

Statistički pristup analizi dejstva naprežanja na standardne debeloslojne otpornike

Ivanka Stanimirović, Zdravko Stanimirović

Institut za telekomunikacije i elektroniku IRITEL a.d. Beograd

Belgrade, Republic of Serbia

inam@iritel.com; zdravkos@iritel.com

Sadržaj—U radu je izložen predlog statističkog modela za analizu degradacija debeloslojnih otpornika u uslovima samo mehaničkog ili istovremenog električnog i mehaničkog naprežanja. To je generalizacija, uvedena na osnovu prethodnih kritičkih razmatranja, jednog statističkog pristupa primenjenog u analizi efekata trimovanja debeloslojnih otpornika visokonaponskim impulsima. Izložena je primena statističkog pristupa na šum i izvedeni su parametri ovog statističkog pristupa na osnovu determinističkog modela za debeloslojni otpornik.

Ključne riječi - standardni debeloslojni otpornici; naprežanje; analiza degradacija; Grimaldijev standardni perkolacioni pristup; deterministički model; niskofrekventni šum.

I. UVOD

Statistički pristup analizi degradacija u uslovima mehaničkog i električnog naprežanja standardnih debeloslojnih otpornika zasnovan je na generalizovanom pristupu švajcarskog autora Klaudivija Grimaldija koji je ovaj pristup primenio u svojoj analizi efekata trimovanja debeloslojnih otpornika visokonaponskim impulsima [1]. Generalizovan Grimaldijev pristup može biti primenjen na različite slučajeve mogućih procesa usled primene naprežanja. Pošto je on zasnovan na 2D slučajnoj otpornoj mreži, ne može se primeniti na direktnu kvantitativnu analizu, već samo na numeričku analizu ponašanja otpornosti i šuma usled naprežanja. U radu će biti izloženi rezultati primene polaznih postavki Grimaldijevog standardnog perkolacionog pristupa na standardne debeloslojne otpornike izlagane naprežanju čiji su parametri strukture određeni na osnovu determinističkog modela transporta naelektrisanja.

II. STATISTIČKI MODEL ZA ANALIZU DEGRADACIJA DEBELOSLOJNIH OTPORNIKA

Grimaldi pretpostavlja da deo kontakata ima provodnost g_1 , a ostali deo – provodnost g_2 , na osnovu čega uvodi bimodalnu distribuciju provodnosti:

$$\rho_0 = p_0 \delta(g - g_1) + (1 - p_0) \delta(g - g_2). \quad (1)$$

sa udelom p_0 provodnosti g_1 , odnosno $(1-p_0)$ provodnosti g_2 .

Sledeća Grimaldijeva pretpostavka je da su rezultat električnog impulsnog naprežanja: prelazi $g_1 \rightarrow g_2$ sa verovatnoćom W_{12} i $g_2 \rightarrow g_1$ sa verovatnoćom W_{21} . Ovo daje

izmenu učešća pojedinih provodnosti, tako da je posle prvog impulsa $p_0 \rightarrow p_1$. Rezultat n -tog impulsa je $p_{n-1} \rightarrow p_n$. Tako je posle prvog impulsa:

$$p_1 = p_0(1 - W_{12}) + (1 - p_0)W_{21}. \quad (2)$$

Pisanjem rekurzivne formule dolazi se do:

$$p_n = p_0(1 - W_{12} - W_{21})^n + \frac{W_{21} [1 - (1 - W_{12} - W_{21})^n]}{W_{12} + W_{21}}, \quad (3)$$

tako da se za $n \rightarrow \infty$ dobija:

$$p = \lim_{n \rightarrow \infty} p_n = \frac{1}{1 + \frac{W_{12}}{W_{21}}}. \quad (4)$$

Koristeći aproksimaciju efektivnog medijuma za slučajnu otpornu mrežu sa kvadratnom rešetkom, nakon n -tog impulsa važi uslov:

$$\int dg \rho_n(g) \frac{G_n - g}{g + G_n} = 0, \quad (5)$$

$$\text{sa } \rho_n(g) = p_n \delta(g - g_1) + (1 - p_n) \delta(g - g_2). \quad (6)$$

Na osnovu (5) i (6) dobija se jednačina:

$$G_n^2 - (2p_n - 1)(g_1 - g_2)G_n - g_1 g_2 = 0, \quad (7)$$

tako da je provodnost nakon n -tog impulsa:

$$G_n = \frac{(2p_n - 1)(g_1 - g_2)}{2} + \sqrt{\frac{(2p_n - 1)^2 (g_1 - g_2)^2}{4} + g_1 g_2}. \quad (8)$$

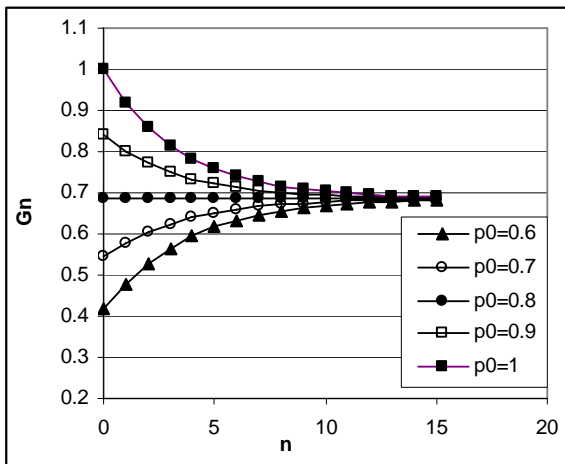
Osnovni Grimaldijevi rezultati su:

(a) Asimptotska vrednost p , jednačina (4), udela veza sa provodnošću g_1 zavisi od odnosa W_{12}/W_{21} i može biti veća ili manja od početne vrednosti p_0 .

(b) Kada je $g_1 > g_2$, krajnja makroskopska provodnost $G_{fin} > G_0$ ako je $p > p_0$, odnosno $G_{fin} < G_0$ ako je $p < p_0$. To znači model daje uslov pod kojim provodnost može rasti ili opadati u zavisnosti od odnosa verovatnoća procesa $g_1 \rightarrow g_2$ i $g_2 \rightarrow g_1$.

Grimaldi je izloženi pristup nazvao standardni perkolacioni pristup za koji tvrdi da je uprošćen da bi kvantitativno opisao proces trimovanja. Zasnovan je na pretpostavci da je proces trimovanja rezultat dva suprotna procesa okarakterisana sa W_{12} i W_{21} . Njegov osnovni rezultat je da provodnost može da raste ili opada. Realniji model bi bio onaj, kaže Grimaldi, koji bi uzeo u obzir da lokalna otpornost zavisi od stanja mreže sa karakteristikama sličnim onim u standardnom perkolacionom pristupu. Razvijajući ovu tezu, Grimaldi ističe da mikroskopski procesi imaju različite uzroke, zavisno od razmatranog sistema.

Grimaldijev standardni perkolacioni pristup bi u slučaju naprežanja debeloslojnih otpornika mogao biti primenjen u vidu modifikovanog modela koji se odnosi na kompozite otpornik-provodnik. Na slici 1 je prikazana promena provodnosti G_n za standardni perkolacioni pristup sa $W_{21}=0,2$, $W_{12}=0,05$ i različitim vrednostima početnih udela kontaktnih provodnosti p_0 za n koraka naprežanja. Vrednosti kontaktne i tunnelske provodnosti su $g_1=1$ i $g_2=0,1$, respektivno. Može se primetiti da asimptotskim režimom prikazanim na slici 1 upravlja odnos W_{12}/W_{21} tj. konačna otpornost može imati veću ili manju vrednost od početne u zavisnosti od vrednosti W_{12}/W_{21} . Ako pretpostavimo da W_{12} i W_{21} zavise od primenjenog naprežanja, u tom slučaju se naprežanje debeloslojnih otpornika može interpretirati pomoću dva suprotna procesa $g_1 \rightarrow g_2$ i $g_2 \rightarrow g_1$ dok je asimptotski režim rezultat odnosa dve verovatnoće - W_{12} i W_{21} . Grimaldijev standardni perkolacioni model predstavlja pojednostavljeni način prikaza efekata naprežanja debeloslojnih otpornika ali igra značajnu ulogu u tumačenju ovih efekata vezano za promene provodnosti otpornika izazvane primenom naprežanja.



Slika 1. Promena provodnosti G_n za standardni perkolacioni pristup sa $W_{21}=0,2$, $W_{12}=0,05$ i različitim vrednostima početnih udela kontaktnih provodnosti p_0 za n koraka naprežanja. Vrednosti kontaktne i tunnelske provodnosti su $g_1=1$ i $g_2=0,1$, respektivno

Da bi se izvršilo razmatranje šuma koji se javlja usled primenjenog naprežanja uvodi se aproksimacija efektivnim medijumom za slučajnu otpornu mrežu. Ova aproksimacija pretpostavlja određene vrednosti provodnosti kontakata (kontakt dve metalne čestice i MIM ćelija), pri čemu se kao parametar uzimaju udeli tih kontakata u ukupnoj mreži. Polazeći od toga da je šum mreže predstavljen šumom fluktuacija provodnosti mreže G_n uslovljene fluktuacijama provodnosti kontakata g ($g_{1,2}$, g_{ct} i $g_{A,B}$), onda bi se za dolaženje do izraza za šum mogao primeniti postupak priraštaja koristeći funkciju $G_n(g_k)$ u implicitnom obliku $F(G_n, g_k)=0$. Tada je:

$$\frac{dG_n}{dg_k} = -\frac{F'_{g_k}}{F'_{G_n}} \quad (9)$$

Za male konačne priraštaje se može pisati:

$$\frac{\Delta G_n}{G_n} \approx -\frac{g_k}{G_n} \cdot \frac{F'_{g_k}}{F'_{G_n}} \cdot \frac{\Delta g_k}{g_k} \quad (10)$$

Relativni spektar fluktuacija provodnosti mreže usled fluktuacija provodnosti g_k kontakata k -tog oblika:

$$\frac{S_{G_n}(f)}{G_n^2} = \left[\frac{g_k}{G_n} \cdot \frac{F'_{g_k}}{F'_{G_n}} \right]^2 \cdot \frac{S_{g_k}(f)}{g_k^2} \quad (11)$$

U prisustvu više nezavisnih izvora šuma je:

$$\frac{S_{G_n}(f)}{G_n^2} = \sum_1^m \left[\frac{g_k}{G_n} \cdot \frac{F'_{g_k}}{F'_{G_n}} \right]^2 \cdot \frac{S_{g_k}(f)}{g_k^2} \quad (12)$$

U ovom slučaju, prema Grimaldijevom modelu, na osnovu jednačine (7), je:

$$F(G_n, g_1, g_2) = G_n^2 - (2p_n - 1)(g_1 - g_2)G_n - g_1g_2 = 0 \quad (13)$$

Parcijalni izvodi su:

$$F'_{G_n} = 2G_n - (2p_n - 1)(g_1 - g_2) \quad (14)$$

$$F'_{g_1} = -(2p_n - 1)G_n - g_2 \quad (15)$$

$$F'_{g_2} = (2p_n - 1)G_n - g_1 \quad (16)$$

Na osnovu (12) i (14-16) dobija se relativni spektar fluktuacija provodnosti G_n :

$$\frac{S_{G_n}(f)}{G_n^2} = \left[\frac{g_1}{G_n} \cdot \frac{g_2}{2G_n - (2p_n - 1)(g_1 - g_2)} \right]^2 \cdot \left\{ \left[(2p_n - 1) \frac{G_n}{g_2} + 1 \right]^2 \frac{S_{g_1}(f)}{g_1^2} + \left[(2p_n - 1) \frac{G_n}{g_1} - 1 \right]^2 \frac{S_{g_2}(f)}{g_2^2} \right\} \quad (17)$$

Polazeći od toga da važi linearna veza napona i struje, tj. $I=GV$, onda je $\Delta V/V \approx \Delta G/G$. Ako se g_1 odnosi na provodnost kontakta dve metalne čestice g_c , a g_2 na barijernu provodnost g_b , onda na jednačinu (17) se mogu primeniti sledeće relacije:

$$\frac{S_{G_n}(f)}{G_n^2} = \frac{S_V(f)}{V^2}, \quad \frac{S_{g_1}(f)}{g_1^2} = \frac{S_{V_c}(f)}{V_c^2},$$

$$\frac{S_{g_2}(f)}{g_2^2} = \frac{S_{V_t}(f)}{V_t^2}. \quad (18 \text{ a,b,c})$$

Na osnovu jednačina (17) i (18 a,b,c) može se napisati:

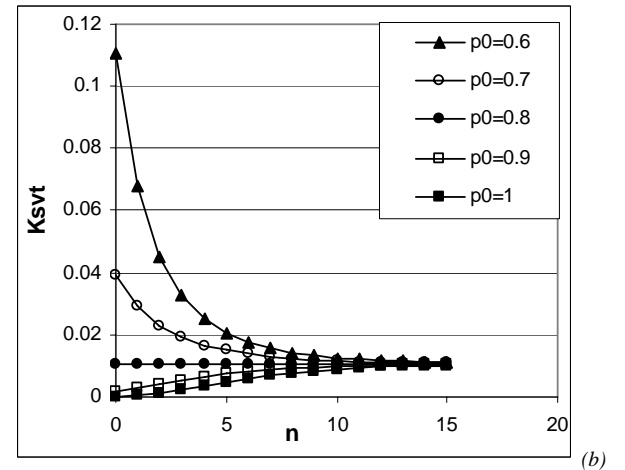
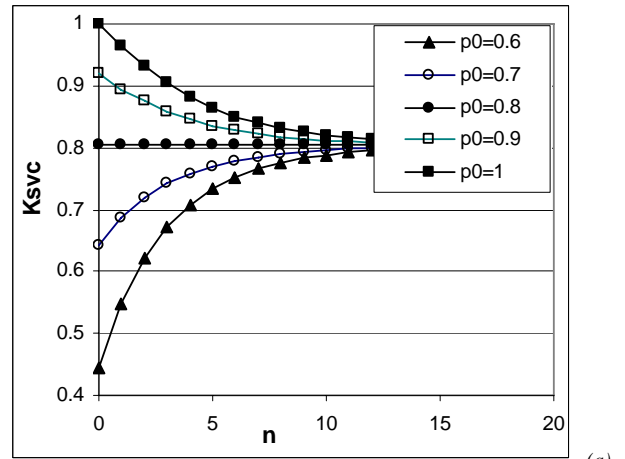
$$\frac{S_V(f)}{V^2} = K_{svc} \frac{S_{V_c}(f)}{V_c^2} + K_{svt} \frac{S_{V_t}(f)}{V_t^2}. \quad (19)$$

Treba napomenuti da se u poslednjoj relaciji, (19), indeks «t» odnosi na barijeru MIM ćelije. Isto tako, Grimaldijev model ne pretpostavlja prirodu provodnosti g_1 i g_2 , već samo dve različite provodnosti. Takođe, može se pretpostaviti da se ništa ne dešava sa elementarnim izvorima šuma, odnosno spektrima fluktuacija provodnosti g_1 i g_2 . Na slici 2 su prikazane vrednosti koeficijenata K_{svc} i K_{svt} iz jednačine 19 za različite vrednosti početnih udela kontaktnih provodnosti p_0 za n koraka naprežanja i $W_{2l}=0,2$, $W_{12}=0,05$. Vidi se da sa porastom p_0 raste koeficijent K_{svc} vezan za metalno provođenje, dok koeficijent K_{svt} koji je vezan za provođenje kroz MIM barijere opada. To znači da sa povećanjem udela kontakata u slučajnoj otpornoj mreži dominantan doprinos ukupnom šumu daju fluktuacije provodnosti mreže uslovljene fluktuacijama provodnosti kontakata (fluktuacije provodnosti g_1) dok doprinos fluktuacija provodnosti barijere opada (fluktuacije provodnosti g_2). Asimptotski režimi prikazani na slici 2 zavise od odnosa W_{12}/W_{2l} tj. vrednosti K_{svc} i K_{svt} variraju u zavisnosti od vrednosti W_{12}/W_{2l} . Ako pretpostavimo da W_{12} i W_{2l} zavise od primenjenog naprežanja, suprotno ponašanje koeficijenta K_{svc} i K_{svt} može biti interperetirano pomoću dva suprotna procesa $g_1 \rightarrow g_2$ i $g_2 \rightarrow g_1$ dok je asimptotski režim rezultat odnosa dve verovatnoće - W_{12} i W_{2l} . Iako se radi o generalizovanom pristupu, bimodalna raspodela provodnosti i izbor vrednosti p_0 , g_1 i g_2 koje zavise od modela kojim se opisuje neuređena struktura potvrđuju validnost interperetacije eksperimentalnih rezultata za promene provodnosti i šuma debeloslojnih otpornika usled naprežanja.

Ukoliko primenimo Grimaldijeve polazne pretpostavke na debeloslojne otpornike izlagane naprežanju tako što ćemo njegove parametre odrediti na osnovu determinističkog modela početna provodnost je:

$$G_0 = \frac{M^2}{N[p_0 R_{C0} + (1-p_0)R_{B0}]}, \quad (20)$$

a, uz uslov da se ne menja broj lanaca M i ukupni broj elementarnih otpornosti N , posle n naprežanja provodnost postaje:



Slika 2. Promena vrednosti koeficijenata K_{svc} i K_{svt} (jednačina 19) za različite vrednosti početnih udela kontaktnih provodnosti p_0 za n koraka naprežanja i $W_{2l}=0,2$, $W_{12}=0,05$

$$G_n = \frac{M^2}{N[p_n R_{C0} + (1-p_n)R_{B0}]}. \quad (21)$$

U zavisnosti od vrednosti p_0 i imajući u vidu da je $R_{C0} < R_{B0}$ gde je R_{C0} elementarna otpornost kontakta dve susedne provodne čestice i R_{B0} elementarna otpornost MIM ćelije, to je

$$G_0 \approx \frac{M^2}{NR_{C0}} \cdot \frac{1}{p_0}, \quad p_0 \rightarrow 1, \quad (22)$$

$$G_0 \approx \frac{M^2}{NR_{B0}} \cdot \frac{1}{1-p_0}, \quad p_0 \rightarrow 0. \quad (23)$$

Uslov $p_0 \rightarrow 1$ znači smanjenje broja kontakata susednih provodnih čestica, a uslov $p_0 \rightarrow 0$ znači povećanje broja kontakata susednih provodnih čestica. Iz ovoga sledi zaključak da kod niskootpornih pasti dominira prelaz $g_1 \rightarrow g_2$, a kod viskootpornih pasti prelaz $g_2 \rightarrow g_1$.

Kada je šum u pitanju, ukoliko pretpostavimo da u šumu dominira šum usled fluktuacionih procesa u MIM ćeliji, onda je:

$$\frac{S_v(f)}{V^2} \approx \frac{1}{N_{B0}} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{N_{C0}R_{C0}}{N_{B0}R_{B0}}\right)^2} \cdot \left[\frac{S_{vBN}(f)}{V_B^2} + \frac{N_T}{N_{B0}} \cdot \frac{S_{vT}(f)}{V_B^2} \right] \quad (24)$$

Ukoliko dominira modulacija Najkvistovog šuma važi:

$$\frac{S_v(f)}{V^2} \approx \frac{1}{N} \cdot \frac{1}{1-p_0} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{p_0R_{C0}}{(1-p_0)R_{B0}}\right)^2} \cdot \left[\frac{S_{vBN}(f)}{V_B^2} \right] \quad (25)$$

Ako dominiraju fluktuacije zahvata na klopama važi:

$$\frac{S_v(f)}{V^2} \approx \frac{N_T}{N^2} \cdot \frac{1}{(1-p_0)^2} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{p_0R_{C0}}{(1-p_0)R_{B0}}\right)^2} \cdot \left[\frac{S_{vT}(f)}{V_B^2} \right] \quad (26)$$

Doprinos šuma kontakata dve metalne čestice je:

$$\frac{S_v(f)}{V^2} \approx \frac{1}{Np_0} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{(1-p_0)R_{B0}}{p_0R_{C0}}\right)^2} \cdot \frac{S_{vC}(f)}{V_C^2} \quad (27)$$

Rezultati prethodnih analiza vezanih za šum [2-5] su pokazali da je porast šuma vezan samo za mehaničko naprezanje posledica izmene vrednosti barijernih otpornosti usled promene širine staklenih barijera, a porast šuma vezan za istovremeno mehaničko i električno naprezanje posledica i mikrostrukturnih i makrostrukturnih promena koje se manifestuju degradacijom integriteta otpornika. Utvrđeno je da mehaničko naprezanje menja širinu potencijalne barijere, a električno njenu visinu. S obzirom da particioni model isključuje mogućnost izmene vrednosti šumova kontakata dve čestice i MIM ćelija, kao i izmene vrednosti otpornosti kontakata i MIM ćelija, šumne performanse otpornika izloženih naprezanju bi se po particionom modelu mogle tumačiti preko preraspodele između broja kontakata i broja MIM ćelija, odnosno odgovarajućih doprinosa šumova kontakata metalnih čestica i fluktuacionih procesa u MIM ćelijama ukupnom šumu koje su posledica izvršenog naprezanja

III. ZAKLJUČAK

U radu je izložen predlog statističkog modela za analizu degradacija debeloslojnih otpornika u uslovima naprezanja. To je generalizacija Grimaldijevog statističkog pristupa primenjenog u analizi efekata trimovanja debeloslojnih

otpornika visokonaponskim impulsima. Izložena je primena statističkog pristupa na šum i izvedeni su parametri ovog statističkog pristupa na osnovu determinističkog modela za debeloslojni otpornik. Ovaj pristup isključuje mogućnost izmene vrednosti šumova kontakata dve provodne čestice i MIM ćelija, kao i izmene vrednosti otpornosti kontakata MIM ćelija. Šumne performanse otpornika izloženih naprezanju se tumače kao preko doprinosa šumova kontakata provodnih čestica i fluktuacionih procesa u MIM ćelijama ukupnom šumu koji su posledica izvršenog naprezanja. Ovaj pristup omogućava interpretaciju eksperimentalnih rezultata za promene provodnosti i šuma debeloslojnih otpornika usled naprezanja.

ZAHVALNICA

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

LITERATURA

- [1] C. Grimaldi et al., "A random resistor network model of voltage trimming", *J.Phys.D: Appl.Phys.*, 37, 2004, pp. 2170-2174.
- [2] I. Mrak, M.M. Jevtić, Z. Stanimirović, "Low-frequency Noise in Thick-film Structures Caused by Traps in Glass Barriers", *Microelectronics Reliability*, 38, pp. 1569-1576, 1998.
- [3] Ivanka Stanimirović, Milan M. Jevtić, Zdravko Stanimirović, "High-Voltage Pulse Stressing of Thick-Film Resistors and Noise", *Microelectronics Reliability*, 43, pp. 905-911, 2003.
- [4] Ivanka Stanimirović, Milan M. Jevtić, Zdravko Stanimirović, "Multiple High-Voltage Pulse Stressing of Conventional Thick-Film Resistors", *Microelectronics Reliability*, 47, pp. 2242-2248, 2007.
- [5] Zdravko Stanimirović, Milan M. Jevtić, Ivanka Stanimirović, "Simultaneous Mechanical and Electrical Straining of Conventional Thick-Film Resistors", *Microelectronics Reliability*, 48, pp. 59-67, 2008.

ABSTRACT

This paper proposes a statistical model for analysis of degradations in thick-film resistors that are being subjected to mechanical or simultaneous electrical and mechanical straining. It is a generalization based on previous critical evaluations of one particular statistical approach applied in analysis of high voltage pulse trimming effects on thick-film resistors. Application of the statistical approach on noise is described and parameters of this statistical approach based on deterministic model are derived.

ANALYSIS OF STRAINING EFFECTS ON STANDARD THICK-FILM RESISTORS - STATISTICAL APPROACH

Ivanka Stanimirović, Zdravko Stanimirović