



UNIVERZA V LJUBLJANI  
FAKULTETA ZA MATEMATIKO IN FIZIKO  
ODDELEK ZA FIZIKO

## **Fizika RFID**

SEMINAR IZ UPORABNE FIZIKE

MARKO MRAVLAK  
*Mentor:* DOC. DR. PRIMOŽ ZIHERL

28. maj 2008

### **Povzetek**

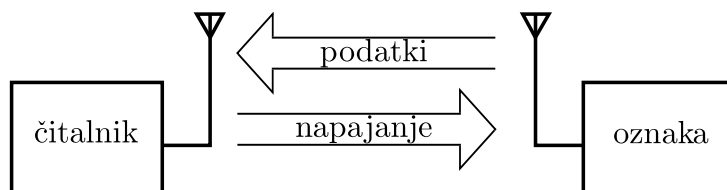
V seminarju bomo predstavili delovanje tehnologije RFID. Sistemi RFID, ki delujejo preko induktivne sklopitve in sevalne sklopitve, ter način optimizacije napajanja RFID oznak na daljavo bodo predstavljeni. Nekatere značilne karakteristike, pomembne za delovanje sistemov RFID bodo podane.

# 1 Uvod

Kratice RFID pomeni v angleščini Radio-Frequency IDentification in predstavlja tehnologijo za avtomatsko identifikiranje. Sistem RFID za identifikacijo je sestavljen iz dveh delov: posebne oznake<sup>1</sup> in čitalnika. Sestavljena sta iz električnega vezja, katerega del je tudi antena, komunikacija med njima poteka brezžično po zraku, ponavadi čitalnik tudi dovaja energijo oznaki (slika 1). Oznaka nosi informacijo, s katero unikatno definira predmet, na katerega je pritrjena. Čitalnik z oddajanjem magnetnega polja ali elektromagnetnega valovanja prebere to informacijo. Tako lahko avtomatizirano in brezkontaktno identificiramo predmete v zelo kratkem času. Možnosti uporabe takšne tehnologije je v razvitem svetu veliko. Predvsem zaradi nizkih cen se RFID uporablja množično v logističnih mrežah. V prihodnosti naj bi oznake RFID popolnoma nadomestile črtno kodo [1].

Tehnologija RFID temelji na fizikalnih odkritjih Faradaya v sredini 19. stoletja ter na odkritjih v radijski in radarski tehnologiji v prvi polovici 20. stoletja. Faraday je zaslužen za odkritje vzajemne magnetne indukcije, ki je temelj za napajanje naprav na daljavo z magnetnim poljem. Z razvojem radarjev med drugo svetovno vojno pa se je razvil način komunikacije z odbojem elektromagnetnih valov. Tehnologija RFID je zelo raznovrstna; obstaja tudi več standardov, ki definirajo različne protokole za delovanje naprav RFID.

Sisteme RFID lahko razdelimo glede na več lastnosti. Za samo delovanje sta najpomembnejši naslednji delitvi: glede na način sklopitve med oznako in čitalnikom ter glede na napajanje oznak.

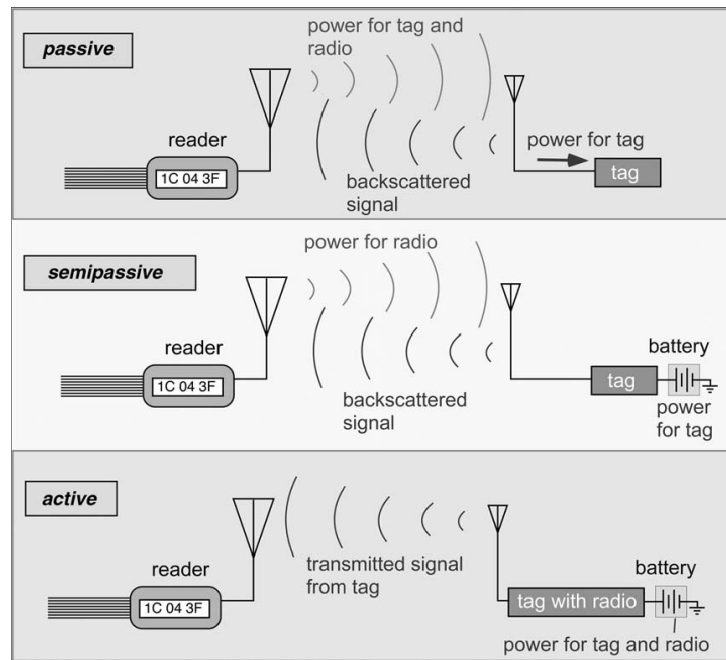


Slika 1: Sistem RFID je sestavljen iz čitalnika in oznake, ki sta sestavljena iz električnih vezij, kateri vsebujeta tudi anteni. Komunikacija med njima poteka brezžično. Oznaka vsebuje informacijo, ki jo čitalnik prebere, v nekaterih primerih lahko čitalnik tudi piše na oznako. Ponavadi dovaja čitalnik oznaki tudi energijo za delovanje [2].

## Napajanje oznak

Glede na napajanje oznak se delijo oznake sistemov RFID na aktivne, semipasivne in pasivne, kot je prikazano na sliki 2. Pasivne oznake za svoje napajanje črpajo energijo iz elektromagnetnega polja čitalnika, aktivne pa za svoje delovanje potrebujejo zunanje napajanje z baterijo. Semipasivne oznake uporabljajo dodatni vir napajanja le za delovanje integriranega vezja, za komuniciranje izkoriščajo polje čitalnika. Oznake z zunanjim napajanjem imenujemo tudi pametne oznake, saj omogočajo dodatne funkcionalnosti, kot so meritev hitrosti, temperature, določanje lege itd. Aktivne oznake omogočajo komunikacijo na večji razdalji kot pasivne. Največ oznak v uporabi je pasivnih, to so predvsem oznake izdelkov in oznake za preprečevanje kraje [1].

<sup>1</sup>Angl. *transponder*, ki pride iz kombinacije besed *transmission* in *respond*. V tem besedilu bom uporabljal besedo *oznaka*.



Slika 2: Glede na napajanje oznak delimo sisteme RFID na aktivne, semipasivne in pasivne. Aktivne oznake uporabljajo za komuniciranje zunanji vir napetosti (baterijo), semipasivne oznake uporabljajo zunanji vir energije le za napajanje integriranega vezja. Pasivne oznake nimajo zunanje baterije, ampak črpajo energijo iz elektromagnetnega polja čitalnika [3].

## Način sklopitve

Glede na način sklopitve med čitalnikom in oznako delimo sisteme RFID na induktivno sklopljene in na sevalno sklopljene. V širšem smislu sodijo med sisteme RFID še nekatere drugače sklopljene naprave, ki jih tukaj ne bomo opisovali. Različno sklopljeni sistemi RFID se razlikujejo glede na doseg, frekvence delovanja, moč, ki je dovedena oznaki in hitrost prenosa podatkov.

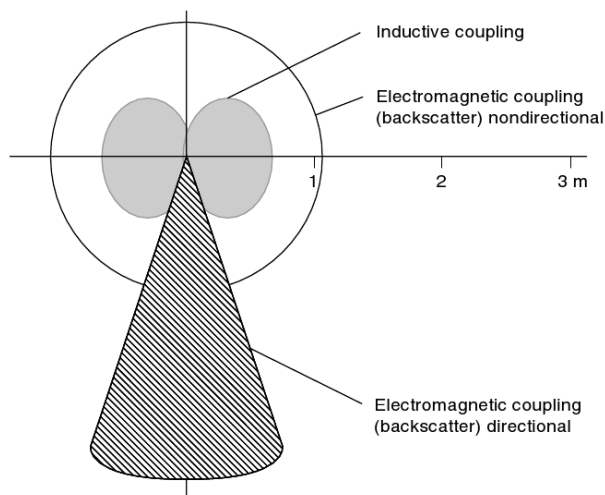
Induktivno sklopljeni sistemi RFID se uporabljajo na kratkih razdaljah med čitalnikom in oznako, doseg branja in pisanja oznake je do 1 m. V to skupino spada približno 95 % obstoječih sistemov (podatek za leto 2004 [2]). Induktivno sklopljeni sistemi najbolj pogosto uporabljajo za delovanje naslednje frekvence [1]:

- nizke frekvence (LF): 135 kHz, in
- visoke frekvence (HF): 13.56 MHz ali 27.125 MHz.

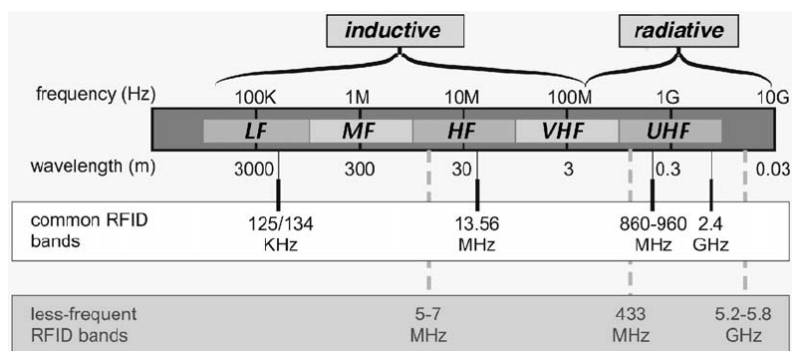
Sevalno sklopljene sisteme RFID uporabljamo na razdaljah med oznako in čitalnikom, ki so večje od 1 m. Z uporabo pasivnih oznak je mogoče doseči razdalje do 3 m (slika 3), z aktivnimi oznakami pa je možen doseg 15 m in tudi več. Standardne vrednosti frekvenc, ki jih uporabljajo sevalno sklopljeni sistemi RFID so [1]:

- ultra visoke frekvence (UHF): 868 MHz, 915 MHz, 2.5 GHz in
- super visoke frekvence (SHF): 5.8 GHz.

Še nekatere pogosto uporabljane frekvence so prikazane na sliki 4. Pri sistemih, ki imajo zelo kratek doseg, tipično do 1 cm od čitalnika, mora biti oznaka vstavljena v čitalnik ali pa na posebno mesto na čitalniku. Ti sistemi uporabljajo magnetno sklopitev in delujejo na frekvencah do 30 MHz. Takšna bližnja sklopitev med čitalnikom in oznako omogoča večji prenos energije do oznake, zato ni potrebno, da so vezja na oznakah optimizirana glede porabe energije [1]. Primer takšnih sistemov so brezžične ID kartice, kot jih uporabljamo npr. v knjigarnah, za prijavo na delovno mesto itd.



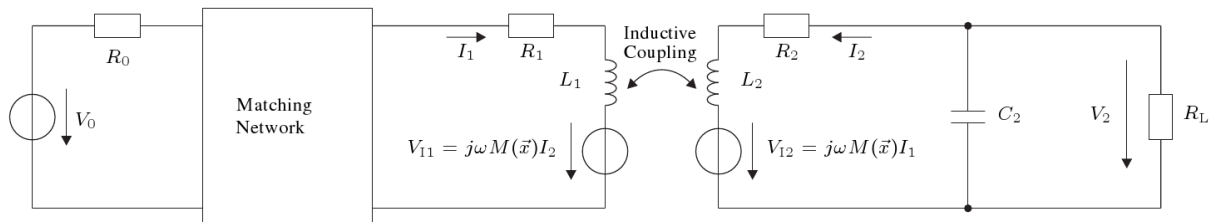
Slika 3: Prikaz dosega za sisteme RFID s pasivnimi oznakami. Območje dosega za induktivno sklopljene sisteme ni izotropno kot je za neusmerjene sevalno sklopljene sisteme. Z usmerjenimi antenami pri sevalni sklopitvi se doseg v določeni smeri poveča. Uporaba aktivnih oznak omogoča tudi večje dosege [1].



Slika 4: Sisteme RFID ločimo glede na vrsto sklopitve, ta je bodisi induktivna bodisi sevalna. Imajo različen doseg in uporabljajo druge frekvenčne pasove kot kaže gornja slika. Induktivno sklopljeni sistemi delujejo pri nižjih frekvencah, medtem ko sevalno sklopljeni sistemi uporabljajo višje frekvence [4].

## 2 Induktivna sklopitev

Večina sistemov RFID deluje v bližnjem polju in je sklopljenih z magnetnim poljem. Model takšnega induktivno sklopljenega sistema je prikazan na sliki 5. Tako čitalnik kot oznaka imata anteni predstavljeni z oznako za tuljavo. Čitalnik mora dovajati energijo oznaki; da bo dovedena moč maksimalna, se morata njuni impedanci ujemati.



Slika 5: Model induktivne sklopitve med čitalnikom in oznako. Vir napetosti na čitalniku je predstavljen z gonilno napetostjo  $V_0$  in notranjim uporom  $R_0$ , antena je predstavljen z induktivnostjo  $L_1$  in zaporednim uporom  $R_1$ . Antena na oznaki je predstavljen na isti način z  $L_2$  in  $R_2$ , frekvenca oznake je nastavljena na resonančno frekvenco s kapacitivnostjo  $C_2$ . Breme na oznaki predstavlja upor  $R_L$ , katerega vrednost je določena s porabo moči na oznaki  $P$  in zahtevano enosmerno napetostjo  $V_D$ :  $R_L = V_D^2/P$ . Induktivna sklopitev je predstavljen z medsebojno impedanco  $M$ , ki povzroča induciranje napetosti  $V_{I2}$  zaradi toka  $I_1$  v tuljavi oznake in obratno [5].

### Osnove induktivne sklopitve

Za jakost magnetnega polja  $H$  okrogle tuljave v limiti, ko je polmer tuljave  $R$  mnogo večji kot dolžina tuljave,  $d \ll R$ , in je razdalja med čitalnikom in oznako majhna v primerjavi z valovno dolžino (bližnje polje),  $x < \lambda/2\pi$ , velja:

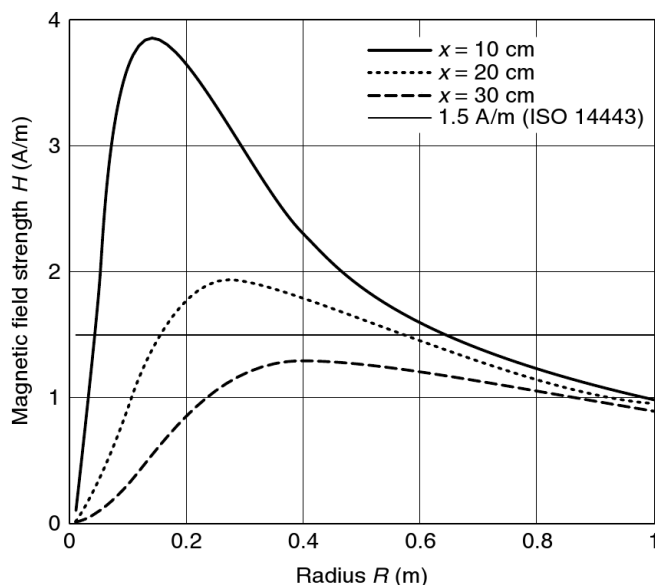
$$H = \frac{INR^2}{2(R^2 + x^2)^{3/2}}, \quad (1)$$

kjer je  $x$  oddaljenost od središča tuljave na simetrijski osi,  $N$  število ovojev in  $I$  tok, ki teče skozi tuljavo. Podobne enačbe se da izpeljati tudi za različne oblike tuljav, npr. za pravokotno tuljavo, ki se pogosto uporablja [1, 6]. Geometrijsko je magnetno polje takšne tuljave odvisno od polmera in oddaljenosti od središča tuljave. Pomembno je, da lahko za induktivno sklopljen sistem RFID, ki bo deloval na določeni razdalji, vedno poiščemo optimalen polmer za tuljavo. Odvisnost je prikazana na sliki 6. Pri tem moramo seveda poznati minimalno vrednost magnetnega polja, ki ga oznaka potrebuje za svoje delovanje.

Lastna induktivnost  $L$  je razmerje med celotnim magnetnim pretokom  $\Phi$  skozi prevodno zanko in tokom  $I$ , ki teče po njej. Za tuljavo, pri kateri je razmerje premera žice  $d$ , ki sestavlja tuljavo, in premera tuljave  $2R$  zelo majhno,  $r/2R \ll 1$ , velja:

$$L = N^2 \mu_0 R \ln \left( \frac{2R}{d} \right), \quad (2)$$

kjer je  $\mu_0$  indukcijska konstanta. Če damo v magnetno polje prve tuljave še eno tuljavo, bo del magnetnega polja prve tuljave šel tudi skozi drugo tuljavo (slika 7). Dva električna



Slika 6: Odvisnost jakosti magnetnega polja od polmera tuljave za kratko okroglo tuljavo z  $I = 1\text{ A}$  in  $N = 1$  [enačba (1)]. Za sistem RFID, ki bo deloval na določeni razdalji, moramo izbrati primeren polmer takšne antene. V tem primeru je to kar  $\sqrt{2}x$ , kjer je  $x$  doseg sistema. Največjo dovoljeno jakost magnetnega polja za nekatere sisteme določajo standardi, kot npr. ISO 14443, ki definira največjo dovoljeno jakost čitalnikovega polja [1].

kroga tako induktivno sklopimo. Velikost sklopitvenega magnetnega pretoka je odvisna od geometrijskih dimenzij obeh tuljav, njune relativne orientacije in magnetnih lastnosti okoljnega medija, npr. permeabilnosti zraka [1]. Definiramo lahko tudi medsebojno induktivnost med prevodnima zankama 1 in 2 kot razmerje med celotnim magnetnim pretokom skozi drugo zanko in tokom, ki teče skozi prvo zanko:

$$M_{21} = \oint_{A_2} \frac{B_2(I_1, \mathbf{r})}{I_1} dA_2 . \quad (3)$$

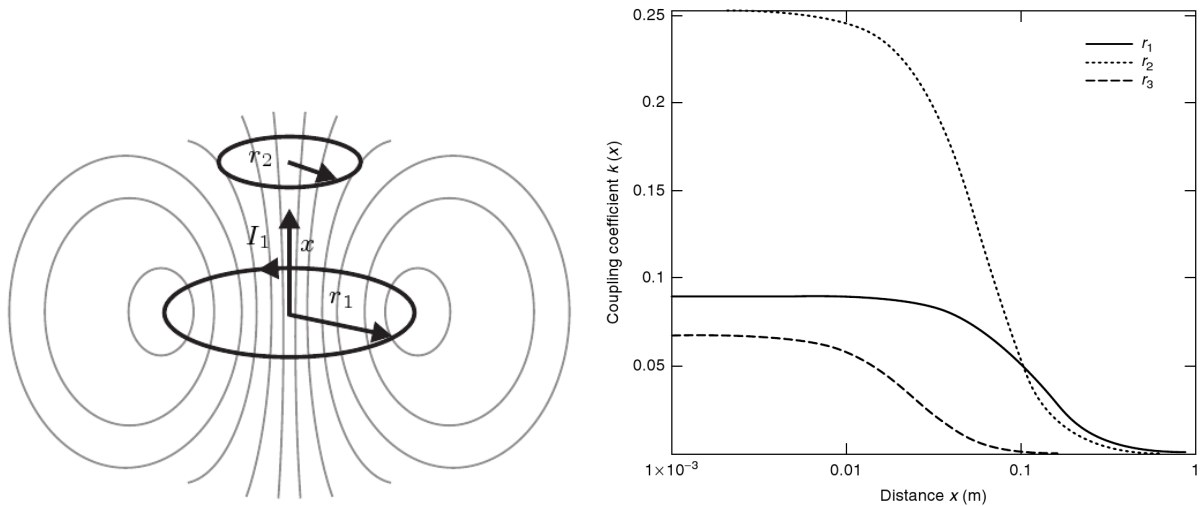
Zaradi simetričnosti velja  $M_{21} = M_{12} = M$ . Faktor sklopitve dveh tuljav je definiran kot

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} , \quad (4)$$

kjer sta  $L_1$  in  $L_2$  lastni induktivnosti obeh zank. Vrednost sklopitvenega faktorja je vedno med 0 in 1: 0 predstavlja popolnoma nesklapljeni zanki zaradi prevelike razdalje ali magnetnega ščita med njima, 1 pa popolno sklopitev obeh zank, kjer sta obe izpostavljeni enakemu magnetnemu pretoku kot npr. pri idealnem transformatorju. Analitični izračun sklopitvenih faktorjev je mogoč le za zelo enostavne primere anten (slika 7). V praksi delujejo induktivno sklopljeni sistemi s faktorji sklopitve tudi pod 0.01 [1].

## Faradayeva indukcija

Za delovanje sistemov RFID v bližnjem polju je pomemben Faradayev princip magnetne indukcije, ki pravi, da sprememba magnetnega pretoka  $\Phi$  skozi prevodno zanko inducira

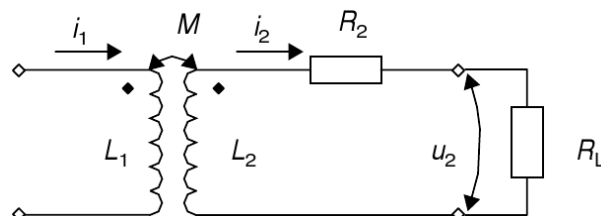


Slika 7: Prikaz dveh induktivno sklopljenih prevodnih zank (levo). Del magnetnega pretoka, ki ga ustvari prva zanka, poteka skozi drugo zanko. Faktor sklopitve kot funkcija razdalje med čitalnikom in oznako za različne velikosti tuljave čitalnika (desno). Polmer tuljave na oznaki je 2 cm. Vidimo lahko, da je faktor sklopitve zelo majhen in po določeni razdalji zelo hitro pada [1].

napetost  $U_i$  na koncih zanke:

$$U_i = - \frac{d\Phi}{dt} . \quad (5)$$

Preprost model induktivno sklopljenih tuljav je prikazan na sliki 8. Čitalnik pošlje iz-



Slika 8: Shema električnih krogov induktivno sklopljenega sistema. Levo vezje predstavlja čitalnik in desno oznako.  $L_1$  in  $L_2$  sta lastni induktivnosti obeh tuljav, ki sta povezani z medsebojno induktivnostjo  $M$ .  $R_2$  je notranji upor druge tuljave in  $R_L$  upor bremena na oznaki [1].

menični tok skozi tuljavo, zaradi česar nastane v bližnji okolici tuljave izmenično magnetno polje. Če v to polje vstavimo drugo manjšo tuljavo, se v njej inducira izmenična napetost, ki se lahko uporabi za napajanje oznake. Upoštevati je potrebno še, da tok v tuljavi oznake zopet inducira magnetno polje, ki nasprotuje prvotni spremembi magnetnega pretoka, in pade napetosti zaradi upornosti  $R_L$ , ki predstavlja breme integriranega vezja na oznaki. Vse skupaj zapišemo z enačbo:

$$u_2 = M \frac{di_1}{dt} - L_2 \frac{di_2}{dt} - i_2 R_2 , \quad (6)$$

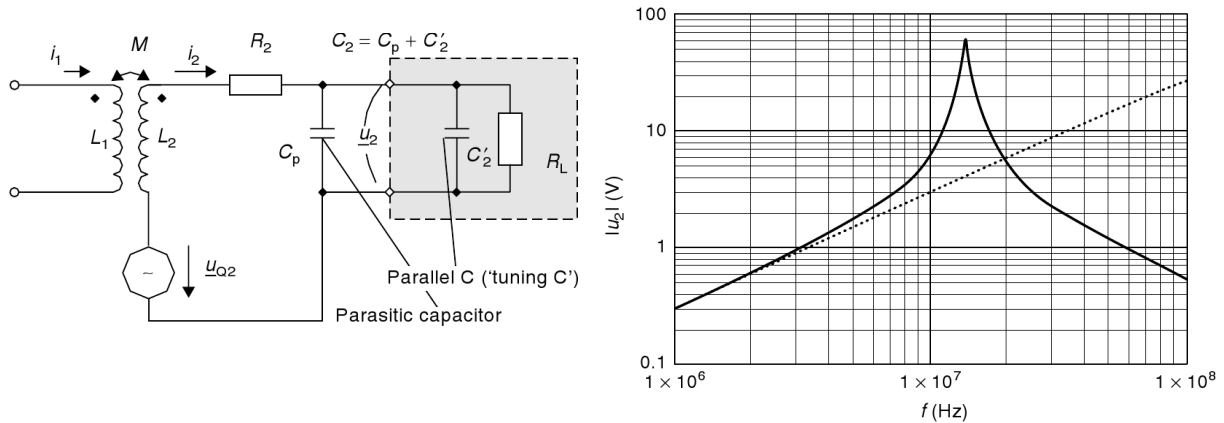
od koder z uvedbo kompleksnega zapisa,  $i_1 = i_{10} \exp(j\omega t)$ , kjer je  $j$  kompleksna enota, dobimo:

$$u_2 = \frac{j\omega M i_{10}}{1 + (j\omega L_2 + R_2)/R_L} . \quad (7)$$

Lastnosti vezja, prikazanega na sliki 8, lahko močno izboljšamo, če vezju dodamo kondenzator s kapaciteto  $C_2$ , ki tvori s tuljavo na oznaki  $L_2$  resonančni krog, katerega frekvenco izberemo enako frekvenci čitalnika (slika 9). Frekvenca resonančnega kroga je  $\omega = 1/\sqrt{L_2 C_2}$ . Upoštevati je potrebno še parazitsko kapaciteto realnega kroga  $C_p$ :  $C_2 = C'_2 + C_p$ . Napetost na oznaki  $u_2$  v primeru resonančne sklopitve podaja enačba [1]:

$$u_2 = \frac{j\omega k \sqrt{L_1 L_2} i_{10}}{1 + (j\omega L_2 + R_2)(1/R_L + j\omega C_2)} . \quad (8)$$

Odvisnost  $u_2$  od frekvence je prikazana na sliki 9. Pri sistemih RFID, ki delujejo pri višjih frekvencah, 13.56 MHz in 27.125 MHz, je kapacitivnost  $C_2$  tako majhna, da ne potrebujemo dodatnega kondenzatorja, ampak jo zagotavlja že sama parazitska kapacitivnost tuljave [1].



Slika 9: Shematično vezje za magnetno sklopljeni prevodni zanki (levo). Tuljava  $L_2$  in kondenzator  $C_2$  na oznaki tvorita resonančni krog, ki pripomore k močnejši sklopitvi med čitalnikom in oznako. Desno je predstavljena napetost v tuljavi oznake kot funkcija frekvence harmoničnega toka v vezju čitalnika v območju od 1 do 100 MHz. Amplituda toka, ki teče skozi tuljavo čitalnika, je konstantna. Polna črta predstavlja napetost na tuljavi za resonančni krog, črtkana pa primer, ko imamo samo tuljavo (slika 8). Napetost na tuljavi z resonančnim krogom močno naraste, ko jo vzbujamo pri resonančni frekvenci  $f_{res} = 13.56$  MHz, pri višjih frekvencah inducirana napetost strmo pade pod vrednost za tuljavo samo [1].



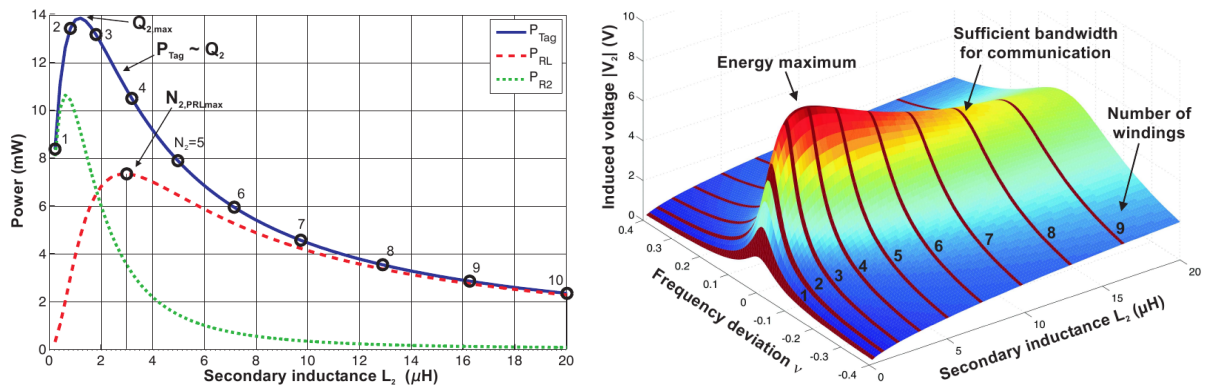
## Optimizacija sklopitve

Induktivno sklopljen sistem RFID je lahko optimiziran glede na faktor sklopitve, pasovno širino in prenos moči. Za to je potrebno najprej poznati impedanco vezja, iz katere lahko izračunamo dobroto  $Q$ . Dobrota resonančnega kroga  $Q$  predstavlja vpliv elementov vezja  $R_2$ ,  $R_L$  in  $L_2$  na napetost  $u_2$  v resonančnem krogu. Definirana je kot absolutna vrednost razmerja med reaktanco in upornostjo. Za vezje oznake na sliki 9 se dobrota zapiše kot [1]

$$Q = \left( \frac{R_2}{\omega L_2} + \frac{\omega L_2}{R_L} \right)^{-1}. \quad (9)$$

Vrednosti dobrote  $Q$  so velike za majhne upornosti tuljave  $R_2 \rightarrow 0$  in velike upornosti bremena  $R_L \gg 0$  in majhne za  $R_2 \rightarrow \infty$  in  $R_L \rightarrow 0$ . Velike vrednosti dobrote torej pomenijo majhno porabo energije, ki se troši na tuljavi oznake.

Faktor dobrote  $Q$  je sorazmeren napetosti  $u_2$  in s tem tudi moči, ki se troši na oznaki. Maksimalno dovedeno moč lahko torej določimo iz maksimalne vrednosti dobrote  $Q$  [5]. Parametra, ki ju lahko izbiramo pri optimizaciji dobrote  $Q$ , sta  $L_2$  in  $R_2$ , medtem ko je  $R_L$  določen z zahtevano napetostjo na bremenu in tokom,  $C_2$  pa izbran tako, da je lastna frekvenca kroga enaka čitalnikovi frekvenci:  $C_2 = 1/\omega^2 L_2$ . Odvisnost dobrote  $Q$  od induktivnosti doseže vrh pri določeni vrednosti  $L_2$  (slika 10). Ker sta  $L_2$  in  $R_2$  odvisna od števila ovojjev, s tem določimo optimalno število ovojjev  $N_2$  na tuljavi oznake.

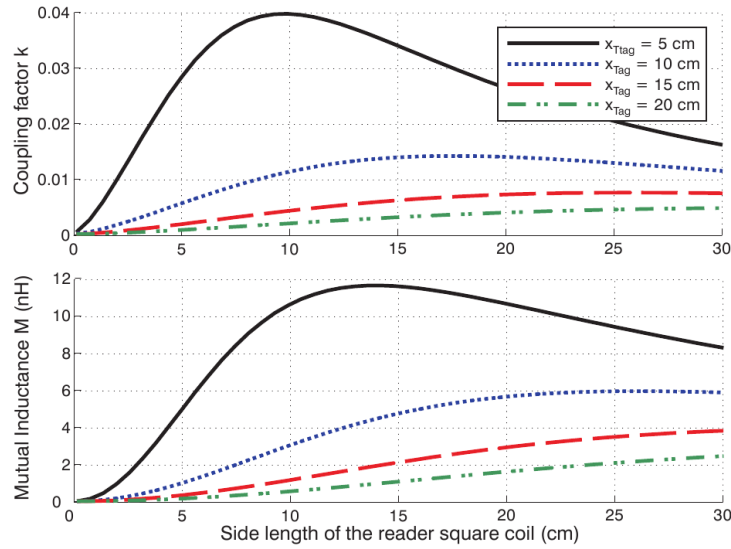


Slika 10: Moč na oznaki ter na delih oznake, tuljavi in bremenu posebej, kot funkcija induktivnosti  $L_2$  (levo). Najdemo lahko vrednost induktivnost za optimalno dovedeno moč, vendar je potrebno  $L_2$  izbrati tako, da se ne bo trošilo preveč moči na uporu tuljave. Parametri so izbrani kot pri tipičnih induktivno sklopljenih sistemih RFID:  $f = 13.56 \text{ MHz}$ ,  $R_2 = 0.8 \Omega$ ,  $k = 0.03$ ,  $I_1 = 100 \text{ mA}$  in  $L_1 = 0.53 \mu\text{H}$ . Desno je prikazana inducirana napetost na tuljavi čitalnika v odvisnosti od relativnega odstopanja frekvenca  $\nu$  in induktivnosti  $L_2$ , kjer so vrednosti za posamezna števila ovojjev posebej označene. Zopet opazimo izrazit maksimum, a je tukaj treba upoštevati še zahtevano pasovno širino za komunikacijo med čitalnikom in oznako, zaradi česar prenos moči ne more biti maksimalen [5].

Za vsako oznako z bremenom  $R_L$  lahko torej poiščemo induktivnost  $L_2$ , pri kateri je vrednost dobrote  $Q$  in s tem napetosti  $u_2$  na oznaki maksimalna. Pri snovanju sistemov RFID je to potrebno upoštevati, da je doseg induktivno sklopljenega sistema maksimalen.

Pri tem je potrebno upoštevati tudi, da je vpliv toleranc v sistemu prav tako maksimalen pri  $Q_{max}$ . To je še posebej pomembno pri masovni proizvodnji oznak, kjer je potrebno zagotoviti, da bo pri maksimalni razdalji med čitalnikom in oznako pri  $Q \ll Q_{max}$  delovanje še vedno dovolj zanesljivo [1].

Sklopitveni faktor  $k$  optimiziramo s spreminjanjem induktivnosti čitalnikove tuljave  $L_1$  oziroma vzajemne induktivnosti  $M$  pri konstantni vrednosti  $L_2$ . Numerični izračun sklopitvenega faktorja in vzajemne induktivnosti je prikazan na sliki 11, kjer lahko opazimo, da se optimalna dimenzija čitalnikove antene spreminja z zelenim dosegom. Tuljave na čitalniku so ponavadi kvadratne z enim samim ovojem, saj je to optimalno za prenos moči in za prenos podatkov [5].



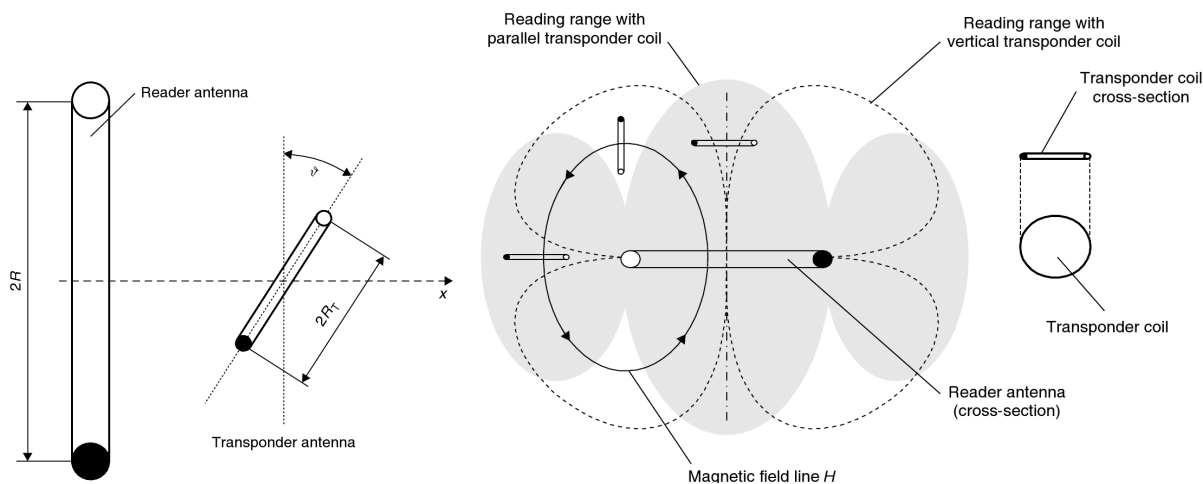
Slika 11: Koeficient sklopitve  $k$  in medsebojna induktivnost  $M$  v odvisnosti od dolžine stranice kvadratne tuljave čitalnika. Tuljava na oznaki je kvadrat s stranico 5 cm. Krivulje prikazujejo odvisnosti za različne razdalje med čitalnikom in oznako. Pri določeni razdalji se optimalna dolžina stranice čitalnikove tuljave spreminja [5].

V zgornjih primerih smo vedno privzeli, da sta bili tuljavi čitalnika in oznake vzporedni in njuni središči na skupni osi. Če je tuljava oznake nagnjena pod kotom  $\vartheta$  glede na skupno os (slika 12), se inducirana napetost zmanjša:

$$u_{i\vartheta} = u_i \cos(\vartheta) . \quad (10)$$

Magnetne silnice okoli tuljave so ukrivljene, kar še dodatno vpliva na magnetni pretok in s tem na inducirano napetost na oznaki na različnih področjih okoli tuljave čitalnika. Okoli čitalnika zato obstaja značilno območje, kjer se le-ta lahko sklopi z oznako. Za dve različni orientaciji  $\vartheta = 0$  in  $\vartheta = \pi/2$  je to območje prikazano na sliki 12.

Nihajočo napetost, ki se inducira v tuljavi oznake, ojačevalnik z majhnimi izgubami ojača in pretvori v enosmerni tok. S posebnim spremenljivim uporom zagotovimo tudi, da je napetost na oznaki enakomerna in ne preseže vrednosti, ki jo vezje na oznaki potrebuje za delovanje [1].



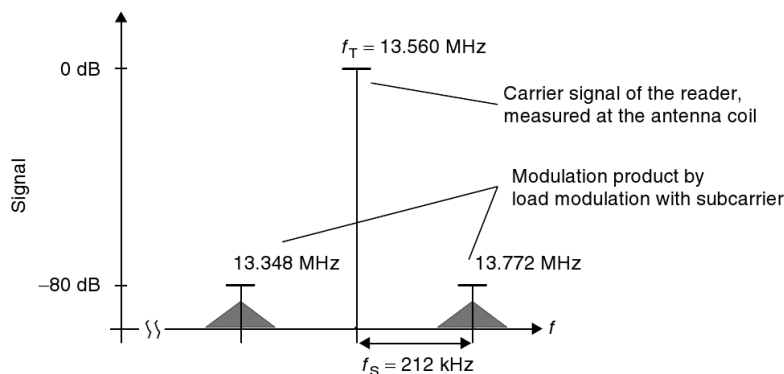
Slika 12: Prikaz tuljave na oznaki, nagnjene za kot  $\vartheta$  glede na skupno os s tuljavo čitalnika, v prerezu (levo). Shematski prikaz bralnega območja okoli čitalnika s kratko okroglo tuljavo za različni orientaciji tuljave na oznaki v prerezu (desno). Na označenih območjih se lahko čitalnik induktivno sklopi z oznako [1].

## Komunikacija med čitalnikom in oznako

Do sedaj so nas zanimala lastnosti induktivno sklopljenega sistema z vidika oznake. V realnih sistemih RFID ima tudi čitalnik dodan kondenzator, ki tvori s tuljavo zaporedno vezani resonančni krog z določeno resonančno frekvenco. Če tak krog napajamo pri resonančni frekvenci, je vrednost impedance celotnega vezja realna in enaka upornosti tuljave. Če v polje čitalnika postavimo oznako, lahko zaznamo spremembo v toku skozi tuljavo na čitalniku. To je v skladu z Lenzovim pravilom, ki pravi, da je inducirana napetost takšna, da nasprotuje prvotni spremembi magnetnega pretoka. Na čitalniku se to pozna v prisotnosti dodatnega imaginarnega dela impedance, ki ga imenujemo transformirana impedanca oznake [1]. Prenos informacije najbolj pogosto poteka s t.i. bremensko modulacijo<sup>2</sup>. Transformirano impedanco oznake lahko časovno spreminjamo z upornostjo bremena  $R_L$  in kapacitete kondenzatorja  $C_2$  na oznaki, zato ločimo ohmsko in kapacitivno bremensko modulacijo. Če spreminjamo upornost bremena na oznaki, se bo spreminjala amplituda napetosti na čitalnikovi tuljavi, medtem ko resonančna frekvenca ostaja ista. To je torej amplitudna modulacija, pri kateri ponavadi vklopljamo in izklopljamo vzporedno vezan dodatni upor v vezju oznake. Če v vezje vporedno vežemo dodaten kondenzator in ga modulirano vklapljamo, se spreminja resonančna frekvenca vezja oznake, kar povzroči spremembo amplitude in faze transformirane impedance oznake. To je kombinacija frekvenčne in amplitudne modulacije.

Ker je sklopitev med čitalnikom in oznako zelo majhna ( $k \approx 0.01$ ), je modulacija amplitude napetosti na čitalnikovi tuljavi več redov manjša kot izhodna napetost čitalnika. Pri sistemih, ki delujejo pri višjih frekvencah, npr. 13.56 MHz, se zato uporablja dodatna frekvenčna pasova (slika 13), ki jih generira vklapljanje in izklopljanje dodatnega upora na oznaki s frekvenco  $f_s$ ; dodatna pasova imata potem frekvenci  $\pm f_s$  okoli frekvence čitalnika. Pasovna širina je obratno sorazmerna z dobroto  $Q$ , zato je treba pri načrtovanju sistema

<sup>2</sup>Angl. *load modulation*.



Slika 13: Bremenska modulacija ustvari dva frekvenčna pasova okoli oddajne frekvence čitalnika. Čitalnik, ki ta dva pasova odčita s pasovnim filtrom, dobi s tem močnejši signal kot od samih fluktuacij napetosti na tuljavi, saj je sklopitev z oznako zelo šibka. Za takšen prenos informacije je potrebna tudi večja pasovna širina [1].

poiskati kompromis med hitrostjo prenosa in dosegom. Sistemi, kot je npr. brezkontaktna pametna kartica, so zato narejeni za dosege okoli nekaj centimetrov, saj zahtevajo hiter prenos podatkov, medtem ko brezkontaktna kartica za dostop ponavadi samo prenesejo serijsko številko in lahko zato delujejo tudi na daljše razdalje. Upoštevati pa je potrebo še omejitve za frekvenčne pasove, ki jih določajo razni standardi. Vrednosti za obstoječe standarde sistemov RFID so prikazani v tabeli 1.

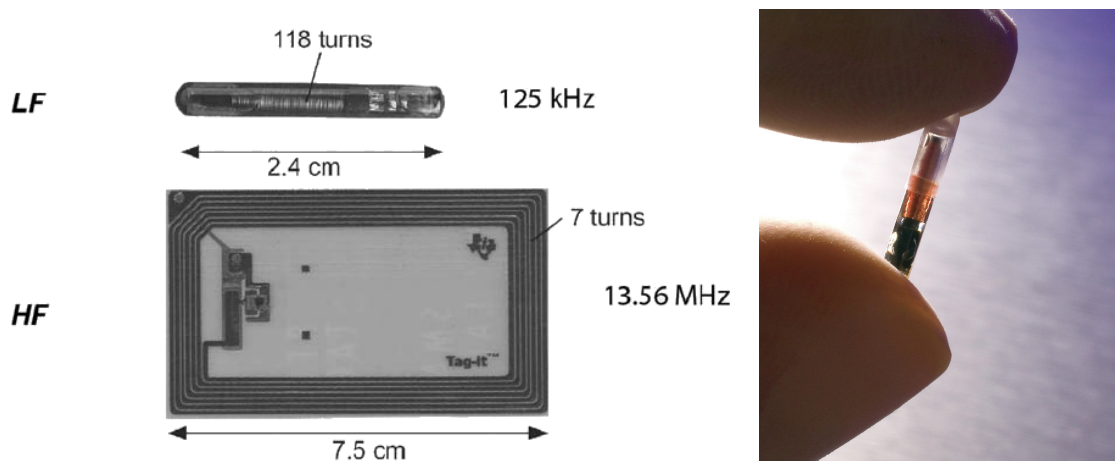
System	Baud rate	$f_{\text{Subcarrier}}$	$f_{\text{TX}}$	Range
ISO 14443	106 kBd	847 kHz	13.56 MHz	0–10 cm
ISO 15693 short	26.48 kBd	484 kHz	13.56 MHz	0–30 cm
ISO 15693 long	6.62 kBd	484 kHz	13.56 MHz	0–70 cm
Long-range system	9.0 kBd	212 kHz	13.56 MHz	0–1 m
LF system	–0–10 kBd	No subcarrier	<125 kHz	0–1.5 m

Tabela 1: Hitrost prenosa podatkov za različne standarde induktivno sklopljenih sistemov RFID z različnimi nosilnimi frekvencami. Velika dobrota  $Q$  poveča doseg sistema RFID, vendar se pri tem zmanjša pasovna širina in s tem hitrost prenosa podatkov med čitalnikom in oznako [1].

Kadar je v okolici čitalnika veliko število oznak, mora čitalnik izbrati oznako, s katero želi komunicirati. V nekaterih primerih mora čitalnik preveriti, ali je oznaka z določeno identifikacijsko številko prisotna v njegovem bralnem območju. To lahko stori z iskanjem po dvojiškem drevesu, katerega listi so identifikacijske številke oznak [4]. Oznake začnejo sporočati svoje identifikacijske številke ob istem času. Čitalnik se v vsakem koraku odloči za polovico preostalih možnosti. Iskalni čas je logaritemski.

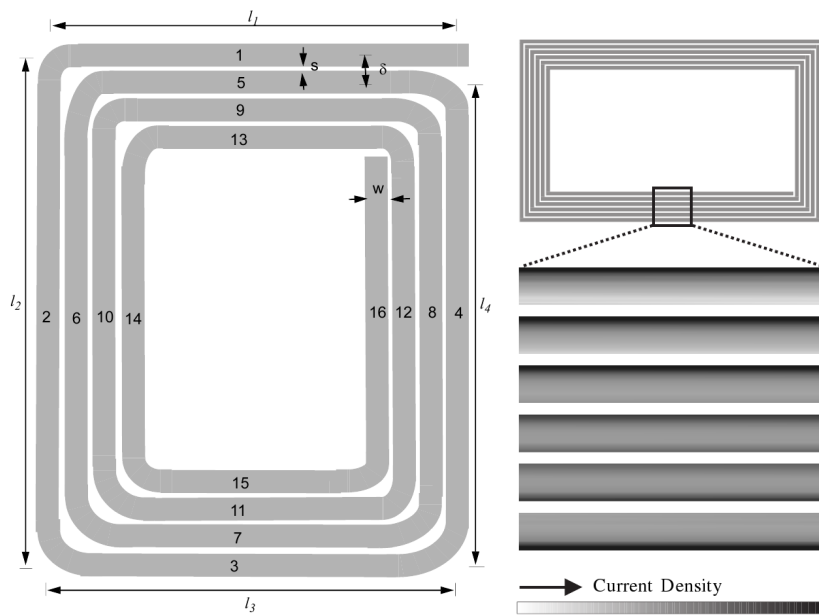
## Oznake

Induktivno sklopljeni sistemi torej uporabljajo za antene tuljave. Inducirana napetost v tuljavi je sorazmerna s številom ovojev, velikostjo tuljave in frekvenco, na kateri deluje. Sistemi, ki delujejo pri 125 kHz, imajo antene z 10 do 100 ovojev, da zagotovijo primerno napetost za integrirano vezje na oznaki. Nekatere oznake so zelo majhne, npr. oznake za sledenje živalim (slika 14), namenjene za vgradnjo v kožo, kjer je značilna dolžina tuljave 5 mm in premer 0.75 mm. Medsebojna induktivnost, ki je pomembna za napajanje oznake, je sorazmerna s presekom tuljave in zato zelo majhna. V tuljavo zato vstavimo feritni material, zaradi česar se induktivnost antene pomnoži s permeabilnostjo jedra. Tako lahko kompenziramo majhen presek tuljave [1]. Takšne antene se izdelujejo z navijalnimi stroji in so zato razmeroma drage. Antene z manj navoji imajo manjši doseg. Velikosti anten na čitalniku so odvisne od zelenega dosega in imajo ponavadi 10 - 20 ovojev [4]. Pri 13.56 MHz, ko je frekvenca za faktor 100 večja, potrebuje tipična oznaka na kreditni kartici le 3-6 ovojev za doseg nekaj 10 cm (slika 15). Te antene se izdelujejo z litografijo (*patch antenna*) in so dosti cenejše. Čitalnikove antene pri HF imajo ponavadi en sam ovoj.

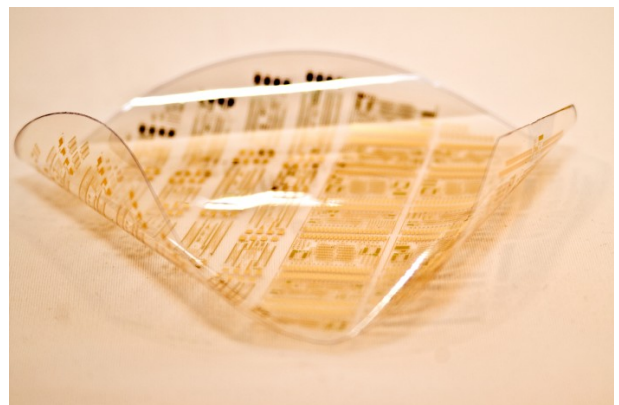


Slika 14: Primer oznak za induktivno sklopljene sisteme RFID. Brezkontaktna pametna kartica, čip za sledenje živalim (levo). Velikost VeriChipa (desno), ki je namenjen za vgradnjo v kožo ljudi za namene identifikacije, je približno enaka riževemu zrnu [4].

Zelo aktualne so oznake, ki so sestavljene iz popolnoma organskih polprevodniških materialov. Takšni materiali imajo podobne karakteristike kot silicijevi polprevodniki, vendar dosti slabše, kar pa za večino sistemov RFID ni pomembno, saj želimo z njimi samo prenesti identifikacijsko številko oznake. Takšne oznake so zelo poceni in tudi enostavne za izdelavo, lahko jih natisnemo na polimerno plast kar z brizgalnim tiskalnikom. So tudi upogljive in raztegljive. Zaradi teh lastnosti naj bi takšne oznake nadomestile črtne kode za označevanje proizvodov v vsakdanji množični rabi [7]. Primer organske RFID oznake in na njej integriranega vezja je prikazan na sliki 16.



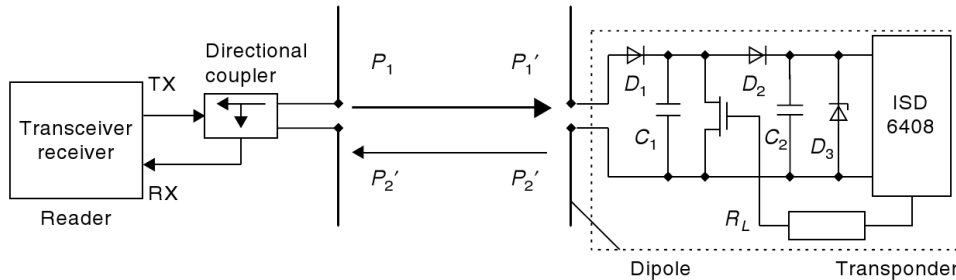
Slika 15: Tipična pravokotna spiralna antena, ki se uporablja na oznakah (levo). Pri izračunu lastne induktivnosti takšne antene je potrebno upoštevati vsoto samoinduktivnosti vseh ravnih delov, ki so označeni z različnimi številkami, in odšteti vse medsebojne induktivnosti med posameznimi ravnimi deli antene. Pri tem je potrebno upoštevati smer toka v posameznih delih, njihovo dolžino in razmaknjenost [6]. Natančnejše računalniške simulacije upoštevajo tudi kožni pojav, kjer je potrebno upoštevati tudi, da magnetno polje sosednjih delov antene povzroči nesimetrično razporeditev toka kot je prikazano za pravokotno spiralno anteno. Bolj siva območja pomenijo večjo gostoto toka (desno) [5].



Slika 16: Organska RFID oznaka (levo) z resonančno frekvenco 13.56 MHz in dosegom 10 cm pri jakosti magnetnega polja 1.25 A/m. Oznaka vsebuje 64-bitno kodo, ki jo lahko prenese s hitrostjo 787 bits/s. Vezje, ki je integrirano na oznaki, vsebuje približno 400 organskih tranzistorjev (levo). Takšna vezja so upogljiva in praktična za izdelavo z brizgalnimi tiskalniki. Organske RFID oznake bi naj nadomestile črtne kode [7].

### 3 Sevalna sklopitev

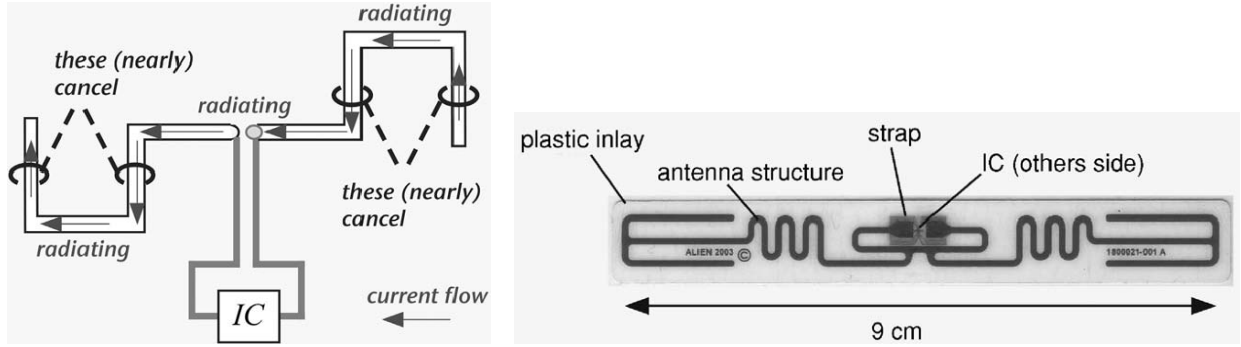
Polje v okolici antene delimo na bližnje in daljno. Bližnje polje sega do približno  $\lambda/2\pi$  od antene, kjer se elektromagnetno polje začne ločevati od antene in širiti v okolni prostor kot ravni valovi. Območje, v katerem so se elektromagnetni valovi že izoblikovali, imenujemo daljno polje. Začne se pri oddaljenosti približno  $2d^2/\lambda$ , če ima antena velikost  $d$ , ki je velika v primerjavi z valovno dolžino  $\lambda$ . Induktivno sklopljeni sistemi RFID v daljnem polju ne delujejo, ampak se uporabljajo sevalno sklopljeni sistemi [1]. Shema sestave takšnega sistema je prikazana na sliki 17.



Slika 17: Shematski prikaz komponent sevalno sklopljenega sistema RFID. Levo je prikazan čitalnik in desno oznaka. Pri sevalni sklopitvi se uporabljajo dipolne antene. Del elektromagnetnega valovanja se na anteni oznake odbije in del porabi za napajanje oznake. Napetost na oznaki ojačamo z ojačevalnikom, ki ga sestavljajo Schottkyjeve diode [1].

V primeru sevalne sklopitve se uporabljajo dipolne antene in t.i. patch antene, skozi katere teče izmenični tok, ki niha z visoko frekvenco. V splošnem ima antena kompleksno impedanco:  $Z_{ant} = R_l + R_s + jX_{ant}$ , kjer je z  $X_{ant}$  označen kompleksni del.  $R_l$  je upornost zaradi izgub v elementih, ki tvorijo anteno, ponavadi je to baker.  $R_s$  je sevalna upornost, ki predstavlja izgube zaradi sevanja antene. Pri konstrukciji anten želimo doseči čim večjo sevalno upornost in čim manjšo  $R_l$ . Dipolne antene so narejene samo iz kosa bakra in so zato poceni za izdelavo, vendar so ponavadi slabo impedančno sklopljene z integriranim vezjem na oznaki.  $\lambda/2$  dipoli so pri frekvenci 900 MHz dolgi 16 cm in so predolgi za večino aplikacij oznak RFID; nalepke so npr. ponavadi velikosti 10 cm. Dipolne antene zato zvijamo, da dobijo meandersko obliko (slika 18). Tem bolj so antene zvite, tem manjša je njihova površina in manj antena seva, saj v več delih antene teče tok v nasprotno smer in elektromagnetno polje obeh delov se približno izniči [4]. Za zelo gosto zvito anteno v približku seva jo le deli, ki so v smeri prvotnega nezvitega dipola, zato se njeno sevalno polje zmanjša z razmerjem dolžin. Če je dolžina zvite antene v smeri prvotnega dipola  $d$ , je sevalna upornost gosto zvite antene približno  $R'_s \approx (2l/\lambda)^2 R_s$ , saj je sevalna moč sorazmerna s kvadratom električnega polja. Pri zviti anteni se zmanjšata tudi induktivnost in kapacitivnost antene, zaradi česar se poveča resonančna frekvenca antene. Zaradi tega mora biti celotna dolžina zvite antene daljša kot pri dipolni anteni za delovanje pri enaki frekvenci. Drug način za sestavo krajše antene s primerno impedanco je razširjenje antene na koncih, kar poveča kapacitivnost antene [4]. Antena na sliki 18 je kombinacija obojega.

Ko elektromagnetni val, ki ga odda antena, pride v stik z oviro, se ga nekaj absorbira in nekaj odbije v različne smeri. Majhen del odbitega valovanja pride tudi nazaj do



Slika 18: Tok v sosednjih delih zvite antene teče v nasprotni smeri, zato ti deli antene ne sevajo (levo). Primer zvite in na koncih razširjene antene, ki se uporabljaja pri sevalno sklopljenih sistemih. Celotna dolžina žice pri takšni anteni mora biti daljša kot pri dipolni anteni, vendar je končna velikost manjša [4].

oddajne antene, kar radarji izkoriščajo za določanje lege oddaljenih objektov. Sistemi RFID izkoriščajo odboj elektromagnetni valov za komunikacijo med čitalnikom in oznako. Gostota sevanja antene pada z drugo potenco razdalje, če antena seva z efektivno izotropno močjo  $P_{EIRP}$  v vse smeri:  $S = P_{EIRP}/4\pi r^2$ . Moč odbitega valovanja na anteni oznake je odvisna od radarskega preseka  $\sigma$  in gostote sevanja na oznaki:  $P_S = \sigma S$ . Odbito elektromagnetno valovanje zopet potuje v vse smeri od oznake in se zato zmanjšuje s kvadratom razdalje. Sevalna moč, ki doseže čitalnik po odboju na oznaki, oddaljeni za  $r$ , je torej:

$$S_B = \frac{\sigma P_{EIRP}}{(4\pi)^2 r^4}. \quad (11)$$

Radarski presek  $\sigma$ , ki ga imenujemo tudi odbojna apertura, je merilo za to, kako dobro objekti odbijajo elektromagnetno valovanje, odvisen je predvsem od valovne dolžine valovanja in velikosti objekta, ki mora biti vsaj  $\lambda/2$ , da pride do odboja. Za objekte, katerih velikosti je primerljiva z valovno dolžino valovanja, je  $\sigma$  posebej velik in če je objekt, na katerem se obijajo elektromagnetni valovi, antena z enako lastno frekvenco kot prihajajoče valovanje, se  $\sigma$  močno poveča [1].

Maksimalna prejeta moč, ki jo lahko dobimo od antene na oznaki, če sta obe anteni relativno optimalno orientirani in ustrezno polarizirani, je sorazmerna z gostoto sevanja prihajajočega valovanja  $S$  na oznaki:  $P_e = A_e S$ . Sorazmernostni faktor  $A_e$  se imenuje efektivna apertura. Maksimalna efektivna apertura je povezana z ojačanjem antene  $G_r$  in valovno dolžino  $\lambda$ :  $A_e = \lambda_{RF}^2 G_r / 4\pi$ .  $P_e$  se lahko zato zapiše kot [1]

$$P_e = P_{EIRP} G_r \frac{\lambda_{RF}^2}{(4\pi r)^2}. \quad (12)$$

Ta enačba je znana pod imenom Friisova enačba in pove, kolikšna je dovedena moč na oznaki. V splošnem je dovedena moč odvisna tudi od medsebojne orientacije čitalnika in oznake, reflektivnih koeficientov anten in polarizacije valovanja. Na koncih dipolne antene se zaradi prihajajočega elektromagnetnega polja inducirana napetost. Ta je sorazmerna z jakostjo električnega polja prihajajočega vala:  $U_0 = l_0 E$ . Sorazmernostni faktor se



imenuje efektivna dolžina, izračunamo jo lahko iz efektivne aperture [1]:

$$l_0 = 2\sqrt{\frac{A_e R_s}{Z_F}}, \quad (13)$$

kjer  $R_s$  in  $Z_F = \sqrt{\mu_0 \epsilon_e}$  predstavljata sevalno upornost antene in impedanco sevanja. Moč, ki jo dovedemo oznaki, je reda nekaj mW, zato so napetosti na anteni zelo šibke, ponavadi jih ojačamo z ojačevalnikom s Schottkyjevimi diodami. V območju bližnjega polja pada jakost elektromagnetnega polja na osi tuljave s tretjo potenco oddaljenosti, v območju daljnega polja pa s tretjo potenco oddaljenosti. Efektivni doseg pasivnih, sevalno sklopljenih RFID oznak je 3-4 m [1].

Odbojna apertura oznake je odvisna od vhodne impedance integriranega vezja. S spreminjanjem te impedance časovno moduliramo odbojno aperturo  $\sigma$  in s tem odbito moč, ki pride do čitalnika. Na tak način lahko pošiljamo podatke od oznake do čitalnika. To se imenuje moduliran odboj. Za uspešno komunikacijo čitalnika s pasivno oznako morata biti izpolnjena dva pogoja: oznaki mora biti dovedeno dovolj moči za delovanje in signal, ki ga oznaka odbije, mora biti dovolj močan, ko doseže čitalnika. Za prenos informacije zopet uporabljamo stranske pasove v spektru [4].

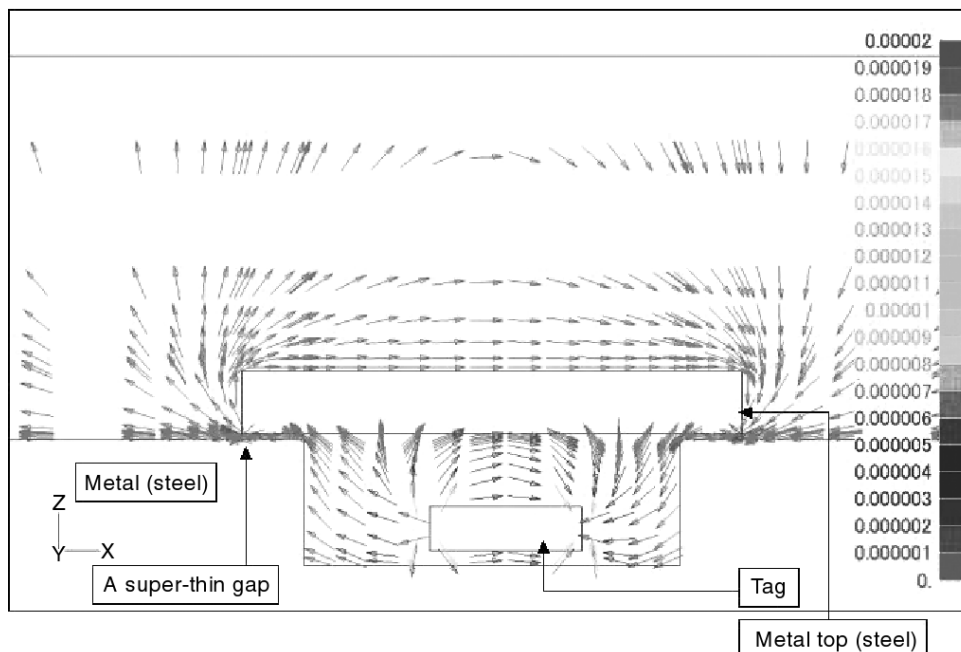
## 4 Vplivi okolja in različnih materialov na radiofrekvenčne signale

Induktivno sklopljene oznake RFID uporabljamo tudi za označevanje kovinskih predmetov. Namestitev tuljave na kovino pa ni možna, saj inducirane vrtničnih tokov v kovini nasprotuje prvotni spremembi magnetnega pretoka (po Lenzu) in močno zmanjša magnetno polje v bližini kovinske površine. Če med kovino in tuljavo vstavimo feritni material z veliko permeabilnostjo, se efekt vrtničnih tokov močno zmanjša in oznake lahko namestimo na kovinske predmete, vendar moramo upoštevati, da se induktivnost oznake poveča. Oznake lahko namestimo tudi znotraj kovine, vendar moramo zagotoviti dielektrično špranjo (npr. zrak ali plastika), skozi katero se bo polje čitalnika lahko širilo. Silnice magnetnega polja za takšen primer so prikazane na sliki 19. To omogoča izdelavo zelo robustnih oznak z močnim ogrodjem [1].

Elektromagnetna polja, ki jih ustvarjajo oznake in čitalniki, interagirajo z različnimi snovmi v okolici. Oznake, ki jih imajo živali vgrajene pod kožo, so npr. obdane z živalskim tkivom. Elektromagnetno polje, ki pride v stik s prevodno snovjo, prodre v to snov do neke značilne globine, ki ji pravimo vdorna globina  $\delta$ . Odvisna je od frekvence polja  $f$ , permeabilnosti  $\mu$  in električne prevodnosti  $\sigma$  materiala:

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi \mu \sigma f}}. \quad (14)$$

Vrednosti vdorne globine za nekaj pogostih materialov in značilne frekvence sistemov RFID so prikazane v tabeli 2. Pri nizkih frekvencah lahko polje prodre globlje v snov kot pri UHF frekvencah, kjer je že skoraj vsak objekt ovira.



Slika 19: Računalniška simulacija silnic magnetnega polja tuljave na oznaki, ki je zaprta v kovinsko ogrodje z zelo tanko dielektrično špranjo. Posledica dielektrične špranje je, da silnice polja potekajo vzporedno s kovinsko površino, kar minimizira vrtilne tokove v kovini, in polje lahko pride v zunanost kovinskega ogrodja. RFID oznake lahko torej delujejo tudi, če so zaprte v kovinskih ogrodjih, če je zagotovljena dielektrična špranja [1].

Material	Skin Depth At			
	125 kHz	13.56 MHz	900 MHz	2.4 GHz
Tap water	8 m	2 m	4 cm	8 mm
Animal tissue	2 m	60 cm	2 cm	8 mm
Aluminium	0.23 mm	71 $\mu\text{m}$	2.7 $\mu\text{m}$	1.6 $\mu\text{m}$
Copper	0.18 mm	55 $\mu\text{m}$	2.1 $\mu\text{m}$	1.3 $\mu\text{m}$

Tabela 2: Približne vrednosti vdorne globine za različne materiale pri značilnih frekvencah sistemov RFID. Pri frekvenci 125 kHz voda in živalsko tkivo nimata skoraj nobenega vpliva, tudi tanke kovinske ploščice ne vplivajo dosti. Z višanjem frekvence se vdorna globina manjša in pri UHF frekvencah tudi že zelo tanke kovinske prepreke preprečujejo delovanje sistemov RFID [4].

## 5 Zaključek

Za razumevanje delovanja sistemov RFID je pomembno predvsem dobro poznavanje elektromagnetizma. Fizikalne osnove za delovanje teh sistemov so bile odkrite že v začetku 20. stoletja. Tehnološki razvoj na področjih silicijeve polprevodniške in organske polprevodniške tehnologije ter nanotehnologije je omogočil izdelavo majhnih in poceni oznak. Pri snovanju sistemov RFID je potrebno upoštevati tudi, da morajo biti oznake čim manjše in sestavljene iz poceni komponent. Na razširitev teh sistemov je zato vplival tudi Moorov zakon, ki pravi, da se število tranzistorjev, iz katerih lahko poceni sestavimo integrirano vezje, z leti eksponentno povečuje. Razvijajo se tudi vedno manj energetske zahtevni tranzistorji. Vse to omogoča izdelavo zelo poceni oznak RFID. Možnosti za uporabo takšnih oznak je ogromno, do zdaj so se že uveljavili za sledenje živalim, identifikacijo prevoznih sredstev, kot brezkontaktna pametne kartice, vstopnice, v potnih listih, vedno bolj tudi v logistiki. V prihodnosti naj bi popolnoma nadomestili optično črtno kodo. Kljub vsej uporabnosti imajo sistemi RFID tudi resne omejitve glede dosega in napajanja oznak in tudi okolica močno vpliva na njihovo delovanje.

## Literatura

- [1] K. Finkenzeller, *RFID Handbook* (Wiley, Chichester, 2003).
- [2] J.-P. Curty, M. Declercq, C. Dehollain in N. Joehl, *Design and Optimization of Passive UHF RFID Systems* (Springer, Lausanne, 2007).
- [3] S. Shepard, *RFID* (McGraw-Hill, New York, 2005).
- [4] D. M. Dobkin, *The RF in RFID, Passive UHF RFID in Practice* (Elsevier, Burlington, 2008).
- [5] C. Reinhold, P. Scholz, W. John in U. Hilleringmann, *J. Commun.* **2**, 14 (2007).
- [6] Y. Lee, *Antenna Circuit Design for RFID Applications* (Microchip Technology, Chandler, 2003).
- [7] IMEC (Interuniversity Microelectronics Centre), Leuven. Spletna stran, 25.5.2008. [http://www.imec.be/wwwinter/mediacenter/en/RFID\\_2008.shtml](http://www.imec.be/wwwinter/mediacenter/en/RFID_2008.shtml).