

Bystrík Dolník, Lukáš Kruželák

Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Technická univerzita v Košiciach

Sledovanie zmien popisných charakteristík ZnO varistorov

Abstract. Varistor na báze ZnO sa používa ako nelineárny komponent do obmedzovačov prepätia. Obmedzovač prepätia reprezentuje dôležitý prvok v elektrických sieťach, pretože zabezpečuje ochranu elektrických zariadení pred účinkami prepätí. Článok pojednáva o metóde urýchleného starnutia pomocou impulzných elektrických a prúdových polí aplikované na komerčne vyrábané varistory na báze ZnO. Boli použité impulzy prúdu s tvarom 8/20. Experimentálne merania na ZnO varistoroch poukázali na tú skutočnosť, že impulzy prúdu degradujú volt-ampérovú charakteristiku varistora. Bolo tiež dokázané, že koeficient nelinearity α sa vplyvom impulzov prúdu zmenšil. Impulzy prúdu možno použiť ako fyzikálny faktor na urýchlenie starnutia ZnO varistorov.

Abstract. The ZnO-based varistor is used as a nonlinear component in surge protection devices. The surge protection device represents an important element in electrical networks because it protects electrical equipment from the effects of overvoltage. This article discusses the method of accelerated aging using pulsed electric and current fields applied to commercially produced ZnO-based varistors. In the experiment, 8/20 shape current pulses have been used. Experimental measurements on ZnO varistor pointed to the fact that the current pulses degrade the current-voltage characteristics of the varistor. It was also shown that the coefficient of nonlinearity α has decreased due to current impulses. Current impulses can be used as a physical factor to accelerate the aging of ZnO varistors. (**Monitoring changes in descriptive characteristics of ZnO varistors**).

Kľúčové slová: ZnO, varistor, koeficient nelinearity, zvodový prúd, starnutie.

Keywords: ZnO, varistor, coefficient of nonlinearity, leakage current, aging.

Úvod

Nelineárny rezistor (varistor) vyrábaný z oxidu zinočnatého (ZnO) a z prímiesi oxidov kovov vzácnych zemín, ako sú: Bi₂O₃, Sb₂O₃, Co₂O₃, MnO₂ a Cr₂O₃ reprezentujú multi-kompozitný, napätovo závislý elektrokeramický prvok, ktorého hlavnou úlohou je opakovane obmedzovať krátkotrvajúce napätové impulzy prevyšujúce menovité napätie pre zariadenie [1]. Elektrické pole E_b štandardne vyrábaného ZnO varistora, zodpovedajúce prieraznému napätiu ZnO varistora, má hodnotu v rozmedzí medzi 100 V/mm až 200 V/mm [2], [3]. Hodnota prierazného elektrického poľa E_b je zvyčajne úzko spojená s prierazným napätím U_b , ktorá korešponduje s hustotou elektrického prúdu rovnajúcou sa 1 mA/cm² [4].

Na zmenšenie rozmerov obmedzovačov prepätia kvôli viac lineárnemu rozloženiu napätia pozdĺž varistorových blokov (hlavne v sieťach s extrémne vysokým napätím) a na zníženie nákladov na ich výrobu možno použiť varistory s vysokým napätovým gradientom [1], [5–7]. Varistory s vysokým napätovým gradientom majú hodnotu prierazného elektrického poľa E_b v rozmedzí medzi 300 V/mm až 400 V/mm. Takúto vysokú hodnotu prierazného elektrického poľa možno dosiahnuť modifikovaním pomerov prímiesi iných než je oxid bizmutu (Bi₂O₃) v základnom zložení.

Najviac študovaný varistorový systém, ktorý sa v súčasnosti komerčne používa, je založený na ZnO štruktúre, tak ako ju pôvodne navrhol Matsuoka okolo roku 1970 [2]. Atmosférické prepätia, vznikajúce počas búrkovej aktivity, niekoľkonásobne prevyšujú menovité napätie zariadení v sieťach nízkeho napätia. Keď blesk spôsobí škodu na strategicky významnom elektrickom zariadení (priamym alebo nepriamym účinkom), možno očakávať vysoké ekonomické straty. Z tohto dôvodu má štúdium degradačných mechanizmov pôsobiacich na varistorovú štruktúru veľký význam. Vo všeobecnosti sa degradačné javy študujú pri pôsobení jednosmerných, striedavých alebo impulzných elektrických a prúdových polí, prípadne ich kombináciou. V dôsledku pôsobenia spomenutých polí vznikajú zmeny v hodnote koeficienta nelinearity a tiež aj zmeny vo veľkosti zvodových prúdov [1–4]. Takéto zmeny majú nepriaznivý vplyv na čas reakcie varistora na prepätia, ako aj na tepelnú stabilitu. Zvýšenie zvodového prúdu, má okrem tepelnej nestability, za následok rýchlejšie starnutie varistora.

Stupeň nelinearity varistora sa vyjadruje pomocou koeficienta nelinearity α definovaný podľa rovnice [1]

$$\alpha = \frac{U}{I} \frac{dI}{dU}, \quad (1)$$

kde: U – je priložené napätie a I – je prúd tečúci varistorom.

Pomocou koeficienta nelinearity varistora možno vyjadriť nelineárnu charakteristiku varistora nasledovne:

$$I = \left(\frac{U}{const} \right)^\alpha, \quad (2)$$

pričom U a I majú význam ako v (1). Lineárna závislosť medzi U a I je možná v prípade keď $\alpha = 1$; keď $\alpha \rightarrow \infty$, potom sa jedná o ideálny varistor. Typické hodnoty koeficienta nelinearity α reálnych komerčne vyrábaných ZnO varistorov sú v rozsahu 30 až 100 [8]. V tejto práci sa analyzuje navrhnutá metóda urýchleného starnutia pomocou impulzných elektrických a prúdových polí (použitie impulzy prúdu s tvarom 8/20 napodobňujúce atmosférický výboj) aplikovaná na komerčne vyrábané varistory na báze ZnO. Taktiež sa analyzuje degradačný účinok navrhutej metódy urýchleného starnutia na ZnO varistoroch. V tejto práci boli použité merania I-V charakteristiky pri monitorovaní degradácie koeficienta nelinearity v ZnO varistoroch.

Teoretická časť

Na generovanie impulzov prúdu s amplitúdou niekoľko stoviek až tisícok ampérov možno využiť rezonančný obvod. Elektrické rezonančné javy vznikajú v obvodoch, ktoré pozostávajú z indukčnosti L , kapacity C a odporu R . Odpor R môže byť do rezonančného obvodu aj umelo zaradený s cieľom získať optimálny, alebo presne definovaný, tvar impulzu prúdu. Kondenzátor s kapacitou C a cievka s indukčnosťou L reprezentujú zásobníky elektrickej (potenciálnej) a magnetickej (kinetickej) energie.

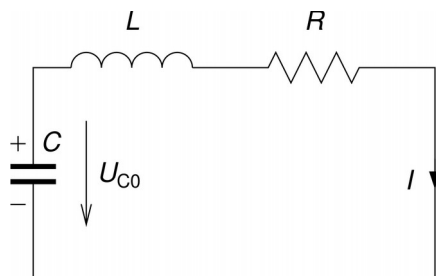
V ideálnom (bezstratovom) elektrickom obvode je $R = 0$. Potom za predpokladu, že počiatočné napätie na konden-

záto je U_{C0} , vzniknú v indukčnosti netlmené prúdové a na kondenzátore napäťové kmity s kmitočtom [9]

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \quad (3)$$

kde: ω_0 – je vlastný kmitočet netlmeného obvodu.

V ideálnom prípade obvodom tečie striedavý periodický prúd s konštantnou amplitúdou. V reálnych podmienkach, akými sú napr. skúšobne, takýto ideálny prípad neexistuje.



Obr. 1. Náhradná schéma sériového rezonančného RLC obvodu: L – indukčnosť, C – kapacita, R – odpor, U_{C0} – počiatočné napätie na kondenzátore.

Príklad viac reálneho elektrického sériového rezonančného obvodu je na obrázku 1. Tuná rezistor R reprezentuje odpor spájacích vodičov v ktorom sa energia elektromagnetického poľa premieňa na teplo a na mechanickú prácu. V skutočnosti existuje náhrada kondenzátora prídavným paralelným odporom a v prípade cievky kapacity medzi závitmi cievky. Časovú závislosť prúdu tečúceho obvodom možno získať analýzou prechodného javu. Výsledkom je

$$I = \frac{U_{C0}}{\omega_r L} e^{-\alpha t} \sin(\omega_r t), \quad (4)$$

kde: ω_r – je kruhová frekvencia a α – je konštanta útlmu

$$\alpha = \frac{R}{2L}. \quad (5)$$

Z hľadiska riešenia rovnice (4) je významný výraz, ktorý pre analytické riešenie lineárnej diferenciálnej rovnice druhého rádu pre sériový RLC obvod reprezentuje diskriminant D pre koreň charakteristickej rovnice, rovný

$$D = \delta^2 - \omega_0^2. \quad (6)$$

Keď výraz v (6) bude rovný nule $D = 0$, dostaneme vzťah pre tzv. kritický odpor obvodu [9]

$$R_k = 2\sqrt{\frac{L}{C}}, \quad (7)$$

kde: R_k – je kritický odpor obvodu.

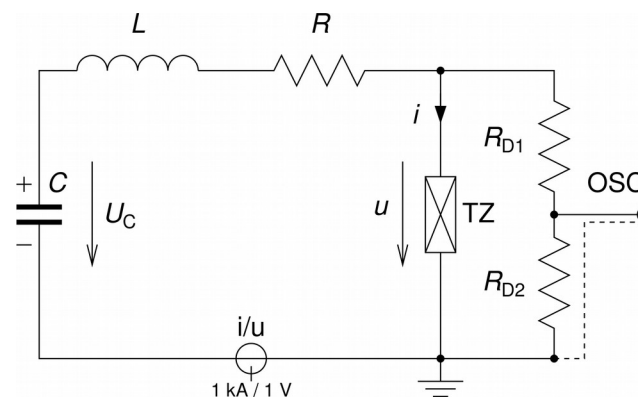
Keď celkový odpor obvodu R je väčší ako kritický odpor obvodu $R > R_k$, hodnoty všetkých časovo závislých veličín sa blížia k svojim ustáleným hodnotám asymptoticky, bez oscilácií. V tomto prípade hovoríme o pretlmenom obvode. Hraničný prípad je, keď celkový odpor obvodu R je rovný kritickému odporu obvodu $R = R_k$; ustálenie veličín trvá najkratšie, hovoríme o kritickom tlmení a dej nazývame na hranici aperiodicity. Spomenuté stavy v sériovom RLC obvode možno využiť v generátoroch impulzov prúdu.

Experiment

Cieľom experimentu bolo navrhnuť metódu urýchleného starnutia pre ZnO varistory monitorovaním degradácie koeficienta nelinearity ZnO varistorov v laboratórnych podmienkach meraním I-V charakteristik.

Použitá vzorka

Predmetom skúmania pre navrhnutú metódu urýchleného starnutia boli komerčne vyrábané ZnO varistory pre sieť nízkeho napätia s označením JVR10N431K. Jedná sa o symetrický prvok určený na ochranu elektrických zariadení pred účinkami prepätí zapojených do siete nízkeho napätia. Varistor má tvar disku s radiálne upravenými vývodmi, vonkajšia izolácia je z epoxidovej živice.



Obr. 2. Zjednodušená schéma meracieho obvodu: L – indukčnosť, C – kapacita, R – odpor, U_C – nabíjacie napätie na kondenzátorevej batérii, u – napätie na varistore, i – prúd tečúci cez varistor TZ – testované zariadenie, R_{D1} a R_{D2} delič napätia, OSC – výstup pre digitálny osciloskop, i/u – prevodník prúd na napätie.

Metodológia experimentu

Pre metódu umelého starnutia bola zvolená injektáž impulzov prúdu do vzorky pomocou generátora impulzov prúdu. Zjednodušená schéma meracieho obvodu je uvedená na obrázku 2. Generátor impulzov prúdu pracuje ako pretlmený, to znamená, že impulz prúdu tečúci cez testovaný varistor má aperiodický priebeh.

Po každej injektáži impulzu prúdu bol urobený záznam časového priebehu napätia na varistore a impulzu prúdu tečúceho cez varistor. Z každého záznamu bol urobený numerický výpočet energie absorbovanej varistorom W_{abs} pre integrál

$$W_{abs} = \int_0^t ui \tau d\tau. \quad (8)$$

kde: u – je okamžitá hodnota napätia na varistore, i – je okamžitá hodnota prúdu tečúceho varistorom, 0 a t – je dolná a horná hranica pre určitý integrál, τ – je premenná.

Pre numerický výpočet určitého integrálu podľa (8) bola použitá lichobežníková metóda. Ako výpočtový nástroj pre numerické výpočty určitého integrálu bol použitý program Octave. Skript napísaný pre program Octave automaticky načíta namerané dáta (čas, napätie na varistore a prúd prechádzajúci varistorom) v aktuálnom adresári, vypočíta energiu absorbovanú varistorom, zistí amplitúdu impulzu prúdu a namerané dáta exportuje do grafickej podoby.

Zmeny v elektrických charakteristikách ZnO varistorov boli posudzované komparačnou metódou. Porovnávané boli tieto popisné veličiny: napätie zodpovedajúce prietoku ustáleného prúdu 1 mA označené U_{1mA} , koeficient nelinearity α_1 a α_2 , príznačné napätie U_{br} . Koeficienty nelinearity α_1 a α_2 sa vypočítali podľa [2] pre 1 μ A a 100 μ A s referenciou 1 mA.

Inštrumentácia a postup merania

Schéma meracieho obvodu je znázornená na obrázku 2. Nabíjacie napätie na kondenzátorovej batérii bolo nastavené v rozsahu od 800 V do 2 kV. Tým sa celková energia elektrického poľa akumulovaná v kondenzátorovej batérii regulovala v rozsahu od 6,4 J do 40 J.

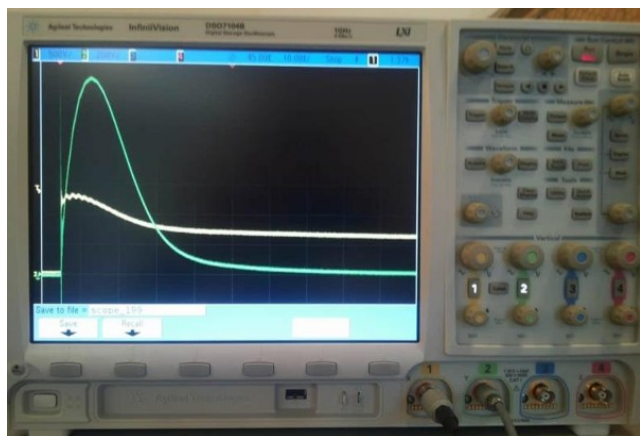
Pre účel časového záznamu napätia na testovanom ZnO varistore bol použitý delič napätia s deliacim pomerom 1 000:1. Časový priebeh impulzu prúdu tečúceho ZnO varistorom sa meral pomocou prevodníka (prúd na napätie, na obrázku 2 označený ako i/u), pričom prevodová konštanta je opäť 1 000:1. Pohľad na generátor impulzov prúdu je na obrázku 3.



Obr. 3. Generátor impulzov prúdu; nabíjacie napätie na kondenzátorovej batérii nastavené na 1,9 kV.

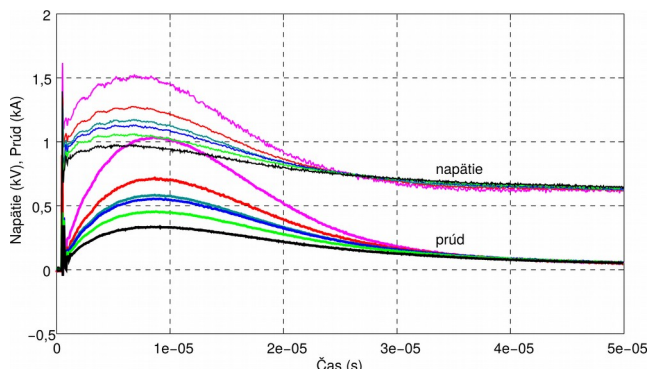
Napätová a prúdová odozva ZnO varistora sa merala pomocou digitálneho pamätového osciloskopu Agilent DSO 7104B (DSO). Výstupné napätie z deliča napätia bolo pripojené na vstup CH1 DSO, výstup z prevodníka bol pripojený na vstup CH2 DSO.

Pre použité vstupné kanály DSO boli nastavené konštanty, zodpovedajúce deliacemu pomeru deliča napätia a prevodníka. Tým bolo možné zaznamenávať dáta uložené v pamäti osciloskopu v reálnych hodnotách. Pohľad na digitálny pamätový osciloskop so zaznamenaným časovým priebehom napätia na ZnO varistore a prúdu tečúceho varistorom je na obrázku 4.



Obr. 4. Pohľad na digitálny pamätový osciloskop so zaznamenaným časovým priebehom napätia a prúdu.

Na začiatku plánovaného experimentu sa odmerala prúdovo-napätová (I-V) charakteristika novej nedegradovanej vzorky. Po meraní I-V charakteristiky bola vzorka namáhaná impulzmi prúdu s amplitúdou prúdu v rozsahu od 336 A do 1 113 kA, ktoré zodpovedali veľkosti nabíjacieho napätia na kondenzátorovej batérii.



Obr. 5. Časové priebehy napätia a prúdu pre rôzne nabíjacie napätia na kondenzátorovej batérii; prvá séria aplikovaných impulzov prúdu.

Impulzy prúdu boli privádzané v ôsmich sériách. Jednotlivé série impulzov prúdu obsahovali skupinu impulzov prúdu v počte 2 až 8. Medzi každou skupinou impulzov prúdu bola prestávka trvajúca 1 až 2 minúty s cieľom dosiahnuť rovnakú teplotu vzorky, t.j. izbovú teplotu. Na obrázku 5 sú zobrazené časové priebehy impulzov prúdu tečúce cez varistory a im zodpovedajúce napätia na varistore namerané počas prvej série injektovaných impulzov prúdu. Impulz prúdu a jemu zodpovedajúce napätie na varistore majú na obrázku 5 totožnú farbu.

Po každej sérii boli na vzorku merané I-V charakteristiky. Výsledná I-V charakteristika bola vypočítaná ako aritmetický priemer z piatich opakovaných meraní. Namerané I-V charakteristiky boli použité pre výpočet ďalších výpovedschopných veličín: koeficient nelinearity, zvodový prúd testovaného ZnO varistora a prirazné napätie, s cieľom zistiť stupeň degradácie ZnO varistora komparáciou veľkostí zvodového prúdu, prirazného napätia a koeficienta nelinearity. V prípade, keď došlo k trvalému poškodeniu testovaného varistora, bola vypočítaná absorbovaná energia.

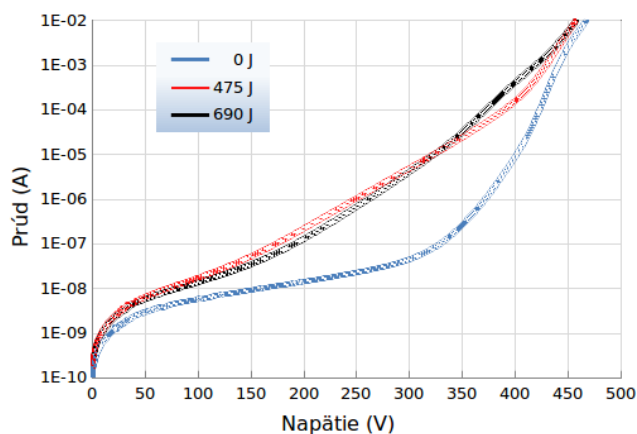
Výsledky a vyhodnotenie

Hodnoty prúdu tečúceho cez varistor pri definovanom napätí (I-V charakteristika) sú znázornené na obrázku 5. Pre vzájomné porovnanie sú vybrané tri charakteristiky: bez injektáže impulzu prúdu (nová vzorka použitá na začiatku experimentu) označené 0 J, po absorbovaní energie 475 J s označením 475 J a nakoniec po absorbovaní 690 J (posledná injektáž impulzu prúdu spôsobila trvalé poškodenie testovaného varistora) s označením 690 J.

Ako je vidieť z I-V charakteristiky, po injektáži impulzu prúdu dochádza k výraznej zmene (degradácii) vlastností ZnO varistora. Kým koeficient nelinearity α_1 nového varistora je 40,7 a α_2 je 166,2, po absorbovaní energie 690 J klesol koeficient nelinearity α_1 na 14,6 a α_3 na 58,2. V oboch prípadoch ide o pokles na 36 % a 35 % pôvodnej hodnoty.

Podobne možno konštatovať o ďalších sledovaných popisných veličinách. Napätie zodpovedajúce prúdu ustáleného prúdu 1 mA označené U_{1mA} kleslo z počiatočnej hodnoty 442 V na začiatku experimentu na 420 V, čo je pokles na 95 % pôvodnej hodnoty.

Priprazné napätie U_{br} opäť kleslo z hodnoty 353,6 V na 336 V, čo je 95 % pôvodnej hodnoty. Čo sa týka trendu zvodového prúdu, bol zaznamenaný nárast z hodnoty 0,314 μA na hodnotu 15,38 μA , čo je 4 898 % pôvodnej hodnoty; približne 49-násobok.



Obr. 6. Závislosť prúdu od napätia testovanej vzorky ZnO varistora počas experimentu (I-V charakteristika); 0 J – počiatočný stav (bez namáhania impulzmi prúdu), 475 J – po absorbovaní energie 475 J, 690 – po absorbovaní energie 690 J.

Porovnaním I-V charakteristík na obrázku 5 je vidieť, že po celkovom absorbovaní energie 690 J došlo k čiastočnému zlepšeniu I-V charakteristiky voči I-V charakteristike meranej po absorbovaní 475 J až do napätia 320 V, avšak pri vyšších testovacích napätiach je I-V charakteristika zjavne zhoršená.

Tabuľka 1 Popisné charakteristiky sledované počas dedgradácie: W_{abs} – absorbovaná energia, U_{1mA} – napätie zodpovedajúce prietoku ustáleného prúdu 1 mA, U_{br} – prierazné napätie, α_1 , α_2 koeficient nelinearity.

W_{abs} (J)	U_{1mA} (V)	U_{br} (V)	I_z (μA)	α_1 (-)	α_2 (-)
0	442	353,6	0,314	40,7	166,2
475	431	344,8	19,69	12,68	70,92
690	420	336,0	15,38	14,76	58,21

Prehľad popisných charakteristík a ich degradácia po absorbovaní energie 475 J a 690 J injektážou impulzov prúdu je uvedený v Tabuľke 1. Treba poznamenať, že aj keď sa zmena prierazného napätia U_{br} a napätia pri prietoku prúdu 1 mA U_{1mA} nejaví ako výrazná, predsa sa jedná o závažnú zmenu. Túto skutočnosť potvrdzujú aj výrazné zmeny vo veľkosti zvodového prúdu I_z a koeficientov nelinearity α_1 a α_2 .

Zvýšenie zvodového prúdu má za následok urýchlené starnutie ZnO varistorov a v prípade tak extrémnej zmeny je dochádza k urýchlenému starnutiu aj pri prevádzkovom napätí. Pokles koeficienta nelinearity má zasa za následok predĺženie času reakcie ZnO varistora na prepätia. V nasledujúcom období bude urobená podrobnejšia štúdia pre použitú metodiku na urýchlenie starnutia ZnO varistorov.

Záver

Použitie impulzov prúdu injektované do ZnO varistorov má svoje opodstatnenie, pretože sa jedná o fyzikálny faktor, ktorý v prevádzkových podmienkach pôsobí na prepäťové ochranné prvky, akými sú ZnO varistory, čím spôsobuje urýchlenie starnutia a tiež degradáciu ich fyzikálnych (najmä elektrických) charakteristík.

Na komerčne vyrábaných ZnO varistoroch boli použité impulzy prúdu s tvarom 8/20. Experimentálne merania na ZnO varistoroch poukázali, že impulzy prúdu degradujú volt-ampérovú charakteristiku varistora a tiež, že koeficient nelinearity α sa vplyvom impulzov prúdu zmenšil. Impulzy

prúdu možno použiť ako účinný fyzikálny faktor na urýchlenie starnutia ZnO varistorov.

Literatúra

- [1] Gupta, T. K. *Application of zinc oxide varistors*, In: Journal of the American Ceramic Society, 1990, vol. 73, pp. 1817–1840. doi:10.1111/j.1151-2916.1990.tb05232.x
- [2] Matsuoka, M. *Nonohmic Properties of Zinc Oxide Ceramics*, In: Japanese Journal of Applied Physics, vol. 10(736), 1971.
- [3] Eda, K. *Conduction mechanism of non-Ohmic zinc oxide ceramics*, In: Japanese Journal of Applied Physics, vol. 49, 1978.
- [4] Alim, M. A., Seitz, M. A., Hirthe, R. W. *Complex plane analysis of trapping phenomena in zinc oxide based varistor grain boundaries*, In: Journal of Applied Physics, vol. 63(7), 1988, pp. 2337-2345.
- [5] Imai, T., Udagawa, T., Ando, H., Tanno, Y., Kayano, Y., Kan, M. *Development of high gradient zinc oxide nonlinear resistors and their application to surge arresters*, In: IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 13, 1998, pp. 1182–1187.
- [6] Pengfei Meng, Shanglin Lyu, Jun Hu, Jinliang He, *Indium tailors the leakage current and voltage gradient of multiple dopant-based ZnO varistors*, In: Ceramics International, vol. 43, no. 5, 2017, pp. 4127-4130.
- [7] Pengfei Meng, Jun Hu, Jinliang He, *Low-residual-voltage ZnO varistor ceramics improved by multiple doping with gallium and indium*, Materials Letters, vol. 195, 2017, pp. 209-212.
- [8] Dolník, B. *Prepätia v elektrických sieťach*. Habilitačná práca, 2016. TU v Košiciach.
- [9] Mayer, D. *Úvod do teórie elektrických obvodů*. SNTL/ALFA, Praha, 1981.

Autori vyjadrujú poďakovanie Vedeckej grantovej agentúre Ministerstva školstva Slovenskej republiky a Slovenskej akadémie vied v rámci projektu VEGA-1/0132/15, VEGA-1/0311/15 a VEGA-2/0141/16.

Túto prácu podporila Slovenská agentúra pre výskum a vývoj na základe zmluvy č. APVV-15-0438.

Táto práca bola podporovaná Agentúrou Ministerstva školstva Slovenskej republiky pre štrukturálne fondy EÚ na základe projektu Vývoj unikátneho nízkoenergetického statického zdroja pre elektrosystémy (číslo projektu: 26220220029, prioritná os 2 Podpora výskumu a vývoja).



Európska únia



Operatívny program
VÝSKUM A VÝVOJ

Podporujeme výskumné aktivity na Slovensku / Projekt je spolufinancovaný zo zdrojov EÚ. Tento článok bol vypracovaný v rámci projektu „Centrum excelentnosti integrovaného výskumu a využitia progresívnych

materiálov a technológií v oblasti automobilovej elektroniky“, ITMS 26220120055.



Európska únia



Operatívny program
VÝSKUM A VÝVOJ



Podporujeme výskumné aktivity na Slovensku / Projekt je spolufinancovaný zo zdrojov EÚ. We support research activities in Slovakia/This project is being co-financed by the European Union. Tento príspevok vznikol vďaka podpore v rámci operačného programu Výskum a vývoj, pre projekt: Univerzitný vedecký park TECHNICAL COM pre inováčné aplikácie s podporou znalostných technológií, kód ITMS: 26220220182, spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja.

Autori: Bystrík Dolník, Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, E-mail: bystrik.dolnik@tuke.sk

Lukáš Kruželák, Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, E-mail: lukas.kruzela@tuke.sk