

Primena neuronskih mreža u analizi rada sistema za bežični prenos energije

Dejan Janjić, Srđan Divac, Aleksandar Ranković, Branko Koprivica

Apstrakt—Cilj ovog rada je prikaz mogućnosti primene neuronskih mreža u analizi rada sistema za bežični prenos električne energije radi predviđanja stanja sistema pri željenim uslovima primene. Izvršena su eksperimentalna ispitivanja sa laboratorijskim sistemom za bežični prenos energije i odredene su promene napona i snage na prijemniku i efikasnosti prenosa snage u zavisnosti od rastojanja između kalemova i radne frekvencije sistema. Na osnovu eksperimentalnih rezultata izvršeno je treniranje neuronske mreže u programskom paketu MATLAB. U radu su prikazana poređenja rezultata dobijenih pomoću neuronske mreže i eksperimentalnih rezultata. Takođe, analizirano je relativno odstupanje između proračunatih i eksperimentalnih rezultata i data je odgovarajuća diskusija.

Ključne reči— Veštačka neuronska mreža; bežični prenos energije; rezonantna frekvencija; relativno odstupanje.

I. UVOD

Neuronske mreže imaju široku primenu u oblasti elektroenergetike, uključujući i bežični prenos električne energije [1, 2]. S obzirom na složenost takvog sistema, formiranje dovoljno tačnog i sveobuhvatnog analitičkog modela je veoma zahtevno, jer je potrebno povezati veći broj ulaznih veličina i parametara (geometrijski oblik, dimenzije, prostorni položaj, nivo napona i struje, radnu frekvenciju i drugo) sa više izlaznih veličina (nivo napona i struje, snaga, efikasnost), kao i sa režimom rada i primenom. Jedno od rešenja za to je primena neuronskih mreža.

Osnove za realizaciju sistema za bežični prenos energije rezonantnom metodom su detaljno analizirane u literaturi [3], a opis realizacije laboratorijskog sistema je opisan u radu [4]. Eksperimentalnim ispitivanjem je utvrđeno da se izlazni napon menja po složenom zakonu sa promenom rastojanja između kalemova i frekvencije. Kako bi se detaljnije ispitala ta promena, naknadno je eksperimentalno ispitivanje ponovljeno sa manjim korakom promene rastojanja od 1 cm (počev od 10 cm do 25 cm) i manjim korakom promene frekvencije od 1 kHz (počev od 20 kHz do 40 kHz). Pri tome

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

Srđan Divac – Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet tehničkih nauka u Čačku, Svetog Save 65, 32000 Čačak, Srbija (e-mail: srdjan.divac@ftn.kg.ac.rs), ORCID ID (<https://orcid.org/0000-0002-7093-9529>).

Aleksandar Ranković – Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet tehničkih nauka u Čačku, Svetog Save 65, 32000 Čačak, Srbija (e-mail: aleksandar.rankovic@ftn.kg.ac.rs), ORCID ID (<https://orcid.org/0000-0002-7205-9584>).

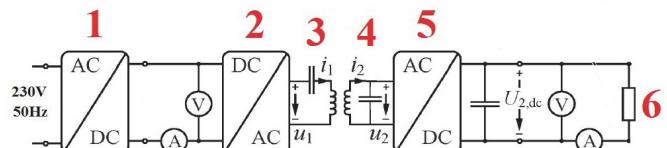
Branko Koprivica – Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet tehničkih nauka u Čačku, Svetog Save 65, 32000 Čačak, Srbija (e-mail: branko.koprivica@ftn.kg.ac.rs), ORCID ID (<https://orcid.org/0000-0001-5014-6866>).

je izvršeno merenje struje i napona jednosmernog izvora napajanja i jednosmerne struje i napona prijemnika, a zatim je izvršen proračun ulazne i izlazne snage sistema i njegova efikasnost. Ukupno 336 merenja je upotrebljeno za treniranje neuronske mreže. Naknadno je izvršeno još 41 merenje, za rastojanja i frekvencije drugih vrednosti, kako bi se izvršila testiranja neuronske mreže.

U ovom radu će biti prikazani rezultati eksperimentalnog ispitivanja laboratorijskog sistema za bežični prenos energije. Zatim će biti date osnovne informacije o primeni neuronskih mreža za analizu rada sistema, informacije o treniranju mreže u programu MATLAB, a biće i prikazani rezultati za izlazni napon i snagu sistema, kao i efikasnost, dobijeni pomoću neuronske mreže. Ovi rezultati će biti upoređeni sa odgovarajućim merenim rezultatima. Na kraju će biti analizirano relativno odstupanje između proračunatih i izmerenih rezultata i biće data odgovarajuća diskusija.

II. OPIS LABORATORIJSKOG SISTEMA

Blok šema laboratorijskog sistema za bežični prenos električne energije je prikazana na Sl. 1.



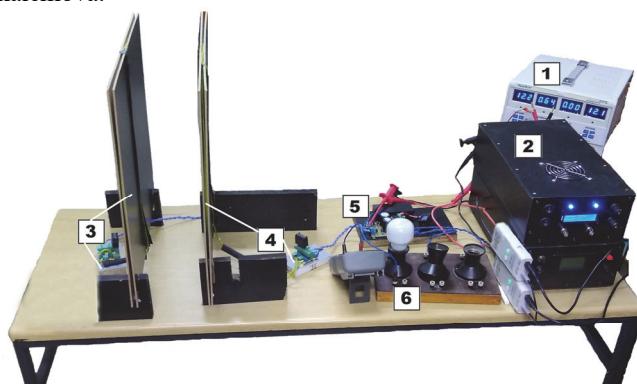
Sl. 1. Blok šema sistema za bežični prenos energije.

Sistem se sastoji od sledeće opreme: 1) izvor DC napona od 0-30 V, 5 A, 2) DC/AC pretvarač napona, 3) redne veze predajnog kalemova i kompenzacionog kondenzatora, 4) paralelne veze prijemnog kalemova i kompenzacionog kondenzatora, 5) ispravljač AC napona i 6) prijemnika u vidu sijalice sa užarenim vlaknom.

Jednosmerni napon od 12 V sa izvora DC napona 1 se dovodi na ulaz DC/AC pretvarača 2 koji generiše pravougaoni AC napon amplitude 0-30 V na frekvencijama od 15 kHz do 120 kHz. Ovaj AC napon se dovodi na predajni kalem 3, koji je spregnut sa prijemnim kalemom 4. Na izlazu prijemnog kalemova 4 se javlja AC napon frekvencije jednake frekvenciji napona priključenog na predajni kalem 3. AC napon sa kalemom 4 se ispravlja u ispravljaču 5 i dovodi na prijemnik 6.

Fotografija opisanog sistema je prikazana na Sl. 2. Podaci o dimenzijama i električnim parametrima sistema kalemova su dati u Tabeli I. Kalemovi imaju iste dimenzije i induktivnost, a kompenzacioni kondenzatori istu kapacitivnost. Njihove induktivnosti i kapacitivnosti su izmerene univerzalnim RLC

mostom PeakTech 2170. Međusobna induktivnost kalemova nije određivana, jer se menja sa promenom rastojanja između kalemova.



Sl. 2. Laboratorijski sistem za bežični prenos električne energije.

TABELA I
PARAMETRI SISTEMA

Unutrašnji prečnik kalemova [mm]	375
Spoljašnji prečnik kalemova [mm]	440
$L_1, L_2 [\mu\text{H}]$	100
$C_1, C_2 [\text{nF}]$	300

III. REZULTATI EKSPERIMENTALNIH ISPITIVANJA

Ispitivanje rada realizovanog sistema za bežični prenos energije je urađeno sa aktivnim opterećenjem, sa jednom sijalicom sa užarenim vlaknom od 100 W, što je znatno veće od snaga ostvarenih u konkretnim merenjima i što daje veći stepen sigurnosti u slučaju nepredviđenih stanja u sistemu.

Detaljnija ispitivanja rada sistema su izvršena sa ciljem određivanja promene napona i snage na prijemniku i efikasnosti prenosa snage u zavisnosti od rastojanja i frekvencije rada sistema. Može se očekivati da će najveći napon biti kada frekvencija napona DC/AC pretvarača 2 odgovara rezonantnoj učestanosti sistema. S obzirom na to da je prethodno izračunata rezonantna frekvencija približno jednaka 29 kHz [4], ispitivanja su vršena u frekventnom opsegu od 20 kHz do 40 kHz. Kalemovi su bili postavljani na međusobnim rastojanjima od 10 cm do 25 cm, sa korakom od 1 cm.

Merenje frekvencije je vršeno pomoću USB osciloskopa Hantek 6074 DB. Takođe, mereni su stalni napon U_{V1} (održavan na 12 V) i struja I_{A1} na izlazu izvora DC napona 1, kao i stalni napon U_{V2} i struja I_{A2} prijemnika 6.

U Tabeli II su dati rezultati jednog seta merenja, za rastojanje između prijemnog i predajnog kalema $d = 10$ cm. Prikazane su vrednosti izmerene frekvencije f , stalne struje I_{A1} , stalnog napona U_{V2} i struje I_{A2} prijemnika.

Na osnovu rezultata datih u Tabeli II su izračunate ulazna i izlazna aktivne snaga sistema P_1 i P_2 , kao i efikasnost sistema η . Ovi rezultati su prikazani u Tabeli III.

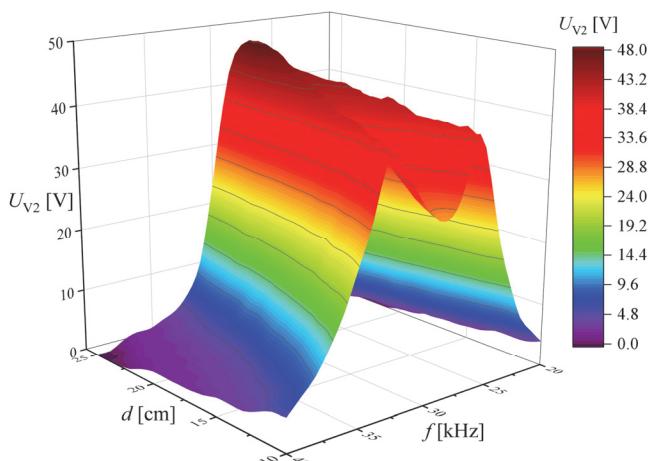
Jedan set merenja ima 21 pojedinačno merenje ulaznih i izlaznih parametara sistema. Za potrebe ovog ispitivanja i pripreme baze podataka za treniranje veštačke neuronske mreže izvršeno je 16 setova merenja, što ukupno daje 336 pojedinačnih merenja. Ovi rezultati, za izlazni napon, snagu prijemnika i efikasnost sistema su prikazani grafički na 3D dijagramima, Sl. 3-5.

TABELA II
REZULTATI JEDNOG SETA MERENJA ZA $U_{V1}=12$ V I $d=10$ cm

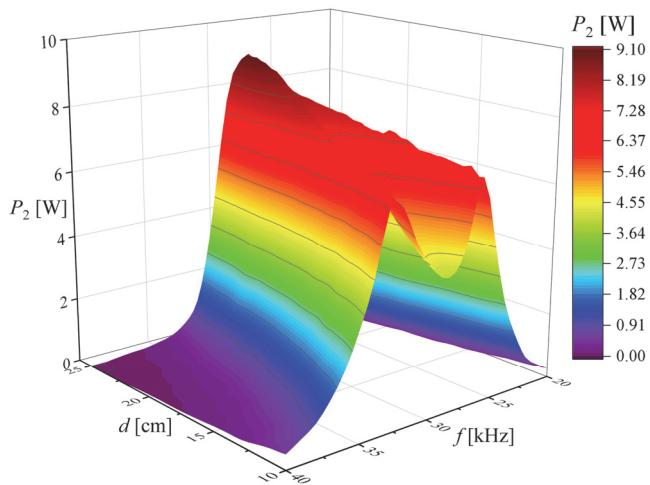
$f[\text{Khz}]$	$I_{A1} [\text{A}]$	$U_{V2} [\text{V}]$	$I_{A2} [\text{A}]$
40	0,18	5,30	0,084
39	0,24	7,60	0,095
38	0,30	9,90	0,102
37	0,40	13,60	0,113
36	0,54	18,00	0,125
35	0,70	23,90	0,138
34	0,88	30,00	0,152
33	1,08	38,30	0,168
32	0,93	37,80	0,168
31	0,69	33,50	0,158
30	0,56	30,00	0,152
29	0,47	27,70	0,147
28	0,47	27,90	0,148
27	0,61	32,30	0,157
26	0,90	39,50	0,171
25	0,81	32,40	0,151
24	0,51	21,90	0,132
23	0,35	14,80	0,117
22	0,21	9,00	0,098
21	0,15	6,40	0,084
20	0,11	4,00	0,068

TABELA III
IZRAČUNATE SNAGE I EFIKASNOST SISTEMA ZA SET MERENJA IZ TABELE II

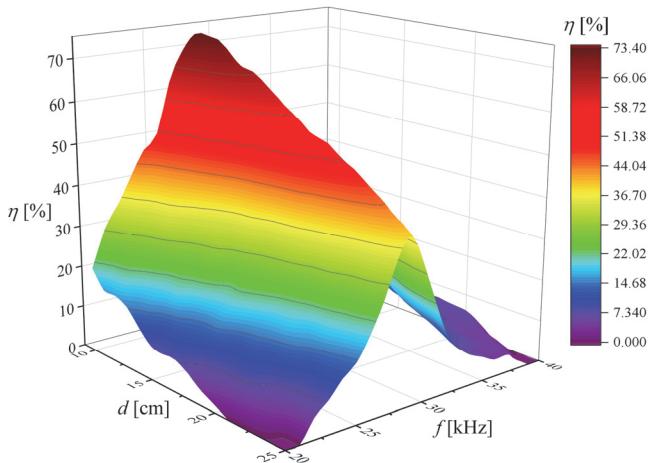
$f[\text{Khz}]$	$P_1 [\text{W}]$	$P_2 [\text{W}]$	$\eta [\%]$
40	2,160	0,445	20,61
39	2,880	0,722	25,07
38	3,600	1,010	28,05
37	4,800	1,537	32,02
36	6,480	2,250	34,72
35	8,400	3,298	39,26
34	10,560	4,560	43,18
33	12,960	6,434	49,65
32	11,160	6,350	56,90
31	8,280	5,293	63,93
30	6,720	4,560	67,86
29	5,640	4,072	72,20
28	5,640	4,129	73,21
27	7,320	5,071	69,28
26	10,800	6,755	62,54
25	9,720	4,892	50,33
24	6,120	2,891	47,24
23	4,200	1,732	41,23
22	2,520	0,882	35,00
21	1,800	0,538	29,87
20	1,320	0,272	20,61



Sl. 3. Promena izlaznog napona pri promeni rastojanja između kalemova i frekvencije.



Sl. 4. Promena snage prijemnika pri promeni rastojanja između kalemova i frekvencije.



Sl. 5. Promena efikasnosti pri promeni rastojanja između kalemova i frekvencije.

Na Sl. 3 i 4 se može uočiti pojava dva vrha u izlaznom naponu i snazi kada su kalemovi na najmanjem rastojanju, dok se takva promena ne uočava kod efikasnosti (Sl. 5). Dva vrha se javljaju zbog uticaja međusobne induktivnosti na promenu rezonantne učestanosti sistema. Takođe, može se uočiti da se maksimalni napon i snaga dobijaju pri najvećem

rastojanju, kada je uticaj međusobne induktivnosti manji, dok je u tom slučaju efikasnost sistema najmanja. Ovo ukazuje na složenost sistema u smislu predviđanja rada sistema, odnosno određivanja njegovog modela. Zbog svega navedenog se zaključuje da je u te svrhe opravdano primeniti neuronske mreže.

IV. VEŠTAČKE NEURONSKE MREŽE

U oblasti istraživanja podataka i kognitivnih procesa, veštačke neuronske mreže su grupa statističkih modela koji su inspirisani biološkim neuronskim mrežama. One se koriste za aproksimaciju funkcija koje zavise od velikog broja ulaznih podataka, a koje su inače nepoznate. Veštačke neuronske mreže se sastoje od međusobno povezanih neurona koji međusobno razmenjuju poruke. Ove veze imaju numeričke težine koje se mogu menjati u zavisnosti od iskustva, što omogućava neuronskim mrežama da se prilagode i da uče.

Osnovni cilj veštačkih neuronskih mreža je simulacija većeg broja međusobno povezanih neurona, tako da se može naučiti pojам, prepoznati uzorak i doneti odluka na način sličan onom u ljudskom mozgu. Neuronska mreža nije eksplicitno programirana za učenje, već uči sama, na sličan način kao i mozak. U suštini, veštačke neuronske mreže su softverske simulacije koje se kreiraju programiranjem običnih računara tako da rade kao milijarde međusobno povezanih neurona u mozgu, koji rade paralelno.

Tok podataka kroz neuronsku mrežu se odvija na dva načina. Kada mreža uči, informacije se šalju ulaznim slojem, koji zatim aktivira skrivene slojeve, da bi na kraju podaci završili u izlaznom sloju. Ovaj tip neuronske mreže se naziva mreža propagacije unapred (*Feedforward Artificial Neural Networks - FF ANN*).

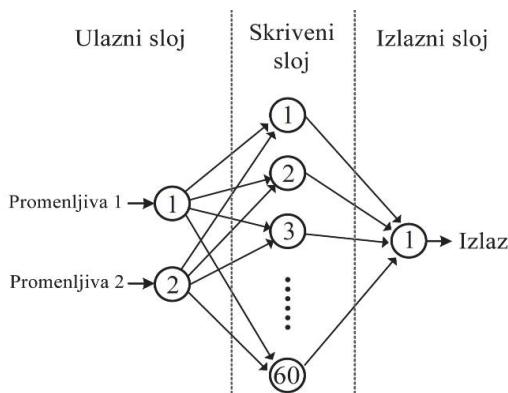
FF ANN su prvi tip ANN koji je osmišljen. Glavna osobina ovih mreža je da zavisnost između podataka nije ciklična, što znači da izlazni podatak zavisi samo od podataka na ulazu, a ne od prethodnih izlaza. Ove mreže nemaju povratnu spregu i podaci se kreću samo unapred, od ulaza ka izlazu [5, 6].

U opštem slučaju, FF ANN se sastoje od tri sloja: ulaznog sloja (*Input Layer*), skrivenog sloja (*Hidden Layer*) i izlaznog sloja (*Output Layer*). Broj neurona u skrivenom sloju direktno utiče na tačnost i preciznost mreže, ali preveliki broj neurona može dovesti do pre-treninga (*Overtraining*) ANN i smanjenja tačnosti [6]. FF ANN je grafički prikazana na Sl. 6.

Signal na izlazu FF ANN y_j se dobija kao rezultat aktivacione formule [6]:

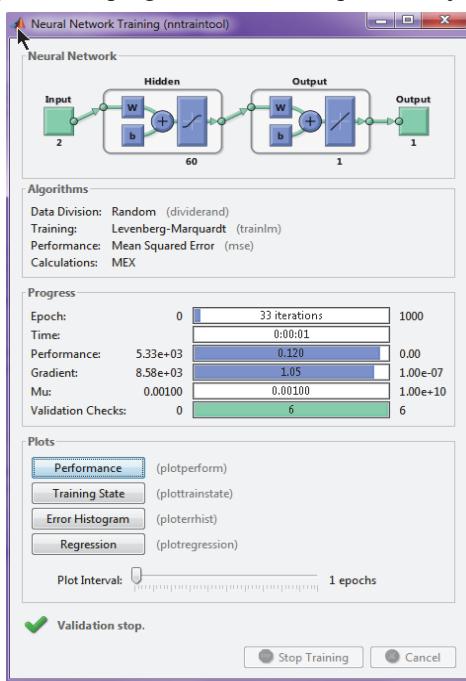
$$y_j = f \left(\sum_{i=1}^n (w_{ij} x_i + \theta_j) \right), \quad (1)$$

gde su y_j izlazni podaci, w_{ij} težinski faktori, x_i ulazni podaci, θ_j vrednost pragova (nagiba) aktivacione funkcije (bias) i n broj neurona u skrivenom sloju. Vrednosti težinskih faktora i pragova se zadaju inicijalno u procesu treninga mreže i predstavljaju slučajne (*Random*) vrednosti. Proces dodavanja slučajnih vrednosti prethodno navedenim faktorima obavlja se više puta u toku treninga ANN i to prema kriterijumu minimalnog odstupanja dobijene od željene vrednosti izlaznog signala. Verifikacija tačnosti dobijenih podataka se obavlja pomoću automatski generisane baze podataka koju čine nasumično izabrani podaci iz polazne baze podataka.



Sl. 6. Grafički prikaz strukture primjene FF ANN [7].

Ukoliko je dobijena greška (odstupanje) dovoljno mala, proces treninga se završava. Bitno je napomenuti da je potrebno da svi procesi verifikacije zadovolje kriterijum tačnosti, u suprotnom proces treninga počinje iznova. Treniranje ANN u programu MATLAB prikazano je na Sl. 7.



Sl. 7. Treniranje FF ANN u programu MATLAB.

Sam proces treninga se može obavljati prema više algoritama, u zavisnosti od broja elemenata baze podataka i kompleksnosti posmatranog problema [8]. Neki od najčešće korišćenih algoritama su [8]:

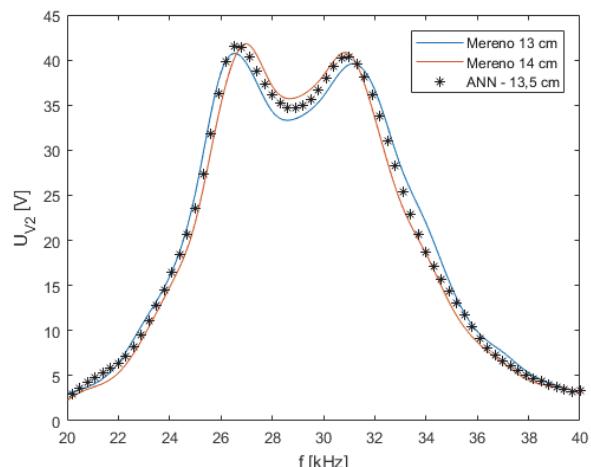
- *Levenberg-Marquardt* – Najčešće korišćen algoritam, omogućava oko četiri puta brže rešavanje problema nego drugi algoritmi. Pogodan za probleme srednje kompleksnosti i broja podataka.
- *Scaled Conjugate Gradient* - Algoritam za treniranje ANN koji koristi gradijentni metod za proračun izlaznih podataka. Pogodan je za kompleksne probleme sa velikim brojem podataka u svojim bazama.
- *Bayesian Regularization* – Veoma spor i detaljan algoritam za trening ANN. Pogodan za rešavanje problema malog obima sa izraženim šumom. Zbog svoje spore brzine proračuna, retko se koristi.

U ovom radu je korišćen *Levenberg-Marquardt* algoritam sa 60 neurona u skrivenom sloju, ulazna promenljiva 1 je rastojanje između predajnika i prijemnika d (u opsegu 10 do 25 cm, sa korakom od 1 cm), ulazna promenljiva 2 je frekvencija f DC/AC pretvarača 2 (u opsegu 20 do 40 kHz, sa korakom od 1 kHz). Trenirane su tri neuronske mreže. Za prvu ANN izlaz je izmerena vrednost napona U_{V2} na prijemniku, za drugu snaga P_2 na prijemniku i za treću efikasnost prenosa snage η .

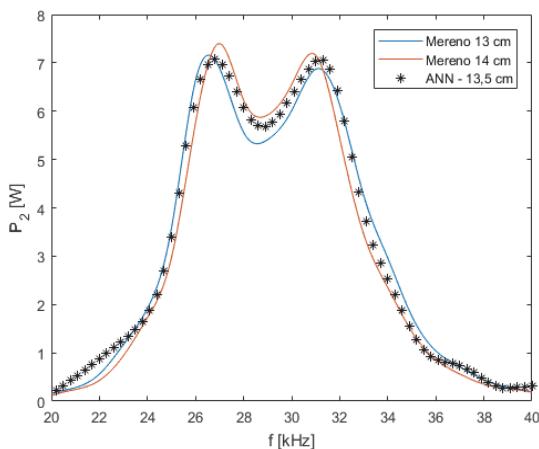
V. ANALIZA REZULTATA I TAČNOSTI ANN

Po završetku projektovanja, treniranja i verifikacije težinskih faktora FF ANN, istu je potrebno testirati prethodno utvrđenim etalonom pretpostavljeno tačnih vrednosti. U razmatranom slučaju, etalon čine eksperimentalno dobijene vrednosti (slične onima prikazanim u Tabelama II i III). Matrica testiranja se sastoji od dve kolone u kojima se nalaze vrednosti frekvencija f i stalnog napona na prijemniku U_{V2} . Preliminarna provera izvršena je za neko međurastojanje (između dva seta merenja), u ovom slučaju za 13,5 cm. Na Sl. 8 prikazan je dijagram koji se generiše prilikom testiranja ANN za napon na prijemniku U_{V2} , gde su plavom linijom prikazani rezultati dobijeni merenjem na rastojanju od 13 cm, crvenom linijom rezultati dobijeni merenjem na 14 cm, a zvezdicama rezultati koje je ANN odredila za međurastojanje od 13,5 cm. Na ovaj način se može preliminarno testirati ANN na celom opsegu frekvencija i rastojanja između kalemova, kako bi se ispitalo postojanje neželjenih oscilacija u rezultatima.

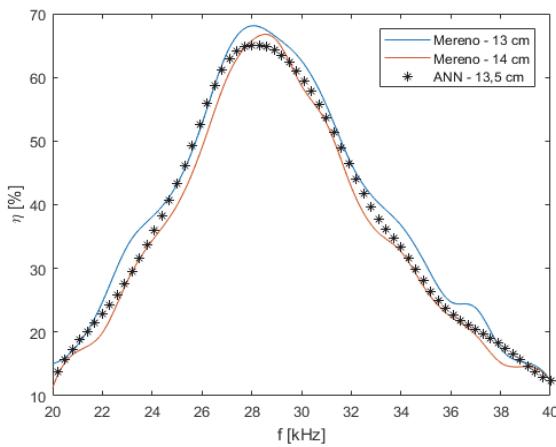
Na isti način je testirana ANN za izlaznu snagu prijemnika P_2 i efikasnosti prenosa snage η , za isto rastojanje od 13,5 cm. Dobijeni dijagrami za P_2 i η su prikazani na Sl. 9 i 10.

Sl. 8. Poređenje izlaznog napona U_{V2} dobijenog merenjem i rezultata dobijenih primenom ANN, za rastojanje od 13,5 cm između kalemova.

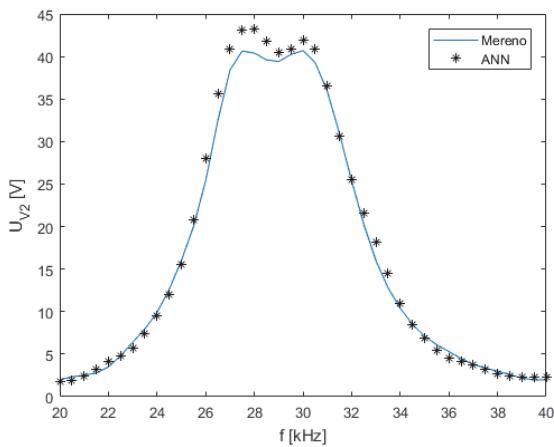
Testiranje ANN je izvršeno i sa još jednim kompletним setom merenja, koji je izveden na rastojanju od 17,5 cm, u istom frekventnom opsegu. Poređenja izmerenih rezultata i rezultata koji su dobijeni pomoću ANN su prikazana na Sl. 11, za izlazni napon, i Sl. 12, za efikasnost sistema. Sa prikazanih grafika se uočava dobro slaganje izmerenih i proračunatih rezultata. Dodatno, izvršen je i proračun relativnog odstupanja između ovih rezultata kako bi se detaljnije analizirala tačnost ANN.



Sl. 9. Poređenje snagu prijemnika P_2 dobijene merenjem i rezultata dobijenih primenom ANN, za rastojanje od 13,5 cm između kalemova.



Sl. 10. Poređenje izmerenih rezultata i rezultata dobijenih pomoću ANN za efikasnosti sistema η , za rastojanje od 13,5 cm između kalemova.



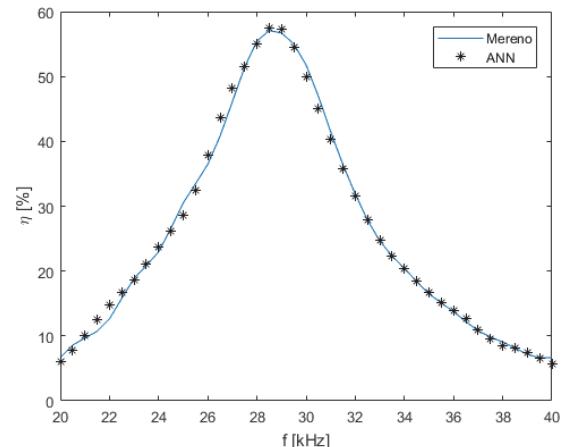
Sl. 11. Poređenje izlaznog napona U_{V2} dobijenog merenjem i rezultata dobijenih primenom ANN, za rastojanje od 17,5 cm između kalemova.

Relativno odstupanje je izračunato na osnovu sledećeg izraza:

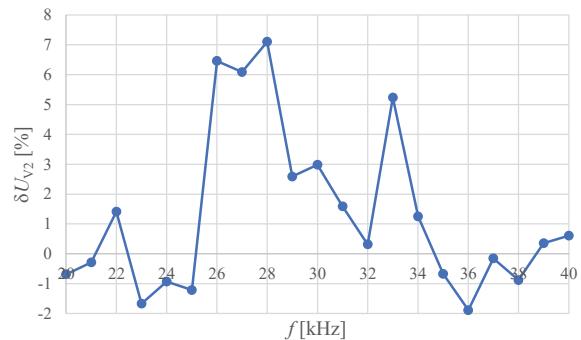
$$\delta y_i [\%] = 100 \frac{y_{ip} - y_{im}}{y_{im}}, \quad (2)$$

gde je y_{im} izmerena vrednost, a y_{ip} proračunata vrednost. Promene relativnih odstupanja sa frekvencijom f , za fiksno

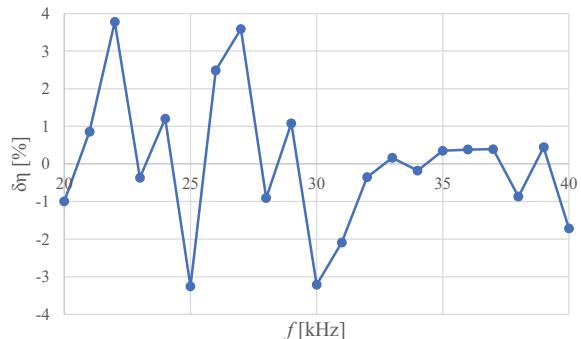
rastojanje od 17,5 cm, su prikazane grafički na Sl. 13 (za izlazni napon) i Sl. 14 (za efikasnost sistema).



Sl. 12. Poređenje izmerenih rezultata i rezultata dobijenih pomoću ANN za efikasnosti sistema η , za rastojanje od 17,5 cm između kalemova.



Sl. 13. Relativno odstupanje izlaznog napona pri promeni frekvencije, za rastojanje od 17,5 cm između kalemova.



Sl. 14. Relativno odstupanje efikasnosti sistema pri promeni frekvencije, za rastojanje od 17,5 cm između kalemova.

Da bi u potpunosti ispitali dobijene rezultate ANN, izvršeno je merenje i na drugim rastojanjima i frekvencijama za koje neuronske mreže nisu imala ulazne podatke (nisu trenirane), i za dobijene parametre izvršen je proračun relativnog odstupanja. Provera je izvršena za pet rastojanja (12,5 cm, 15,5 cm, 18,5 cm, 21,5 cm i 24,5 cm) i za četiri frekvencije (25,5 kHz, 28,5 kHz, 31,5 kHz i 34,5 kHz). Ove vrednosti su korišćene za proveru jer se nalaze između vrednosti rastojanja i frekvencije za koje su trenirane ANN.

Ulagani parametri i izračunato relativno odstupanje su prikazani u Tabeli IV. Vrednosti U_{V2} i η prikazani u tabeli su dobijeni merenjem, a vrednosti relativnog odstupanja δU_{V2} (%) i $\delta \eta$ (%) su dobijene proračunom.

TABELA IV
REZULTATI MERENJA I RELATIVNO ODSTUPANJE

d [cm]	f [kHz]	U_{V2} [V]	η [%]	δU_{V2} [%]	$\delta \eta$ [%]
12,5	34,5	18,50	32,92	1,43	2,23
12,5	31,5	38,40	52,11	1,22	1,45
12,5	28,5	32,20	67,95	-0,06	2,75
12,5	25,5	31,20	47,41	3,90	2,85
15,5	34,5	12,20	25,19	0,78	-0,64
15,5	31,5	34,70	42,08	3,68	1,42
15,5	28,5	37,20	62,37	2,52	-3,83
15,5	25,5	24,30	38,84	-3,04	-3,24
18,5	34,5	7,60	16,26	0,86	2,55
18,5	31,5	28,80	33,64	-2,50	2,41
18,5	28,5	41,90	55,36	0,81	-3,50
18,5	25,5	19,70	31,36	-0,18	-8,71
21,5	34,5	5,30	10,71	-1,26	3,33
21,5	31,5	22,50	25,25	7,76	4,27
21,5	28,5	44,30	47,39	2,47	0,30
21,5	25,5	13,80	23,20	2,21	-3,77
24,5	34,5	4,00	7,29	-2,10	0,24
24,5	31,5	16,30	17,82	1,61	2,17
24,5	28,5	44,20	38,76	7,26	-4,12
24,5	25,5	10,40	16,55	1,72	-0,31

Na osnovu prikazanih rezultata u Tabeli IV može se zaključiti da se relativna odstupanja δU_{V2} i $\delta \eta$ kreću u granicama od -4% do 4%, uz nekoliko skokova preko 7% koji su zabeleženi na frekvencijama bliskim rezonantnoj. Ovi skokovi u odstupanjima su vrlo verovatno posledica relativno male rezolucije merenja u oblasti gde su uočene veće promene naponu na prijemniku U_{V2} .

Buduće aktivnosti vezane za primenu ANN kod ovakvih sistema biće primenjene na slučajeve prenosa većih snaga, kao što su one koje se imaju u brzim punjačima mobilnih telefona, prenosnih računara, električnih bicikala i drugih uređaja.

VI. ZAKLJUČAK

U radu je ukratko prikazana realizacija laboratorijskog sistema za bežični prenos energije rezonantnim kolom sa redno-paralelnom kompenzacijom. Sa ciljem određivanje mogućnosti primene neuronskih mreža u analizi ovakvih sistema izvršeno je detaljnije ispitivanje sistema za 16 međusobnih rastojanja između kalemova, pri čemu su merene ulazni napon i struja sistema U_{V1} i I_{A1} , i izlazni napon i struja sistema U_{V2} i I_{A2} , za frekvencije rada od 20 do 40 kHz. Rezultati merenja su uneti u bazu podataka i upotrebljeni za treniranje ANN.

U radu su tabelarno i grafički prikazani dobijeni eksperimentalni rezultati. Dodatno, prikazano je poređenje izmerenih i rezultata proračuna dobijenih pomoću ANN sa ciljem određivanja tačnosti rezultata proračuna. Pri tome je

analizirano relativno odstupanja između ovih rezultata. Utvrđeno je da se odstupanje u najvećem broju slučajeva kreće u opsegu vrednosti koje su prihvatljive u inženjerskoj praksi. Da bi se povećala tačnost u ovakvim slučajevima, potrebno je povećati broj merenja (rezoluciju) ili u celom opsegu ili u opsegu u kojem je uočena veća promena merene izlazne veličine.

Na osnovu prikazanih rezultata može se zaključiti da primena neuronskih mreža u analizi sistema za bežični prenos električne energije može biti od koristi za sveobuhvatnije sagledavanje rada sistema. Takođe, primenom neuronskih mreža postiže se značajna ušteda u vremenu u poređenju sa rezultatima koji se dobijaju eksperimentalnim putem.

ZAHVALNICA

Istraživanja prezentovana u ovom radu su delimično finansirana sredstvima Ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacija RS, ugovor br. 451-03-47/2023-01/200132 čiji je realizator Fakultet tehničkih nauka u Čačku - Univerziteta u Kragujevcu.

LITERATURA

- [1] L.L. Grigsby, *The Electric Power Engineering Handbook: Power Systems*, 3rd ed. Boca Raton, USA: CRC Press, 2012.
- [2] D. Ćetenović, A. Ranković: Proračun snage na izlazu fotonaponskih panela primenom veštačkih neuralnih mreža, LIX Konferencija ETRAN, Srebrno jezero, Jun 2015, Rad EE 1.4.
- [3] 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.
- [4] D. Janjić, A. Milovanović, B. Koprivica, "Realizacija laboratorijskog sistema za bežični prenos energije," ETRAN 2022, Novi Pazar, Srbija, pp. 249-253, 06-06 Jun, 2022.
- [5] T. L. Fine, *Feedforward Neural Network Methodology*, 1st edition, New York, USA: Springer, 1999.
- [6] M. T. Hagan, H. B. Demuth, M. Bale, *Neural Network Design*, 2nd edition, Boston, USA: PWS Pub. Co., 2011.
- [7] LearnOpenCV - Understanding Feedforward Neural Networks, <https://www.learnopencv.com/understanding-feedforward-neural-networks/>.
- [8] MathWorks - Shallow Neural Network Time-Series Prediction and Modeling, <https://uk.mathworks.com/help/deeplearning/gs/neural-network-time-series-prediction-and-modeling.html;jsessionid=bf7191dada088902f246a5954f2c>.

ABSTRACT

The aim of this paper is to present the possibility of applying neural networks in the analysis of the operation of the system for wireless power transfer in order to predict the state of the system under the desired working conditions. Experimental tests were performed with a laboratory system and the changes in output voltage and power and the efficiency of power transfer were determined depending on the distance between the coils and the operating frequency of the system. Based on the experimental results, the neural network was trained in the MATLAB software package. The paper presents comparisons of the results obtained using a neural network and experiment. Also, a relative deviation between the calculated and experimental results is analysed and a corresponding discussion is given.

Application of neural networks in analysis of operation of systems for wireless power transfer

Dejan Janjić, Srđan Divac, Aleksandar Ranković, Branko Koprivica