

**SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY**

Ing. Miloš Glasa

Autoreferát dizertačnej práce

Elektro – tepelná analýza varistora na báze oxidov kovov

**na získanie akademického titulu doktor (philosophiae doctor, PhD.)
v doktorandskom študijnom programe: 5.2.11 Silnoprúdová elektrotechnika**

Miesto a dátum: **Bratislava, január 2013**

Dizertačná práca bola vypracovaná v dennej forme doktorandského štúdia na Oddelení silnoprúdovej elektrotechniky ÚEAE FEI STU v Bratislave.

Predkladateľ: Ing. Miloš Glasa
ÚEAE FEI STU
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Školiteľ: doc. Ing. Ľudovít Hüttner, PhD.
ÚEAE FEI STU
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Oponenti: doc. Ing. Pavel Mindl, CSc.
ČVUT FEL
Fakulta elektrotechnická
Technická 2, 166 27 Praha 6 - Dejvice

prof. Ing. Justín Murín, DrSc.
ÚEAE FEI STU
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

(meno a priezvisko oponenta s uvedením jeho titulov a názov ustanovizne, s ktorou je oponent v pracovnom pomere)

Autoreferát bol rozoslaný:

**Obhajoba dizertačnej práce sa koná: o hod .
na Ústave energetiky a aplikovanej elektrotechniky FEI STU, Ilkovičova 3,
Bratislava.**

.....
prof. RNDr. Gabriel Juhás, PhD.
Dekan

Tézy dizertačnej práce	1
1. Úvod.....	1
2. Prepätie a prepät'ová ochrana.....	1
2.1 Ochrana pred prepätím	2
2.2 Prehľad konštrukčných riešení	2
3. Varistor na báze oxidov kovov	2
4. Definícia MOV podľa STN EN 61643 - 331.....	3
5. Metóda konečných prvkov.....	4
6. Príprava modelu varistora na báze oxidov kovov	4
7. Návrh modelu ZnO varistora.....	5
8. Záver.....	15
9. Prínosy predkladaného modelu varistora	15
Zoznam použitej literatúry.....	16
Zoznam publikácií autora	19

Tézy dizertačnej práce

- 1) Navrhnutie modelu varistora pre tepelnú a elektrickú analýzu metódou MKP.
- 2) Numerická analýza šírenia tepla v typických tvaroch varistorov typu ZnO pri hodnotách bleskových prúdov charakteristických pre triedu I.
- 3) Spracovanie analytického modelu šírenia tepla ZnO varistorov. Počítačová simulácia tepelnej štúdie životnosti, degradácie ZnO varistorov a elektrických vlastností varistorov s degradovanými vlastnosťami.
- 4) Vykonanie experimentálnych meraní na varistorovom type zvodiča triedy I pri pôsobení bleskového prúdu a porovnanie týchto výsledkov so simuláciami, analýzami a modelmi.
- 5) Na základe dosiahnutých výsledkov spracovať metodiku komplexnej analýzy využívania varistorového typu zvodiča triedy I s odporúčaniami na ich modifikáciu pri opakovanom pôsobení bleskového prúdu.

1. Úvod

Účinky atmosférických prepätí je možné eliminovať pomocou zvodičov bleskových prúdov. Ich funkčnosť závisí na použitom základnom stavebnom prvku. Súčasný trend vo veľkej miere smeruje k podstatnému používaniu výhradne varistorov – pre triedu ochrany I. Chemické zloženie tohto prvku je schopné odolávať energii bleskového prúdu. Za najväčšiu nevýhodu varistora možno považovať jeho tepelné namáhanie, ktoré môže spôsobovať degradáciu jeho elektrických vlastností, prípadne úplnú deštrukciu.

Základnou myšlienkou väčšiny výpočtových metód riešenia diferenciálnych rovníc je voľba náhradnej funkcie systému vzťahných súradníc pre hľadajú neznámu funkciu. Voľba neznámej funkcie musí spĺňať počiatkové a okrajové podmienky.

Ťažiskovou témou práce je návrh počítačového modelu varistora na báze oxidov kovov pomocou metódy konečných prvkov. Model sa zameriava primárne na objasnenie tepelných javov vznikajúcich počas pôsobenia voči bleskovým prúdom.

Model varistora na báze oxidov kovov je pravdepodobne prvým výpočtovým modelom, ktorý je riešený metódou konečných prvkov so zameraním na previazané elektro – tepelné analýzy. Primárnou úlohou návrhu modelu je určenie kritických tepelných vlastností MOV pri pôsobení voči bleskovým prúdom nominálnych hodnôt, ako aj preťaženie tohto prvku hodnotami prúdov presahujúcimi nominálne hodnoty udávané výrobcom.

2. Prepätie a prepät'ová ochrana

Podľa normy (STN EN 61643-11, 2005, STN EN 62305-1, 2007) je prepätie definované ako napätie vyššie ako najvyššie prevádzkové napätie, ktoré vzniká z rôznych príčin (atmosférické deje, spínacie deje, ...). Podľa príčiny (výboj), ktorá ich spôsobuje, ich rozdeľujeme do dvoch základných skupín: vonkajšie (spôsobené

vonkajšími vplyvmi mimo nízko-napäťový rozvod budovy) a vnútorné (vznikajú v rozvode budovy vplyvom rôznych porúch a spínaní).

2.1 Ochrana pred prepätím

Za účelom ochrany priestoru pred účinkami blesku a ním vyvolaných prúdov a prepätí treba chránený priestor rozdeliť do niekoľkých zón. Z hľadiska účinku elektromagnetického poľa, ktoré generuje bleskový prúd, sú odlišné podmienky zaťaženia zariadení nachádzajúcich sa v týchto zónach. Na hraniciach zón sú podmienky zaťaženia výrazne rozdielne. Podľa normy sú zóny bleskovej ochrany (obr. 1.2.2) definované do týchto skupín: ZBO_{0A}, ZBO_{0B}, ZBO1, ZBO2, ZBO3, ... Na rozhranie zón ZBO 0_B a ZBO 1 sa vkladá 1. stupeň ochrany – zvodič triedy I (4 kV). Na rozhranie zón ZBO 1 a ZBO 2 sa vkladá 2. stupeň ochrany – zvodič triedy II (2,5 kV). Na rozhranie zón ZBO 2 a ZBO 3 sa vkladá 3. stupeň ochrany – zvodič triedy III (1,5 kV).

2.2 Prehľad konštrukčných riešení

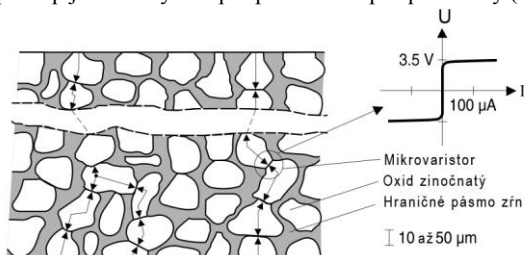
V súčasnosti je jedným z dôležitých kritérií kvality zvodiča parameter I_p , teda veľkosť skratového prúdu, ktorý zvodič preruší bez potreby pôsobenia predradeného ističieho prístroja. Z tohto pohľadu sa zvodiče delia do kategórie bez zhášacieho systému (iskrištia s jedným alebo dvoma v sérii radenými elektrickými oblúkmi a celkovo nízkym oblúkovým napätím v následnej oblasti) a so zhášacím systémom (v následnej oblasti sa vytvára relatívne vysoké oblúkové napätie). Prvú skupinu charakterizuje nízky I_p , typická je hodnota do 3 kA, druhú I_p s hodnotou až do 50 kA. V oboch skupinách sú konštrukčné riešenia buď tlakovo zapúzdrené, bez možnosti výšľahu ionizovaných plynov do okolia alebo otvorené riešenia s výfukovými otvormi. V ZBP so zhášacím systémom môže byť zhášací systém účinný aj v impulznej oblasti alebo len v následnej oblasti (Valent, 2001).

- a) Bez zhášacieho systému, uzavretý systém.
- b) ZBP s deionovou komorou, otvorený systém a uzavretý systém
- c) ZBP s multiiskrišťom s uhlíkovými elektródami, uzavretý systém
- d) ZBP s tlakovo uzavretým systémom a plynotvornou látkou
- e) ZBP s využitím varistora

3. Varistor na báze oxidov kovov

Varistor je nelineárny a tepelne závislý rezistor s nelineárnou V-A charakteristikou, ktorá mu umožňuje širokú škálu uplatnenia. Varistory boli v minulosti vyrábané z karbidu kremíka SiC, ktorý časom nahradila chemická zlúčenina oxid zinočnatý ZnO pre lepšie a komplexnejšie vlastnosti počas pôsobenia voči prepätiu. Chemické zloženie je tvorené z 95% zmesou oxidov kovov. Zvyšných 5% tvoria prímеси Bi₂O₃, TiO₂, CoO, MnO a Sb₂O₃, ktoré sa podieľajú na nelinearite a stabilite varistora. Varistory sú vyrábané sintrovaním zo spekaného granulátu oxidu zinočnatého spolu so spomínanými prímesami pri teplote od 1250 – 1400 °C, v závislosti od triedy

použitia. Na hraničných miestach zín sa vytvárajú polovodivé rozhrania, ktorých princíp je rovnaký ako pre polovodivé p-n priechody (Dudáš, 2006).



Obr. 3.1 Mikroštruktúra ZnO varistora (Littelfuse, 2011)

Pri nízkej hodnote napätia je varistor takmer v nevodivom stave a má veľký elektrický odpor. Pri vyšších hodnotách

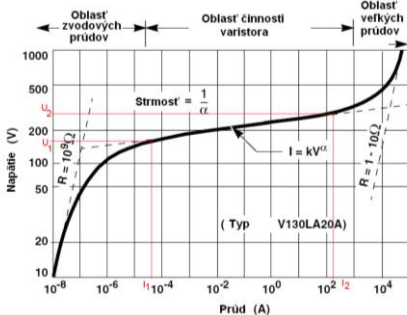
napätia prechádza do vodivého stavu a hodnota odporu je nízka. Odpor varistora vo vodivom stave tlmí oscilácie, ktoré vznikajú pri pôsobení prepätia (Dolník, 2010a).

$$I = kU^\alpha \quad (3.1)$$

Koeficient nelinearity α sa určuje z V-A charakteristiky alebo z nasledujúceho vzťahu:

$$\alpha = \frac{\log\left(\frac{I_2}{I_1}\right)}{\log\left(\frac{U_2}{U_1}\right)} \quad (3.2)$$

Základným ukazovateľom je gradient napätia v celej hrúbke varistora. V prípade že je hodnota gradientu napätia na nízkej úrovni, varistor pôsobí bez problémov a následných poškodení. S rastúcou hodnotou vzniká riziko lavínového efektu, ktorý má za následok preriez. Generovaná teplota predstavuje nápomocný dej pri prerieze.



Obr. 3.2 V-A charakteristika MOV

4. Poškodenie MOV podľa STN EN 61643 – 331

Degradácia MOV je definovaná nasledovne: pri degradácii má MOV menovité napätie varistora menšie než 90 % napätia pred skúškou. Berúc do úvahy, že ak je menovité napätie varistora použité ako základ

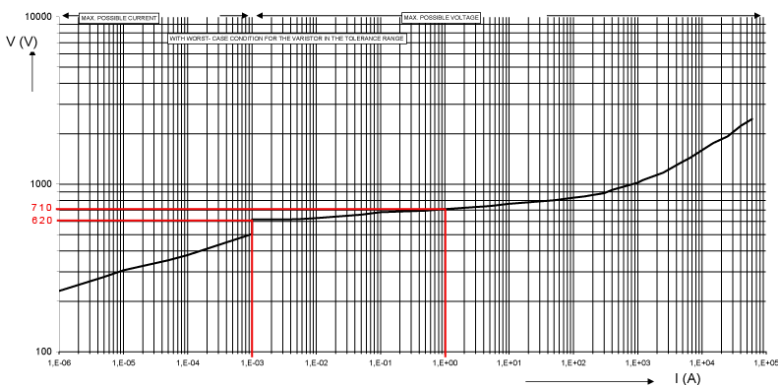
kritéria poruchy, môže voľba skúšobného prúdu ovplyvniť vyhodnotenie poruchy. Typickou odporúčanou hodnotou pre skúšobný prúd je jednosmerný prúd 1 mA. Pri skrate je odpor MOV trvale znížený na menej než 100 Ω (≥ 10 mA) pri priloženom jednosmernom napätí 1 V (STN EN 61643-331, 2004).

5. Metóda konečných prvkov

Je to matematická metóda, ktorá rieši rôzne simulácie priebehov napätí, deformácií, frekvencií, prúdenia tepla, elektromagnetických javov, ako aj prúdenia tekutín. Výpočet prebieha na vytvorenom fyzikálnom modeli. Princíp výpočtu spočíva v diskretizácii spojitého kontinua (rozdelenie telesa na konečné prvky). Skúmané zmeny parametrov sú určované v jednotlivých uzlových bodoch. Vyššia presnosť riešenia úlohy je priamo závislá na jemnosti siete konečných prvkov. (Kalousek 1996, Murín, 2012).

6. Špecifikácia varistora na báze oxidov kovov V350P43SP

Varistor V350P43SP triedy ochrany I je určený pre použitie v paralelnom zapojení dvoch kusov. Impulzná odolnosť daného zapojenia udávaná výrobcom je na hodnote 12,5 kA. Počítačový model však berie do úvahy iba jeden kus zo zapojenia, ktorého I_{max} je stanovené na 9 kA.



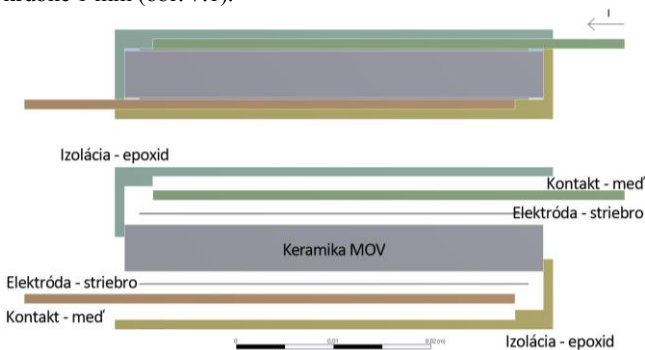
Obr. 6.1 V-A charakteristika MOV varistora V350P43SP

Tab. 6.1 Elektrické vlastnosti MOV varistora V350P43SP

Typ	Maximálne zaťaženie $T_A = +85\text{ °C} (+185\text{ °F})$					
	RMS Napätie	DC Napätie	Priemerná výkonová strata	Impulzný prúd (8/20)	Absorpcia energie	Bleskový prúd (10/350) 1 pulz.
	V_{RMS} (V)	V_{DC} (V)	P_{MAX} (W)	I_{MAX} (A)	E_{MAX} (J)	I_{MAX} (kA)
V350P43SP	350	460	1,5	60000	920	9

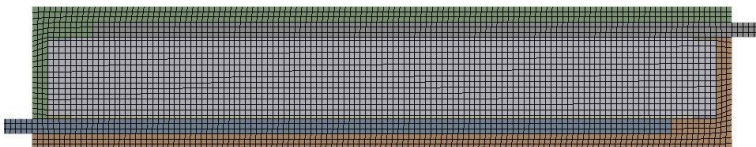
7. Návrh modelu ZnO varistora

Za účelom modelovania a optimalizácie bol navrhnutý počiatočný 2D model varistora typu V350P43SP. Geometria je vytvorená priamo v programe ANSYS Workbench v sekcii Geometry (Obr. 7.1). Model varistora pozostáva z niekoľkých častí. Hlavnú časť modelu tvorí ZnO keramika (43 mm x 4,8 mm), na ktorú sú technologicky pripojené z každej strany dve strieborné elektródy (40 mm x 0,2 mm). Na obe tieto elektródy sú vysokotepelnou spájkou s teplotou tavenia 217 °C napojené medené kontakty (37,2 mm x 1 mm). Celý blok modelu varistora je zaliaty v epoxidovej izolácii v hrúbke 1 mm (obr. 7.1).



Obr. 7.1 Návrh geometrie počiatočného modelu varistora

Pre modelovanie prechodných elektro – tepelných dejov boli použité podprogramy ANSYS Workbench a ANSYS Mechanical APDL verzia V13. Definícia parametrov modelu a výpočtu sa vykonávajú v sekcii Workbench (Engineering Data, Geometry, Thermal-Electric). Výpočty a výsledky elektro – tepelnej simulácie sa nachádzajú v sekcii Mechanical APDL. Obr. 7.2 ilustruje jemnosť siete konečných prvkov pre elektro – tepelnú simuláciu. Sieť konečných prvkov obsahuje 8553 uzlov a 2644 elementov.



Obr. 7.2 Jemnosť siete MKP modelu varistora v programe Ansys

Veľmi dôležitú úlohu zohráva aj koeficient prestupu tepla konvekciou do okolia modelu α_c . V prípade predkladaného 2D modelu sa jedná o voľné prúdenie. Hodnota konvekcie sa mení v závislosti od hodnoty generovaného tepla. Čím je generovaného tepla viac, tým je konvekcia vyššia a naopak.

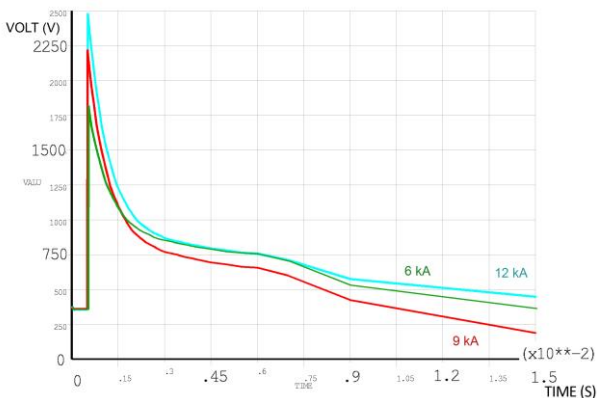
Tab. 7.1 Špecifické hodnoty materiálov pre počiatočnú analýzu varistora

Materiál:	Materiálové vlastnosti (25 °C)			
	hustota (density)	merná tepelná kapacity (specific heat)	rezistivita (isotropic resistivity)	merná tepelná vodivosť (isotropic conductivity)
	ρ	c	P_e	λ
	Kg/m ³	J/kgK	Ω m	W/mK
Epoxid	1400	1500	---	0.3
Striebro	10490	235	1.52E-08	429
Meď	8890	385	1.754E-08	390
Keramika	5606	2000	V-A char.	110

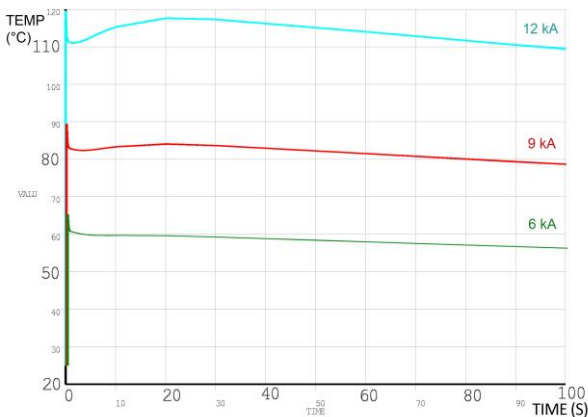
Výpočet prechodnej analýzy je potrebné rozdeliť to troch časových krokov. Prvý krok reprezentuje čas od nuly až po prvý údaj uvedený v tabuľke pre prúdový impulz (500 μ s). V tomto kroku preteká varistorom minimálny prúd 1 μ A, ktorému zodpovedá hodnota napätia 230 V - určené z VA charakteristiky. Výpočet prvého kroku nie je vôbec matematicky zložitý, keďže sa jedná o lineárnu fázu veľmi krátkeho času.

Druhý krok výpočtu predstavuje náběh prúdového impulzu až po maximálnu hodnotu pretekajúceho bleskového prúdu (6, 9 a 12,5 kA). Tento čas je definovaný Slovenskou technickou normou STN EN 61643-11 na 10 μ s. V tomto kroku je výpočet zložitejší, keďže sa začínajú uplatňovať tepelne závislé parametre s narastajúcou teplotou miesta prechodu prúdového impulzu.

V poslednom kroku je počas dobehu prúdu výpočet sústredený na prestup tepla medzi jednotlivými materiálmi, teda na prehrievanie modelu a odvod tepla konvekciou do okolia. Tretí krok simulácie je možné natiahnuť na čas potrebný k sledovaniu požadovaných závislostí. V tomto kroku sa najviac uplatňujú kritické tepelné parametre ako špecifické teplo a tepelná vodivosť. Tieto parametre sú smerodajné pri tvorbe výstupných charakteristík modelu varistora.

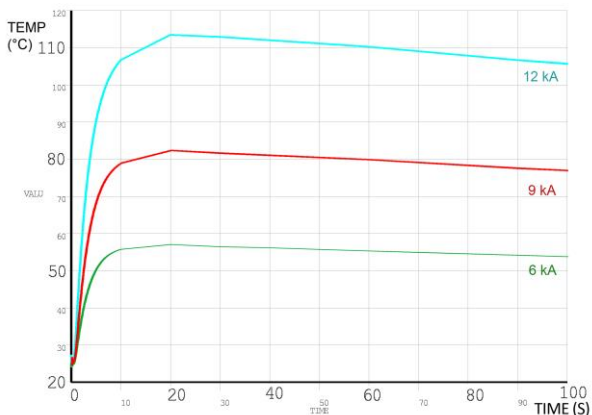


Obr. 7.3 Priebeh generovaného napätia na svorkách MOV modelu



Obr. 7.4 Teplota v jadre keramiky varistora počas prechodu bleskového prúdu - merací bod 4

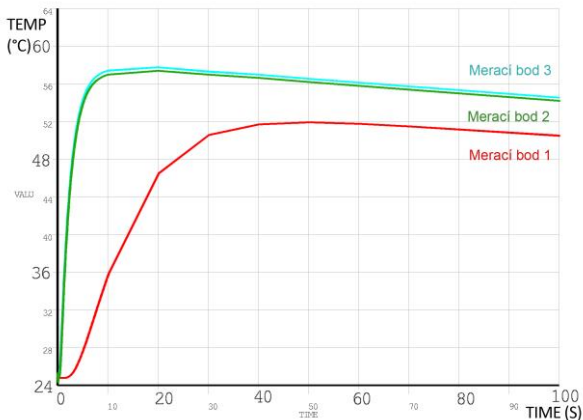
Obr. 7.4 vychádza čisto z teoretických predpokladov, pretože meranie teploty v jadre ZnO keramiky počas prechodu prúdu je technologicky veľmi náročné. Predpoklad maximálneho tepelného zaťaženia môže však pomôcť pri optimalizácii varistora ako jediného stavebného prvku prepäťovej ochrany, hlavne z pohľadu zmien tepelných parametrov. Tento efekt sa dá doceliť zmenou chemického zloženia ZnO keramiky. Vzájomné porovnanie impulzov prúdov 6, 9 a 12,5 kA poukázalo na nárast maximálnej teploty medzi nimi o 35 %.



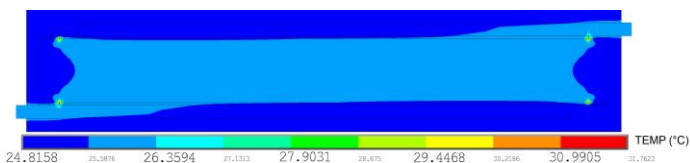
Obr. 7.5 Priebehy teplôt meracieho bodu 3 na povrchu epoxidovej izolácie

Okrem priebehov napätia a teploty je možné sledovať aj rozloženie generovaného tepla tak v keramike varistora, ako aj v celom modeli. Pozorované rozloženie bolo snímané v niekoľkých časoch. Prvý čas predstavuje vrchol impulzu bleskového prúdu

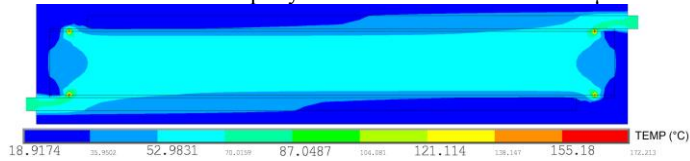
512 μ s. Teplota pred týmto časom je v celom modeli rovnaká, keďže sa predpokladá ustálený stav odpovedajúci teplote okolia, teda 25 °C. Ohriatie modelu v tomto čase je minimálne, čo je spôsobené prechodom prúdu celým objemom keramiky varistora. Práve vplyv prechodu celým objemom keramiky varistora nie celkom korešponduje s reálnymi okrajovými podmienkami.



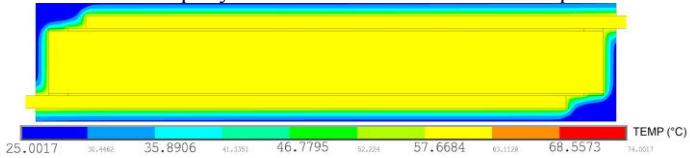
Obr. 7.6 Priebeh teplôt meracieho bodu 3 na povrchu epoxidovej izolácie



Obr. 7.7 Rozloženie teploty v modeli varistora v čase 512 μ s

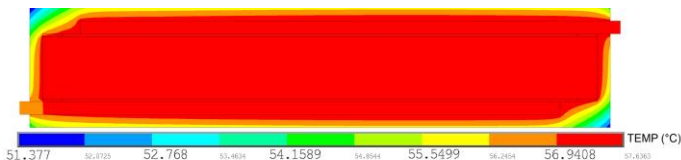


Obr. 7.8 Rozloženie teploty v modeli varistora v čase dobehu prúdu – 1 ms



Obr. 7.9 Rozloženie teploty v modeli varistora v čase – 1 s

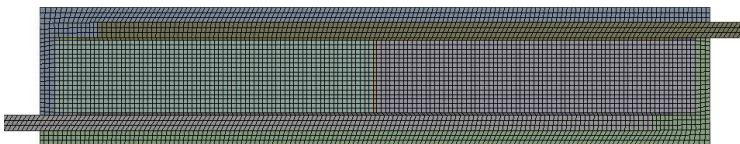
Obr. 7.10 teoreticky predpokladá úplne tepelné nasýtenie ZnO keramiky, ako aj celého modelu varistora. V tomto momente (60 s) sa naplno prejavujú všetky definované tepelné parametre. Veľký vplyv na ochladzovanie má vopred vypočítaný koeficient prestupu tepla konvekciou.



Obr. 7.10 Rozloženie teploty v modeli varistora v čase – 60 s

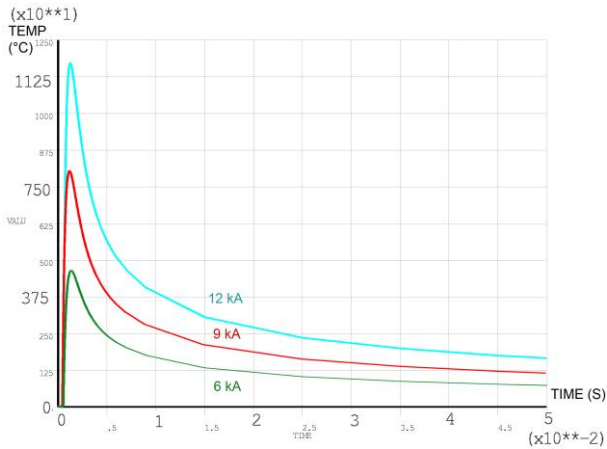
Jedným z účelov simulácií modelu varistora na báze oxidov kovov je štúdiá degradácie a deštrukcie tohto stavebného prvku. Spomínané sprievodné javy sú následkom prúdového preťaženia ZnO keramiky. Prechod prúdu s vyššou amplitúdou než je nominálna hodnota udávaná výrobcom spôsobuje nárast teploty nad limity materiálových vlastností. V realite je možné energiu bleskového prúdu obmedziť pomocou paralelne zapojeného iskrišťa. Toto riešenie má veľa sprievodných efektov, ktoré sú v zapojení zvodíča bleskového prúdu výlučne s varistorom eliminované.

K prierezom varistora paradoxne dochádza v rohoch varistorových blokov. K objasneniu a priblíženiu eliminácie toho úkazu môže pomôcť nasledujúci model varistora, ktorý má namodelovanú zmenu geometrie pomocou definície prúdovej dráhy. Jedná sa o modifikovaný počiatočný 2D model.

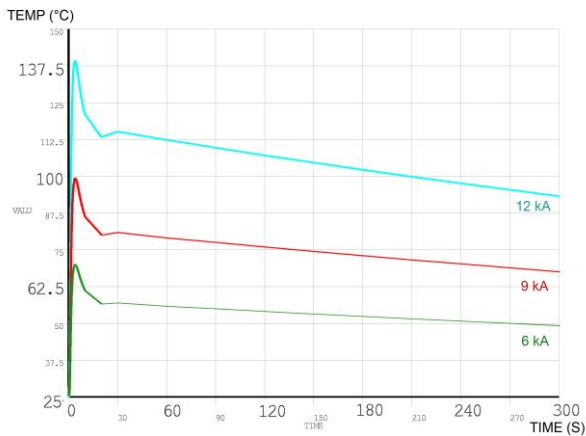


Obr. 7.11 Sieť konečných prvkov modifikovaného počiatočného 2D modelu

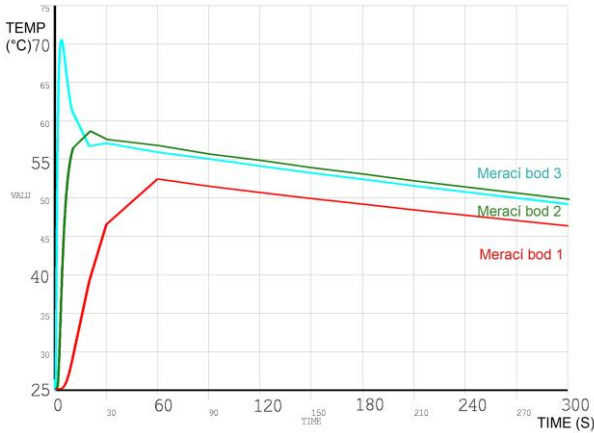
Predkladaná modifikácia počiatočného modelu predpokladá reálnejšie okrajové podmienky. Hlavnou zmenou oproti počiatočnému modelu je úprava veľkosti prúdovej dráhy na 0,2 mm, ktorá umožňuje presnejšiu simuláciu prechodu bleskového prúdu s následným prudkým oteplením. Po prechode prúdu sa vygenerované teplo takmer okamžite odovzdáva bočným častiam keramiky varistora, ako aj okolitým zvyšným častiam modelu. Na nasledujúcich obrázkoch je možné pozorovať priebehy napätia a teplôt, ale aj rozloženie a postupné odovzdávanie generovaného tepla medzi jednotlivými časťami modelu. Sieť MKP je rozdelená na 9290 uzlov a 2889 elementov.



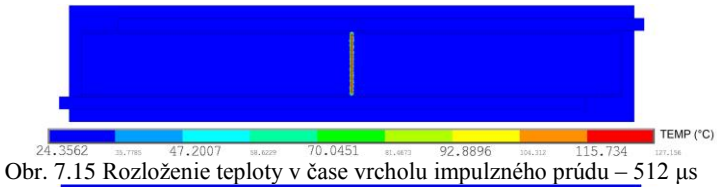
Obr. 7.12 Teplota v jadre modifikovanej prúdovej dráhy



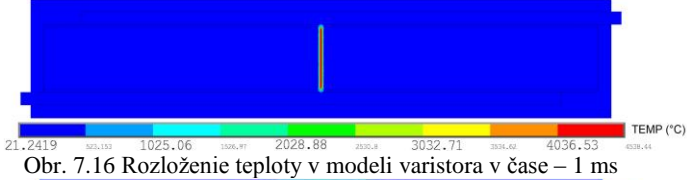
Obr. 7.13 Priebehy teplôt na povrchu epoxidovej izolácie



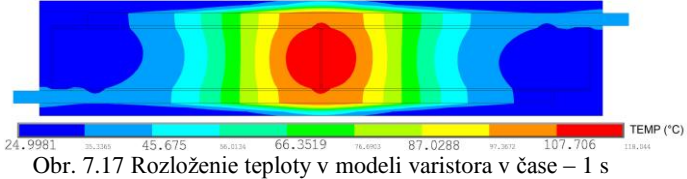
Obr. 7.14 Priebeh teplôt troch meracích bodov na povrchu epoxidovej izolácie



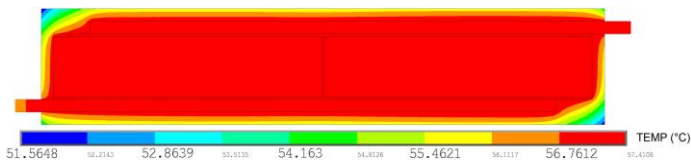
Obr. 7.15 Rozloženie teploty v čase vrcholu impulzného prúdu – 512 μ s



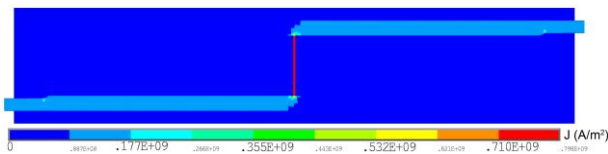
Obr. 7.16 Rozloženie teploty v modeli varistora v čase – 1 ms



Obr. 7.17 Rozloženie teploty v modeli varistora v čase – 1 s



Obr. 7.18 Rozloženie teploty v modeli varistora v čase – 60 s



Obr. 7.19 Rozloženie prúdovej hustoty v čase – 60 s

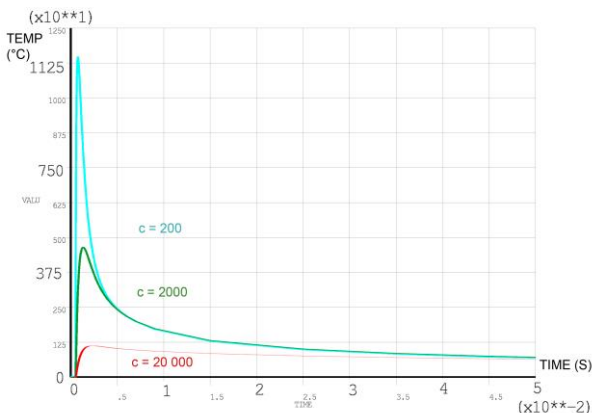
Výraznou zmenou modifikácie modelu je priebeh teploty v jadre keramiky. S touto zmenou značne narastá teplota v mieste prechodu prúdu, konkrétne na maximálnu hodnotu 4538 °C pri hodnote špecifického tepla $c = 2000 \text{ J/kgK}$. Tento efekt spôsobilo podstatné zúženie prúdovej dráhy. Celý prúd 6 kA prechádza 215 násobne menším priestorom, a preto je porovnanie modelov s a bez prúdovej dráhy neadekvátne. Dôvodom pre tak výrazne vysokú hodnotu je fakt, že 2D model predpokladá imaginárnu hĺbku 40 mm pre celý blok, a preto aj prúdová dráha má tvar roviny. Teplo sa nešíri do všetkých smerov, ale iba do bočných strán. Proces odovzdania tepla je aj napriek tomu pomerne rýchly.

Podľa predpokladu sa generované teplo postupne šíri do ďalších elementov modelu, ako aj v samotnej keramike. Vzhľadom na veľmi rýchle deje sa medené kontakty varistora viditeľne nezahrievajú, tento jav nastáva až v čase približne 1 ms. V časovej oblasti 45 až 60 s dochádza k úplnému tepelnému nasýteniu modelu. Od tohto momentu sa naplno prejaví chladenie definovanou konvekciou.

Bod sledovania teploty na povrchu epoxidovej izolácie je totožný s meracím bodom 3. Ten bol určený na základe experimentálnych meraní, kde bol termočlánok umiestnený v strede MOV. Modifikovaná prúdová dráha spôsobila prudký nárast, a zároveň aj rýchlejšie ochladenie v porovnaní s počiatočným modelom, čo je spôsobené odovzdaním tepla do bočných strán keramiky. Po rýchlom nasýtení keramiky sa generované teplo už tak rýchlo nešíri a drží sa vo varistore.

Porovnanie priebehov napätia na svorkách varistora je zobrazené na Obr. 7.3. Na priebeh napätia nemá zmena geometrie ani modifikácia prúdovej dráhy žiadny vplyv, pretože priebeh napätia je závislý iba od amplitúdy prúdového impulzu prostredníctvom V-A charakteristiky.

Modifikovaný 2D model varistora má za úlohu reprodukovať reálne správanie varistora. Charakteristickou zmenou pre model je veľkosť prúdovej dráhy, avšak, tak ako ANSYS predpokladá hĺbku modelu pre všetky časti, tak aj pre prúdovú dráhu, a teda v konečnom dôsledku prúdová dráha nemá valcový tvar, ale tvar roviny.



Obr. 7.20
Porovnanie
špecifického tepla
2D modelu

Zmeny, ktoré je vidieť na obrázkoch 7.20 a 7.21 sa môžu v realite prejavovať zmenami chemického zloženia ZnO keramiky, a to najmä zmenou pomeru prímiesí. Tie

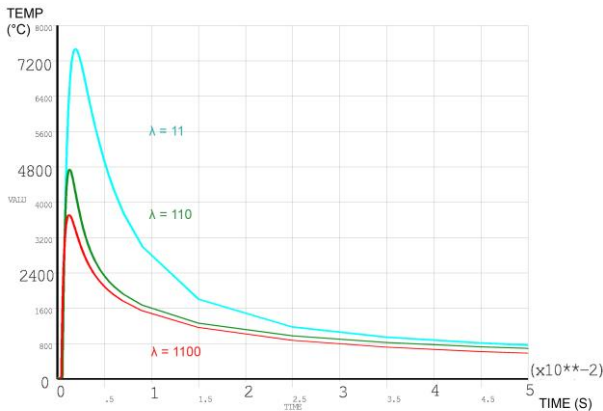
predstavujú 5 %-ný podiel z celkového množstva pri tvorbe ZnO keramiky.

Počiatočný 2D model varistora určil na základe vykonaných simulácií hodnotu špecifického tepla na 2000 J/kgK. Na Obr. 7.20 sú porovnané tri hodnoty špecifického tepla počiatočného 2D modelu varistora. Merací bod pre dané porovnanie vplyvu c je totožný s meracím bodom 4.

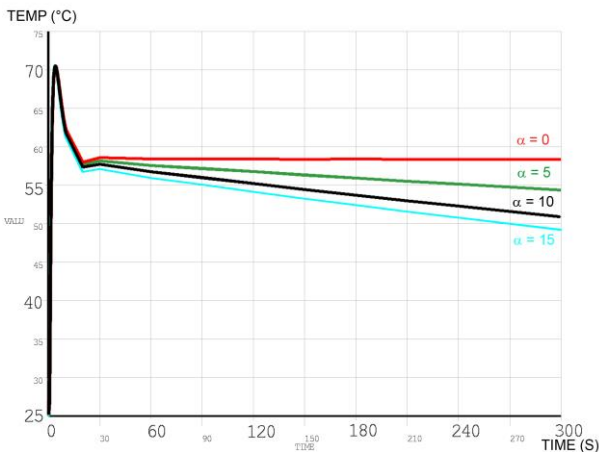
Ďalším parametrom, ktorý má podstatný vplyv na priebeh teplôt modelu, je tepelná vodivosť (isotropic thermal conductivity). Podľa rôznych internetových zdrojov sa hodnota pohybovala od 30 do 140 W/mK, pričom hodnota 110 W/mK bola určená na základe niekoľkých cyklov výpočtu. Výsledky analýzy pre porovnanie vplyvu λ jasne deklarujú, že s rastúcou hodnotou λ klesá hodnota maximálnej teploty v mieste prechodu impulzu prúdu.

Z uvedených analýz je možné konštatovať, že pre čo najefektívnejšie pôsobenie varistora a vyvarovanie sa kritických hodnôt oteplenia je vhodné chemické zloženie keramiky s čo najvyšším možným špecifickým teplom c a taktiež vysokou hodnotou tepelnej vodivosti λ .

Okrem špecifického tepla a tepelnej vodivosti je zaujímavé porovnať aj vplyv koeficientu prestupu tepla konvekciou α_c , teda odvodu tepla do okolia z povrchu epoxidovej izolácie. Na Obr. 7.21 je porovnanie troch hodnôt konvekcie od 0 až do 15 W/m²K. Analýza vplyvu konvekcie má za úlohu ilustrovať umiestnenie varistora v obmedzených priestoroch.



Obr. 7.21
Porovnanie tepelnej
vodivosti 2D
modelu



Obr. 7.22 Analýza
vplyvu konvekcie
2D modelu

Úlohou tejto analýzy je priblíženie aspektu umiestnenia varistora vo zvodíči prepätia, teda v podstatne obmedzených prevádzkových podmienkach. Čím je priestor v okolí varistora obmedzenejší, tým nižšia je hodnota koeficientu prestupu tepla konvekciou a aj podmienky ochladzovania voľným prúdením vzduchu sú horšie.

Predkladaný model je prvým návrhom modelu, ktorý súčasne rieši oteplenie varistora vplyvom prechodu impulzu bleskového prúdu. Ambíciou v ďalšom pokračovaní je tvorba trojrozmernej geometrie, ktorou by sa odstránili niektoré zjednodušenia 2D modelu, a ktoré by viedli k reálnejším okrajovým podmienkam a konečným výsledkom.

8. Záver

Zvodiče prepätia s varistorom na báze oxidov kovov v dnešnej dobe predstavujú perspektívny nástroj v ochrane pred prepätím. Varistorové zvodiče prepätia určené pre triedu I sú schopné odolať bleskovým prúdom s hodnotou $I_{\max} = 12,5$ kA vlny 10/350 μ s.

Práca sa v úvode zaoberá všeobecným prehľadom problematiky prepätí, ich elimináciou a ochranou pred ich účinkami. Priblížený je rozbor rôznych príčin vzniku tohto nežiaduceho javu. Z pohľadu ochrany pred účinkami prepätí sa práca zaoberá základným typmi zvodičov prepätia a ich vzájomnou koordináciou. Vzhľadom na ciele práce sú podrobne opísané základné vlastnosti varistora na báze oxidov kovov, ale aj nepriaznivé javy ktoré vedú k jeho poškodeniu. Jednou z možností ako popísať vlastnosti tohto prvku je využitie rôznych náhrad a modelov, ktorých princíp je však väčšinou založený na skúmaní elektrických vlastností. Čo však chýba v bežne dostupnej literatúre je model varistora zameraný na tepelné vlastnosti.

Hlavným cieľom práce je návrh a optimalizácia nového typu výpočtového modelu varistora na báze oxidov kovov metódou konečných prvkov. Výpočtová analýza sa zameriava na skúmanie vzájomne previazaných elektrických a tepelných vlastností varistora pred, počas a po prechode impulzu bleskového prúdu. Výpočtová metóda, ktorou je model riešený sa skladá z niekoľkých podkrokov výpočtu, ktorých popis je taktiež súčasťou dizertačnej práce.

Vplyvom prechodu impulzu bleskového prúdu dochádza v keramike modelu varistora k prudkému nárastu teploty v dôsledku generovaného tepla, ktorého množstvo priamo závisí na maximálnej hodnote priebehu prúdového impulzu. Model analyzuje dva prevádzkové stavy – prechodu prúdu celým objemom keramiky a prechod modifikovanou prúdovou dráhou. Sledovanými priebehmi sú generované napätie na svorkách varistora, oteplenie keramiky a následné odovzdávanie tepla zvyšným častiam modelu, rozloženie teplotného poľa a poľa elektrickej hustoty.

Dôveryhodnosť predkladaného modelu potvrdzuje aj porovnanie s experimentálnym overením v laboratóriu firmy SALTEK s r.o. so sídlom v Ústí nad Labem. Dosiahnuté výsledky dosahujú odchýlky v maximálnej miere 15 % v porovnaní s experimentálnym overením a sú vhodným základom pre rozšírenie modelu do trojzmernej geometrie v ďalšom skúmaní tepelných dejov varistora.

9. Prínosy predkladaného modelu varistora

Prínosom dizertačnej práce je spracovanie návrhu nového výpočtového modelu varistora na báze oxidov kovov, ktorý je zameraný na previazanú elektro – tepelnú analýzu riešenú metódou konečných prvkov.

Hlavné prínosy pre vedu:

- práca poskytuje ucelený pohľad na problematiku ochrany pred bleskom s využitím varistorového typu zvodiča prepätia,

- priblíženie a opis základných numerických a elektrických náhrad varistora ako základného stavebného prvku,
- vypracovaná štúdia teoretického teplotného zaťaženia počas prechodu impulzu bleskového prúdu so zameraním na vplyv veľkosti vodivého kanála,
- návrh modelu porovnáva dva prevádzkové stavy varistora so špecifickou modifikáciou geometrie prechodu impulzu bleskového prúdu,
- dosiahnuté výsledky modelu varistora analyzujú teoretické predpoklady generovania a šírenia tepla v ZnO keramike pred, počas a po prechode impulzu bleskového prúdu,
- navrhnutý model je možné použiť pri modelovaní ako elektrických, tak tepelných dejov akéhokoľvek typu varistora na báze oxidov kovov.

Hlavné prínosy pre prax:

- práca poskytuje informácie z pohľadu tepelného namáhania varistora počas prevádzky,
- štúdiu oteplenia keramiky modelu varistora je možné využiť pri skúmaní degradačných a deštruktívnych javov počas pôsobenia varistora,
- vzájomné porovnania výsledkov experimentálnych meraní a výpočtových analýz názorne deklarujú dôveryhodnosť návrhu modelu varistora, ktorý je možné použiť pri potreby konštruktárskej praxe.

Zoznam použitej literatúry

- Anslys V13 (2011): Katalóg materiálov, Help, Príručka používateľa.
- Barrado C. M., Leite E. R., Bueno P. R., Longo E., Varela J. A. (2003): Thermal conductivity features of ZnO-based varistors using the laser pulse method. *Materials Science and Engineering A371 (2004)* s. 337-381.
- Charalambakos V. P., Pyrgioti E. C. (2006): Computer Simulation of Lightning Strokes. *28th International Conference on Lightning Protection, Kanazawa, Japan, 163-168.*
- Coleman V. A., Jagadish C. (2006): Basic Properties and Applications of ZnO. In *Zinc Oxide Bulk, Thin Films and Nanostructures, Processing, Properties and Applications*. ISBN 13:978-0-08-044722-3
- DEHN + SÖHNE. (2006): Zriaďovanie systému ochrany pred bleskom a prepätím (LPS) od základov (5). *AT&P journal*, ročník 2006, číslo 10, 20-21.
- DiracDelta (2012): Science and engineering encyclopedia – Zinc Oxide, http://www.diracdeltaco.uk/science/source/z/i/zinc_oxide/source.html
- Dudáš J. (2006): Princípy konštrukcie a funkcie varistorových svodičů přepětí. *Elektro – odborný časopis pro elektrotechniku*, ročník 2006, číslo 05.
- Dolník, B., Guľas, R. (2010a): Príspevok k mechanizmu starnutia ZnO varistorov. *Starnutie elektroizolačných systémov*, ročník 2010, číslo 9, s. 21-25.

- Dolník, B., Guľas, R. (2010b): Sledovanie zmien elektrických parametrov ZnO varistorov pre siete nízkeho napätia počas urýchleného starnutia. *Starnutie elektroizolačných systémov*, ročník 2010, číslo 8, s. 4-13.
- EPCOS (2011): SIOV Metal Oxide Varistors, Data Book 2011. http://www.epcos.com/web/generator/Web/Sections/ProductCatalog/ProtectionDevices/MonolithicVaristors/PDF/SIOV__General,property=Data__en.pdf;/SIOV_General.pdf
- Evangelides P. F., Christodoulou C. A., Gonos I. F., Stathopoulos I. A. (2010): Parameters' selection for metal oxide surge arresters models using genetic algorithm. *30th International Conference on Lightning Protection*, Cagliari, Italy, 1315 1-5.
- Fernandez F., Diaz R. (2001): Metal oxide surge arrester model for fast transient simulations, Int. conf. on Power System Transients IPAT'01, Rio De Janeiro, Brazil, paper 14.
- Fernández-Hevia D., de Frutos J., Caballero A. C., Fernández J. F. (2002): Bulk-grain resistivity and positive temperature coefficient of ZnO-based varistors. *Applied Physics Letters* Volume 82.
- Füle M., Minárik J. (2004): Charakteristika, vznik a šírenie prepätia. *Medzinárodná študentská vedecká konferencia* [elektronický zdroj], Nitra, Slovakia, 126-131.
- Garrett K. W., Rosenberg H. M. (1974): The thermal conductivity of epoxy-resin/poeder composite materials. *Journal of Physics D: Applied Physics* 7 1247 doi:10.1088/0022-3727/7/9/311.
- Glasa M. (2009): *Zvodiče Prepätia*: diplomová práca. Bratislava: FEI STU 2009. 78 s.
- Glasa M. (2011): *Matematické analýzy a počítačové simulácie prepätia a prepäťových ochrán*: písomná časť dizertačnej skúšky. Bratislava: FEI STU 2011. 55 s.
- Hasse P. (2000): *Overvoltage protection of low voltage systems*. 2nd Edition. TJ International Ltd, United Kingdom. ISBN 0 85296 781 0.
- Ibáñez Olaya H., Ortiz Suárez H., Avendaño C. A. (2006): Study of degradation of surge arresters of oxide of zinc type distribution. *28th International Conference on Lightning Protection*, Kanazawa, Japan, 996-1000.
- IEEE Working Group 3. 4. 11 (1992): Modeling of Metal Oxide Surge Arresters, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 7, No. 1.
- Kalousek M., Hučko B. (1996): *Prenos Tepla*, 1. vydanie. Bratislava STU 1996. ISBN 80-227-0881-X. 212 s.
- Katalóg Dehn (2010): http://www.dehn.cz/pdf/katalog/kat09/page7_21.pdf
- Katalóg Hakel (2010): <http://www.hakelsk.sk/index.php?obsah=zvodice-prepatia>
- Katalóg OBO BETTERMAN (2010): <http://www.obo-bettermann.com/sk/tbs.shtml>
- Katalóg Kiwa (2010): http://www.kiwa.sk/katalog/kiwa_POI.pdf
- Katalóg Phoenix Contact (2010): <http://eshop.phoenixcontact.sk/phoenix/treeViewClick.do?UID=852667155&parentUID=&reloadFrame=true>

- Kelham S., Rosenberg H. M. (1981): The thermal conductivity and specific heat of epoxy-resin from 0,1-80K. *Journal of Physics C: Solid State Physics* 14 1737 doi:10.1088/0022-3719/14/12/007.
- Kertész I. (2010): *Nové trendy v oblasti prístrojov na ochranu pred prepätím v rozvodoch nn*: diplomová práca. Bratislava: FEI STU 2010, 52 s.
- Lange J., Luisier A., Hult A. (1997): Influence of crosslink density, glass transition temperature and addition of pigment and wax on the scratch resistance of an epoxy coating. In *Journal of Coatings Technology*, Volume 69, Issue 872, p 77 – 82.
- Lee G., Kyu Kim Ch., Ku Lee M., Kyu Rhee Ch., Kim S. (2012): Thermal Conductivity enhancement of ZnO nanofluid using a one-step physical method. *Thermochimica Acta in 11th Symposium of the Korean Society of Thermophysical Properties*, Volume 542, August 2012, p. 24 – 27.
- LITTELFUSE (2011): *Introduction to Varistor Technology*, basic information. <http://www.littelfuse.com/varistors/introduction-to-varistors.html>
- Mekel P. (2001): Všeobecné pojednanie o problémoch prepäťovej ochrany nn rozvodov. *EE*, ročník 2001, číslo 6. s. 16-19.
- Murín J. (2012): Metóda konečných prvkov – Aplikovaná mechanika - prednáška. Zdroj: kmech.elf.stuba.sk/dokumenty/APLIMECH/prednaska_c2.pdf
- Olorunyolemi T., Birnboim A., Carmel Y., Wilson O. C., Knowlton Lloyd I. (2002): Thermal Conductivity of Zinc Oxide: From Green to Sintered State, *Journal J. Am. Ceram. Soc.* 85 [5] 1249-1253.
- Pinceti P., Giannettoni M. (1999): A simplified model for zinc oxide surge arresters, *IEEE Trans on Power Delivery*, vol. 14, No. 2, pp. 393-398.
- Slovenský ústav technickej normalizácie (2005). STN EN 61643-11, (2005): Nízkonapäťové prepäťové ochrany, Časť 11: prepäťové ochrany zapojené v sieťach nízkeho napätia, Požiadavky a skúšky. Slovenská technická norma.
- Slovenský ústav technickej normalizácie (2007). STN EN 61643-11/A11, (2007): Nízkonapäťové prepäťové ochrany, Časť 11: prepäťové ochrany zapojené v sieťach nízkeho napätia, Požiadavky a skúšky, Zmena A11. Slovenská technická norma.
- Slovenský ústav technickej normalizácie (2004). STN EN 61643-331: Súčasti pre nízkonapäťovú ochranu pred napätím, Časť 311: špecifikácia varistorov na báze oxidov kovov (MOV). Slovenská technická norma.
- Slovenský ústav technickej normalizácie (2007). STN EN 62305-1: Ochrana pred bleskom, Časť 1: Všeobecné princípy. Slovenská technická norma.
- Surge Arrester – SimPowerSystems (2005): <http://www.mathworks.com/help/toolbox/physmod/powersys/ref/surgearrester.htm>
- Valent F., Jurčacko L. (2001). Nová generácia zvodičov bleskového prúdu. *EE*, ročník 2001, číslo 6. s. 23-25.
- Valent F., Jurčacko L. (2004). Zhášacie systémy zvodičov bleskového prúdu. *EE*, ročník 2004, číslo 6. s. 14-16.

Vohlídal J., Štulík K., Julák A. (1999): Chemické a analytické tabulky. 1. vyd. Praha : Grada Publishing. ISBN 80-7169-855-5.

Wikipedia (2012a): Prestup tepla. Zdroj: <http://sk.wikipedia.org/w/index.php?oldid=4221472>

Yoshida S., Ishida H. (2006): A FT-IR Reflection-Absorption Spectroscopic Study of an Epoxy Coating on Imidazole-Treated Copper. In *Journal of Adhesion*, Volume 16, Issue 3, p 217 – 232.

Zoznam publikácií autora

[1.] **Protection of Residential Areas and Buildings from the Effect of Atmospheric Overvoltages – Glasla Miloš (100%)** In: Power Engineering 2010. International Scientific Event. - Bratislava: STU v Bratislave. - Power Engineering 2010. Energy, Ecology, Economy: 9th International Scientific Conference. Tatranské Matliare, Slovakia, 18.-20.5. 2010. - Bratislava: STU v Bratislave, 2010. - ISBN 978-80-89402-23-6, CD-Rom

[2.] **The Importance of Overvoltage Protection in Low Voltage Distribution – Glasla Miloš (100%)** In: ELITECH'10: 12th Conference of Doctoral Students. Bratislava, Slovak Republic, 26.5.2010. - Bratislava: STU v Bratislave, 2010. - ISBN 978-80-227-3303-8. - CD-Rom

[3.] **Možnosti ochrany budov pred účinkami prepätia – Glasla Miloš (100%)** In: EE časopis pre elektrotechniku a energetiku. - ISSN 1335-2547. - Roč. 16, č. 6 (2010), príloha Volt, s. 5-7

[4.] **Credibility of Simulation Models of MOV Varistor - Glasla Miloš (100%)** In: ELITECH'11: 13th Conference of Doctoral Students Faculty of Electrical Engineering and Information Technology. Bratislava, Slovak Republic, 17 May, 2011. - Bratislava: Nakladateľstvo STU, 2011. - ISBN 978-80-227-3500-1. - S. 1-4

[5.] **Degradation of Surge Arrester of MOV Varistor Type during Multiply Operations - Glasla Miloš (100%)** In: Power Engineering 2011. Energy - Ecology - Economy 2011: Tatranské Matliare, Slovakia, June 7-9, 2011. - Bratislava: Slovak University of Technology in Bratislava, 2011. - ISBN 978-80-89402-40-3. - USB Flash

[6.] **Simulation Models of MOV Variations Used in Overvoltage Protection - Glasla Miloš (100%)** In: Power Engineering 2011. Energy - Ecology - Economy 2011: Tatranské Matliare, Slovakia, June 7-9, 2011. - Bratislava: Slovak University of Technology in Bratislava, 2011. - ISBN 978-80-89402-40-3. - USB flash

[7.] **Porovnanie vlastností iskrišťových a varistorových zvodničových prepätia - Glasla Miloš (100%)** In: EE časopis pre elektrotechniku a energetiku. - ISSN 1335-2547. - Roč. 17, mimoriadne č.: ELOSYS, Trenčín, 11.-14.10.2011 (2011), s. 115-117

[8.] **Počítačové modely varistorov používaných v prepäťovej ochrane - Glasla Miloš (100%)** In: EE časopis pre elektrotechniku a energetiku. - ISSN 1335-2547. - Roč. 17, č. 5 (2011), s. 27-29

- [9.] **Zníženie ochranej úrovne poškodených varistorov - Glasa Miloš (100%)** In: EE časopis pre elektrotechniku a energetiku. - ISSN 1335-2547. - Roč. 17, č. 5 (2011), s. 30-35
- [10.] **Varistor - princíp, technológia, využitie - Glasa Miloš (100%)** In: EE časopis pre elektrotechniku a energetiku. - ISSN 1335-2547. - Roč. 17, č. 6 (2011), s. 30-31
- [11.] **Dôveryhodnosť počítačových modelov prepäťovej ochrany - Glasa Miloš (100%)** In: Posterus [elektronický zdroj]. - ISSN 1338-0087. - Vol. 4, Iss. 9 (2011), web-page (<http://www.posterus.sk/?p=11578>)
- [12.] **Impulzná odolnosť ZnO varistorov triedy I a II - Glasa Miloš, Žáček Miroslav (90%)** In: EE časopis pre elektrotechniku a energetiku. - ISSN 1335-2547. - Roč. 18, č. 1 (2012), príloha Volt, s. 2-4
- [13.] **The Application of Final Element Method on Metal Oxide Varistor Model - Glasa Miloš, Paulech Juraj (90%)** In: Power Engineering 2012. Energy - Ecology - Economy 2012: 11th International Scientific Conference EEE 2012. Tatranské Matliare, Slovakia, May 15-17, 2012. - Bratislava: Slovak University of Technology in Bratislava, 2012. - ISBN 978-80-89402-49-6. - S. 43-44
- [14.] **The Destruction Influence of Pulse and Surge Currents on Overvoltage Protection - Glasa Miloš, Hüttner Ľudovít (90%)** In: Power Engineering 2012. Energy - Ecology - Economy 2012: 11th International Scientific Conference EEE 2012. Tatranské Matliare, Slovakia, May 15-17, 2012. - Bratislava: Slovak University of Technology in Bratislava, 2012. - ISBN 978-80-89402-49-6. - S. 41-42
- [15.] **The Resistibility of Metal-Oxide Varistor Surge Arresters - Glasa, Miloš (100%)** In: ELITECH '12 [elektronický zdroj] : 14th Conference of Doctoral Students. Bratislava, 22 May 2012. - Bratislava: Nakladateľstvo STU, 2012. - ISBN 978-80-227-3705-0. - CD Rom, [3] s.
- [16.] **Tepelná analýza varistora na báze oxidov kovov - Glasa Miloš, Hüttner Ľudovít, Paulech Juraj (80%)** In: ELOSYS. Elektrotechnika, informatika a telekomunikácie 2012, Trenčín, 9.-12.10.2012 (2012), s. 187-189
- [17.] **Elektrické tepelné analýzy varistorov na báze oxidov kovov - Glasa Miloš, Paulech Juraj (90%)** In: Posterus [elektronický zdroj]. - ISSN 1338-0087. - Vol. 5, Iss. 10 (2012), web-page (<http://www.posterus.sk/?p=13971>).
- [18.] **Oteplenie prúdovej dráhy kompaktného ističa pri prechode impulzných prúdov – Kertész Igor, Glasa Miloš (30%)** In: EE časopis pre elektrotechniku a energetiku. - ISSN 1335-2547. - Roč. 18, č. 6 (2012), s. 32-33.

Doteraz nezverejnené publikácie zaslané do redakcií zahraničných odborných časopisov:

- [19.] **The MOV computer models for thermal – electric analysis – Journal of electrical engineering** (<http://www.jee.ro/info.php>) Rumunsko, Júl 2012.
- [20.] **Modely varistorov pre elektrické a tepelné analýzy – časopis Energetika** (<http://www.casopisenergetika.cz/>) Česko, Október 2012.