

ANALIZA MEĐUSOBNIH ZAVRŠNIH KAPACITIVNOSTI ČEŠ LJASTIH KERAMIČKIH FILTARA

Nikolić M.N., Đorđević A.R.
Elektrotehnički fakultet u Beogradu

UVOD

Tehnike zasnovane na keramičkim materijalima imaju veliki značaj u procesu minijaturizacije i integracije visokofrekventnih kola. Postoje dve takve tehnike. Prva se zasniva na korišćenju keramičkog bloka. U bloku se prave metalizovane rupice, a po površini bloka štampaju različite provodne ili otporne šare. Keramički materijali su veoma kvalitetni, malih gubitaka i relativne permitivnosti u opsegu između 30 i 100. Zahvaljujući velikoj permitivnosti, odnosno maloj talasnoj dužini, dimenzije komponenti su nekoliko puta manje nego da je dielektrik vazduh. U ovoj tehnici se obično rade razne vrste kvalitetnih filtara propusnika opsega, pretežno interdigitalnih i češljastih, a za učestanosti tipično između 0,5 i 3 GHz. Druga tehnika se zasniva na pravljenju sendviča od tankih keramičkih slojeva, kao kod višeslojne štampe. U svakom sloju se mogu štampati metalizovane ili otporne šare, a veze između slojeva se ostvaruju metalizovanim rupicama. Relativne permitivnosti keramičkih materijala su između 5 i 10. Ova tehnika pruža veću raznovrsnost, pa se u njoj prave diskretni elementi (kondenzatori i kalemovi), filtri propusnici opsega, niskih ili visokih učestanosti, transformatori impedanse, prekidači (uz dodatak poluprovodničkih SMD komponenti), antene i drugo, uz perspektivu integracije celog ulaznog dela prijemnika u jednu hibridnu komponentu na keramičkoj podlozi.

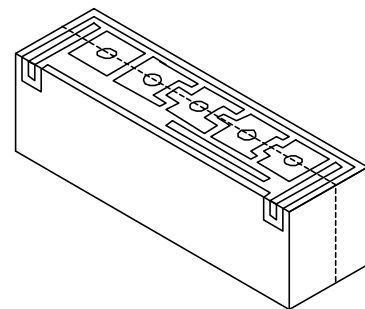
Elektromagnetska analiza keramičkih struktura je složen zadatak, zbog nehomogenog materijala (keramika i okolni vazduh, ili različite permitivnosti slojeva), različitih oblika štampanih šara, istovremene prisutnosti detalja električki vrlo malih dimenzija i ukupnih dimenzija reda talasne dužine itd. Na tržištu postoji čitav niz programa za elektromagnetsku analizu koji, sa različitim kvalitetom rezultata, uspevaju da analiziraju keramičke strukture. Ti programi se uglavnom zasnivaju na dinamičkoj analizi, koja uključuje efekte prostiranja. Međutim, tačnost u većini slučajeva nije zadovoljavajuća, a vreme potrebno za analizu se obično meri časovima, pa i danima.

Sa druge strane, rezultati zadovoljavajućeg kvaliteta (često bolji od dinamičke analize) mogu se dobiti, uz znatno kraće računarsko vreme, dijagnostičkim pristupom. Složena elektromagnetska struktura se izdela na jednostavnije delove, od kojih se svaki može, uz određene aproksimacije, analizirati kvazistatičkim metodima.

Ovaj rad se odnosi na analizu keramičkih češljastih filtara. Ti filtri se sastoje od niza spregnutih rezonatora-

vodova (slika 1a). Vodovi su kratko spojeni na masu na jednom kraju, a završeni kapacitivnim opterećenjima na drugom kraju. Time se dobija filter propusnik opsega, širine reda veličine 10%. U klasičnoj realizaciji, kapacitivna opterećenja postoje između krajeva vodova i mase. Međutim, pravljenjem koncentrisane kapacitivne sprege između krajeva susjednih, pa i nesusednih rezonatora mogu se realizovati nule prenosne funkcije koje popravljaju karakteristike filtra u nepropusnom opsegu.

U tehničkim keramičkim blokovima (slika 1a) vodovi se realizuju kao metalizovane okrugle rupice, a kapacitivna opterećenja u vidu metalizovanih šara (ostrva) na jednoj strani bloka (slika 1b). Blok je metalizovan praktično po svim ostalim stranama i ta metalizacija igra ulogu mase. U mnogim realizacijama blok ima metalni zaklon na maloj visini iznad kapacitivnih opterećenja.



(a)



(b)

Slika 1. Dva keramička filtra: (a) uprošćena skica češljastog filtra i (b) fotografija kapacitivnih opterećenja filtra-dupleksera.

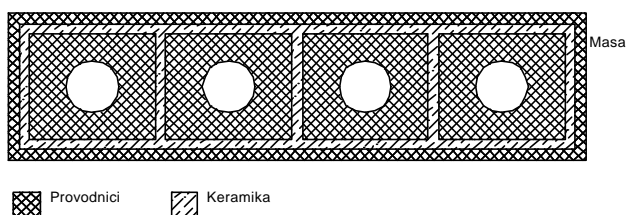
Spregnuti vodovi se mogu karakterisati na osnovu rezultata kvazistatičke analize [1]. Preciznije, dovoljna je elektrostatička analiza višeprovodničke strukture kao dvodimenzionog sistema jer raspodela napona, potencijal i polje ne zavise od koordinate duž ose provodnika.

Metalizovana ostrva koja igraju ulogu završnih kapacitivnosti mogu se analizirati, nezavisno od vodova, kao

poseban elektrostatički problem, samo što je sada u pitanju trodimenzioni sistem. Cilj ovoga rada je procena završnih kapacitivnosti, pre svega međusobnih. Uporedo su vršene dve analize, koristeći dva različita modela. Modeli nisu strogi, već veoma pojednostavljeni, kako bi se dobilo na efikasnosti analize. Prvi model je trodimenziona struktura na granici vakuuma i keramičkog bloka, gde se nalaze kapacitivna ostrva, a prikazan je u narednom, drugom odeljku. Drugi model se svodi na dvodimenzionu analizu, a opisan je u trećem odeljku. U četvrtom odeljku su upoređeni rezultati dobijeni na osnovu ovih modela.

II TRODIMENZIONA STRUKTURA NA GRANICI DVE SREDINE

Glavni deo sopstvenih i međusobnih kapacitivnosti metalizovanih ostrva sa slike 1 potiče od nagomilavanja naelektrisanja na ivicama ostrva, tj. u okolini uskih procepa između ostrva, kao i ostrva i mase. U prvoj aproksimaciji, zanemarujemo uticaj vertikalnih metalizovanih zidova keramičkog bloka sa slike 1a. Takođe, zanemarujemo i uticaj metalizovanih rupa. Time se analizirana struktura svodi na sistem sa slike 2. Da bismo još više pojednostavili analizu, smatramo da se metalizacija sa slike 2 nalazi na razdvojnoj površi i dva poluprostora, od kojih je jedan ispunjen homogenom keramikom (permitivnosti ϵ), dok je drugi vakuum. Tada se proračun može sprovesti kao da se struktura sa slike 2 nalazi u homogenoj beskonačnoj sredini efektivne permitivnosti $(\epsilon + \epsilon_0) / 2$.

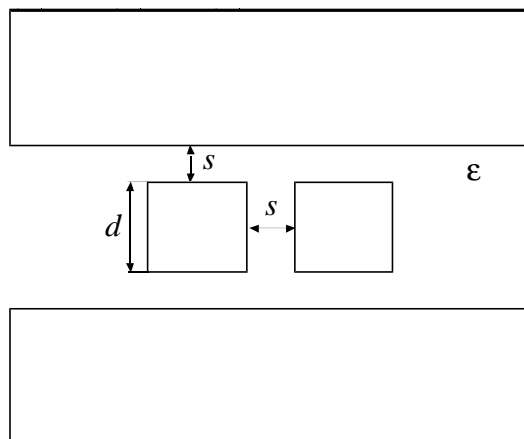


Slika 2. Uprošćeni model gornje površi i keramičkog bloka.

Trodimenzioni sistem sa slike 2 je analiziran metodom momenata [2]. Najpre je formiran sistem integralnih jednačina za nepoznatu raspodelu površinskih slobodnih naelektrisanja, na osnovu graničnog uslova za potencijal. Zatim je površ svakog metalnog ostrva izdvojena na veći broj pravougaonih sekcija i na svakoj od njih raspodela naelektrisanja aproksimirana nepoznatom konstantom. Na kraju se dobija sistem linearnih jednačina po tim konstantama, čije rešenje određuje raspodelu naelektrisanja, a odatle i sopstvene i međusobne delimične kapacitivnosti sistema. Integrali koji se dobijaju u postupku rešavanja problema izračunati su eksplicitno, koristeći se referencom [3]. Pri tome su uneta uprošćenja zahvaljujući planarnom karakteru analizirane strukture [4]. Da bi se mogle odrediti delimične kapacitivnosti, potrebno je analizirati strukturu kada je jedno kapacitivno ostrvo na zadanom potencijalu (recimo, 1 V), a drugo na potencijalu mase. Postupak se ponavlja za svako ostrvo.

Kao primer, posmatramo strukturu sa slike 3, koja se sastoji od dva kapacitivna ostrva (u sredini) i dva veća ostrva koja igraju ulogu mase. Najpre je ispitana konvergencija

rezultata u zavisnosti od broja sekcija. Da bi se dobili rezultati za međusobnu kapacitivnost čija se tačnost procenjuje na 10%, potrebno je bar 10 sekcija duž svake stranice kapacitivnog ostrva. Pošto je primenjena uniformna segmentacija, to znači ukupno 100 sekcija za svako ostrvo. U kasnijim poboljšanjima, koja ovde nisu prikazana, načinjena je neuniformna segmentacija, tako da su sekcije uz ivice provodnika manjih dimenzija od sekcija u unutrašnjosti. Time se, za istu tačnost rezultata, ostvaruje više ostruka ušteda u broju nepoznatih.



Slika 3. Dva kvadratna kapacitivna ostrva okružena provodnicima na potencijalu mase.

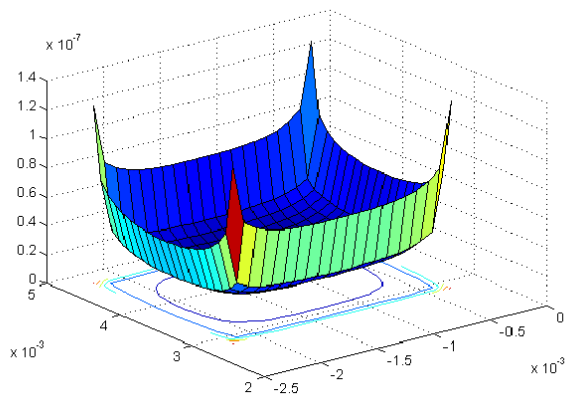
U tabeli 1 prikazana je zavisnost delimičnih kapacitivnosti od veličine i rastojanja kapacitivnih opterećenja. Relativna permitivnost keramike je $\epsilon_r = 37$ (barijum-titanat). U analizi je svako kapacitivno ostrvo izdvojeno na po 100 sekcija, a svako uzemljeno ostrvo na po 400 sekcija.

Tabela 1. Sopstvene i međusobne delimične kapacitivnosti ostrva sa slike 3 (3D analiza).

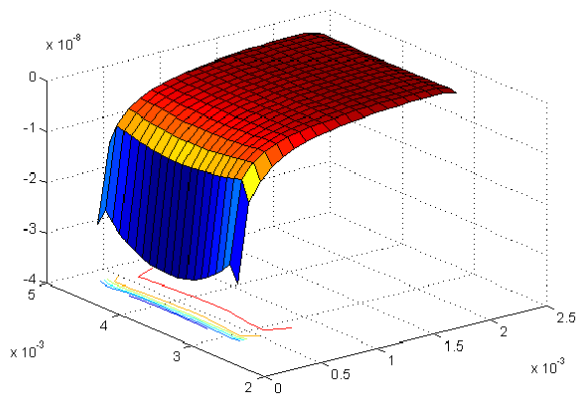
d [mil]	s [mil]	c_{11}, c_{22} [pF]	c_{12}, c_{21} [pF]
70	10	1,64	0,36
70	12	1,60	0,34
70	14	1,57	0,32
70	16	1,55	0,31
80	10	1,87	0,41
80	12	1,85	0,39
80	14	1,79	0,37
80	16	1,76	0,36
100	10	2,36	0,55
100	12	2,34	0,52
100	14	2,30	0,50
100	16	2,27	0,48

Međusobna kapacitivnost je praktično linearno srazmerna dužini procepa (d) i odgovara podužnoj kapacitivnosti procepa od oko 5 fF/mil. Međutim, sopstvene kapacitivnosti su preko dva puta veće nego što daje kapacitivnost procepa. To znači da doprinos naelektrisanja raspodeljenog po srednjem delu ostrva nije zanemarljivo mali. Iako aproksimativno, dobijeni rezultati omogućavaju brzu procenu bar reda veličine završnih sopstvenih kapacitivnosti.

Na slici 4 je prikazana numerički dobijena raspodela slobodnog naelektrisanja na kapacitivnim ostrvima. Jasno se vide ivični efekat i efekat blizine.



(a)



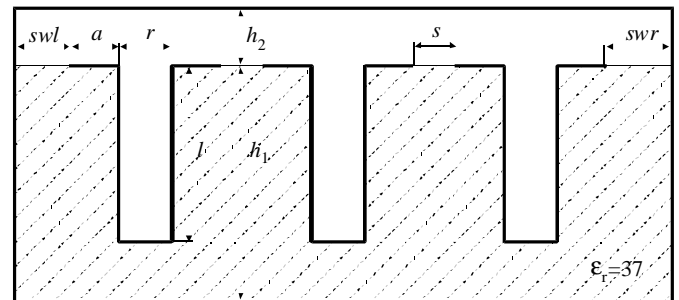
(b)

Slika 4. Raspodela naelektrisanja na kapacitivnim ostrvima sa slike 3 za (a) ostrvo koje je na potencijalu 1 V i (b) za uzemljeno ostrvo.

III DVODIMENZIONA APROKSIMACIJA

Posmatramo ravan vertikalni presek keramičkog bloka, prikazan na slici 5. Blok je sličan onome sa slike 1a, samo što ima tri metalizovane rupe. Presek sadrži i ose rupa, kao što je označeno isprekidanom linijom na slici 1a. Na slici 5 je prikazan slučaj kada blok ima metalni zaklon (poklopac) iznad kapacitivnih ostrva. U stvarnosti, blok je trodimenziona struktura. Međutim, pretpostavljamo da se blok može aproksimirati dvodimenzionom strukturom, čiji je poprečni presek prikazan na slici 5. Ova aproksimacija se uvodi sa ciljem da se ubrza analiza, jer je za numeričko rešavanje dvodimenzionog problema potrebno znatno manje nepoznatih nego za trodimenzione sisteme. Može se očekivati da ovakva aproksimacija daje dobre rezultate za međusobne kapacitivnosti jer su procepi između susednih ostrva praktično dvodimenzione strukture. Greška sigurno postoji, a posledica je prvenstveno zanemarivanja efekata na uglovima ostrva. Što se tiče sopstvenih kapacitivnosti, tu se

može očekivati veća greška, jer su za te kapacitivnosti odgovorni procepi prema masi, od kojih neki nedostaju u dvodimenzionom modelu. Osim toga, i aproksimativno modelovanje metalizovanih rupa utiče na kvalitet rezultata za sopstvene kapacitivnosti.



Slika 5. Presek keramičkog bloka duž osa rupa.

U odeljku II sopstvene i delimične kapacitivnosti ostrva predstavljale su upravo one rezultate koje smo tražili. U ovom slučaju, međutim, u model su uključene metalizovane rupe. Cilj analize je određivanje dodatnih kapacitivnosti koje potiču od kapacitivnih ostrva a , u izvesnoj meri, i od ivičnih efekata na gornjim krajevima metalizovanih rupa. Dodatne kapacitivnosti se računaju tako što se odredi raspodela naelektrisanja na provodnicima, a onda se od ukupnog naelektrisanja provodnika oduzme naelektrisanje koje odgovara uniformnoj raspodeli duž metalizovanih rupa. Gustina naelektrisanja te uniformne raspodele dobija se iz numeričkih rezultata za naelektrisanje oko sredine dužine (l) rupa.

U stvarnosti metalizovane rupe su kratko spojene za metalizaciju na donjoj strani keramičkog bloka. Međutim, za elektrostatičku analizu je neophodno da jedan po jedan provodnik bude na potencijalu različitom od nule. Zbog toga su u modelu sa slike 5 krajevi metalizovanih rupa odignuti od poda. U numeričkoj obradi rezultata, obračunava se i efekat kraja na donjim delovima rupa.

Rezultujuća dvodimenziona struktura se analizira numeričkim postupkom iz reference [1].

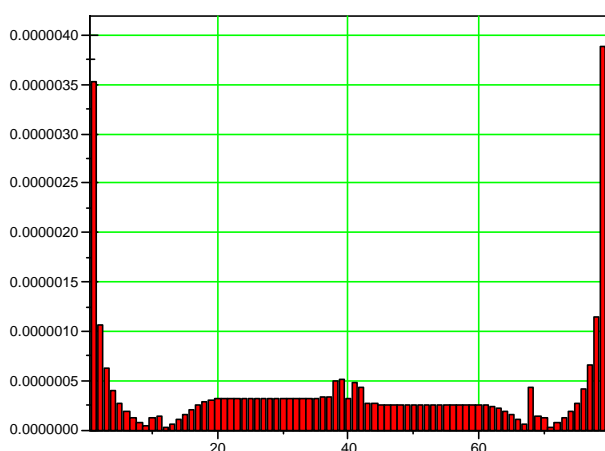
Kao primer, posmatramo sistem sa dve rupe, odnosno dva kapacitivna ostrva. Da bi se rezultati analize mogli uporediti sa onima iz odeljka II, dimenzije na slikama 3 i 5 su povezane relacijom $d=2a+r$, odnosno širine kapacitivnih ostrva su jednake u oba slučaja. Naravno, jednake su i širine procepa. Rezultujuće podužne kapacitivnosti se na kraju množe dimenzijom d . Rezultati su prikazani u tablici 2 za prečnik rupa $r=40$ mil. Širine svih procepa su jednake ($s=swl=swr$), a metalni poklopac je veoma udaljen ($h_2 = 200$ mil). Dobijene međusobne kapacitivnosti su za oko 40% manje nego u tablici 1, dok su sopstvene kapacitivnosti drastično različite, kao što se i očekivalo.

Na slici 6 je prikazana raspodela naelektrisanja duž konture levog provodnika. Taj provodnik je na potencijalu 1 V, dok je desni provodnik uzemljen. U analizi je kontura izdeljena na 80 kratkih segmenata. Na apscisi je redni broj segmenta, počevši i od levog gornjeg kraja. Uočava se ivični efekat oko 1. i 80. segmenta. Gustina naelektrisanja je nešto veća oko 80. segmenta, zbog efekta blizine desnog provodnika. U okolini 10. i 70. segmenta je prelazak sa horizontalnog kapacitivnog ostrva na vertikalni deo

metalizovane rupe. Zbog velike relativne permitivnosti keramike, dominantni deo naelektrisanja provodnika je sa strane keramike. Zato oko ovih segmenata gustina naelektrisanja opada, što odgovara dijedru sa uglom od 270° . Između 20. i 35. segmenta, odnosno 45. i 60. segmenta, gustina naelektrisanja je praktično konstantna, što odgovara zoni oko sredine visine metalizovane rupe. Najzad, u okolini 40. segmenta uočljiva je neravnomerna raspodela naelektrisanja na donjem zidu metalizovane rupe. Na slici prikazan je sličan dijagram, samo u tri dimenzije, koji obuhvata i uzemljeni (desni) provodnik.

Tabela 2. Sopstvene i međusobne delimične kapacitivnosti ostrva sa slike 5 (2D analiza).

a [mil]	s [mil]	c_{11}, c_{22} [pF]	c_{12}, c_{21} [pF]
15	10	0,232	0,188
15	12	0,203	0,165
15	14	0,171	0,151
15	16	0,152	0,130
20	10	0,331	0,260
20	12	0,291	0,230
20	14	0,250	0,212
20	16	0,221	0,186
30	10	0,554	0,419
30	12	0,493	0,373
30	14	0,435	0,345
30	16	0,389	0,313



Slika 6. Raspodela naelektrisanja u 2D modelu duž poprečnog preseka pobuđenog provodnika.

IV POREĐENJE REZULTATA I ZAKLJUČAK

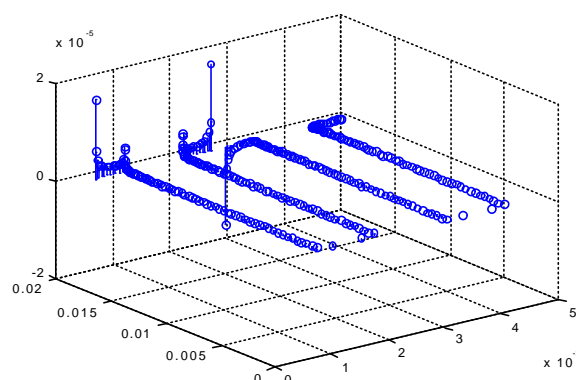
Opisana su dva relativno jednostavna elektrostatika modela za približan proračun sopstvenih i međusobnih završnih kapacitivnosti kod keramičkih čestih filtara. Ta dva modela mogu poslužiti za brzu procenu reda veličine kapacitivnosti. Pri tome je 2D model manje tačniji, posebno za sopstvene kapacitivnosti. Međutim, 2D model zahteva desetak puta manji broj nepoznatih od 3D modela, a time je i 2-3 reda veličine brži.

Za dva kvadratna ostrva sa slike 2, za $d=100$ mil i $s=10$ mil, neuniformna podela značajno poboljšava tačnost.

Za isti broj nepoznatih kao u odeljku II, 3D analiza daje $c_{11}=2,66$ pF/m i $c_{22}=0,594$ pF/m, što je u okviru 1% u odnosu na referentne rezultate (dobijene sa nekoliko puta većim brojem promenljivih).

Ustanovljeno je da prisustvo metalizovane kutije (200 mil visoke) malo utiče na kapacitivnosti: povećava sopstvenu kapacitivnost za oko 1%, a međusobnu smanjuje za 5%.

Za dobijanje još tačnijih rezultata potrebni su složeniji modeli. Jedna mogućnost je analiza trodimenzionog elektrostatikog sistema bez pojednostavljenja učinjenih u ovom radu. Druga mogućnost je potpuna, dinamička analiza, koja u sebi uključuje i efekte prostiranja. Međutim, prema današnjem stanju, programi za dinamičku analizu još uvek ne daju dovoljno pouzdane rezultate, a iziskuju enormno računarsko vreme.



Slika 7. Približna raspodela naelektrisanja u 2D modelu duž poprečnog preseka voda.

LITERATURA

- [1] Djordjević A.R., Baždar, M.B., Harrington, R.F., and Sarkar, T.K., *LINPAR for Windows: Matrix Parameters for Multiconductor Transmission Lines (software and user's manual)*, Boston: Artech House, 1996.
- [2] R.F. Harrington, *Field Computation by Moment Methods*, Piscataway (NJ): IEEE Press, 1993.
- [3] Wilton, D.R., Rao, S.M., Glisson, A.W., and Shubert, D., "Potential Integrals for Uniform and Linear Source Distributions on Polygonal and Polyhedral Domains", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Vol. AP-32. No. 3, March 1984.
- [4] Nikolaić M.N., *Diplomski rad*, Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu, 2000.

ABSTRACT

Two relatively simple electrostatic models were developed for approximate analysis of mutual capacitances that equivalently load a ceramic combline filter. The two models can also serve for quick estimation of the order of magnitude of self capacitances.

**ANALYSIS OF MUTUAL TERMINAL CAPACITANCES
OF COMBLINE CERAMIC FILTERS, Nikoliaž M.N.,
Đorđević A.R.**