

UNIVERZA V LJUBLJANI
FAKULTETA ZA MATEMATIKO IN FIZIKO
ODDELEK ZA FIZIKO

BREZZIČNI PRENOS ENERGIJE

Boštjan Berkopec

Mentor: doc. dr. Primož Ziherl
Ljubljana, 23. 5. 2009

Povzetek

Nikola Tesla je bil prvi, ki je razmišljal o brezžičnem prenosu energije. Čeprav je od takrat minilo že več kot 100 let, je to področje še vedno dokaj skrivnostno. Večina današnjih naprav izkorišča elektromagnetno sevanje, ki ustvarja visoka polja okoli sebe. Prednost nesevalnega načina prenosa energije je v tem, da ne troši veliko energije, če ni priključenega sprejemnika, pa tudi polja okoli naprav so znatno manjša. Drugi poskus brezžičnega prenosa so izvedli na Massachusettskem inštitutu za tehnologijo. Teoretično in v praksi so uspeli dokazati, da je mogoč prenos električne energije na srednjih razdaljah s spodobnimi izkoristki.

Kazalo

1	Uvod	- 2 -
2	Nikola Tesla	- 2 -
2.1	Colorado Springs	- 3 -
2.2	Sanjski stolp	- 4 -
2.3	Schumannov resonator	- 5 -
3	Teoretični model resonančne tuljave	- 7 -
3.1	Poskus	- 8 -
4	Vpliv tujih predmetov in učinkovitost prenosa	- 9 -
5	Dielektrični diski	- 11 -
6	Kapacitivna prevodna zanka	- 12 -
7	Primerjava	- 13 -
8	Varnost uporabe	- 14 -
9	Uporaba	- 15 -

1 Uvod

V začetku 20. stoletja, preden se je uveljavil prenos energije po žici, si je Nikola Tesla veliko prizadeval za sisteme brezžičnega prenosa energije na velike razdalje. Vendar pa tipične ideje (npr. Teslova tuljava) vsebujejo električno polje velike jakosti [1]. V zadnjem desetletju se je uporaba avtonomnih elektronskih naprav (prenosniki, prenosni telefoni, roboti, dlančniki...) močno povečala. Z raziskavami in uporabo le-teh se je povečalo tudi zanimanje za brezžični prenos energije. Sevalni način, ki ga uporabljajo antene, je povsem primeren za prenos informacij, toda povzročča številne težave pri prenosu moči: učinkovitost prenosa moči je zelo nizka, če je sevanje izotropno, saj se v tem primeru porazgubi po prostoru. Usmerjeno sevanje z uporabo laserjev ali zelo usmerjenih anten bi lahko bilo učinkovito za prenos energije na velike razdalje ($L_{raz} \gg L_n$, kjer je L_n velikost naprave in L_{raz} oddaljenost sprejemnika), toda deluje le, če na poti ni nobenih ovir, in zahteva prefinjene mehanizme za sledenje v primeru premikajočih naprav. Nedavni teoretični članki so predložili podrobno analizo izvedljivosti uporabe sklopljenih resonančnih predmetov prek njihovega nesevalnega polja za srednje razdalje [2]. Dva resonančna predmeta z isto resonančno frekvenco ponavadi učinkovito izmenjata energijo, hkrati pa relativno malo energije absorbirajo predmeti, ki niso v resonanci. V temi o sklopljenih resonančnih sistemih pogosto naletimo na besedno zvezo »trdno sklopljen« režim delovanja. Če je možno delovanje v tem režimu, pričakujemo, da bo prenos energije zelo učinkovit. Prenos energije na srednjih razdaljah na zgoraj opisani način se lahko izvaja skoraj v vse smeri učinkovito ne glede na geometrijo okoliškega prostora.

Danes se soočamo z drugačnimi izzivi kot se je pred nami Tesla: brezžični prenos energije skoraj povsod, celo na srednji razdalji (L_{raz} je nekajkratnik L_n), je nadvse uporaben in zanimiv v večini aplikacij. Obstaja že kar nekaj sistemov, ki se opirajo na nesevalni način (magnetna indukcija), toda prav vsi sistemi so omejeni na majhen doseg ($L_{raz} \ll L_n$) ali pa na zelo majhen prenos energije.

Zgoraj navedeni premisleki veljajo ne glede na fizične narave resonance. Tukaj se osredotočimo, kot smo že zgoraj omenili, na eno od posebnih fizikalnih lastnosti: magnetno indukcijo. Magnetna indukcija je še posebej primerna za vsakdanje aplikacije, saj večina predmetov ne interagira z magnetnim poljem. Na prvi pogled spominja na prenos moči na običajno magnetno indukcijo, vendar kmalu ugotovimo, da običajna nesevalna indukcija zelo neučinkovito deluje na srednjih razdaljah.

2 Nikola Tesla

Konec leta 1890 je Tesla prišel do zaključka, da je morda mogoče prenašati električno energijo brez žic na visoki nadmorski višini, kajti zrak ni popoln izolator, saj je delno ioniziran. Vzrok za to so predvsem kozmični žarki. Na še večjih višinah, kjer je zrak že zelo redek, pa povzročajo ionizacijo rentgenski žarki in ultravijolični žarki [3]. Tako je zaradi popolne ioniziranosti in velike gibljivosti ionov ionosfera, to je na višini med 80 km in 300 km, povsem prevodna. Navedel je tudi ugotovitev, da se prevodnost veča s povečevanjem napetosti, ter vpliv že ioniziranega medija pri ponavljanju poskusa.

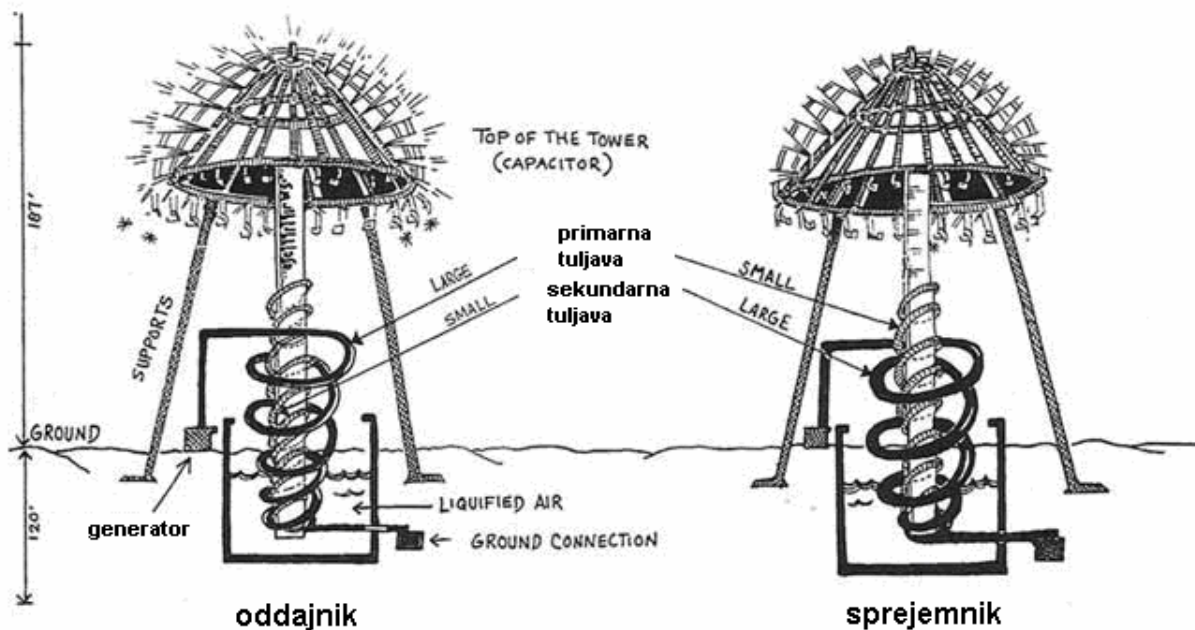
2.1 Colorado Springs

Tesla se je odločil zgraditi eksperimentalno postajo (stolp). Uradno naj bi bil stolp namenjen za prenos informacij, natančneje za prenos radijskih signalov. Vendar so bile sanje Nikole Tesla drugačne od načrtov finančnih podpornikov, za katere se ni zmenil [1]. Ob opazovanju strel v nevihti je prišel na idejo, da bi lahko tudi sam brezžično poslal neomejene količine energije na kateri koli kraj na zemlji. V ta namen je postavil stolp, ki je bil sestavljen iz dolgega droga, na katerega je bila nameščena bakrena žoga (slika 1).



Slika 1: Prva postaja Nikole Tesla za brezžični prenos električne energije je bila visoka 16 m in je bila sposobna ustvariti strele dolge 30 m [4].

Pravzaprav je bila njegova prva naprava sestavljena iz oddajnika in sprejemnika, ki sta po sestavnih delih enaka. Konstrukcija naj bi vsebovala tudi sistem navitij, s katerimi bi proizvedla visoke napetosti. Te napetosti je Tesla dosegal z dvema navitjema. Prva tuljava je bila priključena na generator napetosti, znotraj nje pa je bila tesno prilegajoča se v spiralo zvita žica manjšega premera. Ta je bila na širšem delu navitja ozemljena, drugi konec pa je iz sredine spirale vodil do terminala na visoki višini [4] (slika 2). Tega si je Tesla v nadaljevanju zamislil tudi obešenega na balon, da bi bil oddajnik čim višje zaradi boljše prevodnosti. Ob prvem poskusu, ki je trajal le nekaj sekund, so se okoli krogle ustvarile dolge strele, pri tem pa je celo mesto izgubilo energijo, kajti Teslov eksperiment je dobesedno uničil elektrarno, iz katere je črpal energijo.



Slika 2: Slika prikazuje oddajnik in sprejemnik Teslovega sistema. Iz slike je lepo razvidno, da je sistem sestavljen iz primarne in sekundarne tuljave, ki skupaj z generatorjem ustvarita visoke napetosti. Sprejemnik je sestavljen identično, le da ima namesto generatorja priključeno breme [5].

Drugi pristop, ki ga zasledimo pri Nikoli Tesli, je prenos nizkofrekvenčnih signalov skozi površino Zemlje in ionosfero. Tesla je izračunal, da so resonančne frekvence tega območja, ki mu pravimo zemeljski elektromagnetni resonator, 6, 18 in 30 Hz [1]. V glavnem gre za enako napravo kot pri prejšnjem patentu, le da je tu pomemben vpliv resonance in sinhronega osciliranja oddajnika in sprejemnika za prenos energije.

Eno izmed mnogih noči, ki jih je Tesla preživel v svoji postaji, je opazil preko svojega oddajnika ponavljajoči signal. Bil je navdušen, kajti menil je, da je prejel signal iz vesolja. Možno je, da je bil Tesla prvi človek, ki je zaznal radijski signal iz vesolja [1]. Iz njegovih zapiskov ni moč natančno razbrati, kako pravzaprav je imel namen brezžično prenašati energijo. Vendar je popolnoma jasno, da se je vrnil nazaj v New York prepričan, da bi ga izvedel.

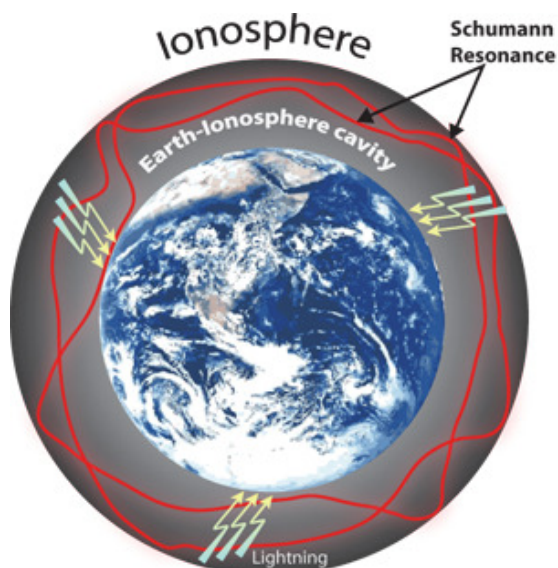
2.2 Sanjski stolp

V senzacionalnem članku za revijo Century Magazine je Tesla podrobno opisal način izkoriščanja sončne energije, kako bi bilo mogoče nadzorovati vreme z električno energijo, in predlagal globalni sistem za brezžično komunikacijo [4]. To so bile zopet samo besede, s katerimi je Tesla privabil ljudi, da bi ga finančno podprli. Še vedno je namreč imel željo, da izpelje načrt o brezžičnem prenosu energije.

Po njegovem prvem poskusnem stolpu za prenašanje električne energije je prišel do zaključkov, da za takšnim prenosom lahko stoji še drugačen fizikalni mehanizem, kot si je sprva predstavljal. Ugotovil je, da s pošiljanjem električnih sunkov v pravih časovnih razmakih dobi stacionarni val. Idejo je primerjal s stoječim zvočnim valovanjem. Pomembna ugotovitev je bila tudi, da bi bil sistem ekonomičen predvsem zato, ker bi energijo iz njega črpali šele takrat, ko bi bil vključen sprejemnik. Tak princip je ravno nasproten sevalnemu, kjer oddajnik konstantno seva elektromagnetno valovanje ne glede na to, ali je sprejemnik vklopljen ali ne. Leta 1901 je svet obšla novica, da je Marconi uspešno vzpostavil čezatlantsko zvezo. Ker je za to porabil veliko manj sredstev kot Tesla, je slednji izgubil denarno podporo. Kljub nekaterim uspešnim poskusom je bil Tesla primoran opustiti projekt za vedno [6].

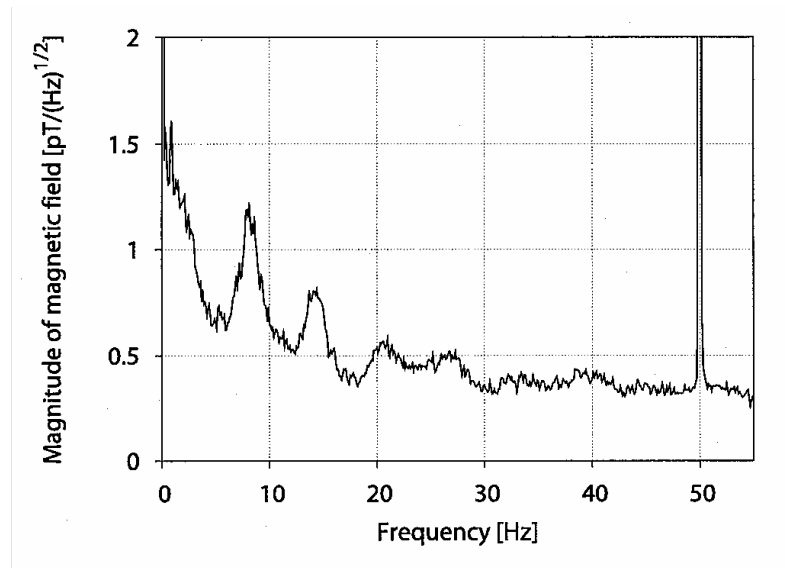
2.3 Schumannov resonator

Ta poseben primer resonatorja si lahko predstavljamo v obliki krogelne lupine kot del atmosfere. Meje resonatorja določa zemeljska površina na eni strani in ionosfera na višini okoli 50 km na drugi strani (slika 3). Schumannovo resonanco povzroči prav ta prostor med površino Zemlje in prevodno ionosfero, ki deluje kot zaprti valovod. Omejene dimenzije Zemlje povzročijo, da ta valovod deluje kot resonančna votlina za elektromagnetne valove pri zelo nizkih frekvencah. Podobno kot valovi na vzmeti ti elektromagnetni valovi niso vedno prisotni, ampak jih moramo vzbujati, če jih želimo opazovati. V naravi votlino vzbujajo električni tokovi, ki nastajajo pri strelah [7].



Slika 3: Slika prikazuje Zemeljski resonator, do kje le-ta sega in kje nastane stoječe valovanje s Schumannovo frekvenco. Glede na to, da je ionosfera na višini 50 km in poznamo polmer Zemlje, lahko rečemo, da razmerja na sliki niso prava. Kljub temu je le-ta pomembna za lažje razumevanje snovi [8].

Če si pogloblje pogledamo elektromagnetni spekter resonatorja, opazimo pri nizkih frekvencah glavni prispevek zaradi Schumannovih resonanc (slika 4). Povprečja pogosto opaženih frekvenc so 7.83, 14.3, 20.8, 27.3, 33.8 Hz [7]. Te frekvence so eksperimentalno določene, medtem ko bomo v nadaljevanju Schumannove frekvence za zemeljsko površje tudi izračunali.



Slika 4: S pomočjo elektromagnetnega spektra Schumannovega resonatorja lahko določimo frekvence, pri katerih ima polje vrhove. Slika prikazuje velikost magnetnega polja v odvisnosti od frekvence. Velikost polja pri frekvenci 50 Hz ni posledica resonatorja, ampak daljnovoda v bližini merilne postaje [9].

V nadaljevanju bomo prikazali način, po katerem pridemo do numeričnih vrednosti Schumannovih frekvenc. Elektromagnetna polja razklopimo na transverzalno magnetni in transverzalno električni del. Z nekaj razmisleka ugotovimo, da ima magnetno polje le azimutalno komponento, medtem ko sta ostali dve komponenti enaki 0. Torej ima magnetno polje komponente $B(r, \theta) = (0, 0, B_\phi(r, \theta))$ in električno $E(r, \theta) = (E_r(r, \theta), E_\theta(r, \theta), 0)$. Iz valovne enačbe in z upoštevanjem nekaterih približkov (natančnejši račun je narejen v [10]) dobimo oceno za najnižje lastne frekvence:

$$\omega_l = \sqrt{l(l+1)} \frac{c}{a}, \quad l = 1, 2, 3 \dots \quad (1)$$

V enačbi smo s c označili svetlobno hitrost in z a mejo resonatorja. Ta je v našem primeru kar enaka polmeru Zemlje. Za zemeljsko površje je numerična vrednost prvih petih Schumannovih frekvenc

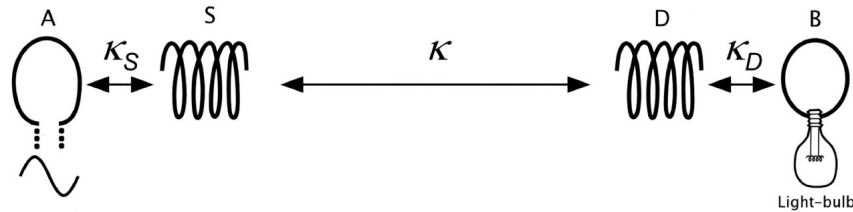
$$\nu_l = \frac{\omega_l}{2\pi} = 7.5 \text{ Hz}, 10.6 \text{ Hz}, 18.3 \text{ Hz}, 25.8 \text{ Hz}, 33.4 \text{ Hz}, 40.9 \text{ Hz} \dots \quad (2)$$

Najnižja lastna frekvenca ustreza stoječemu valu z valovno dolžino enako približno obsegu Zemlje. Kot zanimivost pa naj povemo še, da je zgornjo teorijo prvi podal Winfried Otto Schumann leta 1952, po katerem se frekvenca in resonator tudi imenujeta [10].

Čeprav je Tesla pojav opazil 53 let pred nastankom Schumannove teorije, vseeno ni bil tako daleč od izračunanih vrednosti.

3 Teoretični model resonančne tuljave

Eksperiment, ki so ga raziskovalci izvajali, je sestavljen iz dveh resonančnih tuljav (slika 5). Ena tuljava je induktivno sklopljena z napajalnim nihajnim krogom, druga pa je induktivno sklopljena z bremenom. Ti tuljavi s svojo induktivnostjo in kapacitivnostjo poskušata doseči resonanco. Tuljavi sta narejeni iz prevodne žice dolžine l in radija a , zvite v krog polmera r in višine h [2]. Najboljših parametrov za končno vijačnico ni najti v literaturi. Raziskovalci so ugotovili, da se rešitve tudi za primer neskončno dolge tuljave opirajo na predpostavke, ki so neustrezne za raziskovani sistem. Ugotovili so, da je kljub temu preprost spodaj opisani kvazistatični model dovolj dober, saj se ujema na 5 % s poskusom.



Slika 5: A je bakrena zanka polmera 25 cm, ki je del gonilnega vezja, katerega napajanje je sinusni val s frekvenco 9,9 MHz. S in D sta tuljavi naprave in vira polja. B je zanka, priključena na žarnico. Spremenljivka κ predstavlja stopnjo sklopitve med objekti, označenimi s puščico [2].

Raziskovalci so prenos opisali s pomočjo kvazistatičnega približka. Tok mora biti na koncih tuljave enak 0, ker imamo opravka s prostima koncema žice, pri čemer resonančno stanje opišemo s sinusnim spreminjanjem toka po naviti žici dolžine l :

$$I(t) = I_o e^{i\omega t} \cos \frac{\pi s}{l}, \quad (3)$$

kjer je s parametrizacija žice in teče od $-l/2$ do $l/2$. Ko imamo tok izračunan, lahko zapišemo še energijo tuljave: $E = L|I_o|^2/2$. Takšno tuljavo s svojo kapacitivnostjo C in induktivnostjo L lahko upoštevamo kot običajen nihajni krog s frekvenco $\omega = 1/\sqrt{LC}$ in amplitudo:

$$a = \sqrt{\frac{L}{2}} I_o, \quad (4)$$

kjer smo $a(t)$ definirali tako, da je $la(t)^2$ magnetna energija tuljave. Ker bomo v nadaljevanju obravnavali učinkovitost prenosa s pomočjo disipacijske konstante in sklopitvenega faktorja je prav, da ti dve količini tudi definiramo:

$$\Gamma = \frac{R_{abs} + R_{rad}}{2L} \quad \text{in} \quad (5)$$

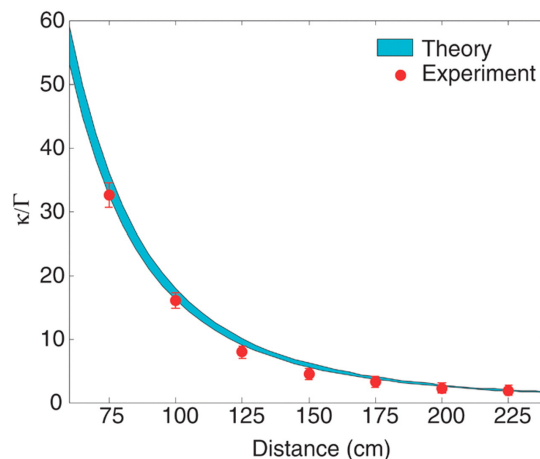
$$\kappa \approx \frac{\omega}{2} \left(\frac{\sqrt{r_1 r_2}}{D} \right)^3. \quad (6)$$

Pri tem R_{abs} predstavlja ohmske izgube, R_{rad} izgube zaradi sevanja in D razdaljo med tuljavama. Sklopitveni faktor smo izpeljali iz zveze $\kappa = \omega M / 2\sqrt{L_1 L_2}$, kjer je M medsebojna induktivnost tuljav in je v kvazistatični limiti $r \ll D \ll \lambda$ $M \approx (r_1 r_2)^2 / D^3$. L in r smo pisali z indeksi za primer, ko tuljavi nista enaki. Za učinkovit prenos velja, da mora biti disipacijska konstanta čim manjša, sklopitveni faktor pa čim večji. Naj omenimo še, da sta tako sklopitveni faktor kot tudi disipacijska konstanta odvisni od frekvence, zato je nastavev le-te ključnega pomena za učinkovit prenos energije.

3.1 Poskus

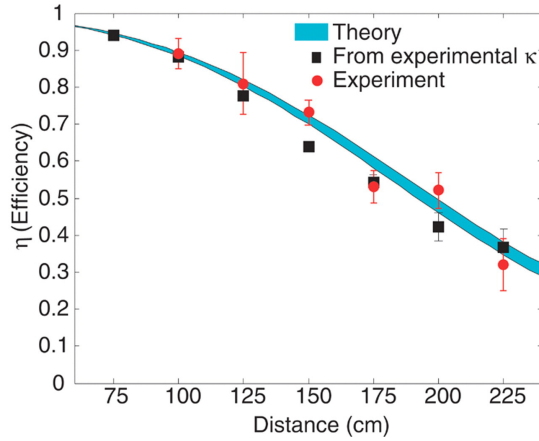
Dimenzije za dve enaki spiralni tuljavi, zgrajenimi za eksperimentalno potrditev prenosa moči, so: $h = 20$ cm, $a = 3$ mm, $r = 30$ cm in $n = 5.25$ [2]. Obe tuljavi sta izdelani iz bakra. Pričakovana frekvenca za tuljavo takšnih dimenzij znaša 10.56 MHz, kar je za 5 % drugačna od izmerjene resonančne frekvence, ki znaša 9.90 MHz. Teoretična dobrota Q za zanko je ocenjen na ~ 2500 ob predpostavki $\sigma = 5.9 \times 10^7$ m/ Ω , toda izmerjena vrednost znaša $Q = 950 \pm 50$ [2]. Prepričani smo, da je nastala razlika v glavnem zaradi učinka plasti slabo prevodnega bakrovega oksida na površini bakrene žice, na katerega je omejena vdorna globina pri tej frekvenci. Zato v nadaljevanju uporabljamo eksperimentalno določene Q in $\Gamma_{odd} = \Gamma_s = \Gamma = \omega/2Q$, kjer je Γ_{odd} disipacijski faktor oddajnika in Γ_s disipacijski faktor sprejemnika [11].

Koeficient κ so raziskovalci določili s finim spreminjanjem dveh resonančnih tuljav (slika 6). Največja teoretična učinkovitost prenosa je odvisna le od parametrov κ in Γ . Njun kvocient je večji od 1 tudi za razdalje $D = 2,4$ m (osemkratni polmer tuljave). Torej imamo do te razdalje na celotnem območju opravlja z močno sklopljenim sistemom.



Slika 6: Primerjava eksperimentalne in teoretične vrednosti kvocienta κ/Γ kot funkcije razdalje brezžičnega prenosa. Teoretična vrednost je izračunana z uporabo teoretičnega κ in eksperimentalnega Γ . Razširjena krivulja teoretične vrednosti je posledica negotovosti Q (5 %) [2].

Raziskovalce je med vsemi parametri še najbolj zanimal izkoristek. Kot prikazuje slika 7, so primerjali izkoristek izračunan popolnoma po teoretični poti, izkoristek, izračunan po enačbi (12), pri kateri so razmerje κ/Γ prebrali iz grafa (slika 7) in izkoristek, dobljen z meritvami.



Slika 7: Izkoristek prenosa energije med oddajnikom in sprejemnikom so raziskovalci določili tako, da so merili tok na vsaki tuljavi. Pri celotni postavitvi so morali paziti, da je bil sklopitveni koeficient med gonilno in bremensko zanko resnično 0. Brema je v tem poskusu predstavljala 60 W žarnica. Iz grafa lepo vidimo, da je izkoristek, dobljen na vse tri načine, pri razdalji 225 cm 35 %. Pri razdalji 75 cm pa le-ta znaša odličnih 95 % [2].

4 Vpliv tujih predmetov in učinkovitost prenosa

Znano je, da predlagani brezžični prenos energije temelji na resonanci objektov samih. Zato je občutljivost le-teh na prisotnost ostalih neresonančnih objektov eno izmed naslednjih vprašanj, ki nas bo zanimalo. Ustrezen analitični model je teorija perturbacij. Polje v neki točki zapišemo kot vsoto polj vseh objektov:

$$\mathbf{F}(\mathbf{r}, t) \approx \sum_{n=1}^N a_n(t) \mathbf{F}_n(\mathbf{r}) \quad (7)$$

($\mathbf{F}_n(\mathbf{r})$) so enotski vektorji, ki nam določajo smer polja posameznega objekta z amplitudami a_n . Amplitudo polja n -tega objekta lahko zapišemo preko diferencialne enačbe, v kateri upoštevamo vse prispevke:

$$\frac{da_n(t)}{dt} = (i\omega_n - \Gamma_n) a_n(t) + i \sum_{n \neq m} \kappa_{n,m} a_m(t) + G_n(t) \quad (8)$$

kjer je ω_n frekvenca, Γ_n je disipacijski faktor (absorpcija, sevanje), ter $\kappa_{n,m}$ predstavlja sklopitveni koeficient, za katerega velja $\kappa_{n,m} = \kappa_{m,n}$ [11]. Z zadnjim členom $G_n(t)$ opišemo gonilni člen. V nadaljevanju bomo obravnavali sistem brez gonilnega člena. Naša naloga je, da ugotovimo učinkovitost prenosa energije iz resonančnega vira na napravo v prisotnosti ostalih objektov (npr. človek). Najprej bomo zapisali enačbo, ki nam opisuje amplitudo polja sprejemnika, na katero vpliva tako oddajnik kot tudi brema:

$$\frac{da_s}{dt} = -i(\omega - i\Gamma_s) a_s(t) + i\kappa a_{odd}(t) - \Gamma_{brema} a_s(t), \quad (9)$$

kjer Γ_{brema} predstavlja izgube v sistemu zaradi bremena. Za reševanje enačbe smo prevzeli, da je frekvenca, s katero poganjamo oddajnik, konstantna. Amplitudi za oddajnik in sprejemnik lahko zapišemo kot: $a_{odd}(t) = A_{odd} e^{-i\omega t}$ in $a_s(t) = A_s e^{-i\omega t}$. Torej je $A_s / A_{odd} = i\kappa / (\Gamma_s + \Gamma_{brema})$. Objekta (oddajnik in sprejemnik) sta sklopljena s sklopitvenim koeficientom κ .

Na koncu lahko zapišemo še moč, ki se troši na bremenu, in izkoristek takšnega sistema:

$$P_{breme} = 2\Gamma_{breme} |a_s(t)|^2, \quad (10)$$

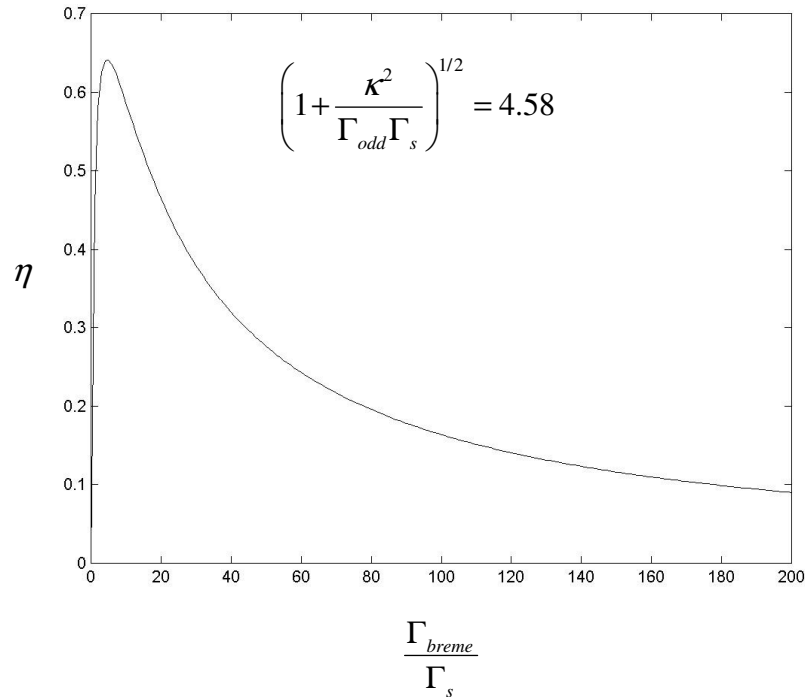
$$\eta = \frac{P_{breme}}{P_{odd} + P_s} = \frac{\Gamma_{breme} |a_s|^2}{\Gamma_{odd} |a_{odd}|^2 + (\Gamma_s + \Gamma_{breme}) |a_s|^2} \quad (11)$$

$$\eta = \frac{\frac{\Gamma_{breme}}{\Gamma_s} \frac{\kappa^2}{\Gamma_{odd}\Gamma_s}}{\left(1 + \frac{\Gamma_{breme}}{\Gamma_s}\right) \frac{\kappa^2}{\Gamma_{odd}\Gamma_s} + \left(1 + \frac{\Gamma_{breme}}{\Gamma_s}\right)^2}. \quad (12)$$

Od tod sledi, da je prenos maksimalen, ko je

$$\Gamma_{breme} / \Gamma_s = \left(1 + (\kappa^2 / \Gamma_s \Gamma_{odd})\right)^{1/2}. \quad (13)$$

To izjavo smo preverili s pomočjo grafa (slika 8) in pokazali, da je izjava pravilna.



Slika 8: Na grafu se lepo vidi, da je izkoristek za faktor $\kappa^2 / \Gamma_{odd}\Gamma_s = 20$ največji pri razmerju $\Gamma_{breme} / \Gamma_s = 4.58$.

Iz enačb lahko izvemo tudi, da mora biti za učinkovit prenos energije $\kappa^2 / (\Gamma_{odd}\Gamma_s) \gg 1$, kar imenujemo močna sklopitev. To lahko pokažemo s tem, da pošljemo člen $\kappa^2 / (\Gamma_{odd}\Gamma_s)$ kar proti neskončnosti. V limiti gre izkoristek namreč proti 1. Prav tako potrebujemo za prenos energije na srednjih razdaljah resonančni režim z visoko dobroto Q , ki ga v našem primeru definiramo kot:

$$Q = \frac{\omega}{2\Gamma}, \quad (14)$$

kar z drugimi besedami pomeni majhne izgube Γ . To je tudi razlog, da se za prenos energije namesto radiacijskega načina dolgega dosega uporablja bližnje evanescentno elektromagnetno polje, kjer so izgube majhne.

Močna sklopitev (velik κ) omogoča večje razdalje od značilnih karakterističnih velikosti objektov in tako je z valovno dolžino v odvisnosti od obsega bližnjega polja okoli objekta določena velikost resonančnega objekta. Takšno nesevalno sklopitev na srednji razdalji lahko dosežemo le z resonančnimi objekti velike valovne dolžine in s tem dobimo dolge repe padajoče funkcije. Amplituda takšnega polja namreč pojema z razdaljo r kot $\exp(-r/\lambda)$ [11]. To območje delovanja še ni bilo raziskano, saj so se raje posvetili kratkim repom in s tem minimalizaciji interference z bližnjimi napravami. Upoštevati je treba tudi, da bodo v praksi te naprave pri miru in zato ne veljajo tako stroge omejitve glede geometrije in velikosti. Zato bodo naprave lahko dovolj velike, da v bližnjem polju ne bomo omejeni z valovno dolžino.

Predlagani sistemi so zelo splošni in vsak tip resonatorja, ki izpolnjuje zgoraj navedene zahteve, lahko uporabimo. Za primer smo vzeli dva dobro znana, toda precej drugačna elektromagnetna resonatorja: dielektrični disk in kapacitivno prevodno zanko. Celo brez optimizacije in kljub njuni enostavnosti bosta pokazala sprejemljivo uspešnost.

5 Dielektrični diski

Za simulacijo prenosa energije so raziskovalci uporabljali tudi dielektrični disk. Zamislili so si dielektrični disk s polmerom r in dielektrično konstanto ε , obdan z zrakom, ki podpira visoke Q [11]. Večina izgub za takšen model prispeva samo sevanje v prostor in absorpcija v materialu samega diska. Visok Q^{rad} , ki je obratno sorazmeren z R_{rad} , in dolge »repe« za velike valovne dolžine lahko dosežemo le, če vzamemo dovolj velik ε , ter so spremembe polja v azimutalni smeri počasne (v literaturi zasledimo pod oznako m) oziroma je število m majhno. Absorpcija snovi je povezana z enačbo $Q^{abs} \sim \text{Re}(\varepsilon) / \text{Im}(\varepsilon)$.

Izračun za ta tip resonančnega diska je bil izveden s pomočjo dveh neodvisnih metod: z numerično simulacijo, ki reši Maxwellove enačbe v frekvenčnem območju, in analitično s standardnim ločevanjem spremenljivk v polarnih koordinatah. Rezultati za dva TE polarizirana dielektrična diska z razmerjem $\lambda/r \geq 10$ so predstavljeni v tabeli 1. Iz rezultatov je lepo razvidno, da s pravilno izbiro materialov in pravilno obliko lahko dosežemo kvalitetne faktorje $Q^{rad} \geq 2000$ in $Q^{abs} \sim 10000$.

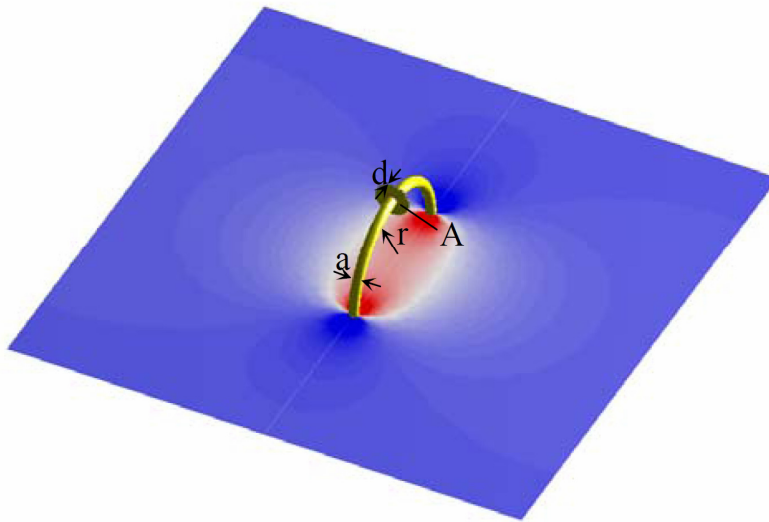
disk	λ/r	Q^{abs}	Q^{rad}	Q
$\text{Re}(\varepsilon) = 147.7, m = 2$	20.01 (20.00)	10103 (10075)	1988 (1992)	1661 (1663)
$\text{Re}(\varepsilon) = 65.6, m = 3$	9.952 (9.950)	10098 (10087)	9078 (9168)	4780 (4802)

Tabela 1: Numerični in analitični rezultati (v oklepaju) za valovno dolžino, absorpcijski in sevalni faktor ter skupni faktor dobrote za dielektrični disk [11].

Na prvi pogled se nam zdijo morda zahtevane vrednosti ε nerealno velike, vendar imajo dejansko nekateri materiali tako velike vrednosti ter majhne izgube. Za primer bomo našteali dva: titanov oksid ($\varepsilon \approx 96, \text{Im}(\varepsilon) / \varepsilon \approx 10^{-3}$) in barijev tetratitanat ($\varepsilon \approx 37, \text{Im}(\varepsilon) / \varepsilon \approx 10^{-4}$) [11]. Raziskovalci so s simulacijo dveh dielektričnih diskov na srednji razdalji (D/r je od 3 do 10) prišli pri faktorju κ/Γ med vrednosti 1 in 50. To pomeni, da še vedno nimamo idealne močne sklopitve, ki bi nam dala vrednost $\kappa/\Gamma \gg 1$, vendar so dobljene vrednosti še zmeraj uporabne predvsem na manjših razdaljah.

6 Kapacitivna prevodna zanka

Kapacitivna prevodna zanka je sestavljena iz neskljenjene prevodne zanke z radijem r in presekom a . Na koncih te zanke je priključen par paralelnih plošč (slika 9) na razdalji d s površino A , ki ima vlogo kondenzatorja s kapaciteto C . Tako kot vsaka žica ima tudi ta zanka induktivnost L . Tako smo s takšnim vezjem dobili nihajni krog z značilno resonančno frekvenco, ki jo zapišemo kot $\omega = 1/\sqrt{LC}$. To frekvenco lahko v praksi poljubno nastavljamo s spreminjanjem kapacitete kondenzatorja, torej njegovih fizičnih parametrov. Tako lahko nastavimo optimalno frekvenco, pri kateri je Q največji.



Slika 9: Slika prikazuje kapacitivno prevodno zanko z radijem r in presekom a . Črka A prikazuje nameščeni par paralelnih plošč, ki opravlja funkcijo kondenzatorja. Rdeča, bela in modra barva označujejo smer električnega polja, medtem ko nam intenziteta barve pove, kako je električno polje močno [11].

Značilnost vsakega resonančnega kroga je, da se energija, shranjena v električnem polju znotraj kondenzatorja, periodično pretvarja v energijo, shranjeno v magnetno polje, ustvarjeno okoli žice. Izgube takšnega resonančnega kroga so sestavljene iz ohmskih izgub R_{abs} znotraj žice in izgub zaradi sevanja R_{rad} . Značilnost vezja je tudi, da pri nizkih frekvencah prevladujejo ohmske izgube, med tem ko izgube zaradi sevanja prevladujejo pri visokih frekvencah. Raziskovalci so za takšen tip RLC vezja uporabili dve metodi reševanja: numerično, ki rešuje Maxwellove enačbe v frekvenčnem območju, in analitično. Obe metodi delujeta zelo dobro in data v mikrovalovnem območju pričakovane koeficiente dobrote: $Q^{abs} \geq 1000$ in $Q^{rad} \geq 10000$. Faktorja sta definirana kot

$$Q^{abs} = \frac{\omega L}{R_{abs}} \quad Q^{rad} = \frac{\omega L}{R_{rad}} \quad (15)$$

Rezultati za dva načina z dolgimi valovnimi dolžinami ($\lambda/r \geq 70$) so prikazani v tabeli 2.

zanka	λr	Q^{rad}	Q^{abs}	$Q = \omega/2\Gamma$
$r = 30 \text{ cm}, a = 2 \text{ cm}$ $\varepsilon = 10, A = 138 \text{ cm}^2, d = 4 \text{ mm}$	111.4 (112.4)	29546 (30512)	4886 (5117)	4193 (4381)
$r = 10 \text{ cm}, a = 2 \text{ mm}$ $\varepsilon = 10, A = 3.14 \text{ cm}^2, d = 1 \text{ mm}$	69.7 (70.4)	10702 (10727)	1545 (1604)	1350 (1395)

Tabela 2: Numerični rezultati za valovno dolžino, dobroto sevanja in absorpcije, ter skupno dobroto za kapacitivni prevodni zanki. Pomemben je tudi podatek, da je bila simulacija izvedena z bakrom ($\sigma = 5.998 \times 10^7 \text{ S/m}$) [11].

Za simulacijo prenosa energije med dvema zankama postavimo drugo zanko na razdaljo D od sredine prve zanke. Zopet uporabimo obe metodi reševanja, tako numerično kot tudi analitično, s pogojem $r < D < \lambda$. Obe metodi delujeta zelo dobro za srednji doseg (D/r je od 3 do 10). Z nekaj računanja dobimo faktor sklopitve $\kappa/\Gamma \sim 0.5-50$, kjer je faktor κ sorazmeren s frekvenco in obratno sorazmeren s kubom razmika med obema zankama.

Pri vsem tem je pomembno vedeti razliko med resonančno in neresonančno sklopljenima sistemoma za prenos energije. Resonančni sklopljeni sistem prenese znatno več moči kot neresonančni. Primer takšnih zank v uporabi so prenosni telefoni, v katerih te služijo kot antene. Razlika je v tem, da zanke pri telefonih delujejo na daljše razdalje ($D/r > 1$, $r/\lambda \sim 1$), pri čemer je Q^{rad} namenoma čim manjši za učinkovitost antene, zato ta ni primerna za prenos električne energije.

7 Primerjava

Za primer si pogledajmo numerično oceno za delovanje modela (tabela 3), pri katerem je razdalja med sprejemnikom in oddajnikom $D/r = 5$. Objekt iz podobne snovi kot je človek, je na oddaljenosti $D/r = 10$. Moč, ki jo je breme pri simulaciji prejelo, je bila 10 W (to je bil dogovor). Iz ohranitve energije mora veljati, da $P_{\text{tot}} = P_{\text{breme}} + P_{\text{rad}} + P_{\text{odd}} + P_{\text{s}} + P_{\text{c}}$ [11].

prenos/deleži	breme	sevanje	oddajnik	sprejemnik	človek
dielektrični disk	52 %	8.3 W (43 %)	0.5 W (2.6 %)	0.3 W (1.6 %)	0.2 W (1%)
kapacitivna prevodna zanka	61 %	0.6 W (3.6 %)	3.6 W (22 %)	2.2 W (13.4 %)	→ 0 W

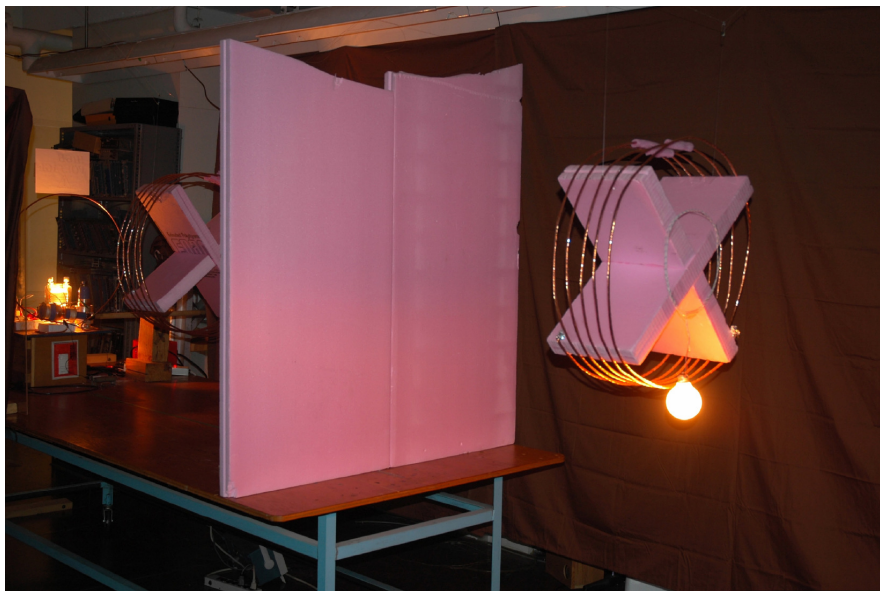
Tabela 3: Numerične ocene porazdelitve moči pri prenosu moči 10 W. Največ moči seveda prejme breme, kajti to je bil tudi cilj raziskav. Kakšna je porazdelitev moči med ostale objekte, je odvisno od tega, ali imamo opravke z dielektričnim diskom ali kapacitivno prevodno zanko. Kapacitivna prevodna zanka ima največje izgube v samem oddajniku, medtem ko dielektrični disk porabi veliko moči pri sevanju. Delež izražen v procentih smo izračunali glede na celotno moč porabljeno pri prenosu energije.

Pri dielektričnem disku je bila potrebna moč, da je breme prejelo 10 W, enaka 19.23 W. Za kapacitivno prevodno zanko pa je ta ista moč znašala 16.39 W. Iz tabele 3 lahko razberemo, da je izkoristek bremena pri kapacitivni zanki veliko večji kot pri dielektričnem disku. Toda bolj nas zanima, kolikšna je moč, ki jo prejme človek. Pri dielektričnem disku je ta majhna, medtem ko je pri kapacitivni prevodni zanki zanemarljiva. S tega stališča bi lahko rekli, da so kapacitivne prevodne zanke primernejše od dielektričnega diska.

8 Varnost uporabe

Ker je pomembno, kako bo naprava vplivala na naše počutje in zdravje, so bili raziskovalci pozorni tudi na to. S podrobno analizo zunanjih objektov, podobnim ljudem, v opazovanem sistemu ni bilo opaziti nobenih poškodb. Poškodb ni bilo opaziti niti na predmetih iz kovine, lesa, ne na elektronskih napravah [2].

Predmete so pri izvedbi eksperimenta postavili med obe tuljavi (slika 10). Zunanji predmeti imajo opazen učinek le v primeru oddaljenosti nekaj centimetrov od ene izmed tuljav, čeprav so na zveznici med sprejemnikom in oddajnikom. Nekateri materiali, kot sta stiropor in aluminijeva folija, v glavnem dvignejo frekvenco, ki je potrebna za resonanco. Podoben učinek imajo tudi živa bitja. Spremembo frekvence lahko uravnavamo s samo geometrijo tuljav. Za karton, les in polivinil pa se je izkazalo, da znižujejo Q , ko jih postavimo dovolj blizu tuljav, in s tem zmanjšajo učinkovitost prenosa [2].



Slika 10: Slika prikazuje postavitev objektov pri uspešnem brezžičnem prenosu energije. V tem primeru je oviro med obema tuljavama predstavljala stiroporna stena, ki dvigne frekvenco potrebno za resonanco.

Škodljivost naprave zdravju ocenimo s primerjanjem vrednosti povprečja kvadratov (RMS) velikosti električnega polja, magnetnega polja ter Poyntingovega vektorja z mejnimi vrednostmi varnostnih standardov IEEE. Pri prenosu 60 W na razdalji 2 m so bile na pol poti med obema tuljavama vrednosti takšne: $E_{RMS} = 210$ V/m, $H_{RMS} = 1$ A/m in $S_{RMS} = 3.2$ mW/cm² [2]. Te vrednosti se večajo z bližanjem tuljavi in so obenem primerljive za obe tuljavi. Tako so raziskovalci na razdalji 20 cm od tuljave sprejemnika izračunali maksimalne vrednosti, ki jih kaže tabela 4. Sevalna moč za te parametre znaša ~ 5 W, kar je približno za en velikostni red večje od sevanja prenosnega telefona. Raziskovalci so že pokazali, da bi s prilagoditvijo geometrije tuljav vrednosti obeh polj in Poyntingovega vektorja zmanjšali tudi pod vrednosti, ki jih določa IEEE standard.

	ν (MHz)	η	E_{RMS} (V/m)	H_{RMS} (A/m)	S_{RMS} (W/cm ²)	izsevana moč (W)
normativ IEEE	1	-	614	16.3	0.1	-
resonančne tuljave	9.90	90 %	1400	8	0.2	5
kapacitivna prevodna zanka	10	83 %	185	21	0.08	3.3
kapacitivna prevodna zanka	1	60 %	40	14	0.04	0.005

Tabela 4: Iz tabele se lepo vidi, da z resonančno tuljavo ne moremo zadostiti IEEE standardu. To lahko napravimo s kapacitivnimi prevodnimi zankami pri nižji frekvenci, ki imajo na žalost pri nižjih frekvencah tudi nižji izkoristek [12].

9 Uporaba

Čeprav sta tuljavi trenutno enakih dimenzij, je možno, da bo tuljava sprejemnika čez nekaj časa dovolj majhna, da bi jo lahko spravili v samo napravo in pri tem ohranili isti izkoristek. Izkoristek oziroma učinkovitost prenosa bi se dal izboljšati tudi s samim srebrenjem tuljav, s katerim naj bi zvečali dobroto. Kljub nekaterim še ne odpravljenim težavam pa bi lahko izdelek že uspešno praktično uporabili.

Trg za brezžični prenos energije je ogromen. Japonska vlada misli, da bo prva naprava, ki bo izkoriščala ta način prenosa, vozilo. Polnilniki bi bili vgrajeni v parkirne prostore in tako napolnili vozila s potrebno energijo. Za promocijo te ideje bo japonska vlada vgradila na tisoče brezplačnih polnilnih mest, nameščenih po Tokiu [13].

Sami raziskovalci so način prenosa začeli uveljavljati pod imenom WiTricity (wireless electricity). Za proizvodnjo in tržne namene že potekajo dogovori s podjetjema Alticor in Splashpower. Podjetje Alticor je v okviru programa Ecoupled izdelalo nekaj naprav, ki predvsem delujejo na majhnih razdaljah. Med njimi je večnamenska plošča, na kateri se lahko polni prenosni telefon, s pomočjo električne ponve spečejo jajca, ali pa prižge žarnica [14].

Literatura

- [1] T. K. Sarkar, R. J. Mailloux in A. A. Oliner, *History of Wireless* (John Wiley & Sons, New Jersey, 2006).
- [2] A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J. D. Joannopoulos, P. Fisher in M. Soljačić, *Science* **317**, 83-86 (2007).
- [3] J. Rakovec in T. Vrhovec, *Osnove meteorologije* (DMFA, Ljubljana, 2007).
- [4] http://www.pbs.org/tesla/11/11_todre.html
- [5] <http://reformation.org/tesla-and-tunguska.html>
- [6] http://en.wikipedia.org/wiki/Wireless_energy_transfer
- [7] <http://www.crystalinks.com/schumannresonance.html>
- [8] <http://www.kempelektroniks.nl>
- [9] http://www2.iee.or.jp/ver2/honbu/14-magazine/log/2006/2006_01a_01.pdf
- [10] R. Podgornik, *Elektromagnetno polje* (skripta, 2007)
- [11] A. Karalis, J. D. Joannopoulos in M. Soljačić, *Annals of Physics* **323**, 34-48 (2008)
- [12] <http://www.sciencemag.org/cgi/data/1143254/DC1/1>
- [13] <http://www.techpark.net/2008/02/04/wireless-energy-transfer-possibility/>
- [14] <http://www.ecoupled.com/>