

# Realizacija laboratorijskog sistema za bežični prenos energije

Dejan Janjić, Alenka Milovanović i Branko Koprivica

**Apstrakt**—Cilj ovog rada je prikaz teorijskih osnova i realizacije laboratorijskog sistema za bežični prenos električne energije. Na početku će biti razmotreni osnovni principi induktivnog i rezonantnog bežičnog prenosa energije i biće navedene njihove osnovne prednosti i mane. Dalje, biće detaljnije opisana rezonantna metoda realizovanog sistema, uključujući: šemu veza i opis principa rada predajnog i prijemnog dela sistema, tehničke podatke, prikaz realizovanog laboratorijskog sistema, kao i rezultate merenja i odgovarajuću analizu.

**Ključne reči**—Bežični prenos energije; rezonantna metoda; rezonantna frekvencija, redno-paralelna kompenzacija.

## I. UVOD

Metodologiju za bežični prenos električne energije je predložio Nikola Tesla, krajem 19. veka [1, 2]. Prve realizacije takvih sistema se javljaju na početku 21. veka, kada MIT realizuje prenos električne energije na rastojanje od 2 m za napajanje sijalice [3], kao i INTEL [4], a SONY predstavlja prvi bežični televizor [5]. Bežični prenos energije je sada već realnost koja se dalje razvija kroz različite primene, u medicini, robotici, za napajanje kućnih uređaja ili punjenje baterija prenosnih uređaja, električnih bicikli i mopeda, a očekuje se da će uskoro ući u primenu i bežični sistemi za punjenje električnih automobila.

Dosadašnja istraživanja u Srbiji u oblasti bežičnog prenosa električne energije (koliko je autorima poznato) odnose se na analizu i izradu Teslinog transformatora, ali ne i na realizacije sistema za napajanje uređaja [6, 7].

U ovom radu će biti date osnove teorije bežičnog prenosa energije bazirane na induktivnoj i rezonantnoj metodi i biće analizirane njihove prednosti i nedostaci. Zatim će biti analizirana rezonantna metoda sa redno-paralelnom kompenzacijom, koja se dobija dodavanjem kondenzatora [8]. Biće prikazana i praktična realizacija sistema, kao i rezultati merenja dobijeni u toku testiranja sistema.

## II. OSNOVI BEŽIČNOG PRENOSA ENERGIJE

Postoje dve glavne tehnologije koje se trenutno koriste za implementaciju bežičnog prenosa energije:

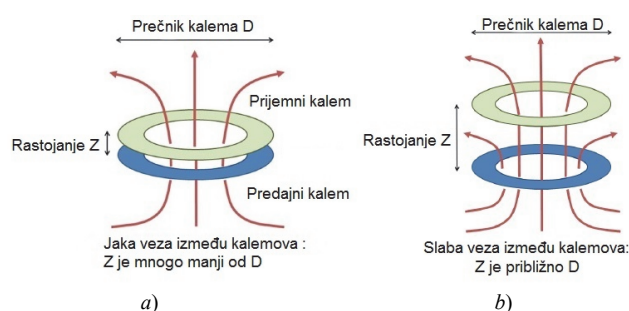
Dejan Janjić – Tehnički remontni zavod Čačak, Dr Dragiše Miševića 167, 32000 Čačak, Srbija (e-mail: dzandz@gmail.com).

Alenka Milovanović – Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet tehničkih nauka u Čačku, Svetog Save 65, 32000 Čačak, Srbija (e-mail: alenka.milovanovic@ftn.kg.ac.rs).

Branko Koprivica – Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet tehničkih nauka u Čačku, Svetog Save 65, 32000 Čačak, Srbija (e-mail: branko.koprivica@ftn.kg.ac.rs).

- induktivna i
- rezonantna.

Obe tehnologije rade po principu spreznja predajnog i prijemnog namotaja u bliskom elektromagnetskom polju i koriste magnetsku spregu da prenesu električnu energiju. Glavna razlika je u tome koliko su namotaji međusobno udaljeni i da li su izrađeni tako da se javlja rezonancija ili ne, kao što je prikazano na Slici 1.



Sl. 1. Ilustracija položaja kalemova za a) induktivnu i b) rezonantnu metodu.

Induktivni prenos energije podrazumeva blisku magnetsku spregu između predajnog kalemova i prijemnog kalemova na relativno malom rastojanju, reda nekoliko milimetara ili centimetara. Ovaj prenos energije se naziva i prenos energije sa jakim spregom. Predajni kalem je povezan na izvor naizmeničnog napona (najčešće u opsegu 100-400 kHz) koji generiše naizmeničnu struju kroz kalem i tako stvara magnetsko polje. Promenljivo magnetsko polje predajnog kalemova se obuhvata prijemnim kalemom u kojem se indukuje naizmenični napon po Faradejevom zakonu, a samim tim i struja prijemnika. Količina prenete energije/snage se kontroliše promenom frekvencije napona u predajnom kalemu. Ova vrsta prenosa električne energije se može uporediti sa prenosom energije pomoću transformatora sa magnetskim jezgrom.

Rezonantna metoda prenosa električne energije se zasniva na magnetskoj rezonanciji između predajnog i prijemnog kalemova. Predajni i prijemni kalem mogu biti i više desetina puta udaljeniji nego kod induktivnog prenosa, što karakteriše slabo spregnute kalemove za bežični prenos energije. Ova vrsta prenosa električne energije se može uporediti sa radio prenosom.

Rezonantni bežični prenos energije ima brojne prednosti u odnosu na induktivni, kao što su:

1. veće rastojanje između predajnog i prijemnog kalemova,
2. veće osno odstupanje između predajnog i prijemnog kalemova koji ne moraju biti postavljeni u osi, kao što je slučaj sa induktivnim prenosom,

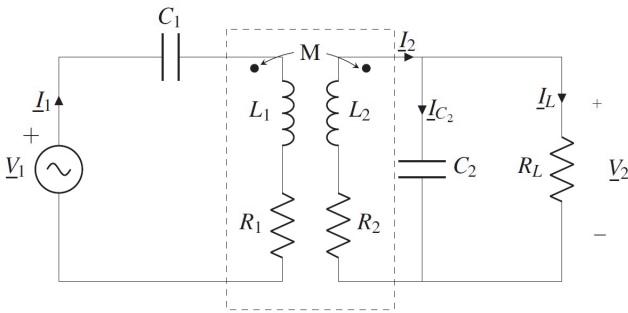
3. jedan predajni kalem može preneti energiju/snagu na više prijemnih kalemova, dok induktivni prenos zahteva više predajnih kalemova, što omogućava prenos snage na više uređaja sa različitim opterećenjima (uređaji sa različitom snagom).

Nedostatak rezonantnog prenosa u nekim slučajevima je niža efikasnost u poređenju sa induktivnim prenosom. Razlog je to što se veći deo polja rasipa oko prijemnog kalema, zbog povećane udaljenosti, što nije slučaj kod induktivne metode.

### III. REZONANTNA METODA SA KOMPENZACIJOM

Za razliku od induktivne metode, rezonantna metoda se zasniva na postojanju reaktivnih (induktivnih i kapacitivnih) delova u predajnom i prijemnom kalema, kako bi sistem radio u rezonantnim uslovima. Zbog dimenzija kalemova, parazitna kapacitivnost nije dovoljna da obezbedi rezonanciju u radnom opsegu frekvencija, određenog primenom sistema za bežični prenos. U skladu sa tim, za postizanje rezonancije u željenom opsegu frekvencija potrebno je na predajnoj i prijemnoj strani dodati reaktivne elemente (najčešće kondenzatore), što se karakteriše kao dodatna kompenzaciona mreža. Tako se mogu realizovati redno-redna, redno-paralelna, paralelno-redna i paralelno-paralelna kompenzaciona metoda.

Šema veza rezonantnog kola sa redno-paralelnom kompenzacijom je prikazan na Slici 2.



Sl. 2. Šema veza rezonantnog kola sa redno-paralelnom kompenzacijom.

Za spregnuto kolo sa Slike 2 se mogu napisati sledeće jednačine po I i II Kirhofovom zakonu i to:

$$\underline{V}_1 = \left( R_1 + j\omega L_1 + \frac{1}{j\omega C_1} \right) \underline{I}_1 - j\omega M \underline{I}_2, \quad (1)$$

$$\underline{V}_2 = -(R_2 + j\omega L_2) \underline{I}_2 + j\omega M \underline{I}_1 = R_L \underline{I}_L = \frac{\underline{I}_L C_2}{j\omega C_2}, \quad (2)$$

$$\underline{I}_2 = \underline{I}_{C_2} + \underline{I}_L, \quad (3)$$

$$\underline{I}_2 = j\omega R_L C_2 \underline{I}_L, \quad (4)$$

gde je  $\omega$  kružna učestanost i  $j^2 = -1$ .

Izjednačavanjem imaginarnog dela ulazne impedanse:

$$\underline{Z}_{ul} = \frac{\underline{V}_1}{\underline{I}_1} = \left( R_1 + j\omega L_1 + \frac{1}{j\omega C_1} \right) + \frac{\omega^2 M^2 (j\omega C_2 R_L + 1)}{R_L + (R_2 + j\omega L_2)(j\omega C_2 R_L + 1)}, \quad (5)$$

sa nulom, može se odrediti rezonantna učestanost kola  $\omega_r$ .

Međutim, u praksi se rezonantna učestanost podešava pomoću parametara prijemnog kola (induktivnosti  $L_2$  prijemnog kalema i kompenzacione kapacitivnosti  $C_2$ ) tako da ona bude jednaka:

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_2}}. \quad (6)$$

Kada kolo radi u režimu rezonancije važe sledeći izrazi [8]:

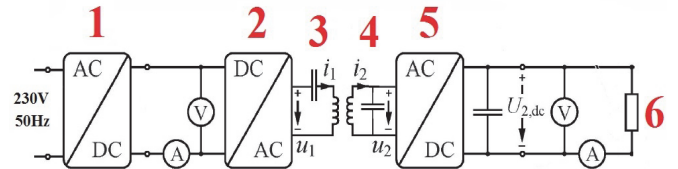
$$\omega_r L_1 - \frac{1}{\omega_r C_1} \approx \frac{\omega_r M^2}{L_2}, \quad (7)$$

$$C_1 \approx \frac{L_2^2 C_2}{L_1 L_2 - M^2}. \quad (8)$$

Izrazom (8) je približno određena vrednost kompenzacione kapacitivnosti  $C_1$  za odabranu induktivnost predajnog kalema  $L_1$ . U slučaju kada je međusobna induktivnost  $M$  mnogo manja od induktivnosti kalemova, odnos kapacitivnosti  $C_1$  i  $C_2$  će biti približno srazmeran odnosu induktivnosti  $L_2$  i  $L_1$ .

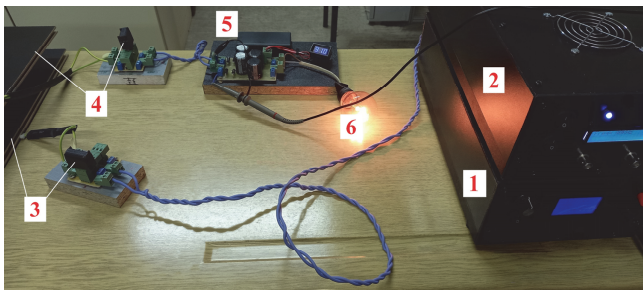
### IV. REALIZACIJA LABORATORIJSKOG SISTEMA

Sistem za bežični prenos energije rezonantnom metodom sa redno-paralelnom kompenzacijom (Slika 1) je realizovan u laboratorijskim uslovima. Sistem se sastoji od: 1) ispravljača naizmeničnog napona 230 V, 50 Hz, 2) pretvarača stalnog napona u naizmenični napon više frekvencije realizovan kao mostni inverter sa MOSFET tranzistorima [9], 3) predajnog kalema sa kompenzacionim kondenzatorom, 4) prijemnog kalema sa kompenzacionim kondenzatorom, 5) ispravljača naizmeničnog napona više frekvencije realizovanog kao Grecov spoj sa brzim diodama i kondenzatorom [9] i 6) aktivnog opterećenja (sijalica sa užarenim vlaknom). Blok šema ovog sistema je prikazana na Slici 3, a odgovarajuće fotografije na Slici 4.

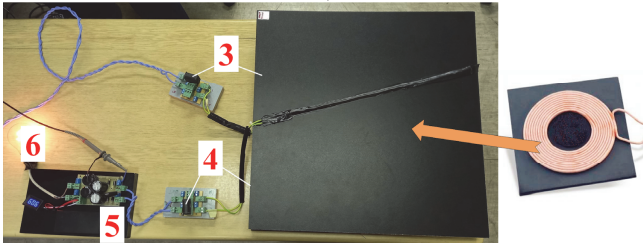


Sl. 3. Blok šema sistema za bežični prenos energije.

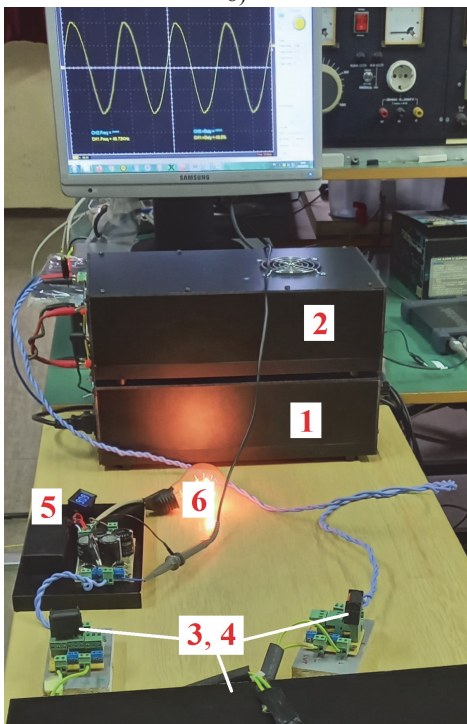
Sistem radi tako što se priključni napon od 230 V, 50 Hz ispravlja pomoću ispravljača 1 i na njegovom izlazu podešava na nivo od 30 V do 50 V, a zatim se taj stalni napon dovodi na ulaz DC u AC pretvarača 2 koji na svom izlazu generiše pravougaoni impulsni napon  $u_1$  amplitude 30-50 V u opsegu frekvencija od 15 kHz do 120 kHz. Tako generisani napon se dovodi na rednu vezu predajnog kalema i kompenzacionog kondenzatora 3. Na izlazu prijemnog kalema 4 se indukuje naizmenični napon  $u_2$  maksimalne amplitude 250-300 V za odabrano opterećenje, frekvencije jednake frekvenciji napona priključenog na predajni kalem 3. Indukovani naizmenični napon se ispravlja pomoću ispravljača 5 i priključuje na prijemnik 6. Ispravljanje napona  $u_2$  je potrebno za većinu praktičnih primena, kao što su napajanje elektronskih uređaja ili punjenje njihovih baterija.



a)



b)



c)

Sl. 4. Fotografije realizovanog laboratorijskog sistema i kalema.

Predajni i prijemni kalem su namotani tako da imaju iste dimenzije i induktivnost, pa su i kompenzacioni kondenzatori izabrani tako da imaju istu kapacitivnost (zanemarujući uticaj međusobne induktivnosti). Podaci o dimenzijama i električnim parametrima sistema su date u Tabeli I.

TABELA I  
PARAMETRI SISTEMA

Unutrašnji prečnik kalemova	375 mm
Spoljašnji prečnik kalemova	440 mm
$L_1, L_2$	100 $\mu$ H
$C_1, C_2$	300 nF

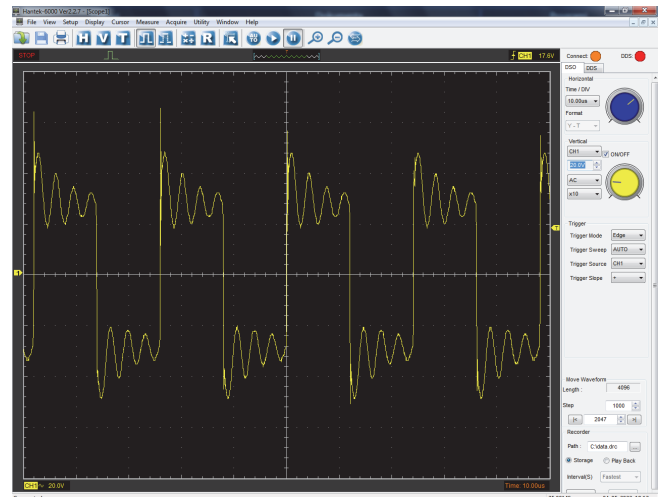
Na osnovu izraza (6) i vrednosti parametara  $L_2$  i  $C_2$  datih u Tabeli 1 određena je rezonantna frekvencija sistema, koja iznosi približno 29,06 kHz.

## V. REZULTATI ISPITIVANJA SISTEMA

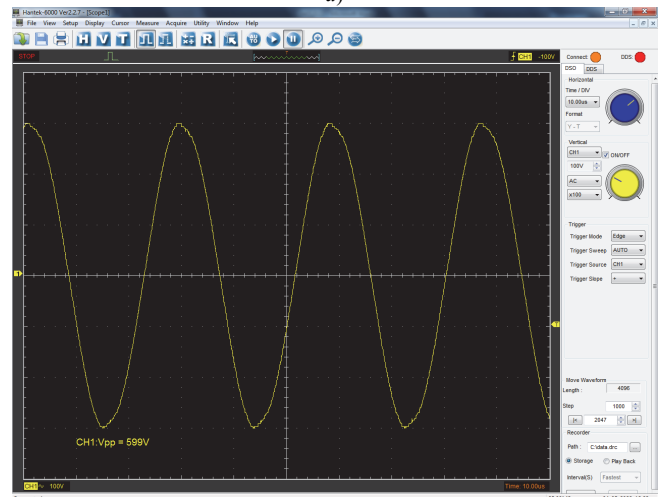
Ispitivanje rada realizovanog sistema za bežični prenos energije je urađeno sa aktivnim opterećenjem, sa jednom ili dve redno vezane sijalice sa užarenim vlaknom od po 100 W. Kalemovi su bili postavljeni na međusodnom rastojanjima od 7 cm do 23 cm.

Merenja napona su vršena pomoću četvorokanalnog USB osciloskopa Hantek 6074 DB. Mereni su stalni naponi na izlazu ispravljača 1, pravougaoni impulsni napon  $u_1$  na izlazu pretvarača 2 i naizmenični napon  $u_2$  na krajevima prijemnog kalema 4. Dodatno, digitalnim voltmetrom je meren stalni napon na izlazu ispravljača 5, što je i napon prijemnika 6.

Na Slici 5 su prikazani snimci ekrana pri merenju napona na pretvaraču 2 i prijemnom kalemu 4.



a)



b)

Sl. 5. Snimci ekrana pri merenju osciloskopom: a) napon  $u_1$  na pretvaraču 2 i b) napon  $u_2$  na prijemnom kalemu 4.

Uočava se da napon  $u_1$  nema sasvim pravougaoni oblik, što je posledica oscilatornog karaktera struje kroz kalem  $L_1$  i

kondenzator  $C_1$  koji su priključeni na taj napon. Sa druge strane napon  $u_2$  ima skoro pravilan sinusoidalni oblik, a frekvencija mu je jednaka frekvenciji napona  $u_1$ .

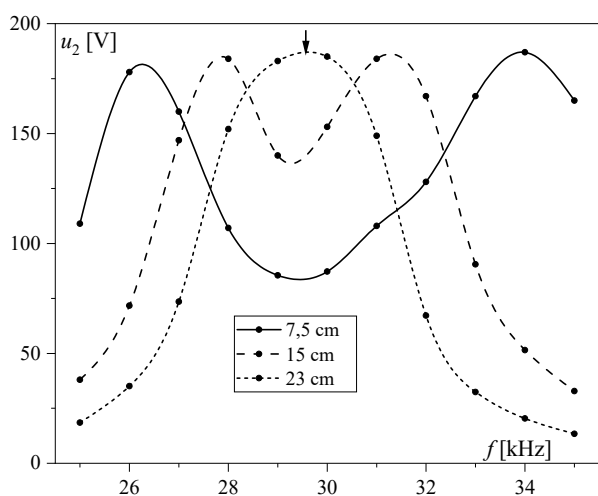
U Tabeli 2 su dati rezultati merenja stalnog napona  $U_2$  i struje  $I_2$  prijemnika, kao i ostvarene aktivne snage  $P_2$ . Prijemnik je realizovan rednom vezom dve sijalice sa užarenim vlaknom naznačene snage od 100 W.

TABELA II  
REZULTATI MERENJA

$I_2$ [A]	$U_2$ [V]	$P_2$ [W]
0,1	14,8	1,48
0,2	82,0	16,4
0,3	193,0	57,9
0,4	334,0	155,6

Detaljnije ispitivanje rada sistema su izvršena sa ciljem određivanja rezonantne učestanosti sistema merenjem napona na prijemniku za različite frekvencije izlaznog napona pretvarača 2. U toku ovakvog merenja se može očekivati da će se najveći napon izmeriti onda kada frekvencija napona pretvarača 2 odgovara rezonantnoj učestanosti sistema. S obzirom na to da je izračunata rezonantna frekvencija približno jednaka 29 kHz, ispitivanja su vršena u frekventnom opsegu od 25 kHz do 35 kHz.

Promena izmerenog napona sa frekvencijom za tri međusobna rastojanja između kalemova je prikazana na Slici 6. Strelicom je označen vrh rezonantne krive, na frekvenciji od 29,57 kHz, dobijene za najveće rastojanje između kalemova. Dobijena vrednost rezonantne frekvencije je veoma bliska proračunatoj vrednosti (29,06 kHz). Na manjim rastojanjima dolazi do razdvajanja maksimuma, koji se postižu za dve frekvencije, jednoj manjoj i jednoj većoj od proračunate. Razlika frekvencija za koje se postižu maksimumi se povećava sa smanjenjem rastojanja između kalemova. Ova pojava je povezana sa vrednošću međusobne induktivnosti  $M$ , koja se povećava sa smanjenjem rastojanja, pa se povećava i njen uticaj na vrednost rezonantne frekvencije, odnosno učestanosti  $\omega_r$ , približno određenu izrazom (7).



Sl. 6. Promena napona na prijemnom kalemu sa frekvencijom.

## VI. ZAKLJUČAK

U ovom radu su dati osnovi metodologije bežičnog prenosa električne energije pomoću spregnutih kalemova i pri tome su ukratko analizirane prednosti i nedostaci induktivne i rezonantne metode. Detaljnije je analiziran slučaj rezonantnog kola sa redno-paralelnom kompenzacijom i određena je rezonantna učestanost kola za poznate parametre kalemova i kompenzacionih kondenzatora. Proračunom je utvrđeno da rezonantna frekvencija iznosi približno 29 kHz.

U radu je prikazana i realizacija laboratorijskog sistema za bežični prenos energije rezonantnim kolom sa redno-paralelnom kompenzacijom. Sistem je testiran u frekventnom opsegu 25-35 kHz, bliskim proračunatoj rezonantnoj frekvenciji. Pri tome su mereni naponi na predajnom i prijemnom kalemu. Rad sistema na frekvencijama od 15 kHz do 120 kHz omogućava njegovo ispitivanje u skladu sa međunarodnim standardima (IEC, ISO, SAE i drugi) u oblasti bežičnog prenosa energije.

Detaljnije ispitivanje sistema je izvršeno za tri međusobna rastojanja između kalemova, pri čemu je meren napon na prijemnom kalemu u odabranom frekventnom opsegu. Pokazana je promena tog napona sa frekvencijom za tri slučaja i utvrđeno je da se maksimum može postići za dve frekvencije kada je rastojanje relativno malo i kada je uticaj međusobne induktivnosti značajan. Sa povećanjem rastojanja se smanjuje uticaj međusobne induktivnosti, pa se maksimum napona dobija na frekvenciji vrlo bliskoj proračunatoj rezonantnoj frekvenciji.

Realizovani laboratorijski sistem za bežični prenos energije će poslužiti kao osnova za nova istraživanja u oblasti koja je veoma aktuelna u svetu, a koja je još uvek nedovoljno istražena. Cilje daljih istraživanja će biti nalaženja novih praktičnih primena bežičnog prenosa energije u elektroenergetici.

## ZAHVALNICA

Istraživanja prezentovana u ovom radu su delimično finansirana sredstvima Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja RS, ugovor br.451-03-68/2022-14/200132 čiji je realizator Fakultet tehničkih nauka u Čačku - Univerziteta u Kragujevcu.

## LITERATURA

- [1] N. Tesla, "System of Transmission of Electrical Energy," Patent No. 645,576, March 1900.
- [2] A. Marinčić, Z. Civrić, B. Milovanović, "Nikola Tesla's Contributions to Radio Developments," *Serb. J. Electr. Eng.*, vol. 3, no. 2, pp. 131-148, Nov. 2006.
- [3] <https://news.mit.edu/2007/wireless-0607>.
- [4] <https://geekologie.com/2008/08/intel-demonstrates-wireless-pow.php>.
- [5] <https://www.sony.com/en/SonyInfo/News/Press/200910/09-119E/>.
- [6] R. Radetić, *Teslin transformator: teorija i praksa*, Niš, Srbija: Agencija Eho, 2019.
- [7] J. M. Cvetić, "Tesla's High Voltage and High Frequency Generators with Oscillatory Circuits," *Serb. J. Electr. Eng.*, vol. 13, no. 3, pp. 301-333, Oct. 2016.
- [8] A. Triviño-Cabrera, J. M. González-González, J. A. Aguado, *Wireless Power Transfer for Electric Vehicles: Foundations and Design Approach*, Cham, Switzerland: Springer Nature, 2020.
- [9] R. Radetić, *Tranzistorski pretvarači*, Bor, Srbija: Grafomed, 2006.

#### ABSTRACT

The aim of this paper is to present the theoretical foundations and realization of the laboratory system for wireless transfer of electric energy. At the beginning, the basic principles of inductive and resonant wireless energy transfer will be considered and their basic advantages and disadvantages will be stated. Further, the resonant method of the implemented system will be described in more details, including the connection scheme and description of the principles of

operation of the transmitting and receiving part of the system, its technical data, presentation of the implemented laboratory system, as well as measurement results and appropriate analysis.

#### **Realization of laboratory system for wireless energy transmission**

Dejan Janjić, Alenka Milovanović i Branko Koprivic