

# O účinnosti antény (3)

Jindra Macoun, OK1VR

V druhé části článku o účinnosti antén (PE 2/2008) jsme se zabývali ztrátami v dielektrických materiálech izolátorů. Dnes toto téma zakončíme kapitolou o napětovém a výkonovém zatížení koaxiálních kabelů, jejichž dielektrická izolace je v místě napájení antény v podstatě také anténním izolátorem.

## Krátká rekapitulace

Kromě odporových ztrát v aktivních anténních vodičích mohou ovlivnit **vyzařovací účinnost antény** ještě dielektrické ztráty izolátorů. Závisí na kvalitě dielektrika, vyjádřené činitelem ztrát  $tg\delta$ , na kapacitě izolátoru  $C_i$ , na impedanci antény  $Z_a$  v místě (na svorkách) izolátoru a na provozním kmitočtu  $f$ .

Znovu připomínáme, že **vyzařovací účinnost antény** ovlivňují jen ztráty ve vlastní anténě, zatímco **celkovou účinnost antény** ovlivňují ještě ztráty v napájecích spojech s nepřizpůsobením (ČSV), ztráty v přizpůsobovacích obvodech a dále odporové a dielektrické ztráty v zemi a v okolních vodivých i nevodivých objektech.

Zatím se zabýváme jen ztrátami ve vlastní anténě. Ty jsou v porovnání s právě zmíněnými menší, a proto i méně významné. Často se však přeceňují.

Z dříve uvedených vzorců [1] je patrné, že tyto ztráty jsou přímo úměrné každému z uvedených parametrů ( $tg\delta$ ,  $C_i$ ,  $Z_a$ ,  $f$ ). Realizátor antény je však může ovlivnit jen částečně – uspořádáním vlastního izolátoru, tzn. jeho konstrukcí, kapacitou a použitým dielektrikem. U vyšších výkonů by měl brát v úvahu ještě napětové namáhání, resp. odolnost izolátoru proti přepětí (průbojnost). Zbývající vlivy, tzn. kmitočty, výkon a impedance na svorkách izolátorů jsou dány provozními požadavky, příp. typem zvolené antény.

U běžných drátových antén na KV pásma obvykle používáme izolátorů:

- v místech nízké impedance – zpravidla u napájecích svorek koaxiálních kabelů nebo transformačních či symetizačních členů;
- v místech vysoké impedance – zpravidla na závěsných koncích anténního vodiče.

U vícepásmových antén se však může objevit vysoká impedance i v místě napájecích svorek, např. při symetrickém (středovém) napájení celovlnného dipólu, resp. na druhé harmonické základního provozního kmitočtu. Napětové namáhání izolátoru je maximální na vysoké impedanci, minimální na nízké impedanci.

V předchozí části [1] jsme naznačili jednoduchý způsob výpočtu poměrů na

nízké impedanci napájecích svorek u půlvlnné rezonanční antény. Ke shodným závěrům docházíme i pomocí známých simulačních anténních programů EZNEC a 4NEC2.

Na nízké impedanci nejsou vlastnosti izolátoru kritické. Ať jde o kapacitu, kvalitu dielektrika či průrazné napětí, resp. dielektrickou pevnost.

Impedance přizpůsobené antény se tam obvykle shoduje s impedancí napáječe, popř. symetizačního členu. Při výkonech do 1 kW není napětí na obvyklé impedanci 50  $\Omega$  větší než 225 V (viz tab. 1) a dielektrické ztráty svorkového izolátoru z polyamidů s „extrémní“ kapacitou 10 pF nečiní na žádném z KV pásem více než několik desetin wattu [1].

Paralelní kapacita 10 pF na svorkách antény, resp. na konci napáječe proto také na žádném z KV pásem prakticky neovlivní vypočtenou impedanci půlvlnné antény a tím ani její přizpůsobení. Na 28 MHz, kde je paralelně připojená kapacitní reaktance  $X_c$  („kapacitní odpor“) svorkového izolátoru nejmenší (-j 568  $\Omega$ ) a její vliv největší, se na impedanci 50  $\Omega$  zhorší ČSV = 1 jen o desetinu, na impedanci 200  $\Omega$  „spadne“ ČSV na 1,4 a na 300  $\Omega$  to bude již 1,65.

## Izolátor na velké impedanci

Pro názornější porovnání vlastností izolátoru na nízké a vysoké impedanci využijeme opět původní, 40 m dlouhý drátový dipól, ale na dvojnásobném kmitočtu, kdy bude na svorkách dipólu řádově stejná impedance i napětí jako na koncích antény, kde je napětové maximum. Výpočet impedance na svorkách celovlnného dipólu zadáme některému z anténních simulačních programů. S dostupnými anténními analyzátory je nereálné zjistit tak vysokou impedanci přímým měřením na vstupu antény, ale ani měřením za půlvlnným kabelovým „opakovačem impedance“. Tak vysoké impedance jsou již mimo rozsah těchto přístrojů. Měření na vysokých impedancích umožňují jen laboratorní můstky admitanční.

Podle programu EZNEC bude 40 m dlouhá anténa z dvoumilimetrového měděného vodiče v „celovlnné“ rezonanci na

$f = 7,13$  MHz se vstupní impedancí  $Z_a = 5700 - j 6 \Omega$ , tzn. s řádově stejnou impedancí, jakou má anténa na svých koncích. Výpočet ovšem nepočítá s paralelní kapacitou (izolátoru) na vstupních svorkách. Při výkonu 1000 W „poteče“ do antény proud 0,42 A za teoretického předpokladu, že napáječ bude k této vysoké impedanci přizpůsoben. V ideálním případě (tzn. s nulovou kapacitou na vstupu) by to bylo možné čtvrtvlnným symetrickým transformátorem o vlnové impedanci 533  $\Omega$ . Poměrně velká paralelní kapacita svorkového izolátoru (10 pF) by však přizpůsobení tak vysoké vstupní impedanci tímto jednoduchým způsobem neumožnila. Vedení by muselo být kratší, aby svojí indukční reaktancí vykompenzovalo kapacitní složku vysoké vstupní impedance. Podrobněji se otázkou přizpůsobení nyní zabývat nebudeme. Vracíme se k výpočtu dielektrických ztrát.

Dosadíme-li všechny známé údaje do vzorce pro ztráty

$$L_{\%} = 2\pi f C_i Z_a tg\delta \cdot 10^{-4} \cdot 100 \% \quad (16),$$

můžeme je kalkulačkou vyčíslit

$$L_{\%} = \left| \frac{2,3 \cdot 14,7 \cdot 13 \cdot 10^6 \cdot 10 \cdot 10^{-12} \cdot 5,7 \cdot 10^3}{2\pi f} \right| \cdot \left| \frac{100 \cdot 10^4 \cdot 100 \%}{Z_a \cdot tg\delta} \right| =$$

$= 2,5 \%$  ztrát, tj. přibližně 25 W z 1 kW, které ohřejí svorkový izolátor celovlnné antény. Na čtyřnásobném kmitočtu, tedy na 28 MHz, by to bylo již 100 W, ale při 10x menší kapacitě – 1 pF jen 10 W atd.

Vliv každého parametru ve vzorci je zřejmý. Až na kmitočty a impedanci můžeme u dané antény ovlivnit nepříznivé poměry jen kapacitou a kvalitou izolátoru.

Zatímco na nízké impedanci „rozhodila“ poměrně velká paralelní kapacita svorkového izolátoru přizpůsobení jen nepatrně, je její vliv na vysoké impedanci značný, a to i na nejnižším KV pásmu. Proto by měla být jeho kapacita co nejmenší, alespoň tak, aby kapacitní reaktance izolátoru v  $\Omega$  byla na daném kmitočtu alespoň třikrát větší než paralelně připojená vypočtená impedance antény  $Z_a$ .

Kapacitní reaktanci  $X_c$  [ $\Omega$ ] snadno vypočteme pomocí jednoduchého vzorce

$$X_c = 159 \cdot 155 / f C_i$$

kam dosazujeme za  $f$  kmitočty v MHz a za  $C_i$  kapacitu v pF.

Podobný vliv má kvalita a kapacita izolátoru na vysokoimpedančním konci antény. **Nepříjemnou kapacitu tam musíme maximálně omezit vhodnými izolátory (viz obr. 1), nejlépe však zcela vyloučit použitím nevodivých (umělohmotných) závěsných i kotevních lan.** Tím se zároveň zmenší nepříjemná vazba na konce dalších vodičů (antén nebo kotevních a závěsných lan), které mohou svým vyzařováním degradovat záření vlastní antény.

## Dielektrická izolace vodičů

Víme, že rezonanční (obecně elektrická) délka izolovaných vodičů je ovlivňována nejen jejich stíhlostí a rozptylovou kapacitou, ale i dielektrickými vlastnostmi a tloušťkou izolantu pokrývajícího vodič [2]. Donedávna bylo „měření“ vlivu dielektrické izolace záležitostí experimentální. Dostupné anténní programy to ještě „neuměly“.



Obr. 1. Obrázek tahového anténního izolátoru jsme dostali z Náchoda od Luboše, OK1ACP, jako ohlas na předchozí díl našeho seriálu o účinnosti antény

Tab. 1.

Vf výkon [W]	Vf napětí [V] na impedanci			
	50 Ω	75 Ω	200 Ω	300 Ω
0,1	2,2	2,7	4,5	5,5
1	7,1	8,7	14,1	17,3
10	22,3	27,4	45	55
100	71	87	141	173
1000	223	274	450	547
10 000	710	870	1414	1732

Poslední verze programu EZNEC v.5.0 však už výpočet vlivu dielektrického povlaku na elektrickou délku antény umožňuje, a to i v bezplatné demoverzi [3]. Neumí však kvantifikovat dielektrické ztráty, které v jisté míře vyzařování z izolovaných vodičů provázejí.

„Hmatatelným“ důkazem těchto ztrát jsou teplejší konce anténních zářičů, pokrytých vysokofrekvenčně „mizernou“ PVC izolací, jsou-li napájeny dostatečnými výkony. Uvádí se, že jsou to ztráty relativně malé. Jejich výpočet nyní zvládá komerčně dostupný profesionální program „EZNEC Pro.“ [4].

Nejjednodušším způsobem, jak se těchto ztrát zbavit, je použít holý vodič. A když už izolovaný, tak polyetylenem nebo teflonem. Ale proč vlastně vodič izolovaný!?

Aby méně „šuměl“ jako anténa přijímací, jejíž funkci většinou dnes každá vysílací anténa zároveň plní. Za určitých povětrnostních situací totiž předávají proudící mlhové částice, kapky deště či sněhové krupičky své statické náboje kovovým částem antény, což zvyšuje úroveň vnějšího šumu (QRN) až o několik dB.

## Elektrické namáhání koaxiálních kabelů

Koaxiálními kabely bychom se při posuzování vyzařovací účinnosti vlastní antény zabývat nemuseli, protože nejsou součástí vlastní antény. V souvislosti s napětovým namáháním izolátorů na vstupních svorkách antény se však nabízí otázka, jakému napětí ten který koaxiální kabel odolá.

Kromě obvyklých údajů, jakými je vlnová (charakteristická) impedance, kmitočtově závislý útlum a činitel zkrácení, jsou při úvahách o napájení antén užitečné i méně sledované parametry – maximálně přenášený výkon a elektrická pevnost, resp. průrazné nebo přeskokové napětí. V katalogových údajích se udává jako efektivní napětí, které musí kabel vydržet po dobu 1 minuty, obvykle na síťovém kmitočtu 50 Hz.

Pevné dielektrikum průrazné napětí zvětšuje. Polovzdušné a vzdušné má odolnost menší. Na **přízpusobených kabelech**, zatěžovaných výkony podle tab. 1, se však těchto hodnot v amatérských podmínkách sotva dosáhne.

Dielektrická pevnost se udává v kV/mm. Suchý vzduch vykazuje při tlaku 760 mm Hg a teplotě 25 °C dielektrickou pevnost 1,5 až 3 kV/mm v závislosti na tvaru „elektrod“. Hrotová zakončení průraz usnadňují.

Dielektrická pevnost vzduchu klesá při nižším barometrickém tlaku. (Proto také antény ve vyšších nadmořských výškách na svých koncích snadněji „srší“.)

Tab. 2.

**Dielektr. izolace:**  
P – pěnový PE,  
PE – pevný PE,  
PTFE – teflon

Z <sub>0</sub>	Dielektr. izolace	Vnější Ø [mm]	Kmitočet [MHz]				
			10	30	100	500	1000
Max. přenášený výkon [W] při 25 °C							
50 Ω	P	5	530	290	160	65	50
		10	1600	890	480	210	140
50 Ω	PE	5	800	450	250	120	80
		10	3200	1800	960	420	290
50 Ω	PTFE	5	6500	3800	2000	880	600
		10	20 000	15 000	6200	2500	1700

Tuhá dielektrika jsou oproti vzduchu podstatně odolnější.

Např. pro sklo se udává 10 až 14 kV/mm, pro nylon a ostatní polyamidy asi 14 kV/mm. Vynikající odolnost vykazuje teflon – 60 kV/mm.

Koaxiální kabely s pevným dielektrikem jsou proto relativně velmi odolné proti průrazu. Záleží na vnitřních rozměrech, tzn. na tloušťce dielektrika mezi vnitřním průměrem stínění a povrchem vnitřního vodiče.

Z hlediska průrazu jsou proto na amatérských KV pásmech použitelné i ty nejtenčí koaxiální kabely při napájení antén výkony do 1 kW – ovšem jen za podmínek přízpusobení, resp. za podmínek, kdy se ČSV na kabelu blíží 1. **Stává-li se koaxiální kabel napájecím laděným, tj. i při běžném „doladování“ antény transmatchem na výstupu vysílače, resp. na vstupu napáječe, tak nároky na jeho napětovou odolnost rostou úměrně s velikostí ČSV na kabelu.**

Užitečné jsou proto katalogové údaje o maximálním výkonovém zatížení koaxiálních kabelů. Podle mezinárodních norem IEC jde o maximální výkon, kterým je možné na daném kmitočtu napájet vodorovně uložený a přízpusobený koaxiální kabel, umístěný v prostředí s teplotou do 40 °C.

Maximální výkon je pak dán teplotou vnitřního vodiče, při které si okolní dielektrická izolace zachovává své původní vlastnosti. Po jejím překročení izolace měkne, dochází k excentrickému posuvu vnitřního vodiče, ke změně impedance, případně až ke zkratu na stínění.

Vnitřní vodič je totiž hlavním nositelem činných ztrát, vyjádřených útlumem koaxiálního kabelu v dB. Tyto ztráty mění přenášený výkon v teplo, kterým se ohřívá dielektrická izolace. Protože útlum kabelu se zvětšuje s kmitočtem a zmenšuje s rostoucím průměrem vnitřního vodiče, bude i maximálně přenášený výkon závislý nejen na druhu dielektrika, ale i na rozměrech kabelu a na kmitočtu.

Maximálně přípustná teplota vnitřního vodiče je 200 °C v dielektrické izolaci z teflonu (PTFE), 75 °C v izolaci z pevného polyetylenu (P) a 65 °C v izolaci z pěnového polyetylenu PE.

Orientační informací o maximálním výkonovém zatížení přízpusobených koaxiálních kabelů nabízí tab. 2. Platí pro kabely s vnitřním vodičem lankem. U kabelů s plným vodičem se maximální zatížení zvyšuje asi o 10 %. Maximální výkonové zatížení závisí na vnější teplotě, zvláště u kabelů s pěnovým PE dielektrikem. Klesá při vyšších teplotách, zvyšuje se při teplotách nižších. Malou závislost na teplotě vykazují kabely s PTFE (teflonovou) izolací.

Z hlediska výkonového zatížení a dalších vlastností není doceňován miniaturní, mrazuvzdorný koaxiální kabel (vnější Ø 3 mm) typu VBPAM 50-1,5, vynikající výrobek vrchlabského KABLA. Na KV

pásmech spolehlivě přenesou kW výkon a při napájení antén je téměř „neviditelný“. Občas se ještě prodává na radioamatérských burzách za přijatelný obnos.

## Závěr

Z toho, co bylo uvedeno, je zřejmé, že „rozumně“ uspořádání drátové KV antény neovlivňují možnými změnami své vyzařovací účinnosti nijak výrazně kvalitu, resp. dosah spojení. Rozdíly mezi shodně vybavenými stanicemi jsou způsobeny spíše ostatními „vnějšími“ okolnostmi, které celkovou účinnost antén ovlivňují. Na jedné straně jsou to poměry na napáječi, na druhé straně – a na té především, je to působení země. Této problematice bude věnována příští část.

## Literatura

- [1] O účinnosti antén (2). PE 2/2008, s. 31-32.
- [2] OCF dipóly (2). PE 5/2007, s. 31.
- [3] Lewallen, R., W7EL: EZNEC Antenna Software – www.eznec.com
- [4] Macoun, J., OK1VVR: Antény, kabely a konektory. AR B 1/1994, s. 18-27.



Obr. 2. Anténní i jiné izolátory jsou dnes předmětem sběratelského zájmu. Nicméně jsou stále důležitou součástí antén. Izolátorem na obrázku je opatřena sedmipásmová drátová anténa od firmy Buckmaster Antennas z Virginie