

Kaj bi radioamater moral vedeti o VF vodih?

Matjaž Vidmar, YT3MV

1. Visokofrekvenčni vodi

Nekoč so ljudje živeli v srečnih časih: na podeželju je bilo vse kot v pravljici. Tudi radioamaterji so se imeli lepo: ni bilo se televizorjev, niti pralnih strojev, niti jeznih sosedov, ki bi za težave s pralnim strojem seveda krivili radioamaterje...

Tudi sicer so bile stvari za radioamaterje zelo enostavne: v oddajniku je zadoščal en sam nihajni krog v anodnem vezju elektronke z vrtljivim kondenzatorjem in tuljavo z nastavljivim odcepom, s katerim se je dalo (zaradi srečnega naravnega naključja) zelo dobro prilagoditi kakršenkoli kos žice kot odlično anteno, da je bil le daljši od približno ene desetine valovne dolžine...

Žal je vseh lepih stvari enkrat konec. Enostavna žična antena je lahko zelo učinkovita tudi pod leseno streho kmečke hiše, v železobetonskem stanovanjskem bloku pa je njena učinkovitost enaka ničli, če izvzamemo raznovrstne vzorce na zaslonu sosedovega televizorja. Razen tega smo radioamaterji začeli uporabljati vedno višja frekvenčna območja, ki zahtevajo cisto posebne antene in nam navaden kos žice ne zadošča več. S podobnimi težavami se je seveda srečal tudi naš sosed: stari radijski sprejemnik mu je delal že s kosom žice, vrženim za omaro, za televizor pa je moral odšteti celo premoženje za ustrezní antenski sistem in napeljavo.

Obe napravi, sosedov televizor in naša radijska postaja, imata zdaj nekaj skupnega: antene ne moremo več postaviti na samo radijsko postajo ali televizor, pač pa jo je treba povezati preko daljšega visokofrekvenčnega voda. Dolžina tega voda lahko znaša kar nekaj valovnih dolžin, zato ne moremo preprosto zanemariti kapacitivnosti med žicama voda, niti induktivnosti samih žic, kot to počnemo pri nizkih frekvencah. Razen tega se neprimerno izdelan visokofrekvenčni vod lahko obnaša tudi kot antena in po njem potujočo visokofrekvenčno energijo izseva, preden ta doseže željeni porabnik. In ne nazadnje, vsak visokofrekvenčni vod ima izgube tudi zaradi ohmske upornosti žic in dielektrika (izolatorja) med njimi, enako kot vsi ostali električni vodi.

Pri visokofrekvenčnih vodih si zato spet pomagamo s srečnim naravnim naključjem, da se vpliv kapacitivnosti med žicama in induktivnosti žic kompenzirata med sabo. To se seveda ne zgodi za vsako možno breme enako dobro: kapacitivnost in induktivnost žic se natančno kompenzirata takrat, ko vod obremenimo z bremenom, ki ima impedanco enako KARAKTERISTIČNI IMPEDANCI VODA (oznaka "Zk"). Za breme s pravilno impedanco lahko torej vstavimo poljubno dolžino voda brez dodatnih izgub zaradi kapacitivnosti ali induktivnosti.

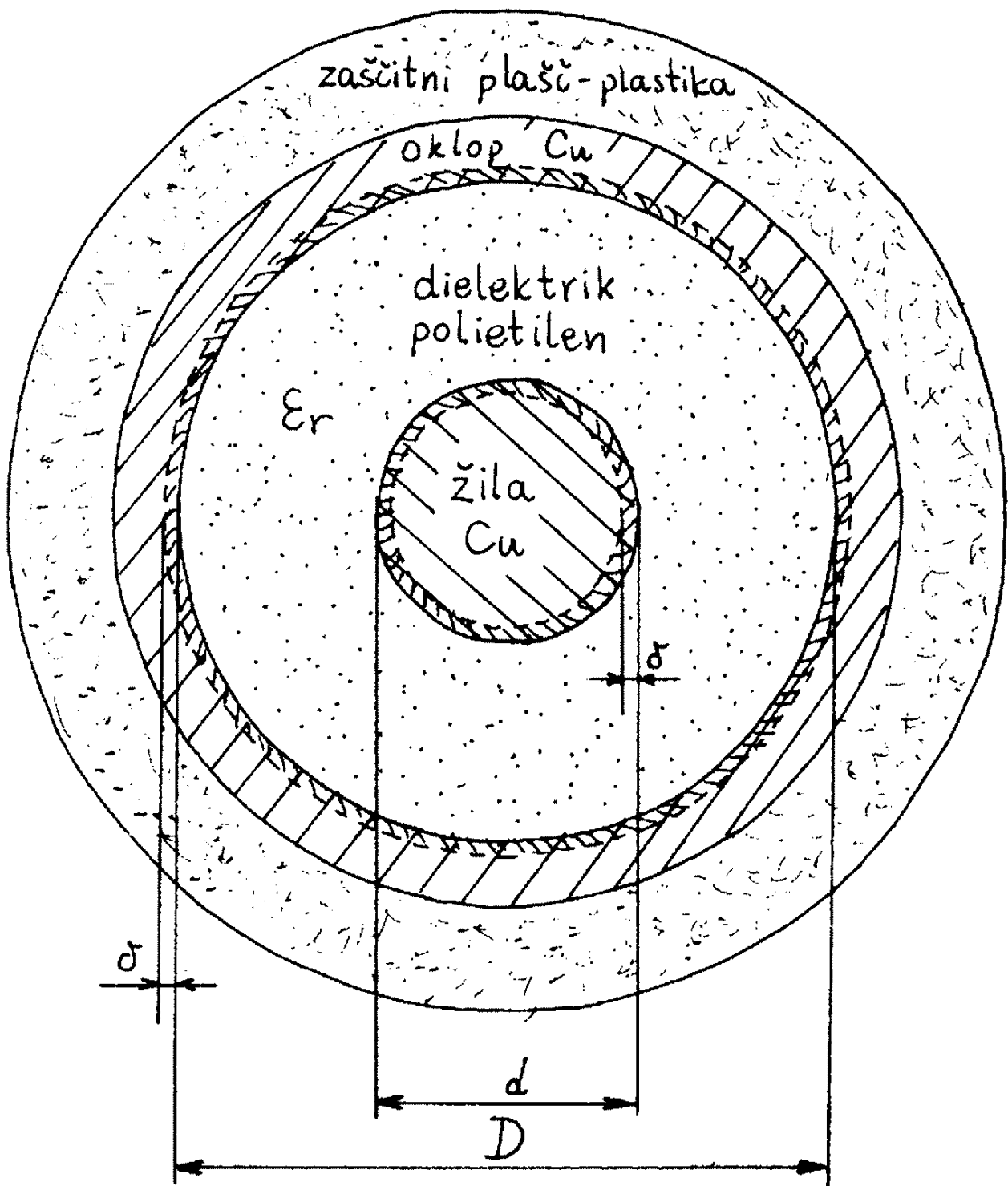
S primerno konstrukcijo visokofrekvenčnega voda se lahko tudi izognemo sevanju potujoče električne energije: najenostavnejša rešitev je, da visokofrekvenčni vod oklopimo in tako preprečimo, da bi se vod obnašal kot neželjena antena. Čemur se v nobenem slučaju ne moremo izogniti so izgube zaradi ohmske upornosti vodnikov in izgube v izolatorju (dielektriku) med vodniki. Te izgube predstavljajo glavnino izgub dobro

načrtovanega visokofrekvenčnega voda in se dajo s primerno konstrukcijo voda le zmanjšati, ne pa tudi povsem izločiti. Izvoru, ugotavljanju in merjenju teh izgub v koaksialnih kablilih je navsezadnje posvečen tudi ta članek.

2. Koaksialni kabli

Koaksialni kabel je prav gotovo najbolj znana in najbolj razširjena praktična izvedba visokofrekvenčnega voda, in je tudi najenostavnejši za praktično uporabo. Verjetno ga ni radioamaterja, ki ne bi vedel, kako je narejen koaksialni kabel. Ker pa je okoli razumevanja delovanja koaksialnega kabla tudi med radioamaterji precej nejasnosti, bom to tukaj skušal opisati.

Prečni presek koaksialnega kabla je prikazan na sliki 1. Kabel sestavljajo vodniki: žila in oklop, ter izolator (dielektrik) med njima. Pri večini kablov je oklop prevlečen še z zaščitnim plaščem, običajno iz plastike, za zaščito pred mehanskimi poškodbami, vlago in drugimi neželjenimi vplivi. Da so izgube v kablu čim manjše, je treba uporabiti za gradnjo kabla kvalitetne materiale: čisti polietilen, polietilensko peno oziroma teflon za dielektrik in čim boljši prevodnik (baker, aluminij, srebro) za vodnike.



Slika 1 - Prečni presek koaksialnega kabla

Pri visokih frekvencah tečejo električni tokovi zaradi kožnega pojava le po tanki plasti na površini prevodnikov. Zato tečejo tokovi v koaksialnem kablu le po površini žile in po notranji površini plašča kabla (dvojno šrafirana površina na sliki 1), saj kabel običajno uporabljamo tako, da se tok, ki teče po srednji žili, vrača nazaj po oklopu kabla in zunaj oklopa zato ni elektromagnetnega polja. Zato so za električne lastnosti koaksialnega kabla pomembni le debelina žile "d", notranje premer oklopa "D" in materiali, iz katerih je izdelan kabel: specifična upornost vodnikov in relativna dielektričnost "er" izolatorja.

Za dani koaksialni kabel bi vsekakor radi vedeli naslednje tehnične podatke:

- (A) Kolikšna je karakteristična impedanca kabla "Z_k"?
- (B) Kolikšne so izgube v kablu na dani frekvenci?
- (C) Kolikšno največjo visokofrekvenčno moč lahko prenašamo?
- (D) Kolikšna je napetostna prebojna trdnost kabla?

Odgovor na prvo vprašanje je enostaven: karakteristično impedanco kabla "Z_k" lahko izračunamo iz kapacitivnosti in induktivnosti kabla, kapacitivnost in induktivnost pa dobimo iz snovno-geometrijskih podatkov za kabel. Končni rezultat je napisan na sliki 2, kjer so vsi logaritmi mišljeni kot naravni logaritmi (log_e oziroma ln) z osnovo e=2.7182818.... Karakteristična impedanca je odvisna le od razmerja premerov žile in oklopa (D/d) ter od vrste dielektrika med njima (ε_r). Za točnost naših računov zadošča, če fizikalne konstante v točnem izrazu zamenjamo s konstanto 60Ω, kot je to prikazano v drugem delu izraza na sliki 2.

$$Z_k = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0 \epsilon_r}} \log_e \frac{D}{d} = \frac{60\Omega}{\sqrt{\epsilon_r}} \log_e \frac{D}{d}$$

Slika 2- Karakteristična impedanca koaksialnega kabla

Iz izraza na sliki 2.vidimo, da se praktično ne da izdelati kabla s poljubno karakteristično impedanco: karakteristična impedanca manjša od nekaj Ω bi zahtevala razmerje D/d blizu ena oziroma izredno tanek izolator, karakteristična impedanca večja od nekaj sto Ω pa zelo veliko razmerje D/d oziroma izredno tanko žilo kabla. Praktično se zato koaksialni kabli izdelujejo le za karakteristične impedance "Z_k" nekje med 30Ω in 100Ω.

Če koaksialni kabel pravilno uporabljamo, so lahko vzroki izgub (dušenja) visokofrekvenčnega signala naslednji:

- (A) Izgube v vodnikih zaradi ohmske upornosti.
- (B) Dielektrične izgube v izolatorju.
- (C) Sevanje skozi oklop kabla.

Medtem ko se prvima dvema vzrokoma izgub nikakor ne moremo izogniti in si ju bomo natančneje ogledali v naslednjem odstavku, je vzrok izgub zaradi sevanja le prereditelj oziroma nepravilno pleten oklop kabla. Izdelava oklopa pomeni največjo porabo bakra in zato največji strošek pri izdelavi kabla, zato imajo kabli varčnih proizvajalcev velike izgube zaradi sevanja skozi oklop.

Največja prenašana moč po koaksialnem kablu je odvisna od tega, kako odvajamo toploto, ki se razvija zaradi izgub v kablu. Ker izgube v kablu naraščajo s frekvenco, največja dopustna moč upada z višanjem frekvence delovanja. Večje moči zato prenašamo s kabli večjega preseka, ki imajo manjše izgube in se hkrati bolje hladijo, ter z uporabo materialov, ki prenesejo višje temperature (teflon namesto polietilena).

Iz podatkov za izolator kabla in oblike električnega polja lahko izračunamo tudi

napetostno prebojno trdnost kabla, vendar ta podatek običajno omejuje le vršno moč za impulzno oddajnike (radarji). Pri delu v režimu s stalno ali malo spremenljivo močjo (tudi radioamaterski oddajniki) pa dosti prej dosežemo mejo segrevanja kabla zaradi izgub.

Razen vseh omenjenih omejitev je dodatna omejitev pri koaksialnem kablu tudi frekvenčna meja, ko se kabel začne obnašati kot okrogli valovod. Ta frekvenca je tem nižja, čim večji je presek kabla. Radioamaterji običajno uporabljamo kable daleč pod to frekvenčno mejo, ker je kabel na teh frekvencah neuporaben že zaradi velikih izgub.

3. Izgube v koaksialnih kabljih

Če hočemo razumeti izvor izgub v koaksialnem kablu, si moramo najprej se bolj natančno ogledati pojave v samem kablu, predvsem izriv toka in kožni pojav (skin effect) pri visokih frekvencah, ter mehanizem izgub v dielektriku kabla.

Vsak tok potrebuje za svoj nastanek padec: vodni tok potrebuje na primer višinski padec, električni tok pa potrebuje napetostni padec oziroma električno polje. Kovine zelo hitro zadušijo elektromagnetno valovanje: če postavimo kos kovine v visokofrekvenčno elektromagnetno polje, jakost polja zelo hitro upada z globino pod površino kovine. Tam kjer ni polja, pa ne more biti električnega toka, zato lahko visokofrekvenčni tokovi tečejo samo po površini kovin.

Kako globoko lahko še tečejo visokofrekvenčni tokovi pod površino kovine? Natančno toliko, kolikor lahko v kovino prodre elektromagnetno polje, ki potem požene tokove. Vdorna globina elektromagnetnega polja je odvisna od frekvence in vrste kovine, izraz za frekvence v radijskem spektru je prikazan na sliki 3. Vdorno globino običajno označimo z grško črko δ (delta). Vdorna globina je manjša pri boljših prevodnikih, saj ti hitreje dušijo elektromagnetno polje, ter je obratno sorazmerna s kvadratnim korenom frekvence.

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{f}} \cdot \sqrt{\frac{\rho}{\pi \mu_0}}$$

f	δ (za Cu)
1MHz	65.6 μm
10MHz	20.8 μm
100MHz	6.6 μm
1GHz	2.1 μm
10GHz	0.66 μm
100GHz	0.21 μm

$\rho \equiv$ specifična upornost
($0.017 \cdot 10^{-6} \Omega\text{m}$ za Cu)

$f \equiv$ frekvenca [Hz]

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{Vs/Am}$

$\delta \equiv$ vdorna globina [m]

Slika 3-Izračun vdorne globine

Na sliki 3 so izračunane vdorne globine v bakru za nekaj frekvenc med 1MHz in 100GHz. Kaj praktično pomenijo te številke? Če uporabljamo okroglo bakreno žico premera 1mm na frekvenci 100MHz, potem tokovi v tej žici tečejo samo na njeni površini, v plasti debeline 6.6 mikrometra oziroma 0.0066 mm! Ohmska upornost žice je zato za visokofrekvenčni tok frekvence 100MHz približno 38-krat večja kot pa za enosmerni tok, ki teče po celotnem preseku žice. Tudi toplotne izgube so za isti faktor večje.

V vseh kvalitetnih visokofrekvenčnih kablih predstavljajo ohmske izgube v vodnikih, povečane zaradi kožnega pojava, glavni izvor izgub. Iz znanega mehanizma izgub v koaksialnem kablu je za praktično uporabo smiselno izračunati izgube, izražene v decibelih na en meter dolžine kabla, kot je to prikazano na sliki 4.

$$A_{\delta/l} = \frac{\sqrt{f}}{D} \cdot \frac{10 \cdot \sqrt{\mu_0 \rho}}{\sqrt{\pi} \cdot \log_e 10} \cdot \frac{1 + e^{\frac{Z_k \sqrt{\epsilon_r}}{60 \Omega}}}{Z_k} \left[\frac{\text{dB}}{\text{m}} \right]$$

Slika 4-Izgube v koaksialnem kablu zaradi kožnega pojava

Iz izraza na sliki 4. razberemo, da za izgube zaradi kožnega pojava veljajo naslednje trditve:

- (A) Izgube so sorazmerne s kvadratnim korenom frekvence " f ".
- (B) Izgube so obratno sorazmerne z zunanjim premerom kabla " D ".
- (C) Izgube so večje v kablji z dielektrikom z velikim " ϵ_r ".
- (D) Izgube so komplicirana funkcija karakteristične impedance in naraščajo pri zelo majhnih in pri zelo velikih " Z_k ".
- (E) Izgube so odvisne še od specifične upornosti in magnetne permeabilnosti vodnikov.

Če hočemo izdelati kabel s čim manjšimi izgubami, je seveda smiselno najprej izbrati ustrezna " Z_k " in " ϵ_r ", ki jih lahko v določenih mejah izbiramo. Če narišemo izgube (slabljenje) kabla kot funkcijo " Z_k ", vidimo, da bojo izgube v kablju najmanjše, ko je " Z_k " nekje med 50ohmi in 75ohmi, v odvisnosti od relativne dielektričnosti " ϵ_r ". Ker se da kabel s takšno vrednostjo Z_k tudi praktično izdelati, so te vrednosti danes v glavnem standardizirane.

Izgube lahko zmanjšamo tudi z uporabo izolatorja z manjšo relativno dielektričnostjo " ϵ_r ". Zato imajo kabli z majhnimi izgubami penast dielektrik (penasti polietilen ali pa penasti teflon) oziroma kar zrak za izolacijo, žilo kabla pa v tem slučaju držijo na mestu distančniki oziroma vijavnica iz polietilena.

Izgube v kablju lahko zmanjšamo tudi z uporabo boljših prevodnikov. Žal je že sam baker precej draga surovina, edina boljša alternativa pa je se dosti dražje srebro. Zaradi kožnega pojava pa ni treba izdelati celotne žile in oklopa kabla iz srebra. Za visokofrekvenčne lastnosti kabla zadošča, če na površino žile in notranjo površino oklopa nanese plast srebra, ki je debelejša od vdorne globine, se pravi nekaj mikrometrov!

Tudi posrebrena žila in oklop ne prineseta kakšnega bistvenega zmanjšanja izgub, saj so te sorazmerne kvadratnemu korenu specifične upornosti materiala vodnikov. Po drugi strani pa lahko brez bistvenega povečanja izgub uporabimo cenejše materiale, na primer aluminij. Izjema so feromagnetni materiali: v njih je zaradi visoke permeabilnosti vdorna globina dosti manjša, kabel z žilo iz železa pa bi zato imel 100-krat večje izgube od bakrenega kabla!

Po vsaki teoretski izpeljavi je vsekakor zanimivo preizkusiti, koliko se izpeljani izrazi res ujemajo s praktično izmerjenimi vrednostmi. Izgube, izračunane po izrazu na sliki 4., se zelo dobro ujemajo s podatki, ki jih lahko izmerimo pri kvalitetnih kablji, na primer za 1/2" celflex kabel. Pri cenjenih kablji, vrste RG-xxx in podobnih, pa so izmerjene izgube vedno večje od teoretske vrednosti. Izmerjene izgube so za okroglo 25% večje zato, ker imajo ti kabli pleteno žilo in oklop iz več tanjših žičk, tokovi pa se ne porazdelijo enakomerno po površini žičk.

Razen tega povečujejo izgube cenjenih kablov tudi izgube v dielektriku kabla, ki se naravnost prištevajo izgubam zaradi kožnega pojava. Izgube v dielektriku ne moremo preprosto izračunati zato, ker fizikalnih lastnosti samega dielektrika ne poznamo oziroma jih je zelo težko izmeriti. Zato je za dani kabel smiselno, da izmerimo celotne izgube in od teh odstejemo izračunane izgube v bakru, razliko seveda predstavljajo izgube v dielektriku.

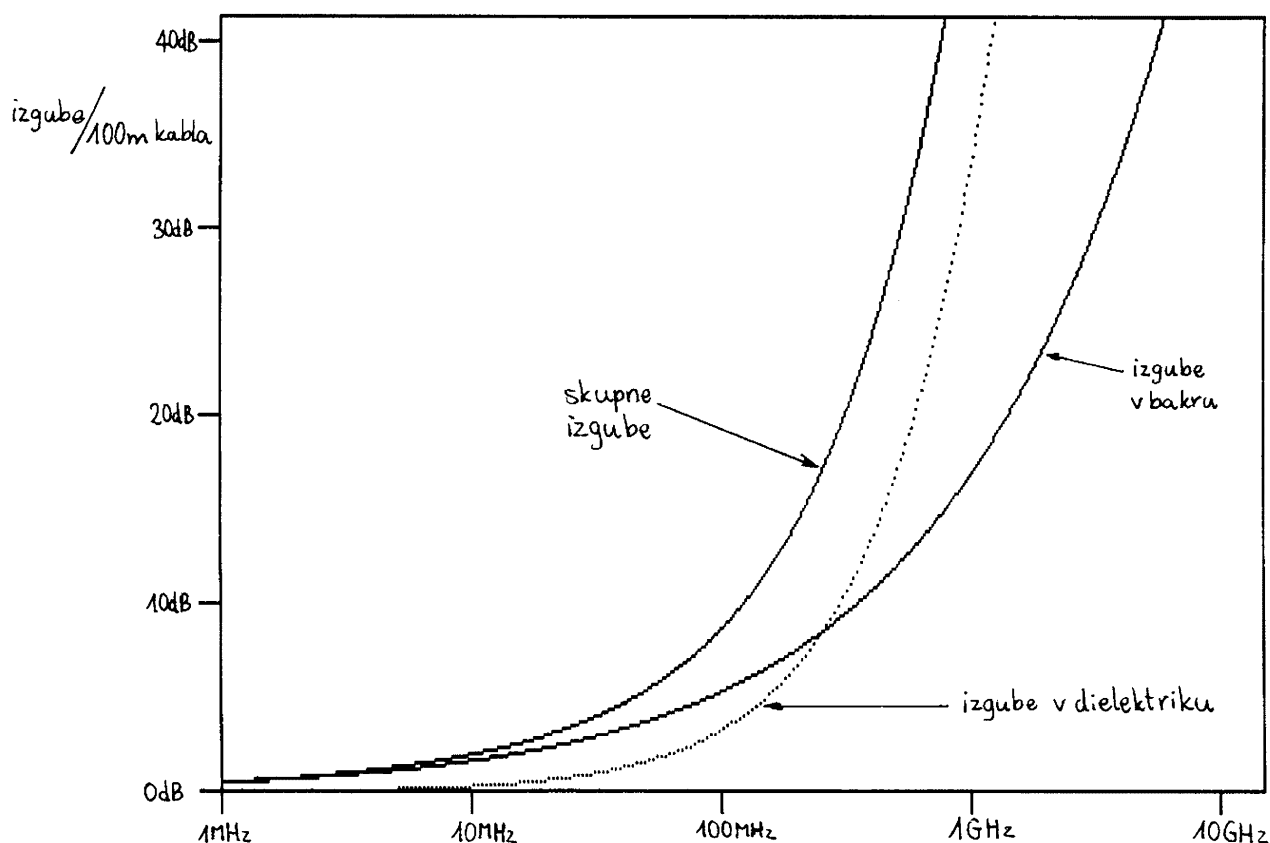
Vzrok izgub v dielektriku kabla so predvsem nečistoče. Nečistoče lahko pridejo v dielektrik kabla, če proizvajalec uporablja nekvalitetne surovine (nečiste kemikalije), lahko

pa pridejo v kabel tudi kasneje. Eden od izvorov nečistoč je lahko zaščitni plašč kabla: če je ta izdelan iz neprimerne materiala, nečistoče počasi pronikajo skozi pleteni oklop v polietilenski dielektrik. Pri taksnih nekvalitetnih kablilih lahko po nekaj letih izmerimo povečano slabljenje tudi v slučaju, ko je bil kabel medtem vskladiščen na suhem, hladnem in temnem mestu!

Za visoke frekvence se dielektrik z izgubami obnaša kot zaporedna vezava upora in kondenzatorja. Za dodatne izgube v kablju s taksnim dielektrikom potem velja:

- (A) Izgube v dielektriku so PREMOSORAZMERNÉ s frekvenco.
- (B) Izgube v dielektriku niso odvisne od premera kabla "D".
- (C) Izgube v dielektriku niso odvisne od karakteristične impedance kabla "Zk".

Ker so izgube v dielektriku kabla premo-sorazmerne s frekvenco, izgube zaradi kožnega pojava pa so sorazmerne s kvadratnim korenem frekvence, bojo pri zelo visokih frekvencah v vsakem slučaju prevladale izgube v dielektriku. Ta pojav je prikazan na sliki 5, kjer je izrisano slabljenje za 100m nekvalitetnega kabla RG-8 (ali RG-213). Na nizkih frekvencah, v področju kratkih valov do 30MHz, so edini izvor izgube v bakru zaradi kožnega pojava (spodnja polna črta). Izgube v dielektriku hitro naraščajo s frekvenco (pikasta črta) in predstavljajo na frekvencah nad 300MHz glavni izvor izgub.



Slika 5–Frekvenčni potek izgub resničnega kabla

4. Izbira koaksialnega kabla

Na tržišču dobimo kopico najrazličnejših kablov, običajno neznanega porekla. Prav

pogosto se zgodi, da dobimo za malo denarja res kvaliteten kabel ali obratno, da nam za dosti denarja ponujajo izmet iz proizvodnje. Če poznamo fizikalni princip delovanja kabla in mehanizme izgub, bo pravilna odločitev vsekakor lažja, tudi brez merilnih instrumentov na licu mesta. Najzanesljivejši pristop je vsekakor meritev izgub in drugih parametrov kabla, vendar si tega ne moremo vedno privoščiti.

Preden se odločimo za nakup kabla, si ga vsekakor temeljito oglejmo! Trgovca je treba vsekakor prepričati, da nam olupi deset centimetrov dolg košček kabla in si tako lahko ogledamo tudi oklop, dielektrik in žilo in ne samo zunanji zaščitni plašč kabla. Verjetno je vsem jasno, da zaščitni plašč ne sme biti trhlen oziroma lepljiv, sicer je s kablom prav gotovo kaj narobe. Nekateri proizvajalci reklamirajo svoje kable kot "non-contaminating jacket", se pravi z zaščitnim plaščem, ki ne sprošča nečistoč skozi pleteni oklop v dielektrik, vendar je boljše stvar preveriti.

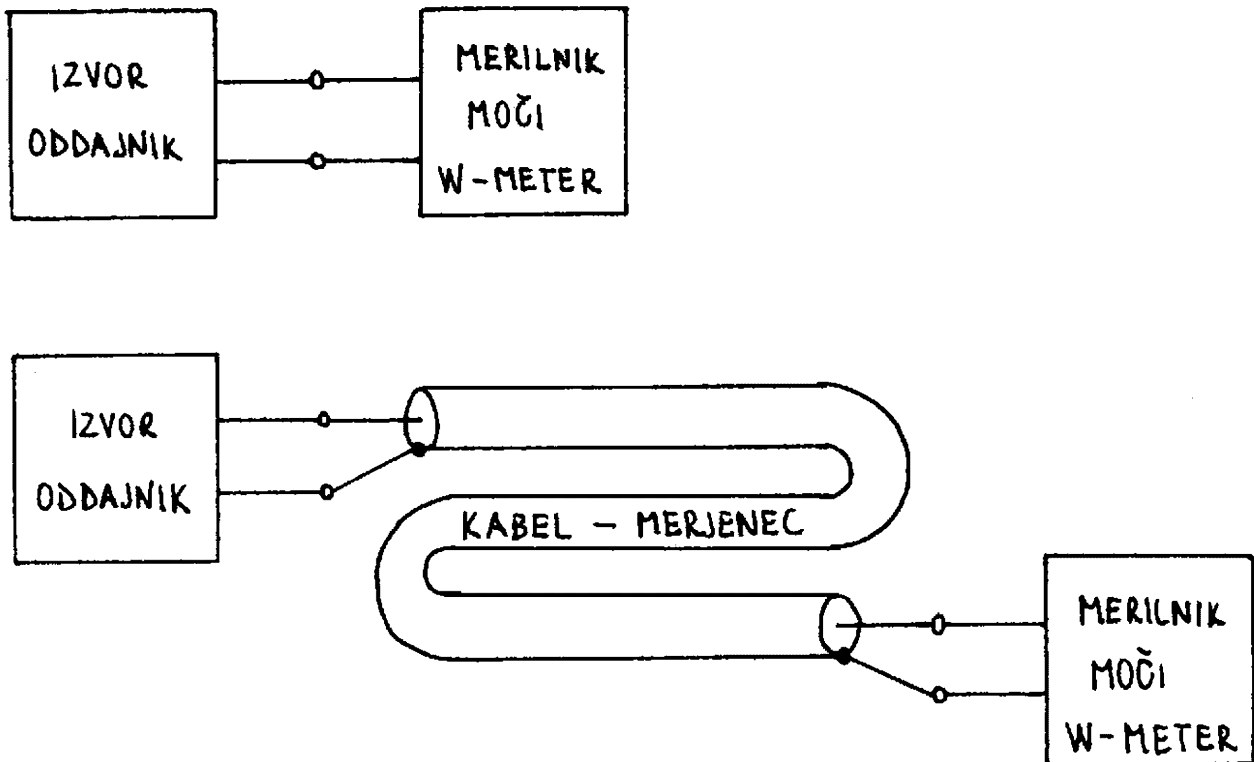
Oklop dobrega kabla mora biti pravilno pleten in zadosti gost: skozi zadosti gosto pleten oklop ne smemo videti prav nič dielektrika! Za frekvence nad 300MHz se zato rajši odločimo za malo dražje kable z dvojnimi oklopi. Oklop mora biti tudi enakomerno pleten: če se v oklopu periodično pojavljajo napake, bo imel tak kabel zelo velike izgube pri frekvenci, ko perioda napak ustreza polovici valovne dolžine. Povsem jasno ne sme biti na oklopu nobenih znakov korozije: bakrene žičke oziroma bakrena folija morajo biti lepe, svetleče rdeče bakrene barve.

Dielektrik mora biti čist, bel, napol prosojen polietilen ozirno čista bela pena brez kakršnekoli umazanije kakršnekoli barve. Dielektrik se mora točno prilegati oklopu, srednja žila pa mora biti točno v sredini dielektrika.

Pri izbiri kabla se moramo tudi odločiti za vrsto srednje žile: ena sama trda bakrena žica ali cevka omogoča manjše izgube, kabel s pletenico iz sedem ali več žic kot srednje žilo pa je lažje zvijati. Ker so izgube zaradi kožnega pojava v glavnem odvisne od površine kovinskih delov kabla, je ugodno, da sta srednja žila in oklop posrebrena. Pozor! Pri nekaterih cenениh kablích, predvsem RG-58, sta žila in oklop cinkana (sive barve). Ker ima cink veliko večjo specifično upornost od bakra, ima tak kabel zelo velike visokofrekvenčne izgube!

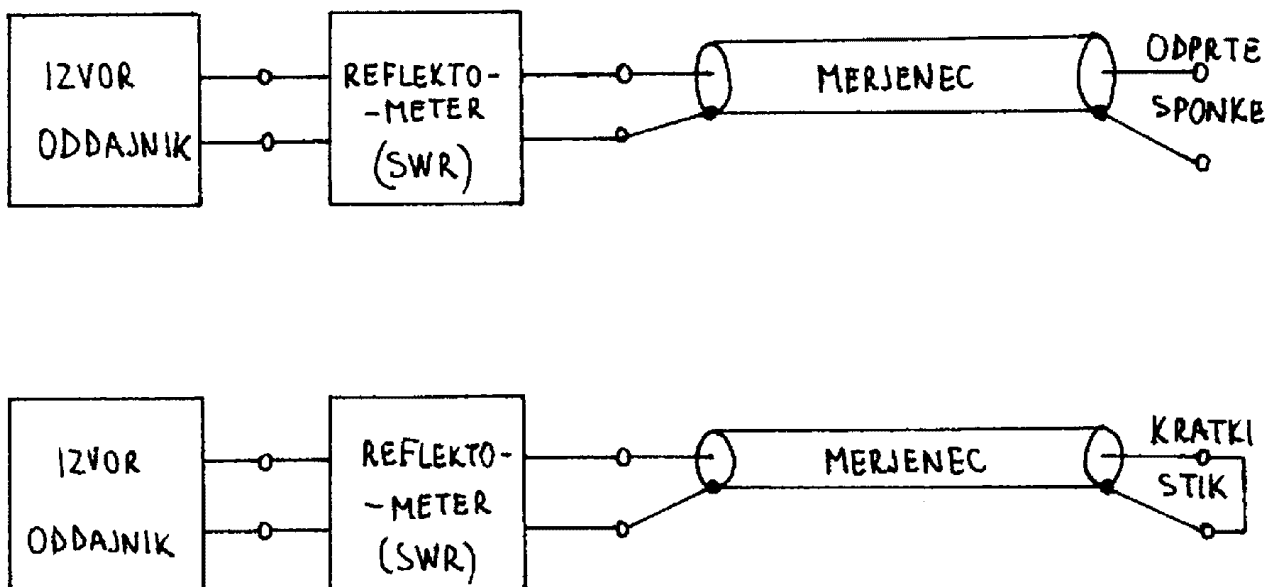
Najzanesljivejši pristop je vsekakor meritev izgub v kablú, in to na čim več različnih frekvencah. Če merimo izgube na več različnih frekvencah, lahko tudi ugotovimo izvor izgub: kožni pojav v vodnikih, izgube v dielektriku ali kaj drugega. Če imamo kvaliteten kabel in izmerimo 2dB izgub na 144MHz, potem bo isti kabel imel na devetkrat višji frekvenci 1296MHz trikrat več izgub, se pravi okoli 6dB. To pomeni, da izgube naraščajo s kvadratnim korenom frekvence oziroma je njihov vzrok ohmska upornost vodnikov in kožni pojav. Če pa na 1296MHz izmerimo bistveno več, tudi 18dB izgub, potem je vzrok v gnilem dielektriku oziroma prereditkem ali slabo pletenem oklopu kabla.

Izgube v koaksialnih kablích in drugih visokofrekvenčnih vodih najpogosteje merimo na dva načina: z merilnikom moči in z reflektometrom. Meritev izgub v vodu z merilnikom moči je enostavna in je prikazana na sliki 6. Merilnik moči najprej priključimo neposredno na oddajnik, potem pa preko merjenca - kabla. Rezultat meritve je preprosto kvocient izmerjenih moči, ki ga je treba le se pretvoriti v decibele. Merilna metoda omogoča merjenje poljubno velikih izgub v kablú, seveda v območju delovanja merilnika moči.



Slika 6–Merjenje izgub v vodu z merilnikom moči

Če so izgube v kablu majhne (in to si običajno želimo), jih lahko izmerimo z reflektometrom, kot je to prikazano na sliki 7. Reflektometer priključimo kot običajno med oddajnik in kabel, drugi konec kabla pa pustimo nezaključen: odprte sponke ali pa kratki stik. Izmerjeno razmerje med napredujočim in odbitim valom na kablu (v dB) ali prilagojenost je tedaj enaka dvakratnim izgubam v kablu (v dB). Na primer, če z reflektometrom izmerimo prilagojenost 6dB (odbojnost 0.5 oziroma valovitost 3) potem so tedaj izgube v kablu enake 3dB.



Slika 7-Merjenje izgub v vodu z reflektometrom

Meritev bi morala dati enak rezultat za odprte sponke in za kratki stik na drugem koncu kabla. Zaradi netočnosti reflektometra se to skoraj nikoli ne zgodi! Da dobimo točnejši rezultat, si zato pomagamo tako, da v račun vzamemo povprečje obeh meritev za odprte sponke in za kratki stik. Netočnost meritve z reflektometrom je sicer tem večja, čim večje so izgube v kablu. Z običajnimi amaterskimi reflektometri je zato opisana metoda neuporabna za merjenje izgub, večjih od približno 6 do 8dB!

5. Zaključek

Koaksialni kabel ni edina vrsta visokofrekvenčnega voda, ki ga uporabljamo v radioamaterski tehniki, je pa verjetno najbolj praktičen in enostaven za uporabo. Z odprtim simetričnim vodom lahko dosežemo pet do desetkrat manjše izgube ob enaki potrošnji bakra, toda odprti vod ni oklopljen in ga je treba speljati na primerni razdalji od kovinskih predmetov in izvorov motenj. Enako razmišljanje velja za Goubau-jevo linijo (odprti vod z enim vodnikom), ki sicer spada med najcenejše načine prenosa mikrovalovne energije. Kovinski valovodi različnih presekov so sicer oklopljeni, vendar so tu potrošnja bakra pri gradnji in zahtevane tolerance se dosti večje kot pa pri koaksialnih kablilih ter jih zato uporabljamo le v mikrovalovnih frekvenčnih področjih.

V tem članku namenoma nisem niti omenil valovnih pojavov v kablilih in drugih vodih, se pravi napredujočih in odbitih valov, ko breme na drugem koncu voda ni prilagojeno na karakteristično impedanco voda. Vsi ti pojavi lahko samo še povečajo izgube v kablu in drugih vodih glede na idealni slučaj, ko je breme prilagojeno.

Namen tega članka je razložiti mehanizme izgub v visokofrekvenčnih vodih, saj sta ohmska upornost kovin in kožni pojav glavna vzroka izgub v vseh kovinskih visokofrekvenčnih vodih. Razen dielektričnih izgub pa imamo v nekvalitetno izdelanih vodih

se celo vrsto drugih izvorov izgub, ki jih je treba razumeti. Navsezadnje, če med anteno in našo radijsko postajo, televizorjem ali drugo napravo že moramo postaviti visokofrekvenčni vod kot nujno zlo, potem moramo vsaj znati poiskati takšen vod, ki bo vnašal najmanjše izgube ob za nas sprejemljivi ceni.

* * * * *