

## OPONENTSKÝ POSUDOK

na dizertačnú prácu Ing. Ondřeja **Krpala** pod názvom: „*Nové přístupy k optimalizaci polovodivých ochran*“

### 1. Všeobecné poznatky a aktuálnosť témy

Doktorand Ing. Ondřej Krpal vypracoval a predložil v študijnom odbore „Elektrotechnika“ dizertačnú prácu pod názvom: „Nové přístupy k optimalizaci polovodivých ochran“.

Počas prevádzky elektrických strojov točivých dochádza v dôsledku pôsobenia prevádzkových činiteľov (elektrické pole, teplota, mechanické a chemické namáhanie) k vzniku čiastkových výbojov a postupnej degradácii izolácie až do prierazu. Jedným z nebezpečných miest kde najčastejšie dochádza k vzniku výbojovej činnosti je výstup cievky z drážky statora. Tu v dôsledku vysokej normálovej a tangenciálnej zložky elektrického poľa vznikajú povrchové výboje ktoré postupne degradujú povrch izolácie a znižujú životnosť celého stroja. Správne navrhnutá a aplikovaná polovodivá ochrana zabráňuje vzniku povrchových výbojov. Preto považujem tému dizertačnej práce za vysoko aktuálnu.

### 2. Splnenie cieľov dizertačnej práce

Ciele dizertačnej práce popísane na strane 19 sú jasné a zrozumiteľne. Doktorand sa venoval hlavne zisteniu optimálneho prevedenia povrchových ochrán izolácie tak, aby gradient elektrického poľa a jeho vplyv pri rôznych hladinách napätia bol čo najlepšie eliminovaný. Ide o čo najefektívnejšie využitie polovodivých ochrán v závislosti na ich typu a spôsobe aplikácie. Základné ciele práce sú splnené v plnom rozsahu.

### 3. Zvolené metódy spracovania

K splneniu cieľov svojej dizertačnej práce doktorand zvolil správny postup. Najprv preštudoval súčasný stav problematiky v oblasti EGS ochrán a potom navrhol a dal vyhotoviť laboratórne vzorky vysokonapäťových statorových tyčí odpovedajúce v meritku 1:3 reálnemu prevedeniu. Na vzorky aplikoval rôzne typy povrchových ochrán a zistil vplyv dĺžky nanesej ochrany na rozloženie napätia a teploty pozdĺž jej povrchu. Ďalej vytvoril matematický model vinutia pre výpočet rozloženia napätia a teploty a porovnal s nameranými výsledkami. Nakoniec overil možnosti využitia nových materiálov - polymérov na báze PEDOT pre ich aplikáciu ako EGS ochrany elektrických strojov.

### 4. Výsledky dizertácie a prínos práce

Využitie výsledkov dizertačnej práce má veľký význam ako pre výrobcov tak aj pre opravárov elektrických strojov točivých. Výsledkami práce poukázal, že aplikáciou vhodného typu a zvolením správneho usporiadania ochrany je možné optimalizovať priebeh rozloženia napätia pozdĺž cievky pri jej výstupe z drážky statora a tým zabrániť vzniku čiastkových výbojov v tomto mieste. Za prínos práce považujem vytvorenie matematického modelu na

simuláciu rozloženia napätia a teploty pozdĺž povrchovej ochrany cievky. Model umožňuje relatívne jednoducho meniť všetky parametre EGS ochrán a prispieť tak k zefektívneniu ich optimálneho návrhu.

## 5. Formálna úprava dizertačnej práce

Formálna úprava dizertačnej práce je na veľmi dobrej úrovni. Jednotlivé kapitoly logicky na seba nadväzujú. Pri vypracovaní práce doktorand vhodne použil odbornú literatúru. Ako pripomienku môžem uviesť, že na obr.6.20 na str. 54 a v Prílohe E nie je označené ktorý graf je vodivosť a ktorý je kapacita. Kvôli logaritmickému mierke je ťažko čitateľný. To však neznižuje úroveň práce.

Otázky na doktoranda:

1. Pri výpočte  $C_0$  na str. 34 je správne keď berieme plochu hornej elektródy? Nevznikne tým chyba pri výpočte permitivity?
2. Pri meraní rozloženia napätia pozdĺž EGS ochrany (obr. 7.3) uzemňujete stred AGS ochrany. Nebolo by správnejšie dať uzemnenie na začiatok EGS ochrany, t.j. na miesto kde skutočne cievka vystupuje z drážky statora?
3. Pri meraní rozloženia napätia pozdĺž EGS ochrany nedochádzalo k vzniku čiastkových výbojov v mieste pripojenia vysokého napätia? Keď dochádzalo ako to ovplyvnilo Vaše meranie?
4. Prečo si myslíte, že na konci polovodivej ochrany by malo byť napätie 45 kV, t.j. také isté napätie ako na oceľovej tyči? ( str.69 a obr.8.4)

## 6. Vyjadrenie k publikáciám

Výsledky svojej práce doktorand prezentoval ako autor a spoluautor v 20 publikáciách. Publikoval v domácich a zahraničných vedeckých časopisoch, na domácich medzinárodných a zahraničných vedeckých konferenciách. Takýto počet publikácií svedčí o množstve výsledkov práce doktoranda Ing. Ondreja Krpala.


## 7. Záver

Záverom môžem skonštatovať, že dizertačná práca Ing. Ondreja Krpala v plnej miere spĺňa požiadavky kladené na doktorandské dizertačné práce. Preto predloženú dizertačnú prácu

– odporúčam –

k obhajobe.

V Košiciach 18.11.2014

  
prof. Ing. Iraidy Kolcunová, PhD.  
oponentka práce



Posudek disertační práce

## Nové přístupy k optimalizaci polovodivých ochran

**Školitel:** Doc. Ing. Eva Kučerová, CSc.  
**Doktorand:** Ing. Ondřej Krpala  
**Recenzent:** Doc. Ing. Pavel Mach, CSc., Katedra elektrotechnologie, FEL ČVUT  
v Praze

---

Disertační práce je rozdělena do 11 kapitol, dále následuje přehled použité literatury, přílohy a přehled publikační činnosti autora. Práce má celkem 101 stran, 68 obrázků a 14 tabulek. V práci chybí seznam použitých zkratk a symbolů.

Práce je zaměřena na problematiku optimalizace EGS ochran u výstupu vinutí z čel synchronního generátoru. Tyto ochrany jsou tvořeny aplikací polovodivých laků nebo pásek, jejichž účelem je zamezení povrchovým výbojům. Uvedená problematika, tedy zamezení vzniku částečných výbojů, je průběžně řešena a zdokonalována což svědčí o její aktuálnosti.

V první části práce se doktorand zabývá přehledem současného stavu v problematice EGS ochran a v další části uvádí cíle práce. Cíle byly stanoveny dosti náročné, pokrývající jak experimentální činnost, tak diagnostiku a matematické modelování rozložení napětí a teploty. Jedním z cílů bylo také ověření možností aplikací nových materiálů – polymerů na bázi PEDOT.

V další části práce je uvedena současná nabídka AGS a EGS ochran. Dále je uvedena výroba vzorků statorových tyčí a měření ztrátového činitele a permitivity na zhotovených laboratorních vzorcích.

Dále jsou studována plniva pro EGS ochrany a vlastnosti těchto ochran. Kromě jiného bylo studováno také stárnutí uvedených ochran.

*Kap.6.2.3 - vysvětlete, proč se stárnutím mění nelinearita VA. Jak byste zdůvodnil, že po stárnutí, prováděném v souladu s normou, došlo úplné degradaci všech typů CGS pásek.*



*Obr. 6.10, obr. 9.6 – obrázky by měly být doplněny odchylkami mezi příslušným proložením a naměřenými hodnotami.*

*Obr. 6.11 - vysvětlíte průběh rezistivity v závislosti na stárnutí.*

V další části práce je uvedena modifikace vzorků vyrobených a změřených v první části práce nanesením různých typů EGS ochran v různých délkách a jejich tepelným zpracováním dle pokynů výrobce. Dále byly studovány napěťové poměry na takto upravených vzorcích.

Dále byl vyvinut matematický model rozložení napětí podél EGS ochrany. Je třeba ocenit, že autor se nezastavil pouze u simulace, ale také výsledky simulace ověřil metodou termovizního měření.

*Čím byste zdůvodnil odchylku mezi simulovanou teplotou a naměřenou teplotou?*

V závěru práce se doktorand zaměřil na studování nových materiálů typu PEDOT vyvinutých pro využití v uvedené oblasti.

*Obr. 9.7 – jak byla měřena a hodnocena nelinearita?*

Doktorand v přehledu své publikační činnosti uvádí celkem 14 publikací, na kterých je prvním autorem a 6 dalších publikací, na kterých je spoluautorem. 3 publikace byly v recenzovaných časopisech, chybí publikace v impaktovaném časopise. Bylo by dobré doplnit uvedené publikace procentním podílem autorství doktoranda. Jedna z publikací je časopisecká v recenzovaném časopise, ostatní jsou konferenční.

Práce je zpracována po formální i grafické stránce velice pečlivě. Je třeba zdůraznit, že doktorand musel zvládnout jak teoretickou problematiku, tak praktickou problematiku na takové úrovni, aby mohl, v průběhu zpracování práce, řešit a vyřešit řadu problémů jak v oblasti simulace, tak v oblasti experimentální a diagnostické. Veliký objem vykonané práce je důkazem aktivity doktoranda i kvality jeho školitele. Oceňuji i logicky stavěnou, graficky hezky provedenou a přehlednou zprávu.

Proto práci, v souladu se zákonem č. 111/1998 Sb. par. 47,

**doporučuji k obhajobě**

  
Doc. Ing. Pavel Mach, CSc.

V Praze dne 24. listopadu 2014

Oponentní posudek na disertační práci

Ing. Ondřeje Krpala

Nové přístupy k optimalizaci polovodivých ochran

Podstatou práce je prezentace nových přístupů při návrhu a realizaci polovodivých ochran na výstupu z drážek statorů vysokonapěťových elektrických točivých strojů. Je to zóna zvýšeného působení gradientu elektrického pole, kde může docházet ke vzniku degradačních koronových a v horším případě úplných výbojů a tím k fatální degradaci povrchu vinutí a následně k průrazu stěny hlavní izolace čel vinutí.

Cílem práce je nalézt takové konstrukční řešení aplikace polovodivé protikoronové vrstvy tak, aby došlo k pokud možno rovnoměrnému průběhu potenciálu podél povrchu a tím k odbourání gradientové špičky a to nejen v provozu stroje při jeho jmenovitém napětí, ale i (zejména) při mezioperačních zkouškách na zkušebně výrobce a při aplikaci zvýšeného přiloženého napětí po provozních zásazích do stroje. Schůdné vyřešení polovodivé úpravy je vždy výsledkem znalosti matematické analýzy použitím soustavy parciálních diferenciálních rovnic 2. řádu, znalostí materiálového inženýrství odpovídajících polovodivých úprav a jejich technologie, jakož i letitých zkušeností nabytých při výrobě statorových vinutí konstrukční kanceláří.

#### **Zhodnocení významu disertační práce pro obor**

Disertant uvedl některá netradiční zlepšení realizace polovodivých ochran na výstupu z drážek statorů synchronních strojů zejména co do různých variant materiálové báze a vzájemně porovnal jejich efektivitu měření a teoretickým modelováním. Tím přispěl k vytvoření účinnější konfigurace ochran vinutí.

#### **Postup řešení problému, použité metody a splnění určeného cíle**

Po kratším popisu současného stavu konstrukčně-technologického uspořádání polovodivé ochrany jsou popsány k dispozici jsoucí varianty významných výrobců materiálů ochran včetně jejich materiálové báze. Následuje pasáž zhotovení vzorků uspořádání na trubičkách s nánosem ochran a příslušným elektrodovým systémem a rozšířením téhož pro geometrické uspořádání bližší tvaru tyčí zakládaných do statorety. Porovnání účinnosti variant bylo jednak měřeními, jednak matematickým modelováním rozložením potenciálu a povrchové teploty. K tomuto modelování vychází disertant ze základních rovnic popisujících pole a uvádí výsledné průběhy jako výsledek zpracování metodou konečných prvků. Zde však (kap. 8) chybí algoritmizace postupu řešení, tj. dodržení zásady postupného odvozování, tak, jak je to obvyklé v pořádku matematického odvozování, čímž jsou pak vyloučeny eventuální pochyby o správnosti postupu. I když toto nepovažuji za podstatnou výhradu, měl by disertant při obhajobě se k mé námitce vyjádřit a blíže postup prezentovat. Jinak cíle práce uvedené na str. 19 byly splněny.

#### **Stanovisko k výsledkům disertační práce a k původnímu konkrétnímu přínosu disertační práce**

S přínosy uvedenými na str. 89 – 91 se ztotožňuji, jsou výsledkem vlastních rozsáhlých měření. Celkové výsledky práce jsou přínosem pro širší náhled konstruktéra na řešení ochran.

## Vyjádření k systematice, přehlednosti, formální úpravě a jazykové úrovni disertační práce

V práci je patrný logický systém postupu řešení od uvedení některých nevýhod používaných řešení přes návrh vlastních zlepšení a jejich verifikace měření a modelovým srovnáním. Text je přehledný, bohatě proložený názornými tabulkami, grafy a snímky výbojové aktivity. Jazyková úroveň je dobrá, **publikace** jsou vesměs spoluautorské a vztahují se k obhajovanému tematu.

Disertační práci Ing. Ondřeje Krpala

**doporučuji**

k obhajobě (dle zákona č. 111/1998 Sb. §47)

V Plzni, dne 12.11.2014



Ing. Lumír Šašek, CSc