

# Uticaj neželjenih sprega na karakteristike meandriranog Čebiševljevog transformatora impedanse

Milomir Petrović, *Elektrotehnički fakultet, Beograd*, [petrovicmilomir@gmail.com](mailto:petrovicmilomir@gmail.com)

**Sadržaj** – U ovom radu analiziran je uticaj neželjenih sprega na karakteristike meandriranog Čebiševljevog transformatora impedanse, realizovanog u tehnici mikrotrakastih vodova. Provereno je kako relativno rastojanje između paralelnih sekcija transformatora utiče na frekvencijsku karakteristiku. U radu su izloženi rezultati dobijeni simulacijom u programskim alatima MWO i WIPL-D, kao i rezultati merenja.

**Gljučne reči** – Čebiševljev transformator impedanse, neželjene sprege.

## I. UVOD

Ako se potrošač kompleksne impedanse  $Z$  priključi na generator unutrašnje kompleksne impedanse  $Z_g$  aktivna (srednja) snaga potrošača biće maksimalna ako je  $Z = Z_g^*$ . Ovo je uslov prilagođenja po snazi. Da bi se ovo ostvarilo, između generatora i potrošača treba priključiti mrežu sa dva pristupa koja obezbeđuje prilagođenje po snazi. Za prilagođenje kompleksne impedanse može se primeniti četvrttalasni transformator impedanse, ali kompleksna impedansa mora se prethodno transformisati u čisto rezistivnu (dodavanjem ogranaka ili koncentrisanih reaktansi) [1].

Četvrttalasni vod karakteristične impedanse  $Z_c$  transformiše impedansu potrošača,  $Z$ , u ulaznu impedansu voda  $Z_{ul} = Z_c^2/Z$  koja najčešće treba da bude jednaka nominalnoj impedansi sistema,  $Z_0$ . Ova transformacija se najčešće primenjuje kada je potrebno uskopojasno prilagoditi dve impedanse koje se ne menjaju sa učestanošću. Tipičan primer je prelaz između dva voda različitih karakterističnih impedansi. Primenom dve ili više četvrttalasnih sekcija voda, za transformaciju čisto rezistivne impedanse, može se dobiti širokopojasno prilagođenje. Karakteristične impedanse vodova treba da se menjaju postepeno. Izborom karakterističnih impedansi sekcija mogu se ostvariti različite frekvencijske karakteristike transformatora. U ovom radu biće prikazana realizacija transformatora čija je frekvencijska karakteristika sa ravnomernim talasanjem (equal-ripple, Čebiševljev transformator<sup>1</sup>). Posebno će, simulacijama na računaru i eksperimentalno, biti ispitan uticaj minijaturizacije na karakteristike ovog transformatora.

## II. SPECIFIKACIJA

Postupak projektovanja transformatora impedanse počinje specifikacijom, koja određuje šta Čebiševljev transformator impedanse treba da ispunjava i, često, na koji način ga treba realizovati.

Za potrebe ovog rada zahtevano je da se projektuje Čebiševljev transformator impedanse u tehnici mikrotrakastih vodova, kao mreža sa jednim pristupom. Transformator treba da čisto rezistivnu impedansu  $Z_p = 120 \Omega$  transformiše na  $Z_0 = 50 \Omega$  sa maksimalnim VSWR (Voltage Standing Wave Ratio) od  $\sigma_{max} = 1.2$ , u frekvencijskom opsegu od  $f_1 = 0.3$  GHz do  $f_2 = 2.2$  GHz (centralna učestanost je  $f_0 = 1.25$  GHz).

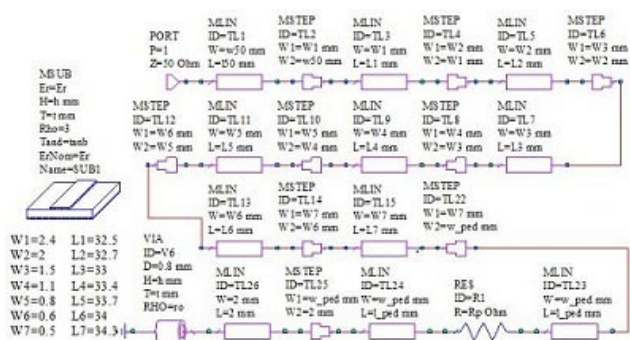
Na raspolaganju je podloga FR-4, debljine  $h = 1.55$  mm, relativne permitivnosti  $\epsilon_r = 4.6$ , debljine metalizacije  $t = 36 \mu\text{m}$ . Tanges ugla gubitaka je  $\tan \delta = 0.02$ . Usled hrapavosti, za MWO parametar uzeto je  $Rho = 3$ , usled efekta hrapavosti, za specifičnu provodnost bakarne metalizacije uzeto je  $\sigma = 15$  MS/m.

## III. SIMULACIONI MODEL TRANSFORMATORA U PROGRAMSKOM ALATU MWO

Na osnovu uslova zadatih specifikacijom (maksimalna vrednost VSWR, vrednosti ulazne i izlazne impedanse, opsega učestanosti) pomoću Excell kalkulatora, korišćenjem standardnih formula [1], određen je red transformatora kao i vrednosti impedansi sekcija transformatora. Korišćenjem mikrotalasnog kalkulatora TXline, integrisanog u softverski alat MWO (Microwave Office) [2], izračunate su potrebne dužine i širine sekcija mikrotrakastih vodova. Dužine sekcija jednake su četvrtini talasne dužine na centralnoj učestanosti, a širine sekcija odgovaraju vrednostima karakterističnih impedansi dobijenih pomoću Excell kalkulatora.

Za proračunate dimenzije sekcija transformatora, realizovan je standardni (nemeandrirani) Čebiševljev transformator impedanse u programskom alatu MWO, (sl. 1).

<sup>1</sup> Detaljna analiza i potrebna izvođenja mogu se naći u standardnoj literaturi, npr. u referenci [1]



Sl. 1. Nemeandrirani Čebiševljev transformator modelovan u programskom alatu MWO.

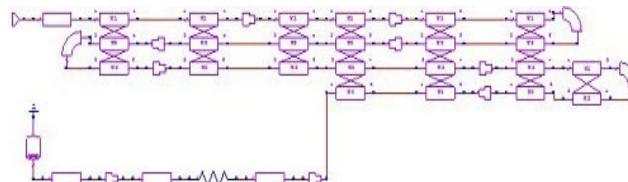
Kako model sa sl. 1 nije zadovoljavao uslove pooštrene specifikacije, (VSWR manje od 1.17 u opsegu učestanosti od 0.28 GHz do 2.22 GHz), pristupilo se optimizaciji. Uslovi su pooštreni kako bi bilo sigurnije da će fizički prototip da zadovolji uslove specifikacije. Pri optimizaciji optimizovane su samo dužine sekcija. Širine vodova definišu karakteristične impedanse mikrotrakastih vodova, pa iz tog razloga nisu optimizovane. Kao optimizacioni metod korišćen je *Simplex Optimizer*. Nakon optimizacije dobijene su sledeće dužine sekcija:  $L_1 = 29,5$  mm,  $L_2 = 33,3$  mm,  $L_3 = 32,5$  mm,  $L_4 = 32,8$  mm,  $L_5 = 35$  mm,  $L_6 = 34,5$  mm,  $L_7 = 29$  mm.

Element označen sa "MSUB" odnosi se na tehniku izrade, mikrotrakasti vod. Vrednosti njegovih parametara odgovaraju specifikaciji supstrata i metalizacije. Element sa nazivom "PORT" predstavlja standardni 50-omski pristup. "MLIN" elementi predstavljaju mikrotrakaste vodove odgovarajućih karakterističnih impedansi, koje su definisane širinom tih mikrotrakastih vodova. Širina označena sa  $w_{50}$  odgovara širini 50-omskog voda, u ovom slučaju  $w_{50} = 2.8$  mm. Dužina  $l_{50}$  predstavlja dužinu 50-omskog uvodnika, koja je proizvoljno izabrana, dužine 25 mm. Da bi rezultati simulacije bili što pouzdaniji modelovani su pad-ovi SMD komponenti kao vodovi dužine  $l_{ped} = 2$  mm i širine  $w_{ped} = 1.4$  mm. Diskontinuiteti su modelovani elementima "MSTEP", prelaz sa jedne širine mikrotrakastog voda na drugu širinu. U tehnologiji štampanih mikrotalasnih kola neophodne su električne veze koje izlaze van ravni metalizacije. Na primer, za paralelno povezivanje elemenata ili ostvarivanje kratkog spoja mikrotrakastog voda potrebno je načiniti električni kontakt između metalizacije i provodne ravni (kroz supstrat ili oko njega). U ovom slučaju najčešće se koriste takozvane "vije". Vija je u ovom modelu simulirana elementom označenima sa "VIA". Parametri vije su prečnik,  $D = 0.8$  mm, debljina supstrata ( $h$ ) i debljina metalizacije ( $t$ ). Potrošač karakteristične impedanse  $Z_p = 120 \Omega$  modelovan je sa elementom "RES", čija vrednost parametra  $R_p$  odgovara vrednosti impedanse  $Z_p$ .

Kako bi se ispitaio uticaj meandriranja na karakteristike transformatora, odlučeno je da se naprave prototipi meandriranog Čebiševljevog transformatora impedanse, kod kojih će minimalno rastojanje između paralelnih

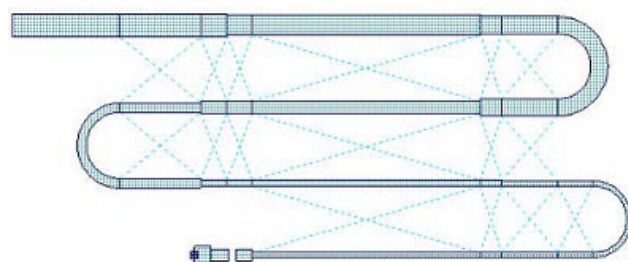
mikrotrakstih vodova biti: 3h, 5h, 10h i 19h, kao i da se napravi nemeandrirani model transformatora.

U cilju realizacije prototipa, pristupljeno je modelovanju u programskom alatu MWO. Zbog kompleksnosti komponente parne sekcije imaju zavijutke. Izgled meandriranog modela u programskom alatu MWO prikazan je na sl. 2.



Sl. 2. Meandriran Čebiševljev transformator impedanse modelovan u programskom alatu MWO.

Da bi se u obzir uzeo ključni efekat kod meandriranja, a to je sprega između paralelnih sekcija voda, primenjen je model spregnutih višeprovodničkih mikrotrakastih vodova duž svih međusobno paralelnih naspramnih sekcija. Spregnuti mikrotrakasti vodovi se u MWO modeluju elementom "MxCLIN", gde  $x$  predstavlja broj spregnutih vodova. Za modelovanje zavijutaka korišćen je element "MCURVE". Kako element "MxCLIN" može imati samo jednu dužinu, u cilju što tačnije simulacije mikrotrakasti vodovi su podeljeni na manje dužine, kako bi svi paralelni vodovi u modelu bili modelovani kao spregnuti. Navedeni model ilustrovan je na sl. 3.



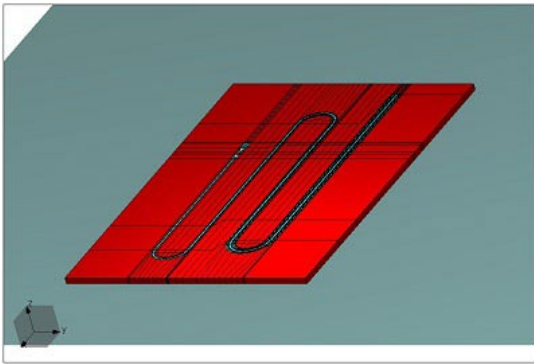
Sl. 3. Meandrirani Čebiševljev transformator impedanse sa podeljenim spregnutim vodovima.

Parametri elemenata "MxCLIN" i MCURVE, proračunati su u zavisnosti od promenljive koja definiše rastojanje između paralelnih sekcija transformatora.

#### IV. SIMULACIONI MODEL TRANSFORMATORA U PROGRAMSKOM ALATU WIPL-D

Još jedan od zadatak ovog rada jeste da se, za odabrane prototipe, naprave simulacioni modeli u programskom alatu WIPL-D [3]. WIPL-D model je 3D elektromagnetski model strukture. Služeći se rezultatima, dimenzijama, dobijenim prilikom realizacije Čebiševljevog transformatora impedanse u MWO-u, napravljeni su simulacioni modeli u programskom alatu WIPL-D. Tom prilikom od pomoći su bili i layout-i simulacionih modela projektovanih u MWO-u.

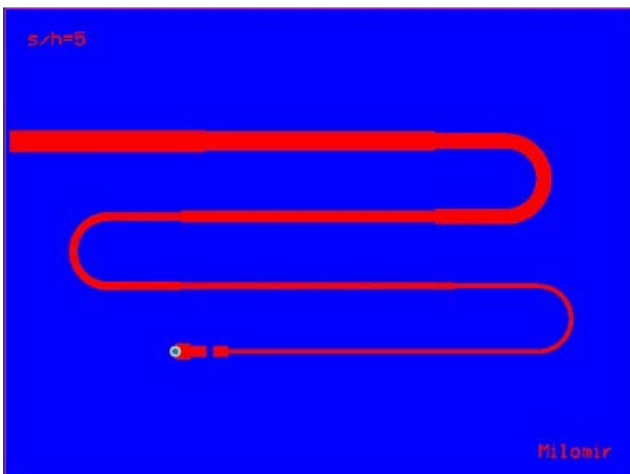
Na narednoj slici (sl. 4) prikazan je jedan od pet realizovanih modela Čebiševljevog transformatora impedanse u programskom alatu WIPL-D.



Sl. 4. Meandrirani Čebiševljev transformator impedanse modelovan u programskom alatu WIPL-D, rastojanje između paralelnih vodova je 5 visina supstrata.

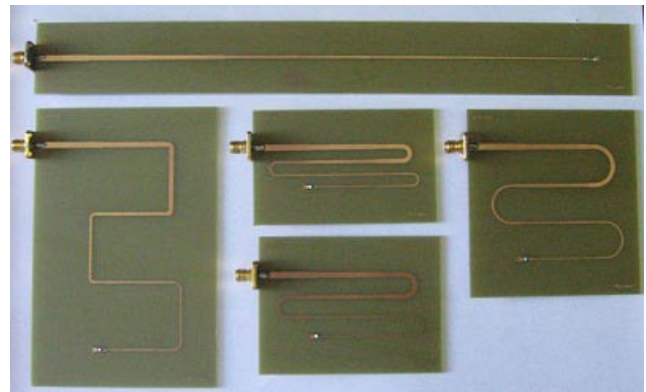
#### V. IZRADA LABORATORIJSKIH PROTOTIPA

Pomoću programskog alata Altium Designer Summer\_09 [4] izvršeno je projektovanje štampanih pločica, u formatu koji je pogodan za rad na mašini. Dimenzije layout-a realizovanih modela u programskom alatu MWO pažljivo su prenete u Altium. Oko štampanog kola uvedena je zaštitna zona, kako bi se izbegao uticaj ivičnih efekata. U tom cilju za rastojanje od ivice pločice do paralelnih vodova uzeto je rastojanje od 10 visina supstrata. Izgled jedne od pločica u Altium-u prikazan je na sl. 5.



Sl. 5. Layout meandriranog Čebiševljevog transformatora impedanse u programskom alatu Altium, rastojanje između paralelnih vodova je 5 visina supstrata.

Na osnovu layout-a dizajniranih u programskom alatu Altium, izrađeni su laboratorijski prototipi Čebiševljevog transformatora impedanse. Uvođenje zaštitne zone oko štampanog kola za posledicu ima povećanje površine koju zauzimaju štampane pločice. Najmanja površina pločice je za model kod kojeg je rastojanje između paralelnih sekcija 3 visine supstrata, 41,6 cm<sup>2</sup>. Model kod kojeg je rastojanje između paralelnih sekcija 19 visina supstrata zauzima najveću površinu, 104,5 cm<sup>2</sup>. Površina pločice nemeandriranog transformatora je 92,8 cm<sup>2</sup>. Izgled prototipa Čebiševljevog transformatora impedanse dat je na sl. 6.



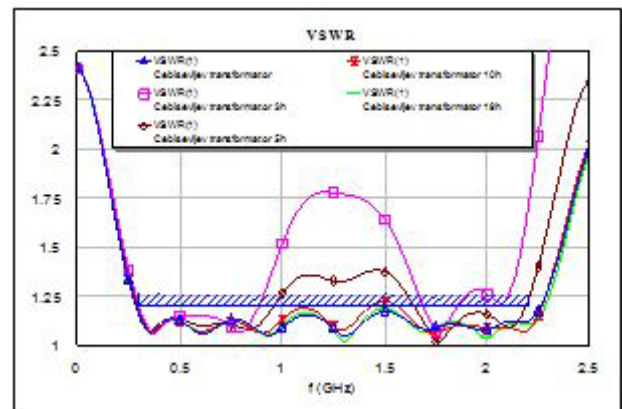
Sl. 6. Realizovani prototipi Čebiševljevog transformatora impedanse.

#### VI. MERENJE I REZULTATI

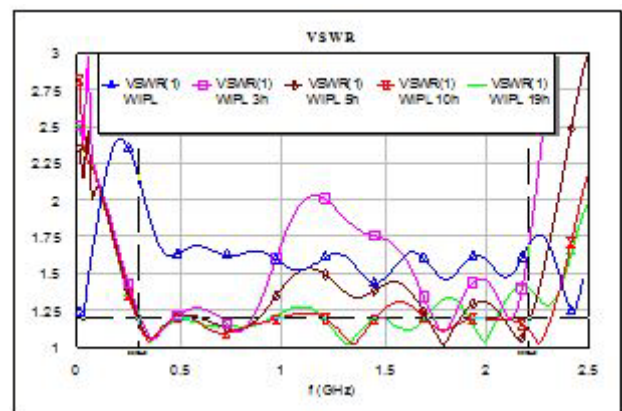
Merenje je izvršeno korišćenjem analizatora mreža Agilent E5062A čiji je radni opseg od 300 kHz do 3 GHz.

U nastavku rada biće prikazani rezultati dobijeni simulacijama u programima MWO i WIPL-D i rezultati dobijeni merenjem na analizatoru mreža.

Poređenje, rezultata simulacija u istom programskom alatu i rezultata dobijenih merenjem prototipa, prikazano je na slikama sl. 7 – sl. 9.



Sl. 7. Rezultati simulacija modela Čebiševljevog transformatora impedanse dobijenih u programskom alatu MWO.

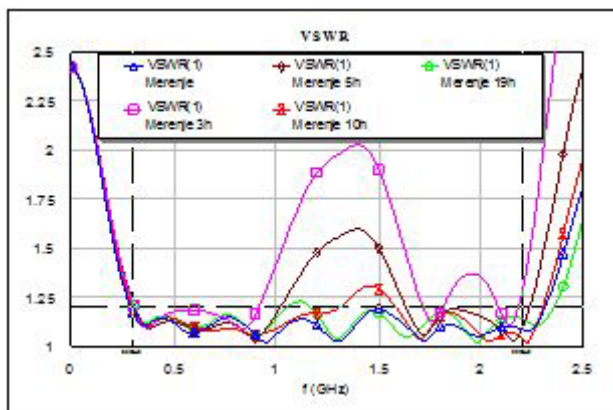


Sl. 8. Rezultati simulacija modela Čebiševljevog transformatora impedanse dobijenih u programskom alatu WIPL-D.

Rezultati simulacije, za nemeandrirani model Čebiševljevog transformatora impedanse, u programu

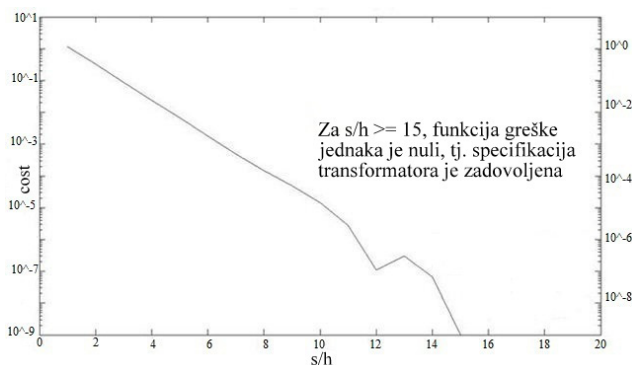


WIPL-D odstupaju od očekivanih rezultata iz razloga što se model transformatora impedanse sastoji od ploče čiji je odnos dužine i širine vrlo veliki. Taj odnos je oko 1:300 i to umanjuje tačnost u WIPL-u. Precizniji model zahteva podelu izduženih ploča na približno kvadratne delove.



Sl. 9. Rezultati merenja prototipa Čebiševljevog transformatora impedanse.

Kako bismo sagledali uticaj neželjenih sprega na karakteristike meandriranog Čebiševljevog transformatora impedanse i na ilustrovan način prikazali smanjenje neželjenog uticaja sprega na specifikacije transformatora, napravljen je grafik koji prikazuje zavisnost funkcije greške<sup>2</sup> od relativnog rastojanja između paralelnih mikrotrakastih vodova (sl. 10). To je urađeno na osnovu modela Čebiševljevog transformatora impedanse u programskom alatu MWO. Funkcija greške ima utoliko veću vrednost ukoliko karakteristike komponente više odstupaju od specifikacije (prema izabranom optimizacionom kriterijumu), a ima vrednost jednaku nuli kada model zadovoljava uslove specifikacije, što je u našem slučaju  $VSWR < 1.2$  u opsegu učestanosti od 0.3 GHz do 2.2 GHz.



Sl. 10. Zavisnost funkcije greške od relativnog rastojanja između meandriranih sekcija.

## VII. ZAKLJUČAK

Rezultati prikazani u radu dobijeni su na tri načina, simulacijom u programskom alatu MWO koji je baziran na modelu električnih kola, simulacijom u programskom alatu WIPL-D koji je baziran na strogoj 3D elektromagnetskoj analizi, i eksperimentalno, merenjem laboratorijskih prototipova. Dobijeno je odlično slaganje između tri grupe rezultata.

Na osnovu svega prikazanog mogu se doneti sledeći zaključci:

1. Sprega između paralelnih sekcija meandriranog Čebiševljevog transformatora impedanse je dominantan i praktično jedini uzrok narušavanja frekvencijskih karakteristika, u odnosu na slučaj kada transformator nije meandriran.
2. Odstupanje frekvencijske karakteristike u odnosu na specifikaciju, kvantifikovano odabranom ciljnom funkcijom, eksponencijalno opada sa povećanjem rastojanja između paralelnih sekcija.
3. Uticaj neželjenih sprega na posmatrani transformator postaje zanemarljiv za rastojanja veća od 15 debljina supstrata.

Mogući pravci daljeg proučavanja ove problematike mogu biti usmereni ka optimizaciji oblika sekcija transformatora, u cilju minimizacije neželjenih sprega. U tom smislu bilo bi zanimljivo proučiti i realizaciju u tehnici višeslojnih štampanih vodova.

## LITERATURA

- [1] Vladimir V. Petrović, Dejan V. Tošić, Antonije R. Đorđević, *Mikrotalasna pasivna kola*, CD izdanje, "Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu", Beograd 2010.  
<http://mtt.etf.rs>
- [2] MWO – Microwave Office, Applied Wave Research, El Segundo, CA, USA.  
<http://web.awrcorp.com>
- [3] WIPL-D Pro v7.1, "Software and User's Manual", WIPL-D d.o.o., Belgrade, 2008.  
<http://www.wipl-d.com>
- [4] Altium Designer Summer 09, Build 9.0.0.17654.  
<http://www.altium.com>

## ABSTRACT

In this paper, influence of the unwanted coupling on characteristics of the Chebyshev impedance transformer realized in microstrip technique is analyzed. It was checked how the relative distance between parallel sections of the transformer influences its frequency characteristics. In the paper, results obtained by simulation in software tools MWO and WIPL-D, as well as experimental results are presented.

## INFLUENCE OF UNWANTED COUPLING ON CHARACTERISTICS OF THE CHEBYSHEV IMPEDANCE TRANSFORMER

Milomir Petrović

<sup>2</sup>  $Cost = Weight * |Meas - Goal|^L$