

RF-DC konvertor zasnovan na prikupljanju energije elektromagnetskog polja

Radivoje Đurić, Mihajlo Božović, Milan Ponjavić

Odsek za elektroniku
Elektrotehnički fakultet

Beograd, Srbija

rade@el.etf.rs, mihajlo.m.bozovic@gmail.com, milan@el.etf.rs,

Sadržaj— U radu je opisan RF-DC konvertor koji se sastoji iz *Dual-Band* antene projektovane za 900 MHz GSM i 2,45 GHz ISM opseg učestanosti, prilagođenja i diodno-kapacitivnog umnožavača napona. Pokazano je projektovanje pojedinih modula konvertora i određivanje optimalne otpornosti potrošača kojem se predaje maksimalna korisna snaga. Konvertor je projektovan modularano, tako da se lako može prilagoditi za RF-DC konverziju u bilo kom uskopojasnom ili širokopojasnom opsegu učestanosti RF signala.

Ključne reči - RF-DC; RF energy harvesting; Dual-Band antena; prilagođenje; umnožavač napona;

I. UVOD

Senzorske mreže su danas nezaobilazne u prikupljanju i obradi podataka za različite namene. Prema izvoru za napajanje, svaki čvor senzorske mreže može biti aktivan, polu-pasivan i pasivan. Aktivni čvorovi uvek imaju izvore za napajanje, pasivni su bez posebnih izvora, dok su polu-pasivni čvorovi senzorskih mreža sa baterijom, ili sa velikom kapacitivnošću za skladištenje energije. Pri aktiviranju polu-pasivnih senzorskih čvorova je potrebno prvo dopuniti bateriju, ako je prazna, a potom se obavlja transfer primopredajnih podataka. Pametne bežične senzorske mreže se ugrađuju u mostove, zgrade, automobile, pa i u živi svet. Svaki čvor ovakve mreže zahteva autonomno napajanje, a zbog otežanog pristupa i nemogućnosti zamene, u ovakvim sensorima se baterije retko koriste. Dakle, moraju se koristiti pasivni senzori.

Kada ima dosta svetlosnog fluksa, solarna energija je pouzdan i najčešće korišćeni alternativni izvor za napajanje senzora sa malom potrošnjom. Međutim, u uslovima slabog osvetljenja, ovakvi senzori su neekonomični i nepraktični. Termoelektrični generatori zahtevaju značajnu temperaturnu razliku za generisanje električne energije, dok je za generatore zasnovane na energiji vibracija potrebna značajna kinetička energija.

Elektromagnetsko zračenje je uvek prisutno, bilo da potiče od udaljenih, ili bliskih izvora elektromagnetskog polja. Energija bliskog elektromagnetskog zračenja se najčešće, pomoću induktivne, ili kapacitivne, sprege izvora i senzora, može koristiti za napajanje pasivnih, ili polu-pasivnih, bežičnih senzorskih čvorova. Sa druge strane, napajanje senzora pomoću udaljenih izvora elektromagnetskog zračenja

zahteva antenu, koja selektivno i usmereno pretvara energiju elektromagnetskog polja u energiju za napajanje. Snaga koja se može predati senzoru u velikoj meri zavisi od relativnog položaja senzorskog čvora i izvora zračenja. Bežično napajanje autonomnih uređaja pomoću energije elektromagnetskog polja, RF zračenja, se obično izvodi na dva načina. Prvi je bežični transfer energije na daljinu pomoću predajnika i ovakav način je karakterističan za RFID sisteme. Drugi način je korišćenje RF energije ambijenta, od primopredajnika javne mobilne telefonije i drugih bežičnih sistema za prenos informacija. Ideja vodilja ovog rada je da se istovremeno koriste i energija RF zračenja okoline i energije predajnih uređaja u ISM (Industrial, Scientific and Medical) opsegu na 2.45 GHz, kao što su WLAN (Wireless Local Area Network), WPAN (Wireless Personal Area Network) mreže i predajnici senzorskih mreža. Emitovana snaga predajnika je u oba slučaja ograničena standardima koji regulišu nivo dozvoljenog električnog polja u prostoru oko predajnika. Kod polu-pasivnih senzorskih čvorova prvo je potrebno uskladištiti energiju u bateriju, ili kondenzator, a potom obaviti primopredaju podataka. Kada je senzorski čvor pasivan, potrebno je istovremeno predavati snagu i obavljati primopredaju podataka.

II. SISTEM ZA PRIKUPLJANJE ENERGIJE ELEKTROMAGNETSKOG ZRAČENJA

Prema Friisovoj jednačini [1] gustina snage koju predajna antena emituje u okolni prostor, u kome nema drugih predajnika i prepreka, je

$$P_{rad} = G_t \frac{P_t}{4\pi r^2} \left[\text{W/m}^2 \right] \quad (1)$$

gde su:

P_t - snaga koju predajna antena predaje okolnom prostoru

G_t - dobitak predajne antene

r - rastojanje između prijemne i predajne antene

Snaga koja se predaje prijemnoj anteni je

$$P_{ant} = A_{eff} P_{rad}, \quad (2)$$

gde je A_{eff} efektivna površina prijemne antene,

$$A_{eff} = G_r \frac{\lambda^2}{4\pi}, \quad (3)$$

gde su

G_r - dobitak prijemne antene

λ - talasna dužina emitovanog elektromagnetskog talasa.

Kada je prijemna antena prilagođena na kolo kome se predaje energija, raspoloživa snaga na njegovom ulazu je

$$P_{av} = \frac{P_{ant}}{2} = G_r \frac{\lambda^2}{8\pi} P_{rad}. \quad (4)$$

Dobici predajne i prijemne antene $G_{t,r} = G_{t,r}(\theta, \phi)$ su u funkciji uglova θ i ϕ , odnosno uglova u horizontalnoj i vertikalnoj ravni u odnosu na pravu koja spaja prijemnu i predajnu antenu. Dakle, snaga koja se predaje prijemnoj anteni, odnosno sistemu za napajanje uređaja zavisi od rastojanja i orijentacije predajne i prijemne antene.

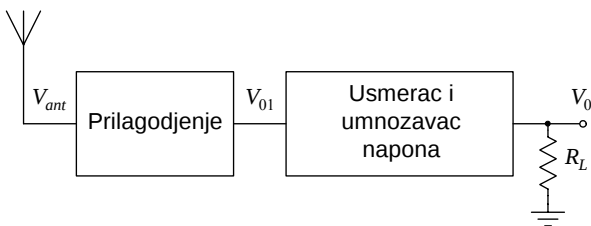
Prethodne relacije striktno važe u slobodnom prostoru gde postoje samo jedna prijemna i jedna predajna antena. U realnim situacijama postoje prepreke i objekti u prostoru oko antena, koji unose dodatna slabljenja, ali i refleksije RF signala. Umesto jednog signala na prijemnoj anteni se pojavljuje više fazno pomerenih signala. Zbog toga se gustina snage RF zračenja menja po zakonu

$$P_{rad} = G_t \frac{P_t}{4\pi r^n} \left[\text{W/m}^2 \right], \quad n \geq 2. \quad (5)$$

U urbanim okruženjima energija elektromagnetskih talasa znatno brže opada sa rastojanjem u odnosu na slobodni prostor [2], obično je $3 \leq n \leq 5$.

S obzirom na talasnu dužinu emitovanog signala, mnogo je manje slabljenje, odnosno veća gustina RF snage na prijemnoj anteni u 900 MHz GSM opsegu, nego u drugom 1,8 GHz GSM opsegu javne mobilne telefonije.

Da bi se mogla koristiti energija RF zračenja za napajanje, signal iz antene je potrebno usmeriti. Sklop koji sadrži antenu i ispravljač se u literaturi još naziva i *rectenna*. Na slici 1 je prikazana blok šema sistema za prikupljanje energije RF zračenja. Prilagođenje obezbeđuje efikasnu konverziju RF energije u DC napon za napajanje. Zbog ograničene snage predajnika i relativno velikog rastojanja predajne i prijemne antene, ispravljeni napon na izlazu antene ima malu vrednost i zato ga je, sa umnožavačima napona, potrebno uvećati.



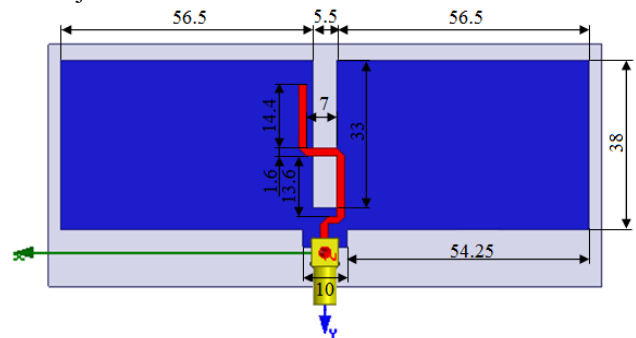
Slika 1. Sistem za prikupljanje energije elektromagnetskog zračenja.

U slučaju idealnog ispravljanja, RF signal bilo koje amplitude se može konvertovati u odgovarajući DC signal. Međutim, zbog konačnih padova napona na ispravljačkim diodama, amplituda izlaznog usmerenog napona se smanjuje, a postoji i prag napona koji RF signal mora preći da bi se mogao usmeriti. Kada je raspoloživa snaga RF signala relativno

velika, umesto umnožavača napona se može koristiti samo diodni usmerač.

III. KARAKTERISTIKE PRIJEMNE ANTENE

U skladu sa idejom o korišćenju energije RF signala iz 900 MHz opsega i na učestanosti ISM signala koji se koristi za komunikaciju u senzorskoj mreži od 2,45 GHz, realizovana je *Dual-Band* antena. Pri projektovanju ovakve antene, iskorišćena je ideja za realizaciju širokopojasne četvrt-talasne transversalne slot antene koja je sa izlazom povezana pomoću elektromagnetski spregnutog voda na štampanoj ploči (PCB) [3]. Antena je malih dimenzija i sa smanjenim uticajem bliskih predmeta na dijagram zračenja. Senzorske mreže su obično na većim rastojanjima, pa je izborom dva opsega, umesto širokopojasnosti, moguće bolje definisati propusne opsege antene i manje povratne gubitke. Na slici 2 su prikazane dimenzije projektovane prijemne antene. Dužine linija pojedinih delova mikrotrakastog voda su podešene prema propusnom opsegu, selektivnosti antene i 50 omskoj izlaznoj impedansi antene. Prednost ove antene u odnosu na dipol antenu je što joj je jedan kraj na masi, čime se izbegava korišćenje dodatnih BALUN-a.



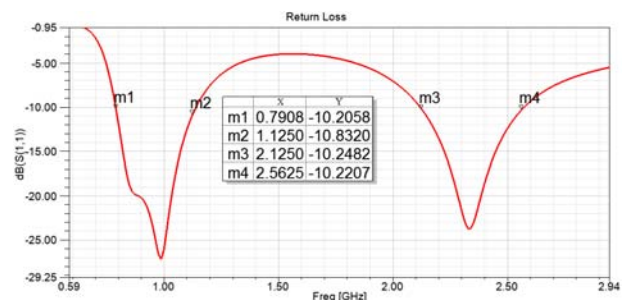
Slika 2. Dimenzije prijemne antene.

Povratni gubici (Return Loss) antene govore o prilagođenju antene na odgovarajuću impedansu koja je najčešće 50 Ω ,

$$\text{Return Loss} = 20 \log |s_{11}| [\text{dB}], \quad (6)$$

gde je s_{11} koeficijent refleksije.

Preciznim podešavanjem dimenzija antene projektovana je antena koja ima povratne gubitke manje od -15dB u korišćenim opsezima oko 0,9 GHz i 2,45 GHz, slika 3.

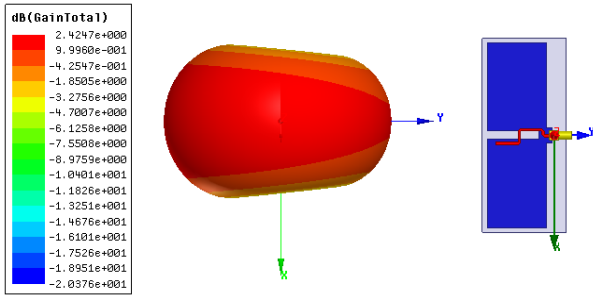


Slika 3. Povratni gubici u prijemnoj anteni.

Na slici 4 je prikazan dijagram zračenja projektovane prijemne antene na 900 MHz dobijen simulacijom. Antena je realizovana na štampanoj ploči FR-4 debljine 0,8 mm.

Procenjena efektivna površina antene je $0,0156 \text{ m}^2$ pri 900 MHz, odnosno $0,0024 \text{ m}^2$ pri 2,45 GHz, dok su dobici antene 2,42 dB i 3,05 dB, respektivno.

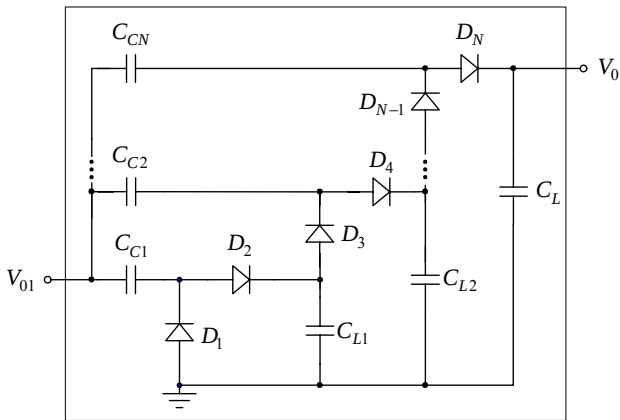
Na osnovu snage ISM predajnika i rastojanja senzorskih čvorova, pomoću jednakosti (1)-(5) se može proceniti raspoloživa snaga za RF-DC konverziju.



Slika 4. Dijagram zračenja antene na 900 MHz.

IV. UMNOŽAVAČ NAPONA

Na antenskom izlazu je signal koji je potrebno ispraviti, a zbog male vrednosti dobijenog napona i uvećati. Za ispravljanje na visokim učestanostima su najbolje šotki diode jer nemaju nagomilavanje naelektrisanja, brzo se uključuju i imaju male padove napona pri provođenju. Jedna od efikasnijih usmeračkih struktura za umnožavanje napona je zasnovana na osobinama *Dicksonove charge pumpe* [4]. Na slici 5 je prikazan ispravljač i umnožavač napona dobijen modifikacijom Dicksonove charge pumpe, tako što je na jedan njen ulaz doveden signal koji se ispravlja, dok je drugi ulaz spojen sa masom.



Slika 5. Umnožavač napona.

Koristeći rezultate dobijene u [2] i oznakama na slici 5, kada je

$$C = C_{C1} = C_{C2} = \dots = C_{CN}, C = C_{L1} = C_{L2} = \dots = C_L \quad (7)$$

napon na izlazu umnožavača napona u ustaljenom stanju je

$$V_0 = N \left(V_{01m} \frac{C}{C + C_{par}} - V_D \right) - \frac{NI_{Load}}{f(C + C_{par})}, \quad (8)$$

gde su:

V_D - pad napona na diodi;

I_{Load} - struja potrošnje na izlazu umnožavača;

C_{par} - parazitna kapacitivnost, od svakog čvora sa sprežnim kondenzatorom $C_{Cj, j=1,2..N}$ i diodama, do mase.

Dakle, kolo umnožavača napona se može ekvivalentirati realnim Tevenenovim generatorom, čija je elektromotorna sila

$$V_{TM} = N \left(V_{01m} \frac{C}{C + C_{par}} - V_D \right), \quad (9)$$

i unutrašnja otpornost

$$R_{TM} = \frac{N}{f(C + C_{par})}. \quad (10)$$

Minimiziranjem sume svih kapacitivnosti

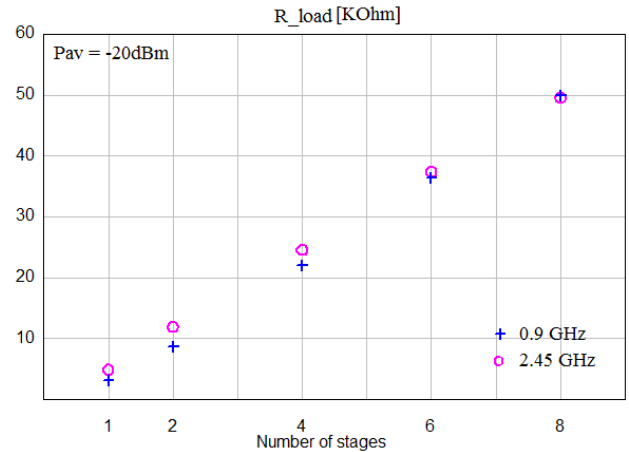
$$C_{tot} = NC, \quad (11)$$

dobija se da je minimalna vrednost kapacitivnosti [5]

$$C_{min} = \frac{I_{Load}}{V_{01m} f} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{C_{par} V_{01m} f}{I_{Load}}} \right). \quad (12)$$

Parazitne kapacitivnosti i pad napona pri provođenju ispravljačkih dioda treba da su što manji da bi diodni efekat došao do izražaja u GHz području, zbog čega su i izabrane Schottky diode. Za realizaciju umnožavača napona je izabrana dioda SMS7630 koja ima malu parazitnu kapacitivnost $C_j = 0,3 \text{ pF}$ i mali pad napona pri provođenju, tipično $V_F = (135\text{mV} - 240\text{mV}) @ 1\text{mA}$, dok je izabrana kapacitivnost $C = 12 \text{ pF}$.

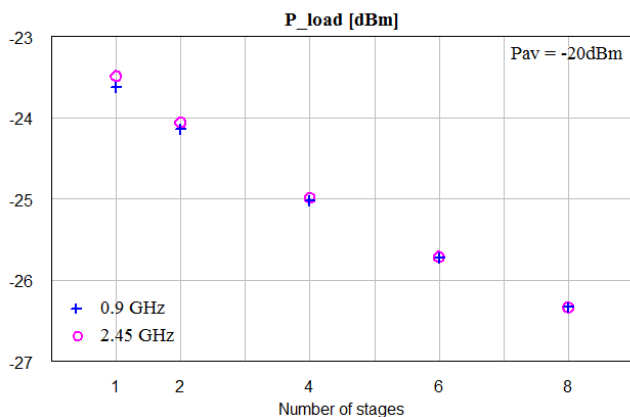
Na slici 6 je prikazan dijagram zavisnosti optimalne otpornosti potrošača pri kojoj se potrošaču predaje maksimalna korisna snaga u funkciji broja stepeni u umnožavaču napona. Pri tome je raspoloživa snaga na ulazu idealizovanog prilagođenja $P_{av} = -20 \text{ dBm}$. Prilagođenje je idealizovano samo na jednoj učestanosti, 0,9 GHz, ili 2,45 GHz.



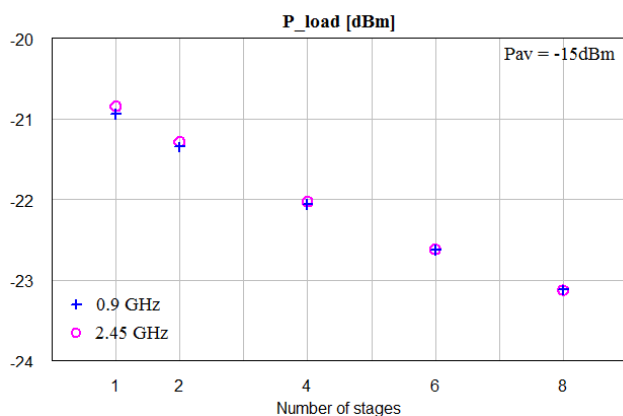
Slika 6. Zavisnost optimalne otpornosti potrošača u funkciji broja stepeni u umnožavaču napona.

Na slikama 7 i 8 su prikazani dijagrami zavisnosti snage koja se može predati potrošaču u funkciji broja stepeni u umnožavaču napona, kada je raspoloživa snaga na ulazu prilagođenja $P_{av} = -20 \text{ dBm}$ i $P_{av} = -15 \text{ dBm}$, na obe

učestanosti. Pri tome je izlaz umnožavača napona opterećen potrošačem optimalne otpornosti, a optimalne otpornosti su približno iste u oba slučaja.



Slika 7. Zavisnost maksimalne snage koja se predaje potrošaču u funkciji broja stepeni u umnožavaču napona pri $P_{av} = -20$ dBm .

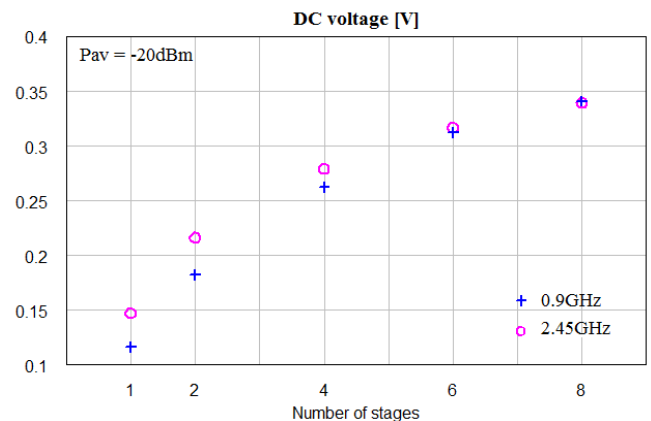


Slika 8. Zavisnost maksimalne snage koja se predaje potrošaču u funkciji broja stepeni u umnožavaču napona pri $P_{av} = -15$ dBm .

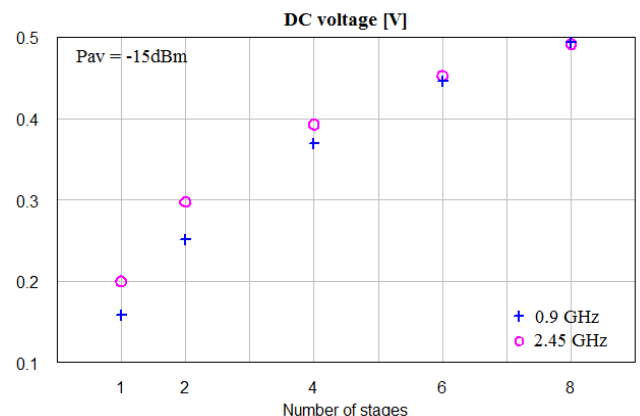
Potrošaču se može predati veća korisna snaga sa manjim brojem stepeni u umnožavaču napona, jer se tada zbog manjeg broja dioda u kolu disipira i manja snaga.

Na slikama 9 i 10 su prikazani dijagrami izlaznog napona u funkciji broja stepeni u umnožavaču napona kada je raspoloživa snaga na ulazu idealizovanog prilagođenja $P_{av} = -20$ dBm i $P_{av} = -15$ dBm, na obe učestanosti. Pri tome je izlaz umnožavača napona opterećen optimalnom otpornošću potrošača, a idealizovano prilagođenje podešeno samo na jedan opseg učestanosti.

Napon na izlazu umnožavača napona zavisi od raspoložive ulazne snage RF signala i od potrošnje. Većina uređaja zahteva konstantan DC napon na izlazu, pa je potrebno postprocesiranje DC napona sa izlaza umnožavača napona, odnosno DC-DC konvertor. Minimalni naponi na ulazima postojećih DC-DC konvertora se kreću od 0,2 V do 0,4 V i zato je u ovom radu u daljem razmatranju korišćen učetvorostručavač napona. Nešto veći napon na izlazu se može dobiti sa većim stepenom umnožavača napona, ali se povećavaju i gubici u kolu.



Slika 9. Zavisnost DC napona na optimalnom potrošaču u funkciji broja stepeni u umnožavaču napona pri $P_{av} = -20$ dBm .



Slika 10. Zavisnost DC napona na optimalnom potrošaču u funkciji broja stepeni u umnožavaču napona pri $P_{av} = -15$ dBm .

V. PRILAGOĐENJE ANTENE NA UMNOŽAVAČ NAPONA

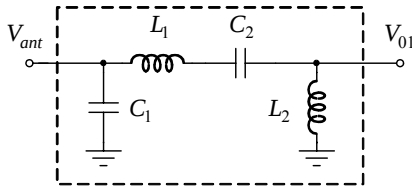
U opsezima učestanosti od interesa se projektovana antena može ekvivalentirati Tevenenovim generatorom čija je unutrašnja otpornost jednaka 50Ω , što znači da je potrebno napraviti prilagođenje nelinearnog ispravljača koje će obezbediti istu takvu ulaznu impedansu u oba opsega učestanosti, oko 0,9 GHz i 2,45 GHz. Prilagođenje za ta dva opsega učestanosti se može realizovati tako što se kolo prvo prilagodi na nižem opsegu učestanosti, a zatim i na višem opsegu. Pri tome se vodi računa o minimizaciji uticaja karakteristike jednog na susedni opseg učestanosti [6]. Na slici 11 je prikazano jedno takvo prilagođenje za opsege učestanosti oko 0,9 GHz i 2,45 GHz. Prilagođenje na nižem opsegu učestanosti, kondenzator C2 u rednoj i kalem L2 u paralelnoj grani, se ponaša kao propusnik visokih učestanosti. Dodavanjem pogodnih vrednosti kondenzatora C1 u paralelnoj i kalema L1 u rednoj grani dobija se kolo prilagođeno i za viši opseg učestanosti.

Budući da je umnožavač napona nelinearno kolo, S-parametri ovog kola zavise od položaja radne tačke, odnosno od snage ulaznog RF signala i od struje potrošnje umnožavača napona. Ugao provođenja struje dioda u

umnožavaču napona je mali, pa se iz razvoja struje diode u Fourierov red [7] može zaključiti da je približna ekvivalentna ulazna otpornost umnožavača napona

$$R_{inM} = \frac{R_{LOAD}}{2N}, \quad (13)$$

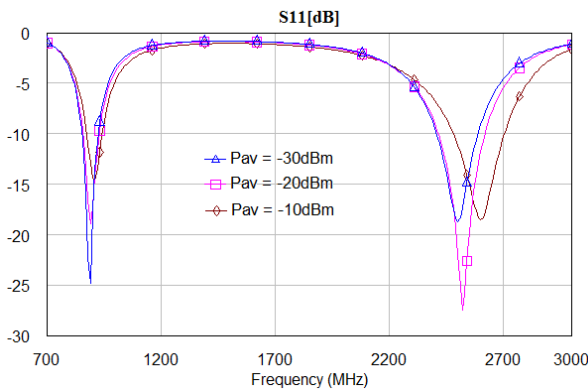
gde je R_{LOAD} otpornost opterećenja na izlazu umnožavača napona. Ova otpornost je potrebna da bi se obavilo početno prilagođenje antene na nelinearni ispravljač sa promenljivom potrošnjom, a pošto je problem nelinearan, iterativnim postupkom su dobijene konačne vrednosti elemenata prilagođenja [8]. Opterećenje je projektovano tako da se potrošaču predaje maksimalna korisna snaga sa učetvorostručavanjem napona. Optimalna otpornost potrošača je dobijena pomoću simulacija i iznosi $R_{LOAD} = 15,4 \text{ k}\Omega$.



Slika 11. Kolo za prilagođenje antene na umnožavač napona.

Na osnovu centralnih učestanosti i propusnog opsega pojedinih opsega učestanosti, pri optimalnoj otpornosti potrošača su dobijene vrednosti elemenata prilagođenja: $C_1 = 0,5 \text{ pF}$, $C_2 = 0,6 \text{ pF}$, $L_1 = 18 \text{ nH}$ i $L_2 = 23 \text{ nH}$. Izabrane komponente su sa konačnim Q-faktorima $Q_C = 100@3\text{GHz}$ i $Q_L = 15@250\text{MHz}$, pa je pri projektovanju i to uzeto u obzir.

Na slici 12 su prikazane zavisnosti povratnih gubitaka prilagođenja pri optimalnoj otpornosti potrošača i pri različitim nivoima raspoložive snage RF signala na ulazu.

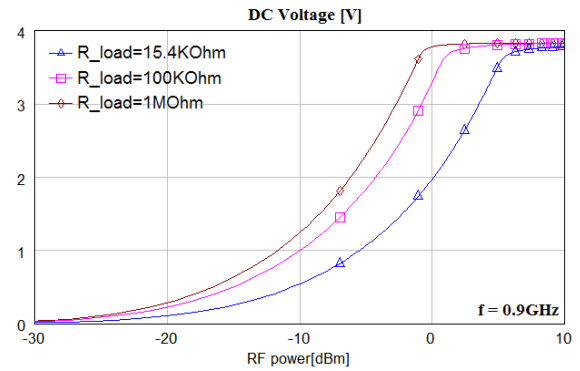


Slika 12. Povratni gubici projektovanog prilagođenja pri optimalnoj otpornosti potrošača.

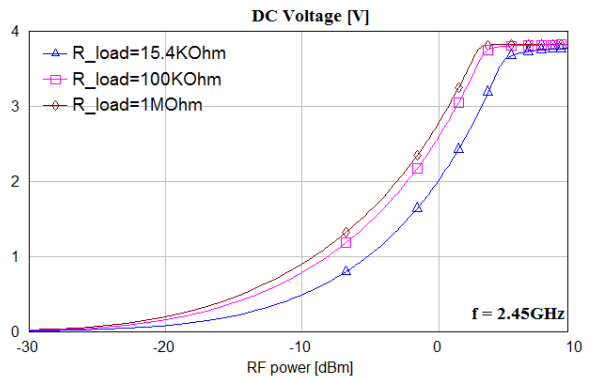
VI. EFIKASNOST RF-DC KONVERZIJE

Na osnovu projektovanih elemenata sistema za konverziju RF signala u jednosmerni napon dobijena je zavisnost jednosmerne vrednosti izlaznog napona u funkciji snage RF signala i to za dve učestanosti, slike 13 i 14. Na slikama 15 i 16 su prikazane zavisnosti efikasnosti konvertora u funkciji otpornosti potrošača kada je raspoloživa snaga RF signala

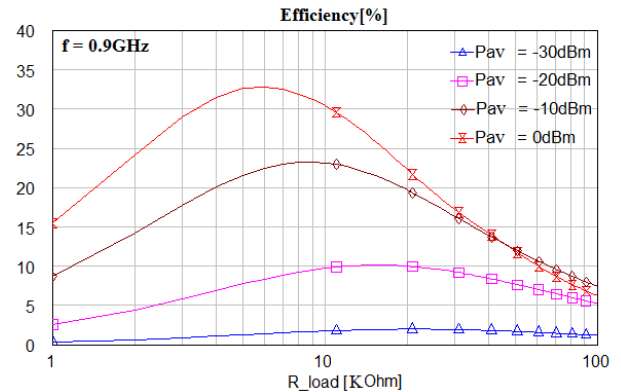
parametar, na učestanostima 0,9 GHz i 2,45 GHz, respektivno. Dijagram je nacrtan u logaritamskoj razmeri da bi se lakše uočila optimalna otpornost potrošača.



Slika 13. Zavisnost jednosmerne vrednosti izlaznog napona u funkciji snage RF signala na 0,9 GHz.

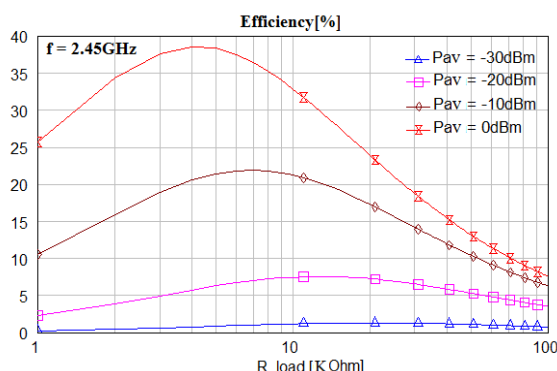


Slika 14. Zavisnost jednosmerne vrednosti izlaznog napona u funkciji snage RF signala na 2,45 GHz.

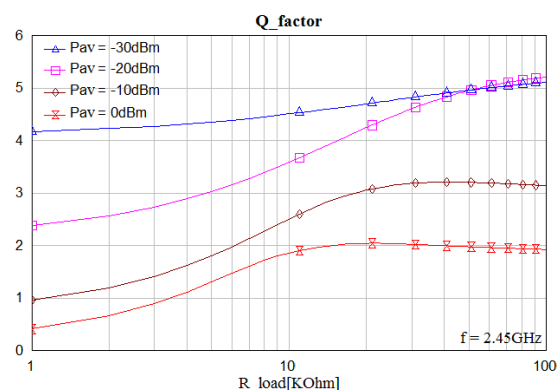


Slika 15. Zavisnost efikasnosti RF-DC konverzije na učestanosti 0,9 GHz.

Uvećana efikasnost RF-DC konverzije je posledica efektivnog Q-faktora kola za prilagođenje. Zbog reaktivnih elemenata u prilagođenju se može obezbediti da je amplituda napona na izlazu kola za prilagođenje veća od amplitude napona na njegovom ulazu. Zbog povećanog ulaznog napona na ulazu umnožavača napona smanjuje se uticaj pada napona na provodnim diodama. Na slici 17 je prikazana zavisnost efektivnog Q-faktora kola za prilagođenje na učestanosti 2,45 GHz u funkciji otpornosti potrošača.

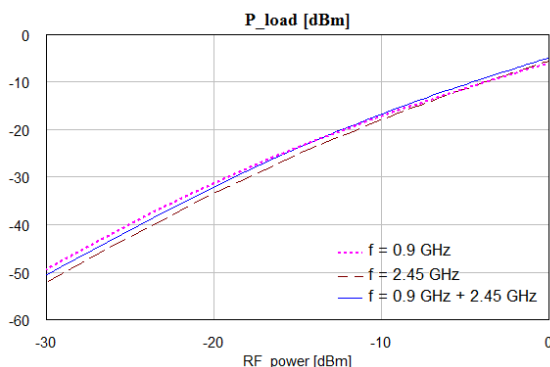


Slika 16. Zavisnost efikasnosti RF-DC konverzije na učestanosti 2,45 GHz.



Slika 17. Zavisnost efektivnog Q-faktora prilagođenja u funkciji otpornosti potrošača.

Na slici 18 je prikazana zavisnost maksimalne korisne snage koja se može predati potrošaču u funkciji snage ulaznog signala, kada na anteni prisutan RF signal na jednoj, ili na obe učestanosti.



Slika 18. Zavisnost maksimalne snage koja se predaje potrošaču u funkciji snage ulaznog RF signala.

Ukupna efikasnost RF-DC konverzije ne prelazi 40% jer se, zbog prilagođenja antene, gubi 50% snage na njenoj unutrašnjoj otpornosti. Pošto je u okruženju čvorova senzorskih mreža uvek prisutna energija RF zračenja, ona se lako može konvertovati u DC napon za njihovo napajanje. Ukoliko je položaj pasivnog čvora senzorske mreže takav da nema dovoljno ambijentalne energije u okruženju za slanje podataka, pomoću aktivnog čvora se lako može ostvariti i komunikacija i transfer energije za njegovo napajanje.

VII. ZAKLJUČAK

Pokazano je projektovanje i optimizacija efikasnosti RF-DC konvertora male snage koji koristi energiju elektromagnetskog polja iz 900 MHz GSM opsega učestanosti i 2,45 GHz ISM opsega za primopredaju podataka u bežičnoj senzorskoj mreži. S obzirom na male nivoe snage RF signala u okruženju, za njenu efikasnu transformaciju u energiju za napajanje bežičnih senzorskih mreža potrebno je podesiti da otpornost potrošača ima optimalnu vrednost. To se može ostvariti pomoću MPPT (Maximum Power Point Tracking) algoritama, što će biti predmet našeg daljeg istraživanja.

ZAHVALNICA

Ovaj rad je realizovan kao rezultat istraživanja na projektu Ministarstva za nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije „Razvoj i modelovanje energetski efikasnih, adaptabilnih, višeprosorskih i višesenzorskih elektronskih sistema male snage“, ev. broj TR 32043.

LITERATURA

- [1] H. T. Friis, "A note on a simple transmission formula," *Proc. IRE*, pp. 254-256, 1946.
- [2] B. H. Calhoun et al., "Design Considerations for Ultra-low Energy Wireless Microsensor Nodes," *IEEE Transactions On Computers*, pp. 727-749, June 2005.
- [3] P. Lindberg, E. Ojefors, and A. Rydberg, "Wideband Slot Antenna for Low-Profile Hand-held Terminal Applications," *Proceedings of the 36th European Microwave Conference*, pp. 1698-1701, Manchester, September, 2006.
- [4] J. F. Dickson, "On-Chip High-Voltage Generation in NMOS Integrated Circuits Using an Improved Voltage Multiplier Technique," *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. SC-11, no. 3, pp. 374-378, Jun. 1976.
- [5] S. C. Lee, D. S. Park, J. H. Song, M. W. Choi, and S.-H. Lee, "A low-ripple switched-capacitor DC-DC up converter for low-voltage applications," *Proceedings of the Second IEEE Asia Pacific Conference*, pp. 13-16, 2000.
- [6] <http://www.antenna-theory.com/tutorial/smith/smithchartC.php>
- [7] R. Barnett, J. Liu, and S. Lazar, "A RF to DC Voltage Conversion Model for Multi-Stage Rectifiers in UHF RFID Transponders," *IEEE Journal of Solid State Circuits*, Vol. 44, No. 2, pp. 354-370, February 2009.
- [8] V.V. Petrović, D.V. Tošić, A.R. Đorđević, *Mikrotalasna pasivna kola*, str. 241-280, Elektrotehnički fakultet u Beogradu, 2010.

ABSTRACT

The paper describes the RF-DC converter which consists of Dual-Band antenna designed for GSM 900 MHz band and 2.45 GHz ISM band, the matching circuits and the diode-capacitor voltage multiplier. Design of the individual converter modules is presented and determination of the optimal resistance for maximum converter efficiency are shown. Designed converter is modular, so RF-DC conversion can be easily adjusted in any narrow-band or broadband frequency range.

Key words: RF-DC; RF energy harvesting; Dual-Band antenna; matching; voltage multiplier;

RF-DC converter for RF power harvesting systems

Radivoje Djuric, Mihajlo Bozovic, Milan Ponjavic