

# O účinnosti antény (2)

Jindra Macoun, OK1VR

**V první části článku (PE 1/2008) jsme se zabývali odporovými ztrátami anténních vodičů, tzn. vlivem materiálu vodičů na vyzařovací účinnost antén. Účinnost mohou také ovlivnit vlastnosti anténních izolátorů. Zvláště při užití vyšších, řádově kW výkonů (což dnes není na amatérských pásmech neobvyklé), je namístě věnovat konstrukci izolátorů pozornost, a to nejen z hlediska ztrát, ale i jejich elektrické pevnosti (průbojnosti). Je to tématem tohoto článku.**

Při napájení antén malými výkony jsou rozměry aktivního anténního vodiče ovlivněny pouze mechanickými podmínkami. Avšak již při středních výkonech musí být brány ohledy na napěťové poměry na anténě, zvláště ve vyšších výškách (nadmořských). Čím větší průměr vodiče, tím nižší napěťový gradient při stejném výkonu a menší možnost různých ztrát, včetně ztrát ionizačním sršeňním (koronou) a přeskoky. Napěťové poměry, především na vysokonapěťových bodech na koncích antény závisí na vstupním výkonu, na výšce antény nad zemí, a na průměru anténního vodiče. Výška antény ovlivňuje vyzařovací odpor a tudíž i anténní proud a napětí.

Dále uvádíme typický příklad postupu, při kterém se počítají potřebné veličiny.

## Maximální vf napětí na anténě

vypočteme jednoduchou metodou, přijatelnou pro návrh a konstrukci antén pro amatérské účely.

Využijeme k tomu rezonanční anténu, půlvlnný dipól z Cu vodiče o průměru  $d = 2$  mm a délce  $l = 40$  m na kmitočtu  $f = 3,65$  MHz.

Prakticky stejný zářič byl použit u dřívě probíraných směrových a impedančních vlastností antén Windom, OFC dipólu a G5RV [1].

Zatím budeme uvažovat anténu ve volném prostoru, takže účinnost vyzařování bude určena pouze ztrátami ve vlastní anténě, tj. dielektrickými ztrátami izolantů a dřívě diskutovanými odporovými ztrátami vodičů. Tzn. ztrátami, které již dále nelze jinak (např. nadzemní výškou, přízpusobením aj.) ovlivnit.

Z předchozích částí víme, že vstupní impedance  $Z_a$  rezonanční antény bude mít jen reálnou složku  $R_a$ , představující vyzařovací odpor  $R_v$ . Reaktance  $jX_a$  bude prakticky nulová.

Ve volném prostoru a při malém průměru vodiče (tzn. velké štíhlosti antény) se bude  $R_a$  blížit hodnotě  $73 \Omega$ .

$$Z_a = R_a \pm j0 = R_v = 73 \Omega \quad (6)$$

Při vf výkonu  $P_i = 1000$  W pak „poteče“ do antény proud  $I_a$

$$I_a = (P_i/R_a)^{1/2} = (1000/73)^{1/2} = 3,7 \text{ A} \quad (7)$$

Tento vf proud se rozloží sinusově podél antény, s minimem na virtuálních koncích, které jsou od sebe vzdáleny  $\lambda/2$ , leží tedy poněkud za skutečnými konci antény, jejíž fyzická délka je zkrácena koeficientem 0,97, a činí 40 m. Maximum vf proudu je uprostřed antény.

Vf napětí má pak průběh velmi blízký kosinovému, s maximy na koncích antény a s minimem uprostřed.

Podél antény tak vznikne stojatá vlna, která se vytvoří z postupné vlny a vlny odražené od konců antény. (Nezaměňujeme ji ale se stojatou vlnou na nepřízpusobeném napájecím vedení.)

Známe tedy průběh napěťového (i proudového) rozložení, ale nikoliv jeho velikost  $E_a$  na svorkách antény – na svorkovém izolátoru, a jeho maximální velikost  $E_{a \max}$  na koncích antény – na koncových (závěsných) izolátorech.

$E_{a \max}$  na konci dipólové antény vypočteme z činitele stojaté vlny  $S_a$  podél antény (nikoliv z ČSV na anténním napájecím) a vstupního napětí  $E_a$  na svorkách antény

$$E_{a \max} = S_a E_a \quad (8)$$

$E_a$  je napětí na svorkách antény, určené součinem vstupní impedance  $Z_a$ , resp. rezistance  $R_a$  a proudu  $I_a$ . Podle (7) víme, že při vf výkonu 1000 W je  $I_a = 3,7$  A.

Takže

$$E_a = I_a Z_a = I_a R_a = 3,7 \cdot 73 = 270 \text{ V} \quad (9)$$

Zbývá určit činitele stojaté vlny  $S_a$  na uvažovaném půlvlnném dipólu, který můžeme principiálně považovat za čtvrvlnné, otevřené, postupně se rozevírající symetrické vedení [2, 3, 4], pro jehož vlnovou (charakteristickou) impedanci  $Z_{a0}$  platí vzorec (4, 5).

$$Z_{a0} = 276 \log 2l/d \quad (10)$$

kde  $l$  je délka a  $d$  průměr vodiče antény ve stejných rozměrových jednotkách.

Po dosazení zvolených rozměrů dostáváme vlnovou impedanci  $Z_{a0} = 1270 \Omega$ .

Dále postupujeme stejně jako při výpočtu poměrů na čtvrtvlnném symetrickém vedení s vlnovou impedancí  $Z_{a0}$ , zakončeném (resp. zatíženém) pouze vyzařovacím odporem  $R_v$ .

Nejprve vypočteme činitel odrazu  $K_a$

$$K_a = (Z_{a0} - R_v)/(Z_{a0} + R_v) = (1270 - 73)/(1270 + 73) = 0,89 \quad (11)$$

Z toho pak činitel stojaté vlny  $S_a$  na anténě

$$S_a = (1 + K_a)/(1 - K_a) = (1 + 0,89)/(1 - 0,89) = 17,18 \quad (12)$$

Hledané  $E_{a \max}$

$$E_{a \max} = E_a \cdot S_a = 270 \cdot 17,18 = 4640 \text{ V} \quad (13)$$

je vlastně vf napětím mezi oběma konci antény. Na každém konci symetrické horizontální antény – dipólu, je pak proti zemi poloviční napětí,  $E_{a \max}/2$ .

Tímto vf napětím je také potenciálně ohrožen každý, kdo by se za provozu antény na konci dotýkal.

Snižením výkonu, např. na desetinu původní hodnoty, tzn. na 100 W, se vypočtené  $E_{a \max}$  zmenší desetkrát, ale ve shodě se vzorcem (7) jen na  $1/10^{1/2}$ , resp. na  $1/\sqrt{10} = 0,316 E_{a \max}$ , tj. na 1467 V.

Z této stručné úvahy o napěťovém namáhání koncových izolátorů vyplývá, že při daném výkonu závisí vf napětí:

- Na vlnové impedanci antény, tzn. na štíhlosti anténního vodiče. Čím je anténní vodič tenčí a delší, tím vyšší je vlnová impedance antény a vf napětí na jejím konci. Napěťové namáhání izolátorů je proto vyšší na nižších kmitočtech.

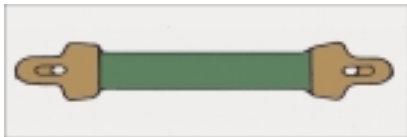
- Na poměru  $Z_{a0}$  a  $R_v$ . Čím vyšší činitel odrazu  $K_a$  (tzn. bližší jedné), resp. čím větší rozdíl je mezi  $R_v$  a  $Z_{a0}$ , tím vyšší je vf napětí na konci antény.

## Izolátory

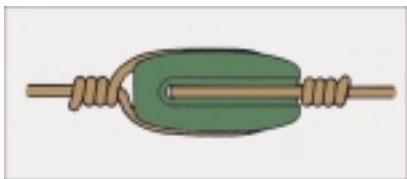
Anténním izolátorem se rozumí vhodné těleso, které např. dělí dipólovou anténu v místě napájení na dvě části, popř. odděluje aktivní anténní vodič od upevňovací či závěsné konstrukce. Aktivní anténní vodič se zavěšuje mezi opěrné (zá-



Obr. 1. Tento dekorační QSL-lístek, který jsme dostali za spojení s Danem, OK1HRA, ukazuje, že i tak technická záležitost, jakou je anténa, má v sobě kus poezie



Obr. 2a. Tahový izolátor, zpravidla keramický, se vyznačuje malou kapacitou mezi závěsnými oky



Obr. 2b. Klasický vajíčkový porcelánový izolátor je dnes spíše předmětem sběratelského zájmu. Mezi radioamatéry však je stále populární. Větší kapacita mezi anténním a kotevním vodičem při obvyklém „propleteném“ upevnění může nepříznivě ovlivnit vlastnosti antény, není-li omezena dalšími „sériovými“ izolátory. Záměnou průvlačných ok se kapacita izolátoru podstatně zmenší. Tím se však také zmenší jeho pevnost, protože těleso izolátoru je pak namáháno tahem a nikoliv tlakem, proti kterému je výrazně odolnější. Vyšší je naopak jeho napěťová odolnost (průbojnost)

vesné) body pomoci tahových izolátorů (obr. 2a). Pro malé a lehké antény se obvykle používá porcelánových izolátorů vajíčkových (obr. 2b), které se uplatní i při dělení kotevních lan na menší „nerezonanční“ úseky tak, aby kotevní lana svým vyzařováním neovlivňovala elektrické vlastnosti antény. Oblíbené a vyhovující jsou také lehké, amatérsky zhotovené páskové izolátory z kuprexitové podložky (tzn. bez naplátované Cu fólie).

Anténní izolátor je v podstatě kondenzátor s pokud možno minimální kapacitou ( $C_i$ ), jehož dielektrikem je vhodný izolační materiál. Charakterizují jej vlastnosti mechanické (rozměry a tvar, tvrdost, pevnost, navlhavost) i elektrické (kapacita  $C_i$ , ztrátový činitel dielektrika, elektrická pevnost, resp. průrazné (přeskokové) napětí a relativní permeabilita dielektrického materiálu). Má se ovšem počítat i se znečištěním (prachem, a zvláště pak kouřovými zplodinami) a vlhkem, které ztráty na izolátoru zvyšují, i když nijak významně. Z tohoto hlediska je důležitá i povrchová úprava (např. glazura) izolátoru.

Průrazné napětí izolátoru je napětí destruktivní, při kterém je izolátor zničen. Předchází mu napětí ionizační, kdy dochází k ionizaci na povrchu, popř. v dutinách dielektrika kondenzátoru – izolátoru. Projevuje se náhlým zvětšením ztrát, což je příznakem počínající destrukce dielektrika.

Elektrické vlastnosti izolátoru – kondenzátoru odvozujeme z náhradního paralelního zapojení ideálního (tj. bezztrátového) kondenzátoru o kapacitě  $C_i$  a rezistoru  $R_i$ , reprezentujícího ztráty v dielektriku.

Ztrátový činitel  $tg\delta$  dielektrika je obvyklý způsob vyjádření ztrát v dielektriku kondenzátoru. Je-li dielektrikum dokonale, protéká kondenzátorem vř proud, který o 90° předbíhá vř napětí. Při ztrátách se tento úhel zmenšuje. Úhlový rozdíl od původních 90°, značený  $\delta$ , se nazývá úhel

dielektrických ztrát. Činitel ztrát je pak definován jako  $tg\delta$ . Pro hodnotu paralelního ztrátového odporu  $R$  pak platí:

$$R_i = 1/(2\pi f C tg\delta) \quad (14)$$

A pro přibližný výkon ve wattech, ztracený v takovém kondenzátoru lze použít vzorce:

$$L = E_a^2 2\pi f C tg\delta \quad (15)$$

kde  $E_a$  je napětí na izolátoru,  $C_i$  je kapacita kondenzátoru ve F(!) a  $f$  je kmitočet v Hz(!).

Dosadíme-li pro výpočet ztrátového odporu  $R_i$  svorkového izolátoru „naše“ hodnoty  $f = 3,65 \cdot 10^6$  Hz, za  $C$  poměrně velkou kapacitu 10 pF, tj.  $1 \cdot 10^{-11}$  F, a  $tg\delta = 100 \cdot 10^{-4}$  (plexisklo, porcelán, skelný laminát apod.), dostaneme  $R_i = 434$  kΩ, na kterém se ztratí pouze 0,17 W.

Potvrzuje se tím, že na nízké impedanci horší vlastnosti izolátoru neovlivňují účinnost antény.

Výhodnější je vyjadřovat ztráty  $L_i$  v % přivedeného výkonu. Ztráty jsou tak vyjádřeny stejným způsobem jako ztráty ve vodičích. Po přepočtu na dB se pak mohou všechny ztráty jednoduše sčítat. Předpokládá se však znalost impedance  $Z$  (vedení, antény) v místě izolátoru.

Pro výpočet ztrát pak platí

$$L_{\%} = 2\pi f C Z tg\delta \cdot 100 \% \quad (16)$$

(Číslování vzorců v tomto článku navazuje na číslování z první části v PE 2/08.)

Ztráty jsou při dané kvalitě izolátoru a daném kmitočtu přímo úměrné kapacitě

a impedanci. Na nízké impedanci, zpravidla na svorkách nízkohodnotného napáječe, koaxiálního kabelu, jsou téměř vždy zanedbatelné. Na konci antény, tzn. na vysoké impedanci mohou dosahovat značných hodnot i při malých kapacitách izolátorů.

Sériovým uspořádáním několika izolátorů oddělených izolačními úseky, popř. jen izolačními závěsnými lany se ztráty omezí.

Výpočet a posouzení ztrát na vysokonapěťových místech antény zmíníme v příštím čísle PE.

Charakteristické vlastnosti, tzn. relativní permeabilitu  $\epsilon_r$  a ztrátový činitel  $tg\delta$  obvykle používaných izolačních materiálů uvádí tab. 1.

## Literatura

- [1] Macoun J., OK1VR: O vícepásmových anténách. PE 2 až 9/2007.
- [2] Brückmann, H.: Antenne, ihre Theorie und Technik. Verlag Hirzel, Leipzig, 1939.
- [3] Procházka, M.: Antény. Encyklopedická příručka. BEN-Technická literatura, Praha (3. doplněné vydání).
- [4] Laport, E., A.: Radio Antenna Engineering.
- [5] Ikrényi, I.: Amatérské krátkovlnové antény. VTEL, Bratislava 1972 (2. doplněné vydání).
- [6] Macoun, J., OK1VR: Izolační (dielektrické) materiály v konstrukci antén. AR B 1/1984.

Tab. 1.

Dielektrický materiál	$\epsilon_r$	$tg\delta \cdot 10^{-4}$	Chemický název
Keramika (kalit)	6,5	10	
Sklo	3,8 ÷ 5,2	20 ÷ 100	
Skelný laminát	3,3	90	
Porcelán	5 ÷ 9	60 ÷ 140	
Pryž silikonová	3 ÷ 8	75 ÷ 150	
Pryž tvrzená	2,5 ÷ 3,5	150 ÷ 200	N
Překlička suchá	1,7	200 ÷ 700	N
TEFLON	2,1	1,5 ÷ 5	polytetrafluoretylén
PE	2,3	2 ÷ 3	polyetylén
KRASTEN (trolitul)	2,4 ÷ 2,6	4 ÷ 7	polystyrén
UMAPLEX (plexisklo)	2 ÷ 3,2	60 ÷ 200	polymethylmetakrylát
SILON	2,84	200 ÷ 400	polyamid
NYLON	2,84	120	polyamid
PVC novodur	2,82	300	polyvinilchlorid tvrdý
PVC novoplast	4 ÷ 8	160 ÷ 700	polyvinilchlorid měkký
UMACEL (celuloid)	5,6 ÷ 6,5	200 ÷ 900	nitrát celulózy
ChS POLYESTER	3,24	72	polyester pryskyřice
ChS EPOXI	3,84	18	epoxidová pryskyřice
Parafin	2,25	2	
Vosk včelí	2,38	50 ÷ 100	
Sněh prachový (-6 °C)	1,26	4,2	
(-20 °C)	1,2	2,9	
Led (-12 °C)	3,2	9	
Voda	80	1500	

### Poznámky k tab. 1:

- Tabulka je rozdělena na čtyři části. Položkami první části jsou běžné materiály. Dále jsou to plastické hmoty i s jejich chemickými názvy. Písmenem N jsou označeny materiály více navlhavé. Navlhavost se vyjadřuje v procentech váhového přírůstku hmotnosti izolátoru. Měla by činit méně než 1%.
- Parafin, popř. včelí vosk jsou hmoty zalévací, kterými se mohou chránit dutiny ochranných krytů na svorkách antén s různými anténními obvody.
- Také led, ale zejména voda mění vlastnosti izolačních materiálů, zvláště pak pronikne-li do ochranných krytů. Nejlepší ochranou není co nejdokonalejší „vodotěsná“ konstrukce ochranného krytu, ale otvory v jeho nejnižší části, odkud kondenzovaná i zateklá voda oteče.