

Prenos moči in informacije v bližnjem polju

Tadeja Saje¹, Gorazd Kandus^{1,2}, Matjaž Vidmar³

¹Mednarodna podiplomska šola Jožefa Stefana Jamova 39 1000 Ljubljana Slovenija, ²Inštitut Jožef Stefan,

³Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška 25, 1000 Ljubljana, Slovenija

E-pošta: tadeja.saje@gmail.com

Povzetek. Za prenos informacije sta potrebna razmerje signal/šum in pasovna širina. Razmerje signal/šum zahteva moč signala. Prenos moči v prostoru opišemo s Poytingovim vektorjem. Realni del Poytingovega vektorja pomeni prenos moči, imaginarni del pa nihanje energije. Zakonitosti prenosa moči se razlikujejo v bližnjem in daljnem polju (sevanje). V bližnjem polju skoraj vsa moč iz oddajnika konča v sprejemniku. Za sevanje je značilno, da del moči prejme sprejemnik, ostalo se izseva v neskončnost. Povečanje izkoristka naprave v bližnjem polju zahteva večji Q , kar zmanjša pasovno širino.

V prispevku bomo prikazali in opisali prenos moči s pomočjo Poytingovega vektorja v bližnjem in daljnem polju. Obravnavali bomo pretok moči v prostoru na različnih razdaljah, ko sta tokova oddajnika in sprejemnika v kvadraturi ali sofazna.

Rezultat naše naloge bo kratek zgodovinski pregled razvoja področja in predstavitev zakonitosti učinkovitega prenosa moči in informacije in njihove omejitve.

Ključne besede: bližnje polje, brezžični prenos energije, Poytingov vektor

Power and information transmission in the reactive near-field region

Power and information transmission in the reactive near-field region Information transmission requires both some signal-to-noise ratio and some bandwidth. An adequate signal-to-noise ratio requires some signal power. The power-flux density in space is described by the Poynting vector. The real part of the Poynting vector represents the power transmission while the imaginary part is the reactive oscillating energy in space. The laws of power transmission differ in the reactive and radiating regions. In the reactive near-field region, all of the transmitted power ends in the receiver. In the radiating region some of the power is collected by the receiver while the remaining power spreads out to infinity. If we want to increase the transmission range in the reactive near-field region, this requires a higher Q thus reducing the bandwidth. In this paper we describe the power transmission in the reactive and radiating regions using the Poynting vector. We analyze the power flow in space between two small electrical dipoles with the electric currents in the transmitter and receiver both in quadrature and in phase. The result of our analysis is a brief historical overview of the development of the topic and a presentation of the laws of power and information transmissions and their limitations.

Keywords: reactive near-field region, wireless transfer energy, Poynting vector

1 UVOD

V bližnjem polju (statično polje) se lahko energija prenaša na dva načina: prek kapacitivnega sklopa (električno polje) ali prek induktivnega sklopa (magnetno polje). V bližnjem polju prevladuje statično polje. Pri

induktivnem sklopu imamo poleg prenosa moči tudi močno jalovo magnetno polje, pri kapacitivnem sklopu pa močno jalovo električno polje. Močno jalovo polje pomeni veliko nihajočo energijo. Povečanje dosega pri prenosu moči v bližnjem polju izredno povečuje jalovo energijo. Kvaliteta $Q = \frac{\omega W}{P}$ omejuje pasovno širino.

Pri induktivnem sklopu ovire manj motijo prenos kot pri kapacitivnem. Električno polje zmoti vsaka prevodna ovira. Za prenos moči v bližnjem polju mora biti tok v sprejemniku za 90 stopinj zamaknjen glede na tok v oddajniku. Tak prenos je izredno učinkovit, saj se moč ne izgublja v prostor. Pri prenosu moči v bližnjem polju prejme moč tisti, ki jo želi, vendar ne moremo ugotoviti, kdo jo je prejel.

Prenos moči v bližnjem polju je uporaben za komunikacijo ali polnjenje naprav (brezžični prenos moči). Žal prenos moči v bližnjem polju omejuje slab izkoristek oddajnikov in sprejemnikov, ki je obratno sorazmeren nihajoči energiji oziroma kvaliteti Q . Pri prenosu informacije je pomembno, koliko informacije lahko prenesemo. Za čim bolj učinkovit prenos informacij potrebujemo čim višjo frekvenco, da pridobimo večjo pasovno širino. To nam opisuje enačba $Q = \frac{f}{B}$. V tem primeru mora biti kvaliteta našega oddajnika majhna. Doseg naprav je pri prenosu informacij s pomočjo sevanja bistveno večji kot pri bližnjem polju. Polje, kjer prevladuje sevanje, upada obratno sorazmerno z razdaljo. V območju, kjer prevladuje bližnje polje, polje upada s tretjo potenco razdalje. V bližnjem polju sta $\vec{E}$ in $\vec{H}$ neodvisna, pri sevanju pa sta $\vec{E}$ in $\vec{H}$ sofazna in med sabo pravokotna.

2 ZGODOVINSKI PREGLED

1820 - André-Marie Ampère odkrije, da električni tok proizvaja elektromagnetno polje.

1821 - Michael Faraday odkrije elektromagnetno indukcijo.

1864 - James Clerk Maxwell izdela matematični model elektromagnetnih pojavov.

1888 - Heinrich Hertz s poskusom dokaže veljavnost Maxwellovih enačb.

1893 - Nikola Tesla predstavi na svetovni razstavi v Chicagu brezžično razsvetljavo: prvi brezžični prenos energije s pomočjo kapacitivnega sklopa.

1926 - Hidetsugu Yagi objavi strukturo antene za prenos energije v UHF območju.

1944 - George I. Babat izvede z magnetno indukcijo brezstični prenos moči v industrijsko vozilo.

1964 - William C. Brown predstavi model helikopterja, ki se premika s pomočjo energije mikrovalovnega oddajnika: predstavitev prenosa energije s pomočjo sevanja.

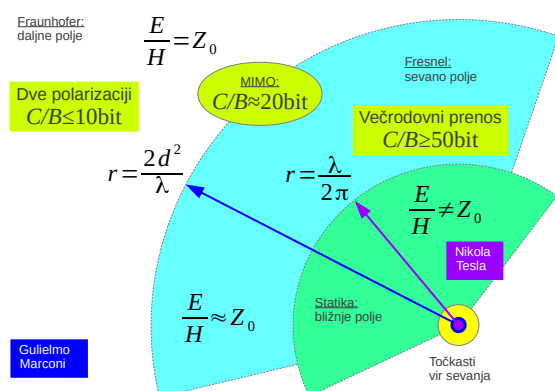
1965 - 1975 - William C. Brown predstavi brezžični prenos moči 30 kW na razdalji več kot 1.6 km s 84 odstotnim izkoristkom [4].

1975 - Mario Cardullo, Koelle iznajdeta pasivni RFID [3].

3 BLIŽNJE POLJE IN SEVANJE

Heinrich Hertz je prvi opazil elektromagnetno sevanje na velikih razdaljah $r \gg \frac{\lambda}{2\pi}$. Elektromagnetno sevanje deluje na drugačni osnovi kot kapacitivni ali induktivni sklop na nižjih frekvencah oziroma manjših razdaljah. Brezstično daljinsko zaznavanje razdelimo po načinu delovanja v tri skupine [1]:

- bližnje jalovo statično polje
- Fresnelovo območje oziroma bližnje sevanje
- Fraunhoferjevo območje oziroma daljno polje



Slika 1: Prikaz brezstičnega daljinskega zaznavanja po območjih [1]

Slika 1 prikazuje brezstično daljinsko zaznavanje EM polja po območjih.

Bližnje jalovo polje prevladuje na razdaljah, kjer je $r \ll \frac{\lambda}{2\pi}$. Bližnje jalovo polje upada s tretjo potenco razdalje [1]. Zvezo v bližnjem polju zadovoljivo opiše kapacitivni oziroma induktivni sklop med oddajnikom in sprejemnikom. Kapacitivni in induktivni sklop sta dualna zgleđa. Kadar sta tokova v sprejemniku in oddajniku sofazna, prevladuje v bližnjem polju jalov Poytingov vektor in tako med sprejemnikom ni prenosa moči.

Poytingov vektor prikazuje pretok gostote moči. Imaginarni del Poytingovega vektorja pomeni jalovo moč. Jalova moč pomeni nihanje energije, ki se ne premika. Sevanje prevladuje na velikih razdaljah, kjer je $r \gg \frac{\lambda}{2\pi}$. Poytingov vektor postane realen in pomeni delovno moč, ki se širi iz oddajnika v smeri, kamor potuje elektromagnetno valovanje [1]. Pri nizkih frekvencah je sevanje šibko, saj so pospeški elektronov majhni. Pri nizkih frekvencah je območje, kjer prevladuje bližnje polje, razmeroma veliko. Nizke frekvence ne omogočajo večje pasovne širine, zato niso primerne za zmogljive komunikacije. Pri visokih frekvencah razpolagamo z veliko pasovno širino in pri njih prevladuje sevanje. Sevanje se širi v prostoru ne glede na sprejemnik. Koliko informacije lahko prenesemo po komunikacijskem kanalu, opisuje Shannonov izrek:

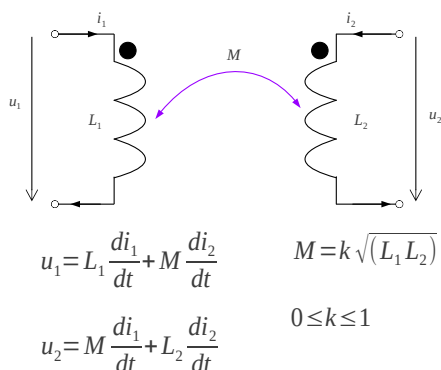
$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right), \quad (1)$$

kjer je B pasovna širina in $\frac{S}{N}$ razmerje signal/šum. Pri prenosu informacije je lahko izkoristek naprave bistveno manjši. Pomembna je pasovna širina, ki pada s kvaliteto $B = \frac{f}{Q}$. Kvaliteta radijskih anten (sevanje) je v velikostnem razredu 10. Kvaliteta nihajnih krogov, ki jih uporabljamo za sprejem in oddajo v bližnjem polju, lahko preseže 100.

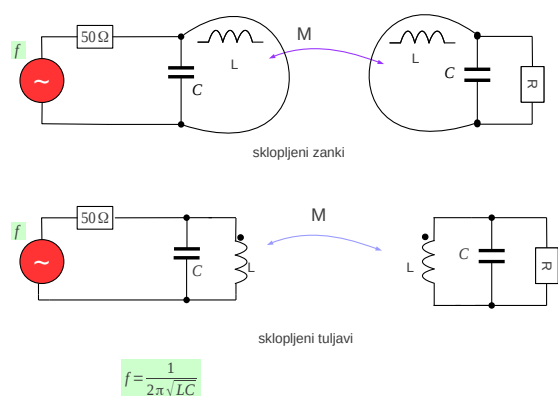
4 KAPACITIVNI IN INDUKTIVNI SKLOP

Kapacitivni in induktivni sklop lahko predstavimo z nadomestnim vezjem, če je razdalja med sprejemnikom in oddajnikom dosti manjša od valovne dolžine oziroma če se sprejemnik in oddajnik nahajata v bližnjem polju. Za učinkovit prenos energije je potrebno, da je $kQ_U \gg 1$, kjer je k faktor sklopa in Q_U kvaliteta tuljave. Faktor sklopa določa, kolikšen del magnetnega pretoka, ki gre skozi prvo tuljavo, gre tudi skozi drugo tuljavo. Faktor sklopa upada približno s tretjo potenco razdalje in temu sledi tudi izkoristek prenosa moči na različnih razdaljah. Faktor sklopa je enak ena, kadar gre ves magnetni pretok, ki gre skozi prvo tuljavo, tudi skozi drugo tuljavo. Sliki 2 in 3 prikazujeta primere induktivnega sklopa.

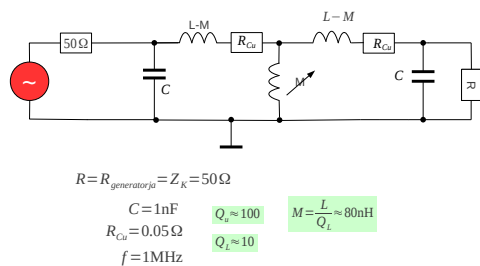
Naredili smo nadomestno vezje induktivnega sklopa, ki je prikazan na sliki 4. Za frekvenco smo izbrali $f = 1 \text{ MHz}$. Kapaciteto kondenzatorja smo nastavili na 30 nF . Induktivnost tuljave je $0.8 \mu\text{H}$. Slika 5 prikazuje simulacijsko okolje puff. S pomočjo orodja puff lahko izračunamo S-parametre. V oknu Plot so z barvo



Slika 2: Induktivni sklop s tuljavama

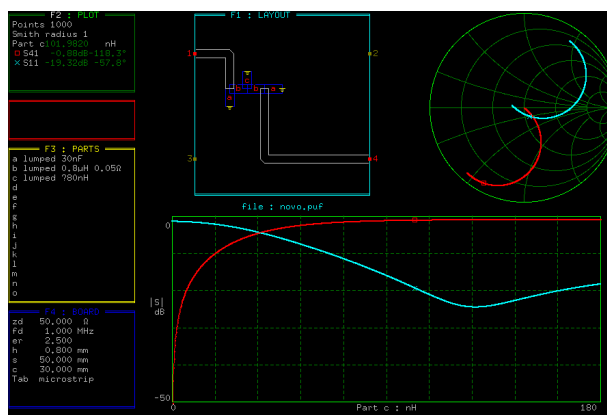


Slika 3: Primeri induktivnega sklopa



Slika 4: Nadomestno vezje za induktivni sklop

označeni S-parametri. Barva S-parametrov ustreza barvi, ki je izrisana na grafu in v Smithovem diagramu. V oknu Parts so navedene vrednosti gradnikov, ki smo jih uporabili v vezju. V oknu Layout je prikazan načrt simuliranega vezja. V oknu Board se navedene lastnosti in dimenzije tiskanine. V programu puff smo za naše nadomestno vezje izračunali odbojnost in odziv. Odziv je na sliki 5 prikazan kot parameter S_{41} v rdeči barvi in odbojnost kot parameter S_{11} v modri barvi. Odbojnost in odziv sta podana v dB. Na sliki 5 vidimo, kako se spreminja izkoristek prenosa moči (parameter S_{41}) v odvisnosti od medsebojne induktivnosti M . Iz slike 5 je razvidno, da pri zmanjševanju vrednosti M izkoristek moči hitro pada. Ko pa od neke točke naprej povečujemo M , gre vrednost izkoristka proti neki limiti, ki ni 100 %.



Slika 5: Učinkovit prenos moči v odvisnosti od medsebojne induktivnosti

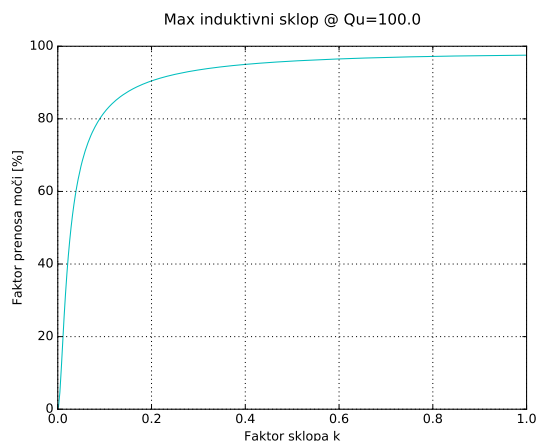
Orodje puff ima omejitve pri optimizaciji izkoristka, saj lahko nastavlamo le posamezno spremenljivko.

Za optimizacijo izkoristka moči v odvisnosti od faktorja sklopa k smo za naše nadomestno vezje izračunali izkoristek pri določeni kvaliteti tuljave. Slika 6 prikazuje iskanje najboljšega izkoristka prenosa moči pri danem faktorju sklopa. Iskali smo tako induktivnost tuljave, pri kateri bo izkoristek za določen faktor sklopa optimalen. Za izračunano induktivnost tuljave je treba izračunati najbolj primerno kapaciteto kondenzatorja. Iz kvalitete tuljave izračunamo še upornost. Simulacijo smo računali pri frekvenci 1 MHz in pri neobremenjeni kvaliteti tuljave 100. Pravilnost rezultatov smo preverili s programom puff.

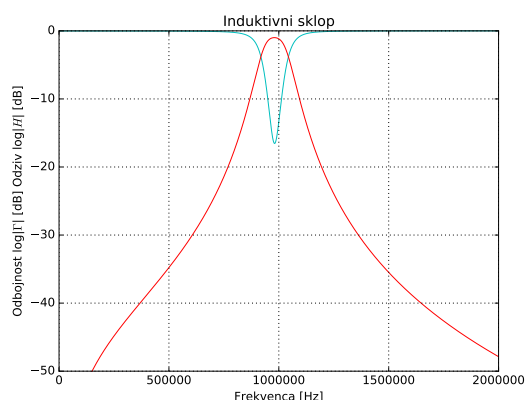
5 GOSTOTA PRETOKA MOČI TOKOVNEGA ELEMENTA

Tokovni element je točkasti dinamični električni dipol. Pri $\omega \neq 0$ električni dipol potrebuje tok v žici, da na elektrodi izmenično odvede elektrini $-Q$ in $+Q$. Tokovni element je kapacitivni sklop v bližnjem polju [1].

Poytingov vektor opisuje gostoto pretoka moči skozi



Slika 6: Iskanje elementov za najboljši izkoristek pri danem faktorju sklopa



Slika 7: Iskanje optimalne frekvence za dano induktivnost in kapacitivnost nadomestnega vezja za induktivni sklop

izbrano ploskev.

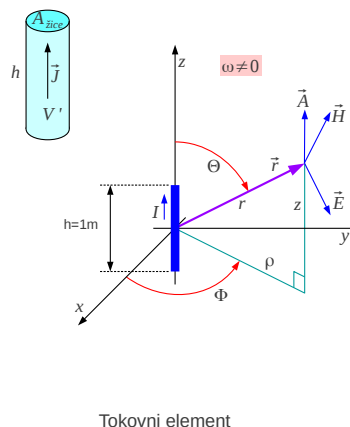
$$\vec{S} = \frac{1}{2} \vec{E} \times \vec{H}^* \quad (2)$$

Poytingov vektor prikaže, kako potuje energija v prostoru [2]. Slika 8 prikazuje poskus z visokonapetostnim virom 15 kV. V bližini vira je močno statično polje, da omogoča prenos moči. Posledica tega je, da sveti nizkotlačna fluorescentna žarnica. To je praktičen prikaz kapacitivnega sklopa.

Naredili smo simulacijo dveh poskusov. V prvem primeru so privzeli, da je dolžina tokovnega elementa precej manjša od valovne dolžine. Postavitev tokovnega vira kot oddajnika prikazuje slika 9. Za simulacijo poskusa smo izbrali frekvenco 500 MHz. Valovna dolžina pri 500 MHz znaša 0.6m. Opazovali smo Poytingov vektor na razdaljah za katere velja, da je $r \gg \frac{\lambda}{2\pi}$. Na teh razdaljah prevladuje sevanje. Tokovni vir, ki je oddajnik, smo postavili v smeri osi z. Jakost Poytingovega vektorja smo računali v ravnini xz. Jakost izračunanega pretoka gostote smo prikazali na logaritemski skali. Enota jakosti Poytingovega vektorja je $\frac{W}{m^2}$.



Slika 8: Praktičen primer prikaza bližnjega polja z visokonapetostnim virom 15 kV in nizkotlačno fluorescentno žarnico: kapacitivni sklop [2]

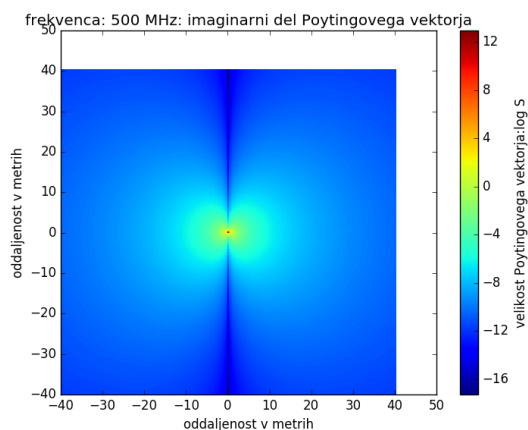


Slika 9: Postavitev tokovnega vira kot oddajnika

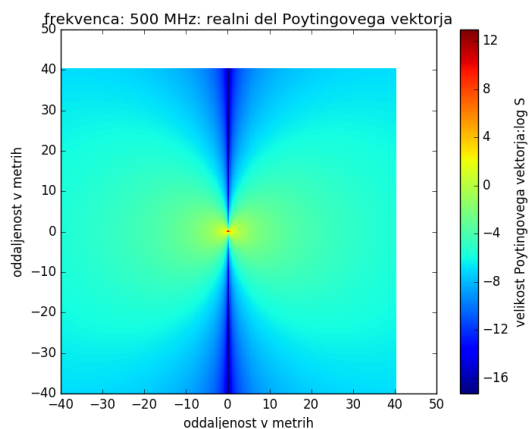
Na slikah 10 in 11 sta prikazana imaginarni in realni del jakosti Poytingovega vektorja v območju sevanja pri frekvenci 500 MHz. Opazimo, da na razdaljah $r \gg \frac{\lambda}{2\pi}$ prevladuje realni del. Realni del pomeni delovno moč. Delovna moč pri sevanju potuje iz koordinatnega središča, kjer se nahaja dinamični električni dipol, v vseh smereh v neskončnost. Jalova moč, ki je imaginarni del, postane na razdaljah $r \gg \frac{\lambda}{2\pi}$ majhna. Realni del moči potuje v neskončnost in se nikoli več ne vrne k izvoru v koordinatnem izhodišču [2].

Pri drugem poskusu smo izvedli simulacijo z dvema tokovnima elementoma. Pri tem je en element sprejemnik, drugi oddajnik. Privzeli smo, da je dolžina tokovnega elementa precej manjša od valovne dolžine. Frekvenca pri našem poskusu je 10 MHz. Valovna dolžina znaša 30m. Pri tem poskusu nas zanima jakost pretoka gostote moči na razdaljah $r < \frac{\lambda}{2\pi}$. To je območje bližnjega polja. Sprejemnik in oddajnik se nahajata v bližnjem polju.

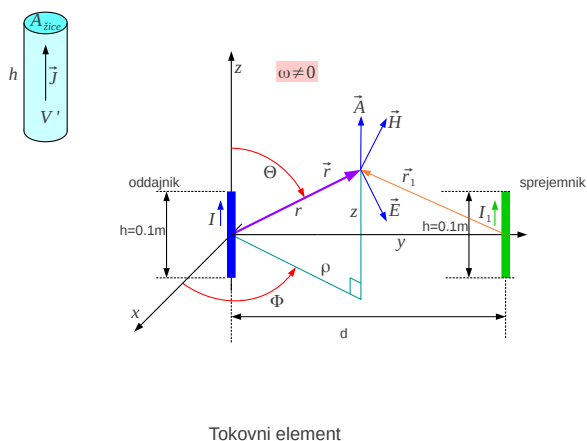
Slika 12 prikazuje postavitev dveh tokovnih elementov v bližnjem polju. Tokovni vir, ki je oddajnik, se nahaja v osi z. Jakost Poytingovega vektorja računamo v



Slika 10: Prikaz velikosti imaginarnega Poytingovega vektorja pri frekvenci tokovnega vira 500 MHz

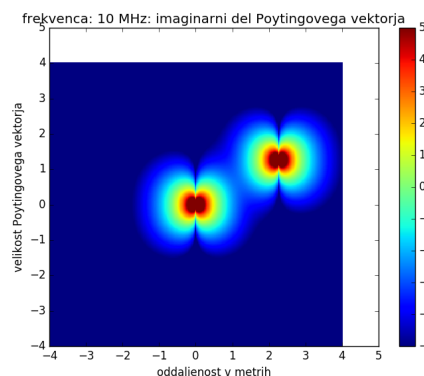


Slika 11: Prikaz velikosti realnega dela Poytingovega vektorja pri frekvenci tokovnega vira 500 MHz

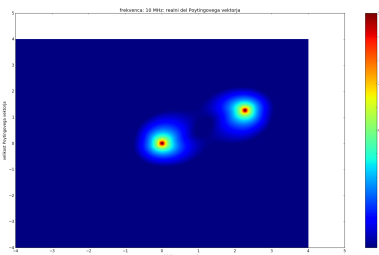


Slika 12: Postavitev tokovnega vira oddajnika in sprejemnika

osi xz. Pri simulaciji smo predpostavili, da sta tokova v sprejemniku in oddajniku v kvadraturi. V tem primeru se med njima prenaša moč. Če sta tokova sofazna, prevladi imaginarni del Poytingovega vektorja in do prenosa moči med sprejemnikom in oddajnikom ne pride. Na slikah 13 in 14 sta prikazana imaginarni in realni del jakosti Poytingovega vektorja pri 10 MHz v bližnjem polju. Slika 15 prikazuje vektorsko polje Poytingovega

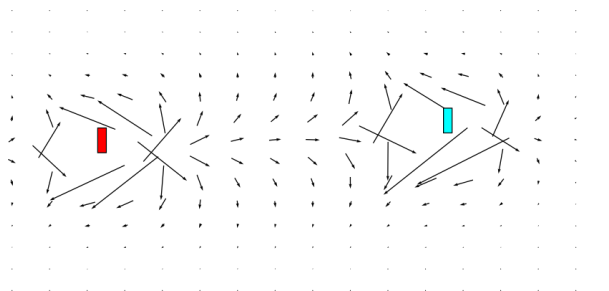


Slika 13: Velikost imaginarne Poytingovega vektorja za oddajnik in sprejemnik: tokova v kvadraturi



Slika 14: Velikost realne komponente Poytingovega vektorja za oddajnik in sprejemnik: tokova v kvadraturi

vektorja, v primeru ko sta tokova sprejemnika in oddajnika v kvadraturi in se nahajata v bližnjem polju. Potek vektorskega polja prikazuje, kam teče moč. Slika 15 prikazuje, da moč potuje od sprejemnika k oddajniku. V našem zgledu vsa moč konča v sprejemniku.



Slika 15: Vektorsko polje: smer poteka Poytingovega vektorja med sprejemnikom in oddajnikom: tokova v kvadraturi

6 ZAKLJUČEK

Bližnje polje ima v današnjem času pomen za prenos moči in komunikacijo na kratkih razdaljah. Prenos moči s pomočjo induktivnega sklopa se lahko v prihodnosti uporabi za polnjenje električnih avtomobilov, v agronomiji in v medicini. Polnjenje električnih avtomobilov, ko se gibljejo po avtocesti, bi omogočil razmah električnih avtomobilov, saj bi zmanjšal potrebo po velikih kapacitetah baterij in bi bistveno povečal doseg. Prvi preizkus je že naredila skupina United States Department of Transportation v letu 2012 [5]. Znan je tudi poskus, ki ga je izvedla skupina na univerzi MIT. Z induktivnim sklopom so prižgali 60 W žarnico na razdalji 2 m z izkoristkom 40 % [4].

Velika omejitev pri prenosu energije v bližjem polju je izkoristek prenosa, saj ta pada s tretjo potenco razdalje. Velik preskok v brezžičnem prenosu energije z induktivnim sklopom bi prinesla iznajdba superprevodnika pri sobni temperaturi, kar bi omogočalo skoraj 100-odstotni izkoristek in bistveno večji doseg ($Q \rightarrow \infty, R_{Cu} \rightarrow 0$).

LITERATURA

- [1] Matjaž Vidmar, Antene in razširjanje valov, <http://antena.fe.uni-lj.si/literatura/ar.pdf>, 2017.
- [2] Matjaž Vidmar, Elektrodinamika, <http://http://antena.fe.uni-lj.si/literatura/ed.pdf>, 2015.
- [3] Wireless power transfer, https://en.wikipedia.org/wiki/Wireless_power_transfer.
- [4] Valtchev, Stanimir S.; Baikova, Elena N.; Jorge, Luis R. (December 2012). *Electromagnetic Field as the Wireless Transporter of Energy*, Facta Universitatis Ser. Electrical Engineering. Serbia: University of Niš.
- [5] Miller, J. M.; Jones, P. T.; Li, J.-M.; Onar, O. C. ORNL experience and challenges facing dynamic wireless power charging of EV's. IEEE Circuits Syst. Mag. 2015, 15, 40.

Tadeja Saje je diplomirala na Fakulteti za računalništvo in informatiko in magistrirala na Fakulteti za elektrotehniko (2017). Trenutno je zaposlena na Arnesu in je doktorski študent na Mednarodni podiplomski šoli Jožefa Stefana. Njeno področje raziskovanja vključuje prenos moči v bližnjem polju, radioastronomijo in avtomatizacijo v telekomunikacijah.

Gorazd Kandus je diplomiral, magistriral in doktoriral v letih 1971, 1975 in 1981 na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. V letih 1978/79 je bil Fulbrightov štipendist na Worcester Polytechnic Institute v ZDA, leta 1993 pa je bil štipendist EU na Univerzi v Karlsruheju. V letih 1995 in 1999 je bil gostujoči znanstvenik DAAD, sprva na FZI inštitutu v Karlsruheju, zatem pa v vesoljskem centru DLR v Oberpfaffenhofnu. Na Institutu Jožef Stefan je do upokojitve leta 1971 vodil številne EU in ESA projekte in sodeloval z domačimi podjetji in akademskimi institucijami pri razvoju TK sistemov ter pri uvajanju IKT storitev. Na Mednarodni podiplomski šoli Jožefa Stefana predava več predmetov s področja informacijskih in komunikacijskih tehnologij.

Matjaž Vidmar je diplomiral leta 1980 in magistriral leta 1983 na Fakulteti za elektrotehniko. Leta 1986 je kot Fulbrightov štipendist nadaljeval podiplomski študij v ZDA na University of Colorado. V ZDA je razvijal satelitske oddajnike za organizacijo AMSAT. Leta 1992 je doktoriral z naslovom teme Metoda korekcije ionosferskih pogreškov pri satelitski navigaciji in prenosu časa. V sklopu sodelovanja z AMSAT-om je sodeloval pri razvoju komunikacijske in navigacijske opreme za satelit AMSAT-Phase-3D, ki je bil uspešno izstreljen v novembru 2000. Trenutno poučuje podiplomske in dodiplomske predmete s področja telekomunikacij na Fakulteti za elektrotehniko. Njegovo področje dela je mikrovalovna elektronika, ki obsega področja od letalske industrije, radioastronomije do optičnih komunikacij.