

Trimovanje debeloslojnih otpornika energijom visokonaponskih impulsa

Ivanka Stanimirović, Zdravko Stanimirović

IRITEL a.d. Beograd

Beograd, Republika Srbija

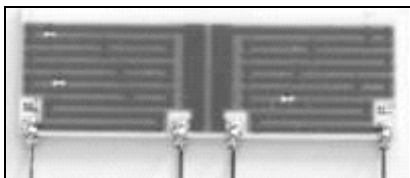
inam@iritel.com; zdravkos@iritel.com

Sažetak— Savremene kompaktne i pouzdane elektronske naprave zahtevaju upotrebu otpornika sve manjih dimenzija, stabilnih i preciznih vrednosti otpornosti. Iz tog razloga se umesto laserskog trimovanja za podešavanje vrednosti otpornosti debeloslojnih otpornika sve češće koristi postupak izlaganja otpornika visokonaponskim impulsima. Za razliku od laserskog trimovanja, ova metoda omogućava kontrolisano i pouzdano podešavanje vrednosti otpornosti otpornika bez prisustva reza i bez obzira na poziciju i dimenzije otpornika. Iz tog razloga smo u radu predstavili rezultate eksperimentalnog istraživanja u kome su vrednosti otpornosti standardnih debeloslojnih otpornika podešavane energijom visokonaponskih impulsa. Dobijeni rezultati su analizirani i utvrđeno je postojanje veze između promena otpornosti i indeksa šuma sa izmenom mehanizama provođenja u otpornicima usled dejstva visokonaponskih impulsa. Pokazano je da trimovanje debeloslojnih otpornika energijom visokonaponskih impulsa predstavlja validnu alternativu laserskom trimovanju.

Ključne reči— *Debeloslojni otpornik; visokonaponski impuls; lasersko trimovanje; otpornost; indeks šuma; mehanizmi provođenja; visokotemperaturski tretman.*

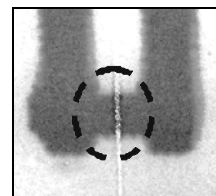
I. UVOD

Impulsno električno naprezanje (IEN) predstavlja jedan od najčešćih pojava oblika ekstremnih radnih uslova koji mogu dovesti do degradacije i otkaza debeloslojnih otpornika. U tom slučaju impulsno električno naprezanje smatramo nepoželjnom pojavom. Detaljna analiza performansi standardnih debeloslojnih otpornika izloženih ovakvom nepoželjnom naprezanju je bila centralna tema brojnih do sada objavljenih radova [1-4]. Međutim, IEN ne mora uvek biti nepoželjna pojava. Jedan od vidova poželjnog IEN-a, koji se u smislu funkcionisanja ne smatra nepoželjnim, je prisutan kod debeloslojnih zaštitnih otpornika koji se koriste kao sekundarna zaštita u telekomunikacionim uređajima (Sl. 1) [5, 6].



Slika 1. Tipični serpentinasti debeloslojni zaštitni otpornici koji se koriste kao sekundarna zaštita telekomunikacionih uređaja u ekstremnim radnim uslovima realizovani u IRITEL-u a.d. Beograd

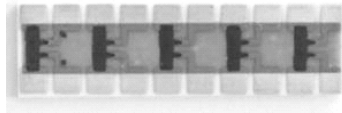
Pored toga, kao vid poželjnog IEN-a se može navesti i trimovanje debeloslojnih otpornika metodom visokonaponskih impulsa čime se vrši kontrolisano podešavanje vrednosti otpornosti otpornika proizvoljnih dimenzija bez prisustva reza. Debeloslojni otpornici se često koriste u proizvodnji kompaktnih i pouzdanih elektronskih naprava kod kojih stabilne i precizne vrednosti otpornosti i male dimenzije otpornika igraju veoma važnu ulogu. Pošto se ovi otpornici formiraju sitoštampom na keramičkim alumina (96% Al_2O_3) substratima, nije moguće izbeći rasipanje vrednosti otpornosti koje se javlja zbog nestabilnih uslova žarenja i varijacija u debljini štampanih otpornih slojeva koje su posledica procesa sitoštampe. Stoga je proces podešavanja vrednosti otpornosti veoma važan za realizaciju elektronskih skopova koji sadrže i debeloslojne otpornike. Za podešavanje otpornosti do zahtevanih vrednosti se u praksi najčešće koristi lasersko trimovanje. Lasersko trimovanje omogućava precizno podešavanje vrednosti otpornosti i daje čist rez na otporniku ali ima dva nedostatka. Prvi je postojanje minimalnih dimenzija otpornika koji se na ovaj način mogu trimovati što predstavlja ograničenje kada je minijaturizacija komponente u pitanju, dok se drugi nedostatak odnosi na oštećenje površine otpornika tokom laserskog trimovanja (Sl. 2). Zbog toga se za trimovanje debeloslojnih otpornika sve češće koristi postupak izlaganja otpornika visokonaponskim impulsima koji, za razliku od laserskog trimovanja, omogućava kontrolisano podešavanje vrednosti otpornosti otpornika bez obzira na dimenzije otpornika i njihovu poziciju. U ovom radu su izloženi rezultati dobijeni na osnovu eksperimenta u kom su vrednosti otpornosti standardnih debeloslojnih otpornika realizovanih komercijalno raspoloživim pastama podešavane energijom visokonaponskih impulsa. Eksperiment - materijali, test-uzorci, algoritam trimovanja, uslovi trimovanja i merenja su opisani u poglavlju II, dok su eksperimentalni rezultati i diskusija izloženi u poglavlju III.



Slika 2. Primer loše laserski trimovanog debeloslojnog otpornika (na mestu reza su vidljivi ostaci otpornog materijala koji u radnim uslovima mogu dovesti do varničenja)

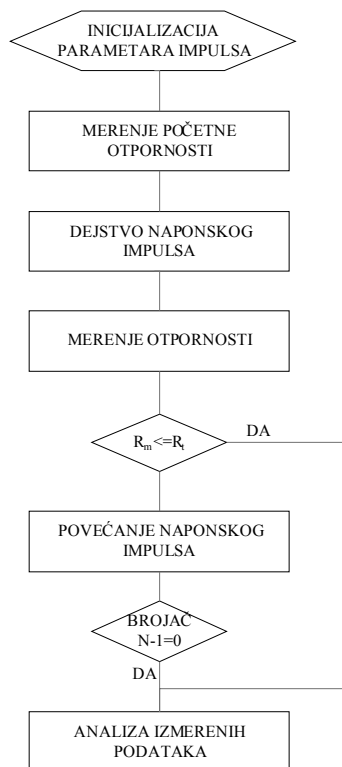
II. TRIMOVANJE DEBELOSLOJNIH OTPORNIKA ENERGIJOM VISOKONAPONSKIH IMPULSA

Analiza trimovanja debeloslojnih otpornika energijom visokonaponskih impulsa je izvedena pomoću test uzoraka prikazanih na slici 3. Na keramičkim alumina (96% Al_2O_3) substratima je konvencionalnim tehnikama sitoštampe komercijalnim otpornim pastama formirano po pet debeloslojnih otpornika dimenzija $1 \times 3 \text{ mm}^2$ slojne otpornosti $10 \text{ k}\Omega/\square$ u kombinaciji sa PdAg provodnom pastom.



Slika 3. Debeloslojni test otpornici identičnih dimenzija $w=1 \text{ mm}$ i $l=3 \text{ mm}$ slojne otpornosti $10 \text{ k}\Omega/\square$

Posle procesa sitoštampe svi vlažni slojevi su se nivelisali 15min na sobnoj temperaturi da bi potom bili sušeni u tunelskoj infracrvenoj sušnici u 15min ciklusu na temperaturi od 150°C . Provodni sloj je žaren u 30min ciklusu, dok su otporni slojevi žareni u standardnom ciklusu od 60min sa maksimalnom temperaturom od 850°C u trajanju od 10min. Da bi se analizirali efekti trimovanja debeloslojnih otpornika energijom visokonaponskih impulsa za njihovo generisanje upotrebljen je Haefely P6T generator impulsa. Merenja otpornosti su izvršena pomoću uređaja HP34401A. Za merenje indeksa šuma pri 1kHz korišćen je Quan-Tech Resistor Test Set, Model 315B. Na slici 4 je prikazan algoritam trimovanja otpornika energijom visokonaponskih impulsa.

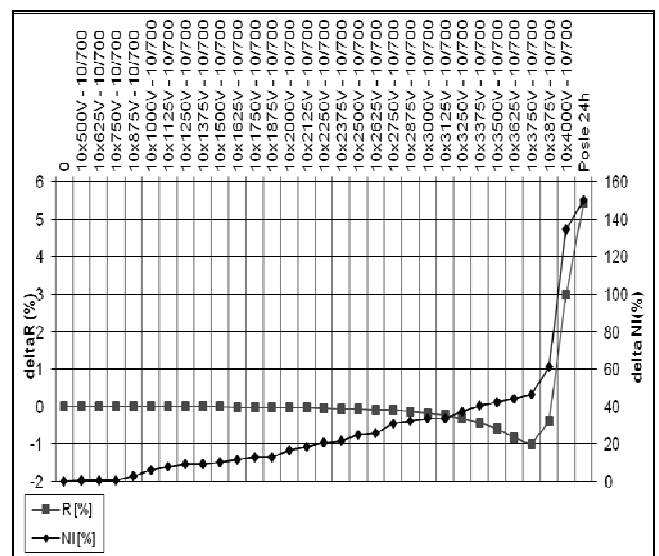


Slika 4. Algoritam trimovanja debeloslojnih otpornika energijom visokonaponskih impulsa

Važni parametri vezani za oblik visokonaponskih impulsa koji se koriste u procesu trimovanja su vrednosti amplitude i širina impulsa, broj impulsa i interval između impulsa, broj impulsa po grupi i vreme između grupa impulsa. Na osnovu razlike između izmerene vrednosti otpornosti R_m i ciljane vrednosti otpornosti R_t amplituda impulsa se inkrementalno povećava ili smanjuje i taj se proces ponavlja do dostizanja ciljane vrednosti R_t . Međutim, da bi detaljnije analizirali efekte visokonaponskog trimovanja, eksperiment smo organizovali na nešto drugačiji način. Prvi deo eksperimenta se odnosio na dejstvo serije od po 10 impulsa sa rastućim amplitudama iz opsega 0.5 kV do 4 kV na vrednosti otpornosti i indeksa šuma debeloslojnih otpornika. U drugom delu eksperimenta na otpornike su delovale serije od po 10 impulsa sa konstantnom amplitudom od 3 kV . Uslovi eksperimenta su odabrani tako da se obezbedi postepena promena vrednosti otpornosti bez mogućnosti pojave katastrofalnih otkaza.

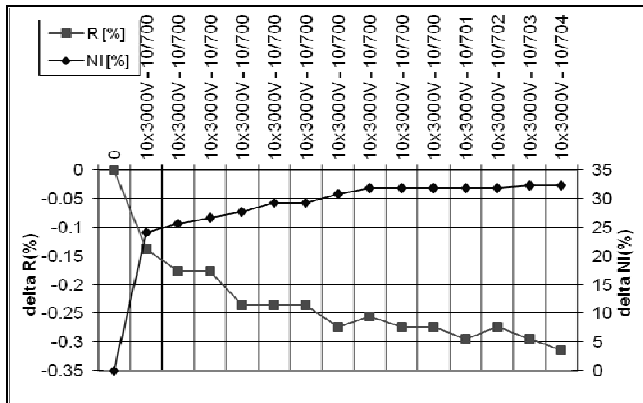
III. EKSPERIMENTALNI REZULTATI I DISKUSIJA

Eksperimentalni rezultati dobijeni nizom merenja vrednosti otpornosti i indeksa šuma trimovanih otpornika slojne otpornosti $10 \text{ k}\Omega/\square$ su prikazani na slikama 5 i 6.



Slika 5. Eksperimentalni rezultati za relativnu promenu otpornosti i indeks šuma debeloslojnog otpornika slojne otpornosti $10 \text{ k}\Omega/\square$ trimovanog serijama od po 10 visokonaponskih impulsa sa rastućim amplitudama

U prvom delu eksperimenta u kome su debeloslojni otpornici trimovani energijom serija od po 10 visokonaponskih impulsa sa rastućim amplitudama značajniji pad otpornosti je započeo posle približno $10 \times 2.9 \text{ kV}$ da bi posle približno $10 \times 3.75 \text{ kV}$ trimovanje rezultovalo značajnim porastom otpornosti. Oblast značajnog porasta otpornosti ukazuje na značajnu degradaciju karakteristika otpornika i amplituda od $3,75 \text{ kV}$, u slučaju posmatranih test uzoraka, predstavlja graničnu vrednost kada je trimovanje energijom visokonaponskih impulsa u pitanju. Rezultati dobijeni merenjem indeksa šuma su pokazali porast NI sa primenjenim trimovanjem pri čemu je indeks šuma dostigao svoje maksimalne vrednosti u tačkama značajne promene vrednosti otpornosti (Sl. 5).



Slika 6. Eksperimentalni rezultati za relativnu promenu otpornosti i indeks šuma debeloslojnog otpornika slojne otpornosti 10kΩ/□ trimovanog serijama od po 10 visokonaponskih impulsa sa konstantnom amplitudom 3kV

Za vreme izvođenja prvog dela eksperimenta amplituda impulsa 3kV je izdvojena kao početna tačka pada otpornosti i kao refrentna amplituda za drugi deo eksperimenta. Rezultati dobijeni trimovanjem debeloslojnih otpornika serijama od po 10 visokonaponskih impulsa sa konstantnom amplitudom 3kV su prikazani na slici 6.

Drugi deo eksperimenta je pokazao da otpornost opada tokom trimovanja pomoću 9 ponovljenih serija od po 10 impulsa amplitude 3kV. Izmerene vrednosti indeksa šuma su ukazale na značajan porast vrednosti NI dok nije dostignut maksimum od 32,5% (~13dB) i, u skladu sa ponašanjem otpornosti, nastavljeno trimovanje nije dovelo do daljih promena vrednosti indeksa šuma. Na osnovu rezultata prikazanih na slici 5 se vidi da je ireverzibilna promena otpornosti započela pri amplitudi impulsa od 3kV te se može zaključiti da je do nje došlo usled promena mehanizama provođenja u debeloslojnom otporniku [7]. U debeloslojnim materijalima se transport naelektrisanja vrši kroz složene provodne mreže koje nastaju tokom procesa žarenja, te se debeloslojni otpornici mogu posmatrati kao slučajni skupovi provodnih lanaca pri čemu su neke od susednih čestica u kontaktu a neke razdvojene tankom staklenom barijerom formirajući metal-izolator-metal strukture. U tom slučaju metalno provođenje kroz provodne čestice i sinterovane kontakte i tunelovanje kroz staklene barijere određuju tok struje. U staklenim barijerama se usled pseudoslučajnog procesa sinterovanja kao posledica prisustva primesa koje unose osnovni konstituenti paste i delimičnog rastvaranja metal-oksida u staklu, javljaju centri zahvata koji doprinose pojavi višestepenih tunelskih procesa. Promena otpornosti debeloslojnog otpornika izloženog dejstvu trimovanja energijom visokonaponskih impulsa može da bude rezultat promene uslova provođenja usled promene kontaktnih i barijernih otpornosti. Pošto otpornici slojne otpornosti 10kΩ/□ imaju približno isti udeo provodne i izolacione faze kod njih je podjednako zastupljeno i metalno provođenje i tunelovanje kroz staklene barijere. Tako se pod dejstvom trimovanja menja naelektrisanje unutar izolatorskog sloja metal-izolator-metal ćelije ili dolazi do mikrostrukturnih promena usled kojih se menja koncentracija centara zahvata što može da ima veći uticaj na šum nego na ukupnu otpornost otpornika. Isto tako,

moć je proces kojim se neprovodni lanac prevodi u provodno stanje smanjujući tako otpornost otpornika. Porast otpornosti pri amplitudama impulsa $\geq 3.75kV$ je posledica smanjenja debljine otpornog sloja usled sagorevanja i isparavanja otpornog materijala pod dejstvom trimovanja.

Nakon izvršenog trimovanja energijom visokonaponskih impulsa dodatna korekcija vrednosti otpornosti se može izvršiti visokotemperaturskim tretmanom. Temperaturske zavisnosti vrednosti otpornosti netrimovanih i trimovanih debeloslojnih otpornika koji su bili izloženi visokotemperaturskom tretmanu u peći u atmosferi vazduha su prikazane u tabeli I. Vrednosti otpornosti i netrimovanih i trimovanih otpornika su počele da rastu pri temperaturi od 600°C, a onda su značajno opale pri temperaturi od 800°C. Tako se vrednost otpornosti debeloslojnog otpornika može dodatno podešavati i kontrolom uslova ponovljenog žarenja, trajanja visokotemperaturskog tretmana i atmosfere u kojoj se odvija ponovljeno žarenje.

TABELA I. TEMPERATURSKE ZAVISNOSTI VREDNOSTI OTPORNOSTI NETRIMOVANIH I TRIMOVANIH DEBELOSLOJNIH OTPORNIKA

R_{sq} (kΩ/sq)	10						
l (mm)	3						
w (mm)	1						
T (°C)	300	400	500	600	700	800	900
ΔR_N (%)	0	0	0	1,56	3,21	11,08	-17,01
ΔR_T (%)	-10,2	-14,6	-13,2	-11,1	2,33	35,42	21,06

IV. ZAKLJUČAK

U radu je predstavljena metoda trimovanja debeloslojnih otpornika energijom visokonaponskih impulsa. Na primeru standardnih debeloslojnih otpornika slojne otpornosti 10kΩ/□ realizovanih komercijalnim pastama, eksperimentalno je pokazano da ova metoda trimovanja predstavlja validnu alternativu laserskom trimovanju naročito kada su u pitanju otpornici malih dimenzija ili pozicije otpornika koje ne dozvoljavaju abrazivno ili lasersko trimovanje. Trimovanje energijom visokonaponskih impulsa dovodi do promene vrednosti otpornosti ujedno utičući i na šumne performanse otpornika što se može objasniti uticajem trimovanja na mikrostrukturu otpornika tj. na mehanizme provođenja u njima. Dodatno podešavanje vrednosti otpornosti se može vršiti visokotemperaturskim tretmanima u kontrolisanim uslovima. Dalja ispitivanja bi mogla biti usmerena ka analizi dejstva ove vrste trimovanja na debeloslojne otpornike koji se nalaze u sastavu višeslojnih struktura kod kojih druge metode trimovanja nije moguće primeniti.

ZAHVALNICA

Ovaj rad je realizovan zahvaljujući podršci Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije u okviru angažovanja na projektima III44003 i III45007.

- [1] I. Stanimirović, M.M. Jevtić, Z. Stanimirović, "High-Voltage Pulse Stressing of Thick-Film Resistors and Noise", *Microelectronics Reliability*, 43, 2003, pp. 905-911.
- [2] I. Stanimirović, M.M. Jevtić, Z. Stanimirović, "Multiple High-Voltage Pulse Stressing of Conventional Thick-Film Resistors", *Microelectronics Reliability*, 47, 2007, pp. 2242-2248.
- [3] Z. Stanimirović, M.M. Jevtić, I. Stanimirović, "Simultaneous Mechanical and Electrical Straining of Conventional Thick-Film Resistors, *Microelectronics Reliability*", 48, 2008, pp. 59-67.
- [4] I. Stanimirović, M.M. Jevtić, Z. Stanimirović, "Noise and Resistance as Indicators of HVP Stressing Impact on Performances of Conventional TFRs", *Proceedings*, Vol. 2, MIEL, Niš, Serbia, 2008, pp. 571-574.
- [5] M.F. Barker, "Low Ohm Resistor Series for Optimum Performance in High Voltage Surge Applications", *Microelectronics International*, 1997, vol. 43, pp. 22-26.
- [6] I. Stanimirović, Z. Stanimirović, "Debeloslojni zaštitni otpornici kao zaštita od nepoželjnog impulsnog električnog naprežanja", *Proceedings*, INFOTEH, ISBN 978-99955-763-6-3, Vol.14, ELS-16, Jahorina, Republic of Srpska, March 2015, pp. 80-83.
- [7] M.M. Jevtić, Z. Stanimirović, I. Mrak, "Low-Frequency Noise in Thick-Film Resistors due to Two-Step Tunneling Process in Insulator Layer of Elemental MIM Cell", *IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology-Part A*, Vol. 22, No. 01, March, 1999, pp. 120-127.

Nowadays, compact and reliable electronic systems require thick-film resistors with significantly reduced dimensions and stable and precise resistance values. For that reason, instead of standard laser trimming method, trimming of thick-film resistors by energy of high voltage pulses is being more often used. Unlike laser trimming, this method allows controlled and reliable resistance adjustment regardless of resistor position or dimensions and without the presence of cuts. For this reason, in this paper results of the experimental investigation of high-voltage pulse trimming of standard thick-film resistors are presented. Obtained results are analyzed and correlations between resistance, noise index changes and changes in conducting mechanisms in resistors due to high voltage pulse trimming are observed. It is shown that this type of trimming is a valid alternative trimming method to dominant laser trimming.

**TRIMMING OF THICK-FILM RESISTORS BY ENERGY
OF HIGH VOLTAGE PULSES**

Ivanka Stanimirović, Zdravko Stanimirović