

Bežični prenos energije

Bežični punjači

Jugović Bogdan

Student I ciklusa studija

Elektrotehnički fakultet Istočno Sarajevo

Pale, RS, BiH

bogdan.jugovic@yahoo.com

Sažetak— U radu je opisan bežični prenos energije na kratka rastojanja, konkretno prenos energije induktivnom spregom i rezonantnom induktivnim spregom. Ovakav način prenosa najčešće se koristi kod bežičnih punjača, pa su opisana dva integralna kola koja se koriste kao kontroleri na primarnoj i sekundarnoj strani punjača. Pored toga odrađena je i simulacija u programskom paketu Matlab – Simulink gdje su analizirani karakteristični talasni oblici napona i struja, kao i ponašanje sistema za različite vrijednosti koeficijenta sprege i faktora dobre kalema. Odrađene su i simulacije koje daju zavisnost izlazne snage i stepena iskorištenja za različite vrijednosti koeficijenta sprege i frekvencije.

Ključne riječi - Bežični prenos energije; Bežični punjači; Matlab; Simulacija; Spregnuti kalemovi;

I. UVOD

Bežični prenos električne energije omogućava prenos energije od izvora do potrošača bez upotrebe provodnika koji ih povezuju. Ova tehnologija našla je svoju primjenu kada je upotreba kablova i žica nemoguća ili opasna. U današnje vrijeme, jedna od značajnijih primjena ove tehnologije je izvedena kroz upotrebu bežičnih punjača.

Razlikuju se dva tipa prenosa energije, prenos na velika i prenos na mala rastojanja. Za prenos na velika rastojanja koristi se prenos laserom i prenos mikrotalasima, dok se na kratka rastojanja koristi prenos kapacitivnom, induktivnom i rezonantnom induktivnom spregom. U nastavku rada biće opisan prenos induktivnom i rezonantnom induktivnom spregom.

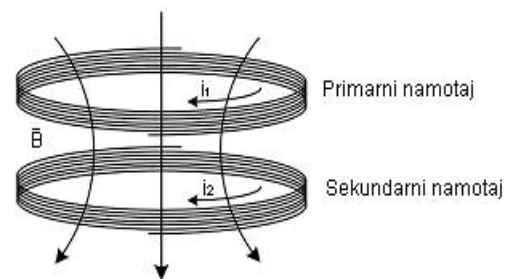
II. BEŽIČNI PRENOS ENERGIJE

A. Induktivna sprega

Prenos elektromagnetnom indukcijom temelji se na dobro poznatim Maksvelovim jednačinama. Na Sl. 1. prikazan je princip induktivnog prenosa. Ako kroz primarni namotaj Sl. 1. protiče vremenski promjenjiva struja $i_1(t)$ ona će prouzrokovati vremenski promjenjivo magnetno polje u prostoru oko sebe. Kako se sekundarni namotaj nalazi u ovom promjenjivom polju doći će do indukovanja elektromotorne sile u njemu. Indukovana elektromotorna sila računa se po formuli:

$$e_{ind} = -\frac{d\Phi(t)}{dt}, \quad (1)$$

$\Phi(t)$ - magnetni fluks kroz sekundarni namotaj.



Slika 1. Induktivna sprega

Opseg frekvencija koje se koriste za induktivni prenos je u kilohercnom području. Stepenn iskorištenja kod induktivnog bežičnog prenosa zavisi od međusobne induktivnosti primarnog i sekundarnog kalema, računane na sledeći način:

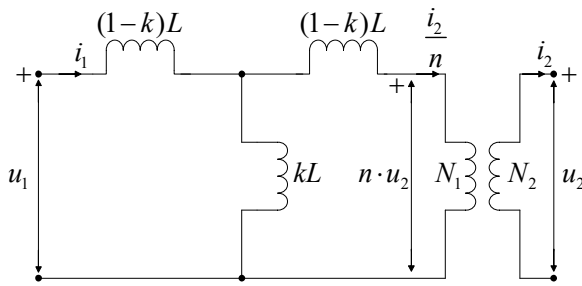
$$M = k\sqrt{L_p L_s}. \quad (2)$$

k - koeficijent sprege;

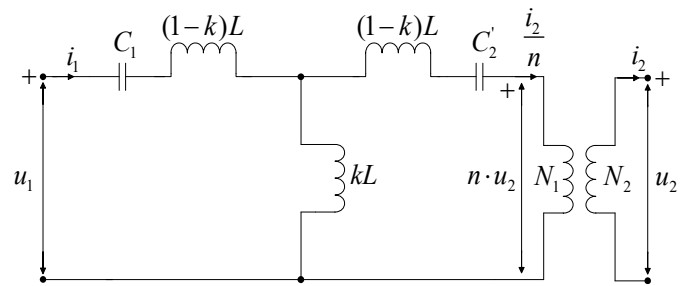
L_p, L_s - induktivnost primarnog i sekundarnog namotaja.

Kod bežičnog prenosa koeficijent k može da bude veoma mali jer ne postoji magnetno kolo koje povezuje primarni i sekundarni namotaj. Kada se prenosi velika snaga namotajima se dodaju feritna jezgra (jedno jezgro na primaru i jedno na sekundaru) koja služe kao usmjerivači magnetnog polja. Neke od prednosti ovakvog prenosa su jednostavna primjena, velika efikasnost na kratka rastojanja (rastojanja kraća od prečnika kalemova), mali uticaj na okolni prostor. Zbog navedenih prednosti ovakav način prenosa energije bez upotrebe žica našao je veoma veliku primjenu u izradi bežičnih punjača za male prenosive uređaje, kao što su mobilni telefoni i slični uređaji.

Na osnovu teorijske analize električnih transformatora dolazi se do ekvivalentne šeme Sl. 2. induktivnog bežičnog prenosa. Model je izveden pod pretpostavkom da su induktivnosti primarnog i sekundarnog namotaja iste. U modelu su zanemarene i aktivne otpornosti primarnog i sekundarnog kola [1], [2].



Slika 2. Model induktivnog prenosa



Slika 4. Model rezonantnog induktivnog prenosa

B. Rezonantni induktivni prenos

Za smanjenje gubitaka koristi se drugi vid prenosa na bazi efekta rezonancije. Efekat rezonancije treba ba obezbjedi smanjenje gubitaka u primarnom i sekundarnom kolu. Rezonantno kolo čini induktivnost namotaja i kondenzator, prikazano na Sl. 3. U ovom sličaju, kada se na primarni namotaj priključi izvor čija je frekvencija jednaka rezonantnoj frekvenciji LC kola, impedanse X_L i X_C se neutrališu. Sekundarno kolo podešeno je na istu rezonantnu frekvenciju kao i primarno kolo. Kako se i sekundarno LC kolo pobuđuje svojom rezonantnom frekvencijom impedanse X_L i X_C su takođe iste i neutrališu se. Ovo dovodi do toga da rastojanje između primarnog i sekundarnog kola može da se poveća, a da predata energija potrošaču ostane ista.

Osim koeficijenta sprege koji je bio jedino mjerilo za stepen iskorištenja prenosa energije kod induktivne sprege, za rezonantni prenos bitan je faktor dobrote RLC kola (Q faktor). Q faktor predstavlja odnos akumulisane energije i disipirane (izgubljene) energije. Sistem će biti efikasan samo ako akumulisana energija bude veća od disipirane. Q faktor za oscilatorno RLC kolo računa se prema formuli:

$$Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{\omega L}{R} \quad (3)$$

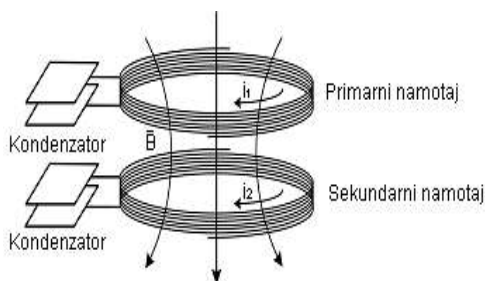
R – aktivna otpornost kola;

L – induktivnost kola;

C – kapacitivnost kola;

ω – kružna frekvencija generatora.

Do izraza za maksimalnu iskorištenost sistema može se doći na više načina: analizom magnetno spregnutih kola, preko Z parametara četveropola ili preko S parametara. Na osnovu ovoga dolazi se do izraza za stepen iskorištenja, relacija (4).



Slika 3. Rezonantna induktivna sprega

$$\eta = \frac{|I_p|^2 R_p}{|I_{ul}|^2 R_1 + |I_p|^2 (R_2 + R_p)} \quad (4)$$

I_{ul}, I_p – ulazna struja i struja potrošača;

R_1, R_2 – otpor primarnog i sekundarnog namotaja;

R_p – otpor potrošača.

Ako se za model sa Sl. 4. odredi koeficijent prenosa S_{21} čiji je postupak određivanja opisan u [3]:

$$S_{21} = 2 \frac{U_p}{U_g} \sqrt{\frac{R_g}{R_p}} \quad (5)$$

U_p, U_g – napon na potrošaču, napon generatora;

R_g – otpor generatora.

dolazi se do zaključka da se maksimalna iskorištenost prenosa postiže na rezonantnoj frekvenciji f_0 računata prema relaciji:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_p C_p}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_s C_s}} \quad (6)$$

C_p, C_s – kapacitivnost primarnog i sekundarnog kola.

Međutim prenos maksimalne snage na ovoj frekvenciji moguć je samo za koeficijent sprege koji iznosi:

$$k_{kr} = \frac{1}{\sqrt{Q_p Q_s}} \quad (7)$$

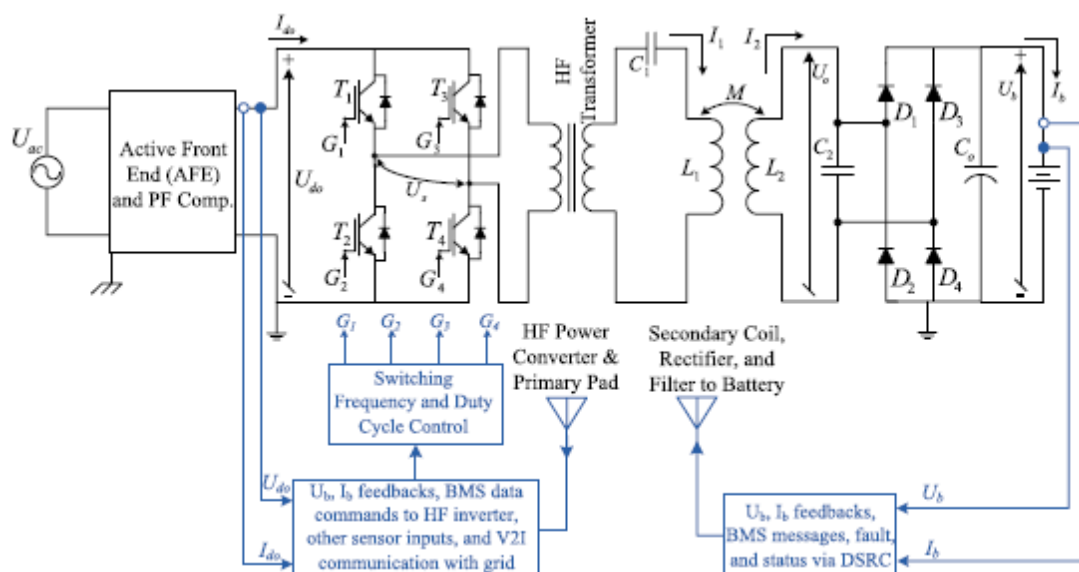
Q_p, Q_s – faktor dobrote primarnog i sekundarnog kola.

Za slučaj kada je koeficijent sprege veći od kritične vrijednosti i ako se želi postići da snaga na potrošaču bude maksimalna, frekvencija izvora se mora mijenjati u funkciji koeficijenta sprege, kako je dato u jednačinama (8).

$$f_e = \frac{f_0}{\sqrt{1-k}}, \quad f_m = \frac{f_0}{\sqrt{1+k}} \quad (8)$$

Kao što se vidi postoje dvije frekvencije na kojima je moguće prenijeti maksimalnu snagu. Ove frekvencije nisu rezonantne pa napon i struja na ulazu u primarno kolo nisu u fazi. Kako napon i struja nisu u fazi pojavljuje se reaktivna snaga, a stepen iskorištenja se smanjuje. Pojava u ograničenju prenosa maksimalne snage na rezonantnoj frekvenciji objašnjava se međudjelovanjem između primarnog i sekundarnog kola. Naime, zbog međudjelovanja ova dva kola ulazna impedansa u primarno kolo se mijenja [4], [5], [6].

III. ARHITEKTURA BEŽIČNIH PUNJAČA



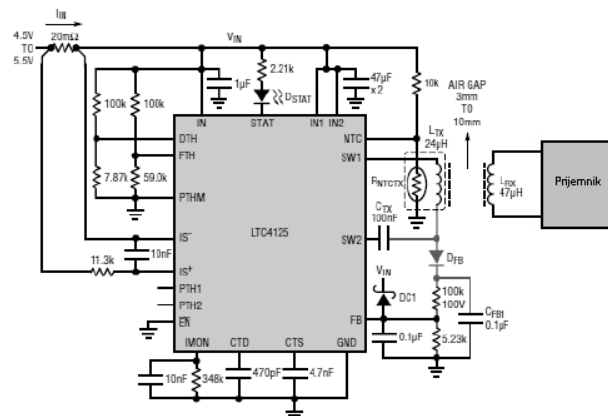
Slika 5. Arhitektura rezonantnog bežičnog punjača [10]

Na Sl. 5. prikazana je arhitektura rezonantnog bežičnog punjača, koja se sastoji od dva funkcionalna bloka. Prvi blok predstavlja predajnik, dok drugi predstavlja prijemnik. Na ulazu predajnika nalazi se ispravljač i uređaj za popravak faktora snage, na izlazu ispravljača dobija se jednosmjerni napon koji se vodi na ulaz visokofrekventnog invertora, a na izlazu invertora dobija se naizmjenični napon visoke frekvencije koji odgovara rezonantnoj frekvenciji primarnog i sekundarnog LC kola. Na strani prijemnika nalazi se ispravljač i kondenzator za filtriranje napona. Visokofrekventni transformator nije neophodan, ali je poželjan zbog galvanke izolacije kada se radi sa velikim vrijednostima struja i napona. Pored energetskog dijela tu je i dio za komunikaciju između predajnika i prijemnika, kao i dio za upravljanje.

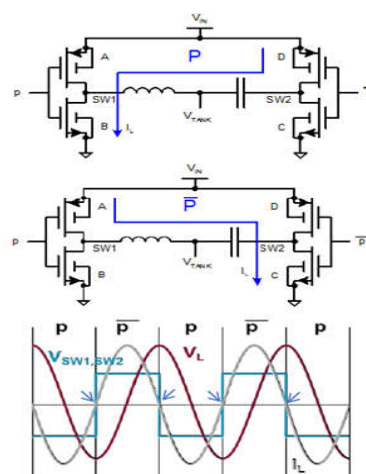
A. Primarni kontroler LTC4125

Za napajanje primarnog kola male snage postoji veliki broj integralnih kola, kao primjer navedeno je integralno kolo LTC4125. LTC4125 integralno kolo koristi se kod rezonantnog induktivnog prenosa. Šema bežičnog prenosa kod koga se koristi LTC4125 kolo data je na Sl. 6. Da bi se generisao signal koji odgovara primarnom kolu, LTC4125 koristi AutoResonant princip upravljanja.

AutoResonant princip upravljanja obezbjeđuje da je napon $V_{sw1,sw2}$ uvijek u fazi sa strujom i_L , kao na Sl. 7. Kada struja teče od SW1 ka SW2 prekidači A i C se uključuju. Kako je obezbjeđeno da su struja i napon u fazi LC krug se pobuđuje svojom rezonantnom frekvencijom. LTC4125 kolo ima mogućnost impulsno širinske modulacije što kao rezultat ima regulaciju poslate energije prijemniku. Još jedna od mogućnosti kola je otkrivanje stranog metalnog objekta koji se nalazi u elektromagnetnom polju predajnika. Kada se otkrije strani objekat, LTC4125 kolo automatski prekida isporuku energije. Na ovaj način sprečavaju se gubici koji se manifestuju kao vrtložne struje u samom objektu [7].



Slika 6. Primjer korišćenja LTC4125 kola [7]



Slika 7. AutoResonant princip upravljanja [7]

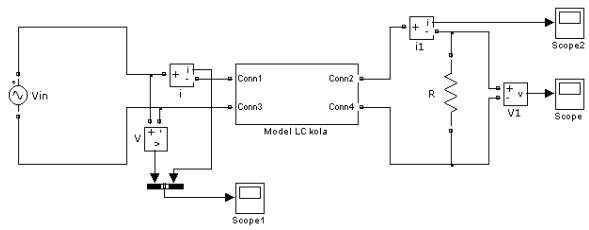
B. Sekundarni kontroleri LTC4120/LTC4120-4.2

LTC4120 je integralno kolo koje se koristi kao regulator na sekundarnoj strani rezonantnog bežičnog punjača. LTC4120 koristi tehniku upravljanja dinamičkim usklađivanjem (DHC) snaga prijemnika i predajnika, u cilju obezbjeđivanja visoke efikasnosti prenosa.

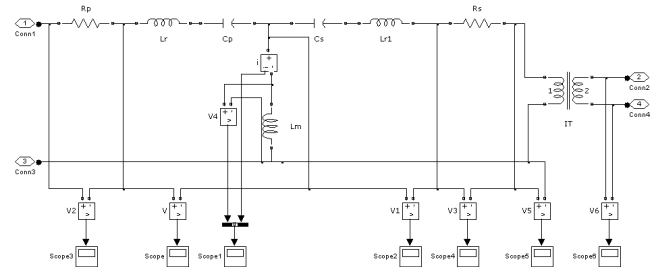
Karakteristike kola *LTC4120*:

- Opseg ulaznih napona od 12,5 V do 40 V,
- Podesivi izlazni napon od 3,5 V do 11 V,
- Izlazna struja od 50 mA do 400 mA,
- Tačnost izlaznog napona $\pm 1\%$.

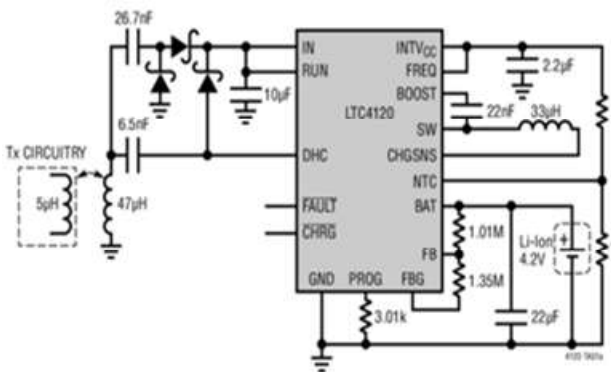
DHC promjenom impedanse prijemnika reguliše napon na ulazu u LTC4120 kolo. Kada je indukovani napon na sekundarnoj strani ispod granične vrijednosti LTC4120 kolo pomoću DHC pina obezbjeđuje da je rezonantna frekvencija sekundarnog kola što bliže rezonantnoj frekvenciji primarnog kola, analogno kada je ulazni napon previsok DHC pin obezbjeđuje da se rezonantna frekvencija sekundarnog kola udaljava od rezonantne frekvencije primarnog kola, dok se snaga na prijemniku smanjuje [8], [9].



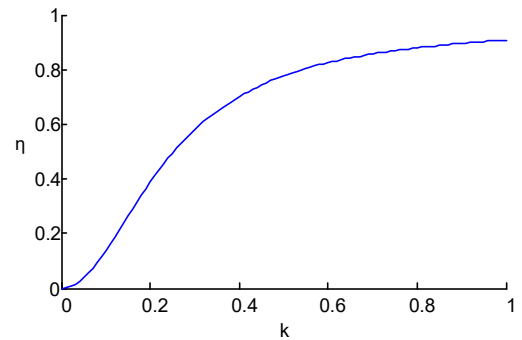
Slika 9. Model bežičnog prenosa



Slika 10. Model LC kola sa aktivnim gubicima



Slika 8. Primjer upotrebe LTC 4120 kola [5]



Slika 11. Zavisnost stepena iskorištenja od koeficijenta sprege

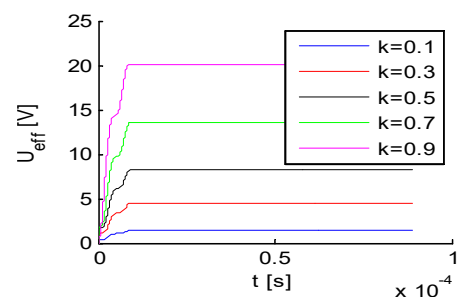
IV. REZULTATI SIMULACIJE BEŽIČNOG PRENOSA ENERGIJE

U ovom radu izvršena je analiza ponašanja bežičnog prenosa energije induktivnom i rezonantnom induktivnom spregom. Simulacija je odrađena u programskom paketu Matlab – Simulink. Cilj simulacije je dobijanje adekvatnih talasnih oblika u cilju verifikacije modela prenosa. Simulacione šeme prikazane su na Sl. 9 i Sl. 10.

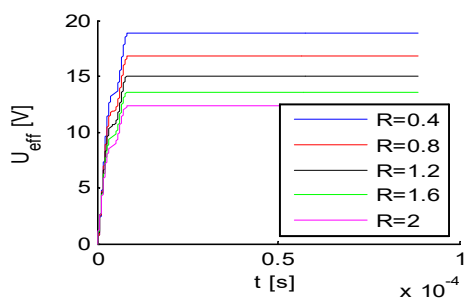
Vrijednosti elemenata simulacije su:

- $V_{g\text{ eff}} = 25 \text{ V};$
- $R_g = 2 \Omega;$
- $L_p = L_s = 10 \mu\text{H};$
- $C_p = C_s = 0,2 \mu\text{F};$
- $R_p = R_s = 0,2 \Omega;$
- $f_0 = 112,5 \text{ kHz};$

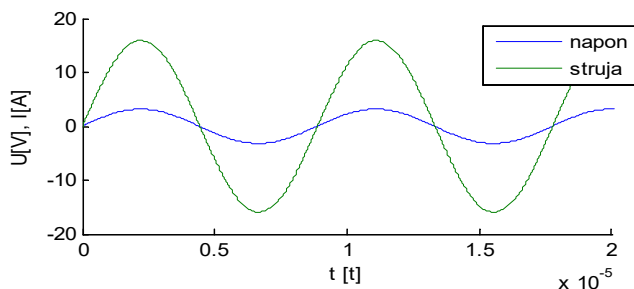
U prvoj analizi posmatrana je zavisnost izlaznog napona od koeficijenta sprege k za slučaj kada u kolo nisu uključeni kondenzatori C_p i C_s . Kako se vrši analiza bez kondenzatora C_p i C_s ova analiza predstavlja induktivni prenos enegije. Na grafiku Sl. 11. data je zavisnost stepena iskorištenja od koeficijenta sprege. Posmatrana je i efektivna vrijednost izlaznog napona za različite vrijednosti koeficijenta sprege, rezultati su prikazani na grafiku Sl. 12.



Slika 12. Efektivna vrijednost izlaznog napona u funkciji koeficijenta sprege



Slika 13. Zavisnost efektivne vrijednosti izlaznog napona od aktivne otpornosti namotaja



Slika 14. Talasni oblik napona i struje na ulazu za koeficijent sprege $k = 0$

Analiziran je i slučaj uticaja aktivne otpornosti primarnog i sekundarnog kola na efektivnu vrijednost izlaznog napona, koeficijent sprege je konstantan i iznosi 0,9. Rezultati simulacije prikazani su na grafiku Sl. 13.

Kada se u kolo uključe kondenzatori C_p i C_s sistem predstavlja rezonantni bežični prenos energije.

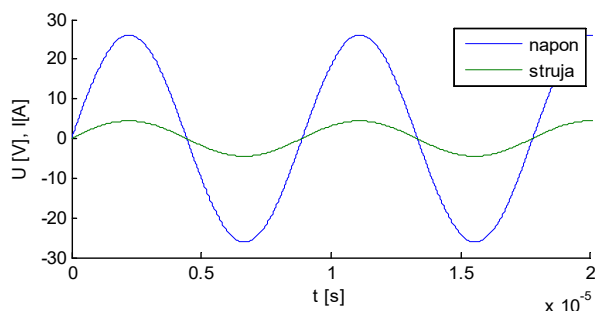
U slučaju da je koeficijent sprege jednak nuli talasni oblici napona i struja na ulazu prikazani su na Sl. 14. Napon i struja na ulazu su u fazi, primarno kolo je u rezonanciji, a struja je ograničena aktivnom otpornošću primarnog namotaja i otpornošću generatora. Izlazni napon u ovom slučaju je jednak nuli.

U narednoj simulaciji analiziran je slučaj kada se sistem pobuđuje rezonantnom frekvencijom. Aktivna otpornost generatora i potrošača iznosi 2Ω , dok otpor namotaja primarnog i sekundarnog kola iznosi $0,2 \Omega$.

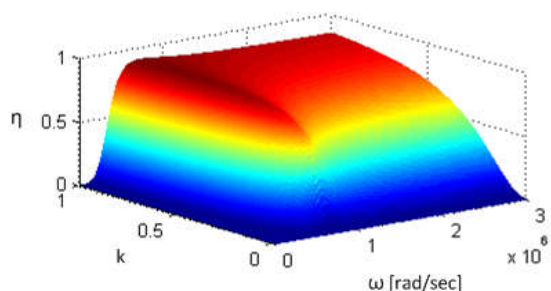
Kako se sistem pobuđuje rezonantnom frekvencijom na ulazu se postiže nulti fazni stav između napona i struje. Međutim ako se uporedi grafik na Sl. 14. i grafik na Sl. 15. može se vidjeti da je amplituda struje na Sl. 15. manja iako je aktivna otpornost kola jednaka. Posljedica ovoga je djelovanje sekundarnog kola na primarno kolo gdje dolazi do povećanja ulazne impedance i ograničavanja struje. Najveća snaga se može prenijeti za koeficijent sprege jednak kritičnoj vrijednosti k_{kr} , koji iznosi 0,31. Na Sl. 16. prikazana je zavisnost stepena iskorištenja od kružne učestanosti i koeficijenta sprege. U Tabeli I. prikazani su rezultati simulacije.

TABELA I. REZULTATI SIMULACIJE PRENOSA ENERGIE SA MAKSIMALNIM ISKORIŠĆENJEM

k	Z_{ul} [Ω]	P_{ul} [W]	P_{iz} [W]	η
0,1	0,25	44,4	21,4	0,48
0,31	2,52	75,6	63,2	0,83
0,5	5,8	58	50,9	0,87
0,7	11,33	39	34,8	0,89
0,9	18,6	26,8	24,13	0,9

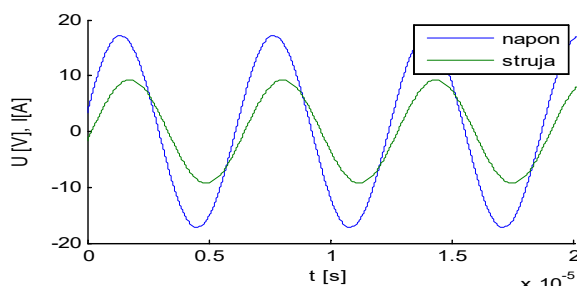


Slika 15. Talasni oblik napona i struje za frekvenciju f_0 i koeficijent sprege $k = 0.5$

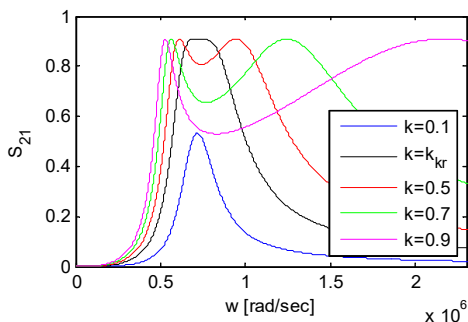


Slika 16. Zavisnost stepena iskorištenja od koeficijenta sprege i kružne učestanosti

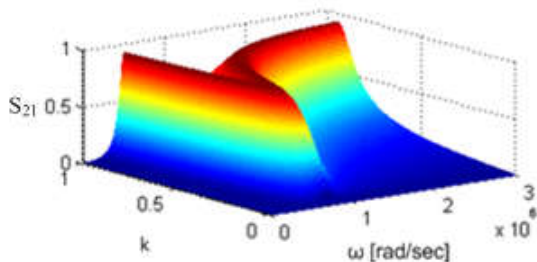
Naredna simulacija pokazuje maksimalni prenos snage kada se sistem pobuđuje frekvencijom f_c . U ovom slučaju struja i napon nisu u fazi. Fazni stav se mijenja u funkciji koeficijenta sprege. Za koeficijent sprege $k = 0.5$ talasni oblik napona i struje na ulazu prikazan je na grafiku Sl. 17.



Slika 17. Talasni oblik napona i struje na ulazu za frekvenciju f_m i koeficijent sprege $k = 0.5$



Slika 18. Zavisnost parametra S_{21} od kružne učestanosti



Slika 19. Zavisnost parametra S_{21} od koeficijenta sprege i kružne učestanosti

TABELA II. REZULTATI SIMULACIJE PRENOSA MAKSIMALNE SNAGE

k	Z_{ul} [Ω]	P_{ul} [W]	P_{iz} [W]	η
0,1	0,42+j0,66	41,2	20	0,48
0,31	1,5+j1,08	68,4	54,9	0,8
0,5	2,04+j0,81	73,6	60,3	0,81
0,7	2,27+j0,5	75,1	62,3	0,82
0,9	2,37+j0,23	75,7	63	0,83

Zavisnost koeficijenta prenosa od kružne učestanosti prikazana je na Sl. 18. Kao što je objašnjeno u poglavlju II prenos maksimalne snage moguće je ostvariti na frekvencijama koje se udaljavaju od rezonantne frekvencije, date formulama (8) uz nešto veće gubitke. Sl. 19. prikazuje zavisnost koeficijenta prenosa od koeficijenta sprege i kružne učestanosti. U Tabeli II. prikazani su rezultati simulacije.

V. ZAKLJUČAK

Bežični prenos energije induktivnom spregom je tehnologija koja se počela razvijati iz potrebe za napajanjem prenosivih električnih uređaja, u zadnjih 10÷15 godina. Koristi se kako za prenos malih snaga kao kod električnih četkica za zube, pa sve do prenosa velikih snaga, kao što je slučaj kod punjača baterija električnih automobila. Glavni nedostatak ovakvog načina prenosa je što sa povećanjem rastojanja stepen korisnog dejstva cjelokupnog sistema opada. Rješenje

navedenog problema je upotreba efekta rezonancije gdje se eliminišu gubici koji nastaju u reaktansama kola pa se, pri istom rastojanju, energija prenosi sa manjim gubicima.

ZAHVALNICA

Ovaj rad je nastao na osnovu seminarskog rada iz predmeta Elektroenergetski pretvarači, pod mentorstvom prof. dr Milomira Šoje i mr Marka Ikića, kojima se ovom prilikom zahvaljujem na ukazanoj podršci. Ovom prilikom se zahvaljujem i kolegini Jovani Kezunović koja mi je pomogla u pronalasku odgovarajuće literature.

LITERATURA

- [1] Xiao Lu, Ping Wang, Dusit Niyato, Dong In Kim, Zhu Han, „Wireless Charging Technologies: Fundamentals, Standards, and Network Applications“, IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol.: 18, Issue: 2, pp. 1413-1452, Second quarter 2015.
- [2] John Rice, „Examining Wireless Power Transfer“, Texas Instruments Power Supply Design Seminar, Topic 3, TI Literature Number: SLUP321, 2014.
- [3] John Choma, „Scattering Parameters: Concept, Theory, and Applications“, unpublished.
- [4] Qiang Zhao, Anna Wang, Hao Wang, „Structure Analysis of Magnetic Coupling Resonant for Wireless Power Transmission System“, AASRI International Conference on Industrial Electronics and Applications (IEA 2015), pp. 380 – 384, April 2015.
- [5] Xuezhe Wei, Zhenshi Wang i Haifeng Dai, „A Critical Review of Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances“, Energies 2014, Vol. 7, No. 7, pp. 4316-4341, 2014.
- [6] D.M. Vilathgamuwa i J.P.K. Sampath, „Wireless Power Transfer (WPT) for Electric Vehicles (EVs)—Present and Future Trends“, Chapter: Plug In Electric Vehicles in Smart Grids, Part of the series Power Systems, pp 33-60, 30 November 2014.
- [7] Eko Lisuwandi, „Monolithic Full Bridge AutoResonant Transmitter IC Simplifies Wireless Battery Charger Design“, Linear Technology Corporation, n.d.
- [8] Raghu Narayanan, „Selecting Coils for Wireless Charging Systems“, Würth electronics, n.d.
- [9] <http://www.linear.com/product/LTC4120>, Decembar 2016.
- [10] John M. Miller, Fellow, IEEE, Omer C. Onar, and Madhu Chinthavali, „Primary-Side Power Flow Control of Wireless Power Transfer for Electric Vehicle Charging“, IEEE Journal of emerging and selected topics in power electronics, Vol. 3, No.1, pp. 147 - 162, March 2015.

ABSTRACT

The paper describes the wireless energy transmission at short distances, specifically, energy transmission with inductive loop and resonant inductive loop. This kind of transmission is mostly used in wireless charging devices, where are described two integrated circuits that are used as controllers at the primary and secondary side of the wireless charger. In addition, the simulation is done in program package Matlab Simulink, where are analyzed characteristic wave forms of voltages and currents, as well as the behavior of the system for different values of coupling coefficient and quality factor of the coil. Simulations that give dependence between output power and efficiency for different values of coupling coefficient and frequency are determined.

WIRELESS POWER TRANSFER

Bogdan Jugović