

MODELOVANJE MIKROTALASNOG APLIKATORA SA POBUDOM PREKO TALASOVODA PRIMENOM TLM METODA

Jugoslav Joković, Tijana Randelović, Mila Stojanović, *Elektronski fakultet u Nišu*

Sadržaj – Primenom numeričkog 3D TLM metoda analiziran je realni mikrotalasni aplikator u koji se energija iz mikrotalasnog izvora dovodi preko talasovoda. Analiza je izvršena u frekventijskom opsegu $f = (2.425 \div 2.475)$ GHz koji predstavlja radni opseg industrijskih aplikatora. Sa ciljem da se ustanovi uticaj položaja i broja talasovoda na raspodelu rezonantnih modova u aplikatoru, dobijeni numerički rezultati su upoređeni sa analitičkim vrednostima, kao i sa rezultatima simulacije rezonatora sa impulsnom pobudom. TLM simulator je najpre primenjen na metalni pravougaoni rezonator bez opterećenja, a zatim je izvršeno i modelovanje aplikatora opterećenog blokom perspeksa, kako bi se utvrdio uticaj prisustva opterećenja na raspodelu pobuđenih modova. Postignuto je veoma dobro slaganje numeričkih rezultata sa referentnim vrednostima.

1. UVOD

Primena mikrotalasa u industriji dovela je do razvoja i primene brojnih mikrotalasnih aplikatora u procesima zagrevanja i sušenja dielektričnih materijala. Veoma pogodna konfiguracija za modelovanje elektromagnetnih osobina realnih mikrotalasnih aplikatora je metalni rezonator pravougaonog ili kružnog poprečnog preseka. Poznavanje ponašanja odabranog modela mikrotalasnog rezonatora sa zadatim pretpostavkama ima veliki značaj i znatno olakšava postupak dizajniranja ovih aplikatora [1,2]. Pri tome, poseban značaj, pored uticaja dielektričnog opterećenja, imaju uslovi pobude, naročito kada postoji veći broj modova u odgovarajućem frekventijskom opsegu, a to je upravo i najčešći zahtev u dizajniranju mikrotalasnih aplikatora.

Postoji više načina za uvođenje energije iz mikrotalasnog izvora u rezonator: induktivna antena u obliku petlje, kapacitivna štap antena, niz rezonantnih slotova i drugo. Međutim, generalno se energija iz mikrotalasnog izvora u rezonator prenosi preko talasovoda čija se prednost ogleda u minimiziranju reflektovane snage [3]. U praktičnoj realizaciji mikrotalasnih aplikatora posebna pažnja se poklanja raspodeli EM polja u rezonatoru, u cilju obezbeđivanja ravnomernog zagrevanja materijala koji se suši. Iz tih razloga, modelovanje realne pobude ima veliki praktičan značaj, jer u zavisnosti od načina pobude, pozicije i dimenzija pobudnog elementa i broj pobuđenih modova je različit.

TLM (Transmission Line Modelling) metod je opšti, elektromagnetski zasnovan numerički metod koji je uspešno primenjen za rešavanje elektromagnetnih problema u oblasti modelovanja metalnih rezonatora [4]. Za uspostavljanje željene raspodele polja u modelovanim strukturama najpre je korišćena impulsna pobuda odgovarajuće komponente polja u TLM mreži. Međutim, s obzirom da se ovaj način uspostavljanja raspodele polja razlikuje od realnih eksperimentalnih slučajeva, u kasnijim istraživanjima za uspostavljanje željene raspodele polja u modelovanom rezonatoru korišćena je realna pobudna sonda modelovana pomoću TLM žičanog čvora [5]. U oba slučaja modelovani prostor je bio veoma jednostavan i praktično je bio određen graničnim površinama samog rezonatora.

Sa druge strane, pored analize praznog metalnog rezonatora, TLM metod je uspešno primenjen i za određivanje rezonantnih frekvencija metalnog rezonatora opterećenog planparalelnim dielektričnim slojevima sa

gubicima [2]. U ovim aplikacijama, karakteristike ukupne modelovane sredine menjale su se samo po jednoj dimenziji, najčešće u pravcu z-ose, tako da su i zahtevi kod modelovanja bili relativno jednostavni, jer je rezolucija mreže bila ista u celom prostoru odgovarajuće sredine (vazduh ili dielektrik).

Cilj ovog rada je da se ispitaju mogućnosti 3D TLM metoda za analizu realnog mikrotalasnog aplikatora u koji se mikrotalasna energija iz mikrotalasnog izvora dovodi preko talasovoda, tako da u ovom slučaju ukupni modelovani prostor čine rezonator i talasovod. Za pobuđivanje samog talasovoda korišćena je pobudna sonda modelovana pomoću TLM žičanog čvora, koja je povezana sa generatorom. Pored toga, za razliku od ranijih istraživanja gde su zidovi rezonatora modelovani kao savršeno provodne sredine, u ovom radu su modelovane i realne karakteristike zidova, tj. uzeta je u obzir i debljina i provodnost zidova rezonatora.

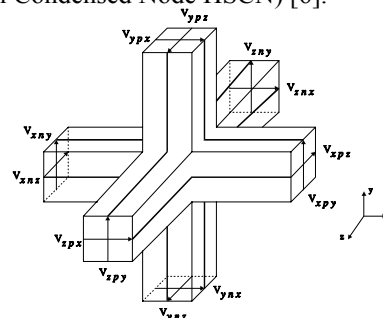
TLM simulator je najpre primenjen na prazan metalni pravougaoni rezonator bez pobudnih elemenata, a zatim i sa talasovodima. S obzirom da većina industrijskih mikrotalasnih sistema za sušenje materijala rade na frekvenciji $f = 2.45$ GHz, sve analize u ovom radu se odnose na radni opseg $f = (2.425 \div 2.475)$ GHz. Činjenica da u radnom opsegu postoji veliki broj modova predstavlja dodatnu teškoću za analizu, naročito za preciznu identifikaciju modova, pa je u ovom radu data i analiza pojedinačnih komponenti električnog i magnetnog polja dobijenih primenom TLM metoda.

Na kraju, dati su rezultati modelovanja aplikatora opterećenog blokom perspeksa koji je smešten u jedan ugao rezonatora, kako bi se ustanovio uticaj ovakvog tipa opterećenja na EM polje u rezonatoru.

2. TLM METODOLOGIJA

U TLM metodu, raspodela elektromagnetskog polja u tri dimenzije, za odgovarajući mod oscilovanja u pravougaonom metalnom rezonatoru, modeluje se ispunjavajući prostor rezonatora mrežom transmisionih linija i pobuđujući odgovarajuću komponentu polja u mreži ili direktno ili sprežanjem sa odgovarajućom komponentom napona odnosno struje od žičanog elementa. Elektromagnetske karakteristike medijuma u rezonatoru se modeluju mrežom međusobno povezanih TLM čvorova.

Na Slici 1 prikazana je osnovna struktura simetričnog kondenzovanog čvora. U cilju postizanja većeg koraka vremenske diskretizacije, za potrebe modelovanja je upotrebljen hibridni simetrični kondenzovani čvor (Hybrid Symmetrical Condensed Node HSCN) [6].



Sl.1. Simetrični kondenzovani čvor

Kako bi se dodatno ubrzao postupak simulacije, implementirani su najefikasniji TLM algoritmi za proračun matrice rasejanja i povezivanja, bazirani na primeni principa kontinuiteta električnog i magnetskog polja i održanja naelektrisanja i magnetskog fluksa [7].

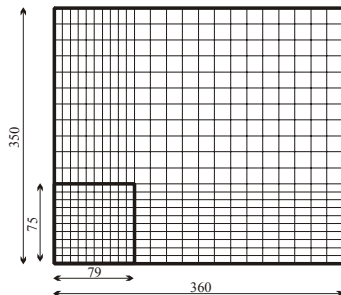
Spoljašnje granične površine sa proizvoljnim koeficijentom refleksije ρ_w se modeluju u TLM metodu završavajući vodove na granicama modelovanog prostora odgovarajućim opterećenjem [4]. Ako je karakteristična impedansa voda različita od impedanse sredine, ekvivalentni koeficijent refleksije TLM voda, ρ_{ij} , generalno je različit od ρ_w . Koeficijent refleksije voda, ρ_{ij} , se nalazi završavajući vod karakteristične impedanse Z_{ij} istom otpornošću:

$$\rho_{ij} = \frac{R - Z_{ij}}{R + Z_{ij}} = \frac{(1 + \rho_w) - \hat{Z}_{ij}(1 - \rho_w)}{(1 + \rho_w) + \hat{Z}_{ij}(1 - \rho_w)} \quad (1)$$

gde je $\hat{Z}_{ij} = Z_{ij} / Z_{ij}^s$ normalizovana karakteristična impedansa TLM voda.

Pri modelovanju električnih ili magnetskih zidova, koji se često koriste, važi da je $\rho_w = \rho_{ij}$. Za ostale vrednosti ρ_w , ρ_{ij} zavise od Z_{ij} . Modelovanje karakteristika spoljašnjih graničnih površina TLM mreže, opisano jednačinom (1), daje odlične rezultate samo u slučaju kada je incidentni talas normalan na spoljašnju graničnu površinu.

Za TLM modelovanje strukture rezonatora sa opterećenjem korišćena je neuniformna mreža i hibridni simetrični kondenzovani čvor. S obzirom na prisutnu nehomogenost, dimenzija TLM čvora u dielektriku je zadata tako da je za $\sqrt{\epsilon_r}$ puta manja od dimenzije TLM čvora u vazduhu, a sve u cilju adekvatnog modelovanja dielektričnog uzorka. Izgled mreže u xy ravni za strukturu modelovanu u ovom radu je prikazan na Slici 2. Sličan izgled se dobija i za ostale preseke.

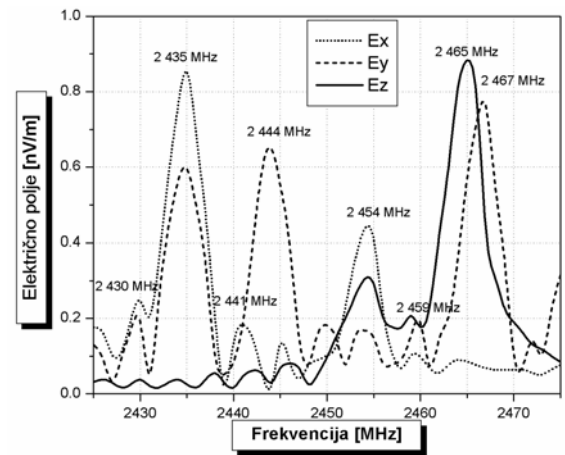


Sl.2. Neuniformna mreža rezonatora opterećenog blokom perspeksa u xy ravni

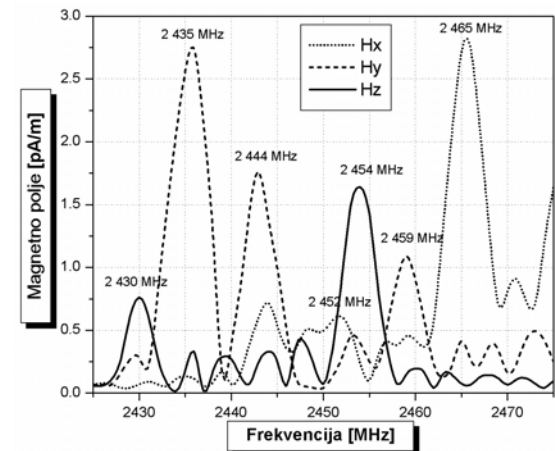
3. NUMERIČKA ANALIZA

Primenom softverskog paketa na bazi 3D TLM metoda analiziran je metalni, pravougaoni rezonator dimenzija $a = 360$ mm, $b = 350$ mm i $h = 260$ mm [3]. Zidovi rezonatora, debljine 4.5 mm, izrađeni su od aluminijuma ($\sigma = 3.54e7$ Sm). Za modelovanje unutrašnjeg prostora razmatranog rezonatora, koji je ispunjen vazduhom ($\epsilon_r = 1$), korišćena je TLM mreža dimenzija $x \times y \times z = 36 \times 35 \times 26$ čvorova.

Rezonator je najpre analiziran pomoću TLM simulatora sa impulsnom pobudom svih komponenata električnog i magnetnog polja u tački TLM mreže (15, 15, 15). Na Slikama 3 i 4 prikazane su dobijene komponente električnog i magnetnog polja u TLM čvoru (20, 20, 20), u frekventijskom opsegu $f = (2.425 \div 2.475)$ GHz. Tačka pobude i izlazna tačka izabrane su tako da se istovremeno može pobuditi i monitorisati veći broj modova.



Sl.3. Komponente električnog polja u praznom pravougaonom rezonatoru u tački (20, 20, 20)



Sl.4. Komponente magnetnog polja u praznom pravougaonom rezonatoru u tački (20, 20, 20)

U Tabeli 1 vrednosti rezonantnih frekvencija dobijene na ovaj način upoređene su sa analitičkim vrednostima rezonantnih frekvencija određenim pomoću relacije:

$$\omega_{mnp}^2 \mu_0 \epsilon_0 \epsilon = \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{m\pi}{b}\right)^2 + \left(\frac{m\pi}{h}\right)^2 \quad (2)$$

gde su m , n i p indeksi modova.

Tabela 1. Rezonantne frekvencije modova u praznom pravougaonom rezonatoru: $a=360$ mm, $b=350$ mm, $h=260$ mm

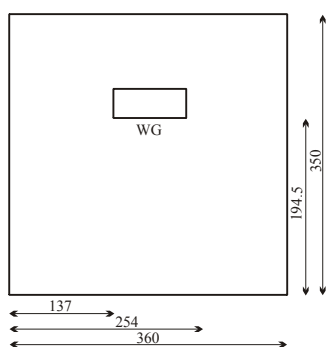
Mod		Rezonantna frekvencija (GHz)			
Indeksi moda, mnp	Tip moda	Analitička vrednost (izraz (2))	TLM simulirana vrednost		
			Impulsna pobuda	WG (Sl. 4)	WG1-4 (Sl. 6)
0 5 2	TE	2.432	2.430	-	-
0 4 3	TE	2.434	2.435	-	2.435
4 1 3	TE, TM	2.439	2.441	-	-
5 3 0	TM	2.446	2.444	-	2.445
2 0 4	TE	2.452	2.452	2.452	2.450
4 4 1	TE, TM	2.458	2.454	-	2.456
0 2 4	TE	2.460	2.459	-	2.459
1 5 2	TE, TM	2.467	2.465	-	2.464
1 4 3	TE, TM	2.468	2.467	2.467	2.468
3 5 0	TM	2.475	2.476	-	2.471

Može se zapaziti da je postignuto veoma dobro slaganje simuliranih i analitičkih rezultata.

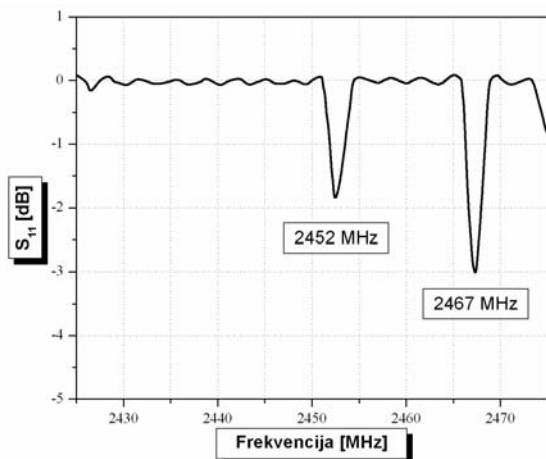
Međutim, u praksi, kada je pobuda realna, u zavisnosti od položaja i načina pobude, broj pobuđenih modova je različit od broja modova prikazanih u odgovarajućim kolonama Tabele 1. Odnosno, broj modova pobuđenih u rezonatoru je manji u odnosu na teorijski slučaj.

U cilju ispitivanja uticaja pobudnog talasovoda na rezonantne modove izvršeno je modelovanje multimodnog rezonatora sa pobudom preko TE_{10} moda talasovoda WR340, dimenzija $86 \times 43 \times 200$ mm, čiji je položaj WG prikazan na Slici 5 [3]. Talasovod je pobuđen pomoću žičane sonde, poluprečnika $r = 0.5$ mm i dužine $d = 30.5$ mm, koja je povezana sa naponskim generatorom ($V_{gen} = 1V$, $R_{gen} = 50\Omega$). Sonda je postavljena na sredini šire stranice talasovoda, na rastojanju $l = 43.5$ mm od kraja talasovoda, odnosno od kratkospojnika.

Na Slici 6 prikazana je karakteristika refleksije za ovaj slučaj, dobijena na osnovu rezultata numeričke analize. Može se uočiti da su na ovaj način dobijene samo 2 rezonantne frekvencije koje odgovaraju modovima TE_{204} i TE_{143} , odnosno TM_{143} (Tabela 1).

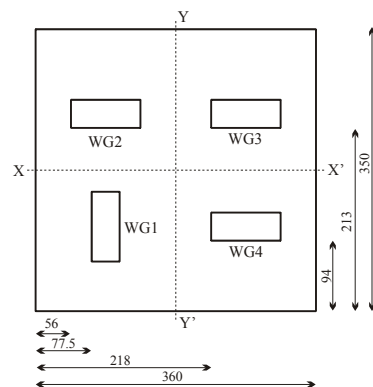


Slika 5. Prednja strana rezonatora sa prikazanim položajem pobudnog talasovoda

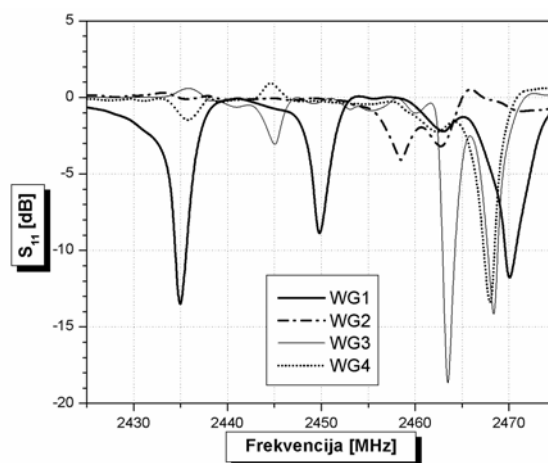


Slika 6. Karakteristika refleksije, S_{11} , praznog rezonatora pobuđenog talasovodom WG

S obzirom da se korišćenjem samo jednog pobudnog elementa pobuđuje jako mali broj modova, što praktično znači da se ne može ostvariti kvalitetno zagrevanje unutrašnjosti aplikatora, potrebno je koristiti više pobudnih elemenata. Primenom TLM metoda modelovan je rezonator pobuđen preko četiri talasovoda čiji su položaji prikazani na Slici 7 [3]. Rezultati simulacije u obliku krivih refleksije prikazani su na Slici 8, a odgovarajuće vrednosti pobuđenih rezonantnih modova takođe su date u Tabeli 1. Kao što se može zapaziti, u ovom slučaju pobuđeno je čak 11 modova, od ukupno 14 modova koji se teoretski mogu uspostaviti u razmatranom frekvencijskom opsegu.



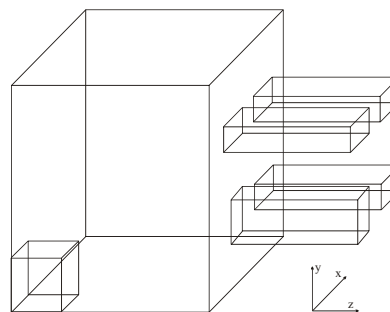
Slika 7. Prednja strana rezonatora sa prikazanim položajima četiri pobudna talasovoda



Slika 8. Karakteristike refleksije, S_{11} , praznog pravougaonog rezonatora pobuđenog preko četiri talasovoda

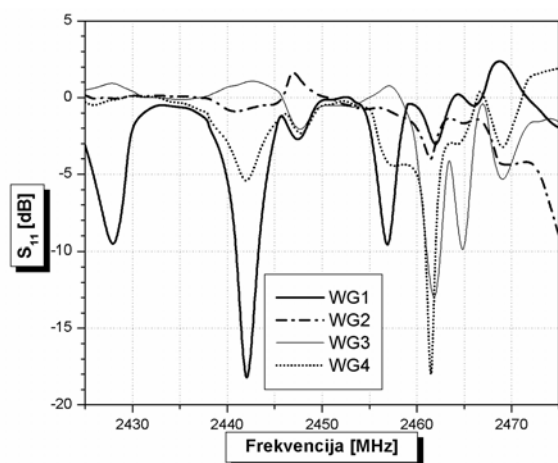
Na osnovu Slike 8 može se uočiti da vrednosti parametra S_{11} na odgovarajućim frekvencijama pobuđenih modova imaju i pozitivne vrednosti, što je posledica međusobne sprege pobudnih elemenata koji su istovremeno pobuđeni.

S obzirom da se 3D TLM metod može uspešno primeniti i za modelovanje multimodnih rezonatora u potpunosti ili delimično ispunjenih dielektrikom, u ovom radu analiziran je slučaj kada je kao opterećenje razmatranog rezonatora korišćen perspeks blok, dimenzija $79 \times 75 \times 51$ mm i dielektrične konstante $\epsilon_r = 2.6 - j0.015$. Izgled modelovane sredine u ovom slučaju prikazan je na Slici 9 [3].



Slika 9. Model rezonatora opterećenog blokom perspeksa

Kao posledica prisustva dielektrika, pobuđuju se potpuno novi rezonantni modovi, različiti od modova prisutnih u praznom rezonatoru, jer prisustvo dielektrika utiče na pomeranje rezonantnih frekvencija prema nižim vrednostima. Odgovarajući rezultati simulacije za ovaj slučaj prikazani su na Slici 9.



Sl.9. Karakteristike refleksije, S_{11} , opterećenog pravougaonog rezonatora pobuđenog preko četiri talasovoda

TLM vrednosti rezonantnih frekvencija prisutnih modova u opterećenom rezonatoru dobijenih impulsnom pobudom, kao i rezonantnih modova pobuđenih korišćenjem četiri talasovoda upoređene su sa vrednostima iz reference [3] i prikazane u Tabeli 2.

Tabela 2. Rezonantne frekvencije modova u multimodnom rezonatoru opterećenom blokom perspeksa (79x75x51) mm

Rezonantne frekvencije (GHz)-referenca [3]	TLM - rezonantne frekvencije (GHz)	
	Impulsna pobuda	Četiri talasovoda
2.429	2.429	2.428
2.434	2.434	-
2.439	2.438	-
2.441	2.441	2.441
2.442	2.442	2.442
2.451	2.450	2.448
2.456	2.455	2.456
2.460	2.461	2.461
2.462	2.465	2.465

Na osnovu prikazanih vrednosti u Tabeli 2 može se takođe ustanoviti da, u slučaju pobude rezonatora preko četiri talasovoda, neki tipovi modova koji postoje u rezonatoru bez pobudnog elementa se ne mogu pobuditi, što se može videti u Tabeli 2.

Takođe, i u slučaju metalnog rezonatora sa opterećenjem može se uočiti efekat međusobne sprege pobudnih elemenata, koja se, u praktičnim realizacijama mikrotalasnih aplikatora sa većim brojem pobuda, mora minimizirati, pre svega promenom položaja i orijentacije talasovoda.

4. ZAKLJUČAK

U ovom radu, analiziran je mikrotalasni aplikator u koji se energija iz mikrotalasnog izvora dovodi preko talasovoda. U tom cilju, 3D TLM softver je primenjen za modelovanje praznog i opterećenog pravougaonog metalnog rezonatora pobuđenog preko talasovoda. U procesu modelovanja uzeta je u obzir i debljina zidova rezonatora, kao i provodnost zidova. Za TLM modelovanje rezonatora opterećenog blokom perspeksa, smeštenog u jedan od uglova rezonatora, korišćena je neuniformna mreža i hibridni simetrični kondenzovani čvor.

Primenom TLM simulatora sa impulsnom pobudom najpre su određene vrednosti rezonantnih frekvencija modova u rezonatoru bez prisustva pobudnog elementa i bez opterećenja. Poređenjem ovih rezultata sa analitičkim vrednostima uočeno je veoma dobro slaganje.

Modelovanjem realnog aplikatora, kada se kao pobuda koriste talasovodi, pokazano je da se pobuđuje manji broj modova u odnosu na teorijski slučaj, kao i da broj pobuđenih modova zavisi od broja i položaja pobudnih elemenata.

Uočeno je da se u slučaju većeg broja pobudnih elemenata javlja i efekat njihove međusobne sprege, pa se, pri projektovanju mikrotalasnih aplikatora, pozicije pobudnih elemenata moraju birati tako da se minimizira njihov međusobni uticaj.

Prikazani rezultati u potpunosti potvrđuju primenljivost korišćenog TLM metoda za analizu raspodele rezonantnih modova u realnom mikrotalasnom aplikatoru, pri čemu je uključen i uticaj položaja pobudnog talasovoda i opterećenja.

LITERATURA

- [1] B. Milovanović, N. Dončov and J. Joković, "Real Excitation Modeling in a Loaded Cylindrical Metallic Cavity Using 3-D TLM Method," *5th IEEE TELSIKS 2001 Conference*, Niš, Serbia and Montenegro, pp. 213-216, 2001.
- [2] M. Mladenović, A. Marinčić, B. Milovanović, "Mode Tuning of Microwave Resonator Loaded with Losses Multilayer Dielectric", *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy* 24, 3: 166-177, 1989.
- [3] T.V.C.T. Chan, H. C. Reader "Understanding Microwave Heating Cavities", *Artech House*, Boston, London, 2000.
- [4] J. Joković, "Modelovanje mikrotalasnih struktura sa realnom pobudom primenom 3-D TLM metoda", *Magistarska teza*, Elektronski fakultet, Univerzitet u Nišu, 2004.
- [5] V. Trenkić, A.J. Wlodarczyk, R.A. Scaramuzza, "Modelling of Coupling Between Transient Electromagnetic Field and Complex Wire Structures", *International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields*, Vol.12, No.4, pp.257-273, 1999.
- [6] C. Christopoulos, "The Transmission-Line Modelling Method", *IEE/OUP Press*, 1995.
- [7] V. Trenkić, "The Development and Characterization of Advanced Nodes for TLM Method", *PhD Thesis*, University of Nottingham, 1995.

Abstract – A real microwave applicator with a waveguide used to launch the energy from the source into the cavity for different feed position is analyzed using 3D TLM method. TLM method is applied to the both empty and loaded rectangular metallic cavity in order to investigate of the load influences to the distribution of the resonant modes. All analysis are done in the operating frequency range of industrial microwave applicators $f = (2.425 \div 2.475)$ GHz and good agreement between simulated and analytically results is achieved.

MODELLING OF MICROWAVE APPLICATORS WITH AN EXCITATION THROUGH THE WAVEGUIDE USING TLM METHOD

Jugoslav Joković, Tijana Randelović, Mila Stojanović