



## **Oponentský posudek disertační práce „Nanomateriály pro elektrotechniku“**

**Doktorand: Ing. Lukáš Harvánek**

Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická, Katedra technologií a měření

**Školitel: Prof. Ing. Václav Mentlík, CSc.,**

Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická, Katedra technologií a měření

**Recenzent: doc. Ing. Pavel Mach, CSc.,**

České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, Katedra elektrotechnologie

Práce je zaměřena na problematiku kompozitů se zaměřením na nové perspektivní materiály – nanoplňiva. Autor se zaměřil na aplikaci vybraných nanoplňiv pro úpravu vlastností epoxidových pryskyřic jako materiálu, který je jako matrice ve vysokonapěťové technice užíván nejčastěji. Pro úpravu vlastností tohoto materiálu byly využity čtyři typy nanoplňiv. S ohledem na vývoj v materiálové oblasti, kde nanomateriály různého typu nabývají stále většího významu s ohledem na své unikátní vlastnosti, je oblast, kdy jsou sledovány nové cesty využití těchto materiálů pro úpravu a zlepšení vlastností materiálů stávajících, vysoce aktuální.

Práce je logicky členěna do 11 kapitol, následuje přehled publikací autora a přílohy. V kapitole 1-4 se autor zabývá nanomateriály jako takovými, dále se zaměřuje na vývoj nanodielektrik, pak uvádí cíle práce a diagnostické metody používané pro diagnostiku pevných dielektrik. Oceňuji, že kromě standardních metod měření elektických parametrů dielektrik, zahrnul do své diagnostiky také měření pomocí termogravimetrie a dynamické mechanické analýzy, protože tyto metody vhodně doplňují měření elektrických parametrů informacemi o struktuře dielektrika. Tato část práce uvádí současný stav v dané problematice, je zpracována přehledně, do přiměřené hloubky s přiměřenou frekvencí citované literatury a svědčí o velmi dobrém přehledu doktoranda v uvedených oblastech.

Vlastní práce doktoranda je uvedena od kapitoly 5 dále. Je zaměřena na zkoumání následujících tří typů polymerních nanokompozitů:

- Epoxidové pryskyřice DGEBA s tvrdidlem Laromin C260 s nanoplňivem, kterou byla nanosilika vytvořená sol-gel procesem z tetraethoxysilanu (TEOS). Byly zkoumány vzorky bez nanoplňiva a vzorky s různou koncentrací nanoplňiva.
- Epoxidové pryskyřice DGEBA s tvrdidlem Laromin C260 s kombinací nanoplňiv – nanočásticemi hydrofobní siliky (AEROSIL R 974) jako modifikátoru matrice a polyamidovou nanovlákninou Ultramid-Polyamid 6 (NPA) rozvlákněnou v elektrostatickém poli jako plňivem. Nejprve byly zkoumány vzorky bez nanoplňiva a vzorky s různou koncentrací hydrofobní a hydrofilní siliky. Po optimalizaci koncentrace a typu siliky byly připraveny vzorky s hydrofobní silikou a začleněním polyamidové nanovlákniny.
- Epoxidového laku Epoxylite 220 TSA. Uvedený lak, na rozdíl od pryskyřice DGEBA již obsahuje



tvrdidlo. Pro tento nanokompozit bylo použito stejných nanoplňiv jako v předchozím případě (hydrofobní silika a NPA) a byla ještě doplněna nanovláknina z polyimidu (NPI).

Z výsledků získaných doktorandem vyplynulo, že epoxidová pryskyřice DGEBA s tvrdidlem Laromin C260 s nanoplňivem, kterou byla nanosilika TEOS, má horší vlastnosti než pryskyřice bez nanoplňiva, a proto byla tato cesta opuštěna.

Nanokompozit s matricí z epoxidové pryskyřice DGEBA s tvrdidlem Laromin C260 s hydrofobní nanosilikou a nanovlákninou NPA prokázal lepší elektrické vlastnosti (izolační odpor, ztrátový činitel i elektrickou pevnost) než běžně užívané izolanty.

Protože však pryskyřice DGEBA není v průmyslovém prostředí běžně užívána, což by omezilo zavedení výsledků práce do průmyslové praxe, byl vyvinut třetí nanokompozit s matricí z epoxidového laku Epoxylite 220 TSA plněného hydrofobní silikou a NPI, který opět prokázal lepší elektrické vlastnosti (izolační odpor, ztrátový činitel i elektrickou pevnost) než běžně užívané izolanty a na rozdíl od předchozího nanokompozitu je ho možné snadno zavést do praxe.

K práci mám následující dotazy:

1. *Zdůvodněte průběh  $tg\delta$  v závislosti na teplotě pro vzorek PS1 a PS3 na obrázku 26 a porovnejte s průběhy pro vzorky PS10 a PS11 na obr.28.*
2. *Na str. 63 a dalších je popsán poměrně složitý proces přípravy vzorků s nanosilikou a nanovlákninou. Jak byly získány časy pro míchání vzorků a jak byla zaručena homogenita nanovlákniny ve vzorku? Bylo studováno, jak jsou částice dispergovány v nanokompozitu?*
3. *Proč jsou takové rozdíly ve variabilitě naměřené resistivity na obr. 32 (např. vzorek D22 a D24 vs. vzorek D23)?*
4. *Vysvětlete průběh červené křivky na obr. 33 ( $\epsilon_r$  vs. teplota) a obr. 35 ( $tg\delta$  v závislosti na teplotě). Proč je tak odlišná od ostatních křivek?*

Práce je zpracována pečlivě s minimem pravopisných chyb a překlepů. Grafické i faktické zpracování práce je na vynikající úrovni. Drobnou připomínku lze mít k tomu, že v obr. 37 jsou sice křivky indexovány, ale chybí popis indexů (měl by být přímo v obrázku), že na obr. 37 jsou dva obrázky jsou pod jedním číslem apod. Tyto připomínky však nesnižují kvalitu samotné práce.

Problematika, na kterou byla práce zaměřena, je na pomezí několika vědních oborů. Proto musel doktorand zvládnout daleko větší objem teoretických i praktických poznatků, než bývá obvyklé. Tohoto úkolu se zhostil úspěšně. Také publikační aktivita doktoranda je mimořádná.

Za hlavní přínos doktoranda do dané vědní oblasti považuji vývoj, realizaci a ověření nanokompozitního materiálu s vlastnostmi lepšími než stávající materiály a použitelného ve výkonové a vysokonapěťové elektrotechnice, aniž by tomu bránila např. cena tohoto materiálu.

Doktorand prokázal schopnost zvládnout na vysoké úrovni teoreticky i prakticky složitou problematiku. Doktorská práce splňuje podmínky samostatné tvůrčí vědecké práce a obsahuje původní výsledky. Proto práci, v souladu se zákonem č. 111/1998 Sb., par. 47,

Doc. Ing. Pavel Mach, CSc.  
Katedra elektrotechnologie  
FEL ČVUT v Praze

doporučuji k obhajobě.

V Praze dne 29. 5. 2017

# OPONENTSKÝ POSUDOK DIZERTAČNEJ PRÁCE

Názov práce: **Nanomateriály pro elektrotechniku**

Autor: **Ing. Lukáš Harvánek**

Oponent: **prof. Ing. Ján Michalík, PhD., EVPÚ a.s. Nová Dubnica**

## Zhodnotenie významu dizertačnej práce pre odbor

Posudok tejto práce som spracoval na základe menovania dekana Elektrotechnickej fakulty ZČU v Plzni, v súlade so zákonom č.111/1998 Sb. A s čl. 107 odst. 1 a 2 studijného a skúšebného řadu ZČU.

Predložená práca je venovaná oblasti, ktorá je predmetom záujmu výskumných tímov na celom svete.

Za dôležitú skutočnosť považujem, že dizertačná práca bola riešená na pracovisku, ktoré sa zaoberá danou problematikou systematicky viac rokov. Za túto dobu sa podarilo na riešiteľskom pracovisku vybudovať technologické zázemie na vysokej úrovni, ktoré je predpokladanom dosiahnutia hodnotných vedeckých výsledkov.

Potvrzuje to aj hlavná myšlienka predloženej práce, kde je uvedená snaha vytvoriť novú konštrukciu elektroizolačného materiálu bez anorganickej bariéry s požadovanými elektrickými vlastnosťami.

Potvrzuje to aj počet citovanej a použitej literatúry (79), ktorú uvádza autor v predkladanej práci.

## Zhodnotenie postupu riešenia a splnenie určeného cieľa

Predložená dizertačná práca je rozdelená okrem úvodu do 11 kapitol, publikačnej činnosti autora a príloh. Ciele práce sú jasné a presne definované v kapitole 3. Ing. Lukáš Harvánek postupoval pri spracovaní svojej dizertačnej práce systematicky, preukázal teoretické znalosti ako aj schopnosť aktívne využívať vedecké metódy práce pre konkrétne riešenie veľmi aktuálnej technickej problematiky.

## Stanovisko k výsledkom dizertačnej práce

Ako už bolo spomenuté v predchádzajúcich časti posúdku, práca sa venuje veľmi aktuálnej a perspektívnej oblasti. Možno konštatovať, že stanovené ciele riešenia boli splnené. Uvádzam aspoň niektoré:

- 1.) vývoj s experimentálnym overením 2 nových nanokompozitov s odlišnou maticou a plnivom,
- 2.) diagnostický systém pre overenie nanokompozitu.

## **Vyjadrenie k spracovaniu dizertačnej práce**

Podľa môjho názoru práca popisuje nové výsledky a z predloženej práce vyplýva, že autor dizertačnej práce Ing. Lukáš Harvánek preukázal odpovedajúce schopnosti a predovšetkým experimentálnu zručnosť.

## **Vyjadrenie k publikáciám**

V práci je uvedený 1 užíkový vzor (spoluautor), 1 impaktovaný článok (spoluautor), 2 recenzované články (v 1 ako prvý autor), 22 príspevkov konferencie (z toho 10 krát prvý autor).

Publikačná činnosť autora je na dobrej úrovni, zvlášť vysoko hodnotím užitkový vzor.

Prevažná časť publikácií má väzbu na riešenú problematiku.

## **Záverčné hodnotenie**

Záverom konštatujem, že dizertačná práca spĺňa všetky požiadavky a preto ju odporúčam k obhajobe. Po úspešnej obhajobe dizertačnej práce odporúčam Ing. Lukášovi Harvánekovi udeliť akademický titul

**„Philosophiae doctor (PhD.)“**

V Žiline 5.7.2017



prof. Ing. Ján Michalík, PhD.

## Oponentní posudek na disertační práci

*Ing. Lukáše Harváňka*

### Nanomateriály pro elektrotechniku

V následování dnes frekventované tendence užití nanomateriálů k tvorbě nových výhodných konstrukčních aplikací se autor zaměřuje na obor elektroizolačních materiálů a systémů a hledá takové řešení materiálové skladby, které má přinést nové a vylepšené dielektrické a eventuálně i mechanické charakteristiky elektroizolačního systému. Podařilo se mu po mnoha variantních řešeních nalézt vhodný funkční nanokompozit aplikovatelný v izolační technice některých částí elektrických strojů a právě v tom spočívá *význam disertační práce*.

Disertant se aktivně podílel na výzkumu nanokompozitů probíhajícího na oddělení elektrotechnologie elektrofakulty ZČU pod vedením prof. ing. Mentlíka, CSc a svou houževnatou experimentální činností a teoretickou erudicí dosáhl úspěchu a přínosu v řešení zadaného úkolu. Tímto konstatuji, že *výsledek disertační práce poskytl konkrétní a původní přínos předkladatele pro praxi v oboru elektroizolační techniky*.

V průběhu hledání optimální varianty byly předmětem porovnávání jako pojidla epoxidové pryskyřice DGBA na bázi bisfenol A reagující s epichlorhydrinem v přítomnosti hydroxidu sodného a Epoxylite 220TSA definované chemické báze a jako tvrdidla Laromin C260 a BF3 komplex a do matrice ve funkci plnidla pak byl v různém objemovém množství zkoumán účinek různých nanočástic ať již hydrofilní či hydrofobní nanosilika SiO<sub>2</sub> a polyamidová a polyamidová nanovláknina. Po systematických krocích hledání složkových kombinací (3 až 4) posuzovaných klasickými diagnostickými metodami dospěl autor ke dvěma optimalizovaným variantám:

1. epoxidová pryskyřice DGBA, tvrdidlo Laromin C260 a hydrofobní nanoplňivo SiO<sub>2</sub> s plněním 1% hm a nosnou nanotkaninou NPA
2. epoxidová pryskyřice Epoxylite TSA 220 s nanoplňivem SiO<sub>2</sub> hydrofobním s plněním 1,25% hm a nosnou nanotkaninou NPI.

Vše (i nepreferované varianty) doprovází svým technologickým postupem přípravy.

*Postup při řešení úkolu a použitelnost metod ke splnění určeného cíle* považuji za adekvátní oborové praxi. Z přínosů práce uvedených disertantem vyzdvihuji zejména vytipování vhodného nanoplňiva a pojidla pro vytvoření nového izolačního systému a výběr nejlepších variant složení nového nanokompozitu na základě vhodného diagnostického systému materiálového inženýrství izolantů. Autor prokázal své znalosti i vlastní publikací (4) tématu a řadou spoluautorských titulů z konferencí tuzemských i zahraničních a výzkumných zpráv a spoluautorstvím na užitém vzoru (viz. Seznam literatury). Za bezprostřední využitelnost práce považuji její nasazení v zálivkových izolačních systémech (encapsulation) vysokonapěťových a výzvu pro budoucí výzkum výrobců foliových sandwichových izolantů.

Předkladatel pracoval *systematicky* a svou aktuální prací *přispěl k praxi v oboru* elektroizolantů. K *formální úrovni, přehlednosti a úrovni jazykové* nemám výhrady.

Vzhledem k výše uvedeným pozitivům, přínosnosti práce a k jejímu využití v provozní praxi elektroizolační techniky vysokého napětí

*doporučuji*

*disertační práci k obhajobě v souladu se zák.č111/1998 Sb. §47*

V Plzni dne 31.5.2017



Ing. Lumír Šašek, CSc