

Snimanje UI karakteristike odvodnika prenapona

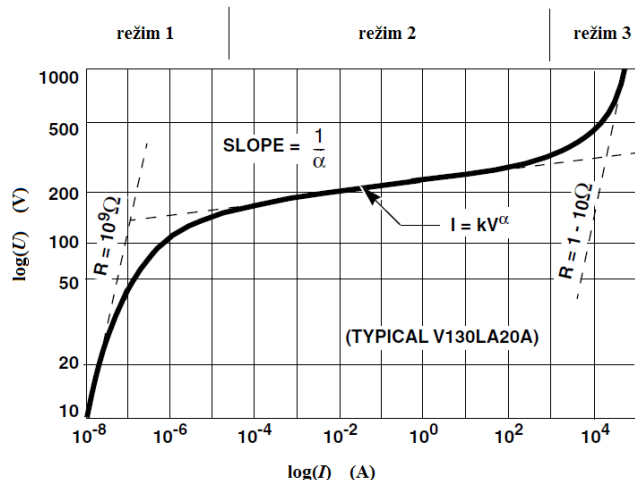
Dragan Pejić, Boris Antić, Zoran Mitrović, Nemanja Gazivoda, Marina Subotin

Apstrakt—Ovaj rad daje prikaz iskustava prilikom snimanja naponsko-strujne (UI) karakteristike odvodnika prenapona (ZnO varistor). Snimanje je obavljeno korišćenjem dvokanalnog digitalnog osciloskopa. Napon sa krajeva varistora je doveden na jedan kanala osciloskopa, a drugi kanal je iskorišćen za određivanje struje kroz varistor merenjem napona na redno vezanom šantu. Analiza je obavljena na dva načina: a) posmatranjem efektivne vrednosti napona i struje i b) posmatranjem trenutne vrednosti napona i struje varistora. Na kraju su dobijeni rezultati i primenjene metode upoređene sa oskudnim informacijama dostupnim u literaturi.

Ključne reči—naponsko-strujna karakteristika, efektivna vrednost, odvodnik prenapona, varistor.

I. UVOD

Varistor je nelinearni dvokrajni element sa naponsko-strujnom (UI) karakteristikom pogodnom za zaštitu elektronskih kola, energetskih postrojenja i dalekovoda od prenaponskih pojava. UI karakteristika varistora [1] se može podeliti u tri zone, Sl. 1.



Sl. 1. Naponsko-strujna (UI) karakteristika varistora, sa obeleženim režimima rada

Kada je napon manji od napona prvog "kolena" reč je o režimu velike otpornosti, tako da kroz varistor protiče mala struja reda 10^{-8} A do 10^{-3} A (režim curenja). S obzirom da je

Dragan Pejić, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Dositeja Obradovića 6, Novi Sad (e-mail: pejicdra@uns.ac.rs).

Boris Antić, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Dositeja Obradovića 6, Novi Sad (e-mail: antic@uns.ac.rs).

Zoran Mitrović, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Dositeja Obradovića 6, Novi Sad (e-mail: zoranmit@uns.ac.rs).

Nemanja Gazivoda, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Dositeja Obradovića 6, Novi Sad (e-mail: nemanjagazivoda@uns.ac.rs).

Marina Subotin, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Dositeja Obradovića 6, Novi Sad (e-mail: marina.bulat@uns.ac.rs).

napon manji od kritične vrednosti, varistor se "trudi" da bude neprimetan; idealno bi bilo da je struja kroz varistor jednaka nuli. U ovom režimu na ponašanje varistora značajno utiče ekvivalentna kapacitivnost, zbog koje, u prosto-periodičnom kolu, dolazi da faznog pomeranja između napona i struje za približno 90° .

U drugom režimu rada varistor ima mnogo manju dinamičku otpornost (idealno bi bilo da je dinamička otpornost jednaka nuli), tako da porastu napona odgovara višestruko povećanje struje. U ovom režimu rada, varistor ograničava prenapon konzumiranjem vrlo velikih struja, reda kA (normalan režim rada varistora). Ako je reč o elektrostatičkim pražnjenjima, usled konzumiranja vrlo velike struje se očekuje da električna energija u kratkom vremenskom intervalu bude potrošena, te da se varistor vrati u prvi režim rada.

Na kraju normalnog režima rada se nalazi drugo "koleno" karakteristike varistora. Za napone veće od napona drugog kolena, nastaje treći deo UI karakteristike (režim preokreta). U trećem režimu rada varistor povećava svoju otpornost, tako da sa daljim porastom napona struja sporije raste. Ukoliko ne bi bilo ovog režima, postojala bi opasnost da se, usled razvijanja velike disipacije, ošteti varistor ili štice objekat.

Na Sl. 1 je horizontalna osa prikazana u logaritamskoj raspodeli, kako bi se dobio pregledan grafik za veliki opseg struje od 10^{-8} A do 10^5 A.

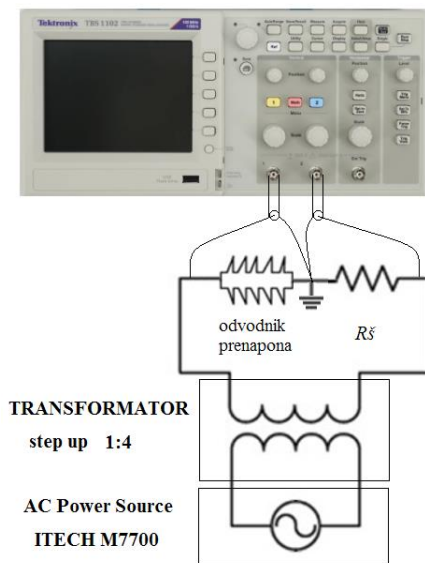
II. LABORATORIJSKI EKSPERIMENT

Na Sl. 2 je prikazana šema koja je korišćena za snimanje UI karakteristike varistora B72232D 271K161 [2]. Ovaj varistor je namenjen za zaštitu od prenapona niskonaponske mreže 230 V. Napon od 275 V je napon "kolena" koji razgraničava režim curenja i normalan režim rada varistora.

Naponski izvor maksimalne snage 300 W i maksimalnog napona 300 V proizvođača ITECH [3] napaja transformator prenosnog odnosa 1:4. Transformator napaja rednu vezu ispitivanog varistora i rednog otpornika - šanta R_s . Dvokanalni digitalni osciloskop [4] je sondama odgovarajućeg faktora slabljenja povezan tako da se na jedan kanal dovodi napon sa varistora, a na drugi kanal napon sa šanta. Poznavanjem otpornosti šanta i primenom Omovog zakona određuje se struja kroz rednu vezu šanta i varistora.

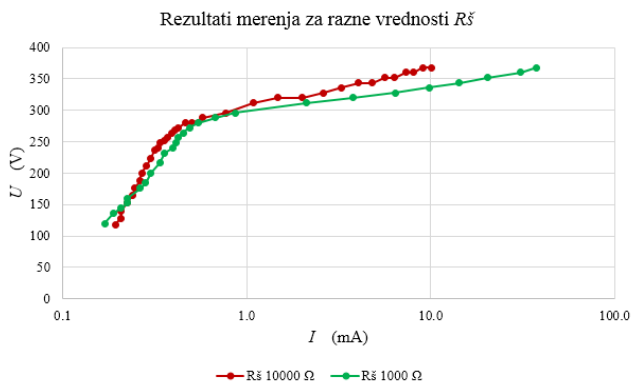
Osciloskop je korišćen na dva načina. U prvooj situaciji je podešeno da osciloskop određuje efektivnu vrednost jednog i drugog napona. Za razne vrednosti prostoperiodičnog napona je beležena efektivna vrednost napona varistora, a primenom Omovog zakona je određivana efektivna vrednost struje na osnovu efektivne vrednosti napona i poznavanja otpornosti šanta. Budući da se snimanje UI karakteristike vrši u naizmeničnom režimu, autorima se učinilo logičnim

da se vrši beleženje efektivne vrednosti napona na varistoru, kao i efektivna vrednost napona na šantu na osnovu koje je računata efektivna vrednost struje kroz varistor. „Step-up“ transformator je korišćen zbog nedovoljnih naponskih mogućnosti izvora napona ITECH M7700.



Sl. 2. Šema korišćena za snimanje UI karakteristike varistora primenom dvokanalnog osciloskopa

Eksperiment je ponavljan za dve vrednosti šanta: 1 kΩ i 10 kΩ. Ideja je bila da se vrednosti šanta prilagode redu veličine struje koja se želi meriti, kako bi se dobijao napon na šantu merljiv primenom osciloskopa. Na Sl. 3 su prikazani rezultati merenja dobijeni za pomenute vrednosti šanta.

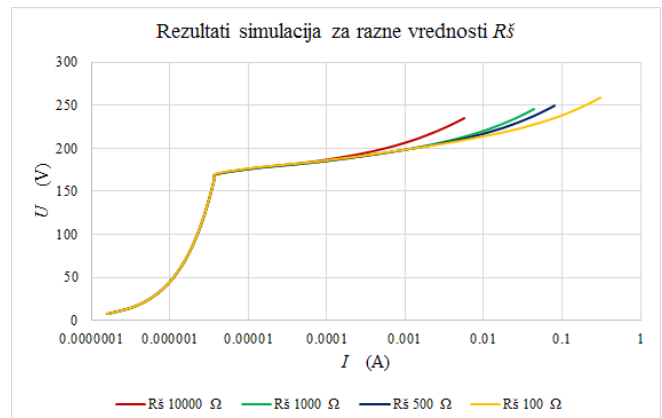


Sl. 3. Rezultati merenja na osnovu efektivne vrednosti napona i struje varistora

Dobijeni rezultati, na prvi pogled deluju zbujujuće, jer se čini da se UI karakteristika varistora menja u zavisnosti od vrednosti redno vezanog šanta. Napominjemo da je na merenje primenjena procedura koja je interpretirana na osnovu preporuka međunarodnih standarda za ispitivanje UI karakteristike odvodnika, te da su sve greške proizišle iz dvosmislenosti ili nedorečenosti koje postoje u ovim standardima.

Da bi se eliminisao uticaj grešaka merenja, urađene su simulacije u paketu LT Spice [5]. Na Sl. 4 su prikazani rezultati dobijeni simulacijama, uz verno oponašanje opisanog načina merenja. U nedostatku modela ispitivanog varistora, korišćen je model varistora manjeg napona kolena,

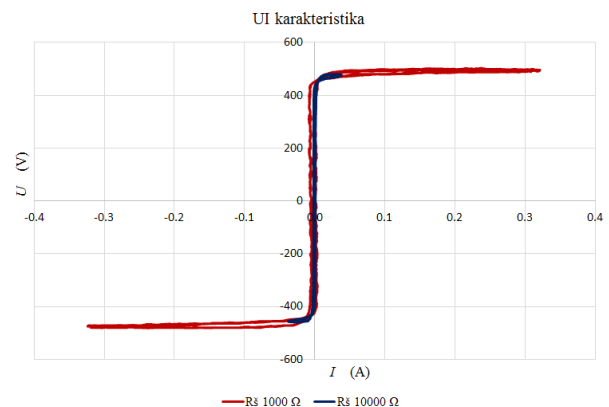
što ne umanjuje ispravnost zaključaka koji se iz rezultata simulacija mogu izvesti.



Sl. 4. Rezultati simulacija u paketu LT Spice na osnovu efektivne vrednosti napona i struje varistora

Na osnovu rezultata simulacija može se zaključiti da i simulacije potvrđuju da ovako dobijena UI karakteristika varistora zavisi od vrednosti redno vezanog šanta. Rezultati simulacija daju UI karakteristiku pravilnijeg oblika u poređenju sa UI karakteristikom dobijenom na osnovu merenja. Objašnjenje leži u uticaju grešaka koje postoje u procesu merenja, a ne postoje u procesu simuliranja. Greške se mogu pripisati ugrađenim AD konvertorima u digitalni osciloskop, kao i načinu računanja efektivne vrednosti na osnovu odbiraka napona.

Snimanje UI karakteristike je obavljeno i na drugi način. Kratko, u trajanju od nekoliko sekundi, je na rednu vezu varistora i šanta doveden prostoperiodični napon maksimalne efektivne vrednosti. Pod ovim se misli na maksimalnu vrednost koju je ukupna aparatura prikazana na Sl. 2 bila u stanju da da, kako po pitanju napona, tako i po pitanju struje. Osciloskop je konfigurisan da radi u režimu „one shot“. Na ovaj način su autori pokušavali da postignu najveće moguće napone i struje varistora, a da izbegnu pregrevanje i eventualno oštećivanje varistora. Ovog puta je pristup merenju bio drugačiji. Osciloskop nije korišćen kao merilo efektivne vrednosti dva napona. U memoriju osciloskopa su snimljeni odbirci napona varistora i šanta. Na osnovu odbiraka napona šanta su, primenom Omovog zakona, određene trenutne vrednosti struje kroz rednu vezu varistora i šanta.



Sl. 5. UI karakteristika varistora dobijena na osnovu odbiraka napona i struje

Na Sl. 5 je prikazana UI karakteristika varistora dobijena

ovim postupkom. Budući da vrednosti odbiraka mogu biti i pozitivne i negativne (za razliku od efektivne vrednosti koja ne može biti negativna), grafik na Sl. 5 je prikazan u sva četiri kvadranta. Zbog činjenice da su u eksperimentu postignute male vrednosti struje, dovoljne tek da se pređe prvo koleno karakteristike, nije bilo potrebe za logaritamskom horizontalnom osom, već je korišćena linearna osa za struju. Primetno je da UI karakteristika prikazana na Sl. 5 ne zavisi od vrednosti korišćenog šanta.

U svim prethodnim situacijama, isključivo zbog ograničenja i mogućnosti raspoložive opreme, izvršeno je snimanje u prva dva režima: u režimu curenja i normalnom režimu rada. Nije vršeno snimanje u režimu preokreta, zbog nemogućnosti raspoložive opreme da obezbedi dovoljno veliku struju za ispitivanje varistora, a i zbog činjenice da se u ovom režimu rada ispitivani varistor nađe samo u ekstremnim situacijama, nakon kojih najčešće biva nepovratno oštećen i isključen iz zaštitnog kola.

III. DISKUSIJA

Omov zakon u kolu vremenskih promenljivih napona i struja, a za otpornost R dat je (1).

$$u(t) = R \cdot i(t) \quad (1)$$

Sada možemo odrediti srednju kvadratnu vrednost leve i desne strane jednakosti.

$$\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T R^2 \cdot i^2(t) dt \quad (2)$$

Kada je otpornost konstantna i nezavisna od vremena i struje koja kroz nju protiče (a time i od napona na njenim krajevima), a imajući u vidu definiciju efektivne vrednosti, kvadrat otpornosti možemo izvući ispred integrala, onda dobijamo (3). Jednačina (3) pokazuje da se vrednost otpornosti može dobiti deljenjem efektivne vrednosti napona na krajevima otpornika i efektivne vrednosti struje koja protiče kroz otpornik.

$$U_{ef}^2 = R^2 \cdot I_{ef}^2 \Rightarrow R = U_{ef} / I_{ef} \quad (3)$$

U slučaju varistora, kao nelinearnog otpornog elementa, situacija je komplikovanija. Ovoga puta otpornost nije konstantna, nego zavisi od napona i struje. U tom slučaju (2) poprima drugačiji oblik.

$$\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T R^2(t) \cdot i^2(t) dt \quad (4)$$

Važno je primetiti da sada nije moguće iz integrala sa desne strane (4) izvući kvadrat otpornosti R , jer zavisi od struje i , a struja zavisi od vremena t . Iz ovoga sledi da nije moguće dobiti izraz koji odgovara (3) u slučaju linearnog otpornika. To znači da određivanje otpornosti na osnovu količnika efektivne vrednosti napona i efektivne vrednosti struje daje ispravan rezultat samo ako je posmatrana otpornost linearna. S druge strane, ovaj postupak bi bio pogrešan ako bismo ga primenjivali u slučaju nelinearne

otpornosti. To je ujedno i osnovni uzrok greške u interpretaciji rezultata, usled načina na koji se UI karakteristike i preporučene šeme merenja prikazuju u standardima ili katalozima proizvođača varistora, jer je svuda indikovano merenje prostoperiodičnom pobudom uz napomenu da su sve vrednosti efektivne.

U prvom načinu snimanja UI karakteristike varistora (rezultati merenja prikazani na Sl. 3, a rezultati simulacija na Sl. 4) otpornost je određivana na osnovu efektivne vrednosti napona i efektivne vrednosti struje. U slučaju određivanja efektivne vrednosti struje na osnovu efektivne vrednosti napona na šantu, struja je određena korektno, jer je otpornost šanta konstantna i linearna. Propust je učinjen kod primene istog načina razmišljanja na varistor, jer je varistor vrlo nelinearan dvokrajni element. UI karakteristika snimljena na ovaj način zavisi od vrednosti šanta u normalnom režimu rada, gde je i nelinearnost izraženija, dok se u režimu curenja (u uslovima približne linearnosti) uticaj vrednosti šanta i ne primećuje, pogotovo u rezultatima dobijenim simulacijama. Ovo je objašnjenje naizgled paradoksalne pojave prikazane na Sl. 3 i 4, po kojima ispada da UI karakteristika zavisi od vrednosti korišćenog šanta.

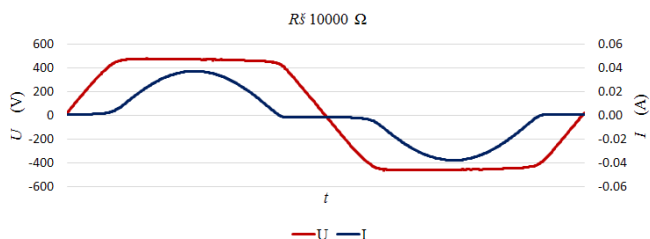
U drugom načinu snimanja UI karakteristike ne dolazi do ovakvog propusta jer je rađeno sa trenutnim vrednostima napona i struje.

Zbog čega je moguće da u interpretaciji preporuke za ispitivanje UI karakteristike varistora dođe do ovakve zabune?

U slučaju primene varistora kao odvodnika prenapona u niskonaponskoj mreži, napon na krajevima varistora je naizmjenični, približno prostoperiodičnog talasnog oblika. Proizvođači daju naponsko-strujnu karakteristiku varistora u prvom kvadrantu, dakle za pozitivne vrednosti napona i struja. Ovo može biti obrazloženo na nekoliko načina: a) zbog simetrije karakteristike dovoljno je prikazivati ponašanje u prvom kvadrantu (za pozitivne vrednosti napona i struje), odnosno nema potrebe da se prikazuje i situacija kada napon i struja imaju negativne vrednosti, b) naponsko-strujna karakteristika je snimljena na osnovu merenja efektivne vrednosti napona i efektivne vrednosti struje, a poznato je da su efektivne vrednosti nenegativne.

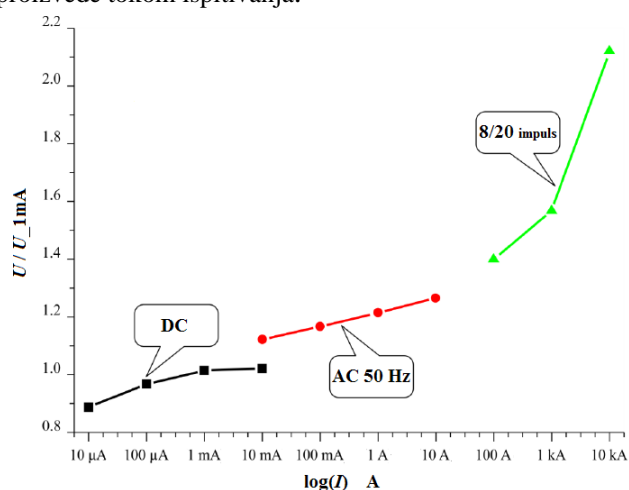
Na osama UI karakteristike su date efektivne vrednosti napona i struje, jer su odvodnici napona namenjeni za korišćenje u naizmjeničnom režimu, gde se uglavnom operiše efektivnim vrednostima napona i struja mnogo češće nego trenutnim vrednostima.

Na Sl. 5 je prikazana UI karakteristika varistora snimljena na osnovu trenutnih vrednosti napona i struja. Zato se UI karakteristika proteže u prvom i trećem kvadrantu UI ravni. Zbog toga što su na osama prikazane trenutne vrednosti napona i struje, dobijeni grafik se po obliku slaže, ali se po vrednostima ne slaže sa specifikacijom proizvođača. Proizvođač je napone i struje na osama naveo u formi efektivnih vrednosti. Tek kada se vrednosti napona i struje na osama na Sl. 5 deljenjem faktorom $\sqrt{2}$ ponderišu, dobija se slaganje snimljene UI karakteristike varistora sa specifikacijom proizvođača. Pomenuti faktor $\sqrt{2}$ predstavlja odnos amplitude i efektivne vrednosti za prostoperiodičan talasni oblik, a sa Sl. 6 se jasno vidi da ni struja ni napon nemaju podrazumevani prostoperiodični oblik.



Sl. 6. Oblik napona i struje varistora pri korišćenju šanta od 10000 Ω

Daljim proučavanjem slabo dostupne i nejasne dokumentacije, autori su došli do saznanja da su i drugi imali slične probleme prilikom određivanja UI karakteristike varistora. Kao primer ovde ćemo navesti UI karakteristiku sa Sl. 7 preuzetog iz [6], na kojoj su naznačene tri zone. U svakoj od zona je otpornost određena drugačijim postupkom. Razlog za ovo jeste izuzetno veliki opseg struja za koje je potrebno ispitati varistor, što za posledicu ima veliku snagu, odnosno energiju koju bi izvor trebalo da proizvede tokom ispitivanja.



Sl. 7. UI karakteristika snimljena na tri načina, u DC, AC i impulsnom režimu

Na Sl. 7 se vidi da postoje diskontinuiteti u snimljenoj UI karakteristici. Za najmanje vrednosti struja, koje se javljaju u režimu curenja, predlaže se ispitivanje varistora u jednosmernom (DC) režimu. Varistor je tada moguće modelovati paralelnom vezom vrlo velike otpornosti (približno linearne u režimu curenja) i malom kapacitivnošću. Merenjem u DC režimu se uticaj kapacitivnosti svesno zanemaruje. U normalnom režimu rada varistora se predlaže snimanje UI karakteristike primenom napona mrežne učestanosti (AC režim). U trećem režimu, režimu preokreta, se predlaže korišćenje impulsa definisanog oblika [6], čija uzlazna ivica traje 8 μ s, a silazna 20 μ s.

IV. ZAKLJUČAK

U radu su prikazana dva načina snimanja UI karakteristike ZnO varistora namenjenog za zaštitu niskonaponske mreže od prenapona. Na grafiku koji daju proizvođači su date efektivne vrednosti napona i struja. Problem nastaje kada se UI karakteristika varistora pokušava snimiti merenjem efektivne vrednosti napona i struje, jer se u tom slučaju dobija da UI karakteristika zavisi od vrednosti redno vezanog šanta korišćenog za merenje struje.

U radu je pokazano da se ispravan način snimanja UI karakteristike sprovodi beleženjem trenutnih vrednosti napona i struje. S obzirom da je u naizmeničnom režimu rada uobičajeno iskazivanje efektivnih vrednosti mnogo češće nego trenutnih vrednosti, konačan izgled UI karakteristike se dobija pravilnim ponderisanjem trenutnih vrednosti napona i struja radi dobijanja efektivnih vrednosti. Problem nastaje kada se pretpostavlja ponder vrednosti $\sqrt{2}$ (odnos amplitude i efektivne vrednosti u slučaju prostoperiodičnog talasnog oblika), a da pri tome ni struja ni napon nemaju podrazumevani prostoperiodični oblik.

Autori predlažu snimanje, ali i prikazivanje UI karakteristike varistora na osnovu trenutnih vrednosti napona i struja i bez dodatnog ponderisanja, čime će se dobijati verodostojniji rezultati, koji će biti ponovljivi, neće zavisiti od uslova merenja i moći će se nedvosmisleno interpretirati.

ZAHVALNOST

Ovo istraživanje je finansirano od strane projekta Fonda za inovacionu delatnost Republike Srbije, pod nazivom "New generation of silicone and zinc oxide surge arrester and insulators for low and medium voltage levels", broj projekta IF ID: 50205.

LITERATURA

- [1] Morris, W., "Physical Properties of the Electrical Barriers in Varistors," J. Vac. Sci. Technol., 13,1976, pp. 926-931.
- [2] Metal Oxide Varistor, Round Disk Metallised, <https://www.tdk-electronics.tdk.com/>
- [3] IT-M7700 High Performance Programmable AC Power Supply, <https://www.itechate.com/en/product/ac-power-supply/IT-M7700.html>
- [4] Tektronix TBS1102 Digital Storage Oscilloscope, <https://www.tequipment.net/TektronixTBS1102.html>
- [5] LT Spice, <https://www.analog.com/en/design-center/design-tools-and-calculators/ltspice-simulator.html#>
- [6] Surge protective component application guide - metal oxide varistor (MOV) component

ABSTRACT

This paper shows the experience of recording of a voltage-current (UI) characteristic of a surge arrester (ZnO varistor). A two channel digital oscilloscope was used for the recording. The voltage from the terminals of the varistor was fed into one of the channels of the oscilloscope, while the other channel was used to determine the value of current through the varistor by measuring voltage on a series shunt. The analysis included: a) observing the RMS values of current and voltage; and b) observing the instantaneous values of the varistor's voltage and current. This was followed by obtaining the results and comparing the methods applied with the scarce information that the literature offers.

The Recording of an UI Characteristic of a Surge Arrester

Dragan Pejić, Boris Antić, Zoran Mitrović, Nemanja Gazivoda, Marina Subotin