

1. Měření parametrů koaxiálních napáječů

1.1 Úvod

Napáječ je vedení spojující generátor a zátěž, resp. jiné dílčí bloky zařízení. Jeho vlastnosti jsou obvykle popsány hodnotami parametrů vedení – charakteristické impedance (vlnového odporu) Z_{ov} [Ω], měrné fáze α [rad/m] a měrného útlumu β [1/m]. Z nich je možno určit hodnoty dalších důležitých veličin

$$\text{délku vlny na vedení} \quad \lambda_v = 2\pi/\alpha,$$

$$\text{fázovou rychlost} \quad v_f = \lambda_v \cdot f$$

V této úloze se měří základní parametry nesymetrického napáječe - koaxiálního kabelu. Ty závisí na poměru průměrů středního vodiče a vodivého pláště i na vlastnostech dielektrika uvnitř kabelu (permitivita, ztráty). Na kmitočtu výrazněji závisí jen hodnoty měrného útlumu β (roste přibližně s $\sqrt{f}$).

Vlnová délka λ_v i fázová rychlost v_f vlny na napáječi jsou menší než hodnoty λ_0 a $c_0 = 3 \cdot 10^8$ m/s při šíření vlny volným prostorem. Jejich poměr udává činitel zkrácení ξ

$$\xi = \frac{\lambda_v}{\lambda_0} = \frac{v_f}{c_0} \quad (1.1)$$

který závisí na permitivitě dielektrika. Je-li dielektrikem vzduch, je $\xi = 1$.

Impedance na vstupu bezeztrátového ($\beta = 0$) vedení délky l , které je na konci otevřené, je rovna

$$Z_p = -j Z_{ov} \cdot \cotg(\alpha \cdot l),$$

při zakončení zkratem

$$Z_k = j Z_{ov} \cdot \tg(\alpha \cdot l).$$

Z průběhu funkcí $\cotg$ a $\tg$ vyplývá, že při hodnotách argumentů $\alpha \cdot l = n \cdot \pi/2$ (n celé) nabývají reaktance mezních hodnot $\pm\infty$ nebo 0. Délky vedení $l = n \cdot \lambda/4$, odpovídající uvedeným argumentům, jsou tzv. rezonanční délky. Když vedení nemá zanedbatelný útlum, je jeho vstupní reaktance při rezonančních délkách nulová a na svorkách je pak jistý reálný odpor. Ten je malý v situacích, kdy bychom na bezeztrátovém vedení dostali $X = 0$ a naopak značně velký při $X = \pm\infty$ na vedení beze ztrát. Vstupní odpor R_{rez} vedení s malými ztrátami délky $\lambda/4$ na konci zkratovaného je možno vypočítat pomocí vztahu

$$R_{rez} = \frac{Z_{ov}}{\beta \cdot l} \quad (1.2)$$

Při malých hodnotách $\alpha \cdot l$, kdy $l \ll \lambda_v$, platí přibližně $X = 1/(\omega \cdot C_1 \cdot l)$ resp. $X = \omega \cdot L_1 \cdot l$, kde L_1 a C_1 jsou hodnoty indukčnosti a kapacity vedení na jednotku délky.

Charakteristickou impedanci (vlnový odpor) napáječe Z_{ov} je možno určit pomocí vztahu

$$Z_{ov} = \frac{1}{v_f \cdot C_1} = \frac{1}{\xi \cdot c_0 \cdot C_1} \quad (1.3)$$

kde C_1 [F/m] je kapacita měřeného napáječe na metr délky.

1.2 Cíl práce

1. Seznámit se s měřením parametrů koaxiálních napáječů.
2. Změřit základní parametry vzorku koaxiálního napáječe.

1.3 Přístroje a pomůcky

- Vektorový obvodový analyzátor R&S ZLV (9 kHz – 3 GHz) s kalibrační sadou
- Vzorky napáječů

1.4 Domácí příprava

- Zopakujte si základní poznatky o vedení a jeho parametrech.
- Zpracujte odpovědi na kontrolní otázky.
- Po prostudování metod měření si promyslete postup práce a vyhodnocení výsledků.

1.5 Metoda měření

Parametry napáječů se v praxi obvykle měří na vzorcích, které jsou krátké ($l \approx \lambda_v/4$) nebo naopak dosti dlouhé ($l \gg \lambda_v$) vůči délce vlny na napáječi λ_v . V této laboratorní úloze zaměříme pozornost na metodu měření na krátkých vzorcích.

1.5.1 Měření na krátkých vzorcích napáječů

S výhodou je možno využít známých vlastností vedení ve čtvrtvlnné rezonanci, kdy zkratovaný úsek vedení má velkou a ryze reálnou vstupní impedanci, a značné citlivosti rezonanční metody na změny parametrů. K měření potřebujeme přístroj pro měření impedancí v oboru rádiových kmitočtů. Vzhledem k tomu, že v laboratoři „klasický“ přístroj na měření impedancí nemáme, použijeme pro měření vstupní impedance vektorový obvodový analyzátor.

Konec měřeného vzorku napáječe se zkratuje a změří se jeho délka l . Přibližně se vypočte kmitočet, při kterém přibližně platí $l = \lambda_v/4$. Měřením se pak najde rezonanční kmitočet f_r , při kterém je vstupní impedance vzorku vysoká a ryze reálná. Činitel zkrácení ξ získáme z následujícího vztahu

$$\xi = \frac{f_r 4l}{c_0} \quad (1.4)$$

Charakteristickou impedanci Z_{ov} měřeného vzorku napáječe je možno vypočítat pomocí vztahu (1.3). Hodnotu C_1 zjistíme měřením kapacity C vzorku napáječe (na konci naprázdno) na nízkém kmitočtu (kdy platí, že $l \ll \lambda_v$) a přepočtením na délku 1 m.

Velikost reálné složky vstupní impedance (rezonančního odporu) R_{rez} odpovídá hodnotě měrného útlumu β podle vztahu (1.2). Přepočet výsledku na běžně užívané hodnoty v [dB/m] se provede násobením koeficientem 8,686.

Uveďme nyní několik poznámek k popsané metodě:

- Popsaným způsobem lze přímo měřit jen nesymetrické napáječe, neboť jedna svorka sondy měřiče impedance je uzemněná a při měření je pak uzemněn i jeden vodič měřeného kabelu (plášť).
- Délka kabelu je uvedena na měřeném vzorku.
- Při měření kapacity je třeba kmitočet měření volit tak, aby platilo $l \ll \lambda_v$. Když do vztahu pro reaktanci vedení naprázdno $X = -Z_{ov} \cdot \cotg(\alpha l)$ dosadíme $\tg(\alpha l) \cong \alpha l$ a nahradíme $\alpha l = 2\pi l \cdot f / v_f = \omega C_1 Z_{ov} \cdot l$, dostaneme $X = -1/(\omega C_1 \cdot l)$. Pak reaktance vedení je stejná jako reaktance kapacity s hodnotou $C_1 \cdot l$ a vedení se chová jako soustředěná kapacita. Tento závěr je ale podmíněn platností podmínky $\tg(\alpha l) \cong \alpha l$ a chyba platnosti této podmínky je i chybou výsledku. Rozborem je možno zjistit velikost přídavné chyby měření, pro přiměřeně přesná měření by délka vzorku neměla přesáhnout asi 2 % délky vlny ve vzduchu při kmitočtu měření.

1.5.2 Další možnosti měření charakteristické impedance Z_{ov}

Charakteristickou impedanci Z_{ov} kabelu je možno určit také ze změřených hodnot vstupní impedance kabelu nakrátko Z_k a naprázdno Z_p na libovolném kmitočtu a dosazením do vzorce

$$Z_{ov} = \sqrt{Z_p \cdot Z_k} . \quad (1.5)$$

Obě impedance jsou obecně komplexní, při měření kabelu beze ztrát je však výraz pod odmocninou reálný. Při měření na velmi nízkých kmitočtech pak dostaneme známý vztah

$$Z_{ov} = \sqrt{\frac{L_1}{C_1}} . \quad (1.6)$$

Vzhledem k dosažitelné přesnosti měření impedancí je však tento postup využitelný především pro ověření výsledků získaných některou z výše uvedených metod.

1.6 Zadání úlohy

1. Vzorek kabelu zakončete zkratem a zobrazte v daném kmitočtovém pásmu závislost jeho vstupní impedance na frekvenci. Porovnejte tuto závislost s teoretickými předpoklady. Diskutujte rozdíly.
2. Určete základní parametry Z_{ov} , ξ a β kabelu měřením ve čtvrtvlnné rezonanci.
3. Změřte impedanci vzorku kabelu naprázdno a nakrátko na vhodném kmitočtu mimo rezonanci. Určete charakteristickou impedanci Z_{ov} měřeného kabelu a srovnajte ji s předchozími výsledky.

1.7 Poznámky k měření

V laboratoři obdržíte jeden vzorek koaxiálního kabelu ($l < 1\text{m}$) s konektory. Vliv konektorů při měření zanedbejte. Číslo a délku měřeného vzorku kabelu zaznamenejte.

Na pracovišti je k dispozici vektorový obvodový analyzátor. Před vlastním měřením je nutné tento přístroj vhodně nastavit a zkalibrovat, aby změřená hodnota impedance byla dostatečně přesná. Pro nastavení a kalibraci přístroje postupujte dle návodu na obsluhu obvodového analyzátoru, který je uveden na pracovišti. Nastavte frekvenční rozsah měření na 1 až 200 MHz, lineární rozmítání frekvence a velikost frekvenčního kroku 250 kHz. Dále nastavte šířku IF filtru na 1 kHz a

aktivujte volbu pro zobrazení měřené veličiny jako průměr z N měření. N (*Average Factor*) nastavte na 10. Proveďte jednoportovou kalibraci přístroje a na displeji zobrazte průběh reálné a imaginární části měřené impedance. Hodnoty impedance odečítejte pomocí markrů.

Po připojení vzorku (na konci nakrátko) k měřicímu portu nejprve zobrazte závislost je vstupní impedance na kmitočtu a tu porovnejte s teoretickými předpoklady pro bezztrátové vedení a diskutujte rozdíly. Naměřenou závislost zaznamenejte. Dále nalezněte přesnou hodnotu rezonančního kmitočtu f_r (jedná se o první paralelní rezonanci, kdy imaginární část vstupní impedance roste nadevšechno meze) a změřte rezonanční odpor R_{rez} . Pak odstraňte zkrat na konci měřeného vzorku, na nízkém kmitočtu změřte reaktanci na vstupu vzorku a vypočítejte kapacitu na metr délky C_1 . Z naměřených hodnot vypočítejte parametry napáječe.

Dále změřte na kmitočtu mimo rezonanci vstupní impedance vzorku při zakončení naprázdno a nakrátko a vypočítejte charakteristickou impedanci Z_{ov} a výsledek srovnajte s předchozím. Pokud výsledky neodpovídají očekávaným, měření opakujte.

1.8 Kontrolní otázky

1. Jak dlouhý kabel ($Z_{ov} = 60 \, \Omega$, $\xi = 0,6$) bude mít čtvrtvlnnou rezonanci na kmitočtu 200 MHz ?
2. Jak je třeba volit kmitočet při měření C_1 předchozího vzorku, aby chyba nepřekročila 2%?
3. Jak se mění znaménko fáze vstupní impedance kabelu nakrátko v okolí čtvrtvlnné rezonance
4. Kabel má měrný útlum 0,2 dB/m. Jakou číselnou hodnotu je třeba dosadit do vzorce (1.2)?
5. Jak dlouhý kousek kabelu ($Z_{ov} = 50 \, \Omega$, $\xi = 0,6$) nahradí kapacitor $C = 3 \, \text{pF}$? Jak je omezen kmitočet při této náhradě?
6. Koaxiální kabel o charakteristické impedanci $75 \, \Omega$ má měrný útlum 0,15 dB/m. Jak velkou impedanci naměříme na vzorku nakrátko o délce 0,5 m na kmitočtu čtvrtvlnné rezonance?
7. Určete nejmenší délku koaxiálního vedení (na konci nakrátko), který bude mít při kmitočtu 100 MHz reálnou vstupní impedanci. Délka vlny v dielektriku kabelu je o 20% menší než ve vzduchu.
8. Při měření koaxiálního kabelu délky 20 m na konci nakrátko byla jeho vstupní impedance reálná na kmitočtech 58,5 MHz, 61 MHz, 63,5 MHz, 66 MHz a střídavě měla velkou a malou hodnotu. Jak velký je poměr délek vlny v dielektriku kabelu a ve vzduchu?
9. Koaxiální kabel délky 0,8 m s charakteristickou impedancí $75 \, \Omega$ měl při čtvrtvlnné rezonanci (na konci nakrátko) vstupní impedanci 7,5 k Ω . Jak dlouhý kabel stejného provedení způsobí útlum 3 dB na tomto kmitočtu?