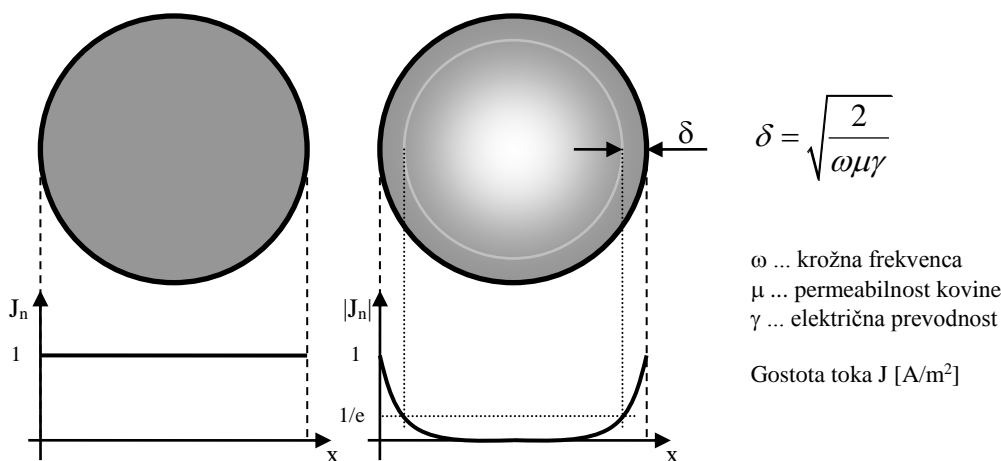


## Kožni pojav

### Kožni pojav in kvaliteta tuljave

Pri frekvenci nič teče (enosmerni) tok po celotnem preseku kovinskega vodnika. Z naraščajočo frekvenco električno polje v kovinskem vodniku usiha eksponencialno od roba vodnika proti sredini, zato tudi jakost toka usiha eksponencialno. Kako globoko bo tekel tok v kovinskem vodniku je odvisno od električne prevodnosti in permeabilnosti kovine vodnika, hkrati pa tudi od frekvence. Pojav, kjer izmenični tok teče pri (visokih) frekvencah le na tankem sloju na površini vodnika, imenujemo kožni pojav (ang. »skin effect«). Električna prevodnost, permeabilnost in frekvenca so vse obratno sorazmerne debelini sloja, kjer teče tok. Debelini oziroma globini plasti, kjer jakost toka pade na  $1/e$  od začetne vrednosti (na površini vodnika), pravimo vdorna globina  $\delta$ . Razmere z normirano gostoto enosmerne toka skozi vodnik in z normirano gostoto izmeničnega toka s kožnim pojavom v kovinskem vodniku prikazuje Slika 1.



Slika 1: Porazdelitev gostote enosmerne toka skozi celoten presek kovinskega vodnika (levo) in radialno -eksponencialno upadajočo gostoto izmeničnega toka v kovinskem vodniku (desno)

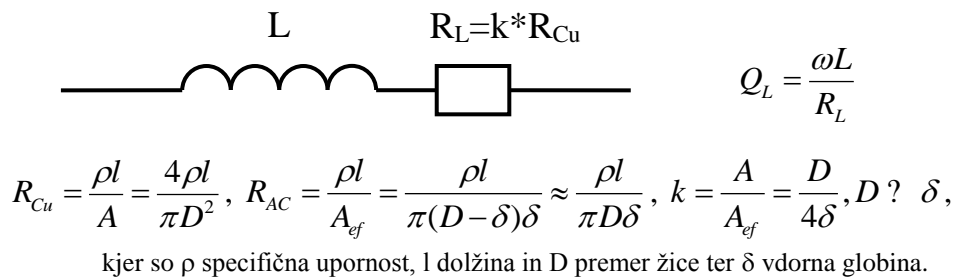
Vdorna globina  $\delta$  je za srebrn (Ag:  $\gamma=61 \cdot 10^6$  S/m,  $\mu_r=1$ ), bakren (Cu:  $\gamma=56 \cdot 10^6$  S/m,  $\mu_r=1$ ), aluminijast (Al:  $\gamma=38 \cdot 10^6$  S/m,  $\mu_r=1$ ) in železen (Fe:  $\gamma=10,3 \cdot 10^6$  S/m,  $\mu_r=4000$ ) vodnik pri več frekvencah prikazana v Tabeli 1.

Frekvenca	$\delta_{Ag}$	$\delta_{Cu}$	$\delta_{Al}$	$\delta_{Fe}$
100 Hz	6,4 mm	6,7 mm	8,2 mm	0,25 mm
10 kHz	0,64 mm	0,67 mm	0,82 mm	25 $\mu$ m
1 MHz	64 $\mu$ m	67 $\mu$ m	82 $\mu$ m	2,5 $\mu$ m
100 MHz	6,4 $\mu$ m	6,7 $\mu$ m	8,2 $\mu$ m	0,25 $\mu$ m
10 GHz	0,64 $\mu$ m	0,67 $\mu$ m	0,82 $\mu$ m	25 nm

Tabela 1: Vdorna globina v srebrnem, bakrenem, aluminijastem in železnem vodniku v odvisnosti od frekvence.

Kožni pojav pri visokih frekvencah predstavlja frekvenčno-odvisne izgube. Visokofrekvenčni tok se skoncentrira le na tankem sloju na površini vodnika  $A_{ef}$ , zato je efektivna upornost žice  $R_{AC}$  višja od upornosti  $R_{DC}=R_{Cu}$  pri enosmernem toku (površina vodnika  $A$ ). Izgube še dodatno povečuje hrapavost površine vodnika. Zato se v visokofrekvenčni praksi uporablja (spolirana) posrebrana bakrena žica za tuljave, saj je prevodnost srebra višja (manjše izgube). Prav tako so izgube manjše pri večji površini, torej debelejšem vodniku.

Če uporabljamo zračno-navito tuljavo do nekaj sto megahercev, poskrbimo, da uporabimo čim debelejšo ter po možnosti posrebrano žico. Tako bodo izgube tuljave manjše ter posledično kvaliteta tuljave višja. Višja kvaliteta tuljave v praktičnem vezju (npr. situ) pomeni manjše vstavitveno slabljenje in strmejši boki sita. Poenostavljen model izgub tuljave (brez upoštevanja hrapavosti) je torej ohmska upornost žice  $R_{Cu}$ , pomnožena z razmerjem efektivne površine  $A_{ef}$ , po kateri teče tok pri določeni frekvenci, in celotne površine žice  $A$ . Nadomestno vezje tuljave in definicije izgubnih upornosti prikazuje Slika 2.



Slika 2: Nadomestno vezje zračne tuljave pri visokih frekvencah in definicija kvalitete tuljave

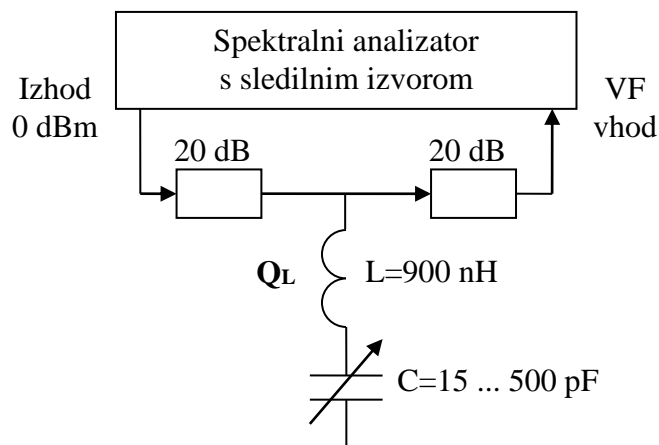
Prikazano nadomestno vezje velja le do določene zgornje frekvenčne meje, saj nato vpliva na lastnosti tuljave tudi kapacitivnost med ovoji in priključnimi žicami. To pomeni, da bo pri neki višji frekvenci tuljava postala vzporedni nihajni krog. Pri vaji bomo uporabljali zračno navito tuljavo precej pod to frekvenčno mejo in s tem zanemarili vpliv te parazitne kapacitivnosti.

### Seznam potrebnih pripomočkov

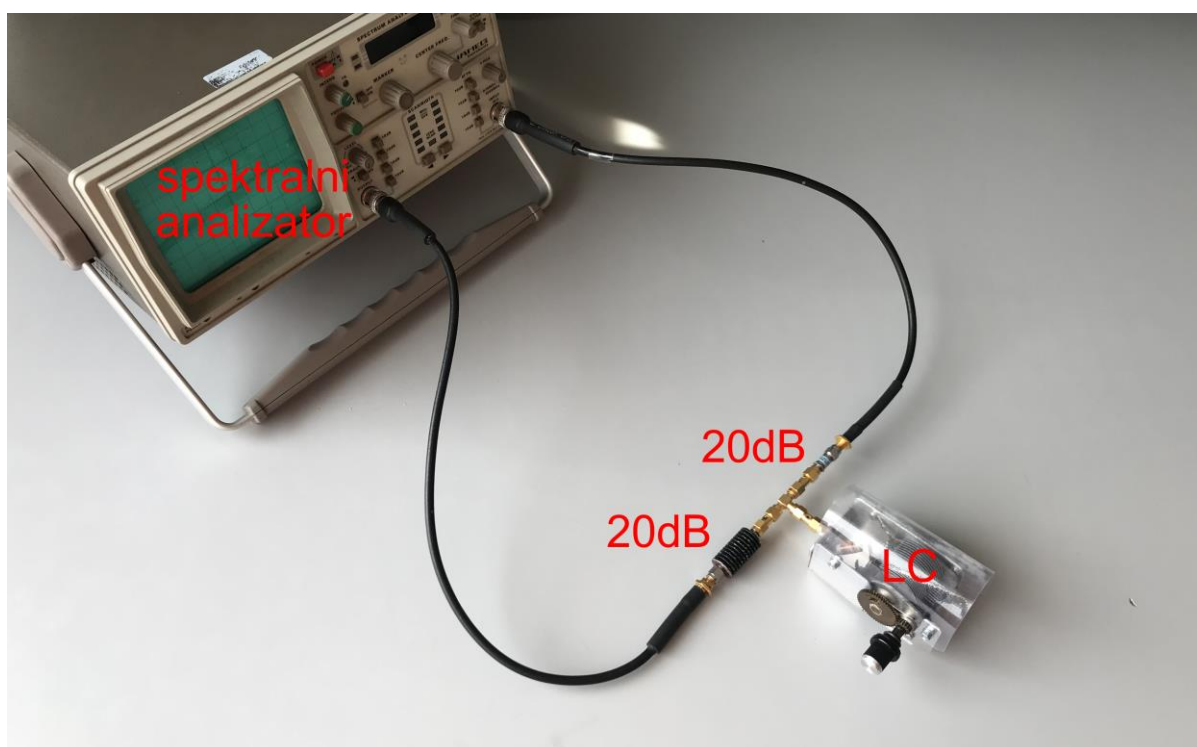
Za izvedbo vaje potrebujemo:

- Visokofrekvenčni izvor, frekvence 1 do 1000 MHz (lahko kot vgrajen izvor v spektralnem analizatorju – sledilni izvor)
- Spektralni analizator, 1 do 1000 MHz
- Nastavljiv zaporedni nihajni krog z zračno tuljavo in nastavljivim kondenzatorjem
- Priključne kable
- Slabilnika 20 dB (2 kosa)

Postavitev merilnih pripomočkov prikazuje Slika 3, razporeditev pa Slika 4.



Slika 3: Skica vezave merilnih pripomočkov



Slika 4: Slika vezave merilnih pripomočkov

### Opis poteka vaje

Zanima nas frekvenčna odvisnost visokofrekvenčnih izgub žice od tuljave in njena kvaliteta  $Q_L$ . Izgube tuljave se višajo s korenem od frekvence, prav tako tudi kvaliteta tuljave. Izgube žice, ki nastanejo zaradi kožnega pojava bomo izmerili s pomočjo zaporednega nihajnega kroga. Izgube nihajnega kroga sestavljata izgubi tuljave in kondenzatorja. Običajno so izgube kondenzatorjev precej manjše od izgub tuljav, zato skupne izgube nihajnega kroga določa le tuljava.

V resonanci nihajni krog predstavlja čisto ohmsko breme, ki ga določata ohmska upornost žice tuljave in upornost zaradi kožnega pojava, kot je prikazano na Sliki 2. Ker zaporedna resonanca predstavlja nizko upornost, pričakujemo v frekvenčnem odzivu na zaslonu spektralnega analizatorja minimum signala točno pri resonančni frekvenci. Z nastavljivim kondenzatorjem lahko poljubno nastavljamo resonančno frekvenco. Izgube in kvaliteta

tuljave sta frekvenčno odvisni, zato se globina minimuma signala spreminja. Iz izmerjene globine minimuma lahko izračunamo skupne izgube tuljave  $R_L$  in njeno kvaliteto.

Če izračunamo prenos moči iz izhoda sledilnega izvora na vhod spektralnega analizatorja v primeru priključenega in ne priključenega nihajnega kroga iz Slike 3, dobimo naslednjo enačbo:

$$\frac{P'}{P} = \left( \frac{2R_L}{Z_k + 2R_L} \right)^2 \Rightarrow R_L = \frac{Z_k}{2} \frac{\sqrt{\frac{P'}{P}}}{1 - \sqrt{\frac{P'}{P}}}, \quad (2.1)$$

kjer je  $P'$  moč na vhodu spektralnega analizatorja v primeru priključenega nihajnega kroga,  $P$  moč na vhodu spektralnega analizatorja brez nihajnega kroga,  $Z_k$  karakteristična impedanca  $50 \Omega$  in  $R_L$  je skupna izgubna upornost tuljave. S pomočjo enačbe s Slike 2 lahko končno izračunamo kvaliteto tuljave.

Če imamo nihajni krog priključen v merilno vezje ves čas in nastavljen »raven odziv« na določeni črti na zaslonu spektralnega analizatorja (moč  $P$ ), lahko moč  $P'$  preprosto odčitamo kot globino minimuma od te črte (zanima nas le razmerje moči, ne pa absolutni vrednosti).

V vaji, kot končni rezultat, narišemo frekvenčno odvisnost kvalitete tuljave na graf ter jo primerjamo z idealnim potekom ( $Q_L \approx \alpha \sqrt{f}$ ). Kvaliteto izračunamo iz skupne izgubne upornosti tuljave  $R_L$ , ki jo izračunamo iz izmerjenih minimumov signala v resonancah. Pri odčitavanju zaslona spektralnega analizatorja poskušamo biti čim bolj točni (odčitki na 0,5 dB), zato uporabimo dovolj majhno frekvenčno preletavanje, npr. 2 MHz/razdelek. Vse meritve in izračunane vrednosti zapišemo tudi v tabelo.

Tuljava ima naslednje podatke: število ovojev  $N=18$ ; premer tuljave  $d=6,5$  mm; dolžina tuljave  $l=10$  mm;  $\phi_{\text{žice}} = 0,3$  mm; teflonski tuljavnik; induktivnost  $L=0,9 \mu\text{H}$ .

### Naloga

1. S pomočjo nihajnega kroga poskušajte določiti izgubno upornost  $R_L$  ter kvaliteto uporabljene tuljave  $Q_L$ .
2. Frekvenčni potek kvalitete narišite na graf, vse meritve ter vmesne izračunane vrednosti pa zapišite v tabelo. (Izberite vsaj 10 frekvenčnih točk med obema mejnima resonančnima frekvencama).