

# Sistem za brezžični prenos energije z dvojnimi DD navitjem

Nataša Prosen<sup>1</sup>, Rok Friš<sup>1</sup>, Jure Domajnko<sup>1</sup>, Mitja Truntič<sup>1</sup>

<sup>1</sup>UM FERl

E-pošta: nataasa.prosen@um.si

## Wireless power transfer using a double DD coil structure

*This paper presents wireless power transfer using a novel double transmitter and receiver coil structure. The proposed coil structure uses two transmitter and receiver double D (DD) coils. The coils are stacked together to form the double DD coil structure. The transmitting side of the wireless power transfer can be used to transfer power through both of the DD coils independently. The magnetic field, generated by the first transmitter coil does not interfere with the magnetic field generated by the second transmitter coil. Because both the transmitter and the receiver coil occupy the same space, the power density of the wireless power transfer system can be increased.*

## 1 Uvod

Število raziskav na področju brezžičnega prenosa energije se je povečalo z naraščanjem razvoja električnih vozil in baterijsko napajanih prenosnih naprav. Brezžični prenos energije se lahko uporablja za polnjenje naprav širokega spektra moči, od nekaj mW do desetine kW. Tako lahko brezžični prenos uporabljamo za brezžično polnjenje medicinskih vsadkov [1], mobilnih telefonov in prenosnih računalnikov [2] ter električnih vozil [3, 4]. Pri brezžičnem prenosu se energija prenaša preko elektromagnetnega polja. Poznamo več različnih tipov brezžičnega prenosa, glede na to, preko katere komponente elektromagnetnega polja se energija prenaša. Prva razdelitev prenosa je na prenose preko bližnjega in preko daljnega polja, glede na valovno dolžino ( $\lambda$ ) polja v primerjavi z velikostjo oddajne antene. Zračna reža med oddajno in sprejemno stranjo je lahko med nekaj milimetri in nekaj metri [5]. V milimetrskem področju se največkrat uporabljata kapacitivni prenos energije (CPT) in induktivni prenos energije (IPT). V področju nekaj decimetrov se največkrat uporablja induktivni brezžični prenos. Na razdalje nekaj metrov se energija največkrat prenaša preko mikrovalov ali laserske svetlobe. Za avtomobilske aplikacije se največkrat uporablja induktivni brezžični prenos. Energija se prenaša preko magnetnega polja s pomočjo oddajnega in sprejemnega navitja. Izmenično magnetno polje, ki ga generira oddajno navitje v sprejemnem navitju inducira izmenično napetost. Koliko magnetnega polja oddajnega navitja se za-

ključi skozi sprejemno navitje povzamemo s koeficientom sklopljenosti. Koeficient sklopljenosti med oddajnim in sprejemnim navitjem močno vpliva na izkoristek sistema za brezžični prenos energije. Ker je koeficient sklopljenosti zaradi zračne reže slab, se energijo prenaša pri višjih frekvencah. Pri električnih vozilih je ta frekvenca navadno 85 kHz [6].

Koeficient sklopljenosti med oddajnim in sprejemnim navitjem je odvisen od geometrijskih lastnosti navitij, razdalje med navitji in poravnosti oziroma neporavnosti navitij. Razdalja med navitji je v tipičnih aplikacijah konstantna. Zaradi tega na koeficient sklopljenosti bolj vpliva neporavnost. Toleranca navitij na neporavnost je odvisna od tipa in velikosti navitij. Klasično ploščato spiralno navitje z neusmerjenim magnetnim poljem, ki se ga najbolj pogosto uporablja, ima slabo toleranco na neporavnost. Kot alternativo klasičnim navitjem, so avtorji v [7] predlagali uporabo navitij z usmerjenim magnetnim poljem in boljšo toleranco na neporavnost. Predlagano navitje je bilo poimenovano dvojno D oziroma DD navitje.

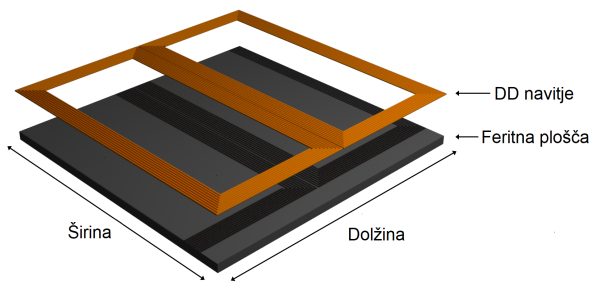
V tem članku je predstavljena nadgradnja DD navitja za potrebe povečanja gostote energije, ki jo z navitjem lahko prenesemo. Nova struktura je sestavljena iz dveh DD navitij, ki lahko ločeno drugo od drugega prenašata energijo ter s tem povečata gostoto energije. Novo navitje je bilo poimenovano dvojno DD navitje.

Članek ima sledečo strukturo. Za uvodom je teoretični opis novega dvojnega DD navitja. Tretje poglavje opisuje strukturo sistema z dvojnimi DD navitjem. Izdelan sistem manjše moči je predstavljen v četrtem poglavju. V petem poglavju so predstavljeni rezultati meritev na sistemu manjše moči. V šestem poglavju so opisane možnosti za nadaljnje delo in sedmo poglavje zajema zaključek članka.

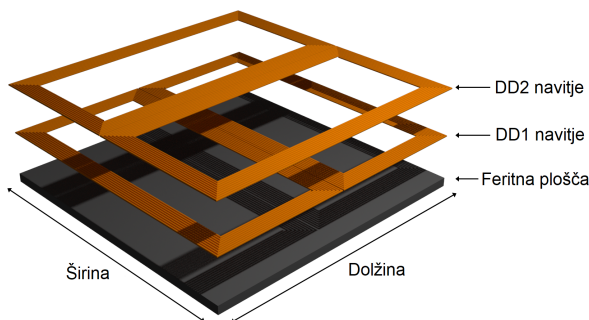
## 2 Novo dvojno DD navitje

Osnovo za dvojno DD navitje predstavlja DD navitje, ki je bilo prvič predstavljeno v [7] leta 2013. Ime DD navitja izvira iz tega, da je sestavljeno iz dveh ploščatih spiralnih D navitij, ki sta vezani zaporedno. Tako posamezni D navitji tvorita eno, DD navitje.

DD navitje generira usmerjeno magnetno polje. Zaradi tega ga lahko uvrstimo med polarna navitja, ki ustvarja magnetni pretok, ki je podoben pretoku, ki ga ustvarja



(a)



(b)

Slika 1: DD in dvojna DD struktura navitij: (a) Sestavni deli DD strukture, (b) Sestavni deli dvojne DD strukture.

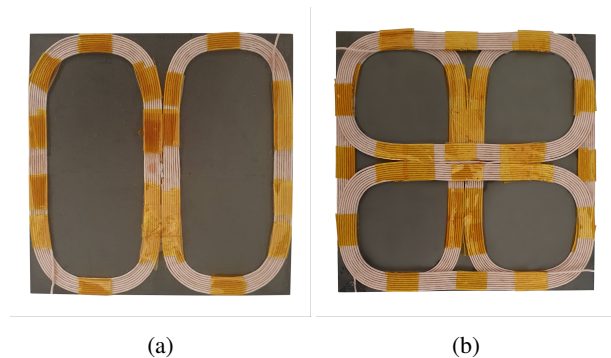
tako imenovana *flux-pipe* oblika navitja [8]. Za razliko pa je DD navitje ploščato, kar pomeni, da zajame manj prostora za namestitvev in implementacijo. Tako lahko DD navitje zamenja klasično nepolarno spiralno ploščato navitje.

Glavna prednost DD navitij pred ostalimi navitji je v tem, da ima boljše toleranco na nepravnanost v eni izmed osi. Os, v smeri katere je DD navitje bolj tolerantno na nepravnanost je tista os, ki je pravokotna na smer glavnega dela magnetnega pretoka. DD navitje ima slabšo toleranco na nepravnanost v osi, ki poteka v smer magnetnega pretoka.

Zaradi tega je DD navitje nesimetrično tolerantno na nepravnanost. Ena izmed možnosti povečanja tolerance v manj tolerantni smeri je, da se DD navitje na sprejemni strani zamenja z DDq navitjem, kar je bilo opisano v [7]. DDq navitje je večplastno navitje, ki je sestavljeno iz DD navitja in spiralnega ploščatega q navitja. Pri tem velja, da DD in q navitji nista magnetno sklopljeni.

Namesto dodatnega q navitja se lahko na DD navitje namesti dodatno DD navitje. Če je med spodnjim DD navitjem in dodatnim zgornjim DD navitjem kot  $90^\circ$ , med navitji ni sklopljenosti. Tako je magnetno polje, ki ga generira spodnje DD navitje pravokotno na magnetno polje ki ga generira zgornjo navitje. Podoben pojav lahko opazimo v [9].

Prvo, spodnje, navitje lahko za lažjo predstavo imenujemo DD1 navitje, drugo navitje pa DD2 navitje. Celo-



(a)

(b)

Slika 2: Navitji z DD in dvojno DD strukturo: (a) DD struktura, (b) Dvojna DD struktura.

tno strukturo lahko imenujemo dvojno DD navitje. DD1 navitje na oddajni strani ne inducira napetosti v DD2 navitju na oddajni strani strani.

Če oddajno dvojno DD navitje ni rotirano na sprejemno dvojno DD navitje, DD1 oddajno navitje prenaša energijo le na DD1 sprejemno navitje in DD2 navitje prenaša energijo le na DD2 sprejemno navitje. Razčlenjeno DD in dvojno DD navitje je predstavljeno na sliki 1. Slika 1a prikazuje strukturo DD navitja, ki je sestavljeno iz enega DD navitja in feritne plošče. Feritna plošča vodi in usmerja magnetni pretok ter ščiti okolico pred magnetnim poljem.

Razčlenjena struktura dvojnega DD navitja je prikazana na sliki 1b. Navitje je sestavljeno iz feritne plošče, spodnjega DD1 navitja in zgornjega DD2 navitja. Kot je bilo prej opisano, sta DD1 in DD2 navitji pravokotni druga na drugo.

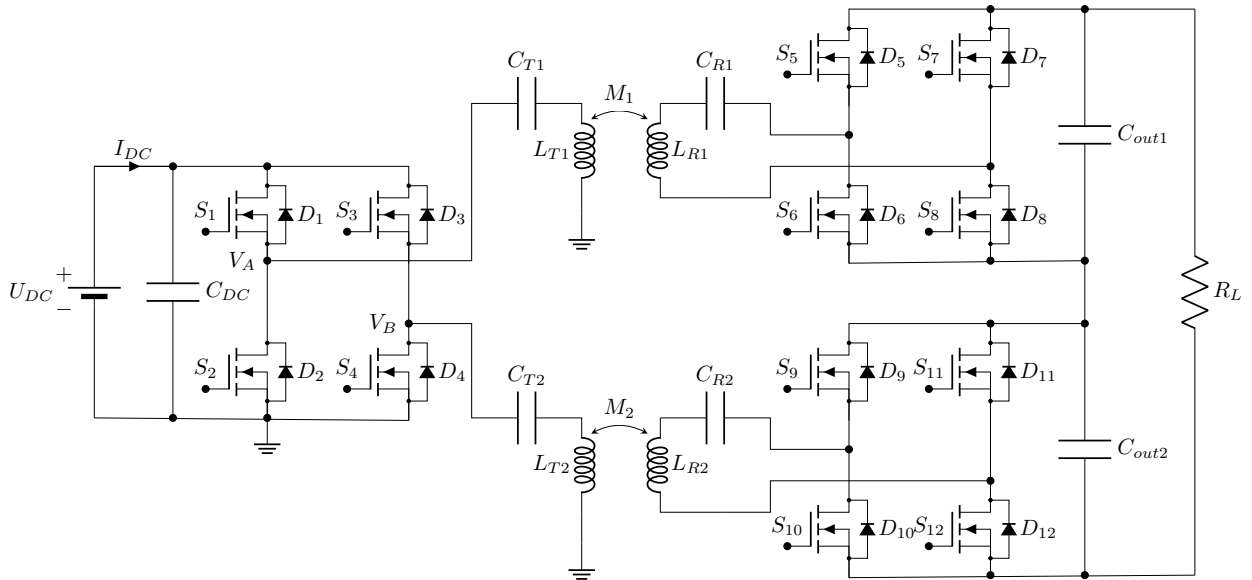
## 2.1 Implementacija dvojnega DD navitja

Da bi preverili teorijo za dvojno DD strukturo navitij smo navili DD in dvojno DD navitje manjše dimenzije. DD navitje smo navili za primerjavo. Izdelani strukturi navitij sta prikazani na sliki 2.

Slika 2a prikazuje izdelano DD strukturo in slika 2b prikazuje izdelano dvojno DD strukturo. Obe strukturi navitij vsebujeta DD navitje z enakimi parametri in dimenzijami, ki so zapisane v tabeli 1. Velikost oddajnega in sprejemnega navitja je bila določena z velikostjo komercialno dostopne feritne plošče. Za navitje smo uporabili 50 žično litz žico proizvajalca ELECTROSOLA. Premer posamezne žičke znotraj snopa je bil 0,071 mm.

Tabela 1: Parametri dvojnega DD navitja.

Parameter	Vrednost
Dimenzije feritne plošče	100 mm × 100 mm
DD1 število ovojev	18 (9 na D del navitja)
DD2 število ovojev	18 (9 na D del navitja)
DD1 induktivnost ( $\mu\text{H}$ )	45
DD2 induktivnost ( $\mu\text{H}$ )	42
DD1 upornost ( $\text{m}\Omega$ )	400
DD2 upornost ( $\text{m}\Omega$ )	400



Slika 3: Sistem za brezžični prenos z dvojno DD strukturo navitij.

### 3 Struktura sistema za brezžični prenos energije

Oddajno navitje z dvojno DD strukturo lahko obravnavamo kakor sistem z več navitji. Vsako izmed navitij lahko vzbujamo s popolnoma ločenim tokom. Struktura sistema, ki ga lahko uporabimo za prenašanje energije s pomočjo navitij z dvojno DD strukturo je prikazana na sliki 3. Sistem je sestavljen iz enofaznega razsmernika, dvojnega DD oddajnega in sprejemnega navitja s kompenzacijskimi kondenzatorji in na koncu dveh sinhronih tranzistorskih usmernikov, povezanih na ohmsko breme. Oddajni DD navitji lahko vzbujamo z enofaznim visokofrekvenčnim razsmernikom. Vsaka izmed tranzistorskih vej se lahko uporablja kakor izhod, na katerega lahko priključimo posamezno DD navitje. Da bi povečali izhodno moč in izkoristek sistema, uporabimo zaporedno kompenzacijo [10]. Resonančna frekvenca vezja je tako določena z lastno induktivnostjo oddajnih in sprejemnih navitij in kapacitivnostjo posameznega kompenzacijskega kondenzatorja. V primeru DD1 navitij je resonančna frekvenca določena z enačbo (1) in v primeru DD2 navitij z enačbo (2).

$$f_{01} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{T1}C_{T1}}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{R1}C_{R1}}} \quad (1)$$

$$f_{02} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{T2}C_{T2}}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{R2}C_{R2}}} \quad (2)$$

pri čemer sta  $f_{01}$  in  $f_{02}$  resonančni frekvenci DD1 in DD2 dela,  $L_{T1}$  in  $L_{T2}$  sta lastni induktivnosti DD navitij v oddajnem dvojnem DD navitju,  $C_{T1}$  in  $C_{T2}$  sta kapacitivnosti kompenzacijskih kondenzatorjev na oddajni strani. Na sprejemni strani predstavljata  $L_{R1}$  in  $L_{R2}$  lastni induktivnosti sprejemnih DD navitij znotraj sprejemnega dvojnega DD navitja,  $C_{R1}$  in  $C_{R2}$  pa sta kapacitivnosti kompenzacijskih kondenzatorjev na sprejemni strani. Ker sta frekvenci  $f_{01}$  in  $f_{02}$  enaki, jih lahko označimo s skupno resonančno frekvenco  $f_0$ .

Sprejemna stran sistema je sestavljena iz dveh sinhronih usmernikov, ki lahko napajata dve ločeni bremen, ali pa samo eno breme. Pri konfiguraciji sistema na sliki 3, se energija prenaša na eno samo breme. Na izhodu je zaradi tega višja napetost.

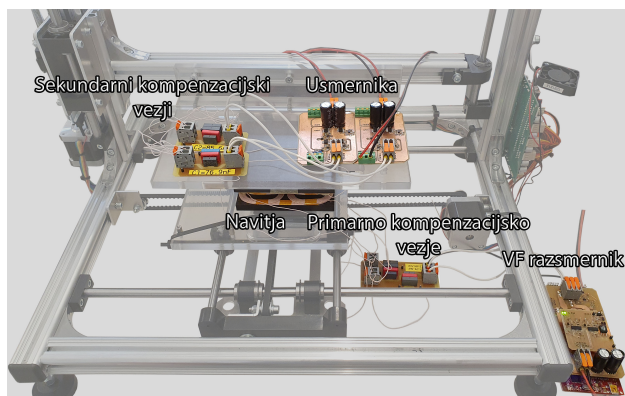
### 4 Sistem za brezžični prenos manjše moči

Za potrditev teoretičnih lastnosti izdelanega DD navitja, smo izdelali sistem manjše moči, ki bi lahko to strukturo tudi uporabljal. Struktura sistema je prikazana na sliki 4. Označeni elementi predstavljajo glavne dele sistema za brezžični prenos energije. Glavni deli so tako visokofrekvenčni razsmernik, oddajno in sprejemno dvojno DD navitje s kompenzacijskimi vezji in sinhrona usmernika. Oddajno in sprejemno navitje sta bila nameščeni na računalniško krmiljen mehanizem za pozicioniranje v prostoru. Mehanizem omogoča bolj natančno postavitve oddajnega in sprejemnega navitja med izvajanjem eksperimenta.

Parametri sistema za brezžični prenos manjše moči so zapisani v tabeli 2. Resonančna frekvenca DD1 dela je enaka resonančni frekvenci DD2 dela, in sicer 85 kHz.

Tabela 2: Parametri sistema za brezžični prenos energije manjše moči.

Parameter	Vrednost
Vhodna napetost (max) $U_{DC}$ (V)	25
Vhodni tok (max) $I_{DC}$ (A)	2
Breme $R_L$ ( $\Omega$ )	20
TX kompenzacija $C_{T1}$ (nF)	75,8
TX kompenzacija $C_{T2}$ (nF)	85,9
RX kompenzacija $C_{R1}$ (nF)	76,9
RX kompenzacija $C_{R2}$ (nF)	85,6
Resonančna frekvenca $f_0$ (kHz)	85



Slika 4: Sistem za brezžični prenos energije manjše moči.

Ker je lastna induktivnost DD2 navitij nekoliko manjša od lastne induktivnosti DD1 navitij, se vrednosti kompenzacijskih kondenzatorjev razlikujejo.

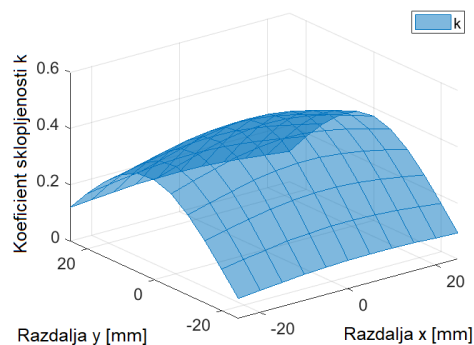
## 5 Eksperimentalni rezultati

Eksperimentalni rezultati so bili razdeljeni na dva dela. V prvem delu je bila opravljena meritev koeficienta sklopljenosti DD in dvojnih DD navitij. V drugem delu je bila opravljena meritev izhodne moči in izkoristka sistema z DD in dvojnimi DD navitjem. Pri meritvi sistema, je bil izmerjen tudi vpliv nepravilnosti v  $x$ - $y$  ravnini na izkoristek. Tako se lahko potrdi vpliv koeficienta sklopljenosti navitij na delovanje sistema.

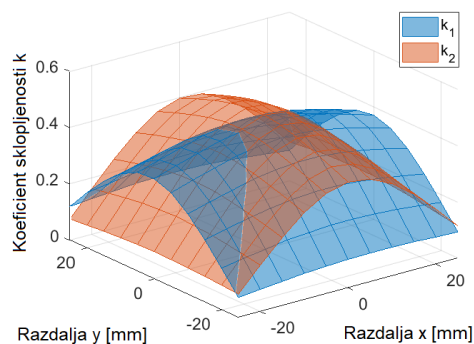
### 5.1 Meritve koeficienta sklopljenosti navitij

Izkoristek sistema za brezžični prenos energije je odvisna od koeficienta sklopljenosti med oddajnim in sprejemnim navitjem. DD navitja so bolj tolerantna na horizontalno nepravilnost v eni izmed osi. Os tolerance je pravokotna glede na smer glavnega dela magnetnega pretoka, ki ga generira DD navitje. Zaradi tega je upad koeficienta sklopljenosti v eni izmed osi manjši. Da bi preverili toleranco na nepravilnost, smo opravili meritve koeficienta sklopljenosti v  $x$ - $y$  ravnini.

Rezultati meritev so prikazani na sliki 5. DD navitji in dvojni DD navitji sta bili nepravilni za  $\pm 25$  mm v smeri  $x$  in  $y$  osi, pri fiksni razdalji  $z$  med navitji. Slika 5a prikazuje meritev koeficienta sklopljenosti DD navitij v  $x$ - $y$  ravnini. Na podlagi rezultatov lahko sklepamo, da sta DD navitji tolerantni na nepravilnost v  $x$  smeri. Slika 5b prikazuje meritev koeficienta sklopljenosti dvojnih DD navitij. Ker sta dvojni DD navitji sestavljeni iz dveh navitij, imenovanih DD1 in DD2 slika prikazuje dva koeficienta sklopljenosti. Koeficient sklopljenosti med dvema DD1 navitjema je označen z modro barvo in koeficient sklopljenosti med dvema DD2 navitjema je označen z oranžno barvo. DD1 navitji izkazujejo boljšo toleranco na nepravilnost v  $x$  osi in DD2 navitji izkazujejo boljšo toleranco na nepravilnost v  $y$  osi. Vpliv razdalje  $z$  med navitji na koeficient sklopljenosti, pri popolni poravnosti navitij je prikazan na sliki 6. Razdalja  $z$  se je spreminjala med 15 mm in 95 mm. Koeficient sklopljenosti  $k_1$  med DD1 navitji je označen z modro črto in koefi-



(a)

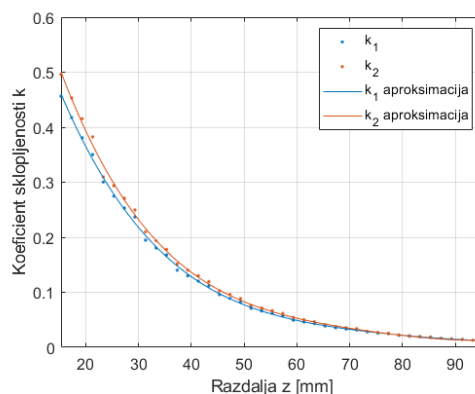


(b)

Slika 5: Meritev koeficienta sklopljenosti v  $x$ - $y$  ravnini pri razdalji  $z = 15$  mm: (a) DD navitji, (b) dvojni DD navitji.

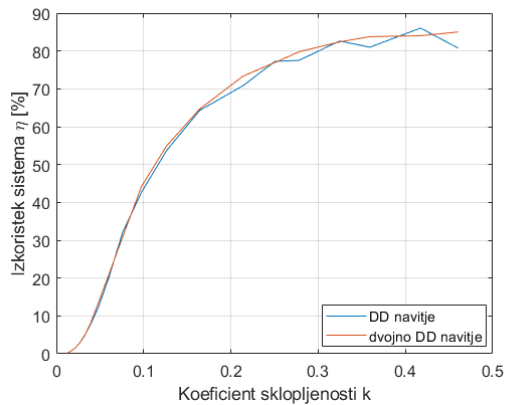
ent sklopljenosti  $k_2$ , med DD2 navitji je označen z rdečo črto. Ker sta DD2 navitji postavljeni na DD1 navitji, je razdalja med DD2 navitji krajša. Zaradi tega je koeficient sklopljenosti  $k_2$  nekoliko večji, kakor koeficient sklopljenosti  $k_1$ . Razlika med koeficientoma ni velika, še posebej pri daljših razdaljah. V obeh primerih, je bil koeficient sklopljenosti pri razdalji  $z = 15$  mm manjši od 0,5. Z naraščanjem razdalje sta koeficienta eksponentno upadala.

Koeficient sklopljenosti med dvema DD navitjema je enak kakor koeficient sklopljenosti med DD1 navitji dvojne DD strukture.

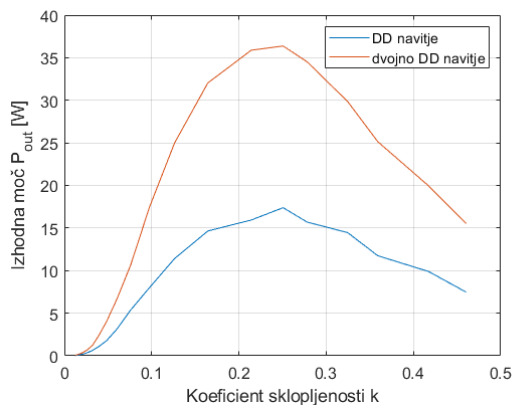


Slika 6: Meritev koeficienta sklopljenosti med dvojnimi DD navitji v  $z$  osi.





(a)



(b)

Slika 7: Meritve na sistemih za brezžični prenos energije: (a) meritev izkoristka, (b) meritev izhodne moči.

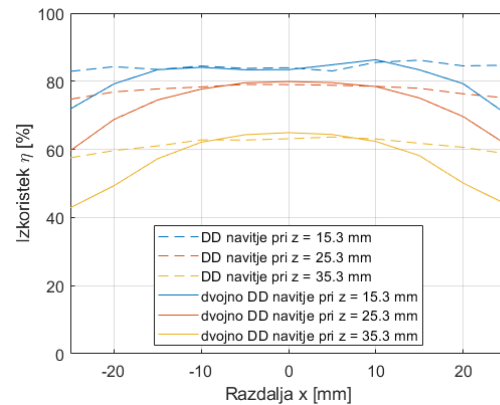
## 5.2 Meritve na sistemu za brezžični prenos moči

Da bi preverili delovanje dvojne DD strukture navitij, smo sistem z DD navitji primerjali s sistemom z dvojno DD strukturo navitij. V obeh primerih smo visokofrekvenčni razsmernik napajali z enako enosmerno napetostjo napetostjo, ne glede na vhodni tok. Primerjava med sistemom z DD navitji in sistemom z dvojnimi DD navitji je prikazana na sliki 7.

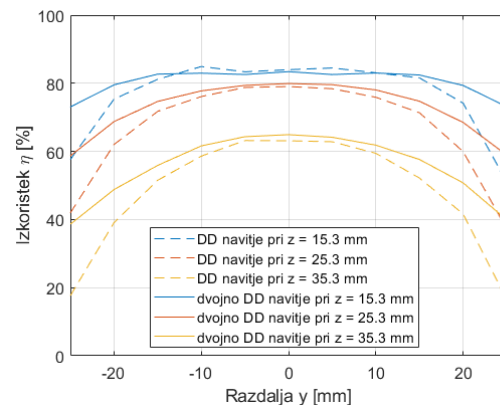
Slika 7a prikazuje vpliv koeficienta sklopljenosti na izkoristek sistema. Izkoristek sistema z DD navitji je označen z modro barvo in izkoristek sistema z dvojnimi DD navitji je označen z rdečo barvo. Izkoristek sistema z DD navitji je enak izkoristku sistema z dvojnimi DD navitji. Iz tega lahko sklepamo, da je dvojna DD struktura navitij ne vpliva na izkoristek prenosa energije.

Slika 7b prikazuje vpliv koeficienta sklopljenosti na izhodno moč sistema. Izhodna moč sistema z DD navitji je označena z modro barvo in izhodna moč sistema z dvojnimi DD navitji je označena z rdečo barvo. Sistem z dvojnimi DD navitji omogoča 100% povečanje izhodne moči v primerjavi s sistemom, ki uporablja DD navitji.

Slika 8 prikazuje vpliv nepravnanosti na izkoristek sistema. Slika 8a prikazuje meritev izkoristka v primeru nepravnanosti v  $x$  osi in slika 8b prikazuje meritev izkoristka v primeru nepravnanosti v  $y$  osi. Meritve so



(a)



(b)

Slika 8: Primerjava vpliva nepravnanosti na izkoristek sistema z DD in dvojnimi DD navitji: (a) v  $x$  smeri, (b) v  $y$  smeri.

opravljene pri treh različnih razdaljah  $z$  med navitji. Rezultati meritev na DD navitjih so označeni z črtkano črto in rezultati meritev na dvojnih DD navitjih so označeni s polno črto.

V primeru nepravnanosti v  $x$  osi, na sliki 8a, ima sistem, ki uporablja DD navitji boljši izkoristek od sistema, ki uporablja dvojni DD navitji. DD navitji sta namreč tolerantni na nepravnanost v  $x$  osi. Enako velja za DD1 navitji pri dvojnih DD navitjih. DD2 navitji pri dvojnih DD navitjih sta netolerantni na nepravnanost v  $x$  osi. Zaradi tega je izkoristek dvojnih DD navitjih manjši.

V primeru nepravnanosti v  $y$  osi, na sliki 8b, ima sistem, ki uporablja dvojni DD navitji boljši izkoristek od sistema, ki uporablja DD navitji. DD navitji sta namreč netolerantni na nepravnanost v  $y$  smeri. Pri dvojnih DD navitjih sta DD1 navitji netolerantni na nepravnanost v  $y$  smeri, DD2 navitji pa sta na nepravnanost tolerantni. Zaradi tega je izkoristek sistema z dvojnimi DD navitji večji.

Sistem z dvojnimi DD navitji je med drugim tudi simetrično toleranten na nepravnanost v  $x$ - $y$  ravnini, v primerjavi s sistemom z DD navitjem, ki izkazuje nesimetrično toleranco na nepravnanost.

## 6 Možnosti za nadaljnje delo

Nova dvojna DD oblika oddajnega in sprejemnega navitja odpira možnosti za nadaljnji razvoj. Ena izmed možnosti je razvoj novih algoritmov za detekcijo tujkov v magnetnem polju med oddajnim in sprejemnim navitjem. Pri tem se bi lahko uporabila sama struktura dvojnega DD navitja, brez potrebe po dodatnih merilnih tuljavicah. Dvojno DD navitje bi lahko tudi uporabili za prenos na klasično DD navitje, ki bi bilo lahko tako neodvisno od rotacije. V nadaljevanju se na sistemu z dvojnimi DD navitjem lahko tudi implementira napetostno in tokovno regulacijo za potrebe polnjenja baterij.

## 7 Zaključek

V tem članku je predstavljen razvoj nove strukture večplastnih navitij, ki je poimenovana dvojno DD navitje. Struktura omogoča prenos večje gostote energije v primerjavi s klasičnim DD navitjem. Dvojno DD navitje je sestavljeno iz dveh DD navitij, označenih z DD1 in DD2, ki sta med seboj rotirani za  $90^\circ$ . Med navitjema DD1 in DD2 ni koeficienta sklopjenosti. Vsako izmed navitij lahko tako ločeno prenaša energijo na sprejemno stran. Rezultat tega je povečana gostota energije, ki jo sistem lahko prenese. Ker navitji DD1 in DD2 nista sklopljeni, se izkoristek sistema ne zmanjša. Dodatna lastnost dvojnega DD navitja je tudi simetrična toleranca na poravnost v  $x$  in  $y$  smeri.

## Literatura

- [1] Khan, Sadeque R., Sumanth K. Pavuluri, Gerard Cummins, and Marc P.Y. Desmulliez. 2020. "Wireless Power Transfer Techniques for Implantable Medical Devices: A Review" *Sensors* 20, no. 12: 3487. <https://doi.org/10.3390/s20123487>.
- [2] Yungtaek Jang and M. M. Jovanovic, "A contactless electrical energy transmission system for portable-telephone battery chargers," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 50, no. 3, pp. 520-527, June 2003, doi: 10.1109/TIE.2003.812472.
- [3] Triviño, Alicia, José M. González-González, and José A. Aguado. 2021. "Wireless Power Transfer Technologies Applied to Electric Vehicles: A Review" *Energies* 14, no. 6: 1547. <https://doi.org/10.3390/en14061547>
- [4] G. Buja, M. Bertoluzzo and K. N. Mude, "Design and Experimentation of WPT Charger for Electric City Car," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, no. 12, pp. 7436-7447, Dec. 2015, doi: 10.1109/TIE.2015.2455524.
- [5] J. Dai and D. C. Ludois, "A Survey of Wireless Power Transfer and a Critical Comparison of Inductive and Capacitive Coupling for Small Gap Applications," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 30, no. 11, pp. 6017-6029, Nov. 2015, doi: 10.1109/TPEL.2015.2415253.
- [6] SAE International J2954 Taskforce about Wireless Power Transfer for Light-Duty Plug-in/Electric Vehicles and Alignment Methodology. Available online: [https://www.sae.org/standards/content/j2954\\_202010/](https://www.sae.org/standards/content/j2954_202010/) (accessed on 22 February 2022)
- [7] M. Budhia, J. T. Boys, G. A. Covic and C. Huang, "Development of a Single-Sided Flux Magnetic Coupler for Electric Vehicle IPT Charging Systems," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, no. 1, pp. 318-328, Jan. 2013, doi: 10.1109/TIE.2011.2179274.
- [8] M. Budhia, G. Covic and J. Boys, "A new IPT magnetic coupler for electric vehicle charging systems," *IECON 2010 - 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, 2010, pp. 2487-2492, doi: 10.1109/IECON.2010.5675350.
- [9] C. Cheng, W. Li, Z. Zhou, Z. Deng and C. Mi, "A Load-Independent Wireless Power Transfer System With Multiple Constant Voltage Outputs," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 35, no. 4, pp. 3328-3331, April 2020, doi: 10.1109/TPEL.2019.2940091.
- [10] W. Zhang and C. C. Mi, "Compensation Topologies of High-Power Wireless Power Transfer Systems," in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 65, no. 6, pp. 4768-4778, June 2016, doi: 10.1109/TVT.2015.2454292.