

Homogenizace vnitřní struktury tříložkového kompozitního dielektrika

Jaroslav Hornak
Katedra technologií a měření
Fakulta elektrotechnická
Západočeská univerzita v Plzni
jhornak@ket.zcu.cz

Homogenization of Inner Structure of Three-phase Composite Dielectric

Abstract – The main aim of this paper is to introduce a new three-phase insulating material consisting of a low viscosity epoxy resin (3750 LV) with dispersed magnesium oxide (MgO) nanoparticles with a surface treatment by silane coupling agent (γ -glycidoxypropyltrimethoxysilane) and a polyethylene naphthalate (PEN) carrier. The new insulating material is synthesized with the aim of eliminating the interface by replacing of mica paper by dispersed nanoparticles in the polymer base. Furthermore, this proposed material has comparable dielectric properties such as volume resistivity, dielectric strength or loss factor under normal conditions. Compared to commercially available materials, it stands out for its resistance to partial discharges.

Keywords – Composite; Dielectric; Epoxy; Insulation; Material; Novel; Properties.

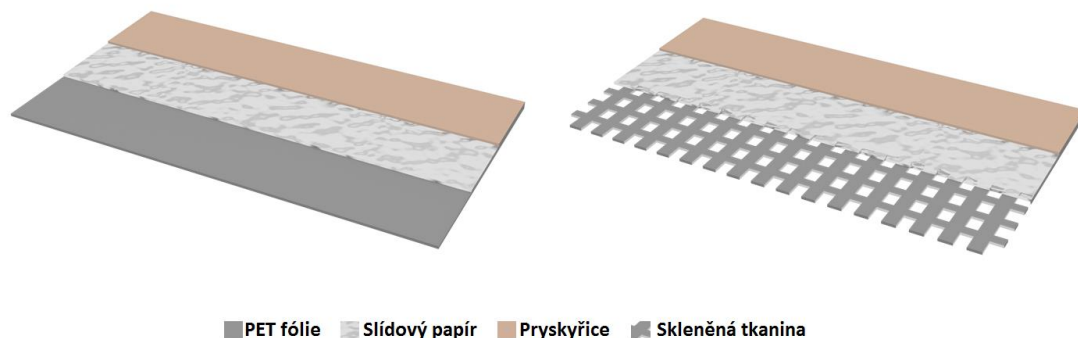
I. ÚVOD

Elektrické izolační systémy jsou nedílnou součástí velkého množství elektrických zařízení, např. generátorů nebo motorů. Z pohledu spolehlivosti je izolační systém nejslabším článkem spolehlivostního řetězce celého zařízení. Z toho důvodu je velká pozornost věnována zlepšování materiálových vlastností, ať se jedná o elektrické, mechanické či fyzikálně chemické. Požadovaných vlastností lze dosáhnout použitím kompozitních materiálů, kde je využíván efekt synergie jednotlivých složek. V současné době jsou v elektrotechnickém průmyslu využívány dvou a tříložkové izolační systémy tvořené matricí a plnivem, či v případě tříložkových kompozitů matricí, plnivem a nosnou složkou. Mezi jednotlivými složkami s rozdílnými materiálovými konstantami však vznikají rozhraní, která přispívají k tomu, že na nich za určitých okolností utkví volný nosič náboje. Volné nosiče náboje se mohou zachytit také na defektech krystalové mřížky. Proto k tomuto jevu dochází i v makroskopicky homogenních materiálech, které mohou být nehomogenní pouze v části jejich strukturální stavby [1-3].

Cílem článku je představit nový tříložkový izolační materiál tvořený nízkoviskozní epoxidovou pryskyřicí (3750 LV) s dispergovanými nanočásticemi oxidu hořečnatého (MgO) s povrchovou úpravou vazebným činidlem (γ -Glycidoxypropyltrimethoxysilane) a nosnou složkou tvořenou polyetylen-naftalátovou fólií (PEN). Nový izolační materiál je syntetizován se snahou o eliminaci rozhraní náhradou slídového papíru dispergovanými nanočásticemi v polymerním základu při současném dosažení dostatečných elektroizolačních vlastností, především dostatečné elektrické pevnosti, vnitřní rezistivity a ztrátového činitele při běžných podmínkách. V porovnání s komerčně dostupnými materiály vyniká svou odolností vůči částečným výbojům.

II. NÁVRH VNITŘNÍ STRUKTURY IZOLAČNÍHO SYSTÉMU

Izolační systémy točivých strojů jsou v současné době tvořeny třemi základními složkami. Nosnou složkou může být buď skleněná tkanina, nebo polyetylen-tereftalátová fólie (PET). U Skleněné tkaniny může jít buď o stlačená, nebo pletená vlákna. Plnivem je v obou případech slídový papír a pojivem nejčastěji novolakepoxidová pryskyřice. Vnitřní struktura stávajících kompozitů je znázorněna na Obrázku I.



Obrázek I. Struktura používaných kompozitních izolačních systémů

V následujícím textu je uveden návrh nového tříložkového izolačního systému včetně popisu jeho jednotlivých částí.

A. Matrice

Polymerním základem je průmyslová epoxidová pryskyřice 3750 LV od společnosti Elantas na bázi Bisphenol-A Epichlorohydrin, která je v průmyslu využívána díky svým výborným vlastnostem mezi které patří např. nízká viskozita při zpracování a vysoká vazebná pevnost. Díky tomu zajišťuje komplexní impregnaci vinutí elektrických strojů. Vedle výborných vlastností pro zpracování je tato pryskyřice vhodná i díky svým elektroizolačním vlastnostem, které jsou uvedeny v Tabulce I.

TABULKA I. MĚŘENÉ DIELEKTRICKÉ VLASTNOSTI PRYSKYŘICE 3750 LV*

Parametr	Hodnota	Parametr	Hodnota
$\text{tg } \delta$ (-)	0,003	ρ_v ($\Omega \cdot \text{m}$)	$6,275 \cdot 10^{12}$
ϵ_r (-)	2,95	ρ_{i1} (-)	1,57
C (pF)	48	E_p (kV/mm)	37

* měřeno při 25 °C, dle ČSN IEC 250 [4], ČSN IEC 93 [5], ČSN EN 60243-1 [6]

B. Plnivo a vazebné činidlo

Jako plnivo byl zvolen oxid hořečnatý ve formě nanočástic s průměrnou velikostí 20 nm od společnosti NanoAmor. Oxid hořečnatý je vhodným plnivem díky svým dobrým izolačním vlastnostem (šířka zakázaného pásu 7,8 eV [7]), chemické a fyzikální stabilitě, žáruvzdornosti a nízké pořizovací ceně. Pro zlepšení úrovně disperze nanočástic oxidu hořečnatého bylo použito vazebné činidlo na bázi silanu γ -Glycidoxypropyltrimethoxysilane. Důvodem použití tohoto druhu vazebného činidla je skutečnost, že dokáže vhodně interagovat společně s vybraným druhem matrice. V návaznosti na optimální stupeň plnění (1% hmotnosti) a charakter použitých

nanočástic, bylo určeno potřebné množství vazebného činidla pro dostatečnou povrchovou úpravu formulí (1)

$$X = \frac{A}{w} \cdot f, \quad (1)$$

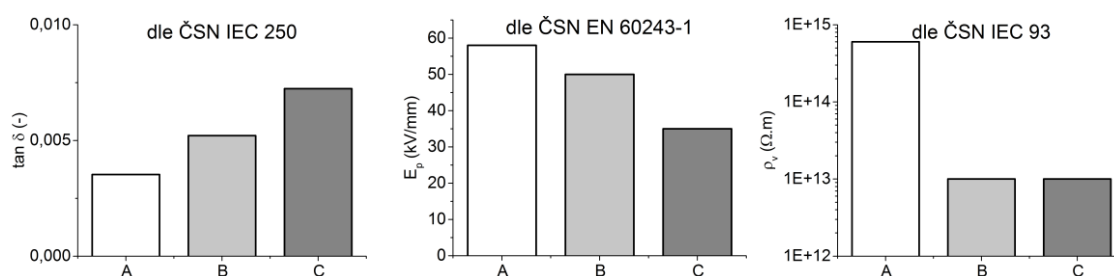
kde X je množství vazebného činidla k vytvoření minimální vrstvy, A (m^2/g) je specifický povrch nanočástice, w (m^2/g) je minimální smáčivost vazebného činidla a f (g) je hmotnost nanočástic [8].

C. Nosná složka

Pro zachování dostatečně vysoké elektrické pevnosti kompozitu ($E_p \geq 50 \text{ kV/mm}$) byla jako nosná složka zvolena polyetylén-naftalátová fólie TEONEX® Q51 jmenovité tloušťky 25 μm od společnosti DuPont. Při rešeršní analýze materiálových vlastností bylo zjištěno, že polyetylén-naftalát vykazuje znatelně lepší vlastnosti, než polyetylen-tereftalát. Jedná se zejména o vyšší chemickou, teplotní a teplotně-oxidační stabilitu.

III. SROVNÁNÍ DIELEKTRICKÝCH VLASTNOSTI NAVRŽENÉHO KOMPOZITU S KOMERČNĚ DOSTUPNÝMI IZOLAČNÍMI SYSTÉMY

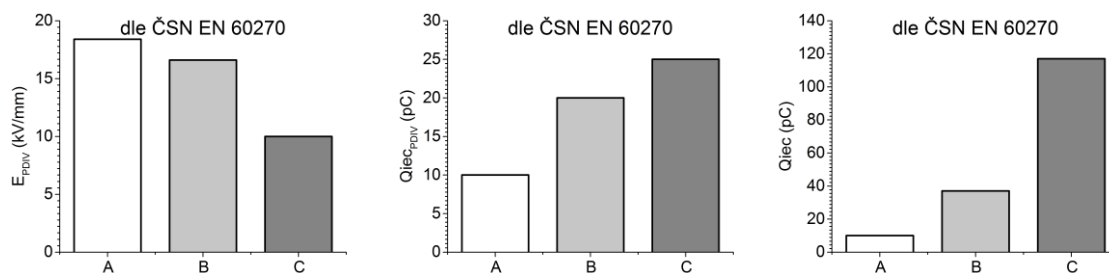
Srovnání vybraných dielektrických parametrů ($\text{tg } \delta$ (-), E_p (kV/mm) a ρ_v ($\Omega \cdot \text{m}$)) pro navržený kompozitní materiál s PEN nosnou složkou a dispergovanými MgO nanočásticemi (označeno **A**) s měřenými hodnotami a katalogovými hodnotami běžně využívaných materiálů s PET nosnou složkou (**B**), resp. skleněnou tkaninou (**C**) je uveden na Obrázku II. Všechna měření byla provedena v souladu s normami ČSN [4-6].



Obrázek II. Srovnání základních dielektrických parametrů – zleva ztrátový činitel, elektrická pevnost, povrchová rezistivita

Dále byla testována homogenost navrženého systému analýzou částečných výbojů (Obrázek II). Měření probíhalo globální metodou dle ČSN EN 60270 [9]. Pro možnost srovnání vzorků odlišných tlouštěk bylo zapalovací napětí PDIV (kV) nahrazeno zapalovací intenzitou elektrického pole E_{PDIV} (kV/mm). Hodnoty náboje Q_{iec} (pC) stanovené při zapalovací intenzitě E_{PDIV} byly odečteny v čase ustálení (1 min). V okamžiku zahoření byla jejich úroveň vyšší v průměru o 12 %. V návaznosti na výsledky měření E_{PDIV} byla stanovena srovnávací hodnota intenzity elektrického pole na 18,5 kV/mm.

Z výsledků je jasně patrné, že v případě srovnání nábojů na intenzitě 18,5 kV/mm je pro navržený kompozit hodnota náboje Q_{iec} o 27 pC nižší porovnání s kompozitním materiálem obsahující PET fólii a 107 pC nižší než v případě kompozitu se skelnou tkaninou. Tento rozdíl lze přičíst silné nehomogenitě vnitřní struktury. Dalším měřením bylo dokázáno, že hodnoty 100 pC bylo u navrženého kompozitu dosaženo až při úrovni intenzity elektrického pole 25 kV/mm.



Obrázek III. Analýza částečných výbojů – zleva zapalovací intenzita elektrického pole, náboj při zapálení částečných výbojů, náboj při stanovené hodnotě intenzity elektrického pole 18,5 kV/mm

IV. ZÁVĚR

Z naměřených výsledků je jasně patrné, že navržený izolační materiál má dostatečné dielektrické vlastnosti v porovnání s konvenčně používanými izolačními systémy ($E_P=58$ kV/mm, $\text{tg } \delta=0,00353$, $\rho_v=6 \cdot 10^{14} \Omega \cdot \text{m}$). Z měření charakterizujících homogennost izolačních systémů, v tomto případě z analýzy vnitřních částečných výbojů, je zřejmé, že eliminací slídového papíru došlo ke zlepšení počáteční úrovně vzniku částečných výbojů.

PODĚKOVÁNÍ

Tento článek vznikl za podpory interního projektu na podporu studentských vědeckých konferencí SVK-2017-008 a projektu SGS-2015-020: Technologické a materiálové systémy v elektro-technice.

LITERATURA

- [1] Kao, K. *Dielectric Phenomena in Solids with Emphasis on Physical Concepts of Electronic Processes*. Amsterdam: Academic, 2004.
- [2] Menlík, V. *Dielektrické prvky a systémy*. 1. ed. Praha: BEN - Technická Literatura, 2006.
- [3] Razeghi, M. *Fundamentals of Solid State Engineering*. 3. ed. New York: Springer-Verlag, 2009.
- [4] ČSN IEC 250: A Doporučené postupy ke stanovení permitivity a ztrátového činitele elektroizolačních materiálů při průmyslových, akustických a rozhlasových kmitočtech včetně metrových vlnových délek.
- [5] ČSN IEC 93: Zkoušky tuhých elektroizolačních materiálů. Metody měření vnitřní resistivity a povrchové resistivity tuhých elektroizolačních materiálů.
- [6] ČSN EN 60243-1 ed. 2: Elektrická pevnost izolačních materiálů - Zkušební metody - Část 1: Zkoušky při průmyslových kmitočtech.
- [7] Klabunde, K. J. a R. M. Richards (Eds). *Nanoscale Materials in Chemistry*. 2nd ed. Hoboken, N.J.: Wiley, 2009.
- [8] Karabela, M. a I. Sideridou. „Effect of the structure of silane coupling agent on sorption characteristics of solvents by dental resin-nanocomposites“. *Dental Materials*. str. 1631-1639, 24(12), 2008.
- [9] ČSN EN 60270: Technika zkoušek vysokým napětím -Měření částečných výbojů.