

# Dinamična $u-t$ karakteristika varistorjev

**Anton Zhezhov, Mislav Trbušič in Anton Hamler**

Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, Koroška cesta 46, 2000 Maribor, Slovenija

E-pošta: [anton.zhezhov@student.um.si](mailto:anton.zhezhov@student.um.si)

## Dynamic $u-t$ characteristic of varistors

**Abstract.** This short paper presents a brief introduction to surge voltage wave impact on a metal-oxide material based varistors, which are commonly used to suppress overvoltages in electrical power systems and devices. The article is focused on the measurements of dynamic  $u-t$  characteristic of low voltage application varistor. The results show a good agreement with theoretical predictions which are based on the breakdown mechanism in gasses.

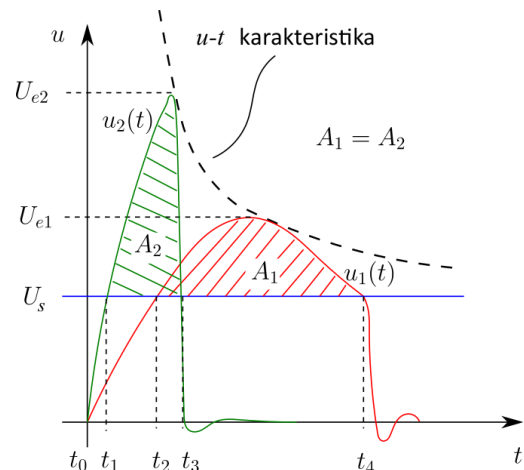
## 1 Uvod

Ščitenje elektronskih naprav proti hitrim tranzientnim prenapetostim predstavlja s stališča zanesljivosti pomemben vidik pri načrtovanju vezij, saj so polprevodniški elementi še posebej občutljiva na tovrstne motnje, ki imajo nemalokrat za posledico uničenje elementa. Iz omenjenega razloga je zaželeno omejiti vpliv prenapetosti na delovanje vezja, za kar se uporabljajo metal oksidni nelinearni upori, ki jih zaradi namena imenujemo tudi prenapetostni odvodniki oziroma varistorji. Glede na širok razpon in značaj prenapetosti, ki se pojavljajo v nizkonapetostnem omrežju je smotrno poznati odziv tovrstnih zaščitnih elementov pri počasnih in hitrih prenapetostnih pojavih. Z namenom ovrednotenja odziva varistorja na udarno napetost, so v članku predstavljene meritve napetostnih razmer na varistorju pri različnih strminah čela udarnega vala [1][2].

## 2 Merjenje udarne $u-t$ karakteristike varistorja

Namen preskušanja varistorjev z udarno napetostjo je posneti  $u-t$  karakteristike, na podlagi katerih bi se dalo sklepati ali pri kovinsko oksidnih materialih velja zakon enakih površin, podobno kot je to pri plinastih izolantih, kjer je prebojna trdnost odvisna od površine, ki jo napetostni sunek oklepa z vrednostjo statične prebojne napetosti, ki je najnižja napetost pri kateri pride do preboja, kot je shematsko prikazano na sliki 1. Za določeno geometrijo in izolacijski plin je ta površina konstantna, kar pomeni, da bo pri hitrejših napetostnih spremembah, pri bolj strmih čelu udarnega vala, napetost pri kateri pride do preboja višja, kot pa pri počasnih spremembah napetosti, oz. pri bolj položnem čelu udarnega vala [3]. Pri varistorjih je zaradi drugačnega mehanizma prevajanja, smiselno udarno napetost primerjati s statično prevodno napetostjo, oz.

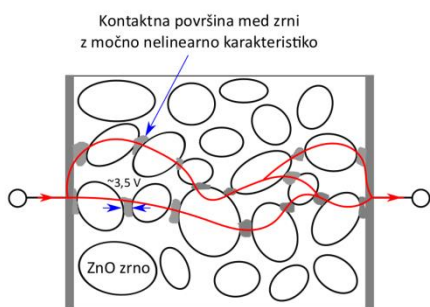
napetostjo pri kateri skozi varistor steče nek v naprej predpisani tok npr. 10 mA.



Slika 1: Zakon enakih površin in  $u-t$  karakteristika, ki velja pri plinskih izolantih

### 2.1 Varistor

Varistor je nelinearen upor, sestavljen na osnovi ZnO zrn (~90%) in drugih komponent  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MnO}_2$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Sb}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Co}_3\text{O}_4$  (~10%), ki kot celota predstavljajo nehomogen material [2][4]. ZnO zrna, oziroma kontaktna površina med njimi, se obnašajo podobno kot polprevodniški elementi s kopico zanimivih fizikalnih lastnosti, kot so: visoka mobilnost elektronov, visoka toplotna prevodnost, široka energijska reža (energijski pas) in relativno visoka vezalna energija, kar omogoča uporabo ZnO spojin ne samo v varistorjih ampak širše na področju polprevodniške tehnike, npr. v tankoslojnih tranzistorjih, foto-detektorjih, LED diodah, ipd. [5]. Pri varistorjih oz. pri prenapetostnih zaščitnih elementih na osnovi ZnO je ključno, da kontaktna površina med zrnami izkazuje usmerniški efekt z relativno visoko pragovno napetostjo, ki znaša približno ~ 3,5 V, tako lahko napetostno in tokovno vzdržnost varistorja pogojujemo s številom zaporednih in vzporednih kontaktnih površin, kjer zaporedna vezava zvišuje napetostni, vzporedna pa tokovni nivo (Slika 2) [6][7]. Povedano drugače, z velikostjo ZnO zrn, ki jih dobimo med procesom sintranja in geometrijo, so v veliki meri določeni parametri varistorja.



Slika 2: Sestava varistorja; prevajalno napetost določajo mejne ploskve med ZnO zrnji

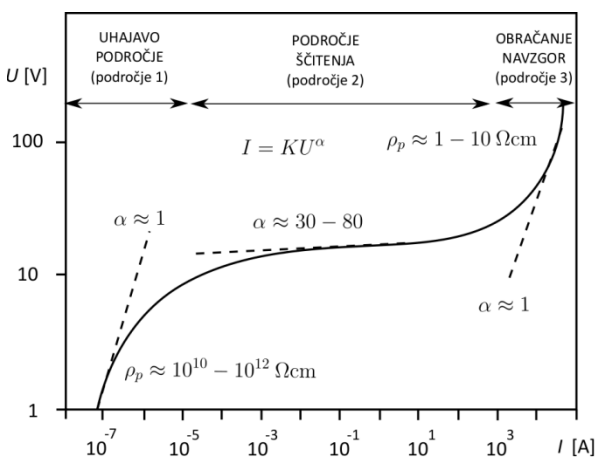
Z ozirom na statično oz. kvazistatično  $U-I$  karakteristiko varistorja, ki jo kaže slika 3, je mogoče delovanje varistorja opredeliti v tri področja, in sicer:

- področje 1, v katerem varistor deluje pri normalnih obratovalnih napetostih. V tem področju ima varistor zelo visoko upornost, pa vendarle je značilno, da kljub temu skozenj teče nek električni tok, ki mu pravimo uhajavi tok.
- Področje 2 na  $U-I$  karakteristiki je izrazito nelinearno in značilno za zaščitno delovanje varistorja pred prenapetostmi. V tem področju želimo da varistor omejuje napetostne sunke.
- Področje 3, ki je ponovno linearno, kjer se  $U-I$  karakteristika obrača navzgor. Varistor se v tem področju delovanja obnaša podobno kot nizkoohmski upor.

Za posamezno področje delovanja je tokovno napetostna odvisnost podana z izrazom (1)

$$I = KU^\alpha, \quad (1)$$

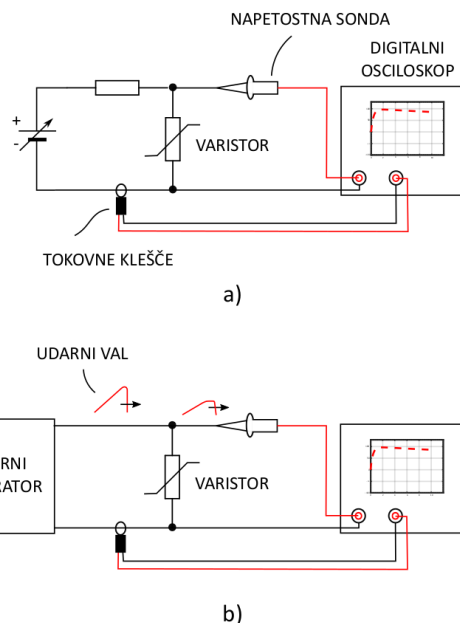
pri tem so:  $I$  tok skozi varistor,  $U$  napetost na varistorju,  $\alpha$  koeficient nelinearnosti in  $K$  konstanta varistorja.



Slika 3: Shematski prikaz statične oz. kvazistatične  $U-I$  karakteristike varistorja za nizkonapetostne aplikacije.

## 2.2 Merilno vezje in potek meritev

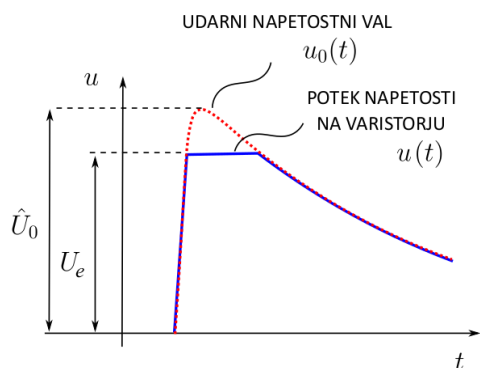
Shematski prikaz merilnega vezja za določanje statične in dinamične prevodne napetosti podaja slika 4. Kot izvor enosmerne napetosti je bil uporabljen enosmerni laboratorijski vir. Udarne napetost za ovrednotenje dinamične prevajalne napetosti je bila ustvarjena z laboratorijskim udarnim napetostnim generatorjem. Merjenje napetosti in toka je bilo izvedeno preko napetostne sonde in tokovnih klešč priključenih na digitalni osciloskop. Uporabljena merilna oprema in tip varistorja so podani v tabeli 1 v dodatku.



Slika 4: Shema merilne vezave za preizkušanje varistorjev z udarno napetostjo; a) za merjenje statične prevajalne napetosti in b) za merjenje dinamičnega odziva.

Ker je bil namen meritev ovrednotiti dinamično  $u-t$  karakteristiko varistorja, oziroma vrednost udarne napetosti  $U_e$ , pri kateri preide varistor v prevodno stanje, je kot referenčna vrednost bila izbrana statično prevodna napetost  $U_s$ , oz. tista vrednost enosmerne napetosti, pri kateri skozi varistor teče tok 10 mA. Shema merilnega vezja za določitev  $U_s$  je podana na sliki 4-a.

V naslednjem koraku je bil varistor preizkušan še z udarnim napetostnim valom  $u_0(t)$  (Slika 4-b), kjer je bilo opravljenih več meritev potekov napetosti  $u(t)$  na varistorju pri različnih temenskih vrednostih udarnega vala  $\hat{U}_0$ , oziroma pri različnih strminah naraščanja napetosti. Pri tem nas je zanimala vrednost napetosti pri kateri varistor omeji špico udarnega vala  $U_e$ . Shematsko je prikaz časovnega poteka napetosti na varistorju podan na sliki 5, kjer je prav tako pikčasto vrisan udarni napetostni val.



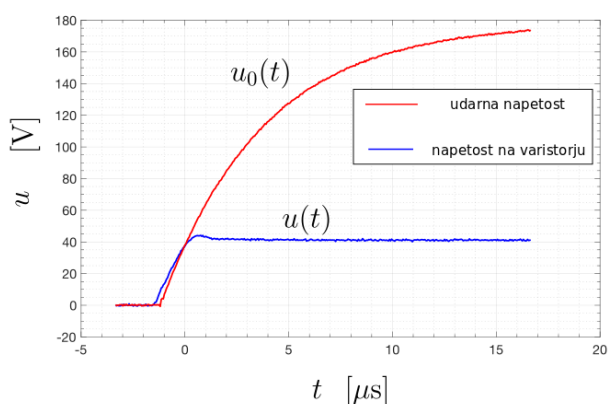
Slika 5: Shematski prikaz napetostnih razmer na varistorju pri preizkušanju z udarno napetostjo

### 3 Rezultati meritev in komentarji

Na podlagi opisanih merilnih postopkov, smo v prvem koraku izvedli meritev statične prevodne napetosti, ki je za izbrani ZnO varistor tipa ZOV-10D330K znašala  $U_s = 34,8$  V (pri toku 10 mA).

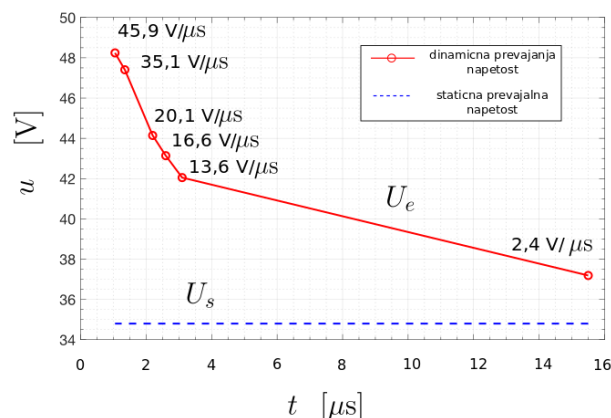
Z namenom določitve dinamične  $u-t$  karakteristike varistorja smo nato po merilni shemi, ki jo kaže slika 4-b, opravili šest meritev z enojnim udarnim valom, kjer smo vršno vrednost udarnega vala  $\hat{U}_0$  spreminjali v mejah od 54-289 V. Za primer  $\hat{U}_0 = 179,8$  V je na sliki 6 prikazan z osciloskopom izmerjeni časovni potek napetosti na varistorju, kot tudi referenčni udarni val, ki je bil izmerjen brez priključenega varistorja. V konkretnem primeru vidimo, da pri udarnem valu z dvižnim časom  $t_d = 10,6$   $\mu$ s varistor omeji napetost v času  $\Delta t = 2,2$   $\mu$ s na vrednost  $U_e = 44,1$  V, kar je občutno višja vrednost kot statična prevodna napetost  $U_s = 34,8$  V. Razmerje med napetostjo  $U_e$  in časom  $\Delta t$  v katerem začne varistor prevajati podaja strmino naraščanja napetosti  $k_e$ , ki je odločilen podatek pri določanju dinamične  $u-t$  karakteristike varistorja (2).

$$k_e = \frac{U_e}{\Delta t}, \quad (2)$$



Slika 6: Časovni potek meritev napetosti na varistorju pri preizkušanju z udarnim valom.

Rezultati predstavljeni v obliki dinamične  $u-t$  karakteristike varistorja so podani na sliki 7, iz katere je razvodno, da ima strmina naraščanja udarnega napetostnega vala oz. t.i. strmina čela udarnega vala občuten vpliv na dinamično prevajalno napetost  $U_e$ , ki se s strmejšim naraščanjem (krajši dvižni čas do začetka prevajanja) pomika k višjim vrednostim.



Slika 7: Izmerjena dinamična  $u-t$  karakteristika ZnO varistorja, pri preizkušanju z udarnim napetostnim valom (rdeče) in statična prevajalna napetost izmerjena pri enosmerni napetosti (modro-črtkano).

### 4 Zaključek

Na podlagi rezultatov meritev z udarnim valom, ki smo jih opravili na varistorju ZOV-10D330V lahko sklepamo, da je dinamična prevajalna napetost varistorja močno odvisna od strmine udarnega vala in vsekakor višja, kot pa statična prevajalna napetost, ki jo izmerimo pri enosmernih oz. počasi spreminjajočih napetostih. Zanimivo je povleči vzporednico s prebojno napetostjo v plinih in tekočinah, ki je na podoben način odvisna od strmine čela udarnega vala, kar je tudi motiviralo avtorje, da pristopijo k raziskovanju na tem področju.

Načrtovanju prenapetostne zaščite predstavlja v praksi velik inženirski izziv. Ne le, da so oblike vršne vrednosti in pojavi prenapetosti v omrežju stohastične narave, marveč vidimo, da se tudi materiali, ki se uporabljajo v zaščitnih elementih odzivajo drugače na hipne in počasne napetostne spremembe. Iz tega razloga je obravnavana tematika aktualna tudi v širšem kontekstu uporabe elektrotehniških materialov v izolacijski in polprevodniški tehniki.

### Dodatek

Tabela 1: Uporabljena merilna oprema.

Oprema	Tip
Osciloskop	Keysight MSO-X 4054A
Napetostna sonda	Keysight N2790A (max 1000 V)
Tokovne klešče	CAG E3N
Napetostni vir	Laboratorijski napajalnik 24V
Udarni generator	Dvostopenjski Marx - 600 V / 0,6 J
Preizkušai varistor	ZOV-10D330K

## Zahvala

Zahvaljujem se vodstvu Laboratorija za aplikativno elektromagnetiko na UM-FERI, ki je podprlo nastajanje članka in mi omogočilo sodelovanje na študentkem tekmovanju v sklopu ERK 2020.

Anton Zhezhov, študent zaključnega letnika na univerzitetnem študijskem programu elektrotehnika UM-FERI.

## Literatura

- [1] M. Lipovec, »Zaščita proti prenapetosti v nizkonapetostnem omrežju«, diplomsko delo, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, UM, Maribor, 2019.
- [2] Vishay BC components, Resistive Products - technical note, document number: 29079, 2019.
- [3] M. Bizjak, M. Bekovic and A. Hamler, *Spark Breakdown in Gas-Discharge-Tube Surge Arrester at Voltage Pulse*, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 30, No. 3, 2015.
- [4] J. Hrastnik, »Razvoj metode za ugotavljanje funkcionalnosti kovinsko oksidnih odvodnikov prenapetosti«, doktorska disertacija, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, UM, Maribor, 2011.
- [5] A. Janotti and C. G. Van de Walle, Fundamentals of zinc oxide as a semiconductor, Rep. Prog. Phys. 72, 126501, 2009.
- [6] Z. Topcagic, T. Tsovilis and D. Krizaj, *Modeling of current distribution in zinc oxide varistors using Voronoi network and finite element method*, Electirc Power System research, Vol. 164, pp. 253-262, 2018.
- [7] A. Rečnik, S. Bernik and N. Daneu, *Microstructural engineering of ZnO-based varistors ceramics*, J. Mater. Sci., Vol. 47, pp. 1655-1668, 2012.