

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra výkonové elektroniky a strojů

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Nanometrické přísady pro kompozitní materiály

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2021/2022

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE (projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Vojtěch ŠMEJKAL**
Osobní číslo: **E19B0219P**
Studijní program: **B2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Téma práce: **Nanometrické přísady pro kompozitní materiály**
Zadávající katedra: **Katedra výkonové elektroniky a strojů**

Zásady pro vypracování

1. Definujte kompozitní materiály.
2. Rozeberte druhy a použití kompozitních materiálů.
3. Provedte analýzu částicových příměsí.
4. Zaměřte se na nanometrické příměsí pro dielektrické aplikace.


Rozsah bakalářské práce: **30-40**
Rozsah grafických prací: **dle doporučení vedoucího**
Forma zpracování bakalářské práce: **elektronická**

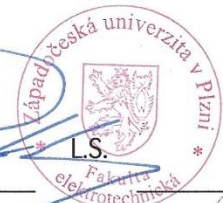
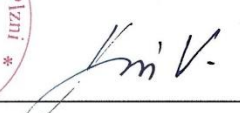
Seznam doporučené literatury:

- KUČEROVÁ, Eva. Elektrotechnické materiály. Plzeň: Západočeská univerzita, 2002. ISBN 80-7082-940-0.
- HORNAK, J., TRNKA, P., KADLEC, P., MICHAL, O., MENTLÍK, V., ŠUTTA, P., CSÁNYI, G. M., TAMUS, Z. Á. Magnesium oxide nanoparticles : dielectric properties, surface functionalization and improvement of epoxy-based composites insulating properties. Nanomaterials, 2018, roč. 8, č. 6, s. 1-17. ISSN: 2079-4991.
- Elektronické informační zdroje (databáze IEEE Xplore a další).

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Ondřej Michal**
Katedra materiálů a technologií

Datum zadání bakalářské práce: **8. října 2021**
Termín odevzdání bakalářské práce: **26. května 2022**


Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan



Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 8. října 2021

Abstrakt

Bakalářská práce je zaměřena na popis částí a vlastností kompozitních materiálů s nanometrickými přísadami. Jsou vysvětleny jednotlivé fáze a popsány vlastnosti používaných materiálů pro výrobu. Práce obsahuje také připomenutí důležitých milníků z historie nanotechnologie. Jsou vysvětleny základní fyzikální veličiny, které jsou potřeba pro pochopení chování dielektrika. V závěru jsou uvedeny nanokompozitní materiály pro dielektrické účely a jejich využití v elektrotechnickém průmyslu.

Klíčová slova

Kompozitní materiály, výztuž, matrice, nanokompozity, nanopřísady, dielektrické vlastnosti, dielektrika

Abstract

The bachelor's thesis is focused on the description of parts and characteristics of composite materials with nanometric additives. Particular phases are explained and characteristics of materials used for production are described. The thesis includes the reminder of important milestones from the history of nanotechnology as well. Basic physical quantities, that are necessary to understand the behaviour of the dielectric, are explained. At the end, nanocomposite materials for dielectric purposes are mentioned, and also their use in the electrotechnical industry.

Key words

Composite materials, reinforcement, matrix, nanocomposite, nano-filler, dielectric properties, dielectric

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 23.5.2022

Vojtěch Šmejkal

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Ondřeji Michalovi, Ph.D. Věnoval mi řadu cenných rad a zkušeností. Z konzultací jsem vždy odcházel s odbornými připomínkami, které mi dopomohly k vypracování této práce.

Obsah

OBSAH	7
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	8
ÚVOD	10
1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY	11
1.1 VYZTUŽUJÍCÍ VLÁKNA.....	11
1.1.1 Skleněná vlákna.....	12
1.1.2 Uhlíková vlákna.....	12
1.1.3 Aramidová vlákna.....	12
1.1.4 Přírodní vlákna.....	13
1.2 MATRICE.....	13
1.2.1 Kovová matrice.....	13
1.2.2 Keramická matrice.....	13
1.2.3 Termoplastová matrice.....	14
1.2.4 Reaktoplasty.....	17
2 NANOMATERIÁLY	19
2.1 HISTORIE.....	19
2.2 VLASTNOSTI NANOKOMPOZITŮ.....	21
2.2.1 Perkolační teorie.....	22
2.2.2 Prostorový náboj.....	23
2.2.3 Elektrická pevnost.....	24
2.2.4 Rezistivita.....	25
2.2.5 Permittivita.....	25
2.2.6 Dielektrické ztráty.....	26
2.2.7 Ztrátový činitel.....	26
2.2.8 Elektrická vodivost.....	27
2.2.9 Polarizace heterogeního dielektrika.....	27
3 ČÁSTICOVÉ PŘÍMĚSY	27
3.1 OXID KŘEMIČITÝ.....	28
3.1.1 PVC/SiO ₂	28
3.1.2 XLPE/SiO ₂	29
3.1.3 PI/SiO ₂ @TiC.....	29
3.2 OXID TITANIČITÝ.....	30
3.2.1 EP/TiO ₂	30
3.3 OXID ZINEČNATÝ.....	32
3.3.1 LDPE/ZnO.....	32
3.4 OXID HLINITÝ.....	33
3.4.1 LDPE/Al ₂ O ₃ @h-Bn.....	34
3.5 OXID ŽELEZITÝ.....	34
3.5.1 PEI/α-Fe ₂ O ₃	35
3.6 OXID HOŘEČNATÝ.....	35
3.6.1 EP/GFRP@MgO.....	36
3.7 OXID GRAFENU.....	36
3.7.1 PI/SiO ₂ @GO.....	37
3.8 (3-GLYCIDYLOXYPROPYL)TRIMETHOXYSILANE.....	37
3.8.1 3750 LV/MgO@GLYMO.....	38
ZÁVĚR	39
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	40

Seznam symbolů a zkratk

Al_2O_3		oxid hlinitý
C_0	[F]	kapacita elektrodové soustavy ve vzduchu
C_X	[F]	kapacita elektrodové soustavy po naplnění
d	[m]	tloušťka
E_p	[kV·mm ⁻¹]	elektrická pevnost
EP		epoxidová pryskyřice
f	[Hz]	frekvence
Fe_2O_3		oxid železitý
GLYMO		(3-Glycidioxypropyl)trimethoxysilane
GO		oxid grafenu
MgO		oxid hořečnatý
P	[-]	pravděpodobnost nalezení vodivé fáze nad kritickou koncentrací
p_c	[-]	pravděpodobnost nalezení vodivé fáze nad kritickou koncentrací
PE		polyetylen
PEI		polyetherimid
PEN		polyethylen naftalát
PF		fenolické pryskyřice
PI		polyimid
PVC		polyvinylchlorid
P_Z	[W]	ztrátový výkon
q	[-]	kritický exponent pod oblastí perkolačního prahu
S	[-]	kritický exponent pro oblast perkolace
SiO_2		oxid křemičitý
t	[-]	kritický exponent nad oblastí perkolačního prahu
$\text{tg } \delta$	[-]	ztrátový činitel – elektrický
TiO_2		oxid titaničitý
U_p	[V]	průrazné napětí
UR		nenasyčená polyesterová pryskyřice
VE		vinylesterová pryskyřice
V_f	[-]	objemový podíl plniva
$V_{\text{kritické}}$	[-]	kritický objemový podíl při překročení prahu

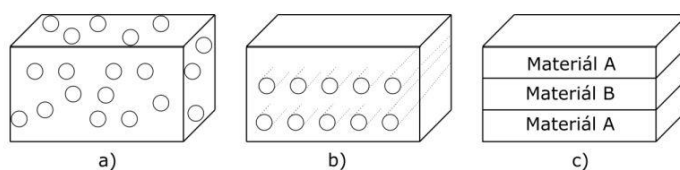
ZnO		oxid zinečnatý
ε	$[\text{F}\cdot\text{m}^{-1}]$	permitivita
ε_0	$[\text{F}\cdot\text{m}^{-1}]$	permitivita vakua
ε_r	$[-]$	relativní permitivita
$\varepsilon'(\omega)$	$[\text{F}\cdot\text{m}^{-1}]$	reálná část komplexní permitivity
$\varepsilon''(\omega)$	$[\text{F}\cdot\text{m}^{-1}]$	imaginární část komplexní permitivity
σ_c	$[\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}]$	vodivost kompozitu
σ_f	$[\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}]$	vodivost plniva
σ_m	$[\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}]$	vodivost matrice
ϕ	$[\text{Wb}]$	magnetický tok
ω	$[\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}]$	úhlová rychlost

Úvod

V nynější době, kdy se neustále zvyšují požadavky na materiály z pohledu efektivnosti, hospodárnosti a spolehlivosti, se hledají cesty, jak dosáhnout lepších vlastností. U samostatných materiálů již není moc velký prostor pro zlepšení, avšak využitím složených materiálů lze dosáhnout potřebných zlepšených vlastností. Takovými materiály mohou být kompozitní. Ty využívají rozdílných vlastností fází, kterými jsou matrice a výztuž. Využívají se i více než dvojfázové materiály, takovým se říká hybridní. Jednotlivé fáze se vzájemně doplňují, a dokonce jsou schopny i zlepšovat vlastnosti, které by měl čistý materiál. To však není konec lidského poznání. Zlepšit vlastnosti lze využitím menších rozměrů plniva. Ty dosahují až řádů nano. Z těchto důvodů se stávají nanometrické přísady pro kompozitní materiály jasnou volbou pro elektrotechnické účely, těmi jsou třeba dielektrika. Nejen že dosahují zlepšených elektrotechnických vlastností, ale také mechanických, chemických a tepelných. Pro dielektrika se převážně využívá polymerních maticí na bázi reaktoplastů nebo termoplastů. Jako nanoplivo se běžně využívá anorganických oxidů, tam se řadí například SiO_2 , TiO_2 , ZnO a Al_2O_3 . Lze se s nimi setkat nejen v elektrotechnickém, ale i ve stavebním, strojírenském, zdravotním, leteckém, vesmírném a celé řadě dalších průmyslů.

1 Kompozitní materiály

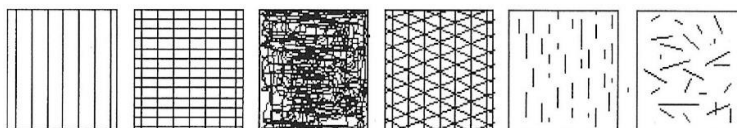
Hlavní charakteristikou kompozitních materiálů je, že jsou to směsi minimálně dvou rozdílných fází, kde jedna z nich je zastoupena alespoň 5 %. [1] Fázi, která je obvykle spojitá a poddajnější nazýváme matrice. Ta zastává funkci pojiva výztuže. Výztuž je většinou tužší, tvrdší, pevnější a nespojitá fáze. Mechanické, chemické a fyzikální vlastnosti matrice a výztuže se liší. Kompozit musí být připraven mísením fází. Toto jsou základní myšlenky definice kompozitního materiálu. Vzhledem k těmto podmínkám nelze za kompozit považovat plast, který obsahuje malé množství tuhých barviv. Za kompozit nelze považovat ani slitiny kovů, jelikož při tepelném zpracování došlo k vyloučení tvrdé fáze. [2] Mezi základní výhody kompozitních materiálů je, že se výhodně kombinují různé vlastnosti jednotlivých materiálů. Tímto způsobem lze získat lepší vlastnosti, než by odpovídalo součtu vlastností složek. Říkáme tomu synergie složek. [3] Kompozity můžeme dle jejich struktury rozdělit na částicové, vláknové a vrstvené. [4]



Obr. 1 Uspořádání uvnitř kompozitu – a) částicové, b) vláknové, c) vrstvené (převzato z [4])

1.1 Vytzužující vlákna

Vlákna řadíme mezi výrazně pevnější materiály, než jsou stejné materiály v kompaktní podobě. Jejich pevnost je vyšší se zvyšujícím se průměrem. Vlákna s krystalickou strukturou mají nejpevnější atomové vazby přednostně orientovány v podélném směru vlákna. [2]



Obr. 2 Způsoby uspořádání rovinného uspořádání vláken: a) jednosměrné uspořádání kontinuálních vláken, b) dvouosá orientace, tkanina z kontinuálních vláken, c) rohož, nahodilá orientace kontinuálních nebo krátkých vláken, d) víceosá výztuž z kontinuálních vláken, e) krátká vlákna jednosměrně orientovaná, f) krátká vlákna s nahodilou orientací (převzato z [2])

1.1.1 Skleněná vlákna

Jsou to amorfní vlákna. [2] Vyrábějí se za pomoci tažení z taveniny připravované v platinových pecích. Máme více druhů skelných vláken dělicích se na základě chemického složení, dle kterého se mění i fyzikální vlastnosti. E-sklovina je nejběžnější typ skelného vlákna, který pokrývá až 90 % trhu. [5] E-sklovina se vyznačuje vysokým elektrickým odporem a dobrými tvářecími charakteristikami. [1] Další typ skelného vlákna je v Evropě znám pod označením R-sklovina, která obsahuje SiO_2 , MgO a Al_2O_3 , tudíž má o 40 až 70 % vyšší pevnost. Sklovinu s vysokou odolností vůči kyselinám, chemicky agresivním látkám, dobrou pevností a neobsahující bor nazýváme C-sklovina. Skloviny neobsahující bor se vyznačují vyšší dielektrickou konstantou, která je přibližně 7. Oproti tomu třeba E-sklovina s borem má dielektrickou konstantu 5,9 až 6,6. AR-vlákna jsou velmi odolná vůči alkáliím, proto se používají pro ztužení betonu. [5]

1.1.2 Uhlíková vlákna

Jsou to krystalická vlákna. [2] Řadí se mezi nejrozšířenější vlákna vůbec a lze je připravit celou řadou způsobů. [1] Uhlíková vlákna se vyznačují velmi vysokou tuhostí a pevností, mají však nízkou tažnost. Jsou tvořeny dlouhým tenkým pramenem o průměru 4 až 8 μm , složeným převážně z atomů uhlíku. [5] V porovnání se skleněnými jsou však křehčí. [2] Uhlíková vlákna se vyrábějí z celulózy, polyakrylonitrilu a smoly. Celulózová vlákna mají horší strukturu, jejich využití je zejména u izolačních materiálů, kde je zapotřebí jejich vysoká teplotní odolnost. Polyakrylonitril má vynikající vlastnosti, kterými jsou například vysoká odolnost vůči světlu a povětrnostním podmínkám. Vlákna se vyrábějí i ze smoly, kde vzhledem k nízké ceně suroviny jsou poměrně levné. Jejich výhodou jsou velmi dobré elektrické a tepelné vlastnosti. Jejich nevýhodou je nižší pevnost v tahu. [5]

1.1.3 Aramidová vlákna

Aramidová vlákna jsou nejlehčí vyztužující vlákna, disponují i vysokou měrnou pevností, jejich hustota je $1,45 \text{ g/cm}^3$. [5] Před lomem tato vlákna vytvoří šíje se značnou lokální deformací. [1] Jejich měřené vlastnosti se však výrazně liší ve směru vlákna a v příčném směru, vlákno je anizotropní. Jejich využití je vhodné například u lehkých konstrukcí s vyšším tahovým namáháním, musí se však brát ohled na to, že jejich mez pevnosti v tlaku a ohybu je značně horší. Jakožto organické vlákno má i výrazně horší odolnost vůči vysokým teplotám. Vlákno je náchylné proti kyselým roztokům a vlhkosti.

V kompozitu dokáží čelit teplotě až 300 °C a neroztaví se, proto se i využívají jako materiál pro protipožární ochranné obleky. [5]

1.1.4 Přírodní vlákna

Z přírodních vláken se pro vyztužování používají pouze vlákna rostlinná, tvořená celulózou. Využívají se vlákna z lnu, konopí, bavlny, juty, sisalu a remí. Výhodou těchto přírodních materiálů je jejich čichová nezávadnost při měnících se klimatických podmínkách, nízká hustota, tak i jejich odolnost vůči stárnutí. Díky své nízké hmotnosti se často využívají pro lehké konstrukce. Vlákna však mají svou omezenou délku a značná nevýhoda je náchylnost vůči vlhkosti. [5]

1.2 Matrice

Pod tímto označením se rozumí materiál, který prosycuje výztuže. Funkcí matrice je udržení geometrického tvaru kompozitního materiálu. [5] Matrice spojuje vyztužující fázi a přesouvá do ní zatížení. [2] Případně přenáší zatížení z vlákna na vlákno. Ochrana před okolními vlivy je neméně důležitá funkce matrice. [5]

1.2.1 Kovová matrice

Tyto matrice se používají již od 60. let dvacátého století, kdy se využívala pro zpevnění lehkých kovů především borová a křemičitá vlákna. [2] Využívá se tam, kde nedostačují vlastnosti slitin, zejména pak její pevností a odolností proti tečení. Kupříkladu použije-li se matrice slitiny na bázi niklu a pro výztuž se použijí wolframová vlákna, docílí se vyšší odolnosti proti tečení za vysokých teplot. Oproti polymerním matricím dosahují též vyšší pevnosti, tuhosti a hlavně houževnatosti. [5] Výhodou kovových matric je vysoký koeficient tepelné roztažnosti, vysoká elektrická a tepelná vodivost. [2] S těmito matricemi v kombinaci s amorfní fází se lze v elektrotechnice setkat u materiálů s vynikajícími magnetickými vlastnostmi. [6]

1.2.2 Keramická matrice

Keramika se řadí mezi přední polykrystalické materiály v elektrotechnice. Má celou řadu složení a s jejím využitím se lze setkat od izolačních hmot po speciální dielektrika. [7] Konstrukční keramika se vyznačuje svojí křehkostí a poměrně nízkou pevností. Použijí-li se však kompozity s keramickou matricí i vlákny, docílí se velké pevnosti a značné chemické i

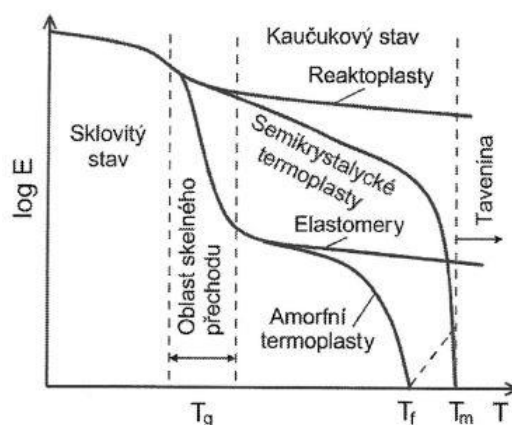
tepelné odolnosti. Pro dobrou lomovou houževnatost lze využít ke keramické matici kovových vláken. Kompozity s keramickou maticí jsou složité pro výrobu, dosahují však vyšší žárupevnosti než slitiny niklu. [2] Keramiky pro elektrotechniku řadíme do těchto skupin: [7]

Silikátové – směs krystalických oxidů kovů a silikátů s podílem fáze (např. kamenina, porcelán, steatit, korundová keramika)

Bezsilikátové – sloučeniny nebo pevné roztoky oxidů kovů (např. piezoelektrotechnika, feroelektrika, keramické vodiče)

Oxidové – pouze z žáruvzdorného oxidu kovu (např. Al_2O_3 , MgO , UO_2 , ThO_2)

Bezoxidové – vyrobené z vysokotavitelných sloučenin (např. nitridy, karbidy, sulfidy)

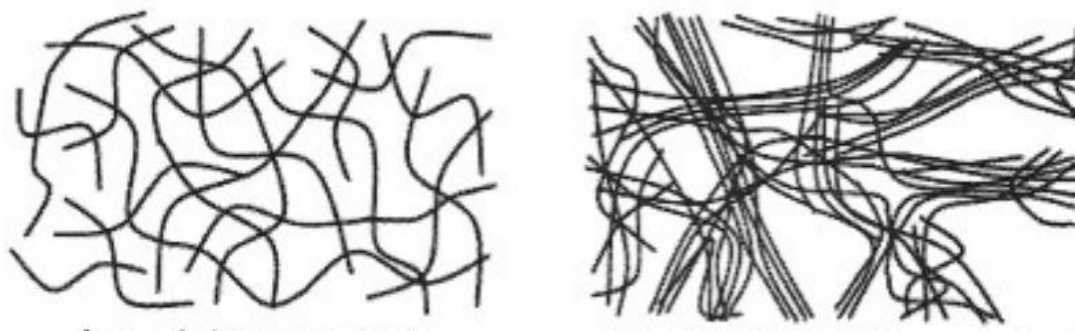


Obr. 3 Závislosti modulů pružnosti různých skupin plastů na teplotě (převzato z [6])

1.2.3 Termoplastová matrice

Termoplast je druh plastu, který lze vratně teplem uvést do plastického stavu a ochlazením do stavu tuhého. [8] Vzhledem k velkému množství termoplastových matic je obtížné obecně porovnávat jejich vlastnosti. Termoplasty na rozdíl od reaktoplastů mají rozdílné zpracovatelské a uživatelské vlastnosti. Mezi reaktoplasty řadíme například reaktivní pryskyřici, která se za normální teploty dobře smáčí a prosycuje vlákna výztuže. Je třeba ji napřed chemicky vytvrdit, aby se docílilo konečné konzistence. Oproti tomu

termoplasty jsou za normální teploty ve skupenství pevném. Dostatečné tekutosti dosahují až při teplotách vyšších, než je jejich teplota tání, obvykle nad 200 °C. Teprve pak se můžou zpracovávat a tvarovat. Je třeba, aby vlastnosti matrice splňovaly požadavky na tvarovatelnost a chemické vytvrzení. Jelikož termoplasty i reaktivní pryskyřice se běžně zpracovávají lisostříkem při zvýšené teplotě, pak je třeba zařadit na závěr proces chlazení. [5]



Obr. 4 Příklad amorfního (vlevo) a semikrystalického (vpravo) termoplastu nadmolekulární struktury polymeru (převzato z [6])

Polyetylen (PE)

Je řazen mezi jeden z nejjednodušších termoplastů, který je vyráběn polymerací. [7] Vlastnosti PE jsou silně závislé na stupni krystality, prostorovém uspořádání merů, molekulové hmotnosti a řetězci makromolekuly. Se stoupající krystalinitou stoupá chemická odolnost PE. [8] Vlivem dlouhodobého působení nejen elektrických a tepelných faktorů dochází k rychlejšímu stárnutí. [10] Za běžné teploty je odolný proti vodě a neoxidujícím chemikáliím, avšak za vyšších teplot je polyethylen napadán některými druhy polárních rozpouštědel. Do teplot okolo 90 °C je tvarově stálý, je však velice odolný vůči nízkým teplotám, křehne až okolo - 120°C. [8] Polyetylen je hojně používán jako elektroizolační materiál pro vysokonapěťové kabely. [10]

LDPE – Nízkohustotní polyethylen dosahuje dobrých fyzikálních a tepelných vlastností. [11] Ve srovnání se zasíťovaným XLPE dosahuje nízké teplotní vodivosti. [12] Ta dosahuje hodnoty okolo 0,32 W/(m·K). [11] LDPE má oproti HDPE větší pružnost. [13]

HDPE – Vysokohustotní polyetylen s hustotou v mezích 0,941 – 0,965. Oproti LDPE má HDPE větší podíl krystalických oblastí. Pevnost v tahu a odolnost proti trhlinám je určena velikostí krystalické oblasti. [13]

XLPE – Je hojně používán jako izolátor vysokonapěťových kabelů. Mezi jeho vlastnosti patří vysoká mechanická pevnost a pružnost, dobrá odolnost proti chemikáliím, snadné zpracování a nízká cena. Není vhodné ho však používat jako podzemní a distribuční kabel. Je náchylný na znečištění a neočekávané počasí. [14] Při špatných okolních podmínkách má velice rychlou degradaci, která způsobuje sníženou spolehlivost a životnost. Má též problémy s akumulací prostorového náboje. [12]

Polyimid (PI)

Řadí se mezi perspektivní polymery s velmi dobrou houževnatostí. [7] Tento polymer je známý svou vysokoteplotní odolností. Mezi jeho výhody se řadí pevnost a rozměrovou stabilitu. Mez tečení je na vysoké úrovni i při teplotách nad 260 °C. PI je vhodný pro náročné aplikace z pohledu tření a opotřebení, má dlouhou životnost a snižuje požadavky na údržbu. [15] Používá se jako součást vysoce výkonných dielektrických materiálů. [41] Zejména pak k opláštění kabelů. [7] Dosahuje vysoké relativní permitivity. [41] Lze se s ním setkat i v polovodičovém a kosmickém průmyslu. [15]

Polyvinylchlorid (PVC)

Nejstarší a nejvýznamnější syntetický plast, který je velice známý pod označení PVC. [8] Známy též pod obchodním názvem Neralit. Jedná se o jeden z nejrozšířenějších plastů, který má nižší náklady na výrobu. Dalšími jeho výhodami je odolnost proti kyselinám, minerálním olejům, alifatickým uhlovodíkům, chemická inertnost, nehořlavost a nerozpustitelnost ve vodě a mnoha dalších organických rozpouštědlech. Využití nachází ve změkčené formě pro izolační pláště vodičů, ohebné vodiče. U neměkčené formy se s ním lze setkat například u elektroizolačních materiálů, přístrojových a rozvodných krabic. [7]

Polyetherimid (PEI)

Jedním z průlomů v chemickém inženýrství byl vynález termoplastických polyetherimidů. [16] Amorfni termoplast, který má vysokou mechanickou pevnost a tuhost. Dosahuje vysokých trvalých provozních teplot, které se pohybují okolo 170 °C. Má vysokou rozměrovou stabilitu. Jako elektrický izolant nabývá dobrých hodnot, podobně tomu je i u chemické odolnosti. [17]

Polyethylen naftalát (PEN)

Je to semiaromatický transparentní polyester. [18] Dosahuje některých lepších vlastností než polyethylentereftalát (PET), těmi jsou mechanické, chemické a elektrické vlastnosti. [19] Nelze nezmínit i nižší teplotní roztažnost a smrštitivost. Vzhledem ke své nízké propustnosti kyslíkem je vhodný pro produkty náchylné na oxidaci. Využívá se pro některé flexibilní tištěné obvody nebo třeba optické displeje. [18] Své využití nachází i mezi elektrickými izolacemi. [19]

1.2.4 Reaktoplasty

Reaktoplasty jsou plasty, které lze za zvýšené teploty nevratnou chemickou reakcí převést z plastického do tuhého stavu. [8] Jedná se o kapalné, případně tavitelné pryskyřice, které se samostatně, či za pomoci jiné složky vytvrzují polyadici eventuálně polymerací bez odštěpení těkavých složek. Tyto pryskyřice se řadí do skupiny reaktoplastů, které se nejčastěji používají pro výrobu kompozitů. [5]

Nenasycená polyesterová pryskyřice (UR)

Díky svým vynikajícím vlastnostem patří UR-P mezi nejčastěji používaný materiál v kompozitech. Ve formě kompozitu se využívá až ze 70 %. Je levný, spolehlivý a má široké spektrum využití jako licí pryskyřice. Tvoří ji nasycená karbonová kyselina s alespoň jednou další složkou je alkohol. Jedná se o bezbarvé, až lehce nažloutlé roztoky v reaktivních rozpouštědlech. Pryskyřice se rozpouští v monomerním rozpouštědle, nejběžněji se využívá styren. Může se vytvrzovat za normální až zvýšené teploty, kde nevznikají vedlejší těkavé

produkty. Během vytvrzování se uvolňuje reakční teplo a také dochází k smrštění o 5–9 %. Mezi její výhody patří i odolnost vůči povětrnostním podmínkám, avšak neúplně odolávají alkalickému namáhání. Vzhledem k využití styrenu mají negativní vliv na životní prostředí. [5]

Vinylesterová pryskyřice (VE)

VE se vyznačují svojí vysokou houževnatostí a také chemickou odolností oproti polyesterovým pryskyřicím. Další jejich výhodou je vyšší odolnost v tahu, která je větší než 6 %. Vyznačují se též vysokou tvarovou stálostí za tepla. Kvůli využití styrenu je však zátěží pro životní prostředí. Využívají se především v prostředích s vysokým korozním namáháním. Lze se s nimi setkat například v tepelných regenerátorech, velkorozměrových troubách pro odvod čistého plynu v odsiřovacích zařízeních, chladících věžích a pračkách. V elektrotechnice se využívají při výrobě rotorových listů, kde vytlačili UP. [5]

Epoxidové pryskyřice (EP)

Pro svou vysokou kvalitu se kombinují s dražšími a vysokopevnostními výztužemi, kam řadíme například uhlíková vlákna. Tyto matrice jsou 3 – 4krát dražší oproti UP. K jejím výhodám patří velmi dobré mechanické vlastnosti. [5] EP též dosahuje vynikajících adhezních vlastností, čehož se využívá u lepidel. [7] Za normální teploty mají tyto látky skupenství kapalné až pevné, mohou však obsahovat přidané pomocné látky jako třeba rozpouštědla. Pokud se provádí vytvrzování alkalickými aminy za studena, je poté dosaženo vyšší odolnosti proti alkáliím a částečnou chemickou odolností proti kyselinám. Jestliže je vytvrzováno za tepla s využitím anhydridů kyselin, získám se lepší odolnost vůči horké vodě a kyselinám. Výrobek je však neodolný proti alkáliím. Použije-li se vytvrzování pomocí aromatických aminů, pak se odolnost proti alkáliím a kyselinám vyrovnají. [5] Epoxidová pryskyřice je často používána jako izolační materiál elektrických strojů. [20] Její využití má však mnohem širší spektrum. Je jedním z nejběžnějších izolačních materiálů používaných v elektrotechnice. [21] Jedním z takových uplatnění je komplexní impregnace vinutí elektrických strojů, kde se využívá například průmyslové epoxidové pryskyřice 3750 LV. Ta je charakteristická vysokou vazební pevností a nízkou viskozitou při zpracování. [22]

Fenolické pryskyřice (PF)

Vůbec první čistě syntetické pryskyřice [8] Jejich výroba probíhá kondenzací fenolů a z 30 až 50 % vodných roztoků aldehydů. Jejich využití při výrobě kompozitních materiálů je nízké. Mezi jejich výhody se řadí vysoká chemická i tepelná odolnost, ale také tvarová stálost. Jsou však zatíženy použitím kyselin a odštěpovacích reakčních zplodin. Kvůli své křehkosti musí být pro celou řadu konstrukčních aplikací modifikovány. Využívají se jako pojiva pro izolační materiály (zvuková, tepelná) nebo při výrobě komutátorů u elektromotorů. [5]

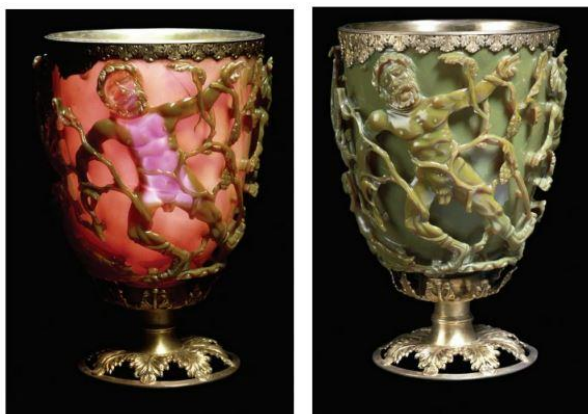
2 Nanomateriály

Nanokompozitní materiály jsou kompozity, které obsahují složku s alespoň jedním rozměrem v nano. [23] Jestliže těleso začneme zmenšovat nejméně v jednom rozměru, tak se nám zvětšuje velikost jeho povrchu vůči objemu částic. Začínají se projevovat vlivy povrchové energie pro plynné i pevné soustavy. Donedávna bylo uvažováno o nejmenších strukturních útvarech v klasické materiálové vědě v okolí přibližně 1 μ m. U rozměrů kolem desítek nanometrů a níže se začínají projevovat kvantové efekty. Velikost atomu je přibližně půl nanometru a v okolí tohoto rozměru probíhají chemické reakce, se kterými se zabývá až poslední období. Vzhledem k těmto skutečnostem je rozměr nano v materiálech konečný a menší pikomateriály už vzhledem k rozměrům atomů a molekul nemůžeme uvažovat. [3] Oproti mikročásticím je potřeba u nanočástic menší množství k dosažení lepších vlastností kompozitu, ať už mechanických, elektrických nebo tepelných. [24]

2.1 Historie

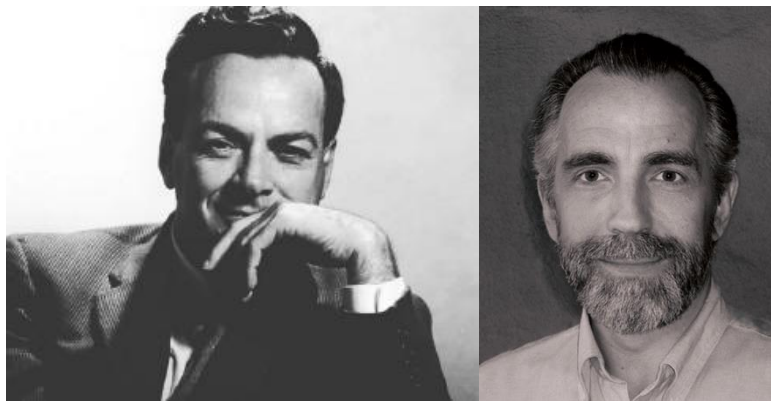
Nanomateriály se využívaly již od prehistorických dob, jelikož kouř z ohně obsahuje nanočástice (např. fullereny, grafen a uhlíkové nanotrubic), které byly využívány například s vosky pro jeskynní malby. [25] Od dob starověku si lidé pokládali filozofické otázky, co se stane, když se budou materiály dělit na menší a menší části. [3] Nanomateriály se používaly v historii v různých časových obdobích a na různých místech. Na první kovové nanočástice je možné narazit již ve 14. století př. n. l., kdy jich bylo využíváno egyptskými a mezopotamskými výrobci skla. V Itálii v 12. – 10. století př. n. l. bylo objeveno červené sklo, které využívalo měděných nanočástic. [25] Mezi nejzajímavější příklad využití

nanokompozitů patří římský pohár Lycurgus, který je nejstarší známé dichroické sklo. Při různých vlnových délkách světla šálek vyzařuje rozdílnými barvami. Při přímém osvětlení vykazuje zelené zbarvení, při zadním osvětlení červenofialové. Tento dichroismus je zapříčiněn příměsí nanočástic ve skle. Těmito nanočásticemi jsou zlato a stříbro o průměru 50–100 nm. [26]



Obr. 5 Rozdílné zbarvení poháru Lycurgus (převzato z [26])

Ve středověku se kupříkladu k výrobě šavlí využívalo kromě oceli také nanodrátů cementitu a uhlíkových nanotrubic. [25] Dalším důležitým objevem je Brownův pohyb, který se zabývá perkineti-ckým seskupením částic. Ten nejprve pozoroval na hladině alkoholu pomocí prachových částic Jan Ingenhouszem roku 1785 a později roku 1824 Robert Brownem, který tento pohyb pozoroval na částicích ve vakuolách plynu. [6] Důležitým horizontem je však rozvoj elektronové mikroskopie ve třicátých letech dvacátého století. To mělo za následek lepší vizualizaci materiálů, včetně nanomateriálů. Jako první popsal uhlíkové nanotrubic Radushkevich a Lukyanovich roku 1952 pomocí elektronové mikroskopie. Za přelomové datum je považován 29. prosinec 1959, kdy americký fyzik Richard P. Feynman pronesl svou přednášku s názvem „There's Plenty of Room at the Bottom“ („Tam dole je spousta místa“). Tato přednáška otevřela nový obor, který je znám pod jménem, nanotechnologie“. K velké popularizaci této revoluční myšlenky nanotechnologie přispěl Erick Drexler, který roku 1986 vydal knihu „Engines of Creation: The coming Era of Nanotechnology“ („Stroje stvoření: Nástup éry nanotechnologie“). [25]



Obr. 6 Richard P. Feynman (vlevo) a Kim E. Drexler (převzato z [27], [28])

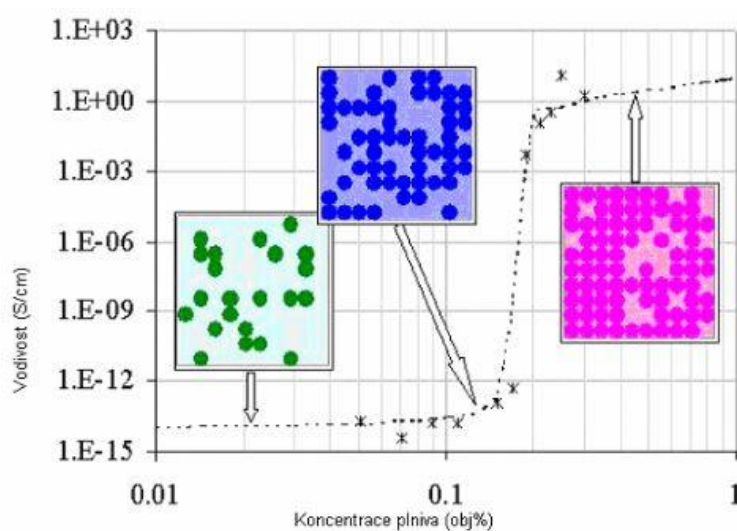
Obrovský rozmach však přišel až po objasnění struktury uhlíkových nanotrubic od Sumia Ijima. Růst využití nanotechnologie každým rokem značně stoupá a nedá se očekávat, že by se tento trend měl v blízké době zastavit. [25] Vzhledem ke svým vlastnostem a možnostem designu jsou považovány nanokompozity za materiál 21. století. [23]

2.2 Vlastnosti nanokompozitů

Nanokompozity jsou velice výkonné materiály, které mají neobvyklé kombinace vlastností. [23] Jejich vlastnosti jsou samozřejmě závislé na množství, materiálu a mechanismu modifikace nanoplňiva. Rozložení nanoplňiv a kompatibilita polymerní matrice jsou největším problémem kvůli aglomeraci nanočástic [24]. Ta značně snižuje poměr povrchové plochy nanočástic k objemu, což omezuje využití vlastností nanoplňiva. [21] Aglomerace je zapříčiněna vysokou akumulací nanočástic, čímž je ovlivněna homogenita dispergovaných nanočástic v polymerní matrici. Homogenita disperze je důležitá pro optimalizování izolačních vlastností nanokompozitu. Těmito vlastnostmi jsou například relativní permitivita, prostorový náboj, dielektrické ztráty. [24] Využitím vhodné zpracovatelské techniky lze dosáhnout lepší rovnoměrné disperze. [21] Ta je také ovlivněna povrchovou charakteristikou nanočástic. Zvýšením povrchové hydrofilicity nanočástic je dosaženo lepší rovnoměrné disperze. Na izolační vlastnosti polymerních nanokompozitů mají vliv i charakteristiky rozhraní mezi organickými a anorganickými sloučeninami. Izolační vlastnosti ovlivňuje i pevnost mezifázového spojení. [24]

2.2.1 Perkolační teorie

Teorie se zabývá závislostí vodivosti na koncentraci plniva náhodně rozptýlených částic v nevodivé matrici. [9] Je velice důležitá z hlediska elektrických vlastností kompozitního materiálu. Oblast perkolačního prahu je charakteristická tím, že zde dochází k ostrému přechodu mezi izolátorem a vodičem. Objemové množství nanočástic má tak vliv pro zlepšení jeho vodivých, dielektrických, tepelných a mechanických vlastností. Při užití jiných nanočástic lze vyrábět feromagnetické nebo třeba feroelektrické polymerní materiály. [29]



Obr. 7 Závislost měrné elektrické vodivosti na koncentraci plniva (převzato z [9])

Oblast pod perkolačním prahem

Pokud je v kompozitním materiálu menší objemový podíl plniva než kritický, pak se vodivost kompozitu mění jen nepatrně, jsou přibližně na hodnotách čisté matrice. Částice mají mezi sebou velkou vzdálenost, proto nedochází ke vzniku vodivé cesty. Oblast pod perkolačním prahem se počítá vztahem: [9]

$$\sigma_c = \sigma_m (V_{\text{kritické}} - V_f)^{-q} \quad (2.1)$$

vodivost kompozitu - σ_c [S/cm], vodivost matrice - σ_m [S/m], kritický objemový podíl při překročení prahu – $V_{\text{kritické}}$, objemový podíl plniva – V_f , kritický exponent pod oblastí perkolačního prahu – q [9]

Oblast perkolačního prahu

Pro tuto oblast je charakteristický prudký nárůst kontaktů mezi částicemi plniva při drobném nárůstu objemu plniva, vodivost kompozitu v tomto bodě prudce roste. Oblast perkolačního prahu se počítá vztahem: [9]

$$\sigma_c = \sigma_f (\sigma_m - \sigma_f)^S \quad (2.2)$$

vodivost kompozitu - σ_c [S/cm], vodivost plniva - σ_f [S/m], vodivost matrice - σ_m [S/m], kritický exponent pro oblast perkolace – S [9]

Oblast nad perkolačním prahem

Tato oblast nad perkolačním prahem je závislá na dimenzi (2D, 3D), není však závislá na typu perkolace. Vodivost kompozitu se počítá vztahem:

$$\sigma_c = \sigma_f (p - p_c)^t \quad (2.3)$$

vodivost kompozitu - σ_c [S/cm], vodivost plniva - σ_f [S/m], pravděpodobnost nalezení vodivé fáze nad kritickou koncentrací – p , kritická pravděpodobnost nalezení vodivé fáze – p_c , kritický exponent pro oblast nad perkolačním prahem – t [9]

2.2.2 Prostorový náboj

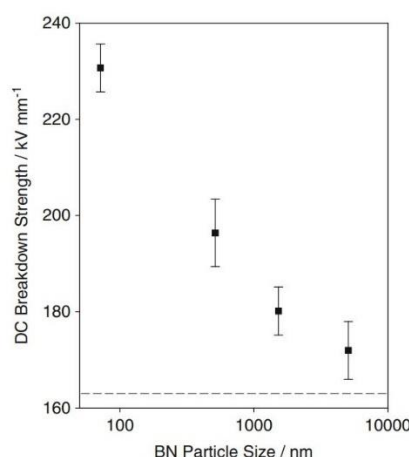
Prostorovému náboji se v poslední době přikládá vyšší pozornost, než tomu bylo dříve. Důvodem zvýšeného zájmu o prostorový náboj jsou vrstvené a kompozitní materiály. Tyto materiály jsou nehomogenní. Jednou z podmínek pro vznik prostorového náboje je existence nehomogenit a přítomnost volných nosičů náboje. Nehomogenitou myslíme nečistoty, bublinky, praskliny, vakuoly a obdobné defekty dielektrika. Na tyto nehomogenity se po vložení do elektrického pole začnou zachycovat migrující volné nosiče, které po

přeskupení vytvoří jinou prostorovou hustotu prostorového náboje. Nejvýznamnějším efektem zformovaného prostorového náboje je značné zkreslení průběhu intenzity elektrického pole v tloušťce materiálu. Následkem toho se značně ovlivňují vodivostní jevy a elektrická pevnost. [30]

2.2.3 Elektrická pevnost

Pakliže se zvýší napětí na izolantu nad kritickou hodnotu, tak dochází k lavinovému nárůstu počtu volných nosičů elektrického náboje a jejich vyšší pohyblivosti. To má za následek trvalý průraz u pevných izolantů, nebo dočasně při přeskočení u kapalných nebo plynných izolantů, izolant přestává plnit svou funkci. [7] Bylo prokázáno, že u epoxid – TiO₂ nanokompozitu s rostoucím množstvím mikroplniva klesá jeho elektrická pevnost již od nulového hmotnostního podílu mikročástic. Oproti tomu epoxid – TiO₂ nanokompozit vykazuje extrémně malé změny stejnosměrné krátkodobé průrazné pevnosti až do 10 hm. % hmotnostního podílu nanoplňiva, po překročení 10 hm. % již výrazněji klesá elektrická pevnost. Epoxidový ZnO a epoxidový vrstvený silikátový nanokompozit po přidání pouhých 0,5 – 1 hm. % nanočástic zvyšují výkon střídavého průrazu. Lze říci, že nanokompozity mají lepší vlivy na elektrickou pevnost oproti mikkompozitům. [31] Elektrická pevnost je dána poměrem průrazného napětí a tloušťky: [43]

$$E_P = \frac{U_p}{d} \text{ [V/m]} \quad (2.4)$$



Obr. 8 Vliv velikosti částic na stejnosměrnou elektrickou pevnost systému na bázi epoxidu s obsahem 10 % nitridu boru (převzato z [32])

2.2.4 Rezistivita

Vnitřní rezistivita, která je zohledněna na objemovou jednotku, vyjadřuje poměr stejnosměrného elektrického pole a hustoty ustáleného proudu uvnitř izolantu. [7]

Povrchová rezistivita vyjadřuje poměr mezi intenzitou elektrického pole a proudovou hustotou v povrchové vrstvě izolantu. [7]

Důležitou vlastností v případě nanokompozitů je jejich vnitřní a povrchová rezistivita. Správným výběrem nanoplňiva do matrice ovlivňuje jeho rezistivitu, ta je samozřejmě závislá i na jeho množství, tvaru a velikosti. Jedním z nejvhodnějších plniv z pohledu rezistivity jsou uhlíkové nanotrubičky. [33]

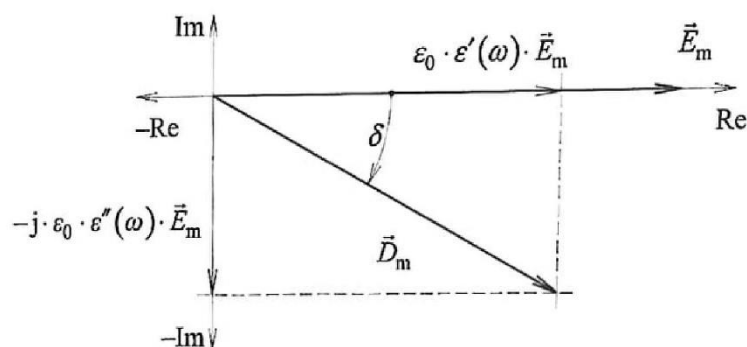
2.2.5 Permitivita

Charakteristickou veličinou dielektrika je permitivita, která je dána součtem permitivity vakua a relativní permitivity. [30]

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \varepsilon_r \text{ [F/m]} \quad (2.5)$$

$$\varepsilon_r = \frac{Cx}{C_0} [-] \quad (2.6)$$

Komplexní relativní permitivita je dána reálnou a imaginární částí. Reálná část je vlastní relativní permitivita, která vyjadřuje kapacitní charakter dielektrika. Imaginární část je dána množstvím ztrát v dielektriku namáhaném střídavým elektrickým polem. [30]



Obr. 9 Grafická interpretace komplexní relativní permitivity (převzato z [30])

Pokud plníme kompozit v řádu několika procent nanočásticemi, pak má nanokompozit nižší permitivitu než samotné plnivo i polymerní matrice. Pokles permitivity je výrazně závislý na velikosti plniva, malou závislost má na materiálu plniva. Permitivita se může zvyšovat vlivem nerovnoměrného rozptylu, hromadění nanoplniv a přimícháním nečistot. [31] Permitivita určuje kapacitu akumulace náboje dielektrického materiálu a rozložení elektrického pole. [21]

2.2.6 Dielektrické ztráty

Při vytváření izolantu je důležitým parametrem, jaké množství energie se po zatížení elektrickým polem za určitý čas, přemění kvůli struktuře izolantu ve ztráty, v elektrotechnice zejména ztráty tepelné. Tyto dielektrické ztráty je žádoucí omezit. Je také zapotřebí, aby bylo vzniklé teplo odvedeno do okolí tak, aby dielektrikum nebylo lokálně přehříváno. Přehřívání by mohlo vést až k teplotnímu průrazu a destrukci izolantu. Mechanismus vzniku těchto ztrát závisí na použitém druhu, vlastnostech a struktuře izolantu. Dalšími faktory zapříčiňujícími velikost dielektrických ztrát jsou nečistoty, chemické složení, obsah příměsí a samozřejmě i vnější fyzikální podmínky. Pokud na dielektrikum působí stejnosměrné pole, pak je rozhodujícím vlivem vodivostní proud, při jehož průchodu dielektrikem vznikají Joulovy ztráty. U střídavého napětí se kromě vodivostních ztrát uvažují i ztráty vyvolané polarizacemi a ztráty ionizační. Důležitou veličinou dielektrických ztrát je ztrátový činitel $\text{tg } \delta$, díky němu můžeme dielektrické ztráty vyjádřit pomocí ztrátového výkonu. [30] Vztah pro dielektrické ztráty je: [7]

$$P_z = \omega \cdot C \cdot U^2 \cdot \text{tg } \delta \text{ [W]} \quad (2.7)$$

2.2.7 Ztrátový činitel

Ztrátový činitel $\text{tg } \delta$ je dán poměrem imaginární a reálné části komplexní permitivity, jak můžeme vidět na Obr. 9. Uvažují-li se dielektrické ztráty ve střídavém elektrickém poli, pak je nejvýznamnější veličina právě ztrátový činitel. Vztah pro ztrátový činitel je: [30]

$$\text{tg } \delta = \frac{\varepsilon''(\omega)}{\varepsilon'(\omega)} \text{ [-]} \quad (2.8)$$

Je-li v nanokompozitu obsaženo více iontových nečistot a polárních radikálů s dipólovým momentem, pak u nízkých kmitočtů a slabých elektrických polí dochází ke snížení ztrátového činitele. [34]

2.2.8 Elektrická vodivost

Důležitým aspektem vodivosti izolantů je jejich skupenství a druhy nosičů elektrického náboje. Elektrická vodivost je spojována s pohybem elektrického náboje ve struktuře izolantu. Náboj přenášíme buď elementárními částicemi nebo ionty, případně koloidními částicemi. [7] Elektrická vodivost pevných izolantů je velice komplikovaná, jelikož při slabých elektrických polích a zároveň nižších teplotách je jejich konduktivita velmi malá. [30]

2.2.9 Polarizace heterogenního dielektrika

U materiálů s heterogenní strukturou, kam řadíme i kompozity, se vyskytuje mezifázová polarizace. Ta je způsobena akumulací nosičů náboje na rozmezí dvou fází o různých hodnotách vodivosti. Tento efekt můžeme sledovat nejen u kompozitních materiálů, jelikož se prakticky nesetkáme s ideálně homogenním materiálem. Další ukázkou jsou semikrystalické materiály, kam se řadí například polymery, kde k mezifázové polarizaci může docházet právě mezi amorfni a krystalickou fází. S tímto druhem polarizace se lze především setkat u kompozitních materiálů s obsahem vodivého plniva. [6]

3 Částicové příměsi

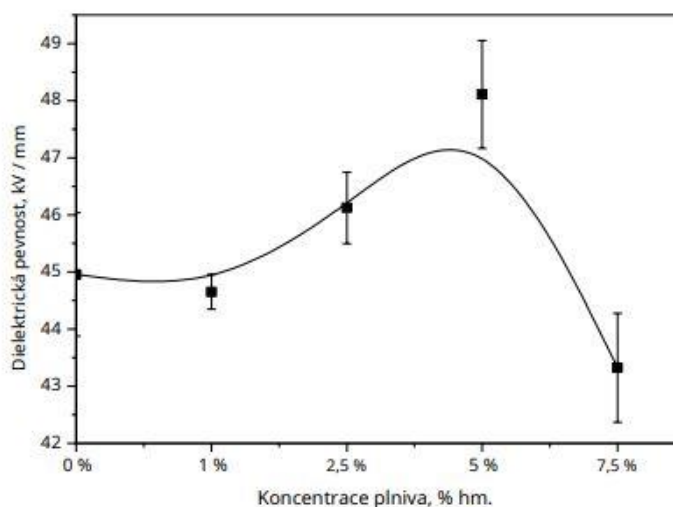
U dielektrických materiálů je důležité zachovat jejich bezpečný a spolehlivý provoz. To u těchto materiálů podmiňují skvělé termomechanické a dielektrické vlastnosti. Jednou z hlavních veličin, která určuje kvalitu, je elektrické průrazné napětí, jelikož kombinuje celou řadu složitých jevů. Výhodnějších elektrických vlastností dosahují nanokompozity oproti čistým polymerům. Za posledních 20 let se ukázalo, že lepší dielektrické vlastnosti mají nanokompozity s dielektrickými oxidy, které mají obsah plniva blízký perkolačnímu prahu. [5]

3.1 Oxid křemičitý (SiO₂)

V přírodě je oxid křemičitý velmi rozšířený. [12] Vyskytuje se nejčastěji ve formě α -křemene, ten se nachází třeba v žule nebo pískovci. SiO₂ je tvořen minimálně 22 fázemi a 12 polymorfními formami, je tak velice rozmanitý a řadí se mezi nejstudovanější oxidy. Jeho výhodou je velká odolnost proti kyselinám, kromě kyseliny fluorovodíkové. [35] Nanočástice tohoto materiálu jsou známy pro své dobré mechanické, tepelné a optické vlastnosti. [36] V průmyslu se využívá α -křemen, silikagel, křemenné sklo, diatomit a kouřový křemen. [35]

3.1.1 PVC/SiO₂

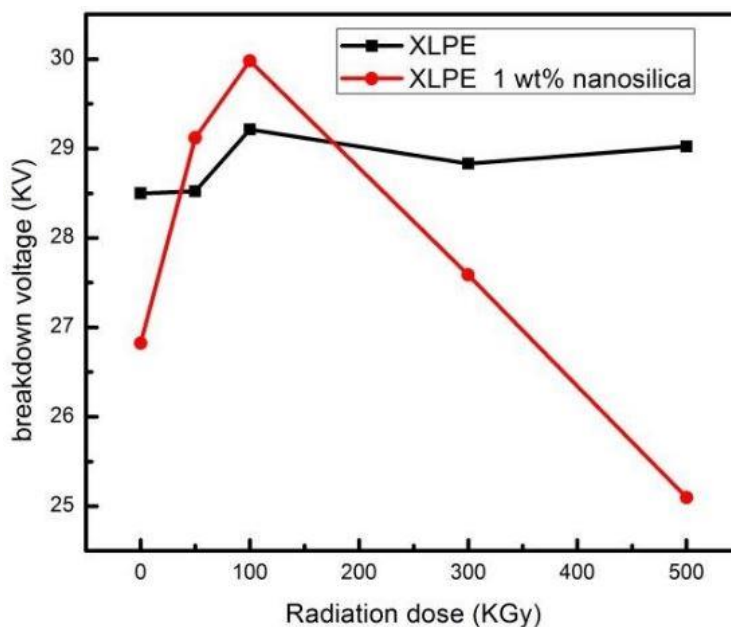
Jednou z možností využití SiO₂ je jako izolační prvek elektrických kabelů, kde můžeme využít matrice polyvinylchloridu (PVC). To má za následek výrazné zlepšení odolnosti PVC proti opotřebení. [37] Z pohledu dielektrických vlastností dochází ke zlepšení relativní permitivity a ztrátového činitele pro nízké frekvence a nižší hmotnostní podíl plniva. [38] Přidáním menšího množství nanoplňiva dokáže zvýšit až o 7 % elektrickou pevnost kompozitu, jak je vidět na Obr. č. 10. Snížení elektrické pevnosti ve vyšších koncentracích může být způsobeno zvýšením pravděpodobnosti aglomerace částic. Při vyšších koncentracích dochází k aglomeraci. [39] Přidáním nanočástic SiO₂ se prodlouží životnost PVC. [39] Tento materiál je vhodný pro použití stejnosměrných HVDC kabelů s širokým rozsahem aplikací. [38]



Obr. 10 Závislost elektrické pevnosti na koncentraci nanoplňiva pro SiO₂/PVC (převzato z [39])

3.1.2 XLPE/SiO₂

Samotný polymer XLPE má řadu nedostatků. Ty lze díky nanoplňvům do určité míry potlačit. [12] Takovou možností využití je komerční nanokompozitní materiál XLPE/SiO₂. [40] Nanoplňivo výrazně zlepšilo odolnost proti částečným výbojům. [41] Dochází ke zlepšení rozložení prostorového náboje a prodloužení životnosti kompozitu. [40] Při nízkých frekvencích dochází ke snížení permitivity, u vyšších frekvencí se vliv nanoplňiva neprojevuje. Dielektrické ztráty jsou sníženy v celé frekvenční oblasti. Tento materiál se používá pro extrudované silové kabely, které se využívají pro vysoká a velmi vysoká napětí. [41]

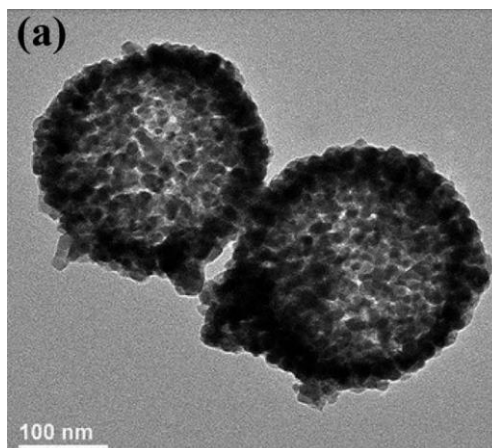


Obr. 11 Závislost průrazného napětí při různých dávkách gama záření pro čisté a plněné XLPE (převzato z [42])

3.1.3 PI/SiO₂@TiC

Lze využít i více nanoplňiv, takovou variantou je kompozit PI/SiO₂@TiC. Ten využívá matici z polyimidu, který má vysokou relativní permitivitu. Jako nanoplňivo použijeme karbid titanu (TiC), který je karbid kovu charakteristický svou vysokou elektrickou a tepelnou vodivostí a vysokým bodem tání. TiC je pokryt vrstvou SiO₂, která zabraňuje proudění elektronů a snižuje dielektrické ztráty. PI/SiO₂@TiC se využívá především jako materiál elektrod superkondenzátorů, kde je potřeba vysoká relativní

permitivita, nízké dielektrické ztráty a dobré mechanické vlastnosti. Všechny tyto požadavky tento nanokompozit splňuje. Na Obr. 21 jsou vidět jádra částic z TiC s obaly tvořenými SiO₂. [43]



Obr. 12 Nanoplivo SiO₂@TiC (převzato z [43])

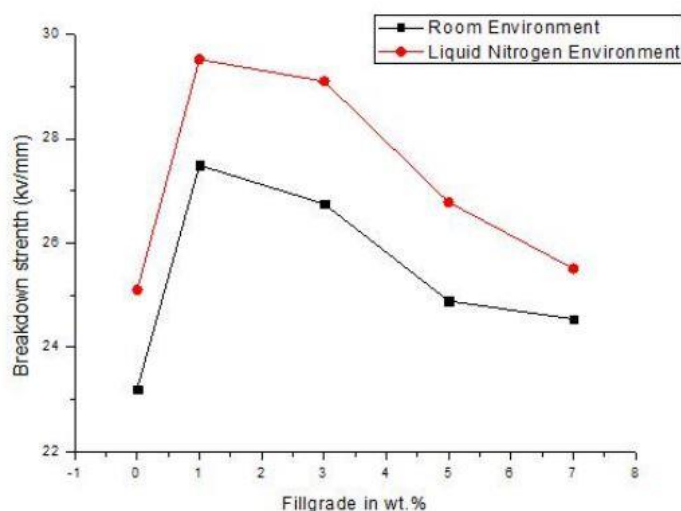
3.2 Oxid titaničitý (TiO₂)

Tento nanomateriál ze skupiny polovodičových oxidů, který se vyskytuje ve formě nanodrátů, tenkých vrstev, nanotubic, povlaků i nanočástic. Oxid titaničitý se v přírodě nachází v různých krystalových modifikacích, jako jsou minerály rutil, anatas a brookit. Tyto modifikace se využívají jako rudné zdroje k výrobě kovového titanu, ale také čistého TiO₂. Tento materiál se vyznačuje nízkou cenou a chemickou stabilitou. Mezi další možné modifikace, které lze vytvořit v laboratoři patří columbit TiO₂(II) – PCN, baddeleyit TiO₂(III) – P21c, bronz TiO₂(B) – C2/m, hollandit TiO₂(H) – I4/m a ramsdellit TiO₂(R) – Pbnm. TiO₂ lze využít pro solární panely formou organických barviv s ionty kovů, které slouží jako absorbér elektromagnetického záření. [33]

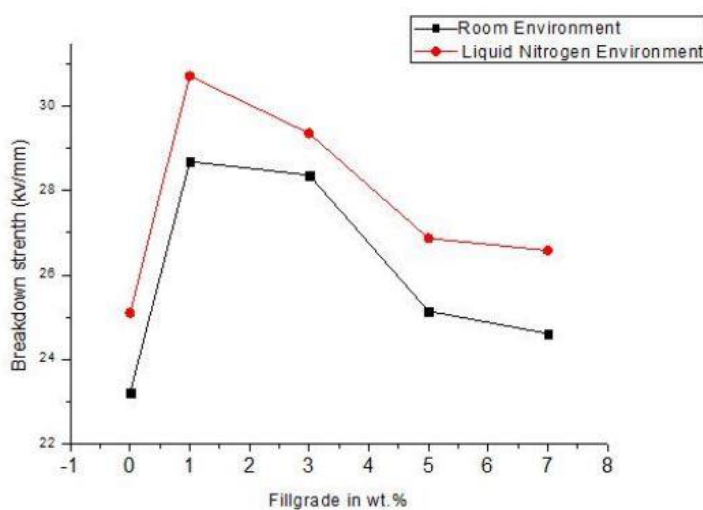
3.2.1 EP/TiO₂

Používáním supravodivé technologie lze řešit některé problémy v energetice. Supravodivá technologie má celou řadu výhod, avšak je třeba u jejích izolačních materiálů počítat s nízkými teplotami, ty mohou být způsobeny kapalným dusíkem. K tomu se může použít například epoxidová pryskyřice s nanometrickými přísadami TiO₂. Samotná

epoxidová pryskyřice má nižší elektrickou pevnost než EP/TiO₂. Elektrická pevnost EP/TiO₂ je při teplotách kapalného dusíku vyšší než u normální teploty. Ztrátový činitel je u epoxidové pryskyřice v kapalném dusíku nižší než za normálních teplot. Přidáním nanočástic TiO₂ dochází ke zvýšení ztrátového činitele v závislosti na množství. S vyšším množstvím nanočástic se zvyšuje i hodnota dielektrických ztrát. Na následujících dvou obrázcích je znázorněn vliv elektrické pevnosti na množství, velikosti nanoplňiva a teplotě prostředí. [44]



Obr. 13 Závislost elektrické pevnosti EP/TiO₂ na obj. množství nanoplňiva TiO₂ -10 nm za normální teploty (červená) a teploty v prostředí kapalného dusíku (černá) (převzato z [44])



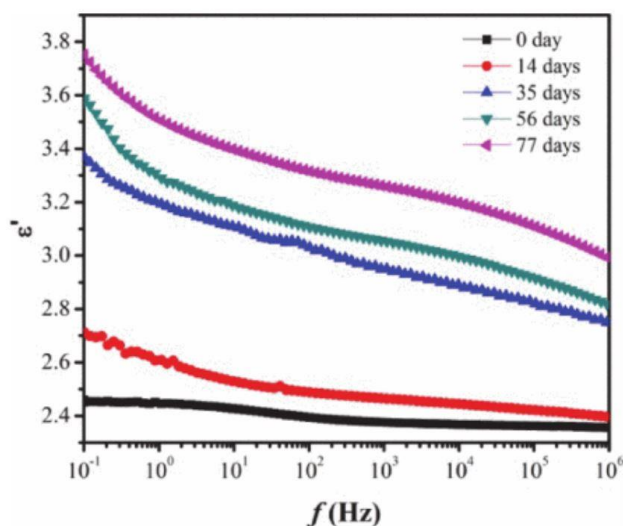
Obr. 14 Závislost elektrické pevnosti EP/TiO₂ na obj. množství nanoplňiva TiO₂ -35 nm za normální teploty (červená) a teploty v prostředí kapalného dusíku (černá) (převzato z [44])

3.3 Oxid zinečnatý (ZnO)

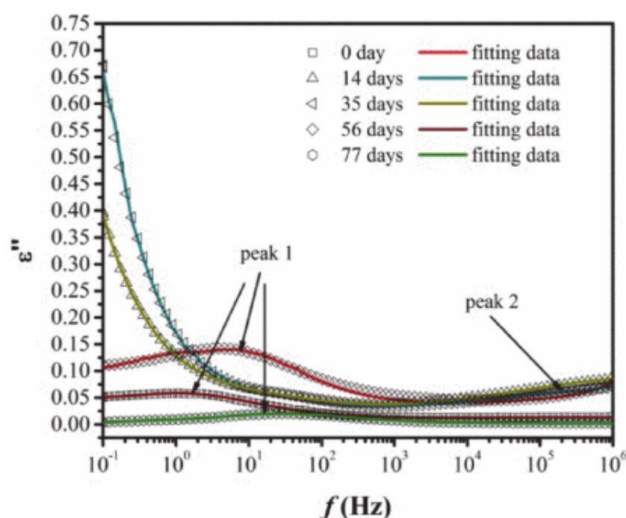
Jedná se o velmi široce používaný nanomateriál ze skupiny polovodičových oxidů. Tento materiál je svými vlastnostmi velice podobný TiO_2 . Mezi jeho výhody patří snadná dostupnost a nízká cena. Jeho funkcí je i zpomalování hoření. Používá se jako plnivo pro keramiku, plasty a skla. [33] Z pohledu elektrických veličin má ZnO velkou šířku zakázaného pásma a velkou relativní permitivitu. [45] Nanočástice ZnO mají schopnost oddálit výskyt oxidačních reakcí. [46] Vzhledem k jeho průhlednosti tenkých vrstev a dalším vlastnostem se oxid zinečnatý využívá pro světloemitující LED diody nebo třeba tranzistory. ZnO má ještě vyšší fototaktivitu s vyšší kvantovou účinností než TiO_2 . Jedná se tedy o perspektivnější materiál pro výrobu senzibilizovaných barviv solárních článků. Mají též lepší smáčivost povrchu a elektrické vlastnosti, pak jejich uplatnění lze rozšířit na výrobu baterií, senzorů, MEMs systémů, ale i v řadě optických prvků a optoelektronických aplikací. [33]

3.3.1 LDPE/ZnO

U tohoto kompozitního materiálu je využíváno míchání polymerní matrice s anorganickým plnivem. Polymerní matrice se vyznačuje vynikajícími zpracovatelskými vlastnostmi a chemickou stabilitou. Anorganické plnivo dodává vynikající elektrické chování. Perkolační práh nanočástic ZnO v matrici LDPE je v okolí hodnoty 52 % objemného množství. [47] Je-li hodnota nižší, pak jsou nanočástice ZnO dispergovány v LDPE nezávisle na sobě a kompozit se chová jako LDPE/ZnO. Jestliže překročíme hodnotu 52 % objemu, tak se nanočástice začnou spojovat do sítě, čímž se vytvoří rozhraní ZnO/ZnO. [48] Tento nanokompozitní materiál je charakteristický svým nízkým ztrátovým činitelem, ten lineárně roste s objemovým množstvím ZnO. [47] Stupeň oxidace LDPE/ZnO dosahuje lepších hodnot než čisté LDPE, takže si nanokompozit zachovává lepší dielektrické vlastnosti. Vzhledem k době stárnutí je však výhodnější LDPE/MgO. Nanokompozit LDPE/ZnO vykazuje určitou schopnost potlačení prostorového náboje. Využití nalezne u vysokonapěťových stejnosměrných kabelů, které realizují přenos na velké vzdálenosti. Vysoké stejnosměrné napětí však způsobuje akumulaci prostorového náboje v LDPE, což způsobuje zkrácení doby stárnutí a ovlivňuje elektrickou pevnost. Z těchto důvodů je výhodné využít nanoplňiva. [46]



Obr. 15 Závislost reálné části komplexní permitivity na frekvenci nanokopozitů LDPE/ZnO pro různé doby tepelného stárnutí (převzato z [46])



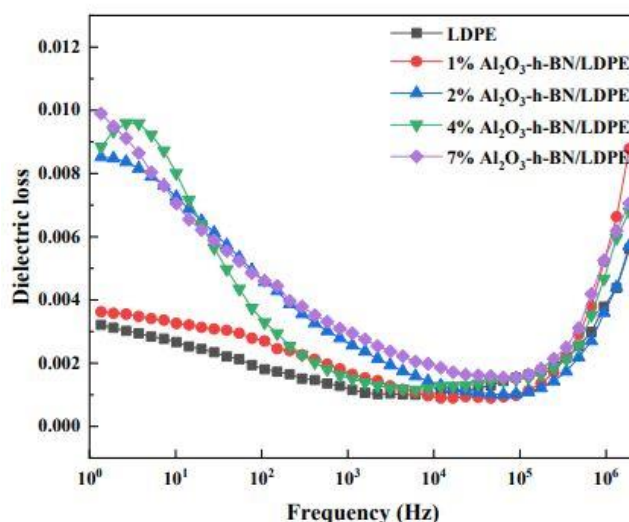
Obr. 16 Závislost imaginární části komplexní permitivity na frekvenci nanokopozitů LDPE/ZnO pro různé doby tepelného stárnutí (převzato z [46])

3.4 Oxid hlinitý (Al_2O_3)

Nanomateriály oxidu hlinitého nejsou svým rozsahem využití srovnatelné s již uvedenými oxidy železnatými nebo oxidy titaničitými. Využívají se zejména pro kompozitní konstrukční materiály, tenké ochranné a funkční vrstvy řezných nástrojů. Uplatnění mají u optických prvků a MEMs systémů. Al_2O_3 se dělá v řadě krystalových modifikací, možné varianty jsou α , δ , η , χ . [33]

3.4.1 LDPE/Al₂O₃@h-Bn

Použitím matrice LDPE a nanoplňiv oxidu hlinitého společně s hexagonálního nitridu boru vznikne materiál, který je používán jako dielektrikum u kabelů pro stejnosměrný přenos elektrické energie (HVDC). [11] Tyto kabely jsou stále perspektivní, jejich používání stoupá. Oproti kabelům pro střídavý přenos HVAC mají nižší přenosové ztráty a nepřenášejí jalový výkon. HVDC se používají například pro přenos na dlouhé vzdálenosti pobřežní větrné a fotovoltaické energie. [49] Jako vhodné objemové množství Al₂O₃@h-Bn se jeví 2 %. Při tomto množství dosahuje nanokompozitní materiál nízké relativní permitivity, vysoké elektrické pevnosti a vynikajícího potlačení prostorového náboje. Tepelná vodivost se oproti čistému LDPE zlepšila o 23,8 %. [11]



Obr. 17 Závislost dielektrických ztrát na frekvenci (převzato z [11])

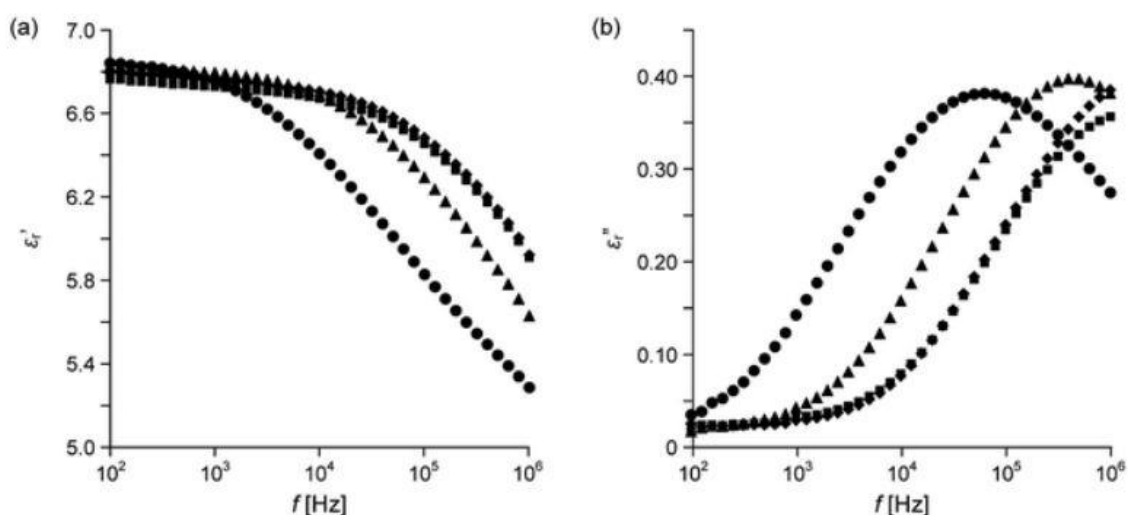
3.5 Oxid železitý (Fe₂O₃)

Pozornost z řad nanomateriálů si zaslouží i oxid železitý, případně jiné sloučeniny železa jako jsou FeO, FeO(OH) nebo Fe₃O₄. Tyto sloučeniny mají zajímavé schopnosti, kterým se v České republice věnují kupříkladu univerzity v Liberci a Olomouci. Oxid železitý je charakteristický svojí červenohnědou barvou, která se využívá pro výrobu pigmentů barev. Odstín závisí též na zpracování, velikosti částic a složení příměsí. Díky své nedráždivosti a stabilitě slouží k barvení kosmetiky, potravin a plastů. Nejen pro svou měkkost se používá i jako leštící červec k leštění technické keramiky a optických prvků. Tento materiál se využívá pro různé modifikace Fe₂O₃, Fe₃O₄ – magnetitu a kompozity

se SiO₂, Co a dalšími materiály. Takové kompozity lze využít pro přípravu magnetických nanotekutin, magnetická záznamová média, především však v bioaplikacích. [33]

3.5.1 PEI/ α -Fe₂O₃

Polymerní nanokompozity mají velkou perspektivu mezi kondenzátory. Polymerní materiály jsou ve srovnání s keramickými levnější. Kupříkladu keramický materiál BaTiO₃ je vhodný pro použití v kondenzátorech, avšak vzhledem ke své ceně je pro průmyslové aplikace nevýhodný. Náhradou může být lacinější PEI/ α -Fe₂O₃. Tento kompozit s polymerní maticí dosahuje nejlepších vlastností při 1 kHz, kde má vysokou vlastní relativní permitivitu ϵ_r' a velmi nízké dielektrické ztráty ϵ_r'' . Dielektrické vlastnosti kompozitu jsou srovnatelné s PEI/BaTiO₃ při vyšších teplotách nad 120 °C. Z tohoto důvodu je vhodný pro vysokoteplotní aplikace. [14]



Obr. 18 Závislost frekvence na ϵ_r' (a) a ϵ_r'' (b) s $\Phi=0,2$ při teplotách 40 °C (kruhy), 80 °C (trojúhelníky), 120 °C (kosočtverce), 160 °C (čtverečky) u PEI/ α -Fe₂O₃ (převzato z [14])

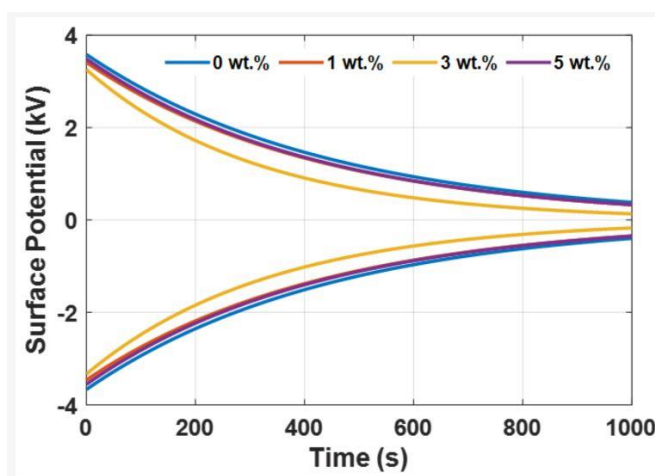
3.6 Oxid hořečnatý (MgO)

Se svojí povrchovou strukturou je řazen MgO mezi ty s nejjednodušší oxidovou strukturou. Oxid hořečnatý je bezbarvý až hnědý či černý, záleží na obsahu železa nebo nějakého jiného prvku. Mezi jeho významné pozitivní vlastnosti patří jeho žáruvzdornost, čehož se využívá nejen ve stavebnictví. Bod tání je 2800 °C a bod varu až 3600 °C. Lze se s ním setkat v jaderném, superslitinovém, lékařském nebo třeba chemickém průmyslu.

V elektrotechnice se využívá například jako izolátor. [50] MgO má lepší izolační elektrické vlastnosti než ostatní oxidová plniva. [20] Elektrický odpor je závislý na chemické čistotě a může při vysoké čistotě dosáhnout až $10^{16} \Omega \cdot \text{m}$. [50] Porovná-li se nanočástice MgO s nanočásticemi SiO₂ v polyetylenové matrici, tak MgO lépe chrání strukturu matrice a oddálí tím vznik termooxidačních reakcí. [43, 46]

3.6.1 EP/GFRP@MgO

Nanokompozit je tvořen matricí z epoxidové pryskyřice a výztuží z kombinace skleněných vláken a oxidu hořečnatého. Přidáním nanočástic MgO do epoxidové pryskyřice se zvyšují její dielektrické vlastnosti a zabraňuje akumulaci prostorového náboje. Rozhraní mezi matricí, plnivem a skleněným vláknem má vliv na tepelné vlastnosti kompozitního materiálu, proto se klade důraz na zlepšení nejen tepelných, ale i elektrických vlastností kompozitu složeného z GFRP prostřednictvím nanočástic MgO. Epoxidové pryskyřice je široce využívána pro bezpečný provoz elektrických točivých strojů, kde je kladen důraz na vylepšení vlastností za pomoci nanoplňiv. [20]



Obr. 19 Profily rozpadu povrchového potenciálu vzorků GFRP (převzato z [20])

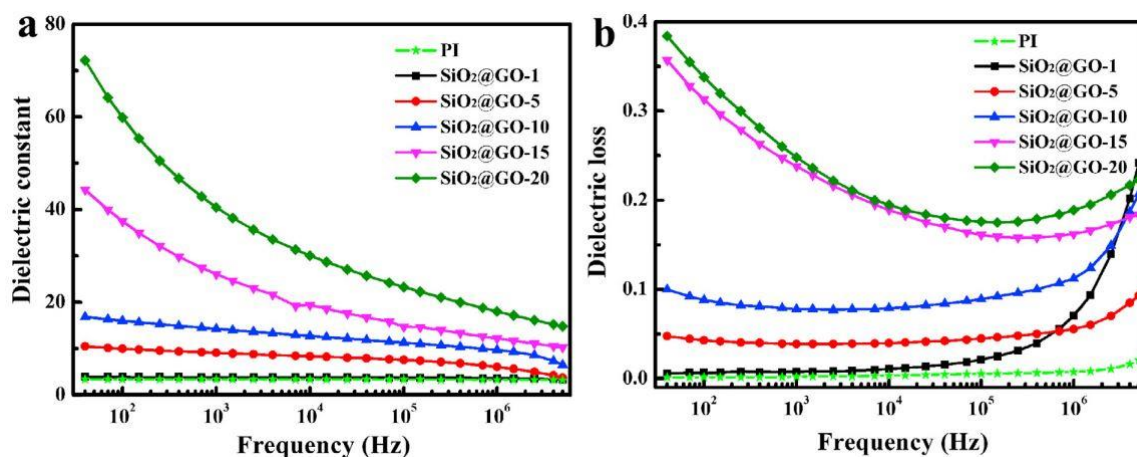
3.7 Oxid Grafenu (GO)

Jedná se o derivát grafenu s roztečí vrstev 0,7 - 1,2 nm. Na povrchu GO je hodně funkčních skupin jako například epoxid, karbonyl, karboxyl a hydroxyl. Vzhledem k těmto funkčním skupinám je GO hydrofilní a vysoce dispergovatelný v organických

rozpouštědlech. Mezi jeho nevýhody řadíme nižší elektrickou vodivost a mobilitu elektronů. Mechanické vlastnosti GO jsou v porovnání s grafenem horší. [51]

3.7.1 PI/SiO₂@GO

Oxid Grafenu se vyskytuje například v hybridním nanokompozitu PI/SiO₂@GO. SiO₂ se naroubuje v silné vrstvě na GO, kde zabraňuje přímému kontaktu GO plechů, čímž se potlačí svodový proud. Výsledný nanokompozit charakterizuje vysoká relativní permitivita a poměrně nízká hodnota ztrát. Mezi jeho špatné parametry patří jeho silná frekvenční závislost. Aplikování těchto nanokompozitů je velice žádoucí v informačním a elektrotechnickém průmyslu. Využití by díky svým nízkým dielektrickým ztrátám mohl nacházet u kondenzátorů pro uchování elektrického náboje. [52]



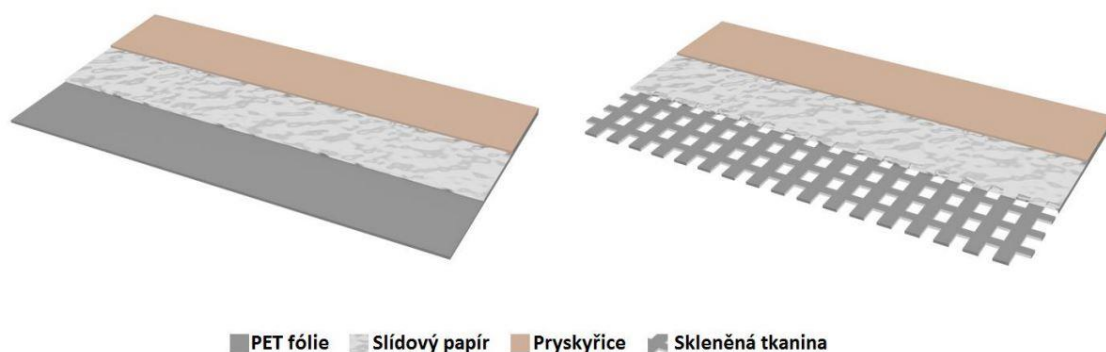
Obr. 20 Závislosti relativní permitivity a dielektrických ztrát na frekvenci (převzato z [52])

3.8 (3-Glycidyloxypropyl)trimethoxysilane (GLYMO)

Tento bifunkční organosilan se umožňuje chemicky vázat s anorganickými materiály, tak i s organickými. Je využíván jako síťové činidlo, promotér adheze nebo modifikátor povrchu. Je rozpustný v alkoholech, ketonech, aromatických nebo alifatických uhlovodících. Je odolný vůči korozi a vlhkosti. Díky jeho využití lze dosáhnout zlepšených mechanických vlastností a disperze plniva. Plnivo se může využít ve větším objemovém množství. Z pohledu elektrických veličin zlepšuje ztrátový činitel. [54]

3.8.1 3750 LV/MgO@GLYMO

Třísložkový izolační materiál, který je tvořen matricí z nízkoviskózní epoxidové pryskyřice (3750 LV), dispergovanými nanočásticemi MgO s povrchem upraveným vazebním činidlem GLYMO. Nosnou složku tvoří fólie PEN, nebo se i může využívat skleněné tkaniny. Výsledný nanokompozit má vynikající odolnost proti částečným výbojům. Mezi jeho uspokojivé vlastnosti patří elektrická pevnost. Za běžných podmínek materiál dosahuje dostatečně elektrické pevnosti, ztrátového činitele a vnitřní permitivity. Tento nový, izolační, kompozitní materiál je syntetizován za účelem eliminace rozhraní a nahrazení slídového papíru. [22]



Obr. 21 Ukázka struktury třísložkového kompozitního materiálu pro izolační účely (převzato z [22])

Závěr

Bakalářská práce je zaměřena na problematiku kompozitních materiálů, zejména těch využívaných pro dielektrické účely. Cílem této práce je obecný popis materiálů, ze kterých se jednotlivé fáze kompozitního materiálu skládají. Následně jsou uvedeny aplikace, kde je možné se s nimi setkat. Jsou vysvětleny i vybrané fyzikální vlastnosti a připomenuta historie této technologie.

V první kapitole jsou vysvětleny základní principy kompozitních materiálů. Jsou definovány pojmy včetně matrice a výztuž. Ze strany výztuže jsou uvedeny základní vláknové výztuže, které zlepšují především mechanické vlastnosti. V podkapitole Matrice jsou popsány jednotlivé typologie, které jsou případně rozvedeny do používaných polymerů. U každé matrice jsou popsány její mechanické, chemické i elektrické vlastnosti.

V druhé kapitole je věnována pozornost nanomateriálům. Nejprve jsou vysvětleny benefity užití této technologie a následně popsána historie, kde jsou uvedena pro různá časová období jejich využití. Dále jsou vysvětleny vlastnosti nanomateriálů s ohledem na pochopení negativních efektů, které způsobují neefektivní fungování těchto materiálů. Pro lepší pochopení jsou zakomponovány do této práce i některé fyzikální pojmy, které s dielektriky souvisí.

V třetí kapitole je věnována pozornost analýze nanočástic, které mohou být pro elektrotechnické účely používány. Pod tímto popisem jsou uvedeny nanokompozitní materiály, které tyto nanočástice obsahují. Jsou popsány jejich výhody a nevýhody, které jsou doplněny o jejich způsoby využití pro dielektrické aplikace. K jednotlivým nanomateriálům jsou přidány obrázky, které znázorňují vybranou zajímavost materiálu, ať už strukturu částice nebo různé závislosti veličin.

Kompozitní materiály nacházejí neustále se rozšiřující uplatnění v celé řadě odvětví průmyslu. Především ty plněné nanočásticemi, které umožňují vylepšit jejich vlastnosti. Je tedy dobré znát jejich základní principy, které jsou popsány v této bakalářské práci.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] SKÁLOVÁ, J., KOUTSKÝ, J., MOTYČKA, V. *Nauka o materiálech*. 4. vyd. V Plzni: Západočeská univerzita, 2010. ISBN 978-80-7043-874-9.
- [2] PTÁČEK, L. *Nauka o materiálu II*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002. ISBN 80-7204-248-3.
- [3] RAAB, M. *Materiály a člověk: netradiční úvod do současné materiálové vědy*. Praha: Encyklopedický dům, 1999. ISBN 80-86044-13-0.
- [4] JANČAŘ, J. *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2003. ISBN 80-214-2443-5.
- [5] EHRENSTEIN, G. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [6] HOŠEK, J. *Úvod do nanotechnologie*. V Praze: České vysoké učení technické, 2010. ISBN 978-80-01-04555-8.
- [7] KUČEROVÁ, E. *Elektrotechnické materiály*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2002. ISBN 80-7082-940-0.
- [8] DUCHÁČEK, V. *Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006. ISBN 80-7080-617-6.
- [9] LIBRA, M. *Elektrické vlastnosti nanokompozitů*. Brno, 2013. Diplomová práce. Vysoké učení technické. Vedoucí práce Polsterová, H.
- [10] HAN, Y., SUN, J., CHEN, G., XU, Z., LI, Z. Study on Electrical Properties of PE/TiC Nano-composites. In: *2020 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)* [online]. IEEE, 2020, 2020-9-6, s. 1-4 [cit. 2022-05-07]. ISBN 978-1-7281-5511-1. Dostupné z: doi:10.1109/ICHVE49031.2020.9279997
- [11] HE, L., YE, J., ZENG, J., YANG, X., LI, D., YANG, X., CHEN, Y., HUANG, Y. Enhancement in Electrical and Thermal Properties of LDPE with Al₂O₃ and h-BN as Nanofiller. *Materials* [online]. 2022, **15**(8) [cit. 2022-05-06]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma15082844
- [12] HEDIR, A., LAMROUS, O., FOFANA, I., SLIMANI F, MOUDOUD, M. Critical Issues in XLPE-Based Polymer Nanocomposites and Their Blends. THOMAS, J., THOMAS S., ZAKIAH AHMAD, Z. ed. *Crosslinkable Polyethylene Based Blends and Nanocomposites* [online]. Singapore: Springer Singapore, 2021, 2021-04-20, s. 63-83 [cit. 2022-05-07]. Materials Horizons: From Nature to Nanomaterials. ISBN 978-981-16-0485-0. Dostupné z: doi:10.1007/978-981-16-0486-7_4
- [13] RAMKUMAR, R., SUGUMARAN, P. Investigation on dielectric properties of HDPE with alumina nano fillers. In: *2016 IEEE 7th Power India International Conference (PIICON)* [online]. IEEE, 2016, 2016, s. 1-4 [cit. 2022-05-06]. ISBN 978-1-4673-8962-4. Dostupné z: doi:10.1109/POWERI.2016.8077207
- [14] MANSOR, S., NAZAR, N.S.M., AZMI, M.A., et al. Effect of ZnO Nanofiller in the XLPE Matrix on Electrical Tree Characteristics. *IEEE Access* [online]. 2020, **8**, 117574-117581 [cit. 2022-05-06]. ISSN 2169-3536. Dostupné z: doi:10.1109/ACCESS.2020.3004638
- [15] PI – polyimid. *Ensigner* [online]. [cit. 2022-05-14]. Dostupné z: <https://www.ensingerplastics.com/cs-cz/polotovary/vysokovykonne-plasty/pi-polyimid>
- [16] PANIN, S.V., LUO, J., BUSLOVICH, D.G., ALEXENKO, V.O., BERTO, F., KORNIENKO, L. A. Effect of Transfer Film on Tribological Properties of Anti-Friction PEI- and PI-Based Composites at Elevated

- Temperatures. *Polymers* [online]. 2022, **14**(6) [cit. 2022-05-06]. ISSN 2073-4360. Dostupné z: doi:10.3390/polym14061215
- [17] PEI – polyetherimid. *Ensinger* [online]. [cit. 2022-05-14]. Dostupné z: <https://www.ensingerplastics.com/cs-cz/polotovary/vysokovykonne-plasty/pei>
- [18] POLYETHYLENE NAPHTHALATE. *Polymerdatabase* [online]. 2015 [cit. 2022-05-14]. Dostupné z: <https://polymerdatabase.com/Polymer%20Brands/PEN.html>
- [19] LILLWITZ, L.D. Production of dimethyl-2,6-naphthalenedicarboxylate: precursor to polyethylene naphthalate. *Applied Catalysis A: General* [online]. 2001, **221**(1-2), 337-358 [cit. 2022-05-07]. ISSN 0926860X. Dostupné z: doi:10.1016/S0926-860X(01)00809-2
- [20] NAVEEN, J., SUKESH BABU, M., SARATHI, R., VELMURUGAN, R., DANIKAS, M.G., KARLIS, A. Investigation on Electrical and Thermal Performance of Glass Fiber Reinforced Epoxy–MgO Nanocomposites. *Energies* [online]. 2021, **14**(23) [cit. 2022-05-07]. ISSN 1996-1073. Dostupné z: doi:10.3390/en14238005
- [21] SINGHA, S., THOMAS, M. Permittivity and tan delta characteristics of epoxy nanocomposites in the frequency range of 1 MHz-1 GHz. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* [online]. 2008, **15**(1), 2-11 [cit. 2022-05-07]. ISSN 1070-9878. Dostupné z: doi:10.1109/T-DEI.2008.4446731
- [22] HORNÁK, J. *Homogenizace vnitřní struktury tříšložkového kompozitního dielektrika* [online]. Plzeň, 2017 [cit. 2022-05-21]. Dostupné z: <https://dspace5.zcu.cz/handle/11025/26478>. Konferenční příspěvek. Západočeská univerzita.
- [23] ANANDHAN, S., BANDYOPADHYAY, S. Polymer Nanocomposites: From Synthesis to Applications. CUPPOLETTI, John, ed. *Nanocomposites and Polymers with Analytical Methods* [online]. InTech, 2011, 2011-08-09 [cit. 2022-05-07]. ISBN 978-953-307-352-1. Dostupné z: doi:10.5772/17039
- [24] SAMAN, N.M., AHMAD, M.H., BUNTAT, Z. Application of Cold Plasma in Nanofillers Surface Modification for Enhancement of Insulation Characteristics of Polymer Nanocomposites: A Review. *IEEE Access* [online]. 2021, **9**, 80906-80930 [cit. 2022-05-07]. ISSN 2169-3536. Dostupné z: doi:10.1109/ACCESS.2021.3085204
- [25] BARHOUM, A., GARCÍA-BETANCOURT, M.L., JEEVANANDAM, J., et al. Review on Natural, Incidental, Bioinspired, and Engineered Nanomaterials: History, Definitions, Classifications, Synthesis, Properties, Market, Toxicities, Risks, and Regulations. *Nanomaterials* [online]. 2022, **12**(2) [cit. 2022-05-07]. ISSN 2079-4991. Dostupné z: doi:10.3390/nano12020177
- [26] VAUGHAN, A. Raman nanotechnology - the Lycurgus Cup - Letter to the Editor. *IEEE Electrical Insulation Magazine* [online]. 2008, **24**(6), 4-4 [cit. 2022-05-07]. ISSN 0883-7554. Dostupné z: doi:10.1109/MEI.2008.4665344
- [27] Richard Feynman Biography. *TheFamousPeople* [online]. [cit. 2022-05-14]. Dostupné z: <https://www.thefamouspeople.com/profiles/richard-feynman-6333.php>
- [28] POPOV, M.E., ZAITSEV, D. Drexler, Kim Eric. *Glossary of nanotechnology and related terms* [online]. [cit. 2022-05-14]. Dostupné z: <https://eng.thesaurus.rusnano.com/wiki/article14622>
- [29] MEISAK, D., MACUTKEVIC, J., PLYUSHCH, A., KUZHIR, P., SELSKIS A., BANYS, J. Dielectric Relaxation in the Hybrid Epoxy/MWCNT/MnFe₂O₄ Composites. *Polymers* [online]. 2020, **12**(3) [cit. 2022-05-07]. ISSN 2073-4360. Dostupné z: doi:10.3390/polym12030697
- [30] MENTLÍK, V. *Dielektrické prvky a systémy*. Praha: BEN - technická literatura,

2006. ISBN 8073001896.
- [31] BOČEK, J. *Aspekty aplikace nanotechnologií v elektrotechnologii*. Plzeň, 2011. Disertační práce. Západočeská univerzita. Vedoucí práce Václav Mentlík.
- [32] VAUGHAN, A.S. Nanodielectrics: The Role of Structure in Determining Electrical Properties. MITCHELL, Geoffrey R. a Ana TOJEIRA, ed. *Controlling the Morphology of Polymers* [online]. Cham: Springer International Publishing, 2016, 2016-09-07, s. 237-262 [cit. 2022-05-07]. ISBN 978-3-319-39320-9. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-319-39322-3_9
- [33] HOŠEK, J. *Úvod do nanotechnologie*. V Praze: České vysoké učení technické, 2010. ISBN 978-80-01-04555-8.
- [34] OVSÍK, J. *Sledování elektrických vlastností nanokompozitních materiálů*. Brno, 2013. Diplomová práce. Vysoké učení technické. Vedoucí práce Polsterová, H.
- [35] NOVÁK, P. *Vlastnosti lakových kompozitních materiálů plněných mikro- A nanočásticemi*. Brno, 2011 [cit. 2022-05-20]. Diplomová práce. Vysoké učení technické. Vedoucí práce ZDENKA ROZSÍVALOVÁ.
- [36] MALLAKPOUR, S., NAGHDI, M. Polymer/SiO₂ nanocomposites: Production and applications. *Progress in Materials Science* [online]. 2018, **97**, 409-447 [cit. 2022-05-07]. ISSN 00796425. Dostupné z: doi:10.1016/j.pmatsci.2018.04.002
- [37] YANG, F., HLAVACEK, V. Improvement of PVC wearability by addition of additives. *Powder Technology* [online]. 1999, **103**(2), 182-188 [cit. 2022-05-07]. ISSN 00325910. Dostupné z: doi:10.1016/S0032-5910(99)00026-1
- [38] ABDEL-GAWAD, N.M.K., EL DEIN, A.Z., MANSOUR, D.A., Hanaa M. AHMED, H.M., DARWISH, M.M.F., LEHTONEN, M. Multiple enhancement of PVC cable insulation using functionalized SiO₂ nanoparticles based nanocomposites. *Electric Power Systems Research* [online]. 2018, **163**, 612-625 [cit. 2022-05-07]. ISSN 03787796. Dostupné z: doi:10.1016/j.epr.2017.11.011
- [39] HABASHY, M.M., ABD-ELHADY, A.M., ELSAD R.A., IZZULARAB, M.A. Performance of PVC/SiO₂ nanocomposites under thermal ageing. *Applied Nanoscience* [online]. 2021, **11**(7), 2143-2151 [cit. 2022-05-07]. ISSN 2190-5509. Dostupné z: doi:10.1007/s13204-018-00941-y
- [40] ZHENG, X., LIU Y., WANG, Y. Electrical tree inhibition by SiO₂/XLPE nanocomposites: insights from first-principles calculations. *Journal of Molecular Modeling* [online]. 2018, **24**(8) [cit. 2022-05-07]. ISSN 1610-2940. Dostupné z: doi:10.1007/s00894-018-3742-4
- [41] TANAKA, T., BULINSKI, A., CASTELLON, J., et al. Dielectric properties of XLPE/SiO₂ nanocomposites based on CIGRE WG D1.24 cooperative test results. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* [online]. 2011, **18**(5), 1482-1517 [cit. 2022-05-07]. ISSN 1070-9878. Dostupné z: doi:10.1109/TDEI.2011.6032819
- [42] EL-SAYED SOLIMAN AHMED SAID et al. *Influence of gamma irradiation on the characteristic and dielectric properties of XLPE / Nano-silica composite* [online]. 2018 [cit. 2022-05-14]. Dostupné z: doi:10.14419/ijet.v7i4.29265
- [43] WANG, Y., WANG, C., ZHANG, Z., XIAO, K. Effect of Nanoparticles on the Morphology, Thermal, and Electrical Properties of Low-Density Polyethylene after Thermal Aging. *Nanomaterials* [online]. 2017, **7**(10) [cit. 2022-05-14]. ISSN 2079-4991. Dostupné z: doi:10.3390/nano7100320
- [44] JIABEI, Z., MING, Q., HONGJIE, Z., YONGQING, Z. Dielectric properties of TiO₂/Epoxy nanocomposites in liquid nitrogen environment. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* [online]. 2018, **423** [cit. 2022-05-06]. ISSN 1757-899X. Dostupné z: doi:10.1088/1757-899X/423/1/012072

- [45] SAHA, M., SASMAL, S., DAS, S., SAHANA, R., BANERJEE, A., LAHIRI, A. Studies on Electrical and Optical Properties of PVC Composites Filled with ZnO Micro Particles. In: *2021 IEEE 6th International Conference on Computing, Communication and Automation (ICCCA)* [online]. IEEE, 2021, 2021-12-17, s. 683-685 [cit. 2022-05-07]. ISBN 978-1-6654-1473-9. Dostupné z: doi:10.1109/ICCCA52192.2021.9666421
- [46] WANG, Y., WANG, C., ZHANG, Z., XIAO, K. Anti-thermal aging properties of low-density polyethylene-based nanocomposites. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* [online]. 2018, **25**(3), 1003-1013 [cit. 2022-05-07]. ISSN 1070-9878. Dostupné z: doi:10.1109/TDEI.2018.006783
- [47] TJONG, S.C., LIANG, G.D. Electrical properties of low-density polyethylene/ZnO nanocomposites. *Materials Chemistry and Physics* [online]. 2006, **100**(1), 1-5 [cit. 2022-05-07]. ISSN 02540584. Dostupné z: doi:10.1016/j.matchemphys.2005.11.029
- [48] TJONG, S.C., LIANG, G.D., BAO, S.P. Electrical properties of low density polyethylene/ZnO nanocomposites: The effect of thermal treatments. *Journal of Applied Polymer Science* [online]. 2006, **102**(2), 1436-1444 [cit. 2022-05-07]. ISSN 0021-8995. Dostupné z: doi:10.1002/app.24294
- [49] ZHOU, Y., PENG, S., HU, J., HE, J. Polymeric insulation materials for HVDC cables: Development, challenges and future perspective. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* [online]. 2017, **24**(3), 1308-1318 [cit. 2022-05-06]. ISSN 1070-9878. Dostupné z: doi:10.1109/TDEI.2017.006205
- [50] HORNAK, J., TRNKA, P., KADLEC, P., MICHAL, O., MENTLÍK, V., ŠUTTA, P., CSÁNYI, G., TAMUS, Z. Magnesium Oxide Nanoparticles: Dielectric Properties, Surface Functionalization and Improvement of Epoxy-Based Composites Insulating Properties. *Nanomaterials* [online]. 2018, **8**(6) [cit. 2022-05-14]. ISSN 2079-4991. Dostupné z: doi:10.3390/nano8060381
- [51] MU, S., YUE, J., WANG, Y., FENG, C. Electrical, Piezoresistive and Electromagnetic Properties of Graphene Reinforced Cement Composites: A Review. *Nanomaterials* [online]. 2021, **11**(12) [cit. 2022-05-07]. ISSN 2079-4991. Dostupné z: doi:10.3390/nano11123220
- [52] LIU, L., LV, F., ZHANG, Y., LI, P., TONG, W., DING, L., ZHANG, G. Enhanced dielectric performance of polyimide composites with modified sandwich-like SiO₂@GO hybrids. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* [online]. 2017, **99**, 41-47 [cit. 2022-05-07]. ISSN 1359835X. Dostupné z: doi:10.1016/j.compositesa.2017.03.029
- [53] HARDON, Š., KÚDELČÍK, J., TRNKA, P., TOTZAUER, P., HORNAK, J., MICHAL, O. The influence of ZnO nanoparticles on the dielectric properties of epoxy resin. In: *25th International Conference Applied Physics of Condensed Matter (APCOM 2019) : /Proceedings/*. Bratislava: American Institute of Physics Inc., 2019. s. 1-4. ISBN 978-0-7354-1873-8 , ISSN 0094-243X.
- [54] Dynasylan GLYMO - Description. *IMCD* [online]. [cit. 2022-05-14]. Dostupné z: <https://www.imcdus.com/en-us/products/dynasytan-glymo#product-wizard>