

Memristivni planarni rekonfigurabilni filtri sa dva propusna opsega učestanosti

Stefan Radovanović, Milka Potrebić Ivaniš, *Member, IEEE*

Apstrakt—U ovom radu je predložen postupak za određivanje optimalne realizacije rekonfigurabilnog filtra sa dva propusna opsega učestanosti u tehnici mikrotrakastih vodova. Istovremeno treba obezbediti optimalnu selektivnost amplitudske karakteristike i što manju površinu zauzeća na štampanoj pločici. Filtrar je realizovan uz pomoć šest spregnutih rezonatora. Rekonfigurabilnost filtra je omogućena korišćenjem RF memristora. Prvi propusni opseg je od 2.4 GHz do 2.546 GHz, a drugi propusni opseg je od 5.025 GHz do 5.379 GHz, što odgovara opsezima za Wi-Fi komunikacije.

Ključne reči—Memristor; filtar propusnik opsega učestanosti; planarna tehnika; rekonfigurabilnost; spregnuti rezonatori.

I. UVOD

Memristor je jedan od četiri osnovna elementa električnih kola. Uveo ga je profesor Leon Chua [1]. Jedan od prvih memristivnih prekidača za mikrotalasne učestanosti realizovan je 2008 [2].

U [3] su prikazane potencijalne primene memristora, kao linearnog otpornika podesive otpornosti, za realizaciju različitih mikrotalasnih pasivnih kola. Memristori mogu omogućiti rekonfigurabilnost mikrotalasnih filtara [4]-[5]. U [4] memristor se koristi kao prekidač za realizaciju rekonfigurabilnog mikrotrakastog planarnog filtra sa dva propusnika opsega učestanosti. Promenom stanja memristora filtar može da ima jedan propusni opseg ili dva propusna opsega.

Modifikacijom višeslojnih filtara, sa memristivnim prekidačima i rezonatora sa više rezonantnih učestanosti [6]-[7], ostvarena je mogućnost rekonfigurabilnosti filtra sa dva propusna opsega [8]. Memristor takođe može naći primenu kod digitalnih pomerača faze [9].

Memristor ima potencijal da zameni PIN diodni prekidač, mikroelektromehanički prekidač i različite RF mikrotalasne prekidače kao što je analizirano u [10]. Memristor može naći primenu i kod mikrotalasnih antena [11].

Memristor se najčešće koristiti kao prekidač sa dva stanja: „OFF“ stanje (otvoren prekidač) i „ON“ stanje (zatvoren prekidač).

U ovom radu je prikazan novi postupak projektovanja planarnog filtra sa dva propusna opsega učestanosti, korišćenjem memristivnog prekidača. Memristivni prekidač

Stefan Radovanović – Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar Kralja Aleksandra 73, 11020 Beograd, Srbija (e-mail: stefan56789krzava@gmail.com).

Milka Potrebić Ivaniš – Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar Kralja Aleksandra 73, 11020 Beograd, Srbija (e-mail: milka_potrebic@etf.bg.ac.rs).

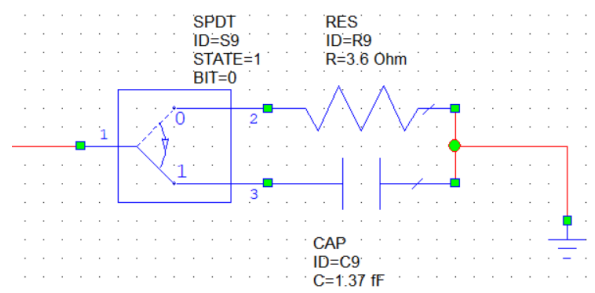
omogućava efikasnu realizaciju rekonfigurabilnosti filtra. Za realizaciju filtra korišćeni su polutalasni rezonatori modifikovani sa memristorom. U II poglavlju prikazane su osnovne osobine korišćenih rezonatora, kao i osnovne osobine memristora. Poglavlje III daje specifikaciju filtra sa memristorom. Dobijeni rezultati primenom predloženog postupka projektovanja prikazani su u poglavlju IV. Izvedeni zaključci dati su u podglavlju V.

II. REKONFIGURABILNI FILTAR

Rezonatori predstavljaju osnovni gradivni element filtra propusnika i nepropusnika opsega učestanosti. Za mikrotalasne učestanosti, postoji više realizacija rezonatora [12]-[13].

Rezonatori se međusobno sprežu, a sprega može biti električna, magnetna ili mešovita. Za spregnute rezonatore određuje se koeficijent sprege, na osnovu amplitudske karakteristike, što je dato u [12]. Primenjen je postupak projektovanja filtra poznat kao Dišalov metod [14] koji omogućava realizaciju filtra propusnika ili nepropusnika opsega učestanosti poznavanjem tri osnovna parametra: centralne učestanosti filtra, koeficijenata sprege rezonatora i Q-faktora opterećenih rezonatora (priključenih na generator odnosno potrošač). Ovaj postupak podrazumeva korišćenje simulacionih ili eksperimentalnih krivih na osnovu kojih se nalaze dimenzije filtra bez obzira na izabranu tehnologiju.

Na osnovu rezultata prikazanih u radu [15] i doktorskih disertacija [16] i [17], memristivni prekidač se za RF i mikrotalasni signal može ekvivalentno predstaviti za OFF stanje pomoću linearnog kondenzatora kapacitivnosti $C_{OFF} = 1.37 \text{ fF}$, a za ON stanje pomoću linearnog otpornika otpornosti $R_{ON} = 3.6 \Omega$ (videti sliku 1).



Sl. 1. RF memristor modelovan sa linearnim otpornikom i kondenzatorom.

RF memristoru nije potrebno jednosmerno napajanje pri radnom režimu što ga razlikuje od drugih mikrotalasnih

komponenti kao što su: PIN diodni prekidači, MEMS prekidači i drugi različiti RF i mikrotalasni prekidači. Pored toga, memristori imaju malu potrošnju, malo slabljenje u ON stanju i zadovoljavajuću izolaciju u OFF stanju.

U ovom radu, ispitana je potencijalna mogućnost primene memristora kao prekidača za projektovanje rekonfigurabilnog mikrotalasnog filtra sa dva propusna opsega učestanosti. Najbitnije karakteristike koje omogućuje realizacija filtra sa memristorima su smanjenje veličine i snage komponente.

Treba voditi računa o mestu gde se memristor vezuje na rezonator, jer treba odabrati poziciju tako da memristor ne unosi parazitne efekte u odziv filtra. Kada je memristivni prekidač otvoren, filter ima dva propusna opsega učestanosti, u slučaju da je memristivni prekidač zatvoren, filter ima jedan propusni opseg učestanosti, što je i bio cilj uvođenja memristora u postupak projektovanja filtra.

III. SPECIFIKACIJA REKONFIGURABILNOG FILTRA SA DVA PROPUSNA OPSEGA

Prvi korak pri projektovanju mikrotalasnog filtra je zadavanje specifikacije. Specifikacija koju treba da zadovolji projektovani filter zadata je u više tačaka.

- 1) Filter treba da ima dva propusna opsega, pri čemu je svaki pojedinačni filter četvrtog reda sa dve realne nule.
- 2) Centralna učestanost prvog propusnog opsega je: $f_1 = 2.477$ GHz, dok je centralna učestanost drugog propusnog opsega: $f_2 = 5.193$ GHz.
- 3) Maksimalno dozvoljeno slabljenje na centralnoj učestanosti prvog propusnog opsega je 2 dB, a maksimalno dozvoljeno slabljenje na centralnoj učestanosti drugog propusnog opsega je 1.5 dB.
- 4) Najveće dozvoljeno neprilagođene u propusnom opsegu je: -10 dB.
- 5) Jednake su nominalne impedanse pristupa po $Z_0 = 50 \Omega$.
- 6) Supstrat za realizaciju filtra ima sledeće karakteristike: relativna permitivnost $\epsilon_r = 3$, debljina $h = 0.508$ mm, debljina bakarne folije $t = 17 \mu\text{m}$ i $\text{tg}\delta = 0.0021$.
- 7) Kao prekidač se primenjuje RF memristor koji se ekvivalentno predstavlja pomoću linearnog otpornika i linearnog kondenzatora.

Projektovanje započinje izborom aproksimacije. Koristi se modifikovana Čebiševljeva aproksimacija sa nulama u transfer funkciji. Zatim je neophodno odrediti nulu prenosne funkcije prototipa filtra, koja se dobija na osnovu jednačine iz [12]

$$\Omega = \frac{1}{FBW} \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right), \quad (1)$$

i u našem slučaju iznosi $\Omega = 2.4$. Parametri Čebiševljeve aproksimacije su $g_1 = 0.94777$, $g_2 = 1.34408$, $J_1 = -0.10642$ i $J_2 = 1.00086$. Na osnovu navedenih parametara može se odrediti Q-faktor opterećenog rezonatora i koeficijenti sprege između rezonatora koristeći formule iz [12]

$$Q = \frac{g_1}{FBW}, \quad (2)$$

$$K_{i,i+1} = K_{n-i,n-i+1} = \frac{FBW}{\sqrt{g_i g_{i+1}}}, \quad (3)$$

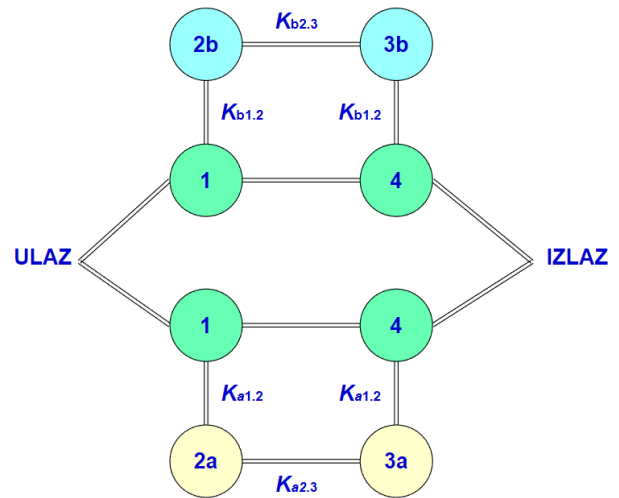
$$K_{m,m+1} = \frac{FBW \cdot J_m}{g_m}, \quad (4)$$

$$K_{m-1,m+2} = \frac{FBW \cdot J_{m-1}}{g_{m-1}}. \quad (5)$$

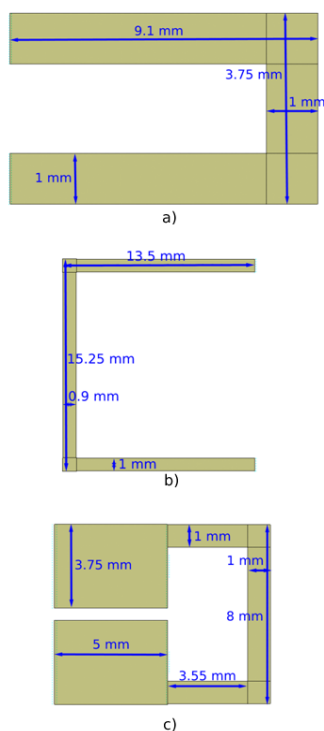
Dobijaju se sledeći parametri: $Q = 18.954$, $K_{1,2} = K_{3,4} = 0.044$, $K_{2,3} = 0.037$ i $K_{1,4} = -0.005615$.

U cilju bolje ilustracije filtra, na slici 2 je prikazan graf filtra sa označenim spregama između rezonatora. Za realizaciju filtra izabrani su polutalasni rezonatori označeni sa 2a, 2b i modifikovani polutalasni rezonator označen sa 1. Osnovna rezonantna učestanost rezonatora 2a iznosi $f_{0,2a} = 2.726$ GHz, a naredna rezonantna učestanost je $f_{1,2a} = 6.845$ GHz. Kod rezonatora 2b osnovna rezonantna učestanost je $f_{0,2b} = 5.212$ GHz, a naredna rezonantna učestanost je $f_{1,2b} = 9.741$ GHz. Osnovna rezonantna učestanost modifikovanog polutalasnog rezonatora 1 iznosi $f_{0,1} = 2.424$ GHz, dok je naredna rezonantna učestanost $f_{1,1} = 4.96$ GHz. Rezonatori 3a, 3b i 4 su istih dimenzija i oblika kao rezonatori 2a, 2b i 1, respektivno, samo su simetrično postavljani jedan u odnosu na drugi.

Sledeći korak pri projektovanju predstavlja određivanje dimenzija rezonatora i procepa između njih.



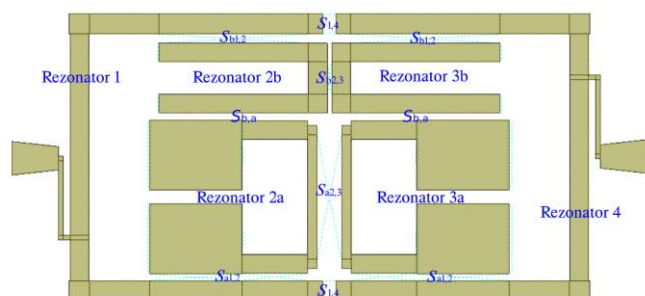
Sl. 2. Graf filtra sa označenim spregama između rezonatora.



Sl. 3. Izgled tri rezonatora, sa dimenzijama, koji se koriste za realizaciju filtra sa dva propusna opsega: a) Rezonator 2b, b) Rezonator 1 i c) Rezonator 2a.

IV. REZULTATI SIMULACIJE REKONFIGURABILNOG FILTRA

Prvo je potrebno odrediti fizičke dimenzije rezonatora da bi se ostvarile centralne učestanosti filtra, odnosno rezonantne učestanosti. Dimenzije su određene korišćenjem softverskog alata za analizu mikrotalasnih kola Cadence AWR Microwave Office [18].



Sl. 4. Šema štampane pločice filtra sa dva propusna opsega učestanosti sa označenim širinama procepa između rezonatora.

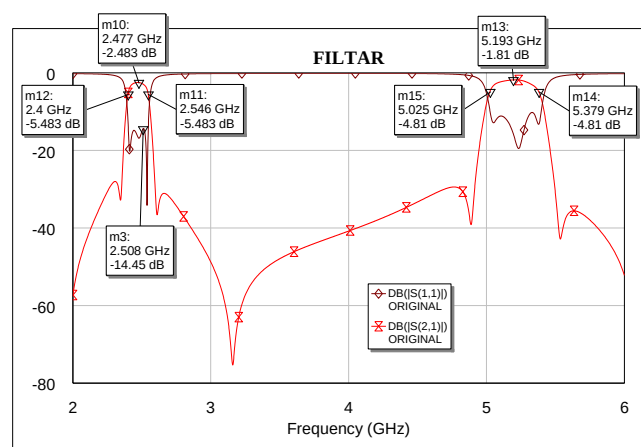
Fizičke dimenzije sva tri rezonatora, prikazane su na slici 3. Raspored rezonatora filtra na štampanoj pločici prikazan je na slici 4 i označena su odstojanja između rezonatora. Filter je realizovan u mikrotrakastoj tehnici.

Zatim je potrebno odrediti širine procepa između rezonatora (pogledati sliku 4). Prvo se određuje širina procepa $S_{1,4}$, pa zatim procepi $S_{a,2}$, $S_{a,3}$, $S_{b,2}$, $S_{b,3}$ i $S_{b,a}$. Procep S_{ij} se određuje na osnovu koeficijenta sprege K_{ij} . Pri analizi se podešava vrednost širine procepa S_{ij} između para spregnutih rezonatora sa ciljem da se ostvari vrednost koeficijenta sprege K_{ij} . Koeficijent K_{ij} se određuje na osnovu jednačine iz [12], a funkcija je parametra rastojanja S_{ij} . U tabeli I su date vrednosti širina procepa za potrebne sprege filtra.

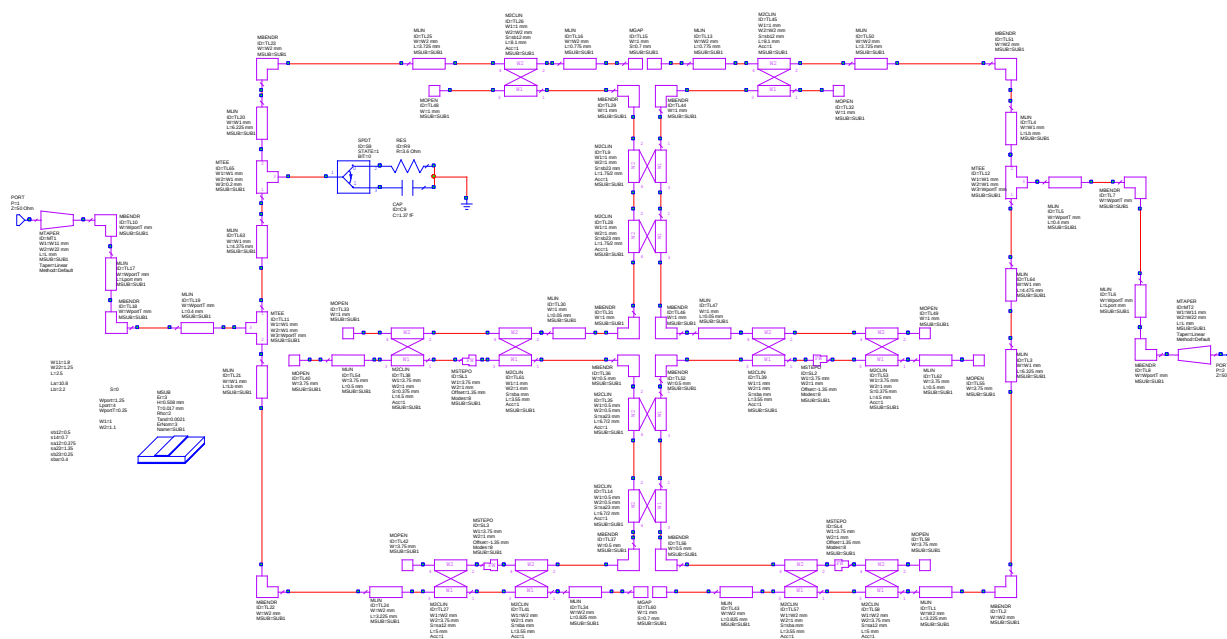
TABELA I
ŠIRINE PROCEPA ZA ODGOVARAJUĆE KOEFICIJENTE SPREGE

i,j	$K_{i,j}$	$S_{i,j}$ [mm]
1,4	-0.005615	0.7
a1,2	0.044	0.55
a2,3	0.037	1.3
b1,2	0.044	0.9
b,a	-0.629241	0.4

Da bi odredili odziv celog filtra, prikazan na slici 5, neophodno je da rasporedimo svaki od šest rezonatora na štampanoj pločici uzimajući u obzir rastojanja između rezonatora i položaje uvodnika u odnosu na prvi i četvrti rezonator (pogledati sliku 4).



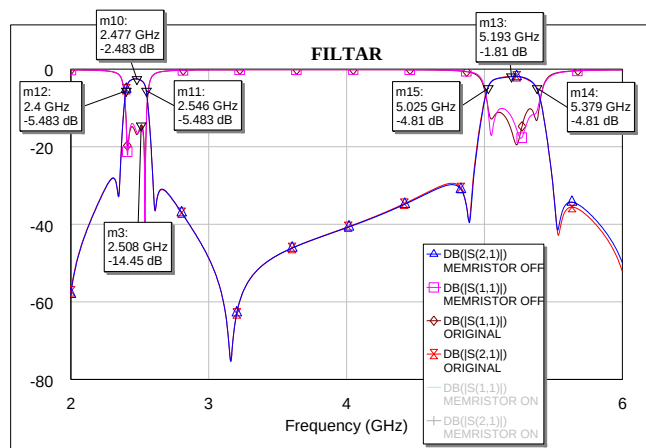
Sl. 5. Odziv filtra sa dva propusna opsega čije su centralne učestanosti 2.477 GHz i 5.193 GHz. „ORIGINAL“ označava filter bez memristora.



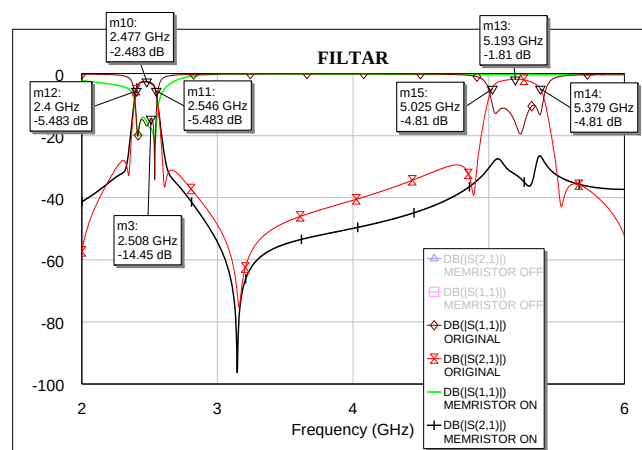
Sl. 6. Šema filtra sa dva propusna opsega koji je modifikovan memristivnim prekidačem.

Modifikacijom predloženog filtra korišćenjem memristora, kao mikrotalasnog prekidača, moguće je realizovati rekonfigurabilnost filtra. Na slici 6 je prikazana šema filtra sa memristorom. Kad je memristor u OFF stanju filter ima dva propusna opsega (slika 7), dok u slučaju da je memristor u ON stanju filter ima samo niži propusni opseg (slika 8).

Kad je memristor u OFF stanju, odziv filtra ima dva propusna opsega i to prvi od 2.4-2.546 GHz, a drugi od 5.025-5.379 GHz (slika 7).



Sl. 7. Odziv filtra sa dva propusna opsega čije su centralne učestanosti 2.477 GHz i 5.193 GHz. „ORIGINAL“ predstavlja filter bez memristora. „MEMRISTOR OFF“ predstavlja filter sa memristorom u OFF stanju.



Sl. 8. Odziv filtra sa dva propusna opsega čije su centralne učestanosti 2.477 GHz i 5.193 GHz. „ORIGINAL“ predstavlja filter bez memristora. „MEMRISTOR ON“ predstavlja filter sa memristorom u ON stanju.

Na slici 9 je dat finalni izgled štampane pločice filtra sa memristorom čije su dimenzije 34.3 mm×15.45 mm.

V. ZAKLJUČAK

Kod savremenih telekomunikacionih sistema, koji rade na mikrotalasnim učestanostima, postoji potreba za filterima sa užim propusnim opsezima, njihovom većom kompaktnošću, što većom selektivnošću i mogućnošću rekonfigurabilnosti.

U radu je predložena nova realizacija rekonfigurabilnog filtra sa dva propusna opsega u mikrotalasnoj tehnici. Kao prekidački element korišćen je RF memristor.

Ispitivana su nezavisna podešavanja propusnih opsega filtra, tako što su ispitivana optimalna rastojanja između

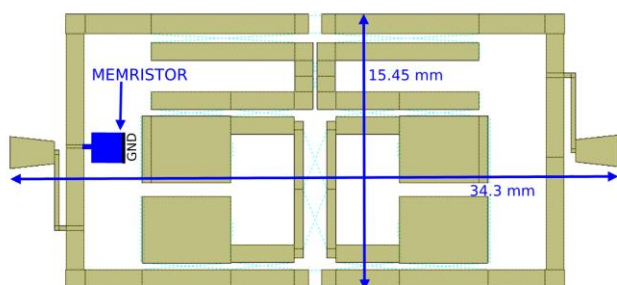
rezonatora za različite propusne opsege. Cilj je bio ostvariti nezavisno podešavanje svakog pojedinačnog propusnog opsega filtra, uz pomoć različitih parametara rezonatora.

Na osnovu dobijenih rezultata uočava se da su zadovoljeni svi zahtevi specifikacije filtra.

Ostvareno je zadovoljavajuće poklapanje karakteristika filtera u slučaju da je filter modifikovan memristorom u OFF stanju u odnosu na originalni filter bez memristora.

Uočava se zadovoljavajuće poklapanje karakteristika filtera za niži propusni opseg u slučaju da je filter modifikovan sa memristorom u ON stanju u odnosu na originalni filter bez memristora. Viši propusni opseg je potisnut za više od 30 dB u slučaju da je memristor u ON stanju.

Jedan od budućih pravaca istraživanja bila bi minijaturizacija filtra u cilju manjeg zauzeća na štampanoj pločici. Drugi pravac istraživanja odnosio bi se na višeslojnu realizaciju rekonfigurabilnog filtra sa dva propusna opsega. Treći pravac istraživanja bi mogao da predstavlja realizaciju podesivih filtera sa više propusnih ili nepropusnih opsega.



Sl. 9. Izgled štampane pločice rekonfigurabilnog filtra sa dva propusna opsega i memristorom.

LITERATURA

- [1] Chua LO. "Everything you wish to know about memristors but are afraid to ask". *Radioengineering* 2015; 24(2):319–368.
- [2] Strukov DB, Snider GS, Stewart DR, Williams RS. "The missing memristor found". *Nature* 2008; 453(7191):80–83.
- [3] Potrebic M, Tošić D. "Application of memristors in microwave passive circuits". *Radioengineering* 2015; 24(2):408–419.
- [4] M. Potrebic, D. Tošić, D. Biolek, "RF/microwave applications of memristors", In: Vaidyanathan S, Volos C, editors. *Advances in Memristors, Memristive Devices and Systems*, Cham, Switzerland: Springer; pp. 159–185, chapter 7, 2017.
- [5] M. Potrebic, D. Tošić, "Potential applications of memristors in microwave circuits", In *Proceedings of the 13th International Conference on Applied Electromagnetics (PIEC)*, Niš, Serbia; I2 1-4. ISBN: 978-86-6125-185-6 (invited lecture), 2017.
- [6] A. Plazinić, M. Potrebic, D. Tošić, "Compact microwave multilayer dual-band bandpass filter with folded dual-mode resonators", *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, vol. 19, no. 5-6, pp. 352–358, May–June, 2017.
- [7] A. Plazinić, M. Potrebic, D. Tošić, M. Plazinić, "Compact microwave triple - mode bandpass filter in planar technology", *Serbian Journal of Electrical Engineering*, vol.14, no.2, pp. 217–228, June 2017.
- [8] M. Potrebic, D. Tošić, A. Plazinić, "Reconfigurable multilayer dual-mode bandpass filter based on memristive switch", *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, vol. 97, pp. 290–298, December 2018.
- [9] I. Marković, M. Potrebic, D. Tošić, "Main-line memristor mounted type loaded-line phase shifter realization", *Microelectron Eng*; pp. 185–186: 48–54, 2018.
- [10] Gregory MD, Werner DH. "Application of the memristor in reconfigurable electromagnetic devices". *IEEE Antennas and Propagation Magazine* 2015; 57(1):239–248.
- [11] Xu KD, Zhang YH, Wang L, Yuan MQ, Fan Y, Joines WT, Liu QH. "Two memristor SPICE models and their applications in microwave devices". *IEEE Transactions on Nanotechnology* 2014; 13(3):607–616
- [12] Hong J-S. "Microstrip Filters for RF/Microwave Applications" (2nd edn). John Wiley & Sons: Hoboken, 2011.
- [13] M. M. Potrebic, D. V. Tošić, "Projektovanje mikrotalasnih filtera", *Akademski misao*, Beograd, 2019.
- [14] M. Dishal, "Alignment and adjustment of synchronously tuned multipleresonant-circuit filters", *Proceedings of the IRE*, vol. 39, no. 11, pp. 1448–1455, 1951.
- [15] S. Pi, M. Ghadiri-Sadrabadi, J. C. Bardin, Q. Xia, "Nanoscale memristive radiofrequency switches", *Nat Commun* vol. 6, pp. 1-9, 2015.
- [16] A. Plazinić, "Mikrotalasni planarni filteri realizovani pomoću rezonatora sa više rezonantnih učestanosti", *Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet tehničkih nauka u Čačku*, Čačak, 2019.
- [17] I. Lj. Marković, "Primjena memristora u realizaciji mikrotalasnih pasivnih kola", *Univerzitet u beogradu, Elektrotehnički fakultet u Beogradu*, Beograd, 2021.
- [18] Cadence AWR Microwave Office, <https://www.awr.com/awr-software/products/microwave-office>.

ABSTRACT

In this paper, a procedure for determining the optimal implementation of a reconfigurable filter, with two passbands in the microstrip technique, is proposed. At the same time, it is necessary to ensure optimal selectivity of the amplitude characteristic and the smallest possible footprint on the printed circuit board. The filter was realized with six coupled resonators. RF memristor enables filter reconfigurability. The first bandwidth is from 2.4 GHz to 2.546 GHz, and the second bandwidth is from 5.025 GHz to 5.379 GHz, which corresponds to the passbands for Wi-Fi communications.

Memristive planar reconfigurable filters with two passbands

Stefan Radovanović, Milka Potrebic Ivaniš