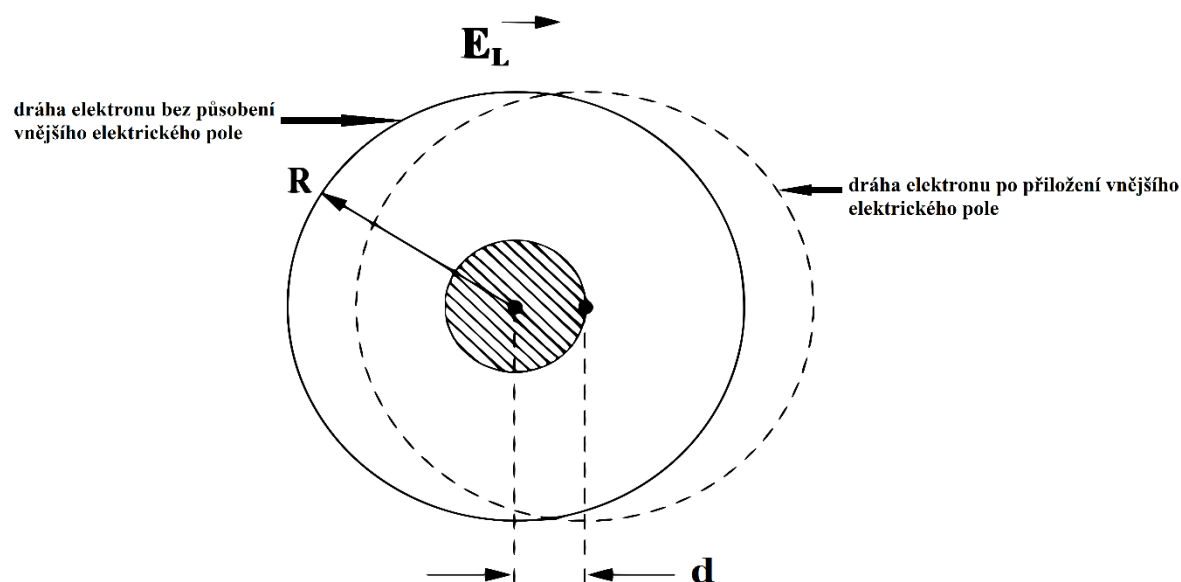
### 2.1 Deformační polarizace

První ze skupiny polarizací jsou deformační polarizace. Podle figurujícího nosiče elektrického náboje rozdělujeme polarizace - elektronové, iontové a polarizace pružně vázaných dipólových momentů. Po vložení daného dielektrika do vnějšího elektrického pole dochází k posuvu nosičů elektrického náboje na velmi malou vzdálenost. Jelikož dochází k posuvu velkého množství nosičů, výsledná relativní permitivita  $\epsilon_r$  se může významně změnit. Pevné vazby nosičů elektrického náboje jsou příčinou, že jsou tyto polarizace velmi rychlé. Stejně rychlé je i jejich navrácení do jejich výchozích stavů po

odeznění elektrického pole. Proto se lze v literatuře setkat s označením rychlé či pružné polarizace. [1, 6, 7, 24]

### 2.1.1 Elektronová polarizace

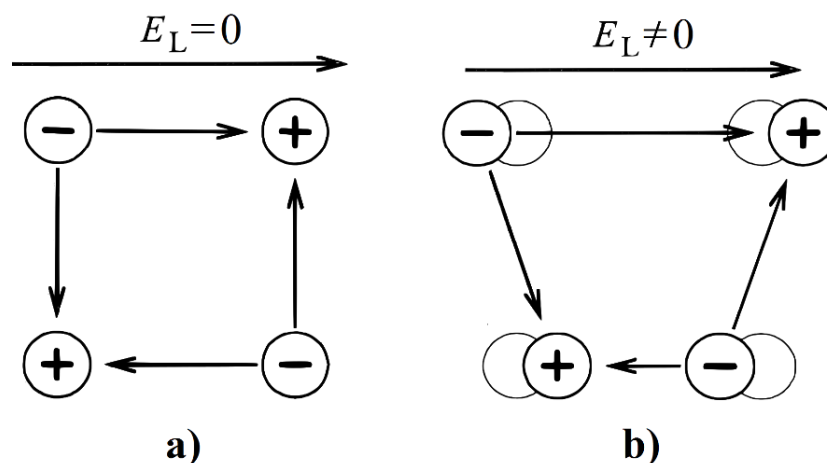
Tento druh polarizace vzniká vždy ve všech látkách jakéhokoli skupenství. Během působení vnějšího elektrického pole se projevuje vychýlením těžiště elektronového obalu, které bez působení elektrického pole splývá s těžištěm jádra atomu, viz *Obr. 6*. Tímto posunem získává atom indukovaný dipólový moment, jež je úměrný velikosti lokálního pole a polarizovatelnosti dané látky. Jelikož vzdálenost posuvu těžiště nepřesahuje velikost atomu, doba ustálení trvá velmi krátkou dobu ( $10^{-16}$ - $10^{-13}$ s). Tato polarizace není frekvenčně ani tepelně závislá. [1, 4, 25]



Obrázek 6: Schéma elektronové polarizace [4]

### 2.1.2 Iontová polarizace

Tato polarizace vzniká u látek, jako jsou například iontové krystaly. Oproti elektronové polarizaci, jsou zde přítomny dipólové momenty i bez působení vnějšího elektrického pole, viz *Obr. 7a*. Jelikož jsou ionty v uzlech krystalové mřížky silně vázány, při působení elektrického pole dochází k pružné změně jejich poloh. To má za následek změnu velikosti a směru dipólových momentů, viz *Obr. 7b*. Doba ustálení se pohybuje v rozmezí  $10^{-13}$ - $10^{-12}$ s. Rovněž se jedná o bezeztrátovou polarizaci nezávislou na teplotě, ani na technicky používaných kmitočtech. [1, 6, 7]



Obrázek 7: Schéma iontové polarizace - a) bez působení vnějšího elektrického pole b) během působení vnějšího elektrického pole [1]

### 2.1.3 Polarizace pružně vázaných dipólových momentů

Tento mechanismus je svým principem shodný s předchozím typem polarizace. Vzniká v pevných látkách, jejichž molekuly jsou vázány pružnými vazbami, jež jsou natolik silné, že dochází pouze k malým posuvům nosičů náboje. Tato polarizace je rovněž bezeztrátová a doba ustálení polarizačního procesu se pohybuje v podobném intervalu jako u iontové polarizace. [1]

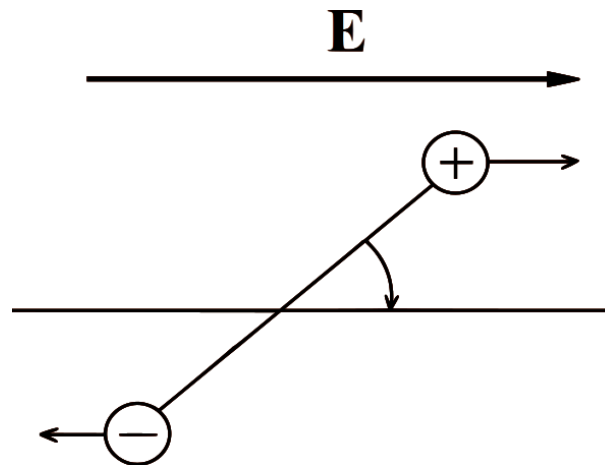
## 2.2 Relaxační polarizace

Dalším typem polarizačního mechanismu je skupina relaxačních polarizací. Tyto mechanismy se výrazně liší od předchozí skupiny deformačních polarizací. Patří sem dipólová relaxační polarizace a iontová relaxační polarizace.

### 2.2.1 Dipólová relaxační polarizace

V literatuře je často označována jako tepelná orientační [6] nebo také Debeyova polarizace [4]. Vyskytuje se u polárních látek s velmi slabými vazbami dipólových momentů. Bez přiloženého vnějšího pole je rozložení permanentních dipólových momentů zcela chaotické (náhodné) a látka se jeví elektricky neutrálně. Polarizace nastává během působení vnějšího elektrického pole, kdy dochází ke změnám výšky potenciálových bariér energetických hladin. Většina momentových dipólů následně zaujímá energeticky výhodnější polohu, jež odpovídá orientaci přiloženého elektrického pole, viz *Obr. 8*. Proti tomuto pohybu však působí tepelný pohyb částic, díky kterému je tato polarizace silně teplotně závislá a s rostoucí teplotou postupně slábne, jelikož roste

tepelný pohyb částic. Matematicky lze tento mechanismus popsat pomocí modelu dvojité potenciálové jámy, přičemž se uvažují dvě možné orientace dipólových momentů. [1, 6, 7]



Obrázek 8: Orientační dipólová polarizace (převzato z [24])

### 2.2.2 Iontová relaxační polarizace

Tato polarizace vzniká v látkách složených z iontů, které se vyznačují netěsnými vazbami spojující jednotlivé částice. To mohou být například anorganická skla, keramické látky s obsahem skloviny nebo anorganické krystalické látky. Bez působení elektrického pole se látka jeví elektricky neutrálně. To je dáno stejnou velikostí energetických hladin dvou rovnocenných poloh, mezi kterými se nosiče mohou přemisťovat tepelným pohybem se stejnou pravděpodobností. Během působení elektrického pole začne docházet ke změně energetických hladin jednotlivých poloh, což zvyšuje pravděpodobnost přechodu některých částic do jiné energeticky výhodnější polohy. Pravděpodobnost přechodu je dána Boltzmannovým rozdělením, jehož demonstraci lze najít v publikaci [1]. Tato polarizace je charakterizována relaxační dobou  $\tau$  [s], která udává rychlost procesu polarizace, respektive depolarizace. Dále lze říct, že je tato polarizace teplotně závislá a s rostoucí teplotou se polarizovatelnost snižuje. [1, 6]

### 2.3 Spontánní polarizace

V literatuře [1, 3, 24] je tento typ polarizací charakterizován samovolným vznikem polarizace i bez působení vnějšího elektrického pole.

Příkladem mohou být piezoelektrika, která se jsou schopna polarizovat vlivem mechanického namáhání. V důsledku namáhání se na povrchu dielektrika objevuje



vázaný náboj. Tento mechanismus je však podmíněn specifickým uzpůsobením vnitřní struktury, která pro jeho vznik nesmí obsahovat střed symetrie. [1]

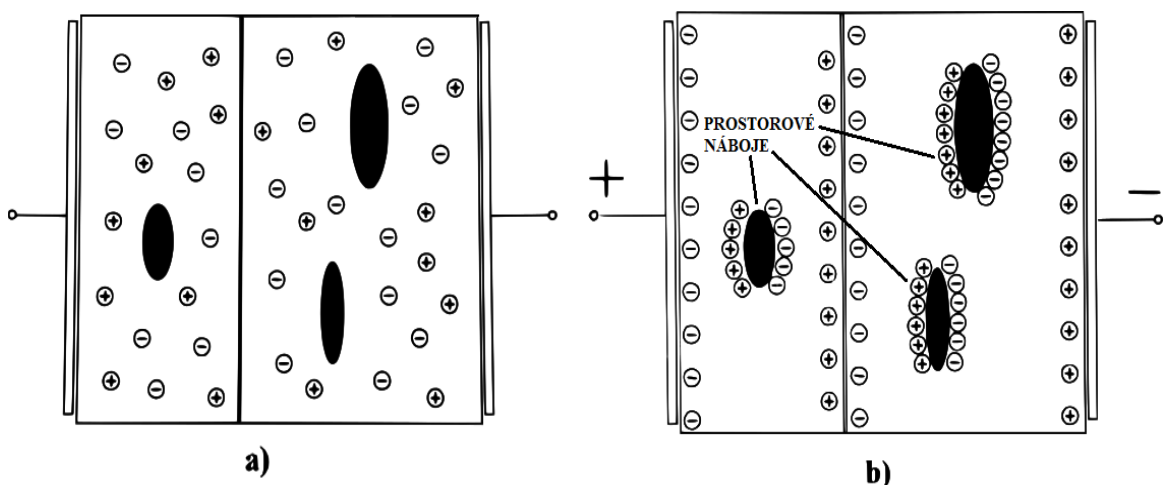
Spontánní polarizace se dále vyskytuje například u pyroelektrik, u kterých je rovněž zapříčiněna atypickou vnitřní strukturou. Tato spontánní polarizace je kompenzována povrchovým nábojem, jehož hustota závisí na teplotě. U lineárních pyroelektrik je možné ovlivnit velikost polarizace zvyšováním teploty. Důležitějšími jsou však nelineární pyroelektrika (feroelektrika). Tyto látky vykazují doménovou strukturu, z nichž je každá doména spontánně zpolarizována a vzájemně kompenzována. Přiložením elektrického pole dochází k zorientování všech domén, což má za důsledek výrazné zesílení elektrického pole. [24]

### 3 MIGRAČNÍ POLARIZACE A PROSTOROVÝ NÁBOJ

V rámci zaměření práce se dostáváme k nejpodstatnějšímu mechanismu - migrační polarizaci. V literatuře se lze setkat také s označením - polarizace prostorovým nábojem či mezivrstevová polarizace. Z historického hlediska byla tako polarizace brána jako okrajová záležitost, ale dnes je jí věnován velký zájem, jelikož formovaný prostorový náboj má nezpochybnitelný vliv na chování izolačních systémů. V této kapitole jsou popsány základní principy a důsledky této polarizace. [1, 7]

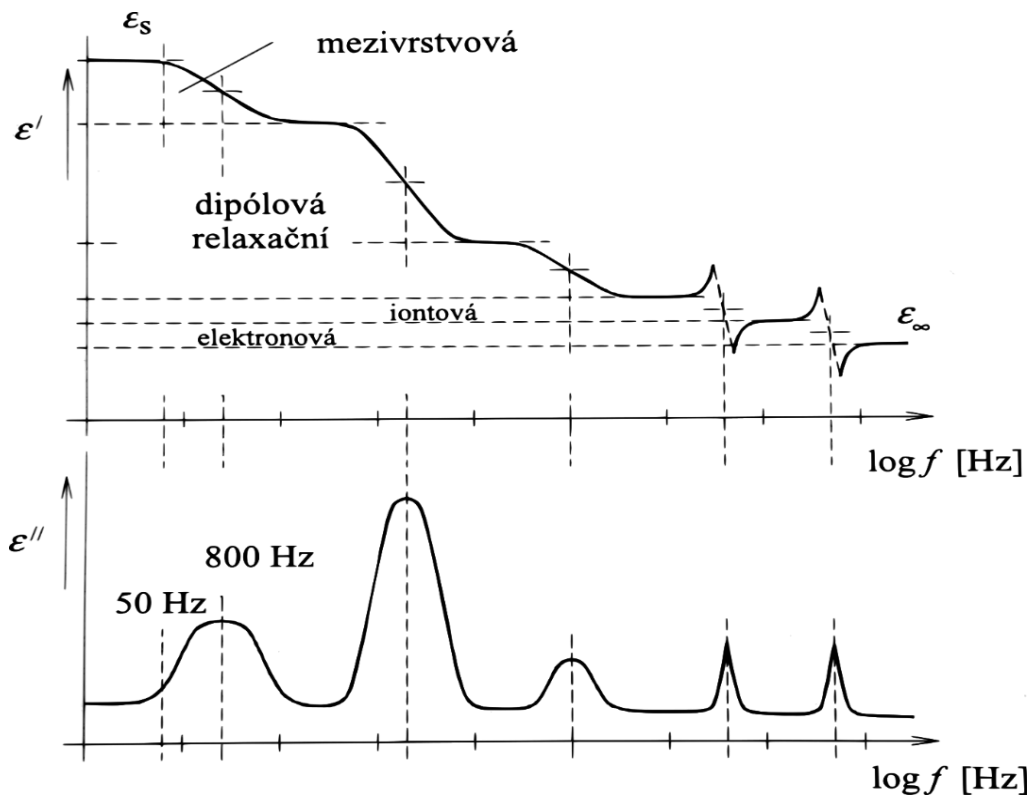
#### 3.1 Migrační polarizace

Tato polarizace se oproti předchozím mechanismům liší tím, že se polarizačního mechanismu účastní volné nosiče náboje. Vyskytuje se v dielektrikách obsahující nehomogenity, jako jsou - prasklinky, vzduchové bublinky, plniva či jiné další příměsi. Mimo těchto strukturních defektů a přidaných aditiv, může vznikat u kompozitních dielektrik sestávajících z dvou a více materiálů o různé vodivosti a permitivitě. Po vložení nehomogenního dielektrika do vnějšího elektrického pole jsou volné nosiče náboje přitahovány k příslušným elektrodám dle polarity. Část nosičů se však zachytává na rozhraní nehomogenit, díky čemu vzniká prostorový náboj, viz *Obr. 9*. To má za následek změnu prostorové hustoty elektrického náboje a dielektrikum se navenek chová jako zpolarizované. [1] Volné elektrony nebo ionty migrují dielektrikem na poměrně velké vzdálenosti - v rozmezí  $10^{-2} - 10^2 \mu\text{m}$ . Doba ustálení je rovněž ze všech předchozích mechanismů nejdelší a pohybuje se v intervalu  $10^{-5} - 10^4 \text{s}$ , v závislosti na vnitřní struktuře dielektrika a působící teplotě. [7]



Obrázek 9: Vznik prostorového náboje - a) bez přiloženého napětí  
b) s přiloženým napětím [1]

S rostoucí frekvencí tato polarizace postupně klesá a začínají převládat ostatní dříve uvedené mechanismy polarizací. Tato skutečnost je demonstrována na průběhu reálné a imaginární permitivity (Obr. 10), kde je znázorněn přínos jednotlivých polarizací ke komplexní permitivitě dielektrika. Je patrné, že migrační polarizace má své opodstatnění pouze v oboru nízkých kmitočtů. [1]



Obrázek 10: Dispersní průběh komplexní permitivity u dielektrika (převzato z [1])

Jak již bylo uvedeno, pro vznik migrační polarizace je nutná přítomnost volných nosičů náboje. Ty jsou do dielektrika nejčastěji dodávány vstřikováním z přiléhajících elektrod, nejčastěji na základě Schottkyho jevu. [1, 4] Jedná se o vstřikování elektronů z katody, respektive extrakci děr na anodě. Není přesně objasněno, co rozhoduje o tom, jaký typ nosiče se bude v materiálu podílet na tvorbě prostorového náboje. U některých materiálů (např. PE, PEN) jsou dominantní elektrony, u jiných (např. kopolymer EVA, PET) jsou dominantní díry. Dalším zdrojem volných nosičů náboje je vlastní vstřikování nosičů vlivem tepelné emise nebo vlivem částečných výbojů ve strukturálních defektech dielektrika. [1]

Matematický popis této polarizace je velmi složitá disciplína. K dnešnímu dni neexistuje matematický model, který respektuje všechny vlastnosti nehomogenního dielektrika. Nejznámějším se stal Maxwellův-Wagnerův model, který pracuje

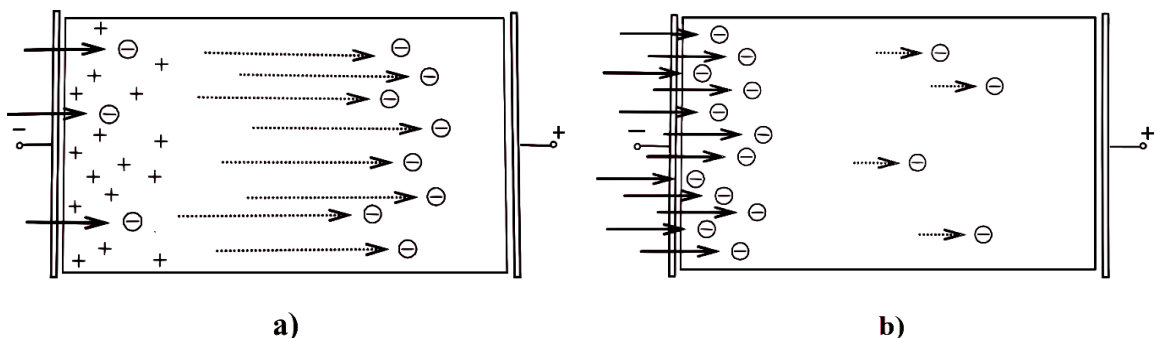
s dvojrvtvým rovinným kondenzátorem. Bohužel je tento model pouze makroskopickým modelem, jež nerespektuje mikroskopické procesy, odehrávající se na rozhraních dielektrika. Konkrétní demonstraci, tohoto modelu lze najít v publikaci [1].

### 3.2 Kladný a záporný prostorový náboj

Na základě vstřikování nosičů do dielektrika se mohou formovat dva typy prostorových nábojů. Jsou to kladné nebo záporné prostorové náboje.

První typ prostorového náboje vzniká vlivem rychlejšího pohybu elektronů dielektrikem, než je katoda schopna emitovat. Takto vzniká v blízkosti katody přebytek kladného náboje, jež nazýváme **hetero-náboj** (Obr. 10a). Ten má za následek nárůst elektrického pole v oblasti katody. [1]

Druhý typ vzniká při vyšším emitování elektronů z katody, než je schopnost dielektrika tyto částice absorbovat. V blízkosti katody vzniká přebytek elektronů, jež nazýváme **homo-náboj** (Obr. 10b). Tento náboj má za následek pokles intenzity elektrického pole v oblasti katody. [1]



Obrázek 11: Typy prostorových nábojů u katody - a) hetero-náboj b) homo-náboj [1]

### 3.3 Účinky prostorového náboje na dielektrický podsystém

Zásadním účinkem akumulace prostorového náboje v dielektrických materiálech je jeho vliv na průběh intenzity elektrického pole v tloušťce dielektrika. Intenzita elektrického pole je pod působením prostorového náboje zkreslována, což následně ovlivňuje vodivostní jevy a může být ohrožena i elektrická pevnost  $E_p$  [V/m]. Prostorový náboj zkresluje průměrné elektrické pole v dielektriku do takové míry, že může dojít k elektrickému průrazu, i když bude poměr napětí k tloušťce nižší než samotná elektrická pevnost dielektrika. K průrazu pak může docházet v blízkosti elektrody na rozdíl od místa s největší hodnotou intenzity. Na tomto základě, lze označit fenomén akumulace prostorového náboje za nežádoucí jev, který snižuje životnost dielektrik a tudíž celého izolačního systému. [1]

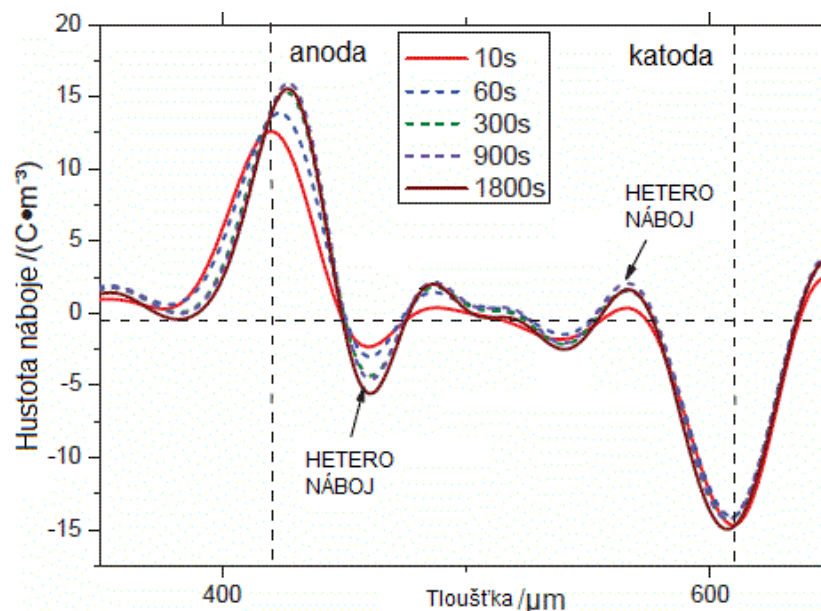
## 4 VLIV NANOSTRUKTURIZACE NA ELEKTRICKÉ VLASTNOSTI DIELEKTRIK

V podkapitole 1.4 byly uvedeny nanokompozitní materiály, které jsou v současné době používány nebo testovány. Jak bylo zmíněno, tyto materiály jsou vyráběny pro svůj pozitivní vliv na funkční vlastnosti, které jsou dány spolupůsobením jednotlivých složek materiálu. V této kapitole jsou popsány konkrétní změny elektrických vlastností vlivem disperze nanočástic v porovnání s neplněnými materiály nebo materiály plněnými běžně používanými mikročásticemi.

### 4.1 Rozložení prostorového náboje

Z literatury [12, 16–19, 22] vyplývá, že použití nanočástic jako plniva má jednoznačný vliv na rozložení prostorových nábojů v dielektriku.

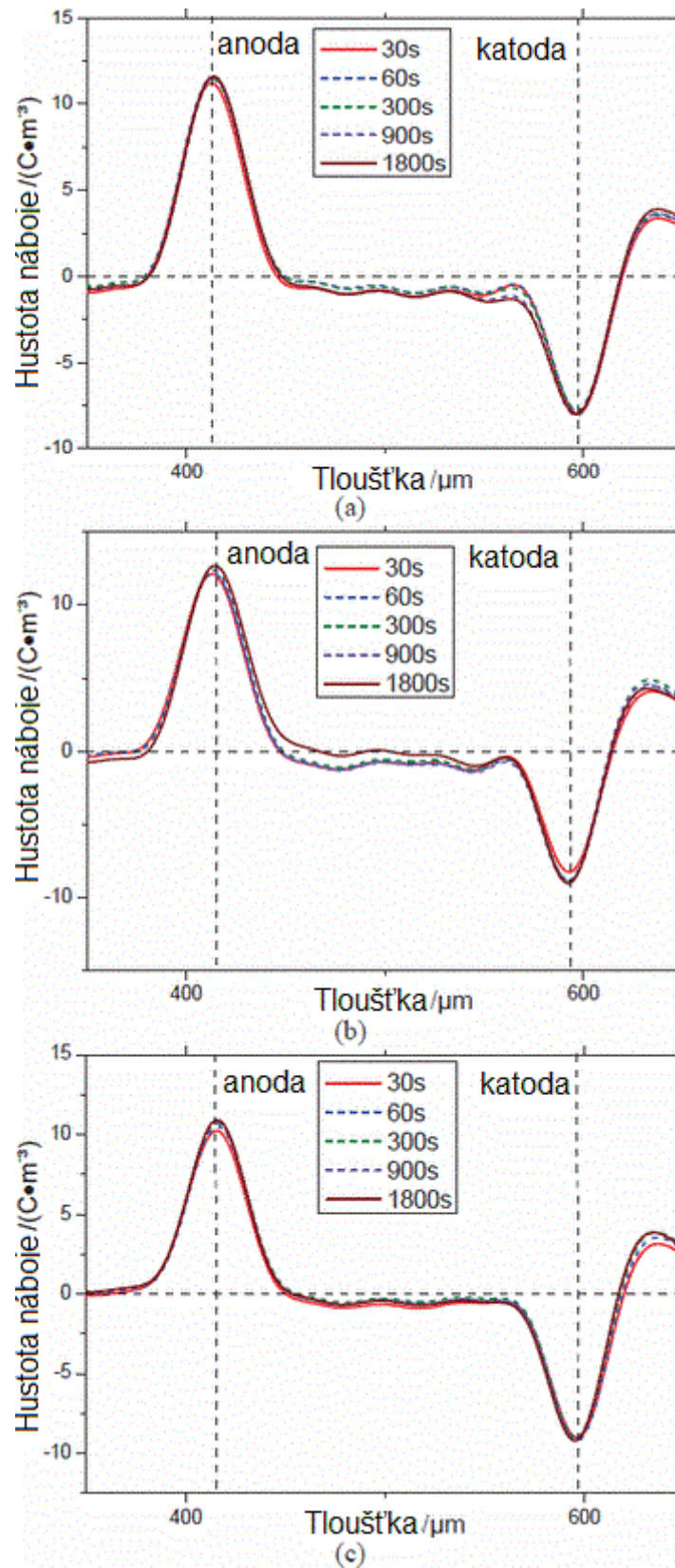
Z nedávné Wangovi studie [16] vyplývá, že čistý polymer XLPE vykazuje při působení stejnosměrného elektrického pole (30kV/mm) akumulaci velkého množství hetero-náboje v blízkosti anody a katody. Tyto prostorové náboje se navíc s časem stávaly mohutnějšími, jak demonstruje *Obr. 12*.



Obrázek 12: Rozložení prostorového náboje v čistém XLPE v různých časech [16]

Wang a kolektiv použili nanočástice  $\text{TiO}_2$  v různých hmotnostních podílech (1-5% hm.), které byly dispergovány v matrici polymeru XLPE. Následná měření nového

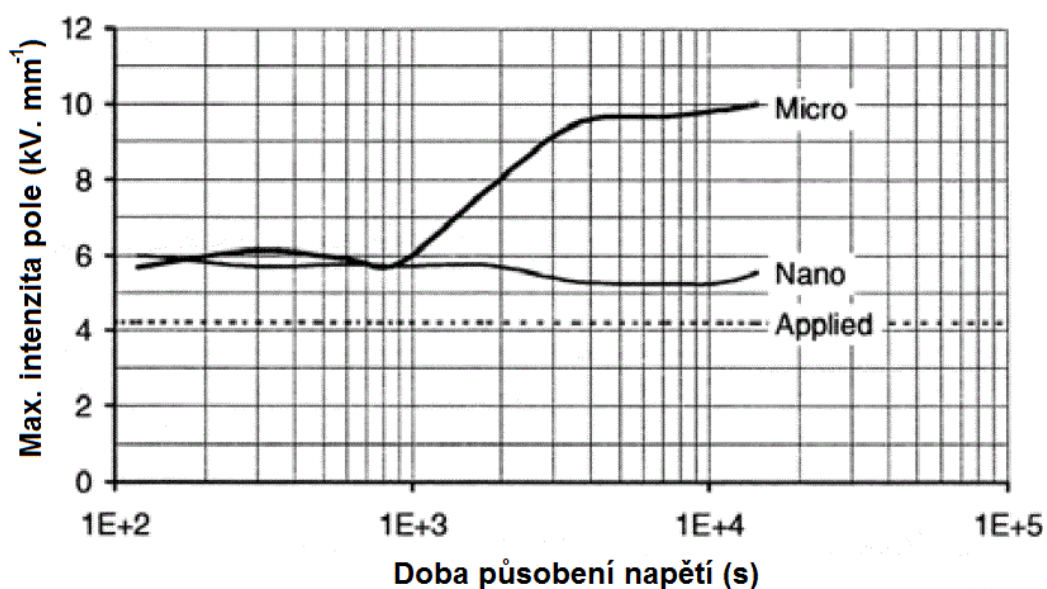
nanokompozitu prokázala, že hetero-náboje byly významně redukovány, jak demonstruje Obr. 13. [16]



Obrázek 13: Rozložení prostorového náboje v materiálu XLPE/TiO<sub>2</sub> s různým podílem plnění v různých časech - a) 1% hm., b) 3% hm., c) 5% hm. [16]

Další rozsáhlá studie, ve které je shrnuto působení nanočástic na rozložení prostorového náboje byla publikována Takadou a kol. [22]. Z publikace vyplývá, že prostorový náboj byl redukován i v jiných nanokompozitech jako je - epoxid/TiO<sub>2</sub>, epoxid/ZnO, PP/vrstevnatý silikát, EVA/vrstevnatý silikát nebo LDPE/TiO<sub>2</sub>.

V jiné publikaci [14] byly porovnány průběhy intenzit prostorových nábojů epoxidové pryskyřice plněné mikro- a nano- částicemi TiO<sub>2</sub>. U obou materiálů došlo ke zkreslení průběhu intenzity elektrického pole. Nicméně, při použití plniva o mikrometrických rozměrech bylo zkreslení elektrického pole vlivem prostorového náboje téměř dvojnásobné oproti materiálu plněného nanočásticemi, viz *Obr. 14*.



*Obrázek 14: Porovnání intenzit el. pole v čase testované epoxidové pryskyřice plněné mikro- a nano- částicemi TiO<sub>2</sub> [14]*

Dle závěru publikace [14] lze říct, že nezávisí tolik na druhu použitého plniva, nýbrž na jeho velikosti a povrchové úpravě. Tuto skutečnost podložila velká podobnost redukce prostorového náboje, která byla zjištěna při použití rozdílných nanoplňiv - TiO<sub>2</sub> a ZnO uvedené ve stejné publikaci.

Nutno doplnit, že existují i některé anomálie. U testovaného nanokompozitu epoxid/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> došlo k nárůstu hetero-náboje v blízkosti katody i anody. Naopak u materiálu dotovaným mikročásticemi stejného oxidu, došlo k redukcí prostorového náboje a následně byl odhalen pouze slabý homo-náboj v blízkosti katody. [14]

Obecně však lze říct, že nanostrukturizace má pozitivní vliv na redukování prostorových nábojů v nehomogenním dielektriku.



## 4.2 Relativní permitivita

Na základě publikací [14, 20, 22, 26] lze říct, že anorganická nanoplňiva mají tendenci relativní permitivitu snižovat za předpokladu rovnoměrného začlenění nanočástic do základního materiálu. Tento jev je zřejmě důsledek snížení pohyblivosti polymerových řetězců. Relativní permitivita nanokompozitu je následně v mnoha případech nižší než permitivity samotných komponentů. Samozřejmě je možné pozorovat i zvýšení hodnot permitivity v důsledku náhodných technologických nedokonalostí, jako jsou nerovnoměrné rozptyly, hromadění nanoplňiv v matici, neúmyslně přimíchání nečistot během výrobních procesů a dalších. [22, 26]

V *Tabulce 3* jsou srovnány hodnoty permitivit základní pryskyřice s několika druhy nano- a mikro- kompozitů za určitých měřicích podmínek.

*Tabulka 3: Vliv nano- a mikro- plniv na hodnotu permitivity [22]*

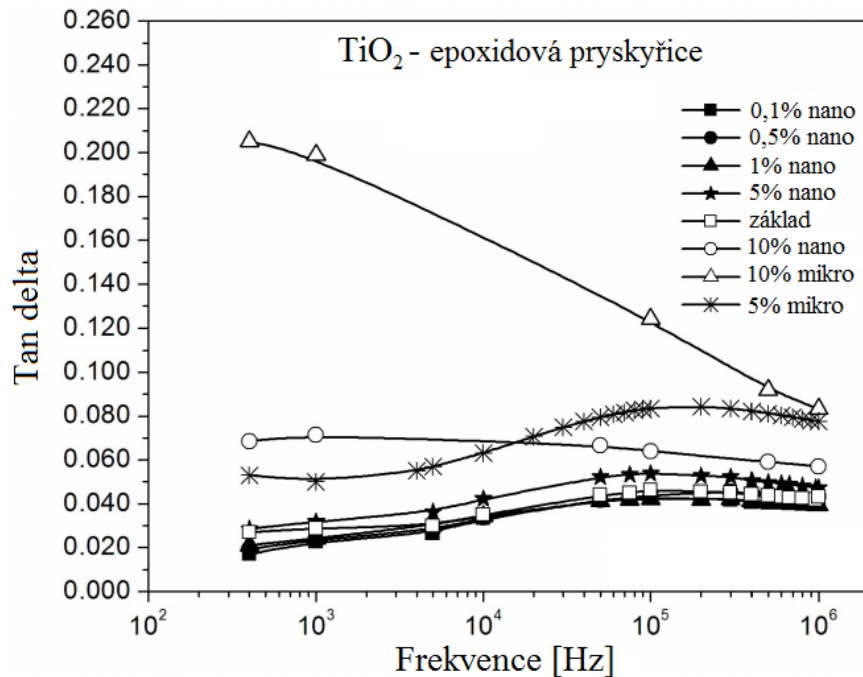
	Epoxid - Silikát		Epoxid - TiO <sub>2</sub>	Epoxid - TiO <sub>2</sub>	PA - Silikát
	20°C 60 Hz	100°C	23°C 1kHz	200°C >1 kHz	20°C 50Hz
Základní pryskyřice	4,1	6,1	5,68	>8,49	4,36
Nano	3,7	3,8	4,5	8,49	4,07
Mikro	-----		6,01	>základ	-----

## 4.3 Ztrátový činitel

Z publikací [14, 22, 23] vyplývá, že ztrátový činitel  $\tan \delta$  je vlivem nanostruktury rovněž ovlivňován, nicméně vykazuje různé hodnoty v různých podmínkách. Ukázalo se, že  $\tan \delta$  je nižší v epoxidových nanokompozitech plněné modifikovaným vrstevnatým silikátem oproti čisté pryskyřici. Nejvýraznější snížení bylo zjištěno při vysokých teplotách (nad 140 °C), zřejmě v důsledku navýšení teploty skelného přechodu  $T_g$  [23]. Další snížení  $\tan \delta$  bylo zjištěno u nanokompozitu epoxid/TiO<sub>2</sub>, zejména v porovnání s mikrokompozitem, viz *Obr. 15* [27]. Nanokompozit epoxid/SiO<sub>2</sub> vykazuje nižší hodnoty  $\tan \delta$  než základní pryskyřice při síťové frekvenci a naopak nárůst při vyšších frekvencích okolo 100 kHz [22]. Při nízkých frekvencích a slabých polích je ztrátový činitel citlivý na působení iontových nečistot a polárních radikálů s dipólovými momenty. Podle [26] je snížení ztrátového činitele důležité z praktického hlediska, jelikož může být



použito jako způsob snížení jalového proudu, který má své opodstatnění zejména u kabelových izolací.



Obrázek 15: Hodnoty  $\tan \delta$  v různých epoxid/ $\text{TiO}_2$  kompozitech při různých kmitočtech [27]

#### 4.4 Elektrická pevnost

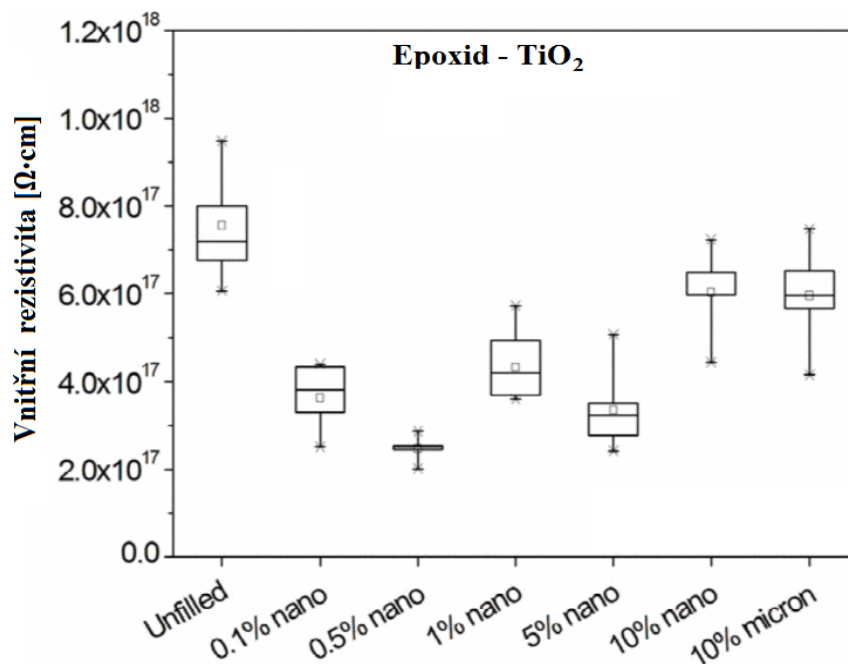
Dielektrická pevnost je jedním z nejdůležitějších parametrů pro hodnocení izolačních materiálů. Z tohoto důvodu je snaha vyvinout nanokompozit, jehož elektrická pevnost bude mít, co nejvyšší hodnotu při zachování ostatních funkčních vlastností. Účinky nanostrukturizace na hodnotu elektrické pevnosti se zabývají například studie [9, 10, 13, 17, 21].

U nanokompozitu epoxid/ $\text{TiO}_2$  byla zaznamenána konstantní hodnota  $E_p$  do 10% hmotnostního podílu nanočástic při krátkodobém stejnosměrném namáhání, kdy se s dalším plněním měla tendenci postupně snižovat. U mikrokompozitu epoxid/ $\text{TiO}_2$  se elektrická pevnost měla tendenci snižovat s rostoucím obsahem mikročástic již od nulového obsahu [15]. Další pozitivní účinky jsou potvrzeny u PP (výrazné) a EVA (mírné) plněné vrstvenatým silikátem s povrchovou úpravou [19]. U materiálů epoxid/ $\text{ZnO}$  a epoxid/vrstvený křemičitan byla zjištěna vyšší hodnota elektrické pevnosti o 10 % ve střídavém poli při relativně malém plnění (0,5 - 1% hm.). Dle [26] lze tento nárůst připisovat zpomalení růstu elektrických stromečků vlivem nanostrukturizace, což bylo i experimentálně dokázáno.

Všeobecně lze říct, že implementováním nanočástic, lze dosáhnout zvýšení elektrické pevnosti.

## 4.5 Vnitřní rezistivita

Změny vnitřní rezistivity v závislosti na koncentracích plniva v epoxidových nanokompozitech s plnivem  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  a  $\text{ZnO}$  jsou zhodnoceny ve studii [27]. Z této studie vyplývá, že vnitřní rezistivita se má tendencí vlivem plnění nepatrně snižovat u všech testovaných vzorků. Tento jev je důsledkem disperze anorganických plniv, jež pravděpodobně umožňují existenci volných iontů a dále jejich volnému pohybu objemem materiálu. To je zřejmě příčina okrajového nárůstu elektrické vodivosti v objemu materiálu. Nutno dodat, že studie neprokázala žádný významný vliv, jelikož žádný z testovaných nano- ani mikro- kompozitů nevykazoval vnitřní rezistivitu nižší než hodnoty v řádu  $10^{17} \Omega \cdot \text{cm}$ . Na Obr. 16 je znázorněn vztah plnění na velikost vnitřní rezistivity pro epoxidovou pryskyřici plněnou různým množstvím nano- a mikro- plniva.



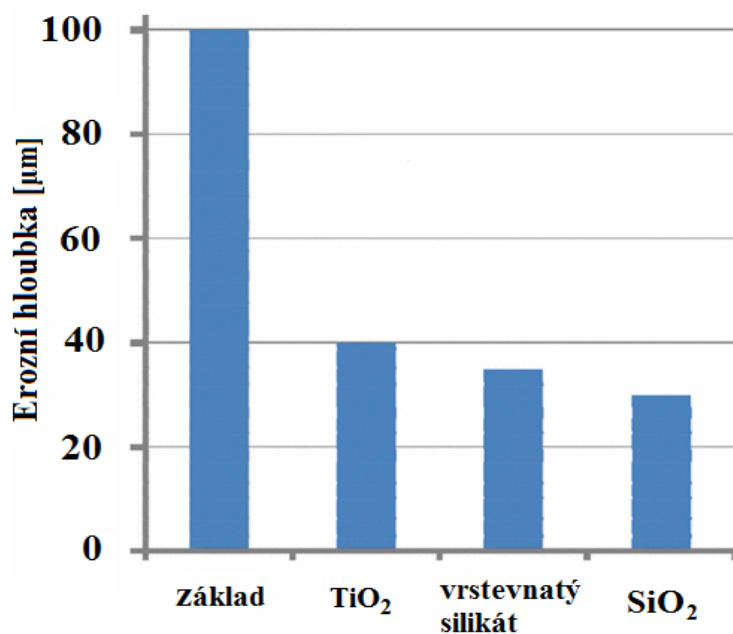
Obrázek 16: Hodnota vnitřní rezistivity v závislosti na množství a typu plnění (převzato z [27])

Další obdobný pokles vnitřní rezistivity je rovněž zaznamenán v publikacích [8, 9]. Nejvyšších hodnot dosahovala základní epoxidová pryskyřice a vlivem plnění byla snížena maximálně o dva řády.

## 4.6 Odolnost proti částečným výbojům

Částečné výboje jsou další z jevů, jež mají degradační účinky na funkčnost izolačního systému. Jsou důsledkem lokálního elektrického namáhání uvnitř nebo na povrchu izolace [22]. Tyto výboje působí na izolační systémy elektrickými, erozivními, chemickými nebo tepelnými vlivy. [28]

Ve studii [29], byla zkoumána odolnost různých nanokompozitů proti částečným výbojům, jejichž základem byla pryskyřice. Měřena byla hloubka eroze, jež vniká pod působením částečných výbojů. Dosažené výsledky znázorňuje *Obr. 17*. Z výsledků studie vyplývá významné snížení erozní hloubky u jednotlivých nanokompozitů. Tato skutečnost potvrzuje pozitivní vliv nanostrukturizace na zvýšení odolnosti vůči částečným výbojům. Příčinou tohoto chování je zřejmě fakt, že rozhraní nanočástice-matrice brání postupu eroze v polymerních oblastech [29].



*Obrázek 17: Porovnání erozní hloubky základní pryskyřice vs. nanokompozity [29]*

Další podobný efekt je zaznamenán v publikaci [22] u nanokompozitu PA/vrstevnatý křemičitan a pro silikonové elastomerové nanokompozity. Odolnost nanokompozitů vůči částečným výbojům je rovněž značně zvýšena. Dle autora jsou zodpovědnými faktory například vzájemné pojivové síly mezi plnivem a maticí, prostor mezi plnivem, objem matrice obklopené sousedním plnivem nebo morfologie „meziplnivového“ prostoru. [22]

## 5 METODY MĚŘENÍ ROZLOŽENÍ PROSTOROVÉHO NÁBOJE

Jak bylo uvedeno v přechozích kapitolách, fenomén akumulace prostorového náboje je jevem negativním. Z tohoto důvodu byla snaha na poli diagnostiky izolačních systémů vyvinout spolehlivé měřicí techniky pro jeho odhalování. Tyto techniky lze rozdělit podle principu do skupin akustických, tepelných a ostatních technik. V následujících podkapitolách jsou tyto techniky popsány.

### 5.1 Skupina akustických metod

Princip elektroakustických metod je založena na šíření akustické vlny zkoumaným vzorkem, která je úměrná velikosti prostorového náboje. Patří sem metody PEA a PWP. PWP metoda je dále dělena na další dvě metody lišící se způsobem generování tlakové vlny na metody PI-PWP a LIPP. [30, 31]

#### 5.1.1 Metoda elektroakustického pulzu PEA

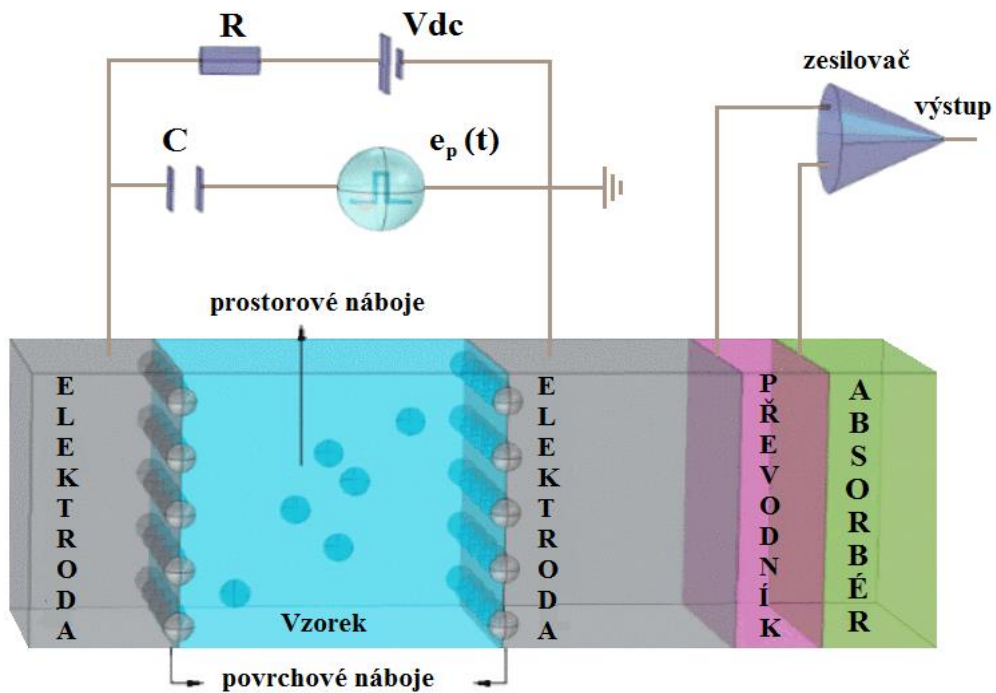
Tato nedestruktivní metoda je v současné době jednou z nejperspektivnějších a byla vyvinuta roku 1987. Zabýval se jí Tatsuo Takada a kol., jehož práce je detailně shrnuta v publikaci [32]. Základem PEA metody (*Obr. 18*) je přivedení krátkého vysokonapěťového pulzu na elektrody, mezi kterými se nachází zkoumaný vzorek. Typické hodnoty vysokonapěťového pulzu jsou (0,1 – 4 kV) s šířkou (5 – 200 ns), v závislosti na tloušťce testovaného vzorku [33]. Na základě přivedeného pulzu vzniká síla, která vychyluje vázané náboje, což má za následek generování akustického signálu. Ten je úměrný rozložení prostorového náboje. Akustická vlna je detekována a převáděna na elektrický signál piezoelektrickým převodníkem (běžně se používá PVDF film<sup>2</sup> nebo monokrystal  $\text{LiNbO}_3$ <sup>3</sup>), který přiléhá k zemnicí elektrodě. Elektrický signál je dále zpracován pro zobrazení na obrazovce osciloskopu. [34, 35] Ukázka výstupního signálu je demonstrován na *Obr. 19*.

Uvedený princip se v průběhu let zásadním způsobem nezměnil. Nicméně byly zavedeny různé inovace týkající se volby odporu a kapacity, velikosti elektrod, typu převodníku, impulzního generátoru a velikosti samotných vzorků, čímž bylo dosaženo zpřesnění celého měřicího systému. Vývoj zavedených inovací je uveden v [35].

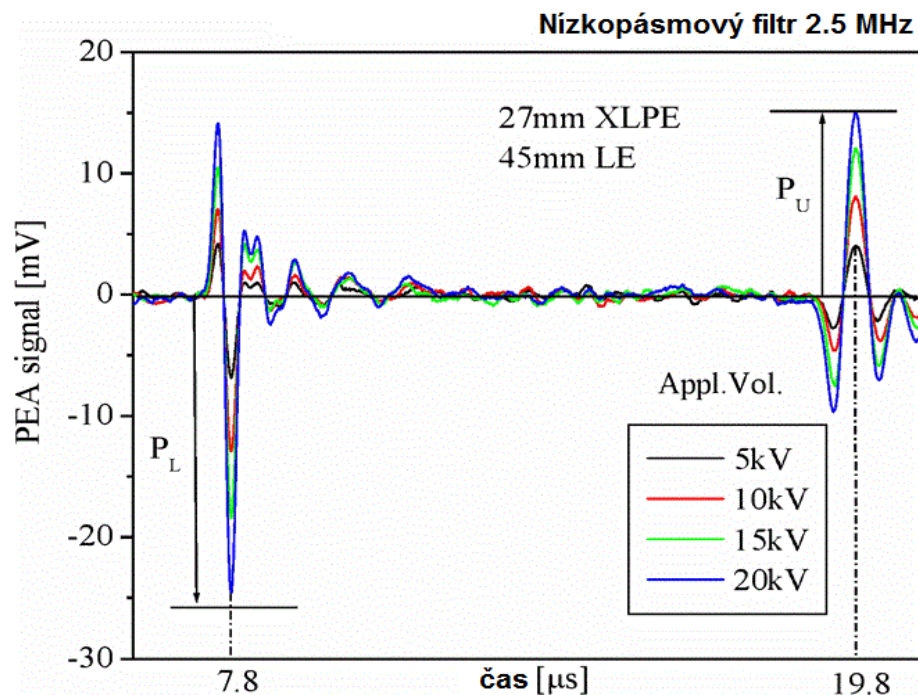
<sup>2</sup> PVDF film - Polyvinylidenfluorid film

<sup>3</sup>  $\text{LiNbO}_3$  – monokrystal niobičnanu lithného

Nevýhodou této metody a obecně všech jejích modifikací je skutečnost, že pokud je zkoumaný vzorek akusticky „nejednotný“, může docházet ke zkreslení akustické vlny, čímž je zkreslen i výstupní signál. [30]



Obrázek 18: Blokové schéma PEA metody [30]



Obrázek 19: Příklad výstupního signálu při použití PEA metody (převzato z [36])

Existuje celá řada modifikací, které jsou založeny na základním PEA principu. Tyto konfigurace jsou ve stručnosti popsány dále.

### **Metoda akustických čoček (Acoustic lens method)**

Tato konfigurace založená na výše uvedeném principu slouží k odhalení prostorového náboje ve třech rozměrech. Detailní popis lze nalézt ve studii [37]. Systém obsahuje numericky řízený detektor tvořený měničem a akustickou čočkou, který snímá tlakovou vlnu pouze v malých zaostřených oblastech, jejichž následným zpracováním lze získat informaci o 3D rozložení prostorového náboje. Nicméně, tato metoda není vhodná pro měření dynamicky se měnícího prostorového náboje, jelikož je snímání časově náročné. Uplatnění lze najít při dlouhodobém pozorování stárnutí desek plošných spojů. [35]

### **Multi-dimenzionální PEA systém**

Tato konfigurace je popsána v [38] a slouží ke zjišťování přechodového chování prostorových nábojů, tj. v reálném čase. Této techniky je dosaženo použitím většího počtu piezoelektrických snímačů připevněných k zemnicí elektrodě, což přineslo i potřebu vícekanálového A/D převodníku. Ten však představuje hlavní nevýhodu, jelikož potřebný vícekanálový převodník je velmi nákladná finanční záležitost. [35]

### **Metoda plovoucí horní elektrody (Open upper electrode)**

Metoda plovoucí horní elektrody vznikla za účelem soudobého měření prostorových nábojů v objemu a nábojů na povrchu dielektrika. Schéma a detailní popis se nachází v publikaci [39]. Podstaty této konfigurace bylo docíleno nahrazením původní přiléhající horní elektrody za plovoucí horní elektrodu. Ta je tvořena kovovým drátkem o průměru 1 mm. Pro lepší kontakt mezi horní elektrodou a vzorkem je v systému použit silikonový olej s vysokou viskozitou nebo jiných dalších maziv. Nevýhodou této metody je kapacitní most mezi elektrodou a testovaným vzorkem, což má za následek vznik výbojové činnosti. Oproti klasickému systému je měřicí systém významně zmenšen a lze ho používat pro studium rozložení prostorového náboje v ozařovacích komorách nebo v plazmatických prostředích. [30]

### **Přenosná PEA**

V roce 2002 vytvořil Maeno a kolektiv přenosný systém pro odhalování prostorových nábojů. Základní metoda byla zmenšena do kompaktních rozměrů pro snadnou práci i mimo laboratorních podmínek. Této možnosti je docíleno použitím upraveného pulzního generátoru, který generuje impulzy o mnohem nižší šířce (okolo 2 - 5 ns). Výstupní signál není potřeba dále upravovat. Rozlišení se zásadně neliší od klasického systému pro ploché vzorky a pohybuje se okolo 10  $\mu\text{m}$  při tloušťce vzorku 500  $\mu\text{m}$ .

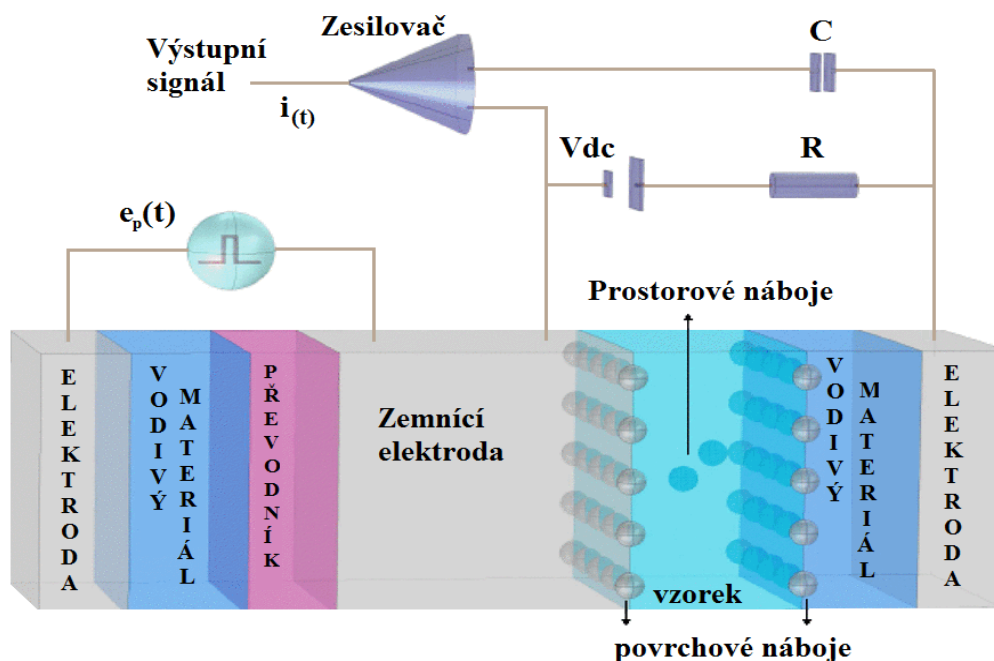
Podrobný popis konfigurace spolu s impulzním generátorem se nachází v [40]. Nevýhoda této metody ční v tom, že lze detekovat pouze náboje v těsné blízkosti elektrod, jelikož gradient elektrického pole není dostatečně silný, aby byly vytvořeny prostorové náboje v „hlubším“ objemu dielektrika. [35]

### Konfigurace pro kabely

Měření prostorových nábojů konfigurací pro kabely jsou podrobně diskutovány v [41]. Hlavní obtíže této konfigurace vyplývají ze složitosti geometrie kabelů, velikosti měřicí soupravy nebo destruktivního přístupu měření plné délky kabelu. [30]

### 5.1.2 Metoda šíření indukované tlakové vlny PI-PWP

Tato metoda se liší od PEA metody jiným způsobem generování tlakové vlny ve vzorku. Blokový diagram je uveden na *Obr. 20*. Princip metody je založen na šíření tlakové vlny testovaným vzorkem, která narušuje rovnovážný stav mezi pružnými a elektrostatickými silami dielektrika. Pulzní generátor přivádí napěťový impulz na piezoelektrický člen, který generuje tlakovou vlnu (tj. inverzně od PEA metody) šířící se vzorkem rychlostí zvuku. Tato vlna uvádí náboje uvnitř vzorku do pohybu (dočasné přeuspořádání nábojů), což vede ke vzniku posuvného proudu ve vnějším obvodu. Proudový signál je následně úměrný rozložení prostorového náboje. Po následných úpravách a dekonvoluci je signál zobrazován na osciloskopu. Rozlišení PI-PWP se pohybuje kolem 2-5 % při použití testovaných vzorků o tloušťkách mezi 100 a 1000  $\mu\text{m}$ . [30, 34, 35]



Obrázek 20: Blokové schéma PI-PWP metody [35]

Nevýhodou této metody je její kompatibilita. Oddělení detekční části od vysokonapěťové části obvodu je realizováno pouze kondenzátorem, což má za následek náchylnost výstupního signálu na vnější elektrické rušení. Pokud nastane elektrická porucha, může dojít až ke zničení celé detekční části obvodu. [35]

Existuje také konfigurace PI-PWP pro odhalování prostorového náboje ve třech rozměrech. Tato konfigurace je detailně popsána v [42]. Konfigurace je ekvivalentem metody „akustických čoček“ u výše uvedené PEA metody. Rozlišení měřicího systému se pohybuje okolo 2,5  $\mu\text{m}$ , v bočním směru v jednotkách mm. Boční rozlišení lze zlepšit zvýšením pracovního kmitočtu.

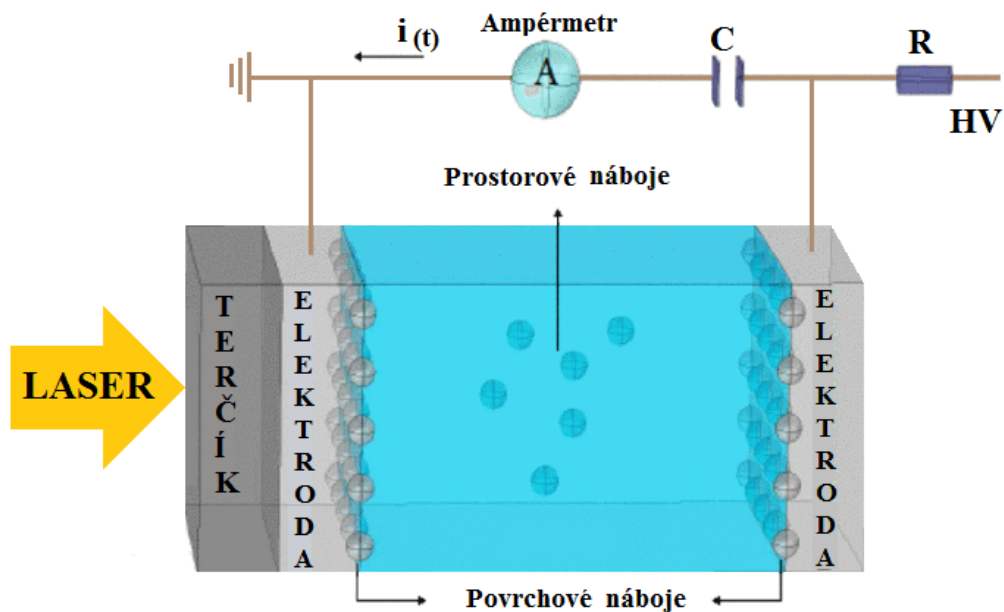
### 5.1.3 Metoda šíření laserem indukovaného tlakového pulzu LIPP

Metoda LIPP se používá, mimo měření rozložení prostorového náboje, rovněž pro určení polarizačních nebo piezoelektrických charakteristik v různých typech izolačních materiálů. Princip této metody je podobný předchozí metodě s rozdílem způsobu generování tlakové vlny, kdy je pro tento účel použit laser. Terčik absorbuje intenzitu světelného impulzu a přeměňuje ji na energii mechanickou. Tímto způsobem je vytvořena tlaková vlna, která ovlivňuje prostorové náboje. Následná proudová odezva je za předpokladu malé oblasti stlačení přímo úměrná rozložení prostorového náboje. Jako zdroj je nejčastěji používán laser Nd:YAG s délkou světelného impulzu okolo ( $10^{-10} - 10^{-8}$  s) a výstupní energií až stovek mJ. [34, 35, 43]

Na *Obr 21*. je uvedeno blokové schéma konfigurace LIPP, která má pokovené obě elektrody. Existují i konfigurace LIPP s jednostranně pokovenou elektrodou, nebo konfigurace modifikované o vzduchovou mezeru mezi pevnou elektrodou a testovaným vzorkem, což je ekvivalentem konfigurace „open upper electrode“ u PEA metody, viz kapitola 5.1.1.

V porovnání s předchozími metodami, které využívají piezo-převodník, vykazuje LIPP lepší prostorové rozlišení (okolo 1  $\mu\text{m}$ ) v důsledku vyšší rychlosti náběhu hran tlakových impulzů. Výsledný signál dále nevyžaduje dekonvoluci. Tloušťka testovaných vzorků může být rovněž vyšší. [35, 43]





Obrázek 21: Blokové schéma metody LIPP [35]

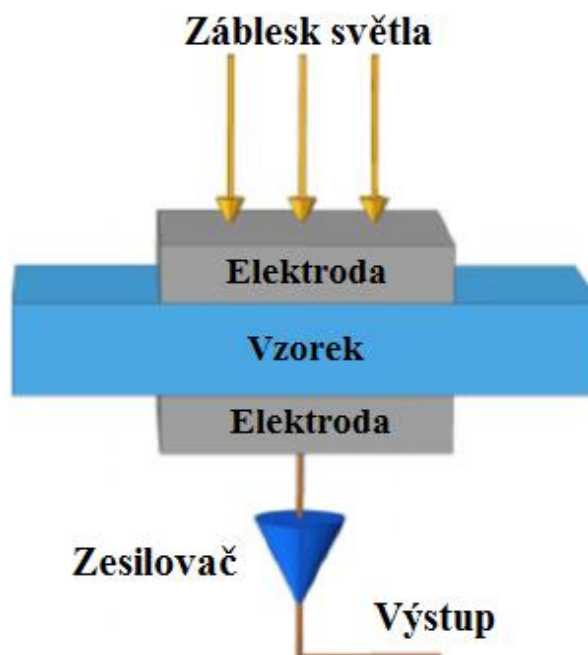
## 5.2 Skupina tepelných metod

Hlavními zástupci této skupiny jsou metoda tepelného pulzu (TPM), metoda tepelného skoku (TSM) a metoda modulace intenzity laseru (LIMM). Tyto metody se většinou liší, jakým způsobem působí tepelný gradient na testovaný vzorek.

### 5.2.1 Metoda tepelného pulzu TPM

Metoda tepelného skoku (*Obr. 22*) byla navržena Collinsem v roce 1975 a později dále upravována jeho kolegy. Princip je založen na aplikaci tepelného pulzu osvětlením jednoho z povrchů dielektrika pomocí světelného záblesku (délka  $8 \mu\text{s}$ ). Během šíření tepelného impulzu jsou měřeny elektrické odezvy generované vzorkem v závislosti na čase. Tvar časové závislosti elektrické odezvy je nositelem informace o rozložení prostorového náboje v testovaném vzorku. Pro zpracování této informace a tím určení rozložení prostorového náboje ve vzorku je potřeba složitého matematického aparátu, což omezuje použitelnost této metody s ohledem na požadovanou přesnost. [35] Jako vhodný matematický aparát lze považovat - Collinsov model a Dereggiho-Mopsikův model [34, 35].

Rozlišení měřicího systému se pohybuje okolo  $2,5 \mu\text{m}$  při tloušťce testovaných vzorků  $25 - 200 \mu\text{m}$  [35].



Obrázek 22: Blokové schéma metody tepelného pulzu [35]

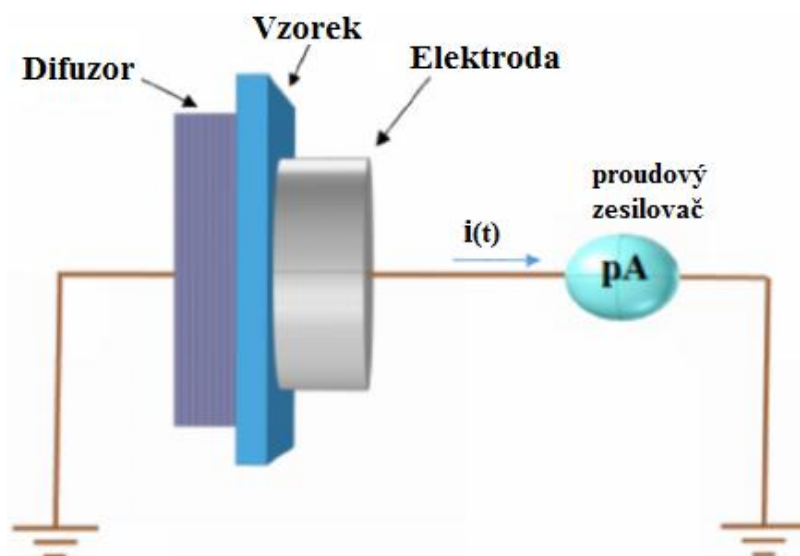
Mellinger a kol. v nedávné době představil metodu tepelného pulzu pro odhalování prostorového náboje ve dvou a třech rozměrech. Jeho práce s podrobnou demonstrací a naměřenými výsledky je shrnuta v publikaci [44].

### 5.2.2 Metoda tepelného skoku TSM

Tato metoda, jehož schéma demonstruje *Obr. 23*, využívá tepelného skoku, který je aplikován na povrch testovaného vzorku. Tepelný skok vytváří tepelný difuzor<sup>4</sup> přiléhající ke zkoumanému vzorku, jež má nízkou teplotu (-10 °C až -15 °C) [34]. Vlivem velkých rozdílů teplot dochází k tepelnému roztažení materiálu, změně permitivity a dočasnému posunutí prostorového náboje uvnitř vzorku. Tímto procesem je indukován proud, jež je spjat s rozložením a hustotou prostorového náboje. Pro přesnou interpretaci výsledného rozložení náboje je potřeba matematického aparátu. [35] Pro tento účel lze použít několik technik, jako je – „Fourierova řada“, „Metoda postupné derivace“ nebo „Metoda inverzní matice“. Podrobný popis těchto aparátů se nachází v publikaci [45].

U této metody je nutné dbát na přesný kontakt mezi tepelným radiátorem a testovaným vzorkem. V opačném případě dochází ke kolísání teplot, což se negativně odráží na indukovaném proudu a výsledné informaci o prostorovém náboji. [35]

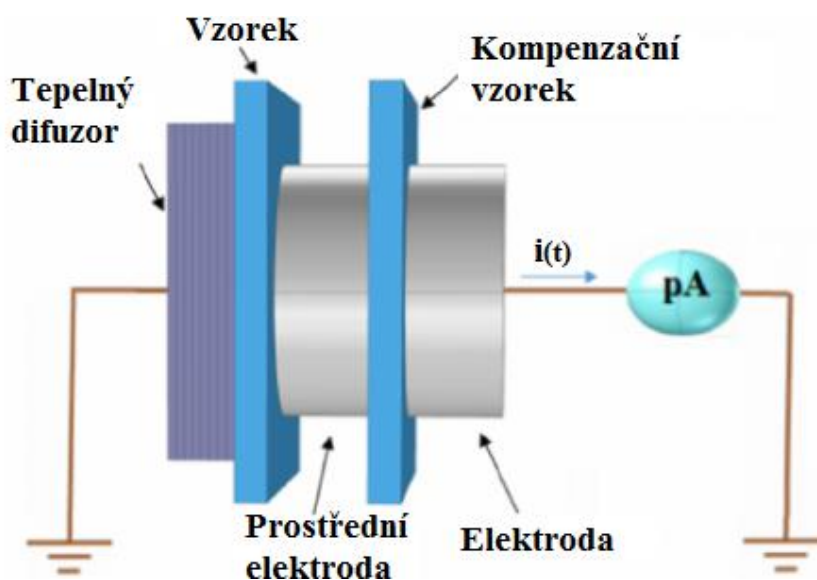
<sup>4</sup> Tepelný difuzor – Radiátor s cirkulující horkou kapalinou [34]



Obrázek 23: Blokové schéma metody tepelného skoku [35]

Metoda byla zpočátku používána pro izolace o tloušťkách v rozmezí 2 - 20 mm s rozlišením okolo 150  $\mu\text{m}$ . Díky zdokonalení zahřívacích technik lze současně zkoumat izolace o tloušťkách 10 – 100  $\mu\text{m}$  s rozlišení v řádu desetin mikrometrů. [31, 32]

Nevýhoda TSM metody ční v jejím použití ve stejnosměrném poli, jehož vlivem dochází k maskování proudu tepelného skoku polarizačními proudy. Tuto nevýhodu lze potlačit umístěním kompenzačního vzorku před testovaný vzorek. Tato konfigurace se pak nazývá „Dvojitý kondenzátor“ a její schéma znázorňuje Obr. 24. [35]



Obrázek 24: Blokové schéma metody tepelného skoku v konfiguraci pro stejnosměrné namáhání [35]

Pro úplnost lze uvést i další konfigurace vycházející ze základního principu. Jsou jimi:

- Konfigurace tepelného skoku „bez kontaktu“ [46],
- Konfigurace pro kabely [47, 48],
- Metoda alternativní tepelné vlny [49].

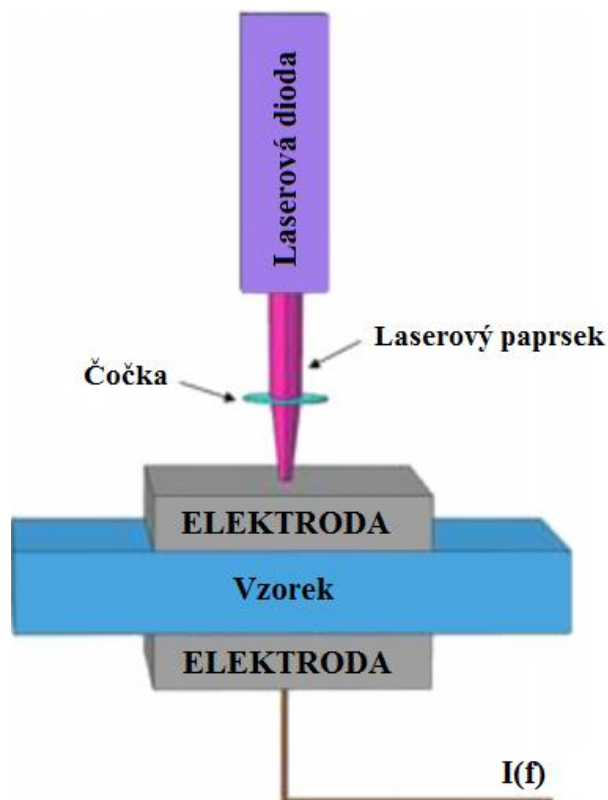
### 5.2.3 Metoda modulace intenzity laserového záření LIMM

Metoda spočívá v zahřívání povrchu testovaného dielektrika pomocí krátkého laserového pulzu s modulační sinusovou intenzitou. Blokové schéma je na *Obr. 25*. Vlivem pulzu pak dochází k nerovnoměrnému rozložení teplot v tloušťce vzorku. Elektroda absorbuje laserový pulz, jehož sinusová modulace způsobuje kolísání teplot na elektrodě a vzorkem se začne šířit tepelná vlna. Ta je během šíření zeslabována a zpoždována ve fázi, což způsobuje nerovnoměrné rozložení „tepelné síly“. Interakce měnících se teplot, prostorově rozložených polarizací a prostorového náboje má za následek vznik sinusového pyroelektrického proudu. Tento proud je funkcí modulačního kmitočtu, rozložení prostorového náboje a polarizace. [34, 35] I pro tuto metodu je potřeba dalšího matematického zpracování, jehož problematikou se zabývá například publikace [50].



Obrázek 25: Blokové schéma metody LIMM [35]

Na principu metody LIMM, lze měřit i vícerozměrné profily prostorových nábojů. Pro tento účel byla vyvinuta konfigurace FLIMM (Focused LIMM), jehož schéma znázorňuje *Obr. 26*. Odhalování trojrozměrných profilů je realizováno pomocí laserového paprsku generujícího laserovou diodou, která se pohybuje ve dvou směrech. Obecně je tato metoda použitelná pro vzorky do tloušťky 200  $\mu\text{m}$ . Rozlišením se pohybuje v řádu jednotek  $\mu\text{m}$ , přičemž je závislé na amplitudě laserového paprsku a použitím matematickým aparátu. [35]



Obrázek 26: Blokové schéma konfigurace FLIMM [43]

### 5.3 Ostatní metody

Výše uvedené akustické a tepelné metody jsou velmi osvědčené metody, které jsou v současné době hojně používány. Existují však i další metody, které už tak známé nejsou. V následujících podkapitolách jsou uvedeny některé doplňující metody. Některé další metody lze nalézt v publikaci [34].

#### 5.3.1 Elektrooptické mapování prostorového náboje

Elektrooptické metody jsou založeny na aplikaci Pockelova a Kerrsova jevu. Pockelův jev je lineární elektrooptický jev, jež vykazují pevné látky. Kerrův jev je elektrooptický kvadratický jev pozorovaný zejména v kapalinách. Mechanismus těchto metod je založený na interakci polarizovaného světla s polem prostorového náboje. Tato metoda je po vzoru akustických a tepelných metod také nedestruktivní a její výhodou ční v bezkontaktním snímání dat počítačové řízenou kamerou, čímž je omezen vliv rušení. Princip optického záznamu je založen na snímání zpoždění optické fáze polarizovaného světla, které prochází vzorkem. K tomuto zpoždění dochází vlivem dvojlomu u anizotropních dielektrik. [35, 51] Detailní popis této metody lze nalézt v [51].

### **5.3.2 Fotokonduktivní metoda**

Je založena na absorpci úzkého světelného paprsku slabou fotokonduktivní vrstvou. Velmi slabě pohlcené světlo uvolňuje nosiče náboje, které se pohybují v poli prostorového náboje. Tato metoda je nedestruktivní pouze při krátké době osvitu. [34]

### **5.3.3 Metoda neuspořádaného akustického pulzu**

Metoda využívá neuspořádaného akustického pulzu k lokálnímu stlačení testovaného vzorku. Neuspořádaný akustický pulz je generován vysokonapěťovým výbojem mezi vodičem a membránou. Měřicí systém je složen z pulzního generátoru, akustického přijímače, olejové nádrže a detekční části. Akustický pulz je generován pomocí průrazu oleje mezi membránou a elektrodou. Tuto metodu lze použít pro pevné i tekuté dielektrika. [34]

### **5.3.4 Metoda laserem generované akustické vlny**

U této techniky jsou akustické vlny generovány absorpcí záření tenkým papírovým terčikem. Jako zdroj paprsku je použit apollo-rubínový laser generující pulzy o délce 15 ns a energii 1,5 J. Laserový paprsek dále prostupuje skleněným oknem do hliníkové nádrže naplněné freonem. V nádrži je umístěn tlakový snímač, testovaný vzorek, zesilovač a absorbér, který mění záření na tlak. Zahřátím uhlíkového papíru laserovým paprskem a následným přechodem mezi vlákny papíru do freonu jsou generovány akustické vlny. Bylo dosaženo prostorového rozlišení 50  $\mu\text{m}$  pro vzorky o tloušťce 3 mm. [34]

### **5.3.5 Metoda akustické sondy**

U této metody je elektrický signál generován mechanickým vybušením nabitého vzorku. Mechanicky generovaná vlna vytváří úzkou deformovanou vrstvu, jež se šíří vzorkem. Generovaný elektrický signál je potom úměrný rozložení prostorového náboje. Tato metoda byla používána pro měření elektrického pole a profilu prostorového náboje v radioaktivním dielektriku. Tloušťky testovaných dielektrik se pohybují v rozsahu 2 – 6 mm, při rozlišení 0,2 mm. [34]

### **5.3.6 Spektroskopická metoda**

Metoda využívá štěpení nebo posuv spektrálních čar v elektrickém poli k určení velikosti elektrického pole. Tvar elektrického pole ve vzorku je sledován detekčním systémem. [34]

## ZÁVĚR

Předkládaná práce zhodnocuje chování nehomogenních dielektrických materiálů ve vnějším elektrickém poli. Jelikož je tento pojem velmi obecný, byly posuzovány hlavně velmi perspektivní nanokompozitní dielektrika. Tyto nanokompozitní dielektrické materiály jsou současně centrem velkého zájmu na poli izolačních systémů, jelikož mohou pro své funkčními vlastnostmi nahradit komerčně používané mikrokompozitní dielektrické materiály.

V úvodní části práce jsem obecně charakterizoval dielektrické látky, jejich dělení a popsal hlediska na jejich polarizaci. Dielektrické látky jsou velmi rozmanité a jejich charakter je odrazem vnitřní struktury. Dalším podstatným aspektem jest prostředí, ve kterém se dielektrikum nachází. Obecně lze říct, že v každém dielektriku mohou nastat všechny typy polarizačních mechanismů a právě povaha prostředí udává, jaký polarizační mechanismus bude převládat. Výsledný stav dielektrika je následně dán superpozicí jednotlivých polarizačních mechanismů. Polarizační mechanismy lze rozdělit do rodin – deformačních, relaxačních, spontánních a migračních polarizací. Dále jsem charakterizoval dielektrické látky nehomogenního charakteru, pro které jsou uvedeny konkrétní příklady vybrané z různých pramenů literatury. Všichni vybraní zástupci jsou nanokompozitní dielektrika.

Následující kapitola zvýrazňuje vliv migrační polarizace, jejíž důsledkem je vznik prostorového náboje. Vyplývá, že tento zajímavý fenomén má za následek deformace intenzity elektrického pole v tloušťce dielektrického materiálu, což se negativně odráží na jeho elektrické pevnosti, respektive celkové životnosti. To však představuje veliký problém, neboť tato vlastnost může být rozhodujícím aspektem výběru materiálu, konkrétně na izolace pro stejnosměrné účely. Diagnostické metody využívané ke sledování rozložení prostorového náboje jsou uvedeny v závěrečné části práce.

Předmětem následující kapitoly je posouzení vlivu implementace nanoplniv do dielektrických materiálů. Pro tento účel byly posuzovány materiály dotované hlavně anorganickými nanoplnivými částicemi anorganických oxidů nebo jílových minerálů, zejména  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{ZnO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$  a vrstevnaté silikáty, jež jsou častým plnivem, zvláště s cílem zlepšení mechanických vlastností. Formou rešerše byly zkoumány elektrické parametry, jako je - rozložení prostorového náboje, relativní permitivita, ztrátový činitel, elektrická pevnost, vnitřní rezistivita a odolnost vůči částečným výbojům. Lze říct, že přínos

nanostrukturizace dielektrických materiálů je enormní. Příkladem může být významná redukce prostorového náboje při začlenění nanočástic  $\text{TiO}_2$  do matrice polymeru XLPE. Tato pozitivní změna může být v praxi využita například při výrobě kabelových izolací pro stejnosměrné účely.

Závěr práce shrnuje jednotlivé metody měření rozložení prostorového náboje. Od doby, kdy se problematika fenoménu prostorového náboje stala předmětem mnoha výzkumů, vzniklo nepřehledné množství různých metod pro jeho měření. V současné době lze říct, že perspektivními skupinami metod jsou akustické a tepelné. Hlavními zástupci akustických metod jsou PEA, PI-PWP a LIPP, jež jsou pro své dobré parametry předmětem neustálého vývoje. Existují i mnohé modifikace těchto základních metod, jež mohou odhalovat různé typy profilů prostorového náboje v různých měřicích podmínkách. Obecným nedostatkem akustických metod je jejich možná nepřesnost zapříčiněná „akustickou nejednotou“ testovaných vzorků. Skupina tepelných metod je svými parametry velmi podobně použitelná. Zástupci této skupiny jsou TPM, TSM a LIMM. Tyto metody jsou limitovány v důsledku potřeby použití složitých matematických aparátů pro dekonvoluci výsledného signálu. Nicméně i tyto metody jsou velmi používané a rovněž jsou předmětem dalšího vývoje.



## SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ

- [1] MENTLÍK, Václav. *Dielektrické prvky a systémy*. 1. vydání. Praha: BEN - technická literatura, 2006. ISBN 80-7300-189-6.
- [2] MENTLÍK V., M. BEČKA, V. BOČEK, V. KOČOVÁ, Z. KRAUS, E. KUČEROVÁ a J. RAIS. *Elektrotechnické materiály*. Plzeň: ZČU Plzeň, 1995. ISBN 80-7082-227-9.
- [3] KUČEROVÁ, Eva. *Elektrotechnické materiály*. Plzeň: ZČU Plzeň, 2002. ISBN 80-7082-940-0.
- [4] KAO, Kwan-Chi. *Dielectric phenomena in solids: with emphasis on physical concepts of electronic processes*. Amsterdam: Academic Press, 2004. ISBN 0-12-396561-6.
- [5] HOFMANN, Jaroslav a Marie URBANOVÁ. *Fyzika I*. Praha: VŠCHT, 2005. ISBN 80-7080-514-5.
- [6] HASSDENTEUFEL, Josef. *Elektrotechnické materiály*. 2. vyd. Bratislava: Alfa, 1978.
- [7] POLJAK, František. *Dielektrika, Izolanty*. Bratislava: Alfa, 1983.
- [8] HORNAK, J., L. HARVANEK, P. TRNKA a V. MENTLIK. Possibilities of Modification of Polymer / SiO<sub>2</sub> Composite by Various Types of Carrier. 2016, 1–4.
- [9] HORNAK, J., L. HARVANEK, P. TRNKA a V. MENTLIK. Dielectric Parameters of Polymer / SiO<sub>2</sub> Composite with Different Carrier. 2016, 1–4.
- [10] SAMI, a., E. DAVID, M. FRECHETTE a S. SAVOIE. Breakdown and surface discharge involving PE/SiO<sub>2</sub> nanocomposites. *Electrical Insulation (ISEI), Conference Record of the 2010 IEEE International Symposium on*. 2010, 5–8. [cit. 14. 02. 2017]. ISSN 1089-084X. Dostupné z: doi:10.1109/ELINSL.2010.5549748

- [11] FUSE, N., M. KOZAKO, T. TANAKA, S. MURASE a Y. OHKI. Possible mechanism of superior partial-discharge resistance of polyamide nanocomposites. *The 17th Annual Meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society, 2004. LEOS 2004*, 322–325. [cit. 14. 02. 2017]. ISSN 00849162. Dostupné z: doi:10.1109/CEIDP.2004.1364253
- [12] FUSE, N., M. KOZAKO, T. TANAKA a Y. OHKI. Effects of mica fillers on dielectric properties of polyamide nanocomposites. *Annual Report - Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, CEIDP*. 2005, 148–151. [cit. 20.02. 2017]. ISSN 00849162. Dostupné z: doi:10.1109/CEIDP.2005.1560642
- [13] MONTANARI, Gian Carlo, Davide FABIANI, Fabrizio PALMIERI, Dirk KAEMPFER, Ralf THOMANN a Rolf MÜLHAUPT. Modification of electrical properties and performance of EVA and PP insulation through nanostructure by organophilic silicates. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2004, 754-762. [cit. 20. 02. 2017]. ISSN 10709878. Dostupné z: doi:10.1109/TDEI.2004.1349780
- [14] FOTHERGILL, J.C., J.K. NELSON a M. FU. Dielectric properties of epoxy nanocomposites containing TiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and ZnO fillers. *The 17th Annual Meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society, 2004. LEOS 2004*. 2004, 406–409. [cit. 22.02. 2017]. Dostupné z: doi:10.1109/CEIDP.2004.1364273
- [15] NELSON, J.K., Y. HU a J. THITICHAROENPONG. Electrical properties of TiO<sub>2</sub> nanocomposites. *2003 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*. 2003, 719–722. [cit. 30.02. 2017]. Dostupné z: doi:10.1109/CEIDP.2003.1254955
- [16] WANG, Youyuan, Kun XIAO, Can WANG, Lijun YANG, Feipeng WANG a A SAMPLE. Study on Dielectric Properties of TiO<sub>2</sub>/XLPE Nanocomposites. 2016, 1–4.
- [17] TANAKA, Toshikatsu a kol. Dielectric properties of XLPE/SiO<sub>2</sub> nanocomposites based on CIGRE WG D1.24 cooperative test results. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2011, 1484–1517. [cit. 04. 03. 2017]. ISSN 10709878. Dostupné z: doi:10.1109/TDEI.2011.6032819

- [18] PEREZ, N. Low Temperature Dielectric Spectroscopy Study of a Nanocomposite Silicone Rubber. *2006 IEEE 8th International Conference on Properties and applications of Dielectric Materials*. 2006, 339–342. [cit. 20.03. 2017]. Dostupné z: doi:10.1109/ICPADM.2006.284185
- [19] TANAKA, T., G.C. MONTANARI a R. MULHAUPT. Polymer nanocomposites as dielectrics and electrical insulation-perspectives for processing technologies, material characterization and future applications. 2004, 763–784.
- [20] CIUPRINA, Florin, Ilona PLESA, Petru V. NOTINGHER, Tiberiu TUDORACHE a Denis PANAITESCU. Dielectric properties of nanodielectrics with inorganic fillers. *Annual Report - Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, CEIDP*. 2008, 682–685. [cit. 04. 04. 2017]. ISSN 00849162. Dostupné z: doi:10.1109/CEIDP.2008.4772905
- [21] NELSON, J.K. The promise of dielectric nanocomposites. *Conference Record of the 2006 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*. 2006, 452–457. [cit. 28. 03. 2017]. ISSN 1089-084X. Dostupné z: doi:10.1109/ELINSL.2006.1665355
- [22] TANAKA, Toshikatsu. Dielectric nanocomposites with insulating properties. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2005, 914–928. [cit. 14.03. 2017]. ISSN 10709878. Dostupné z: doi:10.1109/TDEI.2005.1522186
- [23] IMAI, T, Y HIRANO, H HIRAI, S KOJIMA a T SHIMIZU. Preparation and properties of epoxy-organically modified layered silicate nanocomposites. *Conference Record of the 2002 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*. 2002, 379–383. [cit. 14.03. 2017]. ISSN 01642006. Dostupné z: doi:10.1109/elinsl.2002.995955
- [24] BOUDA, Václav, Josef HAMPL, Jan LIPTÁK a Josef SEDLÁČEK. *Materiály pro elektrotechniku*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2000. ISBN 80-01-02232-3.
- [25] RAJU, Gorur G. *Dielectrics in electric fields*. London: Boca Raton: CRC Press/Taylor & Francis, 2010. ISBN 0-8247-0864-4.
- [26] BOČEK, Jiří. *Aspekty aplikace nanotechnologií v elektrotechnologii*. 2011 Disertační práce (Ph.D.). Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická.

- [27] SINGHA, Santanu a M. THOMAS. Dielectric properties of epoxy nanocomposites. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2008, 12–23. [cit. 14.03. 2017]. ISSN 1070-9878. Dostupné z: doi:10.1109/T-DEI.2008.4446732
- [28] MENTLÍK, Václav. *Diagnostika elektrických zařízení*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2008. ISBN 978-80-7300-232-9.
- [29] TANAKA, T a T IIZUKA. *Generic PD resistance characteristics of polymer nanocomposites*. 2010. [cit. 14.03. 2017]. Dostupné z: doi:10.1109/CEIDP.2010.5723950
- [30] ALA, G., M. CARUSO, V. CECCONI, S. GANCI, A. IMBURGIA, R. MICELI, P. ROMANO a F. VIOLA. Review of acoustic methods for space charge measurement. *2015 AEIT International Annual Conference, AEIT 2015*. 2016. [cit. 14.03. 2017]. Dostupné z: doi:10.1109/AEIT.2015.7415270
- [31] LU, Jundong, Yewen ZHANG, Peng MA, Feihu ZHENG, Zhenlian AN a Hui ZHAO. A variational PWP method for measuring space charge distributions in real EHV cables. *Proceedings of the IEEE International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*. 2015, 1023–1026. [cit. 14.03. 2017]. Dostupné z: doi:10.1109/ICPADM.2015.7295449
- [32] LI, Ying, Masataka YASUDA a Tatsuo TAKADA. Pulsed Electroacoustic Method For Measurement Of Charge Accumulation In Solid Dielectrics. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 1994, 188–195. [cit. 14.03. 2017]. ISSN 10709878. Dostupné z: doi:10.1109/94.300251
- [33] BODEGA, R, P H F MORSHUIS a J J SMIT. *Space charge measurements on multi-dielectrics by means of the pulsed electroacoustic method*. 2006. [cit. 14. 03. 2017]. ISBN 1070-9878. Dostupné z: doi:10.1109/TDEI.2006.1624272
- [34] AHMED, N. H. a N. N. SRINIVAS. Review of space charge measurements in dielectrics. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 1997, 644–656. [cit. 14.03. 2017]. ISSN 10709878. Dostupné z: doi:10.1109/94.625650
- [35] IMBURGIA, Antonino, Rosario MICELI, Eleonora Riva SANSEVERINO, Pietro ROMANO a Fabio VIOLA. Review of space charge measurement systems: acoustic, thermal and optical methods. *IEEE Transactions on Dielectrics and*

- Electrical Insulation*. 2016, 3126–3142. [cit. 14.03. 2017]. ISSN 1070-9878. Dostupné z: doi:10.1109/TDEI.2016.7736878
- [36] FUKUMA, M, H TOMITA a T MAENO. *Space charge measurement for 27mm thick XLPE sample in PEA method*. 2014. [cit. 14.03. 2017]. Dostupné z: doi:10.1109/ISEIM.2014.6870727
- [37] MAENO, T. *Three-dimensional PEA charge measurement system*. 2001. [cit. 14.04. 2017]. ISBN 1070-9878. Dostupné z: doi:10.1109/94.959715
- [38] FUKUMA, M, T MAENO a K FUKUNAGA. *Cross-section space charge measurement system*. 2004. [cit. 14.04. 2017]. Dostupné z: doi:10.1109/ICSD.2004.1350320
- [39] IMAI, S, Y TANAKA, T FUKAO, T TAKADA a T MAENO. *Development of new PEA system using open upper electrode [pulsed electro-acoustic method]*. 2004. [cit. 14.04. 2017]. Dostupné z: doi:10.1109/CEIDP.2004.1364189
- [40] MAENO, T. *Portable space charge measurement system using the pulsed electrostatic method*. 2003. [cit. 14.04. 2017]. Dostupné z: doi:10.1109/TDE.2003.1194119
- [41] MAZZANTI, Giovanni a Massimo MARZINOTTO. *Space Charge in HVDC Extruded Insulation: Storage, Effects, and Measurement Methods*. B.m.: Wiley-IEEE Press. 2013. [cit. 14. 04. 2017]. ISBN 9781118590423. Dostupné z: doi:10.1002/9781118590423.ch04
- [42] TIAN, Y, G CHEN a A E DAVIES. *Development of a three dimensional space charge measurement system for dielectrics using PWP method*. 2002. [cit. 14.04. 2017]. Dostupné z: doi:10.1109/CEIDP.2002.1048878
- [43] IMBURGIA, A., P. ROMANO, M. CARUSO, F. VIOLA, R. MICELI, E. RIVA SANSEVERINO, A. MADONIA a G. SCHETTINO. Contributed Review: Review of thermal methods for space charge measurement. *Review of Scientific Instruments*. 2016, [cit. 14. 04. 2017], ISSN 10897623. Dostupné z: doi:10.1063/1.4968029
- [44] ARYAL, S a A MELLINGER. *Two-and three-dimensional analysis of polarization profiles in electret materials with thermal pulses*. 2011. [cit. 14.04. 2017]. ISBN 0084-9162. Dostupné z: doi:10.1109/CEIDP.2011.6232642

- [45] NOTINGHER, P, S AGNEL a A TOUREILLE. *Recent advances in calculating space charge distribution by processing the signals obtained using the thermal step method*. 1998. [cit. 14.04. 2017], Dostupné z: doi:10.1109/CEIDP.1998.733897
- [46] LAURENTIE, J C, H YAHYAOU, P NOTINGHER, J CASTELLON a S AGNEL. *Contactless electric field and space charge measurement across solid dielectrics: A fully non-intrusive thermal technique*. 2014. [cit. 14. 05. 2017], ISBN 0197-2618. Dostupné z: doi:10.1109/IAS.2014.6978356
- [47] AGNEL, S, P NOTINGHER, A TOUREILLE, J CASTELLON a S MALRIEU. *Study of space charge dynamics directly on power cables using the thermal step method*. 1999. [cit. 14. 05. 2017], Dostupné z: doi:10.1109/CEIDP.1999.804590
- [48] CASTELLON, J, P NOTINGHER, S AGNEL, A. TOUREILLE, J MATAALLANA, H JANAHA, P MIREBEAU a D SY. *Industrial installation for voltage-on space measurements in HVDC cables*. 2005. [cit. 14.05. 2017], ISBN 0197-2618. Dostupné z: doi:10.1109/IAS.2005.1518496
- [49] REBOUL, J M a F MADY. *Space charge measurements by the alternating thermal wave method: thermal analysis and simulations for data processing improvement*. 2004. [cit. 14. 05. 2017], Dostupné z: doi:10.1109/ICSD.2004.1350339
- [50] LANG, S B a R FLEMING. *A Comparison of Three Techniques for Solving the Fredholm Integral Equation of the Laser Intensity Modulation Method (LIMM)*. 2009. [cit. 14. 05. 2017], Dostupné z: doi:10.1109/TDEI.2009.5128521
- [51] TAKADA, T. *Acoustic and optical methods for measuring electric charge distributions in dielectrics*. 1999. [cit. 14. 05. 2017], Dostupné z: doi:10.1109/CEIDP.1999.804581