

Замјенске шеме спрегнутих микроталасних квази-концентрисаних резонатора

Дејан М. Миљановић

m.tel

Добој, Босна и Херцеговина

dejan.miljanovic@mtel.ba

Милка М. Потребих и Дејан В. Тошић

Универзитет у Београду - Електротехнички факултет

Београд, Србија

milka_potrebic@etf.rs, tosic@etf.rs

Садржај— У раду је приказана замјенска електрична шема спрегнутих квази-концентрисаних резонатора реализованих у микротракастој техници. Замјенска шема је сачињена од концентрисаних елемената (отпорника, кондензатора, калемова и линеарних индуктивних трансформатора) константних вриједности. Примјеном дијакоптичког приступа сви елементи квази-концентрисаног резонатора и међурезонаторске спреге су идентификоване и моделоване одговарајућим замјенским шемама. Тачност приказаног моделовања, помоћу замјенских шема, верификована је поређењем са резултатима тродимензионалне (3D) електромагнетске (ЕМ) анализе спрегнутих резонатора.

Кључне ријечи—вишеслојни резонатор; ЕМ спрега; замјенска шема; филтар пропусник опсега учестаности.

I. УВОД

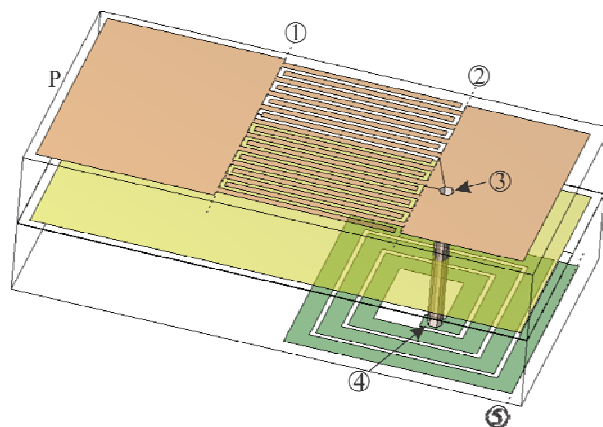
Поступак пројектовања микроталасног филтра чини неколико корака од којих је један од временски најзахтјевнијих 3D ЕМ симулација модела филтра. Резултати добијени модерним софтверским алатима за 3D ЕМ симулације [1]-[3] дају резултате врло блиске резултатима добијеним реалним мјерењима фабрикованог филтра. Међутим, вријеме потребно за тачну анализу модела значајно расте са комплексношћу структуре која се анализира. Такође, утицај појединих елемената на резултате одзива цијелог филтра се испитује промјеном одговарајућих параметара елемента и понављањем 3D ЕМ анализе цијеле структуре.

Коришћењем замјенских модела [4], [5] за елементе и цијелу структуру микроталасног филтра могуће је постићи велике уштеде у времену потребном за пројектовање филтра. Брзина анализе ових замјенских кола су неупоредиво веће у односу на 3D ЕМ анализу. Оптимално моделована замјенска шема нам даје лакши и бржи увид у природу понашања елемената и цијелог филтра. Могућност селективног испитивања утицаја одговарајућих елемената на коначне резултате је такође предности кориштења замјенских шема. Замјенске шеме се користе прије 3D ЕМ моделовања филтра како би се испитале карактеристике планиране реализације филтра, утицај појединих параметара и елемената на понашање цијелог филтра и израчунале почетне димензије елемената. У литератури се замјенске шеме најчешће користе за грубу процјену утицаја појединих елемената структуре на особине цијелог система. При томе се врше апроксимације и поједностављивање са циљем идентификације основних

параметара који утичу на резонантне фреквенције, нуле преноса и слично. У овом раду биће показана употребљивост замјенских шема за описивање природе понашања спрегнутих квази-концентрисаних резонатора. Као пример ће се користити реализација филтра пропусника опсега учестаности у вишеслојној техници са капацитивно спрегнутим уводником [6].

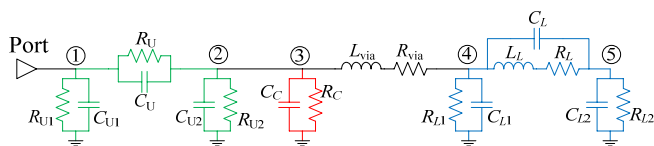
II. ЗАМЈЕНСКА ШЕМА РЕЗОНАТОРА И УВОДНИКА

На сл. 1 приказан је тродимензионални електромагнетски (3D ЕМ) модел резонатора са капацитивним уводником, док је на сл. 2 дата одговарајућа замјенска шема овог модела. Вриједности елемената се могу израчунати кориштењем аналитичких израза или екстракцијом параметара користећи 3D ЕМ симулацију за поједине елементе [7]-[9]. За једноставније структуре оба начина дају приближно исте резултате. Код сложенијих елемената (нпр. спирални калем) тачније процене параметара, укључујући паразитне ефекте, ипак даје 3D ЕМ симулација. У истраживању су коришћена оба начина прорачуна вриједности елемената.



Слика 1. 3D ЕМ модел резонатора са уводником.

Резонатор се састоји од кондензатора и калема спојених вијом. На кондензатор је интердигитално (капацитивно) спрегнут уводник карактеристичне импедансе од 50Ω ($W_{50\Omega} = 4.9 \text{ mm}$). Кориштени супстрат је RT/duroid 5880 (дебљине $h_L = h_C = h = 1.575 \text{ mm}$, $\epsilon_r = 2.2$, $\text{tg}\delta = 0.001$, $h = 1.575 \text{ mm}$, метализација дебљине $t = 18 \mu\text{m}$).



Слика 2. Замјенска шема 3D ЕМ модела резонатора са уводником са сл. 1.

Ширина вода спиралног калема је 0.4 mm , а растојање између проводника спирале је 0.1 mm . Демаркационе тачке су означена од 1 до 5. Капацитивна интердигитална спрега између тачака 1 и 2 моделује се замјенском π -шемом са реалним кондензаторима у паралелним (C_{U1} , R_{U1} , C_{U2} , R_{U2}) и серијској грани (C_U , R_U). Кондензатор који је реализован као одсјечак микротракастог вода моделован је кондензатором са губицима (C_C , R_C) између тачке 3 и масе, а вија је моделована калемом са губицима (L_{via} , R_{via}) између пресека 3 и 4. Спирални калем моделован је замјенском π -шемом између пресека 4 и 5. Кондензатори са губицима у паралелним гранама (C_{L1} , R_{L1} , C_{L2} , R_{L2}) описују капацитивност калема према маси. Индуктивност калема са губицима представљена је серијском граном (L_L , R_L), док кондензатор у серијској грани (C_L) описује одговарајућу капацитивност између навојака калема. За карактеристике коришћеног супстрата вриједности ових елемената су: $R_{U1} = 2.26 \text{ M}\Omega$, $C_{U1} = 0.19 \text{ pF}$, $R_{U2} = 2.3 \text{ M}\Omega$, $C_{U2} = 0.13 \text{ pF}$, $R_U = 64 \text{ k}\Omega$, $C_U = 1.1 \text{ pF}$, $R_C = 0.66 \text{ M}\Omega$, $C_C = 0.31 \text{ pF}$, $R_{via} = 0.22 \Omega$, $L_{via} = 1.7 \text{ nH}$, $R_{L1} = 0.19 \text{ M}\Omega$, $C_{L1} = 0.2 \text{ pF}$, $R_{L2} = 0.14 \text{ M}\Omega$, $C_{L2} = 0.272 \text{ pF}$, $R_L = 0.61 \Omega$, $L_L = 27 \text{ nH}$, $C_L = 0.09 \text{ pF}$. Прорачун ових вриједности је рађен за учестаност од 1.6 GHz што представља задату централну учестаност филтра. На тај начин се постиже најбоља апроксимација управо у том опсегу учестаности. Параметери реалних елемената су фреквенцијски зависни, нарочито калем, али се за прву апроксимацију усвајају фреквенцијски независне вриједности.

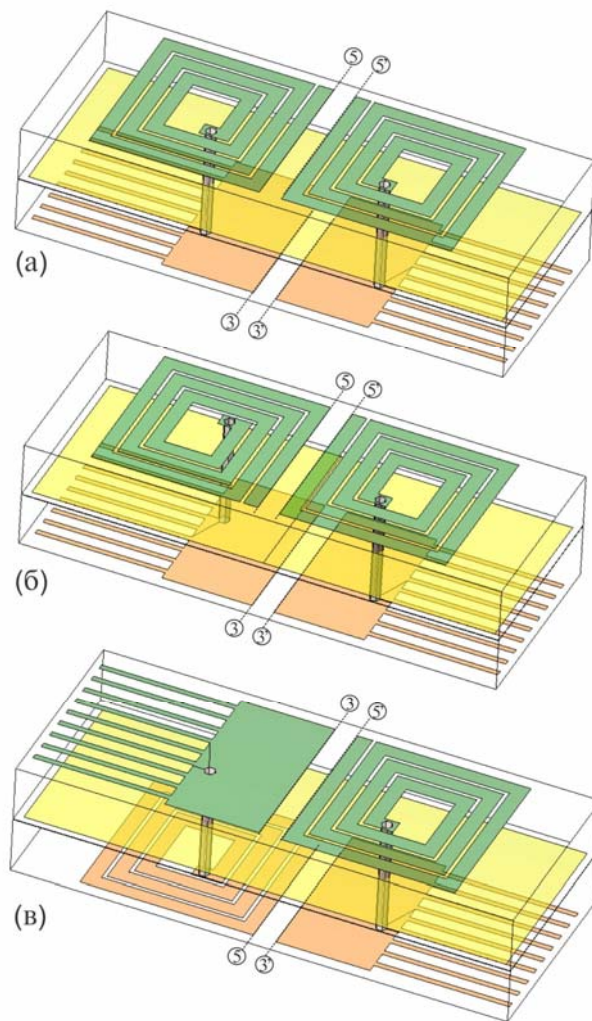
III. ЗАМЈЕНСКА ШЕМА ДВА СПРЕГНУТА РЕЗОНАТОРА

Приликом спрезања два резонатора могуће је извршити спрезање два сусједна калема на истој страни супстрата, док су кондензатори спрегнути на супротној страни. Могуће је калемове поставити тако да буду симетрично или асиметрично међусобно орјентисани. Наведене двије варијанте су приказане на сл. 3а и сл. 3б. Могуће је и мјешовито спрегнути резонаторе тако да калем једног резонатора буде у спрези са кондензатором другог на истој страни структуре. Ова варијанта је приказана на сл. 3ц.

У првом случају (сл. 3а и сл. 3б) између кондензатора два резонатора постоји капацитивна спрега која се моделује серијском капацитивношћу између тачака 3 и 3' (C_{CC}), гдје су са апострофом означене тачке демаркације на другом резонатору. Између калемова постоје и капацитивна и индуктивна спрега.

Капацитивна спрега постоји јер спољни дио калема није уземљен тако да је на том дијелу калема постоји

велика концентрација наелектрисања. Капацитивна спрега између калемова се моделује серијском капацитивношћу између тачака 7 и 7' (C_{LL}). Индуктивна спрега је последица међусобног утицаја струја калемова. Због неуземљеног краја калема ове струје се примарно налазе у унутрашњем дијелу калема. Индуктивна спрега између калемова се моделује линеарним индуктивним трансформатором: сопствене индуктивности укључујући губитке (L_{L1} , R_{L1} , L_{L2} , R_{L2}) и коефицијент спреге k . Коефицијент спреге тј. међусобна индуктивност може бити позитивна или негативна у зависности од међусобне орјентације калемова. Позитивна спрега је за случај асиметричне спреге (сл. 3б), а негативна за случај симетричне спреге (сл. 3а).

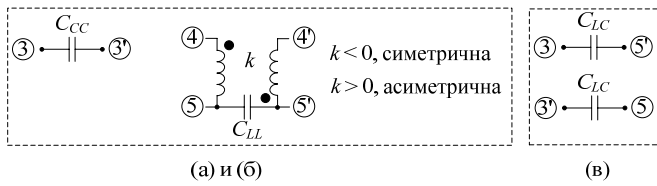


Слика 3. Спрега два резонатора: (а) симетрична, (б) асиметрична и (ц) мјешовита.

У последњем случају (сл. 3ц) између кондензатора једног и калема другог резонатора постоји капацитивна спрега (C_{CL}) која се моделује серијском капацитивношћу између пресека 3 и 5' и између 3' и 5. Индуктивна спрега се може занемарити.

Замјенске шеме спреге између два резонатора за ова

три случаја су приказана на сл. 4 а вриједности елемената замјенске шеме су: $C_{CC} = 0.055 \text{ pF}$, $C_{CL} = 0.05 \text{ pF}$, $C_{LL} = 0.036 \text{ pF}$, $k = \pm 0.03$.



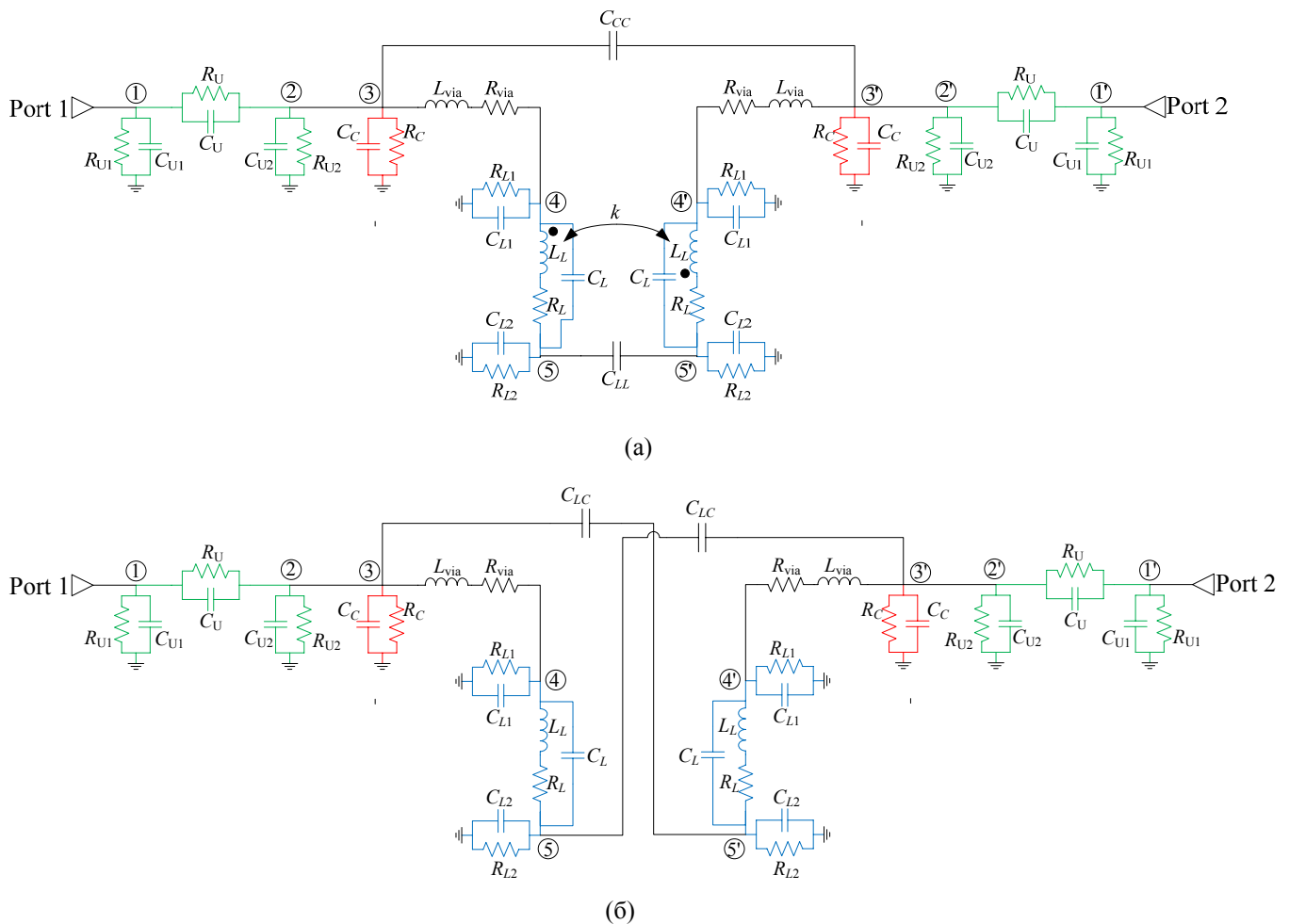
Слика 4. Замјенска шема спреге два резонатора: (а) симетрична/асиметрична спрега, (б) мјешовита спрега.

IV. ЗАМЈЕНСКЕ ШЕМЕ ФИЛТАРА ДРУГОГ РЕДА

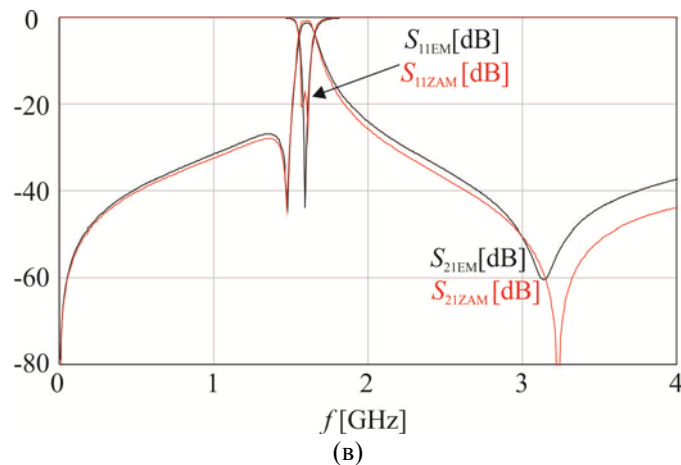
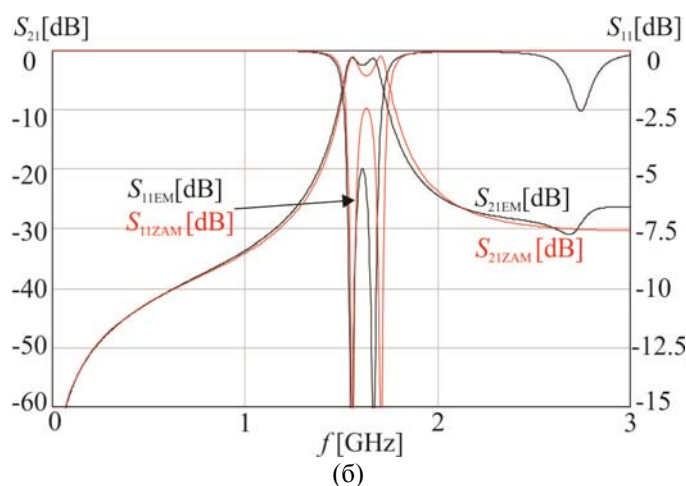
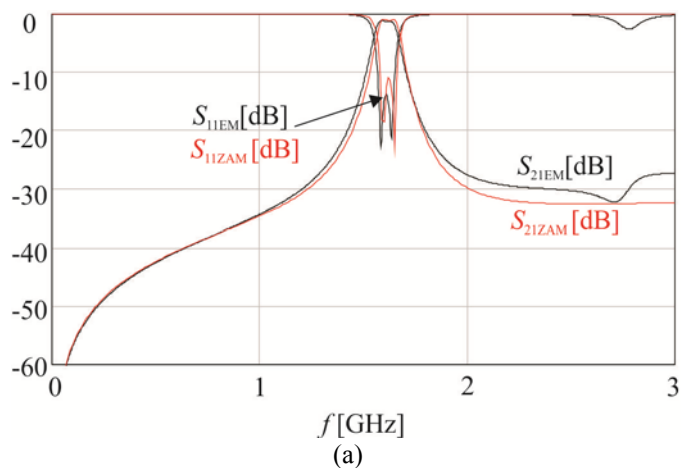
Усвајајући замјенске шеме за појединачне елементе и

за спрегу два резонатора може се формирати замјенска шема цијелог филтра другог реда. За три могуће међусобне оријентације резонатора, замјенске шеме су приказане на сл. 5. Шема са сл. 5а описује два случаја спрега и то симетричну и асиметричну (сл. 3а и сл. 3б). С обзиром на оријентацију мотања калемова, коефицијент спреге два калема је позитиван у случају асиметричне оријентације калемова, а негативан код симетричне оријентације калемова. Шема са сл. 5б описује случај мјешовите спреге два резонатора (сл. 3в).

Параметри расејања S_{11} и S_{21} добијени из замјенских шема су поређени са резултатима добијеним 3D ЕМ анализом одговарајућих модела. На сл. 6 су приказани резултати за сва три случаја.



Слика 5. Замјенска шема филтра другог реда: (а) симетрична/асиметрична спрега, (б) мјешовита спрега.



Слика 6. S -параметри добијени 3D ЕМ симулацијом (црна линија) и симулацијом предложених замјенских шема (црвена линија) за: (а) симетричну, (б) асиметричну и (в) мјешовиту спрегу.

Резултати показују велику подударност добијених функција мреже. Ту се на првом мјесту мисли на цјелокупну природу понашања филтра. Облик амплитудске карактеристике и постојање нула преноса у потпуности је описано постојањем одговарајућих електричних и магнетских спрега између резонатора замјенских шема. Ширине пропусних опсега које су

одређене међусобном удаљеношћу резонатора односно промјеном C_{CC} , C_{LC} , C_{LL} и κ су практично исте. При анализи асиметричне спреге извршена је промјена само јачине магнетске спреге док су параметри уводника и резонатора остали исти као код симетричне. Постојање већих магнетских спрега између калемова и њихов утицај на ширину пропусног опсега за асиметричну ($\kappa > 0$) спрегу је такође евидентан на основу амплитудске карактеристике (сл. 6(б)).

V. ЗАКЉУЧАК

У раду је приказан начин формирања замјенске шеме спрегнутих квази-концентрисаних резонатора. Делови квази-концентрисаног резонатора су моделовани фреквенцијски независним замјенским елементима са концентрисаним параметрима. Вриједности елемената су добијене екстракцијом користећи 3D ЕМ симулације у опсегу учестаности од интереса и користећи аналитичке изразе објављене у литератури. Карактеристике међу-резонаторске спреге су такође моделоване замјенском шемом која укључује електричне и магнетске спреге. У циљу што једноставнијег моделовања, вриједности елемената су изабране да буду фреквенцијски независни што није случај у реалности.

Добијени резултати показују да замјенска шема на задовољавајући начин описује карактеристике уводника, резонатора и међу-резонаторске спреге. Коришћење замјенске шеме убрзава процес анализе и синтезе филтра и процјену утицаја свих елемената филтра на преносне и улазне карактеристике. Тако је могуће користити замјенску шему за брзо пројектовање филтра жељених спецификација. Након тога, добијене елементе замјенске шеме треба представити одговарајућим квази-концентрисаним елементима. На крају се врши верификација модела филтра временски захтјевнијим 3D ЕМ симулацијама и евентуалном оптимизацијом.

ЗАХВАЛНИЦА

Овај рад је делимично финансиран од Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије у оквиру пројекта TR 32005.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] WIPL-D Pro 9.1, <http://www.wipl-d.com>, 3D Electromagnetic Solver, WIPL-D d.o.o., 2011.
- [2] IE3D full-wave EM simulation, optimization, and synthesis package, Zeland Software, Inc., Fremont, CA, 2007.
- [3] Ђ. Мирковић, Д. Миљановић, М. Потребих, Д. В. Тошић, „Моделовање микроталасног филтра са квази-концентрисаним резонаторима у софтверу WIPL-D Зборник 56. конф. ЕТРАН, МТ-2-6, стр. 1-4, Златибор, Србија, 11–14 јун, 2012.
- [4] В. В. Петровић, Д. В. Тошић, А. Р. Ђорђевић, Микроталасна пасивна кола, Београд, 2010.
- [5] J.-S. Hong, Microstrip Filters for RF/Microwave Applications, New York: John Wiley & Sons, 2nd ed. 2011.
- [6] Д. Миљановић, М. Потребих, Д. В. Тошић, „Микроталасни филтар реализован у вишеслојној техници са капацитивно спрегнутим уводником“, Зборник 12. симп. ИНФОТЕХ, КСТ-3-3, стр. 434-438, Јахорина, БиХ, 20–22 март, 2013.
- [7] I. Bahl, Lumped Elements for RF and Microwave Circuits, Boston, London, Artech House, 2003.

- [8] B. M. Kolundžija and A. R. Đorđević, „Electromagnetic Modeling of Composite Metallic and Dielectric Structures,“ Norwood, MA, Artech House, 2002.
- [9] W. Tang, X. He, T. Pan, „Synthetic Asymptote Formulas of Equivalent Circuit Components of Square Spiral Inductors,“ Journal of Electromagnetic Waves and Applications, vol. 20, no. 2, p. 215-226, 2006.

ABSTRACT

In this paper, we propose an equivalent circuit of coupled microstrip resonators using quasi-lumped elements. The equivalent circuit consists of frequency-invariant lumped-

elements (resistors, capacitors, coils and linear inductive transformers) with constant parameter values. Using diakoptic approach, all components of the quasi-lumped resonator and inter-resonator coupling are identified and modeled with equivalent circuits. The proposed circuit model is validated by 3D EM simulation of the coupled resonators.

CIRCUIT MODEL OF COUPLED QUASI-LUMPED MICROWAVE RESONATORS

Dejan M. Miljanović, Milka M. Potrebić, Dejan V. Tošić