

Brezžični neradiativni prenos električne energije

Avtor: Vid Agrež
Mentor: prof. Rudolf Podgornik

3. marec 2008

Povzetek

Za brezžični prenos električne energije se danes uporabljajo raznovrstne naprave. Med njimi večina izkorišča elektromagnetno sevanje. Nesevalni način brez uporabe žic je dokaj neobičajen. Prvi je v tej smeri razmišljal Nikola Tesla, ki je poskušal prenašati električno energijo s pomočjo ionizacije zraka pri visokih napetostih. Kasneje je sistem poskušal prilagoditi tako, da bi pri vzbujanju atmosfere z električnimi sunki pri pravi frekvenci, lahko napajal katerikoli kraj na zemlji. Ob tem naj bi imel dokaj majhne izgube. To njegovo delo so kasneje povezali s Schumannovo resonanco. Drugi primer je poskus, ki so ga izvedli na inštitutu MIT. Teoretično in v praksi so uspeli dokazati, da je mogoč prenos električne energije na srednjih razdaljah s spodobnimi izkoristki. Za to so uporabili sprejemnik in oddajnik, ki sta bila resonančno sklopljena. Gre za režim močne sklopitve sprejemnika z oscilirajočim oddajnikom v njegovem statičnem pojemajočem polju. Prednost takšnega sistema je v tem, da ne troši veliko energije, če ni priključenega sprejemnika.

Kazalo

1	Uvod	2
2	Nikola Tesla in brezžična energija	2
2.1	Schumannova resonanca	4
2.2	Wardencllyffe in Teslova vizija	4
3	Prenos električne energije s pomočjo močno sklopljene magnetne resonance	5
3.1	Teorija	6
3.2	Kapacitivne prevodne zanke	7
3.3	Resonančno sklopljene tuljave	7
3.4	Dielektrični diski	9
3.5	Meritve	9
3.6	Interakcija z okoljem	10
3.7	Uporaba	11
4	Zaključek	12

1 Uvod

Danes električna energija igra pomembno vlogo v naši civilizaciji. Poleg vse večjih naporov po iskanju alternativnih virov, je pomemben tudi sam prenos električne energije. Pri tem je mišljena predvsem njegova učinkovitost. Prvi uspeli poskusi brezžičnega prenosa, ki so temeljili na indukciji, so se izvedli v štiridesetih letih 19. stoletja s sorazmerno majhnimi izkoristki. Z napredkom v razvoju so se pojavili novi načini brezžičnega prenosa energije. Večina jih izkorišča elektromagnetno valovanje. Pri prenosu energije definiramo doseg naprave za učinkovit prenos. Za majhen doseg velja, da je oddaljenost sprejemnika (L_s) manjša od velikosti naprave (L_o). V srednji razred spadajo naprave, ki učinkovito delujejo na razdaljah, kjer je L_s nekaj velikosti L_o , pri čemer za naprave dolgega dosega velja $L_o \ll L_s$. V slednji razred uvrščamo od radijskih anten, ki sevajo po celotnem prostorskem kotu in so bolj uporabne za prenos informacij, do usmerjenih sevalcev, kot so laserji ali usmerjene antene. Pri zadnjih se ponavadi uporablja mikrovalove, s katerimi so dosegli v najboljšem primeru 95% izkoristek. Njihova šibka stran so velike oddajne in sprejemne površine. Pri laserjih z določeno valovno dolžino svetimo na fotocelice, ki so nanjo seveda optimirane, pri čemer dosegajo izkoristke do 50%. Poleg tega je slabost to, da mora biti vedno vzpostavljen vidni kontakt med laserjem in sprejemnikom.

Na majhnih razdaljah je primernejši prenos preko indukcije. Njegova šibka točka je predvsem nizek izkoristek, čim malo povečamo razdaljo med oddajnikom in sprejemnikom.

V nadaljevanju si bomo pogledali prenos na dolge razdalje, ki ga je predlagal Nikola Tesla, a ni nikoli prešel iz razvojne faze. Drugi projekt pa je novo patentirani prenos električne energije na srednjih razdaljah, ki so ga razvili na inštitutu MIT. Oba temeljita na prenosu energije, ki ne izkorišča elektromagnetnega sevanja.

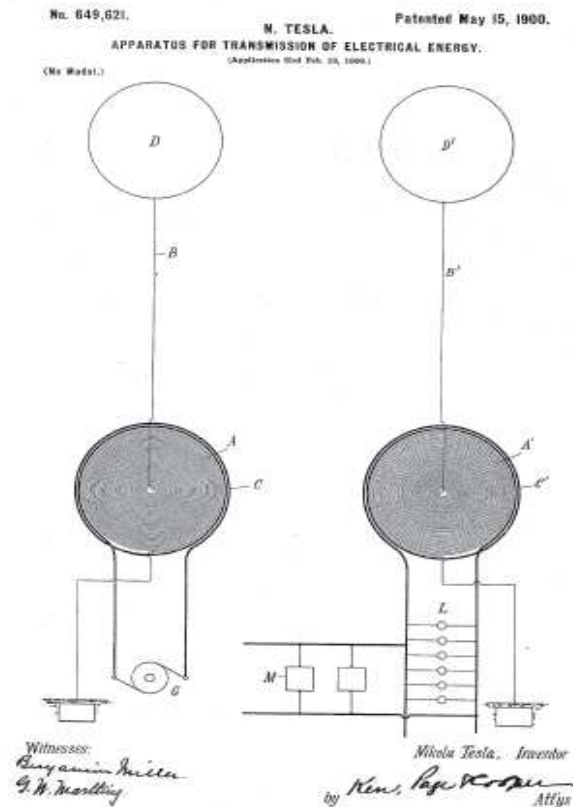
2 Nikola Tesla in brezžična energija

Med pionirje pri prenosu električne energije spada znanstvenik Nikola Tesla, ki se je rodil v Avstro-Ogrski ter kasneje svoje raziskave opravljal v ZDA. Z brezžičnim prenosom energije, kot tudi informacije se je ukvarjal na prehodu iz 19. v 20. stoletje. V nadaljevanju bom opisal dva patenta, ki sta igrala ključno vlogo pri njegovi napravi za brezžični prenos energije.

V svojem prvem patentu "sistema za prenos električne energije" št. 645,576 leta 1900 [1] Tesla izkorišča ugotovitev, da zrak, ki je pri normalnih pogojih dober izolator, postane prevoden, ko se ga izpostavi visokim napetostim. Navedel je tudi ugotovitve, da se prevodnost veča s povečevanjem napetosti in vpliv že ioniziranega medija pri ponavljanju poskusa.

Tako je njegova prva naprava (slika 1) za brezžični prenos električne energije sestavljena iz oddajnika in sprejemnika, ki sta po sestavnih delih enaka. Oddajnik, bi vseboval generator s sistemom navitij, ki bi proizvedla visoke napetosti. Energija bi se prenesla v obliki toka preko ionizirane zračne plasti do sprejemnika. Pri tem bi bila oba sprejemnik in oddajnik ozemljena. S tem je Tesla upošteval prevodnost zemlje. Visoke napetosti je Tesla dosegel s pomočjo dveh navitij. Prva tuljava je bila priključena na generator napetosti. Znotraj nje je bila tesno prilegajoče se v spiralo zvita žica manjšega premera. Ta je bila ozemljena na širšem delu navitja.

Drugi konec je iz sredine spirale vodil do terminala velike površine. Tega si je Tesla zamislil obešenega na balon, da bi oddajnik bil čim višje. Frekvenca v sekundarnem krogu naj bi bila okoli 925Hz, pri čemer bi valovna dolžina znašala 321,8km. Dolžina sekundarnega tokokroga naj bi bila eno četrtno valovne dolžine, tako bi na dvignjenem terminalu dosegli največjo napetost.



Slika 1: Slika je vzeta iz patenta Nikole Tesla št. 645,576 in prikazuje oddajnik (levo) in sprejemnik (desno) njegovega sistema. S črko G je označen generator, C označuje primarno tuljavo, A sekundarno spiralno navitje, ki je vezano na vodnik B, preko katerega se nabije terminal D, ki naj bi bil na primerni višini. Sprejemnik je sestavljen identično, samo da ima namesto generatorja priključena bremena L in M.

Dva meseca pozneje je Tesla prijavil novi patent št 647,621 uradno poimenovan "naprava za prenos električne energije" [1]. V glavnem gre za enako napravo kot pri prejšnjem patentu. Tokrat Tesla poudarja vpliv resonance in sinhronega osciliranja oddajnika in sprejemnika na prenos energije.

To lahko povežemo z zapiski njegovih opazovanj nevihte. Ugotovil je, da se bliski pojavljajo v enakomernih intervalih, kar mu je dalo misliti, da opazuje stacionarne valove. Ta resonančni pojav so kasneje opisali s Schumannovo resonanco. Tesla je ocenil lastne frekvence zemeljskega elektromagnetnega resonatorja na 6, 18 in 30 Hz.

2.1 Schumannova resonanca

Idealno si lahko Schumannov resonator predstavljamo kot del atmosfere, omejen z dvema krogelnima lupinama. Spodnjo mejo predstavlja prevodna zemeljska površina, zgornjo pa spodnji rob ionosfere na višini okoli 50km. Tu se začne tako imenovana D plast ionosfere, kjer ionizacijo povzročajo alfa in kozmični žarki. K dodatni ionizaciji prispeva še sončeva aktivnost. Tako smo dobili naravni resonator. Pri tem privzamemo, da so vdorne globine EM valovanja majhne, tako da imamo dielektrik med dvema prevodnima plastema. Elektromagnetno valovanje razklopimo na transverzalno magnetno in transverzalno električno in ugotovimo, da 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 [2]) dobimo oceno za najnižje lastne frekvence:

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

Te lastne frekvence imenujemo Schumannove frekvence. Za zemeljsko površino je numerična vrednost prvih petih Schumannovih frekvenc enaka:

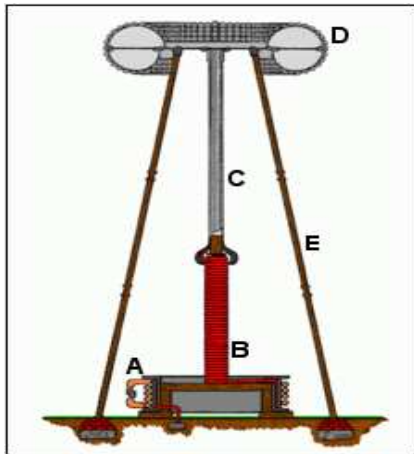
$$\nu_l = \frac{\omega_l}{2\pi} = 10.6 \text{ Hz}, \quad 18.3 \text{ Hz}, \quad 25.8 \text{ Hz}, \quad 33.4 \text{ Hz}, \quad 40.9 \text{ Hz} \dots \quad (2)$$

Vidimo, da Tesla ni bil tako daleč od izračunanih vrednosti za lastne frekvence, čeprav je opazil pojav 53 let pred nastankom Schumannove teorije.

2.2 Wardencliff in Teslova vizija

Tesla je pri opazovanjih v kraju Colorado-Springs, kjer je stal tudi njegov prvi poskusni stolp za prenašanje električne energije, prišel do zaključkov, da za takim prenosom stoji lahko še drugačen fizikalni mehanizem, kot si je sprva predstavljal. Torej prenos elektrike preko ioniziranih molekul zraka. Ugotovil je, da pri pošiljanju električnih sunkov v pravih časovnih razmakih (z ustrezno frekvenco) dobi stacionaren val. Kot analogijo je podal odmev in akustično stoječe valovanje. Tako ne gre za običajno elektromagnetno valovanje, ampak longitudinalne valove. Predvideval je, da bi na tak način lahko s centralne električne postaje oskrboval celoten planet. Ocenil je, da bi bile izgube nekaj procentov. Pri tem v svojih zapiskih trdi, da bi bil sistem ekonomičen tudi zaradi tega, ker bi energijo iz njega črpali šele takrat, ko bi bil vključen sprejemnik (breme). Brez sprejemnikov bi naprava rabila smo toliko moči, kot bi jo bilo potrebno za gnanje internih komponent. Tak princip je ravno nasproten sevalnemu, kjer oddajnik konstantno seva elektromagnetno valovanje ne glede na to, ali je vklopljen sprejemnik ali ne.

Za preizkus te ideje je leta 1900 ustanovil nov laboratorij v Wardencliffu na Long Islandu. Ker je šlo za velik finančni zalogaj, si je sponzorstvo poiskal pri J.P.Morganu za gradnjo telekomunikacijske naprave. Stolpa (sliki 3 in 4) mu žal ni uspelo dokončati. Leta 1901 je Marconi uspešno vzpostavil čezatlantsko zvezo. Ker je za to porabil veliko manj sredstev, je Morgan umaknil podporo Tesli, pri čemer se mu je prenos energije zdel nesmiselen, saj z njim ne bi imel kaj za zaslužiti. Tako sta skupaj z Edisonom Teslo tako očrnila pred javnostjo, da je njegovo raziskovalno delo skupaj s stolpom za prenos energije začelo propadati, dokler niso oblasti stolp razstrelile zaradi domnevnih vohunskih aktivnosti.



Slika 2: Shema stolpa za prenos električne energije. S črko A je označen primarni krog z generatorjem. Pod črko B je sekundarno navitje, ki preko vodnika C vodi na terminal D sestavljen iz prevodnih polkrožnih plošč. Te so optimirane tako, da se doseže maksimalen potencial.

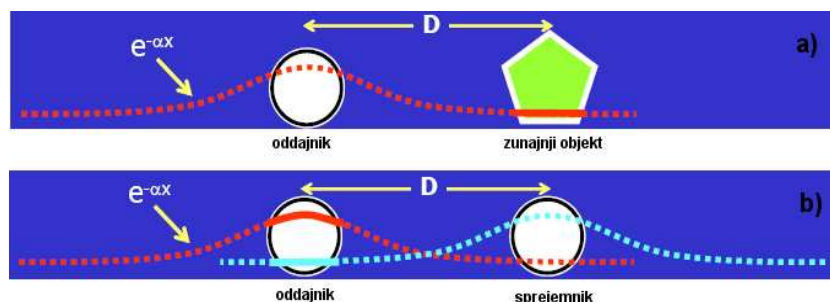


Slika 3: Rekonstrukcija stolpa v Wardencliffu, ki ga je leta 1901 začel graditi Nikola Tesla. Visok naj bi bil 50m. Terminal bi počival na leseni konstrukciji E

3 Prenos električne energije s pomočjo močno sklopljene magnetne resonance

Že obstoječi sistemi za nesevalni prenos energije izkoriščajo magnetno indukcijo v bližnjem načinu. Poleg tega so sposobni, brez večjih izgub, prenašati le male moči (mW).

Raziskovalna skupina na MIT [3] je poskusila nesevalni prenos energije na srednjih razdaljah ($L_s \sim \alpha \cdot L_o$) doseči s pomočjo sklopljenih resonančnih stanj v počasi pojemajočem stacionarnem EM polju. Tako bi izkoriščali princip resonančne sklopitve, oziroma dejstva, da se objekta, z enakima resonančnima frekvencama, sklopita, pri čemer šibko interagirata z neresonančnim okoljem. V našem primeru se sklopitev zgodi preko prekrivanja bližnjih polj objektov (slika 4).



Slika 4: Shematski prikaz interakcije oddajnika z okoljem: a) če je prisoten neobčutljiv objekt, b) če imamo sprejemnik resonančno sklopljen z oddajnikom v eksponentno pojemajočem stacionarnem polju.

3.1 Teorija

Za sistem sklopljenih objektov velja, da njegovo polje lahko zapišemo kot:

$$\mathbf{F}(\mathbf{r}, t) \approx \sum_{n=1}^N a_n(t) \mathbf{F}_n(\mathbf{r}) \quad (3)$$

kjer so $\mathbf{F}_n(\mathbf{r})$ smeri polja posameznega objekta z amplitudami a_n . Te so definirane kot:

$$\frac{da_n(t)}{dt} = (i\omega_n - \Gamma_n)a_n(t) + i \sum_{n \neq m} \kappa_{n,m} a_m(t) + G_n(t) \quad (4)$$

kjer so ω_n lastna frekvenca, Γ_n disipacijski faktor odvisen od izgub objekta, kot sta absorbcija in sevanje ter $\kappa_{n,m}$, ki predstavlja sklopitveni koeficient, za katerega velja $\kappa_{n,m} = \kappa_{m,n}$. Z zadnjim členom $G_n(t)$ opišemo gonilni člen. Tako se bo za nesklopljen objekt, brez gonilnega člena, amplituda spreminjala kot:

$$a_n(t) \propto e^{i\omega_n - \Gamma_0 t} \quad (5)$$

pri čemer bo energija, shranjena v takem objektu, enaka $|a_n(t)|^2$.

V nadaljevanju upoštevamo samo dva objekta. Oddajnik (o), ki ga poganjamo s konstantno frekvenco in sprejemnik (s), ki je obremenjen s konstantnim bremenom, recimo v obliki upora. Objekta sta sklopljena s sklopitvenim koeficientom κ . Tako spremembo amplitude za sprejemnik zapišemo:

$$\dot{a}_s(t) = (i\omega_n - \Gamma_s - \Gamma_A)a_s(t) + i\kappa a_o(t) \quad (6)$$

kjer nam Γ_A predstavlja izgube v sistem zaradi bremena. Oziroma koliko moči se troši na bremenu:

$$P_A = 2\Gamma_A |a_s(t)|^2 \quad (7)$$

Izkoristek takšnega sistema lahko sedaj zapišemo kot:

$$\eta = \frac{P_A}{P_o + P_s} = \frac{\Gamma_A |a_s|^2}{\Gamma_o |a_o|^2 + (\Gamma_s + \Gamma_A) |a_s|^2} \quad (8)$$

$$\eta = \frac{\frac{\Gamma_A \kappa^2}{\Gamma_s \Gamma_o \Gamma_s}}{\left(1 + \frac{\Gamma_A}{\Gamma_s}\right) \frac{\kappa^2}{\Gamma_o \Gamma_s} + \left(1 + \frac{\Gamma_A}{\Gamma_s}\right)^2} \quad (9)$$

Od tod sledi, da mora biti za učinkovit prenos energije veljati $\kappa^2/(\Gamma_o \Gamma_s) \gg 1$, kar imenujemo močna sklopitev. Prav tako rabimo za prenos energije na srednjih razdaljah resonančni režim z visokim kvalitetnim faktorjem Q (dobrota), ki ga v našem primeru definiramo kot:

$$Q = \omega \times \frac{\text{Shranjena energija}}{\text{Disipacija moči}} = \frac{\omega}{2\Gamma} \quad (10)$$

Kar z drugimi besedami pomeni počasne (majhne) izgube Γ . To je tudi razlog, da se za prenos energije, namesto radiacijskega načina dolgega dosega, uporablja bližnje evanescentno EM polje, kjer so izgube majhne. Amplituda takšnega polja pojema z razdaljo (r) kot $\exp(-r/\lambda)$, od koder sledi, da rabimo za tak sistem dolge valovne dožine (λ).

Tak način delovanja se da preizkusiti na sistemih, ki vsebujejo resonančne elemente, kot so kapacitivne prevodne zanke in dielektrični diski.

3.2 Kapacitivne prevodne zanke

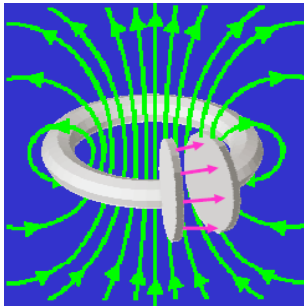
Kapacitivna prevodna zanka je sestavljena iz nesklenjene prevodne zanke z radijem r in induktivnostjo L , ki je na koncih priključena na kondenzator s kapaciteto C (slika 5). S tem smo dobili nihajni krog. Takšen sistem ima ohmske izgube R_{abs} in izgube zaradi sevanja R_{rad} . Frekvenco nihajnega kroga zapišemo kot $\omega = 1/\sqrt{LC}$ in jo v praksi nastavljamo s spreminjanjem kapacitete kondenzatorja, torej njegovih fizičnih parametrov. Tako lahko nastavimo optimalno frekvenco pri kateri je Q največji. Pri tem se upošteva dejstvo, da pri majhnih frekvencah prevladujejo ohmske izgube, pri visokih pa izgube zaradi sevanja. Numerična simulacija pokaže, da so koeficienti kvalitete, pri poskusih v mikrovalovnem območju, za izgube enaki $Q^{abs} \geq 1000$ in $Q^{rad} \geq 10000$, pri čemer sta faktorja definirana kot:

$$Q^{abs} = \frac{\omega L}{R_{abs}} \quad Q^{rad} = \frac{\omega L}{R_{rad}} \quad (11)$$

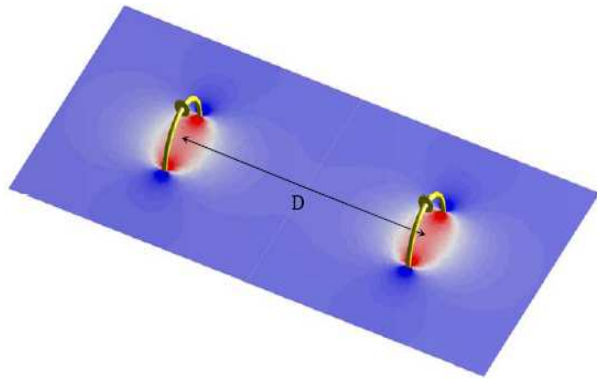
Sedaj postavimo drugo tako zanko na razdaljo D (slika 6) s pogojem, ki sledi iz prejšnjih ugotovitev: $r < D < \lambda$. Pokaže se, da režim dobro deluje za srednje razdalje D/r od 3 do 10. Omenimo še sklopitveni faktor, ki je sorazmeren:

$$\kappa \approx \frac{\omega}{2} \left(\frac{\sqrt{r_1 r_2}}{D} \right)^3 \quad (12)$$

Primer takšnih zank v uporabi so mobilni telefoni, v katerih te služijo kot antene. Razlika je v tem, da delujejo na daljše razdalje ($D/r > 1$, $r/\lambda \sim 1$), pri čemer je Q^{rad} namensko čim manjši, za učinkovitost antene.



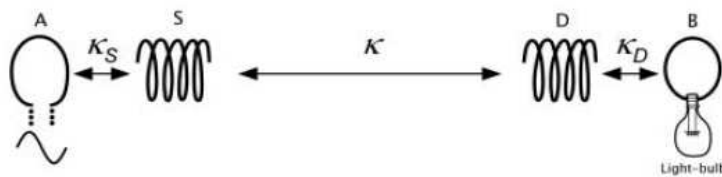
Slika 5: Shema kapacitivne prevodne zanke, kjer so z zeleno predstavljene magnetne silnice. Električno polje je prikazano z roza barvo.



Slika 6: Simulacija dveh resonančno sklopljenih kapacitivnih prevodnih zank.

3.3 Resonančno sklopljene tuljave

Podoben princip prenosa energije se lahko izvede tudi preko sklopljenih tuljav. Tak način so uporabili v svojem eksperimentu tudi raziskovalci iz MIT [4]. Ta je vseboval štiri tuljave, kjer sta bili gonilna in oddajna tuljava induktivno sklopljeni, prav tako pa tudi sprejemna in tuljava direktno vezana na breme (sliki 7 in 8). Oddajna in sprejemna tuljava sta bili narejeni iz prevodne žice zvite v vijačnico s prostima koncema. S tem so pridobili učinek nihajnega kroga opisanega v zgornjem podglavju.



Slika 7: Shema poskusa prenosa energije s pomočjo resonančno sklopljenih tuljav

Mehanizem prenosa opišemo s pomočjo kvazistatičnega približka. Tok mora biti na koncih takšne tuljave enak nič, pri čemer resonančno stanje opišemo s sinusnim spreminjanjem toka po naviti žici dolžine l :

$$I(t) = I_0 e^{i\omega t} \cos \frac{\pi s}{l} \quad (13)$$

kjer je s parameterizacija žice in teče od $-l/2$ do $l/2$. Iz enačbe(13) sledi linearna gostota naboja:

$$\lambda(t) = \frac{\rho(t)}{l} = \lambda_0 e^{i\omega t} \sin \frac{\pi s}{l} \quad (14)$$

Tako ena polovica tuljave, prerezana pravokotno na njeno os, vsebuje naboj $\rho_0 = |\lambda_0 l / \pi|$. Iz zgornjih dveh enačb vidimo, da sta tok in naboj fazno zamaknjena za $\pi/2$. Energijo tuljave zapišemo kot:

$$E = \frac{1}{2} L |I_0|^2 = \frac{1}{2C} |q_0|^2 \quad (15)$$

Sedaj upoštevamo takšno tuljavo kot običajen nihajni krog s frekvenco $\omega = 1/\sqrt{LC}$ in amplitudo:

$$a(t) = \sqrt{\frac{L}{2}} I_0 \quad (16)$$

Disipacijsko konstantno za ta primer zapišemo :

$$\Gamma = \frac{R_{abs} + R_{rad}}{2L} \quad (17)$$

Sklopitveni faktor se podreja enaki zvezi, kot smo jo zapisali v enačbi(12). Tako sklopitvena, kot disipacijska konstanta sta odvisni od frekvence. Zato je nastavitev le te, ključnega pomena za učinkovit prenos energije.

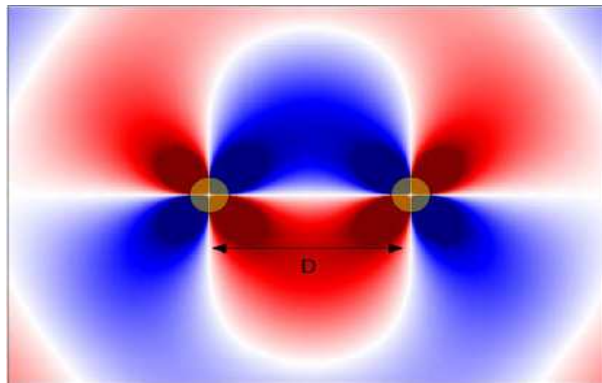


Slika 8: Slika poskusa prenosa energije s pomočjo resonančno sklopljenih tuljav na inštitutu MIT, pri katerem so na 2m prižgali 60W žarnico.

3.4 Dielektrični diski

Simulacije prenosa energije so se izvajale tudi z dielektričnimi diski. Ti v zunanjem polju preidejo v resonanco za ozek pas frekvenc v mikrovalovnem področju. Ponavadi se kot material uporablja keramika, ki ima veliko dielektrično konstanto in nizek disipacijski faktor. Samo resonančno frekvenco pa določajo velikost in oblika diska ter njegova dielektrična konstanta. V praksi se jih uporablja v nihajnih krogih za referenco frekvence.

Za prenos energije so raziskovalci uporabili dve snovi, ki imata veliko dielektrično konstanto in majhne izgube: Titania ($\epsilon \approx 96$, $Im\{\epsilon\}/\epsilon \approx 10^{-3}$) in Barijev tetratanat ($\epsilon \approx 37$, $Im\{\epsilon\}/\epsilon \approx 10^{-4}$). Izkaže se, da je faktor κ/Γ med 1 in 50, kar pomeni, da nimamo idealne močne sklopitve med diskoma (slika 9). Kljub temu pa je takšen sistem še zmeraj uporaben, predvsem na manjših skalah.

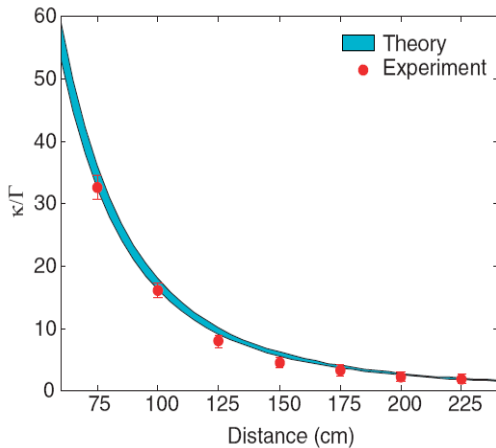


Slika 9: Simulacija sklopitve dveh dielektričnih diskov označenih z oranžno barvo. Rdeča, bela in modra barva pa označujejo pozitivno, ničelno in negativno vrednost električnega polja.

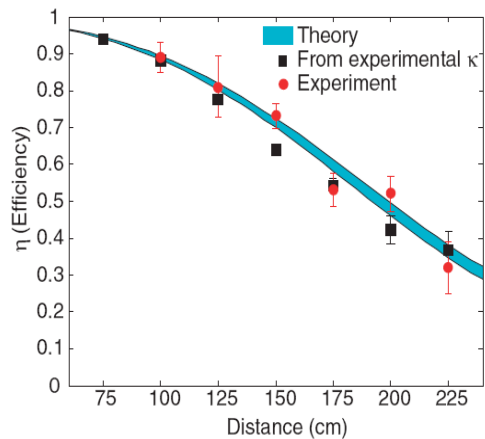
3.5 Meritve

Praktični poskus se je izvedel s pomočjo sistema opisanega na začetku podpoglavja o resonančno sklopljenih tuljavah(3.3). Oddajnik in sprejemnik sta predstavljali tuljavi premera $r=30\text{cm}$, dolžine $h=20\text{cm}$, polmera navite žice $a=3\text{mm}$ in s številom ovojev $n=5,25$. Pričakovana resonančna frekvenca je za te parametre $\nu_0 = 10,56 \pm 0,3$ MHz, pri čemer so izmerili med samim poskusom $\nu_0 = 9,90$ MHz. Težava se je pojavila pri primerjavi teoretičnega in izmerjenega Q. Saj je bil prvi za faktor tri večji od izmerjenega. To so pripisali oksidirani površini žice, saj je tok pri tej frekvenci omejen na njeno površino. Izmerjeni Q je tako znašal 950 ± 50 . Prav tako se je pokazalo, da je bil sistem močno sklopljen tudi pri maksimalni razdalji med tuljavama(2,4m), saj je bil povsod izpolnjen pogoj: $\kappa/\Gamma \gg 1$ (slika 10).

Izkoristek prenosa energije med oddajnikom in sprejemnikom so določili tako, da so merili tok na vsaki tuljavi (I_o in I_s)in s pomočjo zvez (7) in (16) izrazili disipirano moč: $P_{o,s} = \Gamma L |I_{o,s}|^2$. Izkoristek je v tem primeru: $\eta = P_A / (P_o + P_s + P_A)$; (slika 11). Pri celotni postavitvi so morali paziti, da je bil sklopitveni koeficient med gonilno in bremensko zanko resnično nič. Breme je v tem poskusu predstavljala 60W žarnica.



Slika 10: Potek eksperimentalne in izmerjene vrednosti parametra κ/Γ , ki nam določa močno sklopitev. Razširjena krivulja teoretične vrednosti je posledica negotovosti Q (5%).



Slika 11: Izkoristek v odvisnosti od razdalje. Vrednosti označene z rdečo so merjene direktno na tuljavah. S črno so označene vrednosti pridobljene iz meritev κ/Γ (slika 10).

3.6 Interakcija z okoljem

Pri interakciji z okoljem sta pomembna dva vidika. Prvi je, kako dodatni objekti v prostoru vplivajo na resonanco. Drugi pa predstavlja učinke sistema na človeški organizem. Za prvi del se izkaže, da dodani objekti vidno vplivajo šele, ko so oddaljeni od tuljav le nekaj centimetrov, kljub temu, da so na zveznici med sprejemnikom in oddajnikom. Materiali, kot sta aluminijeva folija in stiropor, v glavnem dvignejo samo frekvenco, ki je potrebna za resonanco. Podoben učinek imajo tudi živa bitja. To se da prilagajati z majhnim spreminjanjem geometrije tuljav. Za karton, les in polivinil pa se je izkazalo, da znižujejo Q , ko jih postavimo zadosti blizu tuljav in s tem manjšajo učinkovitost prenosa.

Za primer si pogledjmo numerično simulacijo, kjer je razdalja med oddajnikom in sprejemnikom $D = 5r$, pri čemer je na oddaljenosti $D_c = 10r$ še človek (c). Breme mora pri poskusu dobiti 10 W moči. Celotno moč, ki je v sistemu, zapišemo kot: $P_{tot} = P_A + P_{rad} + P_o + P_s + P_c$. Polje prikazuje (slika 12), pri čemer je na njej še vpliv stene. Rezultati so zapisani v spodnji tabeli:

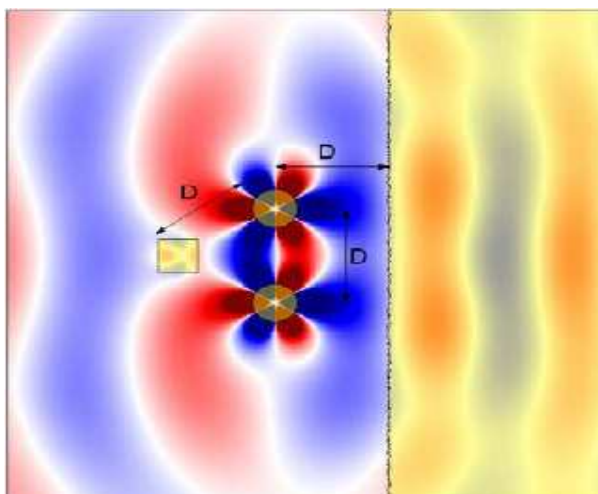
tip prenosa \ deleži	breme	sevanje	oddajnik	sprejemnik	človek
dielektrični diski	52%	43%	2,6%	1,5%	1%
kapac. prev. zanke	61%	3,6%	21,5%	13,4%	→ 0%

Pri čemer so bile moči potrebne, da smo dosegli zgornje rezultate enake: $P_{tot} = 19,3W$ za dielektrične diske in $P_{tot} = 16,4W$ za kapacitivno prevodno zanko. Vidimo, da so deleži disipacije moči zaradi prisotnosti človeka majhne, pri kapacitivno prevodnih zankah pa popolnoma zanemarljive.

Kako bi takšna naprava škodila zdravju ocenimo s primerjanjem vrednosti povprečja kvadratov (ang. root mean square RMS) velikosti električnega (E_{rms}) in magnetnega polja (H_{rms}) ter Poyntingovega vektorja (S_{rms}) z mejnimi vrednostmi IEEE varnostnih standardov.

	ν (MHz)	η	E_{rms} (V/m)	H_{rms} (A/m)	S_{rms} (W/cm ²)	Izs. moč (W)
IEEE normativi	1	-	614	16,3	0,1	-
resonančne tuljave	9,90	90%	1400	8	0,2	5
kapac. prev. zanke	10	83%	185	21	0,08	3,3
kapac. prev. zanke	1	60%	40	14	0,04	0,005

Iz tabele se da razbrati, da imajo resonančne tuljave dokaj veliko vrednost za jakost električnega polja in velikost Poyntingovega vektorja. To se da znižati z uporabo kapacitivnih prevodnih zank, ki večino električnega polja zadržijo v kondenzatorju, kar potrjuje primerjava s tretjo vrstico zgornje tabele. Prav tako je njihova lastnost, da delujejo pri nižjih frekvencah. Imajo pa po zgornji shemi manjši izkoristek.



Slika 12: Simulacija polja v okolici dveh resonančno sklopljenih dielektričnih diskov, pri čemer imamo prisotno betonsko steno in živo bitje.

3.7 Uporaba

Tovrstni prenos električne energije bi lahko imel številne aplikacije. Dosedanji poskusi so se izvajali z oddajnikom in sprejemnikom enakih dimenzij. Teoretično bi lahko oddajnik bil večji. Tako bi imeli velik glavni vir energije, ki bi lahko napajal naprave z manjšimi sprejemniki razporejenimi po sobi, saj prenos ni odvisen od orientacije. Prav tako postane bolj perspektivna uporaba v javnem prevozu. Pred leti je bila predlagana rešitev, kako napajati električno gnane avtobuse po mesnih središčih. Takrat bi za mehanizem prenosa energije uporabljali indukcijo in tuljave napeljene pod cestiščem. Seveda bi imeli kar velike izgube. Z resonančnim sistemom pa bi bili izkoristki prenosa na razdaljah pol metra še ugodni. Prav tako bi bilo koristno dejstvo, da naprava ne oddaja moči, če ni v bližini ustreznega sprejemnika.

Bolj futuristična je ideja o napajanju nano ali mikro naprav. V tem primeru bi pri prenosu uporabljali dielektrične diske. Te je sorazmerno lahko narediti v manjših velikostih, pri čemer orientacije oddajnik sprejemnik ni pomembna. To je še posebno koristno, saj bi drugače poravnavo težko dosegli na tako majhnih skalah pri premikajočih se objektih.

Sami raziskovalci so način prenosa začeli uveljavljati pod imenom WiTricity (wireless electricity). Za proizvodnjo in tržne namene pa potekajo dogovori s podjet-

jem Alticor, kot tudi s Splashpower. Zadnje je obljubilo brežične polnilce mobilnih telefonov, ki bi izkoriščali ta sistem, v enem letu.

Podjetje Alticor je v okviru programa Ecoupled izdelalo nekaj naprav, ki pa predvsem delujejo na malih razdaljah. Te so predstavili na tehnološkem sejmu. Med njimi je večnamenska plošča, na kateri se lahko polni mobilni telefon, s pomočjo električne ponve spečejo jajca ali pa prižge žarnica. Za mobilni telefon in I pod so morali narediti posebni vmesnik. Podobne naprave so bile predstavljene že prej in so delovale na indukciji. Novi način ima prednost, saj je izkoristek prenosa na razdaljah okoli 2cm pri 4 dm² veliki plošči večji od 90%.

4 Zaključek

Prenos električne energije z minimalnimi izgubami je zanimivo področje, še posebej, če to opravimo brez žic. Pojavljati so se začele ideje o oživitvi Teslovega sistema za prenos energije. Nekaj pozornosti je doživel tudi v ZDA, kjer ugotavljajo, da 2/3 vse proizvedene električne energije izgubijo na prenosu na dolgih razdaljah po električni mreži. Da bi zadostili potrebam, bi teoretično morali zgraditi dve 300MW elektrarni na teden v naslednjih dvajsetih letih. Tako so nekateri predlagali Teslov sistem prenosa energije, kjer so izgube manjše in bi s tem pridobili potrebne kW. Sama ideja verjetno ni slaba. Pomankljivost je v tem, da takšnega stolpa za prenos električne energije, z izjemo Tesle, ni preizkusil na tako veliki skali še nihče. Prav tako se pojavi vprašanje, kako bi sistem vplival na okolje. Znanstveniki so izračunali, da bi takšna dodatna dejavnost že obstoječe zemeljsko električno polje, ki znaša zaradi ionosfere okoli 100 V/m, dvignila za faktor 4 do 10. To pa naj še ne bi vplivalo na živa bitja. Tako praktično delovanje, kot tudi uporaba ostajata pod vprašajem.

V nasprotju pa ima modernejši sistem WiTricity boljšo perspektivo v domači uporabi. Za polnjenje številnih mobilnih naprav na majhnih razdaljah, ki jih je v domovih zmerom več. Še posebej temu v prid šteje poljubna orientacija in dobri izkoristki prenosa, pri čemer je biološki učinek zanemarljiv. Seveda zadnje temelji samo na teoretičnih izračunih in normativih.

Literatura

- [1] J.Glenn, *The Complete Patents of Nikola Tesla* (Barnes & Noble, New York, 1994)
- [2] R.Podgornik, *Elektromagnetno polje*
- [3] <http://arxiv.org/abs/physics/0611063>, 1.2.2008
- [4] A.Kurs,A.Karalis,R.Moffatt,J.D.Joannopoulos,P.Fisher in M.Soljačić, *Science* **317**, 83 (2007)
- [5] T.K.Sarkar, R.J.Mailloux in A.A.Oliner, *History of Wireless* (John Wiley & Sons, New Jersey, 2006)
- [6] T.F.Valone, *ExtraOrdinary Technology*, **1**, 4,(2003)