

# O účinnosti antény (1)

Jindra Macoun, OK1VR

**K článkům o vícepásmových anténách došlo několik dotazů ohledně odporových a dielektrických ztrát anténních vodičů a izolantů a jejich vlivu na účinnost antén. Těto problematiky jsou proto věnovány následující informace. K dalším vícepásmovým anténám se později znovu vrátíme.**

Podle učebnicového výkladu [1] bychom měli rozlišovat mezi **účinností antény a vyzařovací účinností antény**. V obou případech jde o poměr anténního výkonu  $P_a$  k výkonu  $P_v$  vysílačem anténě dodanému. Vyjadřujeme ji činitelem účinnosti ( $\eta$ ), který se blíží jedné, pokud je dodaný výkon anténou většinou vyzařen. Účinnost se obvykle vyjadřuje v %. Ztratí-li se v anténě např. 10 % výkonu, bude účinnost 90 %, čili  $\eta = 0,9$ . Těto účinnosti odpovídá ztráta ( $L$ ) vyzařeného výkonu v dB:

$$L_{dB} = 10 \log (P_a/P_v) = 10 \log (90/100) = -0,46 \text{ dB}$$

o kterou se zmenší zisk uvažované antény.

Při 50 % účinnosti, kdy celou polovinu přiváděného výkonu pohltí ztrátové odpory, bude ztráta 3 dB. Na přijímací straně se to prakticky projeví poklesem síly signálu („jen“) o 1/2 stupně S.

Jak se liší **účinnost antény a vyzařovací účinnost antény**, jde-li v obou případech o poměr vyzařeného a dodaného výkonu?

**Vyzařovací účinnost antény** ovlivňují pouze ztráty ve vlastní anténě. Působí je proud ztrátovými odpory. U drátových KV antén je to především **vf odpor anténního vodiče a ztrátový odpor dielektrika izolátorů**.

(Celkovou) **účinnost antény** pak ovlivňují kromě zmíněných ztrát ve vlastní anténě ještě ztráty nepřizpůsobením (ČSV), ztráty v přizpůsobovacích obvodech a dále odporové i dielektrické ztráty v zemi a v okolních vodivých i nevodivých objektech.

Vf proud proudící do antény se tedy zčásti změní v teplo při průchodu ztrátovými

vými (neužitečnými) odpory a zčásti se vyzaří na vyzařovacím (užitečném) odporu antény.

Vyzařovací odpor (nebo také odpor záření) antény je dán typem, rozměry, konstrukcí a umístěním antény – především její výškou nad zemí. Je vztažen k amplitudě proudu v místě napájení. Pokud je anténa v rezonanci (kdy jsou reaktanční složky impedance, kapacita nebo indukčnost nulové), přibližuje se vyzařovací odpor reálné – odporové složce vstupní impedance – rezistanci v  $\Omega$ , měřené na svorkách antény.

Přestože **vyzařovací účinnost** běžných (nezkrácených) KV antén, používaných v amatérské praxi, je zpravidla velmi dobrá a celkovou **účinnost antén** ovlivňují spíše ostatní vlivy, jsou příčiny ztrát ve vlastní anténě, způsobené materiálem vodičů, zvětčovány. Proto se o nich zmíníme podrobněji (přestože si to spíše nezasluhují).

## Ztráty ve vodičích

Stejnoseměrný nebo střídavý proud o velmi nízkém kmitočtu protéká celým kruhovým průřezem vodiče. Je ovlivňován jeho činným odporem  $R(\Omega)$ :

$$R = 0,022 \cdot l/d^2 \cdot K^2 \quad (1)$$

kde  $l$  je délka vodiče v m,  $d$  je jeho průměr v mm, a  $K$  je materiálová konstanta, vztažená k vodivosti mědi (Cu), jejíž  $K = 1$ . Je odvozena z měrného odporu ( $\rho$ ) vodiče o délce 1 m a průřezu 1 mm<sup>2</sup>. Konstanta  $K$ , resp. měrný odpor může u některých materiálů nabývat různých

hodnot v závislosti na jejich složení, popř. čistotě (viz tab. 1).

U mosazných slitin závisí měrný odpor na poměru mědi a zinku. U bronzových slitin na poměru mědi a cínu (popř. okysličených fosforem). Tyto slitiny jsou v porovnání s čistou mědí pevnější, tvrdší a klimaticky odolnější. Dříve se používaly hlavně na venkovní telefonní vedení, a pro malou průtažnost i klimatickou odolnost jsou vhodným materiálem i na drátové antény.

Problematické jsou údaje o vlastnostech železa, resp. oceli. Zatímco čisté železo má poměrně dobrou vodivost, jsou vodivosti některých chromových (nerezových) ocelí velmi nízké. Jsou to také materiály magnetické (feromagnetické), které svojí zvýšenou permeabilitou ( $\mu$ ) ovlivňují skin efekt a tím i vf odpor. Jako anténní vodiče se proto používají jen povrchově upravené, poněkud zinkované. Relativní permeabilita  $\mu$  ostatních, nemagnetických kovů je prakticky rovna jedné (viz tab. 1).

Podle vzorce (1) má měděný (Cu) vodič o průměru  $d = 2$  mm a délce  $l = 40$  m stejnosměrný odpor  $R = 0,22 \Omega$ .

Vysokofrekvenční proudy se však vlivem skin efektu šíří vodičem v relativně tenké povrchové vrstvě, jejíž tloušťka s rostoucím kmitočtem klesá, takže vnitřní část průřezu vodiče se na přenosu vf energie podílí stále méně.

Pro vysokofrekvenční odpor  $R_{vf}(\Omega)$  přímého vodiče s kruhovým průřezem proto platí:

$$R_{vf} = 0,083 \cdot l/d \cdot \sqrt{f} \cdot K \quad (2)$$

Dosazuje se kmitočet  $f$  (MHz), délka vodiče  $l$  (m), průměr vodiče  $d$  (mm) a již zmíněná materiálová konstanta  $K$ .

Vzorec platí pro definovanou délku, podél které je průběh proudu rovnoměrný, tzn. že platí jak pro vodiče přizpůsobených symetrických napájecích vedení (tzv. „žebříčky“), tak pro vodiče aperioidických širokopásmových antén s postupnou vlnou, jakými jsou například zakončené antény rhombické, nebo dlouhodrátové (Beverage). Vzorec (2)

Tab. 1.

materiál vodiče	konstanta K	měrný odpor $\rho$ [ $\Omega/(m/mm^2)$ ]
stříbro	0,97	0,016
měď	1,0	0,0174
hliník	1,25	0,026
slitiny hliníku („duraly“)	1,3 - 2	0,028 - 0,068
chrom	1,3	0,028
bronz	1,1 - 1,8	0,02 - 0,06
zinek	1,9	0,061
mosaz	1,9 - 2,3	0,061 - 0,9
nikl	2,0 - 2,4	0,068 - 0,098
železo	2,4	0,098
cín	2,7	0,12
ocel	2,8 - 3,6	0,13 - 0,22
olovo	3,5	0,21
nerezová ocel	7,2	0,88

$d$ (mm)	0,5	1,0	2,0	materiál vodiče
$R_{vf rez}(\Omega)$	6,54	3,25	1,62	Cu ( $K = 1$ )
	11,68	5,84	2,92	fosforbronz ( $K = 1,8$ )
	21	10,5	5,18	Fe ( $K = 3,2$ ) $\mu = 1$
$\eta_a$ (%)	91,8	95,7	97,8	Cu ( $K = 1$ )
	86,2	92,6	96,1	fosforbronz ( $K = 1,8$ )
	77,6	87,4	93,4	Fe ( $K = 3,2$ ) $\mu = 1$
$L$ (dB)	-0,37	-0,19	-0,1	Cu ( $K = 1$ )
	-0,65	-0,33	-0,17	fosforbronz ( $K = 1,8$ )
	-1,1	-0,58	-0,29	Fe ( $K = 3,2$ ) $\mu = 1$
	-2,95	-1,67	-0,9	Fe ( $K = 3,2$ ) $\mu = 10$
	-5,91	-3,87	-2,16	Fe ( $K = 3,2$ ) $\mu = 100$

Tab. 2. Graficky je kmitočtová závislost ztrátového vf odporu a účinnosti dipólu  $\lambda/2$  z Cu vodiče o průměru  $d$  znázorněna na obr. 1. I když  $R_{vf}$  s kmitočtem roste, je z obr. 1 zřejmé, že vf ztráty jsou na vyšších kmitočtech menší. Důvod je ten, že délka  $\lambda/2$  dipólu se s kmitočtem krátí rychleji než vzestup vf odporu [4]. (Číselné údaje  $\eta_a$  jsou zaokrouhleny na desetiny.)

již také respektuje kmitočtovou závislost skinefektu.

Vysokofrekvenční odpor  $R_{vf}$  téhož Cu vodiče ( $d = 2$  mm,  $l = 40$  m) na kmitočtu  $f = 3,65$  MHz tak činí  $3,17 \Omega$ . Je tedy podstatně větší než odpor stejnosměrný.

**Vf odpory vodičů rezonančních  $R_{vf rez}$  ( $\Omega$ ) klesají vlivem sinusového rozložení vf proudů přibližně na polovinu hodnoty odporu  $R_{vf}$ . Pro ztrátový vf rezonanční odpor půlvlnné antény platí:**

$$R_{vf rez} = 6,22 / (d/f) \cdot K \quad (3)$$

Ztrátový vysokofrekvenční odpor  $R_{rez}$  (rezonanční) půlvlnné antény pro kmitočtu  $f = 3,65$  MHz, zhotovené z Cu vodiče  $\varnothing 2$  mm stejné délky ( $l = 40$  m), bude činit  $1,63 \Omega$ .

Podle [5] platí vzorec (3) s dostatečnou přesností pro vodiče, jejichž  $d > 1$  mm a  $f > 1,8$  MHz.

Za předpokladu, že vyzářovací, tzn. „užitečný“ odpor  $R_{rad}$  činí ve volném prostoru  $73 \Omega$ , vypočteme vyzářovací účinnost antény  $\eta_a$  v procentech:

$$\eta_a = R_{rad} / (R_{rad} + R_{vf rez}) \cdot 100 \% \quad (4)$$

a odpovídající ztrátu  $L_{dB}$  ve vodiči antény

$$L_{dB} = 10 \cdot \log(\eta_a / 100) \quad (5)$$

Vzájemné porovnání ztrátových rezonančních odporů  $R_{vf rez}$ , vyzářovací účinnosti  $\eta_a$  a vf ztrát  $L_{dB}$  ve vodiči této půlvlnné (rezonanční) antény zhotovené ze tří různých průměrů  $d$  ( $\varnothing = 2$ ; 1 a 0,5 mm) nabízí tab. 2.

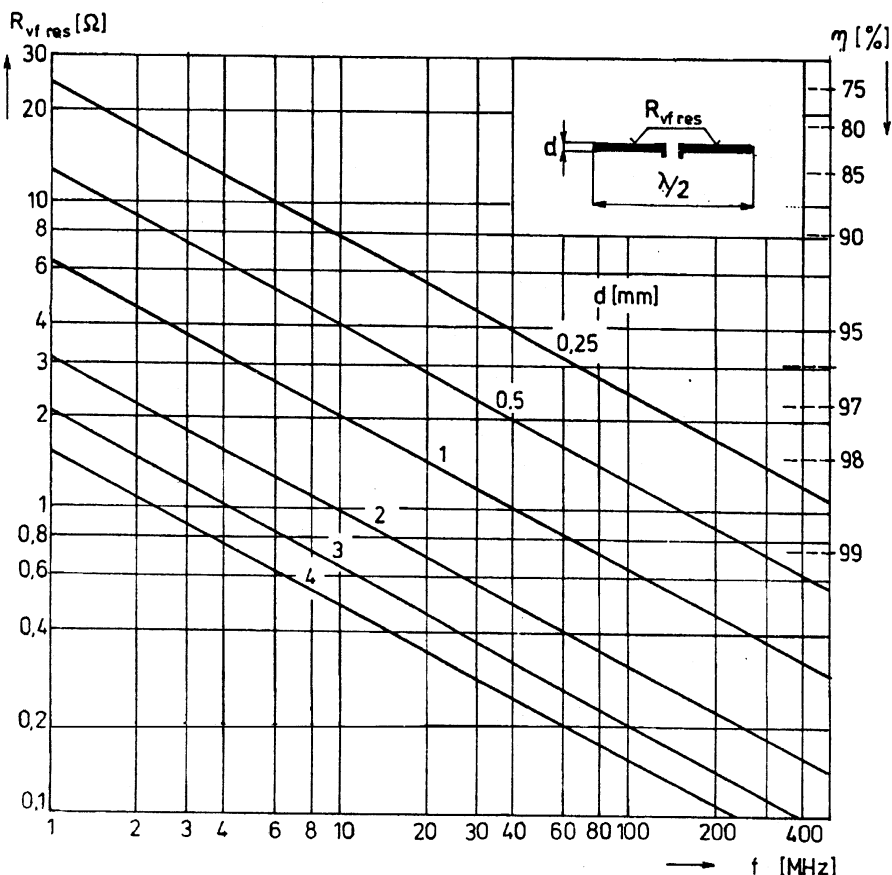
Porovnávají se antény, zhotovené jednak z Cu vodiče ( $K = 1$ ), dále z často užívaného fosforbronzového vodiče ( $K = 1,8$ ) a pak i ze železného (ocelového) vodiče ( $K = 3,2$ ), jehož měrný odpor ( $\rho = 0,174 \Omega$ ) je desetkrát větší než měrný odpor vodiče měděného.

Výpočet ukazuje zdánlivě překvapivou, ale relativně dobrou účinnost antény zhotovené z ocelového drátu. V konečném důsledku to např. při užití vodiče o průměru 2 mm znamená ztrátu jen několika desetin dB zisku antény, což se při provozu prakticky vůbec neprojeví. Tento „vzorečkový“ výpočet však nebere v úvahu permeabilitu  $\mu$  ocelového materiálu, která ztráty Fe vodičů zvyšuje (viz tab. 2).

## Počítačové výsledky

Téměř stejný závěr, k jakému jsme došli „vzorečkovým“ výpočtem, nabízí dnes běžněji užívaný výpočet anténními simulačními programy, kam jsou parametry některých materiálů již implementovány. Je to např. měrný odpor zinku, ze kterého se sice anténní vodiče nezhotovují, ale používá se na povrchovou (protikorozivní) ochranu Fe vodičů, kdy zároveň zmenšuje jejich vf odpor.

Mimoto je možné do programů zadat vlastní parametry, a to včetně pro-



Obr. 1. Vf ztrátový odpor ( $R_{vf rez}$ ) a účinnost ( $\eta$ ) dipólu  $\lambda/2$  v závislosti na kmitočtu. Parametrem je průměr ( $d$ ) měděného vodiče. (Jde o ztráty, resp. účinnost vlastního zářiče, která nezahrnuje případné další ztráty v napájecích obvodech.)

blematické permeability  $\mu$ , jejíž vliv na ztráty jednoduchý „vzorečkový“ postup nezahrnuje.

Podle demoverze programu EZNEC 5.0, ale i podle programu 4NEC2 činí zisk „našeho“ půlvlnného dipólu z Cu vodiče ve volném prostoru 2,04 dB. Zvolíme-li „ideální“, bezztrátový vodič, vypočte program správně teoretických 2,14 dB, čili o +0,1 dB více než s Cu vodičem.

Zisk dipólu z často užívaného fosforbronzového vodiče téhož průměru je jen o 0,216 dB menší. Předvolíme-li v EZNECu pro špatný ocelový vodič o  $\varnothing 2$  mm ( $K = 3,2$ , tj.  $\rho = 0,174 \Omega/m$ )  $\mu = 10$  a  $\mu = 100$ , zvýší se ztráty „pouze“ na -0,9 dB, resp. na -2,16 dB, což odpovídá účinnosti 81 %, resp. 60 %.

Vypočtené ztráty jsou vlastně „vedlejším produktem“ při komplexním výpočtu napájecích a směrových vlastností antény.

S Cu vodičem uvedených rozměrů má „naš“ dipól impedanci  $Z_a = 72,99 - j 2,35 \Omega$ . Je tedy prakticky v rezonanci, protože reaktanční složka impedance je téměř nulová. Anténa fyzické délky  $l = 40$  m tak rezonuje na kmitočtu  $f = 3,65$  MHz ( $\lambda = 82,192$  m,  $\lambda/2 = 41,1$  m), takže je zkrácena na 97,3 % (činitel zkrácení  $k = 0,973$ ). Kapacita závěsných izolátorů na koncích antény může rezonanční délku ještě mírně ovlivnit.

Z uvedených výsledků je nicméně zřejmé, že u běžných drátových antén

na KV pásma, jejichž vyzářovací odpory se pohybují řádově v desítkách ohmů, má materiál vodičů z praktických hledisek zanedbatelný vliv na jejich účinnost.

Tím spíše to platí o velkých smyčkových anténách ( $D > 0,33 \lambda$ ) s vyzářovacím odporem kolem 200 až 300  $\Omega$ . Nicméně povrchově neupravené ocelové vodiče by používané být neměly.

Naopak u malých smyčkových antén ( $D < 0,1 \lambda$ ), jejichž vyzářovací odpor činí řádově jednotky až desetiny ohmů, ovlivňuje materiál a povrchová úprava vodičů účinnost antény velmi výrazně.

## Literatura

[1] Mazánek, M.; Pechač, P.; Vokurka, J.: Antény a šíření vln. Vydavatelství ČVUT, 1999.

[2] Janzen, G., DF6SJ: Kurze Antennen. Francksche Verlagshandlung, Stuttgart, 1986.

[3] Macoun, J., OK1VR: Anténa (3D) Quad. PE 12/2007. (Na s. 32 jsou uvedeny internetové adresy, odkud lze stáhnout volně šířené programy EZNEC Demo 5.0 a 4NEC2.)

[4] Macoun, J., OK1VR: Účinnost „neviditelných“ antén. PE 4/1999, s. 30 až 31.