

# Laboratorní úloha č. 11

14. ČERVNA 2023

MARTIN ŠIMÁK

**Měření permitivity materiálů** Laboratorní úloha ukazuje využití vektorového měření pro určování frekvenčního průběhu efektivní i relativní permitivity různých materiálů.

## Úkoly měření

1. Měření frekvenčního průběhu efektivní permitivity mikropáskového vedení pomocí přímkového rezonátoru.
2. Měření frekvenčního průběhu efektivní permitivity mikropáskového vedení pomocí prstencového rezonátoru.
3. Měření relativní permitivity materiálu ABS ve vlnovodu.

## Použité přístroje a komponenty

- Vektorový analyzátor R&S ZVA67 (10 MHz až 67 GHz)
- Elektronická kalibrační jednotka R&S ZV-Z52 (10 MHz až 24 GHz)

## Popis měření

**Měření frekvenčního průběhu efektivní permitivity mikropáskového vedení pomocí přímkového rezonátoru** Subjektem měření je mikropáskové vedení šířky 0.7 mm a délky 34 mm, které je umístěno do kovové krabičky a má otevřené konce, které jsou jen přiblížené k pinům SMA konektorů. Použitý substrát je CuClad® 233 od firmy Rogers s tloušťkou 0.254 mm. Podél délky vedení  $L$  je možné rozmístit celé násobky  $\lambda/2$  stojaté vlny, která má kmitny elektrického pole na otevřených koncích vedení. Vlnová délka na mikropáskovém vedení je dáva vztahem

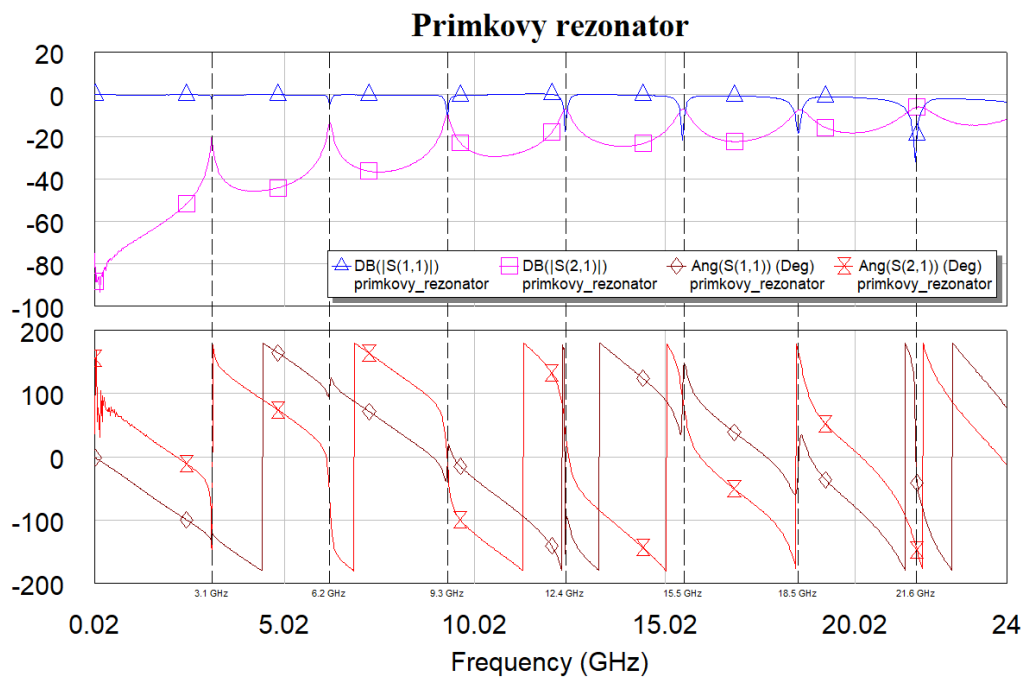
$$\lambda = \frac{c}{f\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}}, \quad (1)$$

kde  $c$  je rychlost světla a  $\epsilon_{\text{eff}}$  je efektivní permitivita vedení.

Pro nastavení vektorového analyzátoru volíme frekvenční pásmo 20 MHz až 24 GHz a výkon 0 dBm. Dále počet frekvenčních bodů volíme tak, aby byl frekvenční krok měření 20 MHz. Šířku pásma mezifrekvenčního filtru RBW je vhodné volit tak, aby měření probíhalo za akceptovatelný čas, ale abychom zároveň dosáhli dostatečné šumové separace. Kalibraci provádíme pomocí automatické kalibrační jednotky, která umožňuje velice přesnou kalibraci s dobrou opakovatelností. Exportované grafy modulu a fáze S-parametrů vedení jsou na obrázku 1.

Pro všechny odečtené rezonanční frekvence jsou vypočtené hodnoty permitivity zaneseny v tabulce 1 a jejich průběh graficky znázorněn na obrázku 2. Zpracování bylo provedeno formou porovnání vlnové délky ve volném prostoru ( $\lambda_0 = c/f$ ) s délkou měřeného vedení tak, aby jednotlivé rezonance odpovídaly rovnosti

$$L = m\lambda/2, \text{ kde } m = 1, 2, \dots \quad (2)$$

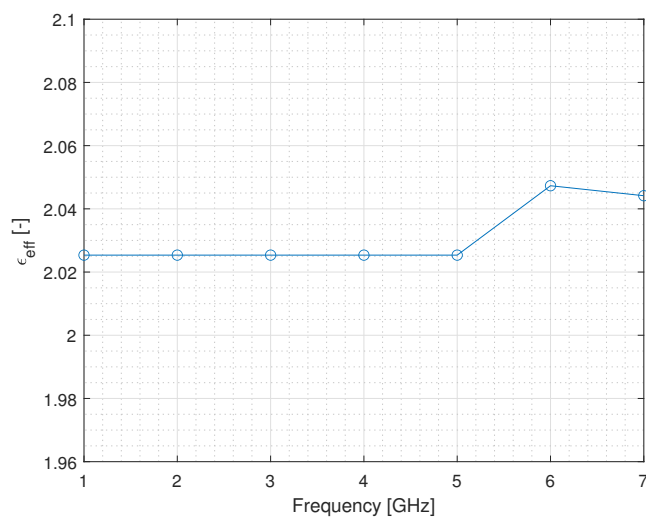


Obrázek 1: Modul a fáze vedení s přímkovým rezonátorem

Očividnou diskuzí je volba násobku  $m$  vlnové délky pro první zobrazovanou rezonanci, ale jelikož pro volbu  $m = 1$  vychází frekvenční disperze permitivity v rámci očekávatelných mezí, byla posouzena jako správná.

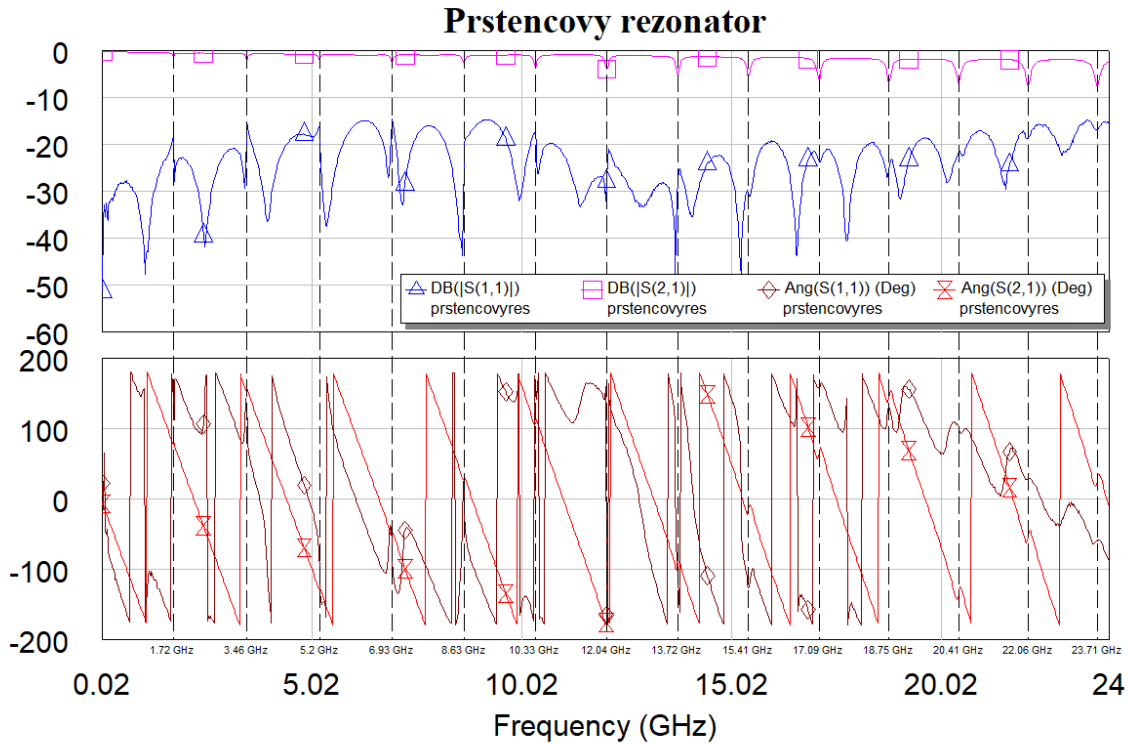
| $f_{\text{res}}$ [GHz]      | 3.1  | 6.2  | 9.3  | 12.4 | 15.5 | 18.5 | 21.6 |
|-----------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| $\epsilon_{\text{eff}}$ [—] | 2.03 | 2.03 | 2.03 | 2.03 | 2.03 | 2.05 | 2.04 |

Tabulka 1: Zjištěné hodnoty permitivity vedení s přímkovým rezonátorem



Obrázek 2: Přímkový rezonátor – grafické znázornění

**Měření frekvenčního průběhu efektivní permitivity mikropáskového vedení pomocí prstencového rezonátoru** Měřeným vedením v této úloze je přípravek s prstencovým rezonátorem. Tento přípravek je vyroben na substrátu Rogers RO4003C s tloušťkou 0.508 mm. Šířka vedení prstence je 0.7 mm a vnější průměr je 34 mm. Průběh S-parametrů, z něhož čteme rezonanční frekvence, je na obrázku 3.



Obrázek 3: Modul a fáze vedení s prstencovým rezonátorem

Pro všechny odečtené rezonanční frekvence jsou vypočtené hodnoty permitivity zaneseny v tabulce 2 a jejich průběh graficky znázorněn na obrázku 4. Zpracování bylo provedeno formou porovnání vlnové délky ve volném prostoru s vnějším průměrem rezonátoru tak, aby jednotlivé rezonance odpovídaly rovnosti

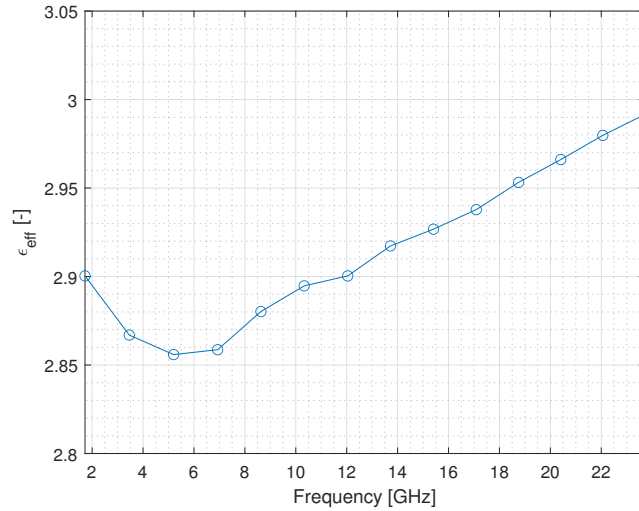
$$2\pi \left( R - \frac{w}{2} \right) = m\lambda, \quad (3)$$

kde  $m = 1, 2, \dots$ ,  $R$  je vnější průměr a  $w$  je šířka páska rezonátoru.

|                             |       |       |       |       |       |       |       |
|-----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $f_{\text{res}}$ [GHz]      | 1.72  | 3.46  | 5.2   | 6.93  | 8.63  | 10.33 | 12.04 |
| $\epsilon_{\text{eff}}$ [—] | 2.72  | 1.51  | 1.19  | 1.05  | 0.97  | 0.92  | 0.89  |
| $f_{\text{res}}$ [GHz]      | 13.72 | 15.41 | 17.09 | 18.75 | 20.41 | 22.06 | 23.71 |
| $\epsilon_{\text{eff}}$ [—] | 0.87  | 0.85  | 0.83  | 0.82  | 0.82  | 0.81  | 0.81  |

Tabulka 2: Zjištěné hodnoty permitivity vedení s prstencovým rezonátorem

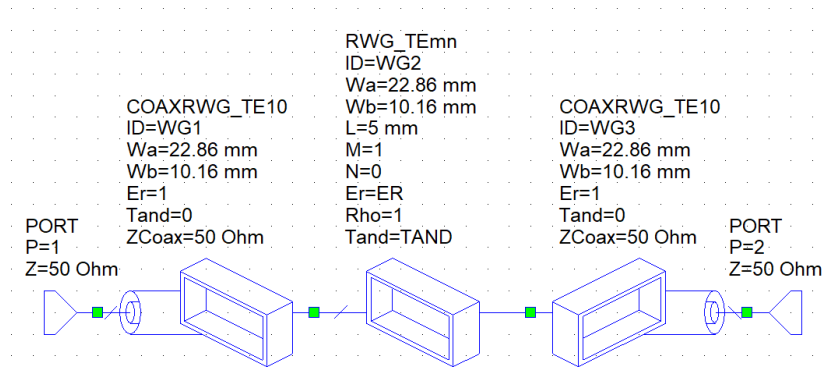
**Měření relativní permitivity materiálu ABS ve vlnovodu** Pro měření na vlnovodu R100 je nutné upravit frekvenční pásmo na jednovodové pásmo vlnovodu (8.2 GHz až 12.4 GHz) a provést příslušnou kalibraci TRL. Pro kalibraci připojujeme mezi vlnovodné přechody rovné úseky



Obrázek 4: Prstencový rezonátor – grafické znázornění

vlnovodu vyplněné kvádry materiálu ABS vytisknuté na 3D tiskárně. Pro každý vzorek ukládáme frekvenční průběh změřených S-parametrů ve formátu Touchstone a následně analyzujeme v softwaru AWR.

Analýza v AWR probíhá tak, že si nejprve sestavíme ekvivalentní obvodové schéma jako je na obrázku 5. Pro ostatní délky postupujeme analogicky. Proměnné  $ER$  a  $TAND$  jsou hodnoty efektivní permitivity a ztrátového faktoru  $\tan(\delta)$ , které jsou předmětem následné optimalizace.

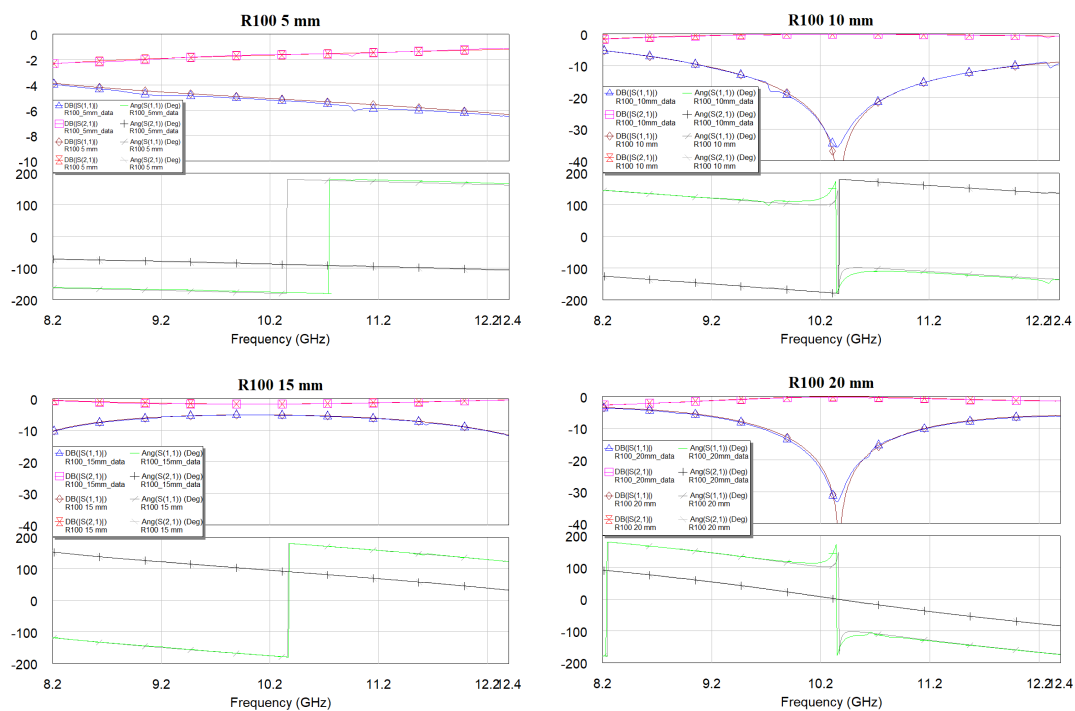


Obrázek 5: Ekvivalentní obvodové schéma vlnovodu R100 pro délku 5 mm

Dále v grafech sledujeme podobnost vypočítaných S-parametrů s importovanými průběhy z VNA, jak je vidět na obrázcích ve fig. 6. Tuto podobnost maximalizujeme pomocí optimalizace proměnných  $ER$  a  $TAND$  simplexových algoritmem s cílem minimalizace kvadratické chybové funkce pro  $S_{11}$  a  $S_{21}$ . Tyto rovnice sestavíme a optimalizujeme proměnné pro všechny čtyři konfigurace. Výsledné hodnoty jsou zaneseny v tabulce 3.

|                         |        |
|-------------------------|--------|
| $\epsilon_{\text{eff}}$ | 2.49   |
| $\tan(\delta)$          | 0.0024 |

Tabulka 3: Výsledky optimalizace



Obrázek 6: Modul a fáze vedení s úseky vlnovodu R100 různých délek

## Závěr

V rámci laboratorní úlohy jsme se seznámili s měřením efektivní permitivity pomocí tří různých metod, každá z nichž využívala jiné struktury vedení. První dvě metody využívaly rezonančního mikropáskového vedení a třetí vlnovod R100. Měření proběhlo bez výraznějších potíží.