

„Koaxiál’ nebo dvoulinka?

Jindra Macoun, OK1VR

Převládajícím anténním napáječem je již dlouhá léta koaxiální kabel, tzn. nesymetrický stíněný napáječ s normalizovanou vlnovou impedancí 50 Ω pro zařízení radiokomunikační a 75 Ω pro příjem televizní [1].

Pro napájení vysilacích antén na amatérská KV pásma je někdy účelné použít symetrický nestíněný napáječ s vyšší vlnovou impedancí (200 až 600 Ω) [2]. Jde zejména o antény, přizpůsobené k výstupní impedanci 50 Ω anténním tunerem (ATU) na vř výstupu transceiveru, kdy se anténní napáječ stává laděným vř vedením, na kterém se zákonitě objeví stojaté vlny. Článek proto zmiňuje vlastnosti vř napáječů, které ovlivňují účinnost přenosu vř energie, a upozorňuje na dva programy, které řeší problematiku napájení a přizpůsobení antén na pásmech KV.

V minulých číslech PE vzbudil pozornost článek „Symetrické anténní tunery“ [4]. Autor se tímto tématem mj. vrátil k napájení antén na amatérská KV pásma pomocí „vysokoohmových“ symetrických napáječů – tzv. „žebříčků“ (ladder lines) nebo „dvoulinek“ [2], které se přes některé negativní vlastnosti uplatní také v současnosti, při výše zmíněném napájení (obvykle vícepásmových) antén, přizpůsobovaných k nízké vlnové impedanci (50 Ω) tunerem na anténním výstupu vysílače. Anténní napáječ se v takovém případě stává laděným vř vedením, na kterém se mohou vyskytnout stojaté vlny s poměrně vysokým ČSV.

Malé ztráty těchto „vysokoohmových“ symetrických napáječů v porovnání se ztrátami běžných napáječů nesymetrických – koaxiálních (doložené číselnými údaji v článku [4]) však nejsou primárně způsobeny velkou charakteristickou impedancí těchto napáječů, ale především jejich malým **vlastním útlumem**. Ten je výrazně menší než vlastní útlum běžných „nízkoohmových“ napáječů nesymetrických – koaxiálních. A právě tato skutečnost příznivě ovlivňuje účinnost přenosu nejen do přizpůsobených antén (ČSV < 2), ale zejména do antén nepřizpůsobených, kdy na laděných napáječích vznikají i velmi značné stojaté vlny (ČSV >> 2). Nezbytnou podmínkou pro užití těchto napáječů je zachování dokonalé symetrie po celé délce symetrického napáječe včetně antény. Této symetrie se dosáhne vhodnou instalací napáječe připojeného k symetrické anténě.

Zmíněný **vlastní útlum** každého vř napáječe se totiž zvyšuje o **přídavný útlum**, způsobený stojatými vlnami na vř vedení – napáječi. Tento **přídavný útlum je tím větší, čím větší je vlastní útlum napáječe a čím větší jsou stojaté vlny. A vlastní útlum běžných koaxiálních napáječů je vždy větší než vlastní útlum běžných napáječů symetrických.**

O útlumech vř napáječů (vř vedení) nyní obecněji.

Ztráty na přizpůsobeném vedení

Každé praktické vř vedení (napáječ antény) má vlastní ztráty. Zčásti jsou tvořeny odporem vodičů, zčásti spotřebuje přenášený výkon dielektrikem mezi vodiči. Někdy také uniká část výkonu zářením vedení. Zabýváme se zde podrobněji jen ztrátami způsobenými vodiči a dielektrikem.

Ztráta výkonu na vedení není přímo úměrná délce vedení, ale mění se logaritmicky s jeho délkou. Tzn. ztratí-li se např. 10 % přivedeného výkonu na určité délce,

pak se 10 % zbývajících výkonu ztratí na stejné délce zbývajících částí atd. Z těchto důvodů je obvyklé a účelné vyjadřovat ztráty na vedení **útlumem v dB na jednotku délky**, protože decibel je logaritmickou jednotkou.

Výpočty účinnosti, resp. ztrát jsou pak velmi jednoduché, protože celkové ztráty na vedení jsou násobkem ztrát na jednotku délky a celkové délky vedení. Všechny **ztráty (ale i zisky) vyjádřené v dB** nejen na vlastním napáječi, ale v celém přenosovém řetězci **pak lze jednoduše pouze sčítat**.

Ztrátu výkonu na přizpůsobeném vedení, kdy je vedení zakončeno odporem shodným s charakteristickou nebo vlnovou impedancí vedení, nazýváme **ztrátou na přizpůsobeném vedení (matched-line loss nebo flat-line loss)**. Obvykle se vyjadřuje v dB na 100 m. Zároveň je nezbytné specifikovat kmitočet, na kterém uvedena ztráta platí, protože ztráty se s kmitočtem výrazně mění. Místo pojmu ztráta se proto používá termín **útlum v dB**.

Ztráty na vodičích a v dielektriku s kmitočtem stoupají, nikoliv však stejným způsobem. Relativní velikost každého typu ztrát závisí na vlastní konstrukci napáječe, což neumožňuje specifikovat vztahy mezi ztrátami a kmitočtem obecně na všech typech vedení.

Každý typ vř napáječe (symetrického nebo koaxiálního) musí být uvažován a specifikován individuálně, nezbytnými katalogovými údaji na jednotlivých kmitočtech.

Vliv nepřizpůsobení

Účinnost přenosu vř výkonu napáječem dané délky se zvyšuje vlivem ztrát, ke kterým dochází nepřizpůsobením (ČSV > 1) [3] výstupní impedance vysílače k vlnové impedanci napáječe, resp. impedanci antény k vlnové impedanci napáječe, pokud mezi anténou a vysílačem není zapojen samostatný přizpůsobovací obvod, resp. anténní tuner (ATU). Uplatňuje se zejména na pásmech VKV a UKV, kde není použití laděného ATU obvyklé.

Tuto ztrátu, přesněji odražený výkon P_0 v % můžeme určit podle vzorce:

$$P_0 = \left(\frac{\text{ČSV} - 1}{\text{ČSV} + 1} \right)^2 \cdot 100\%$$

Např. při ČSV = 2 se odráží (jen) 11 %, resp. 0,5 dB výkonu.

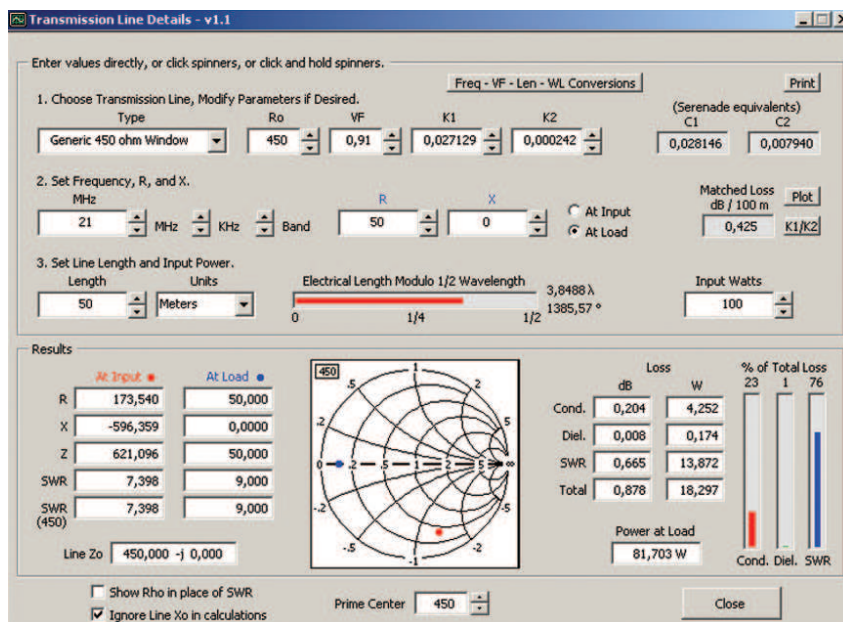
Tuto ztrátu pak mohou dále zvýšit obvody pro ochranné snížení vř výkonu, kterými jsou mnohé vysílače většího výkonu vybaveny. Mají zabránit poškození špatně zatížených koncových stupňů, překročí-li ČSV povolenou, resp. nastavenou hodnotu.

Přídavné ztráty výkonu vlivem ČSV

Vlastní, tzn. katalogový útlum (na určitém kmitočtu) uváděny obvykle v dB/100 m (popř. v dB/100 feet = přibližně 30 m) platí jen v případě, že na napáječi (vedení) existuje jen postupná vlna, kdy je napáječ zakončen odporem shodným s jeho charakteristickou impedancí, popř. je-li nekočně dlouhý.

Vyskytují-li se však na daném vedení stojaté vlny, objevují se tam **další přídavné ztráty**, které se zvětšují s rostoucím ČSV. Na takovém vedení se pak také zvyšuje velikost vř proudů a napětí. Nárůstem efektivního proudu se zvětší výkonové ztráty (I^2R) ve vodičích, nárůstem efektivního napětí se zvětší ztráty v dielektriku (E^2/R).

Existují-li totiž na vedení stojaté vlny, „putují“ tam dvě složky elmag. vlny – postupná a odražená. Stojatá vlna vzniká jejich interferencí. Výkon dodaný do zátěže



Obr. 1. Okno programu TLD, v1.1

je rovný rozdílu výkonu spotřebovaného zátěží a výkonu odraženého. Je-li činitel odrazu vysoký, je velký i výkon, který „putuje“ vedením oběma směry, zatímco jen velmi malou část výkonu spotřebovává zátěž. To zvětšuje poměr výkonu ztraceného v napájecí k výkonu dodanému do zátěže a snižuje tak účinnost vedení. Můžeme to názorně doložit jednoduchým příkladem:

Uvažujme např. vedení s vlnovou impedancí 100Ω , zakončené tak, že na něm vzniknou stojaté vlny s $\text{ČSV} = 9$, odpovídající činiteli odrazu $\rho = 0,8$ (podle vzorce $\rho = (\text{ČSV} - 1)/(\text{ČSV} + 1)$).

Bude-li na tomto vedení napětí postupně vlny např. 100 V , bude napětí odražené vlny 80 V . Na vedení tak vzniknou stojaté vlny, jejichž maxima a minima budou mít velikost 20 a 180 V , což představuje $\text{ČSV} = 9$ u zátěže.

Bude-li za těchto podmínek postupně v proud 1 A a odražený $0,8 \text{ A}$ (určené napětím a impedancí zátěže), bude vedením postupovat v výkon 100 W ($= 100 \times 1$) k zátěži a zároveň se bude vedením vracet 64 W ($= 80 \times 0,8$). Vedení propustí do zátěže (antény) jen 36 W . Vedení však bude zatíženo 164 W . Vlastní ztráta na vedení tak bude stejná, jako kdyby se 164 W rozptýlilo v dobře přizpůsobené zátěži.

Tato úvaha je poněkud zjednodušená, nicméně naznačuje, proč se na vedení (anténním napájecí) zvětšují ztráty vlivem stojatých vln. Přidavné ztráty prvoplánově nezávisí na druhu vedení (koaxiálním nebo symetrickém) ani na jeho charakteristické (vlnové) impedanci, ale jen na jeho vlastním útlumu.

Programy pro vf napáječe

Všechny ztráty na vedení (napájecí) určitého typu a délky, zatíženém na uvažovaném kmitočtu reálnou nebo komplexní impedancí, určíme dnes velmi přesně pomocí dostupných výpočetních programů TLD (Transmission Line Details, obr. 1) nebo TLW (Transmission Line Program for Windows, obr. 2).

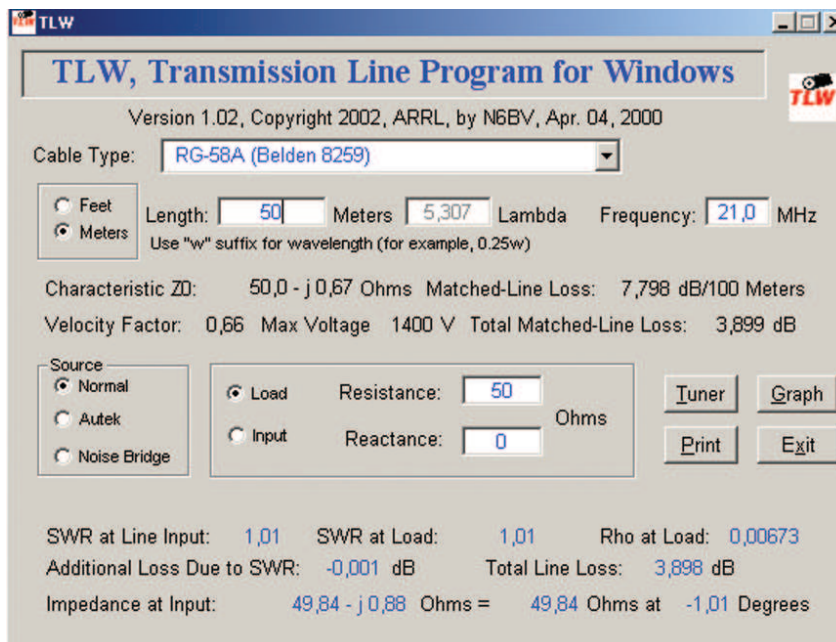
V obou programech je totiž uložena databáze více jak 40 typů koaxiálních a symetrických napájecí, a to jak komerčních, tak individuálně navržených, což usnadňuje vzájemné porovnání různých variant napájení antén.

Stačí vybrat typ a délku napáječe, kmitočet, impedanci zátěže a v hlavním okně programu se objeví jeho katalogový útlum na 100 m (popř. stop), útlum zvolené délky, přidavný útlum vlivem stojatých vln a pak útlum celkový zvoleného napáječe. To jsou v podstatě jen základní informace.

Oba programy však poskytují další informace, které usnadňují praktické přizpůsobení antén. Přepočítávají totiž impedanci z jednoho konce daného koaxiálního nebo symetrického vedení na druhý včetně ztrát. Ocení to zejména mnozí majitelé cenově poměrně dostupných anténních můstků a analyzátorů (MFJ, RF1). Z impedance, změřené na konci napáječe (u vysílače) jim umožní dokonale přizpůsobení antén některým z obvodů (včetně velikostí kapacit a indukčností), které jsou uloženy v databázi programů.

Naměřené i uložené parametry lze plynule a rychle měnit přidržetím příslušných tlačítek a na odpovídajícím grafickém znázornění zároveň sledovat vypočtené výsledky.

Zvláště působivé a poučné jsou v programu TLD změny na Smithově diagramu,



Obr. 2. Hlavní okno programu TLW

kde se současně zobrazuje impedance na obou koncích anténního napáječe.

Názorné zobrazení s popisy tlačítek vkládaných a vypočtených číselných údajů jsou natolik názorné, že jsou srozumitelné i bez nápovědy.

Každý z programů může být také pomůckou při rozhodování, jaký napáječ zvolit pro napájení antény – zda „koaxiál“ nebo dvoulinku.

Závěrem

Přidavné ztráty lze vypočítat i pomocí jednoduchých vzorců na kapesní kalkulačce [7]:

Celková ztráta v dB (TL = Total Loss)

$$TL = 10 \log \left[\frac{\alpha^2 - \rho^2}{\alpha(1 - \rho^2)} \right] \quad (1),$$

kde ρ je tzv. činitel odrazu daný vzorcem

$$\rho = \frac{\text{ČSV} - 1}{\text{ČSV} + 1} \quad (2);$$

ČSV je činitel stojatých vln na konci vedení (u zátěže – antény); α je poměrná ztráta výkonu na přizpůsobeném vedení délky L :

$$\alpha = 10^{ML/10} \quad (3),$$

kde ML je ztráta výkonu na přizpůsobeném vedení v dB, tzv. tabulkový útlum napáječe v dB dané délky na daném kmitočtu (ML z angl. Matched-line Loss).

Přidavné ztráty AL (Additional Loss) v dB způsobené stojatými vlnami na (útlumovém) vedení jsou pak rozdílem mezi celkovou ztrátou TL v dB (1) a tabulkovým (katalogovým) útlumem ML v dB:

$$AL = TL - ML \quad (4).$$

Příklad: Koaxiální kabel RG 58 o délce 40 m napájí anténu na kmitočtu 14 MHz .

Katalogový útlum kabelu na 14 MHz činí $6,164 \text{ dB}/100 \text{ m}$.

Jaké budou na kabelu ztráty, bude-li u antény $\text{ČSV} = 1, 4$ a 8 ?

Katalogový útlum kabelu délky 40 m bude

$$ML = (6,164/100) \cdot 40 = 2,46 \text{ dB};$$

$$\alpha = 10^{2,466/10} = 1,76;$$

$$\rho_1 = (1 - 1)/(1 + 1) = 0 \quad (\text{ČSV} = 1);$$

$$\rho_4 = (4 - 1)/(4 + 1) = 0,6 \quad (\text{ČSV} = 4);$$

$$\rho_8 = (8 - 1)/(8 + 1) = 0,78 \quad (\text{ČSV} = 8).$$

Celková ztráta (útlum) TL v dB:

$$TL_1 = 2,46 \text{ dB};$$

$$TL_4 = 3,856 \text{ dB};$$

$$TL_8 = 5,59 \text{ dB}.$$

Přidavné ztráty AL:

$$AL_1 = 2,46 - 2,46 = 0;$$

$$AL_4 = 3,856 - 2,46 = 1,396 \text{ dB};$$

$$AL_8 = 5,587 - 2,46 = 3,127 \text{ dB}.$$

Použije-li se na 14 MHz symetrického „okénkového“ napáječe 450Ω s útlumem $0,325 \text{ dB}/100 \text{ m}$ a délce $L = 40 \text{ m}$, bude

$$ML = (0,325/100) \cdot 40 = 0,13 \text{ dB}.$$

Přidavné ztráty AL_1 , AL_4 a AL_8 , vypočtené stejným způsobem, pak budou činit pouze 0 dB , $0,127 \text{ dB}$ a $0,37 \text{ dB}$.

Literatura

[1] Macoun, J., OK1VR: Koaxiální (souosé) kabely. AR B 1/1994, s. 19 – 27.

[2] Macoun, J., OK1VR: Souměrné vf napáječe (dvoulinky). AR A 4/1994, s. 28 a 39.

[3] Macoun, J., OK1VR: Proč a jak měříme ČSV (PSV) – (1), (2) a (3). PE 4, 6, 7/1997.

[4] Šperlín, M., OK2BUH: Symetrické anténní tunery. PE 3, 4 a 5/2010.

[5] Straw, Dean, N6BV: TLW – Transmission Line Program for Windows, V.1.02. Původní verze programu je na CD v ARRL Antenna Booku (17. vydání, 1999). Další verze V.2.0 je na CD u 20. vydání téže publikace.

[6] Maguire, Dan, AC6LA: TLD – Transmission Line Details. Lze stáhnout ze stránek www.ac6la.com nebo <http://www.qsl.net/ac6la/>

Oba programy [5] a [6] porovnává, vysvětluje jisté rozdíly ve výsledcích a doplňuje praktickými výpočty různých přizpůsobovacích obvodů dnes již zesnulý L. B. Cebik, W4RNL, na stránkách www.antennex.com/shack/Dec04/tlnw.htm L.B.Cebik

[7] Straw, R. D., N6BV; Hall, G. L., K1TD; Beezley, B., K6TSI: The ARRL Antenna Book. ARRL 1999.