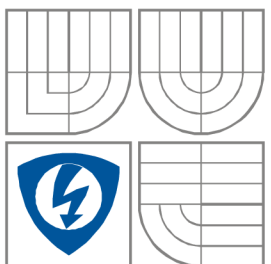


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY  
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

## Měření permitivity materiálů v mikrovlnném pásmu – laboratorní úloha

Measurement of permittivity materials in microwave band - lab task

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

Jakub Fojtík

AUTHOR

**VEDOUCÍ PRÁCE**

Ing. Jaroslav Láčík, Ph.D.

SUPERVISOR

BRNO, 2012



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

## Bakalářská práce

bakalářský studijní obor  
Elektronika a sdělovací technika

Student: Jakub Fojtík  
Ročník: 3

ID:125421  
Akademický rok: 2011/2012

NÁZEV TÉMATU:

Měření permitivity materiálů v mikrovlnném pásmu – laboratorní úloha

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte metody měření permitivity materiálů ve vlnovodu. Metody vzájemně porovnejte a diskutujte jejich vlastnosti. Po dohodě s vedoucím práce dvě z těchto metod vyberte, modelujte je v CST Microwave Studio a navrhnete uspořádání měřicího pracoviště. Pracoviště realizujte. Ověřte funkčnost realizovaného měřicího pracoviště a diskutujte možné chyby měření. Vytvořte návod k laboratorní úloze a vypracujte vzorový protokol.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] HANUS, S., SVAČINA, J., Vysokofrekvenční a mikrovlnná technika. Elektronické skriptum. Brno: FEKT VUT v Brně, 2002.

[2] SVAČINA, J., RŮŽIČKA, V., PUNČHOCHÁŘ, J., Teorie obvodů V a technika velmi krátkých vln – Laboratorní cvičení. Skriptum FE VUT v Brně, 1980.

Termín zadání: 6.2.2012

Termín odevzdání: 25.5.2012

Vedoucí práce: Ing. Jaroslav Láčik, Ph.D.  
Konzultanti bakalářské práce:

prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida  
Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **ABSTRAKT**

Tato práce se zabývá vypracováním laboratorní úlohy se zaměřením na měření permitivity materiálů v mikrovlnném pásmu. Pro vlastní měření jsou použity dvě vlnododové metody. První metoda využívá pro určení parametrů bezztrátových materiálů zkrácení vlnové délky v materiálu. Druhá metoda využívá pro určení komplexní permitivity ztrátových materiálů metodu nakrátko – naprázdno. Obě metody jsou v této práci krátce popsány a využity pro určení parametrů materiálů z dat získaných modelováním v CST Microwave Studio. Měřicí pracoviště pro obě metody je realizováno a pomocí něj je u několika vzorků materiálů změřena jejich permitivita. Nakonec je vypracován návod pro laboratorní úlohu a vzorový protokol.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Měření komplexní permitivity materiálů, vlnododové metody měření materiálů, metoda určení parametrů bezztrátových materiálů ze zkrácení vlnové délky, metoda určení komplexní permitivity a permeability ztrátových materiálů metodou nakrátko – naprázdno

## **ABSTRACT**

This work is concentrated on the development of laboratory task with a focus on measuring permittivity of materials in microwave band. For the measurement, two waveguide methods are used. The first method is used for determining of the permittivity of lossless materials by a method „shortening wavelength in the material“. The second method is used for determining of the permittivity of loss materials by a method „short – open“. Both methods are briefly described and used for determining permittivity of materials obtained from the data modeling in CST Microwave Studio. Then measuring workplace for both methods is realized and used for measurement of the permittivity of selected materials. Finally, the instruction for lab task with and measurement report is created.

## **Keywords**

Measurement of complex permittivity of materials, waveguide methods for material measurement, determining permittivity of lossless materials by shortening of wavelength method, determining of complex permittivity and permeability of loss materials by short - open method

Fojtík Jakub, Měření permitivity materiálů v mikrovlnném pásmu – laboratorní úloha. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2011. 33 s., 15 s. příloh. Bakalářská práce. Vedoucí práce: Ing. Jaroslav Láčik, Ph.D.

## **PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Měření permitivity materiálů v mikrovlnném pásmu – laboratorní úloha jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne .....

.....

(podpis autora)

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji vedoucímu bakalářské práce prof. ing. Jméno Příjmení, CSc. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne .....

.....

(podpis autora)

# Obsah

Seznam obrázků .....	vii
Seznam tabulek .....	viii
Úvod .....	1
1 Obecné pojednání o permitivitě a permeabilitě materiálů.....	2
2 Srovnání jednotlivých metod měření relativní permitivity .....	5
2.1 Metody, při kterých je vzorek měřeného materiálu vložen do úseku vedení nebo vlnovodu: 5	
2.1.1 Určení parametrů bezeztrátových materiálů ze zkrácení vlnové délky .....	6
2.1.3 Určení komplexní permitivity a permeability metodou nezávislou na poloze vzorku ....	8
2.2 Metody využívající dutinových rezonátorů .....	9
2.2.1 Rezonátor zcela vyplněný dielektrickým materiálem.....	9
2.2.2 Rezonátor částečně vyplněný dielektrickým materiálem .....	10
2.3 Metody měření ve volném prostoru .....	11
3 Určení relativní permitivity pomocí vybraných dvou metod .....	12
3.1 Určení parametrů bezeztrátových materiálů ze zkrácení vlnové délky .....	12
4 Ověření a vyzkoušení metod v programu CST MICROWAVE STUDIO .....	19
4.1 Určení parametrů bezeztrátových materiálů ze zkrácení vlnové délky .....	19
Obr. 4.1: Vlnovod se vzorkem teflonu.....	19
5 Návrh měřicího pracoviště .....	25
6 Závěr .....	30
Literatura .....	32
Seznam symbolů, veličin a zkratk.....	33
Seznam příloh.....	35
A Měření permitivity materiálů v mikrovlnném pásmu – návod k laboratorní úloze .....	36
Určení komplexní permitivity a permeability ztrátových materiálů metodou nakrátko – naprázdno.....	38
B Měření permitivity materiálů v mikrovlnném pásmu – vzorový protokol .....	44
C Měření permitivity materiálů v mikrovlnném pásmu – šablona vzorového protokolu .....	48

# SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 2.1: Posun minima stojatých vln vlivem zkrácení vlnové délky v materiálu.....	6
Obr. 2.2: Měření vstupní impedance vlnovodu zaplněného dielektrikem: nakrátko.....	7
Obr. 2.3: Měření vstupní impedance vlnovodu zaplněného dielektrikem: naprázdno.....	8
Obr. 2.4: Měření nezávislé na poloze vzorku.....	9
Obr. 2.5: Rezonátor částečně vyplněný dielektrickým materiálem.....	11
Obr. 3.1: Posun minima stojatých vln vlivem zkrácení vlnové délky v materiálu.....	12
Obr. 3.2: Měření vstupní impedance vlnovodu zaplněného dielektrikem: nakrátko.....	15
Obr. 3.3: Měření vstupní impedance vlnovodu zaplněného dielektrikem: naprázdno.....	16
Obr.4.1: Vlnovod se vzorkem teflonu.....	19
Obr.4.2: Rozložení vidů v obdélníkovém vlnovodu.....	20
Obr. 4.3: Vzorek polystyrenu v počátku.....	21
Obr. 4.4: Posunutý vzorek polystyrenu.....	22
Obr. 4.5: Určení impedance $Z_z$ .....	22
Obr. 4.6: Určení impedance $Z_p$ .....	23
Obr. 5.1: Schéma zapojení pracoviště.....	26
Obr. 1: Určení vlnové délky $\lambda_g$ .....	36
Obr. 2: Určení impedance $Z_z$ .....	38
Obr. 3: Určení impedance $Z_p$ .....	39
Obr. 4: Pracoviště .....	41

# SEZNAM TABULEK

Tabulka 1.1.: Relativní permitivita vybraných materiálů.....	3
Tabulka 5.1: FR4 zkrácení vlnové délky.....	27
Tabulka 5.2: FR4 nakrátko – naprázdno.....	28
Tabulka 1:.....	44
Tabulka 2:.....	45



# ÚVOD

Tato práce se zabývá měřením permitivity materiálů pomocí vlnododových metod. Jsou zde srovnány jednotlivé metody pro měření permitivity. Dvě jsou vybrány a využity pro vytvoření laboratorní úlohy.

Vlastní text práce je členěn do šesti kapitol. V první kapitole je obecně pojednáno o komplexní permitivitě a permeabilitě materiálů. Ve druhé kapitole jsou představeny a srovnány metody měření permitivity materiálů. Ve třetí kapitole jsou detailně rozebrány dvě vlnododové metody. Jedná se o metodu měření relativní permitivity ze zkrácení vlnové délky v materiálu, což je metoda použitelná pro měření bezztrátových materiálů. Druhou vybranou metodou je metoda určení komplexní permitivity a permeability ztrátových materiálů při měření nakrátko a naprázdno. Pro ověření těchto metod byl použit program CST MICROWAVE STUDIO. V další kapitole jsou shrnuty výsledky získané ze simulací. V předposlední kapitole je navrženo a diskutováno pracoviště pro laboratorní úlohu. V závěrečné kapitole je pojednáno o praktickém měření permitivity a dosažených výsledcích za použití zmíněných dvou metod. V příloze je uveden návod jak postupovat při využívání těchto metod ke zjištění relativní permitivity a vzorový protokol, s proměřeným vzorkem FR4-ky.

# 1 Obecné pojednání o permitivitě a permeabilitě materiálů

Permitivita popisuje z fyzikálního hlediska schopnost prostředí se polarizovat. Permitivita udává vztah mezi vektorem intenzity elektrického pole a vektorem elektrické indukce. [2]

$$\mathcal{E} = \frac{D}{E} \quad (1.1)$$

kde  $D$  představuje elektrickou indukci a  $E$  intenzitu elektrického pole.

Permitivitu prostředí  $\mathcal{E}$  lze vyjádřit jako součin permitivity vakua  $\mathcal{E}_0$  a relativní permitivity  $\mathcal{E}_r$ .  
 $\mathcal{E} = \mathcal{E}_0 \cdot \mathcal{E}_r = \mathcal{E}_0 \cdot (\mathcal{E}_r' - j \cdot \mathcal{E}_r'')$  (1.2)

$\mathcal{E}_r'$  je reálnou částí,  $\mathcal{E}_r''$  je částí imaginární

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_0 \times \mathcal{E}_r' (1 - j \cdot \text{tg} \delta_E) \quad (1.3)$$

$\text{tg} \delta_E$  představuje činitel elektrických ztrát

$$\text{tg} \delta_E = \frac{\mathcal{E}_r''}{\mathcal{E}_r'} \quad (1.4)$$

Podobnou veličinou je permeabilita prostředí, tato veličina nám udává schopnost prostředí se magnetizovat. Permeabilita  $\mu$  je vyjádřena jako součin  $\mu = \mu_0 \cdot \mu_r = \mu_0 \cdot (\mu_r' - j \cdot \mu_r'')$  (1.5)

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r' (1 - j \cdot \text{tg} \delta_H) \quad (1.6)$$

$\text{tg} \delta_H$  představuje činitel magnetických ztrát

$$\text{tg} \delta_H = \frac{\mu_r''}{\mu_r'} \quad (1.7)$$

Permitivita vakua  $\mathcal{E}_0 = 8,854 \times 10^{-12}$  F/m. Permeabilita vakua  $\mu_0 = 4 \times \pi \times 10^{-7}$  H/m. Hodnoty relativní permitivity vybraných materiálů:

**Tabulka 1.1. Relativní permitivita vybraných materiálů**

<b>Materiál</b>	<b><math>\epsilon_r</math></b>
vzduch	1,00054
polystyren	2,6
slída	7
papír	3,5
porcelán	6,5
sklo	7,6
voda	80
křemík	12

Permitivita udává elektrické vlastnosti materiálů a permeabilita magnetické vlastnosti materiálů. Často potřebujeme znát chování a parametry různých materiálů na velmi vysokých kmitočtech, tzv. v oblasti mikrovln. K tomuto účelu nám slouží mikrovlnná technika. Tato technika má tak uplatnění nejen v elektrotechnice, ale i řadě dalších oborů, jako např. geologie, chemie, stavebnictví a další. Proto byla v mikrovlnné technice vyvinuta řada postupů a metod, které umožňují měřit základní konstanty pevných, kapalných a plyných materiálů. V zásadě se používají tři základní metody zjišťování materiálových konstant:

- 1) Metody, při kterých je vzorek měřeného materiálu vložen do úseku vedení nebo vlnovodu
- 2) Metody využívající dutinových rezonátorů – materiál se umístí do dutiny rezonátoru
- 3) Metody měření ve volném prostoru – volně umístěný materiál je ozařován signálem pomocí vhodného mikrovlnného zářiče

Dále v textu bude často zmiňován pojem obdélníkový vlnovod, pojďme se teda seznámit s tímto pojmem, před samotným srovnáním jednotlivých metod. Mimo jiné je obdélníkový vlnovod také základem pro vlnovodové metody, konkrétně se jedná o vlnovod řady R 100.

### **Vlnovody:**

Na *cm* a *mm* vlnách se používají velmi často vlnovody, protože mají menší útlum než třeba koaxiální vedení. Vlnovody se dělí na kovové a dielektrické. Dielektrické vlnovody jsou tvořeny několika vrstvami s různou permitivitou a v praxi dosud nenašli velkého uplatnění.

Jsou stále předmětem výzkumu, avšak perspektivní uplatnění mohou mít v oblasti světlovodů. Běžně se v praxi používají kovové vlnovody, nejčastěji obdélníkového průřezu. Kovové vlnovody jsou na obou koncích zakončeny přírubami, pomocí kterých se může navzájem spojovat více vlnovodů. Kovové vlnovody mohou mít ale také průřez čtvercový, kruhový a ve speciálních případech tvaru písmene  $H$  nebo  $\pi$ . Vlnovody umožňují přenášet velké výkony, až stovky  $kW$  nebo  $MW$  (pokud je dielektrikem vzduch), jsou omezeny průraznou pevností dielektrika.

## Výroba vlnovodů

Materiály na výrobu vlnovodu musí mít vysokou elektrickou vodivost a musí splňovat vlastnosti konstrukčního materiálu. Nejčastějším materiálem pro výrobu vlnovodů je mosaz a hliník (nižší cena i váha zařízení). Na vnitřní vlnovodové straně se vlnovody stříbří, výjimečně i zlatí. Vlnovodové trubky bývají vyráběny výtlačným lisováním a tahem za studena se zpevňují. Vnitřní povrch je lesklý a hladký. Přesné rozměry a vnitřní tvar jsou docíleny protažením trubky broušeným a leštěným kalibrem z oceli nebo karbidu kovu. Geometricky náročné vlnovodové útvary, které se nedají mechanicky prakticky vyrobit, se vyrábějí galvanoplasticky.

## Obdélníkový vlnovod:

Ve vlnovodu obdélníkového průřezu se může nacházet nekonečně mnoho různých vln TE a TM, které se označují jako vidy TE a vidy TM. Konkrétně  $TE_{mn}$  a  $TM_{mn}$ . Indexy  $m, n$  představují vidová čísla. U vlnovodů obdélníkového průřezu musí být obě vidová čísla vidu TM nenulová. U vidu TE může být maximálně jedno z těchto čísel rovno nule. Z těch nekonečně mnoha vidů TE a TM je nejdůležitější tzv. dominantní vid. U vlnovodu obdélníkového průřezu je to vid  $TE_{10}$ .

Mezní vlnová délka vidu  $TE_{10}$  pro vlnovod R100 ( $a = 22,86 \text{ mm}$ ,  $b = 10,16 \text{ mm}$ ) se vypočítá:

$$\Lambda_m = 2a = 2 \times 0,02286 = 0,04572 \text{ m} = 45,72 \text{ mm}$$

Další vidy, které následují po vidu  $TE_{10}$  jsou tzv. vyšší vidy, pro něž platí, že  $\Lambda_m < \Lambda_m^{TE_{10}}$ . Po vidu  $TE_{10}$  následuje vid  $TE_{20}$ , pak  $TE_{01}$  a poté dvojnásobně degenerované vidy  $TE_{11}$  a  $TM_{11}$ . Při přenášení signálů vlnovodem se snažíme pracovat v pásmu jednovidovosti, to znamená, že chceme, aby se vlnovodem šířil pouze jeden vid, tedy dominantní vid. Pásmo jednovidovosti je výhodné k tomu, že se zde šíří tedy pouze jeden vid, na rozdíl od pásma mnohovidovosti. V pásmu mnohovidovosti se tak šíří mnoho vidů s odlišnými fázovými a skupinovými rychlostmi. Jednotlivé vidy tak dorazí na konec vlnovodové trasy v různých časových okamžicích. Takový signál je pak hodně zkreslený a prakticky nepoužitelný. Z tohoto důvodu je výhodné používat pásmo jednovidovosti. Pásmu jednovidovosti musí vyhovovat vlnová délka  $\lambda$  následovně:

$$\lambda_m^{\text{TE20}} < \lambda < \lambda_m^{\text{TE10}}, \text{ tedy } a < 2a$$

Mezi důležité parametry vlnovodu obdélníkového průřezu patří též mezní kmitočet  $f_m$  a mezní vlnová délka  $\lambda_m$ . [1]

$$f_m = \frac{1}{2 \times \pi \times \sqrt{\epsilon \times \mu}} \times \sqrt{\left(\frac{m \times \pi}{b}\right)^2 + \left(\frac{m \times \pi}{b}\right)^2} \quad (1.8)$$

$$\lambda_m = \frac{2 \times \pi}{\sqrt{\left(\frac{m \times \pi}{b}\right)^2 + \left(\frac{m \times \pi}{b}\right)^2}} \quad (1.9)$$

Dalším důležitým parametrem je též délka vlny ve vlnovodu  $\lambda_g$ .

$$\lambda_g = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_m}\right)^2}} \quad (1.10)$$

## 2 Srovnání jednotlivých metod měření relativní permitivity

### 2.1 Metody, při kterých je vzorek měřeného materiálu vložen do úseku vedení nebo vlnovodu:

Při těchto metodách je vzorek měřeného materiálu vložen do obdélníkového vlnovodu nebo koaxiálního vedení a to tak, že příčný průřez úseku vedení (vlnovodu) je materiálem zcela vyplněn. Důležitá je též přesnost výroby vzorku, zejména jeho délka  $d$ , která je důležitá při výpočtu  $\epsilon_r$  a  $\mu_r$ . Příčný průřez vlnovodu nebo koaxiálního kabelu musí být vzorkem zcela vyplněn, jinak vzniká při měření chyba způsobená vzduchovou mezerou mezi stěnou vedení a měřeným materiálem. Vzduchová mezera působí největší chybu v místech s největší intenzitou elektrického pole. Tyto metody lze v zásadě použít jen pro homogenní a izotropní materiály. V případě nehomogenních materiálu se musí ke změřeným hodnotám  $\epsilon_r$  a  $\mu_r$  poznamenat i orientace vzorku ve vlnovodu, neboť při jiné orientaci bychom obdrželi jiné hodnoty materiálových konstant.

Zde patří tři základní druhy metod:

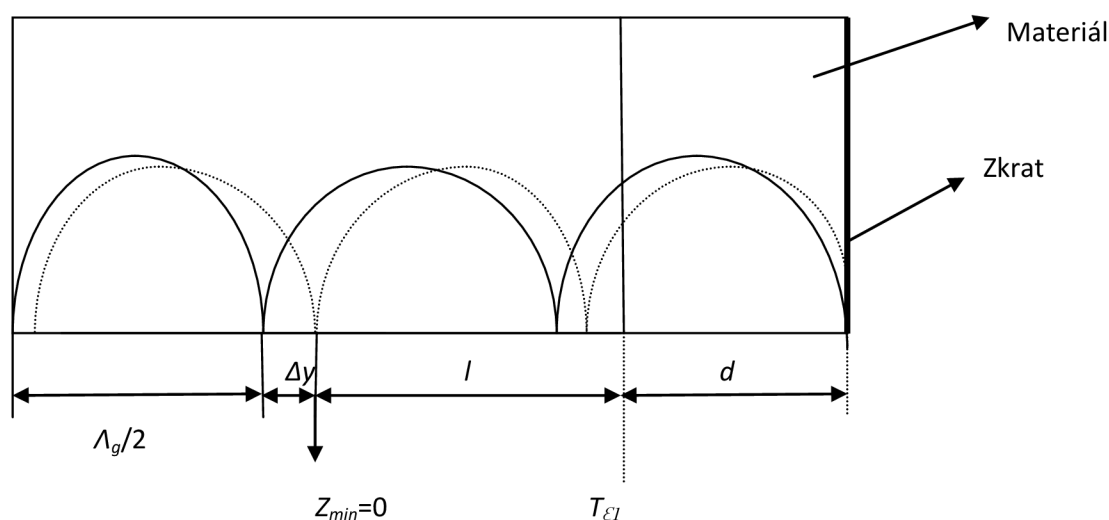
Určení parametrů bezztrátových materiálů ze zkrácení vlnové délky

Určení komplexní permitivity a permeability ztrátových materiálů metodou nakrátko – naprázdno

Určení komplexní permitivity a permeability metodou nezávislou na poloze vzorku

Dále bude v textu zaměřena pozornost pouze na vlnodové metody, u kterých se měřený vzorek materiálů vkládá do úseku vlnovodu. V této práci je konkrétně používán obdélníkový vlnovod R 100.

### 2.1.1 Určení parametrů bezztrátových materiálů ze zkrácení vlnové délky



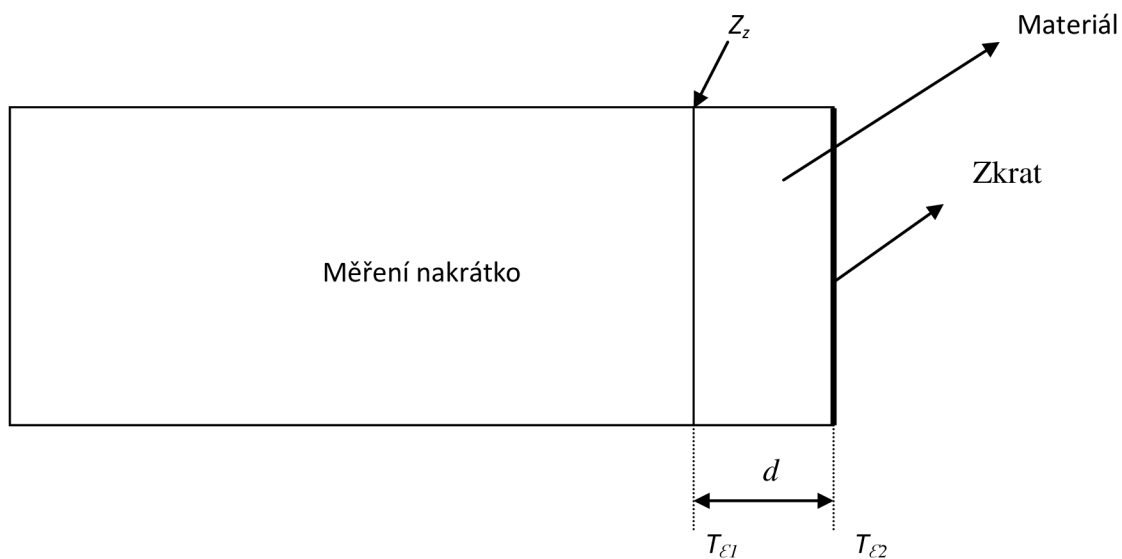
Obr. 2.1: Posun minima stojatých vln vlivem zkrácení vlnové délky v materiálu [2]

Při této metodě (Obr. 1) nejprve zkratujeme prázdný úsek vlnovodu, tím nám vznikne uvnitř stojaté vlnění, polohu minima stojatých vln můžeme zjistit pomocí měřícího vedení. Poté do vlnovodu vložíme vzorek o známé délce  $d$ . Předpokladem této metody však je, že vložený vzorek musí být z materiálu, který je bezztrátový. Po vložení vzorku se zmenší fázová rychlost šíření vlny ve vzorku a délka vlny vzorku se zkrátí. Poměr stojatých vln je nekonečně velký, napětí v minimech je nulové. Tato vlnododová metoda je často používanou v praxi, neboť je jednoduchá, poměrně rychlá a nenáročná na vybavení měřícího pracoviště. Nevýhodou může být potřeba většího množství vzorků měřeného materiálu. Tato metoda je použitelná pro měření pevných materiálů.

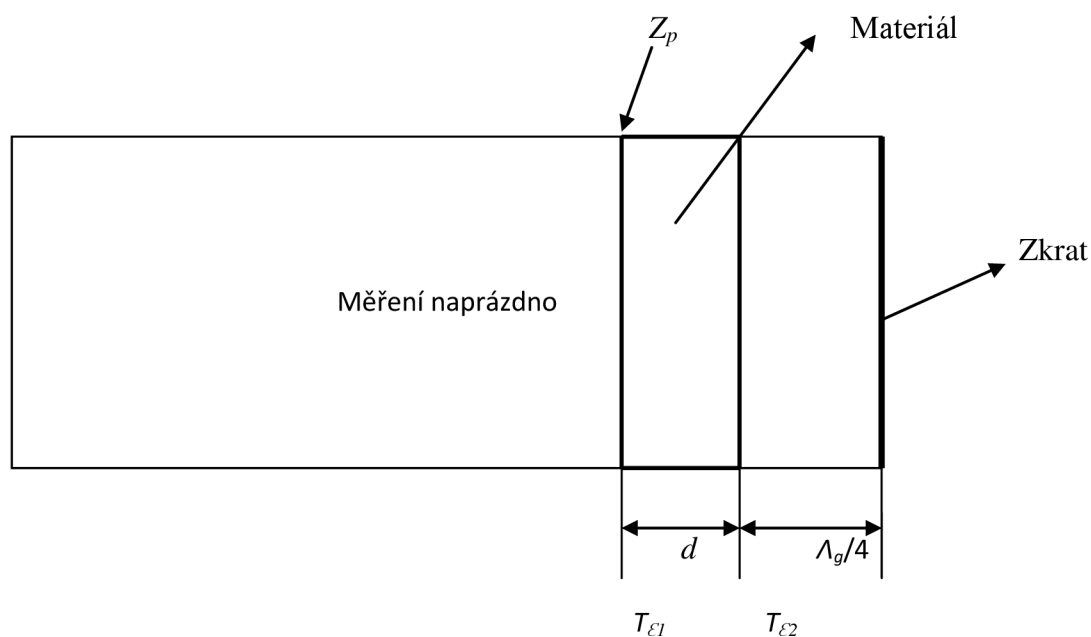
### 2.1.2 Určení komplexní permitivity a permeability ztrátových materiálů metodou nakrátko – naprázdno

U metody nakrátko – naprázdno se měří vstupní impedance vlnovodu, který je zaplněn měřeným materiálem. Jak napovídá už samotný název metody, jedná se o materiál ztrátový.

Měřený vzorek o délce  $d$  vložíme do vlnovodu, který na konci vzorku, v rovině  $T_{e2}$ , zkratujeme. Poté na druhém konci vzorku, v rovině  $T_{e1}$ , změříme vstupní impedanci  $Z_z$  (Obr. 2). Pak posuneme rovinu zkratu o  $\lambda_g/4$  od roviny  $T_{e2}$ . V rovině  $T_{e2}$  je nekonečně velká vstupní impedance, stav naprázdno, při níž naměříme vstupní impedanci  $Z_p$  v rovině  $T_{e1}$  (Obr. 3). Ze změřených hodnot impedancí  $Z_p$ ,  $Z_z$  a známých vlnových délek  $\lambda$  a  $\lambda_m$  se dá vypočítat  $\mathcal{E}$  a  $\mu$ . Tato metoda používá klasický způsob měření impedancí  $Z_p$  a  $Z_z$ . Vycházíme ze změřeného poměru stojatých vln, z něhož určíme hledané impedance (nejčastěji pomocí Smithova diagramu). Pouze v případě, že se jedná o materiál nízkoztrátový, kdy je hodnota poměru stojatých vln příliš velká, musí se využít výpočetních vztahů.



Obr. 2.2: Měření vstupní impedance vlnovodu zaplněného dielektrikem: nakrátko [2]

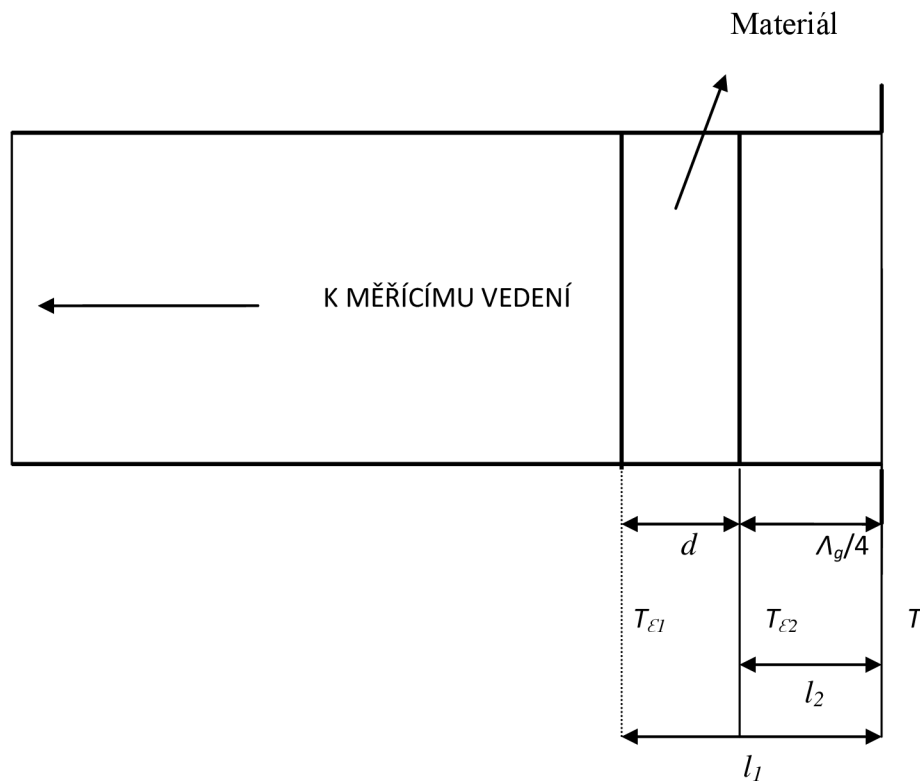


Obr. 2.3: Měření vstupní impedance vlnovodu zaplněného dielektrikem: naprázdno [2]

### 2.1.3 Určení komplexní permitivity a permeability metodou nezávislou na poloze vzorku

Tato metoda určování komplexní permitivity a permeability nevyžaduje přesnou polohu vzorku. Může totiž nastat situace, kdy vzorek je nepohyblivý, nelze přesunout nebo neznáme jeho polohu ve vlnovodu. Musí se tedy rozptylové koeficienty dvojbranu přepočítat z původních bran do jiných, libovolně zvolených. Máme tedy vlnovod, kdy uvnitř je v libovolné poloze umístěn vzorek o známé délce  $d$ . Zvolíme si tedy libovolnou rovinu  $T$ , nejlépe v rovině výstupní příruby daného vlnovodu, zde pak změříme rozptylové koeficienty  $s_{11}$ ,  $s_{22}$  a  $s_{12}$ . Poté vstupní rameno prodloužíme o úsek  $l_1$  z roviny  $T$  do roviny  $T_{\epsilon 1}$ . Výstupní rameno se naopak zkrátí o délku  $l_2 = l_1 - d$ . Tedy z roviny  $T$  se přesune do roviny  $T_{\epsilon 2}$ . Tato metoda se dá použít i v případě, že neznáme délku vzorku  $d$  měřeného materiálu, případně ji nemůžeme přesně změřit.





Obr. 2.4: Měření nezávislé na poloze vzorku [2]

## 2.2 Metody využívající dutinových rezonátorů

Při používání těchto metod se vkládá měřený vzorek do dutinového rezonátoru. Vlivem změn parametrů v prostředí dutinového rezonátoru dojde ke změnám rezonančního kmitočtu a činitele jakosti. Ze změny rezonančního kmitočtu pak můžeme určit  $\epsilon_r$  nebo  $\mu_r$ . Měřený materiál však může vyplňovat celou dutinu rezonátoru nebo pouze její část. Podle toho pak rozlišujeme dva způsoby měření permitivity případně permeability za pomoci dutinových rezonátorů.

Rezonátor zcela vyplněný dielektrickým materiálem

Rezonátor částečně vyplněný dielektrickým materiálem

### 2.2.1 Rezonátor zcela vyplněný dielektrickým materiálem

Tento způsob se výhradně používá pro nemagnetické dielektrické materiály, to zejména pro plyny a kapaliny. Jen v těchto případech, kdy je rezonátor zcela vyplněn kapalinou nebo plynem, lze v jistých mezích přeladovat. Jednou z nevýhod této metody je nutnost zaplnit celý objem dutiny měřeným materiálem. Druhou nevýhodou je to, že touto metodou lze měřit

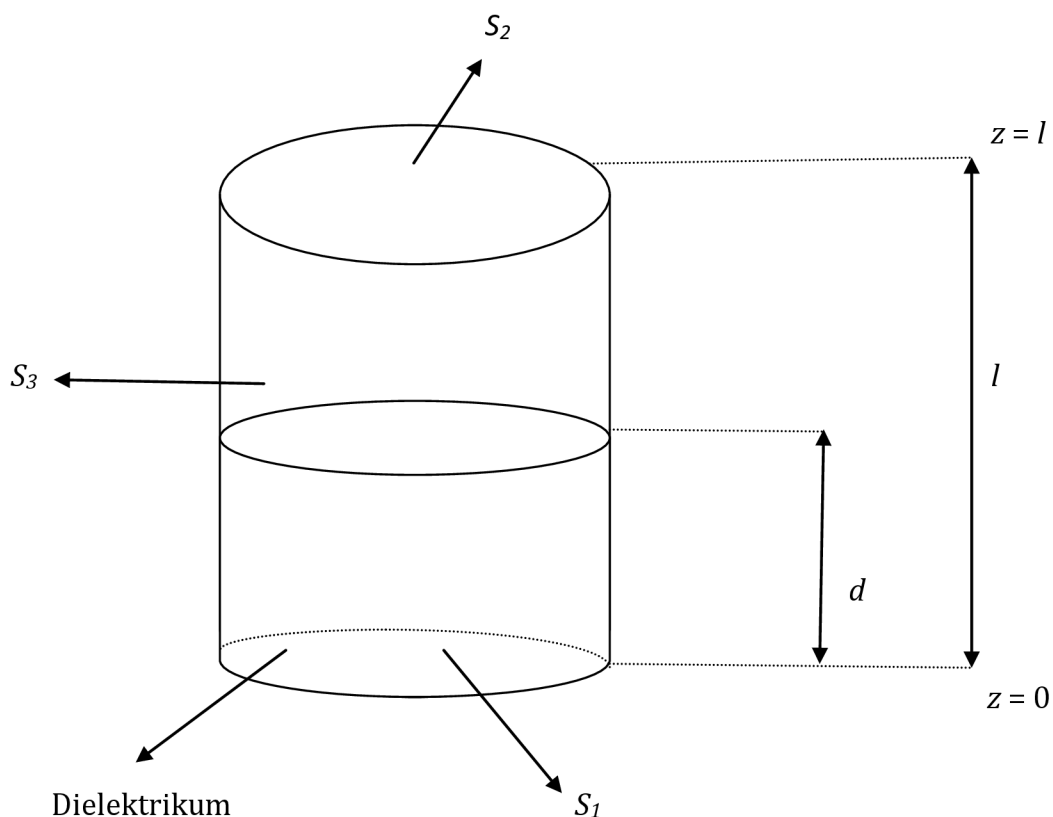
pouze látky s malou hodnotou  $\mathcal{E}_r$ , protože u látek s velkou  $\mathcal{E}_r$  by byla změna rezonančního kmitočtu příliš velká.

### 2.2.2 Rezonátor částečně vyplněný dielektrickým materiálem

Tato metoda se používá spíše pro měření látek kapalných nebo pevných. Pro ilustraci této metody můžeme uvažovat válcový rezonátor, na jehož dolní základně je umístěn vzorek dielektrika o délce  $d$  a to tak, že vyplňuje příčný průřez dutiny. Potom při určování reálné části relativní permitivity  $\mathcal{E}_r$  musíme postupovat jako u vlnododové metody, kdy se určují parametry bezeztrátových materiálů ze zkrácení vlnové délky. U této metody můžeme uvažovat dva případy. Prvním je postup, kdy prázdnou dutinu vyladíme do rezonance (kmitočt  $f_0$  a délka dutiny  $l_0$ ) a po vložení dielektrika neměníme její délku a rezonanci obnovíme změnou kmitočtu budícího signálu na hodnotu  $f_{0\epsilon}$ . Kmitočt  $f_{0\epsilon}$  musíme změřit buď jiným dutinovým či koaxiálním vlnoměrem, nebo rezonátorem, v němž měříme dielektrikum. V tomto případě po skončení celého měření vyjmeme vzorek z dutiny, dutinu vyladíme a určíme  $f_{0\epsilon}$ . [2]

Tímto způsobem, kdy rezonanci dutiny po vložení vzorku obnovujeme změnou kmitočtu signálu, neměníme velikost dutiny, z čehož plyne, že  $V = V_0$  a  $S = S_0$ . Druhý způsob měření spočívá v tom, že po vložení dielektrického vzorku při nezměněném kmitočtu signálu  $f_0$  doladíme dutinu do rezonance změnou její délky z  $l_0$  na  $l_{0\epsilon}$ . Jejich rozdíl  $\Delta = l_0 - l_{0\epsilon}$  můžeme přímo číst na stupnici mikrometrického šroubu ladícího pístu rezonátoru. [2]

Při tomto druhém způsobu je kmitočt signálu stejný  $\omega = \omega_0$ . Dutinu však doladíme změnou její délky. Potom  $V \neq V_0$  a  $S \neq S_0$ . Tato metoda, kdy je rezonátor pouze z části vyplněn dielektrickým materiálem se v praxi dost často používá, neboť poskytuje značně přesné výsledky. Zde byl jako příklad k vysvětlení této metody uveden případ, že měřený vzorek byl umístěn na dolní základně rezonátoru a vyplňoval celý příčný průřez dutiny. Tato poloha není podmínkou této metody, vzorek se může do dutiny umísťovat i jiným způsobem, kdy poté dojde pouze ke změně některých výpočetních vztahů.



Obr. 2.5: Rezonátor částečně vyplněný dielektrickým materiálem [2]

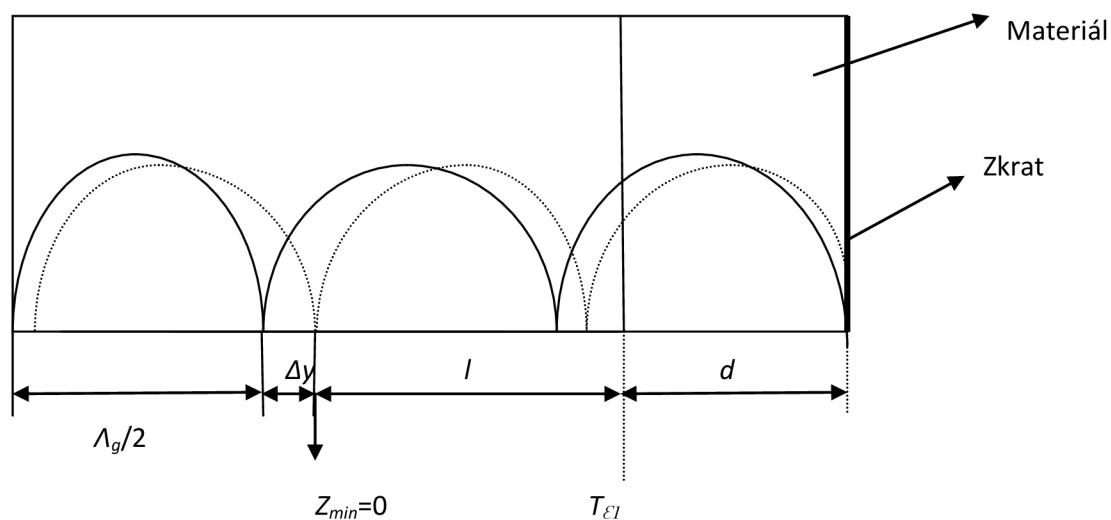
### 2.3 Metody měření ve volném prostoru

Tato metoda spočívá v tom, že volně umístěný materiál je ozařován signálem pomocí vhodného mikrovlnného zářiče, jako například trychtýřová anténa. Metoda měření ve volném prostoru poskytuje výhody hlavně na  $mm$  vlnách, kde se též hojně využívá. Na  $cm$  a  $dm$  vlnách se spíše používají metody využívající úseku vedení nebo vlnovodu a metody rezonátorové. V pásmech  $cm$  a  $dm$  vln, v případě že bychom chtěli použít metodu měření ve volném prostoru, museli bychom mít velké vzorky materiálů. Velké, přesně opracované desky však nejsou vždy k dispozici, proto se v těchto pásmech metoda měření ve volném prostoru nepoužívá.

### 3 Určení relativní permitivity pomocí vybraných dvou metod

#### 3.1 Určení parametrů bezeztrátových materiálů ze zkrácení vlnové délky

Jak bylo zmíněno už na začátku, při srovnání jednotlivých metod pro měření relativní permitivity, jedná se o metodu bezeztrátovou. Tato metoda není náročná na vybavení měřicího pracoviště, což je její velkou výhodou a proto se dost často využívá k zjišťování materiálových vlastností. Její nevýhodou je případ, kdy neznáme ani přibližnou hodnotu relativní permitivity, musíme provést více měření se vzorky odlišné tloušťky a je potřeba tedy více vzorků daného materiálu. To může být někdy problém, zejména pokud se jedná o nějaké dražší materiály. Používá se prakticky pouze k měření permitivity u pevných materiálů.



Obr. 3.1: Posun minima stojatých vln vlivem zkrácení vlnové délky v materiálu [2]

Vložení vzorku do materiálu dojde k posunu minim (uzlů) blíže ke zkratovanému konci. Dojde totiž ke zkrácení vlnové délky vlivem snížení fázové rychlosti (přerušovaná čára stojatých vln).

Základní výpočetní vztahy pro danou metodu:

Určení kritického kmitočtu [1]

$$f_m = \frac{c}{2 \times \pi} \cdot \sqrt{\left(\frac{m \cdot \pi}{a}\right)^2} \cdot \sqrt{\left(\frac{n \cdot \pi}{b}\right)^2} \quad (3.1.1)$$

$m, n$  značí vidová čísla, pro obdélníkový vlnovod je dominantním videm vid  $TE_{10}$

$a, b$  jsou rozměry vlnovodu

$c$  označuje rychlost světla

Mezní vlnová délka

$$\lambda_m = \frac{2 \cdot \pi}{\sqrt{\left(\frac{m \cdot \pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n \cdot \pi}{b}\right)^2}} \quad (3.1.2)$$

Délka vlny ve vlnovodu

$$\lambda_g = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_m}\right)^2}} \quad (3.1.3)$$

Vlnová délka

$$\Lambda = \frac{c}{f} \quad (3.1.4)$$

Konstanta šíření  $\gamma_\epsilon$  v prostředí zaplněném daným materiálem [2]

$$\gamma_\epsilon = \sqrt{\epsilon_r \cdot \mu_r - \left(\frac{\lambda}{\lambda_m}\right)^2} = j \cdot \beta_\epsilon = j \cdot \frac{2 \cdot \pi}{\lambda_g} \quad (3.1.5)$$

Konstanta šíření

$$\gamma = \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_m}\right)^2} = \gamma = j \cdot \beta = j \cdot \frac{2 \cdot \pi}{\lambda_g} \quad (3.1.6)$$

Charakteristická impedance vidů TE ve vlnovodu vyplněném vzduchem

$$Z_0 = \frac{\omega \cdot \mu_0}{\beta} \quad (3.1.7)$$

Měrný posun v rad/m

$$\beta = \frac{2 \cdot \pi}{\lambda_g} \quad (3.1.8)$$

Impedance v rovině  $T_{\epsilon 1}$  je dána výrazem [2]

$$Z_{\epsilon 1} = Z_{0\epsilon} \cdot \operatorname{tgh} \cdot \gamma_\epsilon \cdot d = j \cdot Z_0 \cdot \operatorname{tg} \cdot \beta_\epsilon \cdot d \quad (3.1.9)$$

Musí platit rovnost

$$Z_{0\epsilon} \cdot \operatorname{tg} \cdot \beta_\epsilon \cdot d = Z_0 \cdot \operatorname{tg} \cdot \beta \cdot (d + \Delta y) \quad (3.1.10a)$$

$d$  je tloušťka vzorku měřeného materiálu,  $\Delta y$  označuje posun minim

Měříme-li nemagnetický materiál  $\mu_r = 1$ , rovnice se nám zjednoduší a dostaneme

$$\frac{\text{tg. } \beta \epsilon \cdot d}{\beta \epsilon \cdot d} = \frac{\text{tg. } \beta \cdot (d + \Delta y)}{\beta \cdot d} \quad (3.1.10b)$$

$\beta_\epsilon$  se určí jako

$$\beta_\epsilon = \frac{1}{d_1} \cdot \arctg \left\{ \pm \sqrt{1 - 2 \cdot \frac{\text{tg. } \beta \cdot (d_1 + \Delta y_1)}{\text{tg. } \beta \cdot (2d_1 + \Delta y_2)}} \right\} \quad (3.1.11)$$

$d_1$  je tloušťka vzorku

$\Delta y_1$  posun minim při tloušťce vzorku  $d_1$

$\Delta y_2$  posun minim při tloušťce vzorku  $2d_1$

Charakteristická impedance vlnovodu zaplněného materiálem

$$Z_{o\epsilon} = \pm Z_o \cdot \frac{\text{tg. } \beta \cdot (d_1 + \Delta y_1)}{\sqrt{1 - 2 \cdot \frac{\text{tg. } \beta \cdot (d_1 + \Delta y_1)}{\text{tg. } \beta \cdot (2d_1 + \Delta y_2)}}} \quad (3.1.12)$$

Výsledná permitivita je dána vztahem

$$\epsilon_r = \frac{1}{\mu_r} \cdot \left( \frac{\gamma E}{\gamma} \right) \cdot \left[ 1 - \left( \frac{\lambda}{\lambda_m} \right)^2 + \left( \frac{\lambda}{\lambda_m} \right)^2 \right] \quad (3.1.13)$$

### Postup:

1) U této metody nejprve zkratujeme prázdný úsek vlnovodu (nejčastěji se jedná o obdélníkový vlnovod R100). Zkratováním konce vlnovodu docílíme toho, že uvnitř vznikne stojaté vlnění, které můžeme za pomoci selektivního milivoltmetru detekovat a tím zjistit polohu kmiten a uzlů. Nejdůležitější pro naše měření budou polohy uzlů.

2) Na konec vlnovodu umístíme vzorek měřeného materiálu (za rovno výstupní přírubou), konec vlnovodu je opět zkratovaný. Opět vznikne stojaté vlnění, znovu zjistíme polohy uzlů. Určíme rozdíl poloh uzlů  $\Delta y$ , když je ve vlnovodu vzorek a bez vzorku.

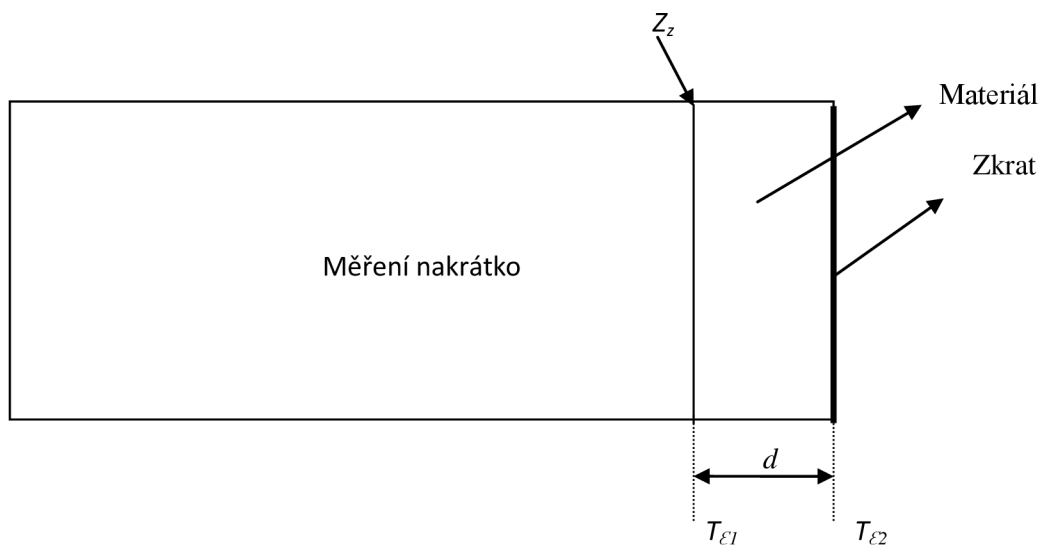
3) Poté vložíme na konec vlnovodu opět vzorek stejného materiálu, avšak dvojnásobné tloušťky a znovu určíme posun minim. V případě, že neznáme ani přibližnou hodnotu relativní permitivity, použijeme ještě třetí vzorek daného materiálu s odlišnou tloušťkou než v předchozích dvou případech a ověříme rovnost vztahu (3.1.10).

### Závěr:

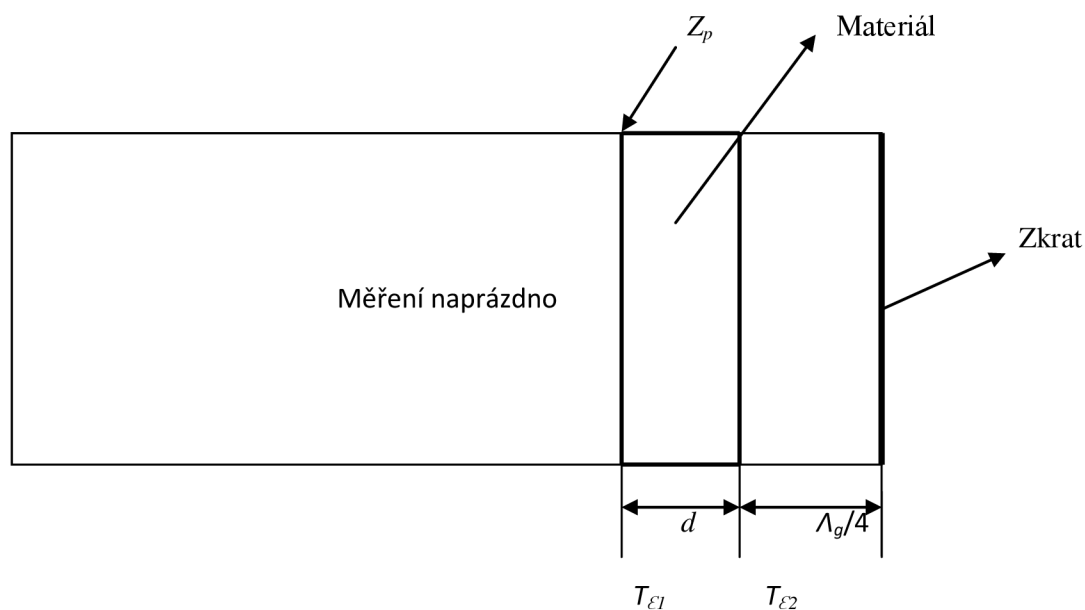
Vlnododová metoda určení parametrů materiálů ze zkrácení vlnové délky je bezztrátová metoda a prakticky použitelná pro měření pevných materiálů. Je to jedna ze snadnějších metod určení parametrů materiálů a není též náročná na vybavení měřícího pracoviště. Problém však může nastat, pokud neznáme ani přibližnou hodnotu relativní permitivity. V takovém případě musíme provést několik měření a je k tomu potřeba více vzorků měřeného materiálu, zpravidla s odlišnou tloušťkou.

### 3.2 Určení komplexní permitivity a permeability ztrátových materiálů metodou nakrátko – naprázdno

Tato metoda na rozdíl od předcházející je ztrátová, určena pro měření permitivity ztrátových materiálů. Ve výsledku relativní permitivity se objeví i imaginární (ztrátová) část. Opět je zde využito několik vztahů, které byly využity i u metody zkrácení vlnové délky (určení  $f_m$ ,  $\lambda_m$ ,  $\lambda_g$ ). Základem této metody je určení dvou impedancí, v rovině zkratu a v rovině při stavu nakrátko – naprázdno.



Obr. 3.2: Měření vstupní impedance vlnovodu zaplněného dielektrikem: nakrátko [2]



Obr. 3.3: Měření vstupní impedance vlnovodu zaplněného dielektrikem: naprázdno [2]

Základní výpočetní vztahy pro danou metodu:

Mezní kmitočet je dán vztahem [1]

$$f_m = \frac{c}{2 \times \pi} \cdot \sqrt{\left(\frac{m \times \pi}{a}\right)^2} \cdot \sqrt{\left(\frac{n \times \pi}{b}\right)^2} \quad (3.1.1)$$

Mezní vlnová délka se určí ze vztahu

$$\lambda_m = \frac{2 \cdot \pi}{\sqrt{\left(\frac{m \cdot \pi}{a}\right)^2} \cdot \sqrt{\left(\frac{n \cdot \pi}{b}\right)^2}} \quad (3.1.2)$$

Délka vlny ve vlnovodu

$$\lambda_g = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_m}\right)^2}} \quad (3.1.3)$$

Impedance v rovině zkratu (na krátko) [2]

$$Z_z = Z_{0\epsilon} \cdot \operatorname{tgh} \cdot \gamma_\epsilon \cdot d \quad (3.2.1)$$

Konstanta šíření v prostředí se vzorkem měřeného materiálu

$$\gamma_\epsilon = j \cdot \frac{2 \cdot \pi}{\lambda_g} \quad (3.2.2)$$

Impedance při posunutí vzorku o  $\lambda_g/4$  (na prázdko)



$$Z_p = \frac{Z_{0\epsilon}}{\operatorname{tgh} \gamma \epsilon \cdot d} \quad (3.2.3)$$

Charakteristická impedace vlnovodu zaplněného daným materiálem

$$Z_{0\epsilon} = \sqrt{Z_z \cdot Z_p} \quad (3.2.4)$$

Mezivýsledek použitý ve vztahu (3.2.10), A je komplexní číslo

$$A = \frac{\sqrt{Z_p} + \sqrt{Z_z}}{\sqrt{Z_p} - \sqrt{Z_z}} = |A| \cdot e^{j\Phi_A} \quad (3.2.5)$$

V případě velkého poměru stojatých vln se použijí vztahy pro určení impedance  $Z_z$

$$\operatorname{Re}[Z_z] = \frac{2 \cdot r}{r^2 + 1 - (r^2 - 1) \cdot \cos \varphi} \quad (3.2.6a)$$

$$\operatorname{Im}[Z_z] = \frac{2(r^2 - 1) \cdot \sin \varphi}{r^2 + 1 - (r^2 - 1) \cdot \cos \varphi} \quad (3.2.6b)$$

Podobně pro určení impedance  $Z_p$  výpočetní vztahy

$$\operatorname{Re}[Z_p] = \frac{2 \cdot r}{r^2 + 1 - (r^2 - 1) \cdot \cos \varphi} \quad (3.2.7a)$$

$$\operatorname{Im}[Z_p] = \frac{2(r^2 - 1) \cdot \sin \varphi}{r^2 + 1 - (r^2 - 1) \cdot \cos \varphi} \quad (3.2.7b)$$

Argument činitele odrazu

$$\varphi = 2\beta l_{\min} - (2n - 1)\pi \quad (3.2.8)$$

Činitel elektrických ztrát  $\operatorname{tg} \delta_E$  je definován podle vztahu (1.4) jako  $\operatorname{tg} \delta_E = \frac{\epsilon_r''}{\epsilon_r'}$

Určení výsledné permittivity:

V případě, že se jedná o nemagnetický materiál můžeme použít vztah [2]

$$\epsilon_r = \frac{1}{Z_z \cdot Z_p} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{\lambda}{\lambda_m} \right)^2 \right] + \left( \frac{\lambda}{\lambda_m} \right)^2 \quad (3.2.9)$$

Obecný vztah pro určení komplexní permittivity [2]

$$\epsilon_r = \frac{2 \cdot \beta \cdot d}{\sqrt{Z_z \cdot Z_p} \cdot (\Phi_A - j \ln |A|)} \cdot \left[ \left( \frac{\Phi_A - j \ln |A|}{2 \cdot \beta \cdot d} \right)^2 \left[ 1 - \left( \frac{\lambda}{\lambda_m} \right)^2 \right] + \left( \frac{\lambda}{\lambda_m} \right)^2 \right] \quad (3.2.10)$$

d označuje tloušťku vzorku,  $\beta$  je měrný posun v rad/m

Pro výpočet  $(\Phi_A - j \ln |A|)$  vycházíme ze vztahu (3.2.5)

### Postup:

1) V prvním kroku je tato metoda podobná metodě zkrácení vlnové délky. Měřený vzorek je vložen na konec vlnovodu, do roviny zkratu. Je určena hodnota poměru stojatých vln, ze které se následně určuje hodnota impedance v této rovině.

2) Měřený vzorek je ponechán ve stejné poloze, jako v předchozím případě, pouze rovina zkratu je vzdálena o  $\lambda_g/4$  od měřeného vzorku. Opět se změří poměr stojatých vln a z něj se poté určí impedance při stavu nakrátko – naprázdno.

### Závěr:

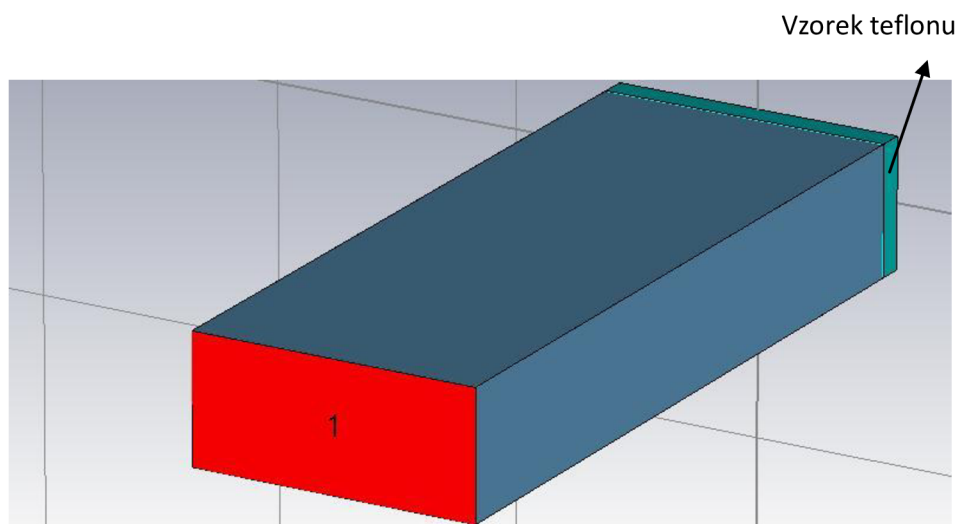
Už ze samotného názvu je patrné, že tato vlnododová metoda je ztrátová. To nám dokumentuje i výsledná relativní permitivita, u které nám oproti metodě ze zkrácení vlnové délky vyšla u permitivity i imaginární (ztrátová) část. Důležitou částí této metody je zjištění hodnot příslušných impedancí  $Z_z$  (při stavu nakrátko) a  $Z_p$  (při stavu naprázdno). Tyto hodnoty totiž figurují v základních vztazích pro tuto metodu, od kterých se potom odvíjí další výpočty až po výpočet samotné relativní permitivity.

## 4 Ověření a vyzkoušení metod v programu CST MICROWAVE STUDIO

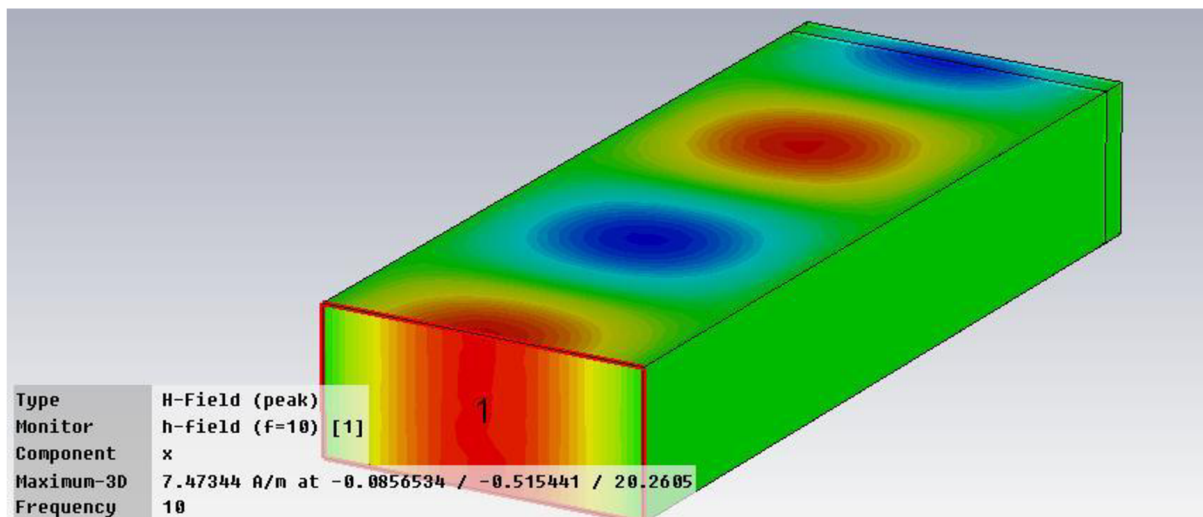
V této kapitole budou vyzkoušeny obě představené metody pro určení relativní permitivity. Pro simulace bude použit program CST MICROWAVE STUDIO. Pro simulaci metody určení permitivity ze zkrácení vlnové délky bude použit vzorek teflonu, jehož permitivita činí 2,1. Rozměry vzorku teflonu byly zvoleny  $a = 22,86 \text{ mm}$ ,  $b = 10,16 \text{ mm}$  a tloušťkou  $d = 2 \text{ mm}$ . Metodu nakrátko – naprázdno bude odsimulován vzorek polystyrenu s rozměry  $a = 22,86 \text{ mm}$ ,  $b = 10,16 \text{ mm}$  a tloušťkou  $d = 2 \text{ mm}$ , jehož permitivita je 2,6 a pro ověření imaginární (ztrátové) části bude zvolen činitel elektrických ztrát  $tg\delta = 0,4$ .

### 4.1 Určení parametrů bezztrátových materiálů ze zkrácení vlnové délky

Tato metoda byla popsána v kapitole 3. Zde bude simulací v programu CST MICROWAVE STUDIO ověřena její funkčnost. Byl zvolen vzorek teflonu, který byl vložen do obdélníkového vlnovodu R100, byla provedena simulace celé této metody, ze které se určila výsledná permitivita teflonu.



Obr. 4.1: Vlnovod se vzorkem teflonu



Obr. 4.2: Rozložení vidů v obdélníkovém vlnovodu

U této metody nám program CST MICROWAVE STUDIO napomohl určit posuvy minim stojatých vln, při posouvání jednotlivých vzorků materiálu, které se lišili svojí tloušťkou. Následně společně s dalšími hodnotami byly tyto údaje implementovány do matlabovského skriptu pro výpočet permitivity daného materiálu. Při tloušťce teflonového vzorku  $d = 2 \text{ mm}$  byl posuv minim stojatých vln  $y_1 = 1,5 \text{ mm}$ . Při tloušťce teflonového vzorku  $d = 4 \text{ mm}$  byl posuv  $y_2 = 2,75 \text{ mm}$ .

### Skript pro výpočet permitivity v Matlabu:

```
d=0.002; %tloušťka vzorku
fzvol=10e+9; %zvolená frekvence
mi0=1.2566e-6; %permeabilita vakua
mir= 1; %relativní permeabilita
a=0.02286; %strana a vlnovodu R100
y1=0.0015; %posuv minima,při tloušťce vzorku d=2mm
y2=0.00275; %posuv minima,při tloušťce vzorku d=4mm
lambdag= 0.03976 ; %délka vlny ve vlnovodu, (3.1.3)
c=3*10^8; %rychlost světla
lambda=c/fzvol %vlnová délka
lambdam=2*a; %mezní vlnová délka

beta=(2*pi)/(lambdag) % (3.1.8)
a=tan(beta*(d+y1)); %pomocná proměnná pro výpočet
b=tan(beta*(2*d+y2)); %pomocná proměnná pro výpočet

betaE=(1/d)*atan(sqrt(1-2*(a/b))) %výpočet betaE, (3.1.11)
pom=1-(lambda/lambdam)^2 %pomocná proměnná pro výpočet
pom2=(lambda/lambdam)^2 %pomocná proměnná pro výpočet

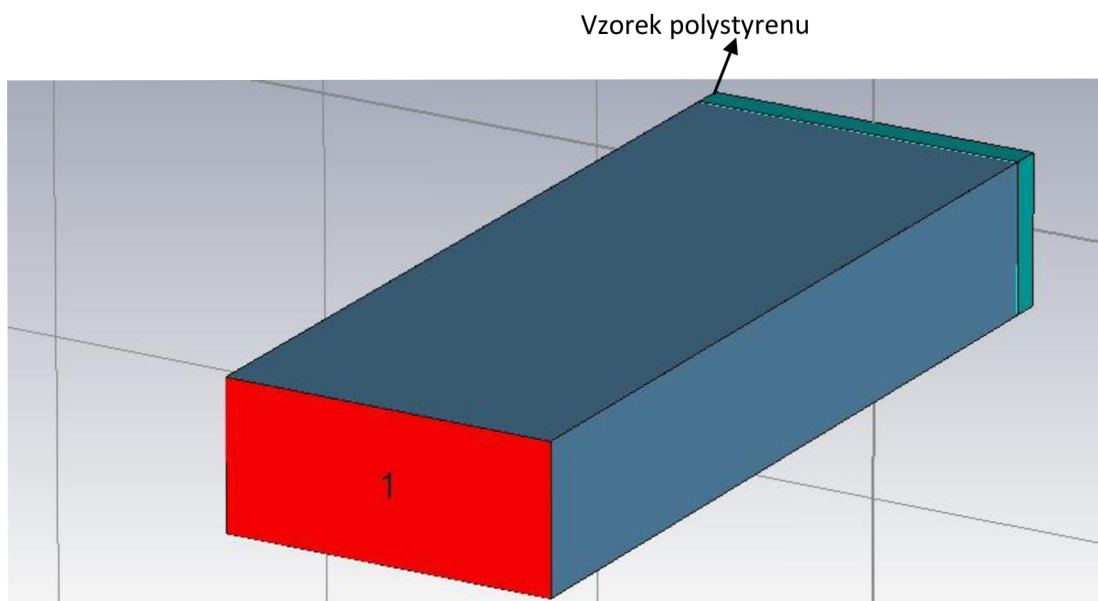
eps=(1/mir)*[ ((betaE/beta)^2)*(pom)+(pom) ]
%permitivita, (3.1.13)
%gamae=j*betae
%gama=j*beta
```

Výsledek je:  $\epsilon = \underline{2.0757}$

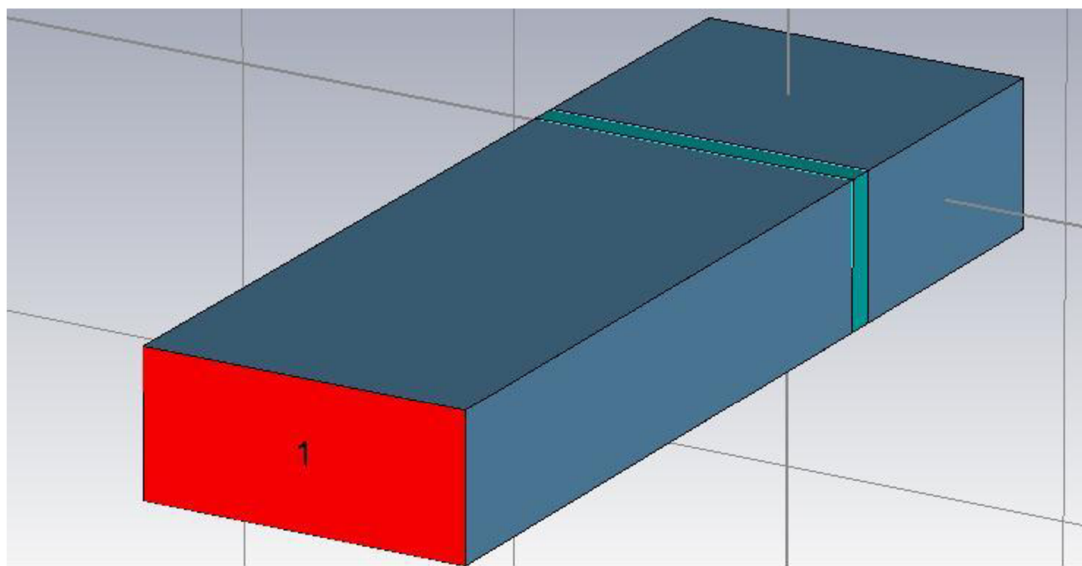
Výsledná relativní permitivita určená ze simulací je velmi blízká původní hodnotě materiálu, tj. 2,1. Vzniklá chyba je poměrně malá (menší než 1,5 %) a je pravděpodobně způsobena konečnou přesností vypočtených hodnot v programu CST Microwave Studio.

#### 4.2 Určení komplexní permitivity a permeability ztrátových materiálů metodou nakrátko – naprázdno

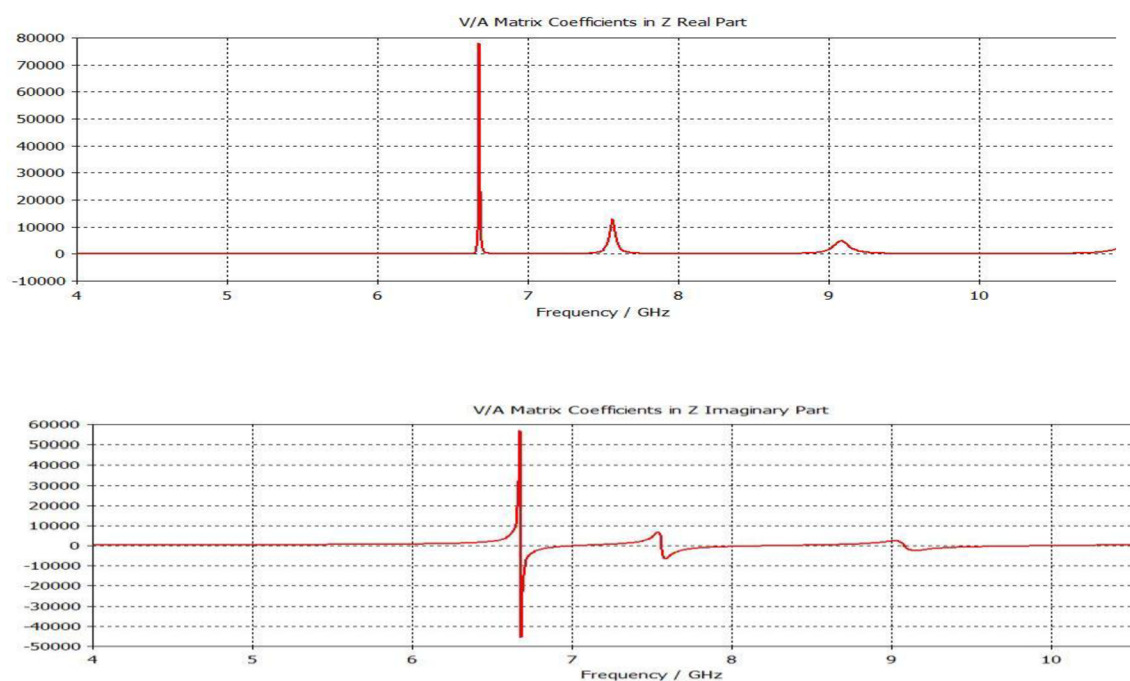
Touto metodou byl zkoumán vzorek polystyrenu s rozměry  $a = 22,86 \text{ mm}$ ,  $b = 10,16 \text{ mm}$  a tloušťkou  $d = 2 \text{ mm}$ . Relativní permitivita činila 2,6. Hodnota činitele elektrických ztrát  $\text{tg}\delta$  byla zvolena 0,4.



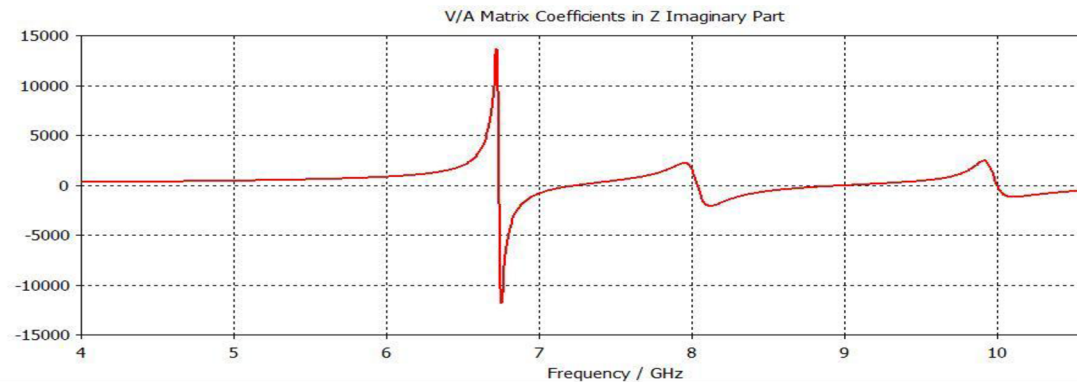
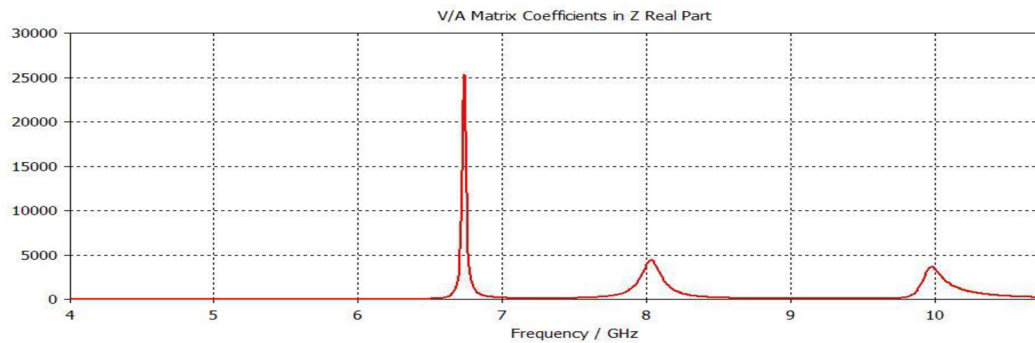
Obr. 4.3: Vzorek polystyrenu v počátku



Obr. 4.4: Posunutý vzorek polystyrenu



Obr. 4.5: Určení impedance  $Z_z$



Obr. 4.6: Určení impedance  $Z_p$

U této metody nakrátko – naprázdno jsme za pomoci programu CST MICROWAVE STUDIO určili impedanci při měření nakrátko  $Z_z$  (Obr. 13) a impedanci při měření naprázdno  $Z_p$  (Obr. 14). Následně byly tyto hodnoty společně s dalšími mezivýsledky implementovány do vzorců uvedených v kapitole 3 a za pomoci matlabovského skriptu byla určena výsledná permitivita materiálu. U této metody lze tedy z komplexních impedancí  $Z_z$  a  $Z_p$  a ze známé tloušťky vzorku  $d$ , vlnových délek  $\lambda$ ,  $\lambda_m$  určit výslednou relativní permitivitu.

### Skript pro výpočet permitivity v Matlabu:

```
d= 0.002; %tloušťka vzorku
lambdag= 0.03976 ; %délka vlny ve vlnovodu, (3.1.3)
mi=1.2566e-6; %permeabilita vakua
mir= 1; %relativní permeabilita
fzvol=10e+9; %zvolená frekvence
beta=(2*pi)/(lambdag); %, (3.1.8)
lambda= 0.03; %vlnová délka, (3.1.4)
lambdam= 0.04572; %mezní vlnová délka, (3.1.2)
epsil= 8.85e-12; %permitivita vakua
Zz = 0.35 - 0.6i; %impedance při měření nakrátko
Zp = 0.035 + 0.35i; %impedance při měření naprázdno

epsilon_r1 =
(1/(Zz*Zp)) * [1(lambda/lambdam)^2] + (lambda/lambdam)^2
%pro nemagnetický dielektrický materiál, je
permitivita dána vztahem (3.2.6)
```

Výsledná hodnota permitivity je :  $\epsilon_{r1} = \underline{2.55 - 0.97i}$

$$\text{tg}\delta_{\epsilon} = \frac{0.97}{2.55} = 0.38 \quad \text{\%činitel elektrických ztrát, (1.4)}$$

Rovněž i v tomto případě jsou původní hodnoty parametrů popisující analyzovaný materiál velmi blízké vypočteným hodnotám.



## 5 Návrh měřicího pracoviště

Principiální schéma zapojení pracoviště je na obr. 15. Zapojení bude pro obě metody stejné. Uvnitř vlnovodové linky je zabudována sonda, která snímá rozložení pole ve vlnovodu, rezonátor a detektor. Detektorem je převedeno vysokofrekvenční napětí indukované v sondě na napětí stejnosměrné. Při posouvání vozíku se sondou se podle intenzity pole v místě sondy mění výstupní napětí detektoru. Mezi měřicí linkou a generátorem jsou dva atenuátory. První (nejblíže generátoru) je neproměnný atenuátor, slouží jako ochrana generátoru), druhý v pořadí je proměnný atenuátor, můžeme měnit jeho útlum. Tím se dají najít polohy kmiten a uzlů stojatého vlnění, měřidlem na lince se určí jejich poloha a z výchylky měřidla detektoru se určí poměr stojatých vln. Při zakončení vlnovodu zkratem je činitel odrazu  $\rho_z = -1$ . První uzel je v místě zkratu a další se opakují po  $\lambda_g/2$ . Intenzita elektrického pole  $E$  je nulová a poměr stojatých vln jde k nekonečnu. Modul činitele odrazu se určí ze změřeného poměru stojatých vln.

Poměr stojatých vln [3]

$$\sigma = \frac{|U_{\max}|}{|U_{\min}|} \quad (5.2)$$

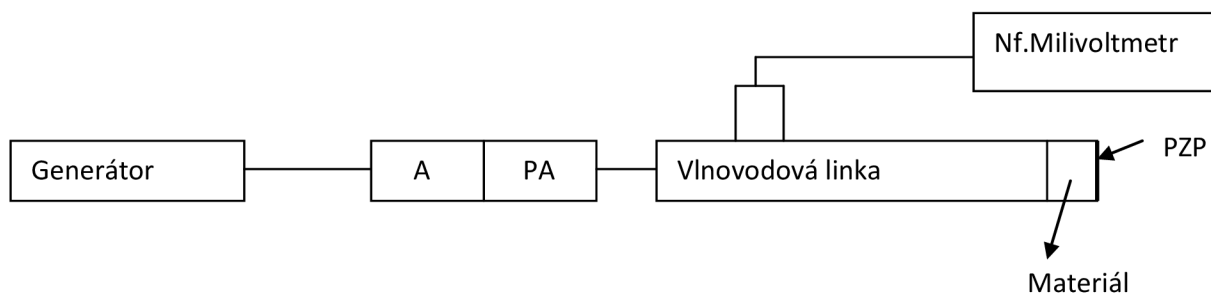
Činitel odrazu

$$|\rho_z| = \frac{\sigma z - 1}{\sigma z + 1} \quad (5.1)$$

Fáze je úměrná posunutí uzlů proti jejich polohám na lince zakončené zkratem

$$\phi = \pi + 4 \cdot \pi \cdot x_m / \lambda_g \quad (5.3)$$

Aby se měřené napětí dalo detekovat nf. milivoltmetrem, musí být signál generovaný mikrovlnným generátorem amplitudově modulovaný. Hloubka modulace však může být zvolena libovolně, na přesnost měření nemá vliv. Poté co určíme činitel odrazu nebo poměr stojatých vln, můžeme určit impedanci. U metody nakrátko – naprázdno je určení impedancí  $Z_z$  a  $Z_p$  stěžejní částí celého postupu. U metody ze zkrácení vlnové délky je kromě vlnové délky a mezní vlnové délky důležité též určit posun minim, vlivem vložení vzorku materiálu do měřicího vedení. Dále pak můžeme postupovat podle vztahů uvedených u jednotlivých metod a dopočítávat potřebné veličiny pro určení výsledné permitivity materiálů.



Obr. 5.1 Schéma zapojení pracoviště [3]

A....atenuátor (zajišťuje ochranu generátoru, jeho hodnota útlumu nesmí být snižována pod bezpečnou mez, nelze měnit jeho hodnotu)

PA...proměnný atenuátor (můžeme měnit útlum, aniž bychom nějak ohrozili generátor)

PZP..posuvný zkratovací píst

Návod k laboratorní úloze a k obsluze celého pracoviště je uveden v příloze této práce. Sestavení a konstrukce této úlohy vychází z toho, že bude potřeba určovat polohy minim (uzlů) stojatého vlnění a bude též potřeba určit poměr stojatých vln, ze kterého se bude vycházet pro určování impedancí. Pracoviště je složeno z generátoru, selektivního milivoltmetru, dvou atenuátorů, přičemž první z nich (blíže ke generátoru) slouží pouze jako ochrana generátoru a druhým ovlivňujeme amplitudu měřené vlny, nazývá se proměnný atenuátor. Dále je k nim připojena vlnododová linka se sondou a měřidlem, s jejichž pomocí detekujeme stojaté vlnění a určujeme polohy jednotlivých částí stojaté vlny.

## 5.1 Praktická realizace měřícího pracoviště

Pracoviště bylo realizováno ve školní laboratoři. Skládá se z generátoru, dvou atenuátorů a vlnododové měřící linky s pohyblivou sondou, viz Obrázek 15. Funkčnost celého pracoviště je popsána výše v kapitole 5. Základní myšlenka sestavení pracoviště vycházela z pracoviště pro určení činitele odrazu a poměru stojatých vln, což je základem pro zmiňované metody určení vlastností materiálů. Ze změřeného poměru stojatých vln se totiž počítají impedance, které jsou důležité pro určení permitivity metodou nakrátko - naprázdno. Nedílnou součástí je rovněž měřící vlnododová linka s pohyblivou sondou, s jejíž pomocí se dají určit polohy minim (uzlů). Tyto údaje jsou též důležité při určování výsledné permitivity materiálů. Drobnou úpravou bylo přidání posuvného zkratovacího pístu, kde se vkládaly měřené vzorky materiálů. Rovněž byl změněn proměnný atenuátor, bylo potřeba totiž u nízkoztrátových

materiálu měřit přesně poměr stojatých vln, který byl totiž dost vysoký. Pro praktické ověření zmíněných dvou metod byl zvolen vzorek FR4-ky.

### 1) Určení parametrů FR4-ky ze zkrácení vlnové délky

Tabulka 5.1: FR4 zkrácení vlnové délky:

vzorek	d [mm]	2d [mm]	$\Delta y_1$ [mm]	$\Delta y_2$ [mm]	$\epsilon_r$
Fr4	3,2	6,4	5,3	17	4,25

Nejdříve určíme vlnovou délku

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8}{10 \cdot 10^9} = 0.03 \text{ m}$$

Délku vlny ve vlnovodu určíme jako dvojnásobek vzdálenosti dvou minim

$$\lambda_g = 39,8 \text{ mm}$$

Mezní vlnová délka je rovna dvojnásobku většímu z příčných rozměrů vlnovodu R 100

$$\lambda_m = 2a = 2 \cdot 0.02286 = 0.04572 \text{ m}$$

$$\beta_\epsilon = \frac{1}{d_1} \cdot \arctg \left\{ \pm \sqrt{1 - 2 \cdot \frac{\text{tg.}\beta \cdot (d_1 + \Delta y_1)}{\text{tg.}\beta \cdot (2d_1 + \Delta y_2)}} \right\} = \frac{1}{0.00304} \cdot \arctg \left\{ \pm \sqrt{1 - 2 \cdot \frac{\text{tg.}158 \cdot (0.0032 + 0.0053)}{\text{tg.}158 \cdot (2 \cdot 0.0032 + 0.017)}} \right\} = 409 \text{ m}^{-1}$$

$$\gamma_\epsilon = j \cdot \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \sqrt{\epsilon_r \cdot \mu_r - \left(\frac{\lambda}{\lambda_m}\right)^2} = j \cdot \beta_\epsilon = j \cdot \frac{2\pi}{\lambda_g} = j \cdot 409$$

$$\gamma = j \cdot \beta = j \cdot \frac{2\pi}{\lambda_g} = j \cdot 157,87$$

Nyní máme všechny potřebné hodnoty pro určení výsledné permitivity, stačí tyto vypočtené hodnoty dosadit do vztahu (3.1.13)

$$\epsilon_r = \frac{1}{\mu_r} \cdot \left(\frac{\gamma E}{\gamma}\right) \cdot \left[1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_m}\right)^2 + \left(\frac{\lambda}{\lambda_m}\right)^2\right] = \frac{1}{1} \cdot \left(\frac{409, i}{158, i}\right) \cdot \left[1 - \left(\frac{0.03}{0.04572}\right)^2 + \left(\frac{0.03}{0.04572}\right)^2\right] = 4.25$$

Permitivita nám vyšla o něco málo větší, což je způsobeno zřejmě zaokrouhlováním mezivýsledků.

## 2) Určení komplexní permitivity a permeability FR4 - ky metodou nakrátko – naprázdno

Tabulka 5.2: FR4 nakrátko - naprázdno:

vzorek	tloušťka[mm]	PSV $Z_z$	Impedance $Z_z [\Omega]$	PSV $Z_p$	Impedance $Z_p [\Omega]$	permitivita
Fr4	6,15	7,57	0,196-0,69i	26,88	0,04+0,22i	3,96 – 0,3i

Tloušťka vzorku FR4 – ky

$$d = 0,00615 \text{ m}$$

$$\text{PSV} = 10^{\Delta L[\text{dB}]/20}$$

$$\text{PSV} = 10^{17.58 \text{ dB}/20} = 7,57$$

$$\text{PSV} = 10^{28.59 \text{ dB}/20} = 26,88$$

$$\text{Re}[Z_z] = \frac{2 \cdot r}{r^2 + 1 - (r^2 - 1) \cdot \cos \varphi} = \frac{2 \cdot 7,57}{7,57^2 + 1 - (7,57^2 - 1) \cdot \cos(-1,91)} = 0,196$$

$$\text{Im}[Z_z] = \frac{2(r^2 - 1) \cdot \sin \varphi}{r^2 + 1 - (r^2 - 1) \cdot \cos \varphi} = \frac{2 \cdot (7,57^2 - 1) \cdot \sin(-1,91)}{7,57^2 + 1 - (7,57^2 - 1) \cdot \cos(-1,91)} = -0,69$$

$$\text{Re}[Z_p] = \frac{2 \cdot r}{r^2 + 1 - (r^2 - 1) \cdot \cos \varphi} = \frac{2 \cdot 26,88}{26,88^2 + 1 - (26,88^2 - 1) \cdot \cos(2,7)} = 0,04$$

$$\text{Im}[Z_p] = \frac{2(r^2 - 1) \cdot \sin \varphi}{r^2 + 1 - (r^2 - 1) \cdot \cos \varphi} = \frac{2 \cdot (26,88^2 - 1) \cdot \sin(2,7)}{26,88^2 + 1 - (26,88^2 - 1) \cdot \cos(2,7)} = 0,22$$

$$\varphi = 2\beta l_{\text{min}} - (2 \cdot n - 1) \cdot \pi$$

$$\varphi = 2 \frac{2\pi}{\lambda_g} \cdot 0,0039 - (2 \cdot 1 - 1) \cdot \pi = -1,91$$

$$\varphi = 2 \frac{2\pi}{\lambda_g} \cdot 0,0185 - (2 \cdot 1 - 1) \cdot \pi = 2,7$$

Pro určení výsledné permittivity můžeme použít ještě jeden vztah, při  $\mu_r = 1$  a dosazením do vztahu (3.1.13) dostaneme výraz

$$\epsilon_r = \frac{1}{Z_z \cdot Z_p} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{\lambda}{\lambda_m} \right)^2 \right] + \left( \frac{\lambda}{\lambda_m} \right)^2$$

$$\epsilon_r = \frac{1}{(0,196-0,69i) \cdot (0,04+0,22i)} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{0,03}{0,0457} \right)^2 \right] + \left( \frac{0,03}{0,0457} \right)^2$$

$$\epsilon_r = \underline{\underline{3.9642 - 0.3435i}}$$

Problematickou částí celého měření byla zejména metoda nakrátko – naprázdno, kde bylo důležité zjištění poměru stojatých vln, k tomu bylo nakonec zapotřebí hodně přesného atenuátoru. Ze změřeného poměru stojatých vln vycházíme při určování impedancí a tudíž je potřeba přesně určit jeho hodnotu. Z toho plyne nutnost používat atenuátory, kterými lze přesně určit i velké hodnoty PSV. Jedná se zejména případy, kdy vzorek měřeného materiálu je nízkoztrátový. Další možností udělat nějakou chybu bylo při posouvání vzorku o vzdálenost  $\lambda g/4$ . Samotný vzorek je totiž stále ve stejné poloze, posouvá se pouze zkratovaný konec. Toho je docíleno použitím posuvného zkratovacího pístu.

## 6 Závěr

Předmětem této práce bylo zkoumat dvě metody měření relativní permitivity různých materiálů. Jednalo se o metodu určení permitivity ze zkrácení vlnové délky a metodu určení permitivity při stavu nakrátko – naprázdno. Nejdříve byly vybrané dvě metody odsimulovány softwarově pomocí programu CST MICROWAVE STUDIO a poté provedeny též prakticky, kdy za pomoci představeného pracoviště jimi byly proměřeny vzorky FR4-ky a dřeva. Pomocí simulací byla ověřena permitivita vzorku teflonu a vzorku polystyrenu, přičemž byla zároveň ověřena funkčnost obou metod. Metodou určení parametrů bezztrátových materiálů ze zkrácení vlnové délky byla ověřena hodnota relativní permitivity teflonového vzorku, jemuž odpovídá hodnota  $\epsilon_r = 2,1$ . Metodou určení komplexní permitivity a permeability ztrátových materiálů, metoda nakrátko – naprázdno, byl ověřen výpočet relativní permitivity vzorku polystyren, jemuž odpovídá hodnota  $\epsilon_r = 2,55 - 0,97i$ . Zde je vidět, že se ve výsledku objevila i imaginární (ztrátová část) relativní permitivity. To potvrzuje, že tato metoda je vhodná pro měření permitivity ztrátových materiálů. Výpočty byly ověřeny hodnoty relativní permitivity vzorků, zadané do programu CST MICROWAVE STUDIO, drobné odchylky na pozicích desetinných míst byly způsobeny zřejmě zaokrouhlováním jednotlivých mezivýsledků. Např. pro vzorek teflonu byla vypočtena hodnota  $\epsilon_r = 2.0757$ . Druhou částí práce bylo využití těchto metod v praxi. Cílem bylo zejména ověřit, jak skutečně tyto dvě metody fungují a vyloučit všechny možné nepřesnosti, které by se mohli během jejich realizace objevit. Byly měřeny vzorky FR4-ky a dřeva. FR4 – ka je materiál nízkoztrátový, hodnota poměru stojatých vln totiž vychází hodně velká. Z toho plyne, že pro určení impedancí nemůžeme využít Smithova diagramu, ale musíme použít výpočetní vztahy. Výsledná permitivita FR4-ky vyšla touto metodou  $\epsilon_r = 3.96 - 0.34i$ . U metody zkrácení vlnové délky můžeme vycházet z předpokladu, že známe alespoň přibližnou hodnotu relativní permitivity, poté můžeme podle ní určit hodnotu  $\beta_c$ , která musí vyhovovat rovnosti (3.1.10B), pro určení rovnosti můžeme využít tabulku hodnot funkce  $\text{tg}X/X$ . V případě, že neznáme ani přibližnou hodnotu relativní permitivity, provedeme ještě jedno měření se vzorkem o dvojnásobné tloušťce  $d$ . Poté z posunů minim, ke kterým došlo vložním vzorku do měřicího vedení a z hodnot vlnové délky  $\lambda$  a mezní vlnové délky  $\lambda_m$  můžeme dospět k výsledné permitivitě daného materiálu. Touto metodou byla určena výsledná permitivita  $\epsilon_r = 4,25$ . Pro ověření imaginární můžeme vypočítat ztrátový činitel, který stejně jako permitivita charakterizuje jednotlivé materiály.

Vzniklé odchylky ve výsledné permitivitě mohou být způsobeny nedokonalým zkratem u posuvného pístu a nastavení referenční roviny pístu. Nicméně zas až tak velký vliv na výslednou permitivitu to nemá. Většinou chyba bývá způsobena nedokonalým tvarem vzorku, zejména je důležitá přesnost příčného rozměru vzorku, jinak vzniká při měření výrazná chyba a výsledná permitivita se poté dost podstatně liší od skutečné permitivity vzorku.

Další částí této práce bylo vypracování návodu k této úloze (uvedeným dvěma metodám). Samotný návod obsahuje základní představení metod a stručné seznámení se s nimi. Poté je v něm popsáno, jak postupovat při realizaci těchto metod, když budeme zjišťovat relativní permitivitu nějakého vzorku měřeného materiálu. Nechybí v něm ani návod k obsluze generátoru.

# Literatura

[1] HANUS,S.,SVAČINA,J.,Vysokofrekvenční a mikrovlnná technika.Elektronické skriptum.Brno:FEKTVUT v Brně,2002

[2] SVAČINA,J.,RŮŽIČKA,V.,PUNČOCHÁŘ,J.,Teorie obvodů V a technika velmi krátkých vln – Laboratorní cvičení.Skriptum FEVUT v Brně,1980,str.198,199

[3] Raida,Z.,Elektromagnetické vedení,vlny a antény – návod pro laboratorní cvičení Měření na vlnovodné lince, <http://www.urel.feec.vutbr.cz/~raida/beva>



## Seznam symbolů, veličin a zkratk

$f$	zvolená frekvence
$d$	tloušťka vzorku
$Z_{0E}$	charakteristická impedance pro dané prostředí
$\epsilon$	permitivita
$\epsilon_r$	relativní permitivita
$\epsilon_0$	permitivita vakua
$\mu$	permeabilita
$\mu_r$	relativní permeabilita
$\mu_0$	permeabilita vakua
tgh	funkce hyperbolický tangens
$\beta$	vlnové číslo
$Z_z$	impedance v rovině zkratu(stav nakrátko)
$Z_p$	impedance při stavu naprázdno
$\Delta y_1$	posunutí minima stojatých vln
$\Delta y_2$	posunutí minima stojatých vln
$\Lambda$	délka vlny
$\Lambda_g$	délka vlny ve vlnovodu
$\gamma$	konstanta šíření v příčném směru
$\gamma_\epsilon$	konstanta šíření v příčném směru u zvoleného materiálu
tzv.	takzvaný

Obr.	obrázek
D	elektrická indukce
E	intenzita elektrického pole
$\text{tg}\delta_{\text{E}}$	činitel elektrických ztrát
$\text{tg}\delta_{\text{H}}$	činitel magnetických ztrát
nf	nízkofrekvenční
A	atenuátor
PA	proměnný atenuátor
PZP	posuvný zkratovací píst
Např	například
$\varphi$	Argument činitele odrazu
r	poměr stojatých vln
PSV	poměr stojatých vln
tj.	to je

## Seznam příloh

<b>A</b> Měření permitivity materiálů v mikrovlnném pásmu – návod k laboratorní úloze.....	36
<b>B</b> Měření permitivity materiálů v mikrovlnném pásmu – vzorový protokol.....	44
<b>C</b> Měření permitivity materiálů v mikrovlnném pásmu – šablona vzorového protokolu.....	48

# A Měření permitivity materiálů v mikrovlnném pásmu – návod k laboratorní úloze

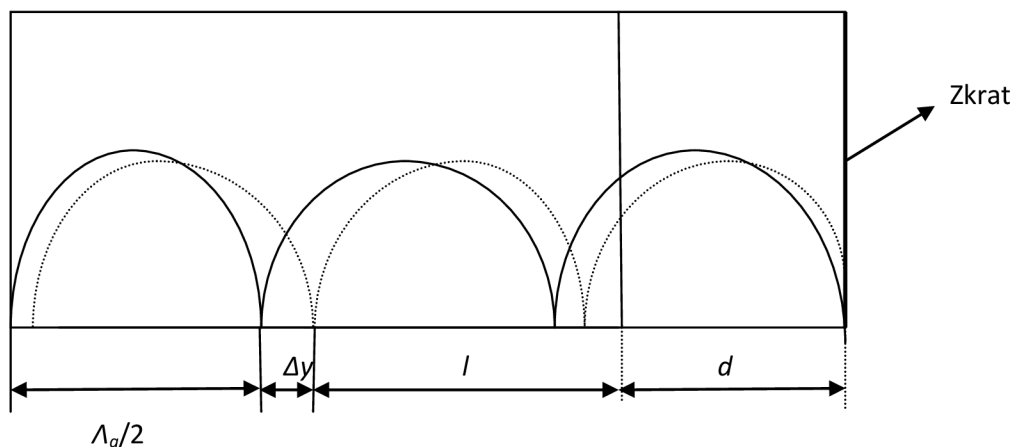
## Teoretický úvod

Určení parametrů bezztrátových materiálů ze zkrácení vlnové délky

Při této metodě nejprve zkratujeme prázdný úsek vlnovodu, tím nám vznikne uvnitř stojaté vlnění, polohu minima stojatých vln můžeme zjistit pomocí měřícího vedení. Poté do vlnovodu vložíme vzorek o známé délce  $d$ . Předpokladem této metody však je, že vložený vzorek musí být z materiálu, který je bezztrátový (nízkoztrátový). Po vložení vzorku se zmenší fázová rychlost šíření vlny ve vzorku a délka vlny vzorku se zkrátí. Poměr stojatých vln je nekonečně velký, napětí v minimech je nulové. Tato vlnododová metoda je často používanou v praxi, neboť je jednoduchá, poměrně rychlá a nenáročná na vybavení měřícího pracoviště. Nevýhodou může být potřeba většího množství vzorků měřeného materiálu. Tato metoda je použitelná pro měření pevných materiálů. Nejdůležitější částí této metody je určení posunu minim  $\Delta y$ .  $\Delta y$  značí vzdálenost mezi minimem stojaté vlny vzniklé při zkratování prázdného konce vlnovodu a minimem vzniklým při zkratovaném konci vlnovodu s měřeným vzorkem materiálu.

Základní výpočetní vztahy pro danou metodu:

Délku vlny ve vlnovodu určíme jako dvojnásobnou vzdálenost dvou minim (uzlů), nebo podle vztahu:



Obr. 1 Určení vlnové délky  $\lambda_g$

$$\lambda_g = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_m}\right)^2}} \quad (1)$$

kde vlnová délka se rovná

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad \text{a mezní vlnová délka}$$

$$\lambda_m = 2a \quad , \text{ kde } a \text{ představuje větší z příčných rozměrů vlnovodu} \quad (2)$$

činitel odrazu je definován

$$|\rho_z| = \frac{\sigma_z - 1}{\sigma_z + 1} \quad \sigma_z \text{ je poměr stojatých vln} \quad (3)$$

Konstanta šíření  $\gamma_\epsilon$  se rovná

$$\gamma_\epsilon = j \cdot \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \sqrt{\epsilon_r \cdot \mu_r - \left(\frac{\lambda}{\lambda_m}\right)^2} = j \cdot \beta_\epsilon = j \cdot \frac{2\pi}{\lambda_g} \quad (4)$$

Konstanta šíření  $\gamma$  ve vlnovodu se vzduchovým dielektrikem je dána vztahem

$$\gamma = j \cdot \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \sqrt{\epsilon_r \cdot \mu_r - \left(\frac{\lambda}{\lambda_m}\right)^2} = j \cdot \beta = j \cdot \frac{2\pi}{\lambda_g} \quad (5)$$

Charakteristická impedance vidů TE ve vlnovodu vyplněném vzduchem

$$Z_0 = \frac{\omega \cdot \mu_0}{\beta} \quad (6)$$

Konstanta šíření  $\beta$  je definována jako

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda_g} \quad (7)$$

Impedance v rovině  $T_{\epsilon 1}$  je dána výrazem

$$Z_{\epsilon 1} = Z_{0\epsilon} \cdot \operatorname{tgh} \cdot \gamma_\epsilon \cdot d = j \cdot Z_0 \operatorname{tg} \cdot \beta_\epsilon \cdot d \quad (8)$$

musí platit vztah

$$Z_{0\epsilon} \operatorname{tg} \cdot \beta_\epsilon \cdot d = Z_0 \operatorname{tg} \cdot \beta \cdot (d + \Delta y) \quad (9)$$

Pokud měříme nemagnetický materiál s  $\mu_r = 1$ , musí platit rovnost

$$\frac{\operatorname{tg} \cdot \beta_\epsilon \cdot d}{\beta_\epsilon \cdot d} = \frac{\operatorname{tg} \cdot \beta_\epsilon \cdot (d + \Delta y)}{\beta \cdot d} \quad (10)$$

$$\beta_{\epsilon} = \frac{1}{d_1} \cdot \arctg \left\{ \pm \sqrt{1 - 2 \cdot \frac{\operatorname{tg} \beta \cdot (d_1 + \Delta y_1)}{\operatorname{tg} \beta \cdot (2d_1 + \Delta y_2)}} \right\} \quad (11)$$

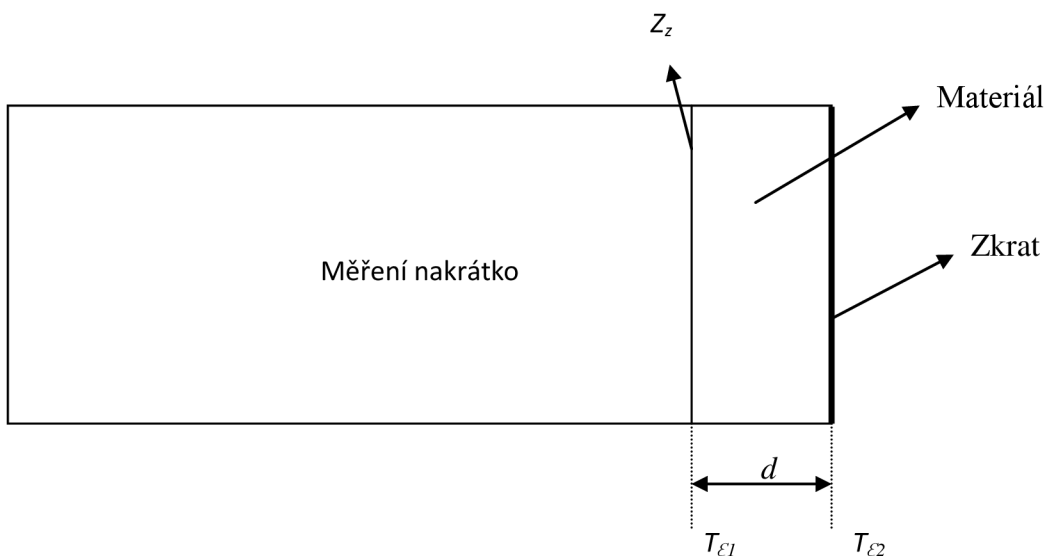
$$Z_{0\epsilon} = \pm Z_0 \cdot \frac{\operatorname{tg} \beta \cdot (d_1 + \Delta y_1)}{\sqrt{1 - 2 \cdot \frac{\operatorname{tg} \beta \cdot (d_1 + \Delta y_1)}{\operatorname{tg} \beta \cdot (2d_1 + \Delta y_2)}}} \quad (12)$$

Výsledná permitivita se určí jako

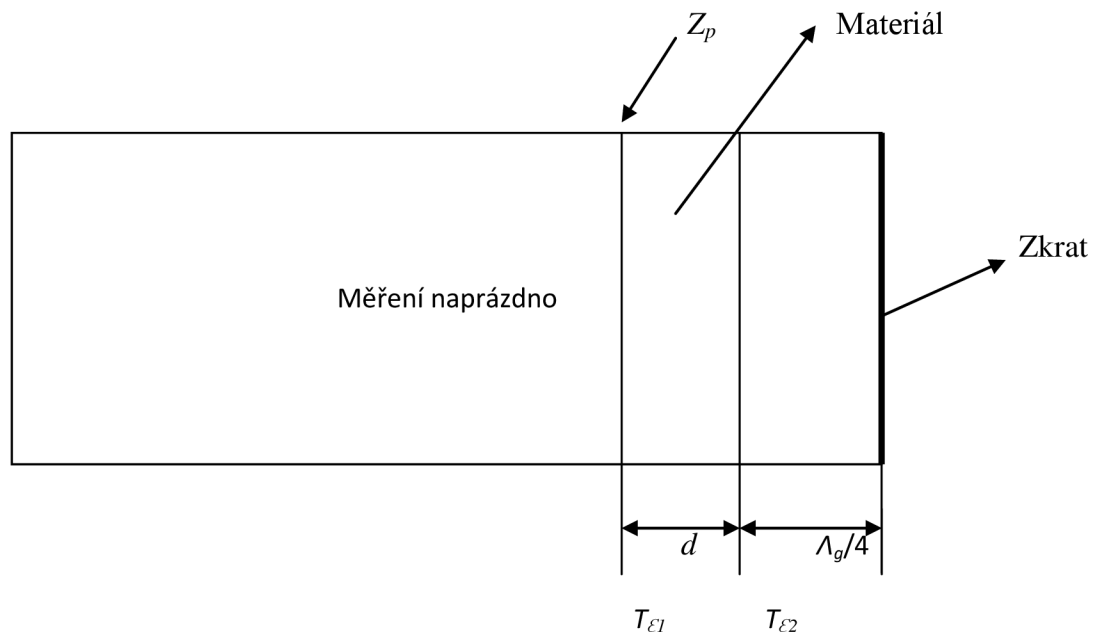
$$\epsilon_r = \frac{1}{\mu_r} \cdot \left( \frac{\gamma E}{\gamma} \right) \cdot \left[ 1 - \left( \frac{\lambda}{\lambda_m} \right)^2 + \left( \frac{\lambda}{\lambda_m} \right)^2 \right] \quad (13)$$

## Určení komplexní permitivity a permeability ztrátových materiálů metodou nakrátko – naprázdno

U metody nakrátko – naprázdno se měří vstupní impedance vlnovodu, který je zaplněn měřeným materiálem. Jak napovídá už samotný název metody, jedná se o materiál ztrátový, výsledná permitivita obsahuje i imaginární (ztrátovou část). Měřený vzorek o délce  $d$  vložíme do vlnovodu, který na konci vzorku, v rovině  $T_{e2}$ , zkratujeme. Poté na druhém konci vzorku, v rovině  $T_{e1}$ , změříme vstupní impedanci  $Z_z$ . Pak posuneme rovinu zkratu o  $\lambda_g/4$  od roviny  $T_{e2}$ . V rovině  $T_{e2}$  je nekonečně velká vstupní impedance, stav naprázdno, při níž naměříme vstupní impedanci  $Z_p$  v rovině  $T_{e1}$ . Ze změřených hodnot impedancí  $Z_p$ ,  $Z_z$  a známých vlnových délek  $\lambda$  a  $\lambda_m$  se dá vypočítat  $\epsilon$  a  $\mu$ . Tato metoda používá klasický způsob měření impedancí  $Z_p$  a  $Z_z$ . V případě, že se jedná o materiál nízkoztrátový, nelze použít k určení impedance Smithova diagram, ale musíme využít výpočetní vztahy. Tato metoda charakterizuje materiály i z hlediska ztrát, což dokumentuje imaginární část relativní permitivity, jak už bylo zmíněno. Z reálné a imaginární složky komplexní permittivity můžeme určit činitel elektrických ztrát  $\operatorname{tg} \delta_{\epsilon}$ .



Obr. 2 Určení impedance  $Z_z$



Obr.3 Určení impedance  $Z_p$

Základní výpočetní vztahy pro danou metodu:

Vstupní impedance  $Z_z$  vlnovodu o délce  $d$  na konci zkratovaného

$$Z_z = Z_{0\epsilon} \cdot \operatorname{tgh} \cdot \gamma_{\epsilon} \cdot d \quad (14)$$

Vstupní impedance  $Z_p$  při stavu naprázdno

$$Z_p = \frac{Z_{0\epsilon}}{\operatorname{tgh} \cdot \gamma_{\epsilon} \cdot d} \quad (15)$$

Charakteristická impedance vlnovodu zaplněného měřeným materiálem

$$Z_{0\epsilon} = \sqrt{Z_z \cdot Z_p} \quad (16)$$

Poměr stojatých vln se určí podle vztahu (17), kde  $\Delta L[\text{dB}]$  je hodnota odečtená ze stupnice atenuátoru

$$\text{PSV} = 10^{\Delta L[\text{dB}]/20} \quad (17)$$

Určení výsledné permitivity

$$\epsilon_r = \frac{2 \cdot \beta \cdot d}{\sqrt{Z_z \cdot Z_p} \cdot (\Phi_A - j \ln|A|)} \cdot \left[ \left( \frac{\Phi_A - j \ln|A|}{2 \cdot \beta \cdot d} \right)^2 \left[ 1 - \left( \frac{\lambda}{\lambda_m} \right)^2 \right] + \left( \frac{\lambda}{\lambda_m} \right)^2 \right] \quad (18a)$$

Pro určení výsledné permitivity, při  $\mu_r = 1$  a dosazením do vztahu (13) dostaneme vztah

$$\epsilon_r = \frac{1}{Z_z \cdot Z_p} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{\lambda}{\lambda_m} \right)^2 \right] + \left( \frac{\lambda}{\lambda_m} \right)^2 \quad (18b)$$

Charakteristická impedace vlnovodu je definována jako

$$Z = \frac{\pi^2}{8} \cdot \frac{b}{a} \cdot Z_{Te10} \quad (19)$$

V případě příliš velkého poměru stojatých vln (nízkoztrátový materiál) nemůžeme k určení impedancí použít Smithův diagram a musíme použít následující výpočetní vztahy, ze kterých určíme impedance  $Z_z$  a  $Z_p$  (reálné i imaginární části):

$$\operatorname{Re}[Z_z] = \frac{2 \cdot r}{r^2 + 1 - (r^2 - 1) \cdot \cos \varphi} \quad (20)$$

$r$  zde označuje poměr stojatých vln

$$\operatorname{Im}[Z_z] = \frac{2(r^2 - 1) \cdot \sin \varphi}{r^2 + 1 - (r^2 - 1) \cdot \cos \varphi} \quad (21)$$

$$\operatorname{Re}[Z_p] = \frac{2 \cdot r}{r^2 + 1 - (r^2 - 1) \cdot \cos \varphi} \quad (22)$$

$$\operatorname{Im}[Z_p] = \frac{2(r^2 - 1) \cdot \sin \varphi}{r^2 + 1 - (r^2 - 1) \cdot \cos \varphi} \quad (23)$$

Argument činitele odrazu

$$\varphi = 2\beta l_{\min} - (2 \cdot n - 1) \cdot \pi \quad (24)$$

$l_{\min}$  je vzdálenost  $n$  – tého minima od zátěže,  $n$  značí číslo uvažovaného minima

## Cíle práce

1. Seznámení se s používáním vlnododové měřící linky
2. Ověřit funkčnost použití vybraných dvou metod pro zjištění relativní permitivity vzorků
3. Určit výslednou permitivitu vzorků

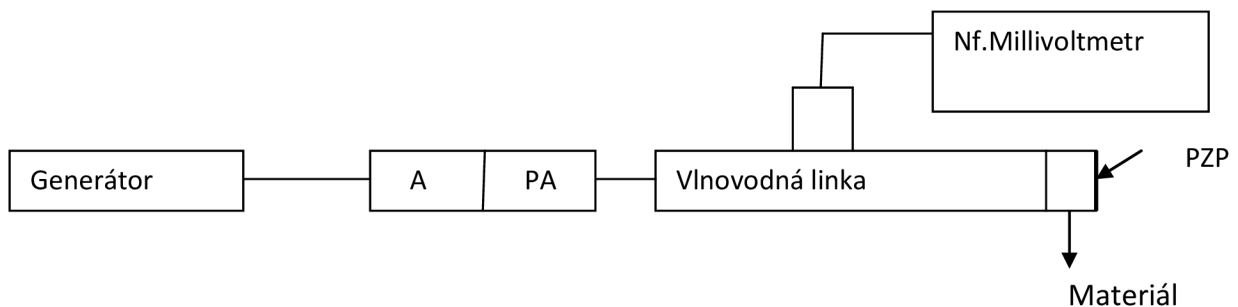
## Použité přístroje

- Generátor HAWLETT – PACKARD – 835 0B SWEEP OSCILATOR (83545A RF PLUG – IN 5,9 – 12,4 GHz)
- Atenuátor TESLA QFV 222 11



- Měřicí linka
- Vlnovod R100 ( $a = 22,86\text{mm}$ ,  $b = 10,14\text{mm}$ )
- Selektivní milivoltmetr
- Vzorke měřených materiálů
- Posuvný zkratovací píst

### Schéma zapojení pracoviště



Obr. 4: Pracoviště

### Poznámky k měření

Signál přichází z generátoru přes atenuátor do vlnovodové linky. Před vlnovodovou linkou jsou dva atenuátory, první slouží k ochraně generátoru, nemůžeme měnit jeho hodnotu. Druhý atenuátor je proměnný, nastavujeme jím vhodnou výchylku pro měření. Vlnovodovou linku tvoří obdélníkový vlnovod R100, na němž je připevněna pohyblivá sonda. Ta detekuje vysokofrekvenční napětí, které je následně přiváděno na nf.milivoltmetr, s jehož pomocí můžeme zjistit polohu kmiten a uzlů, díky výchylkám, které nám zobrazí nf.milivoltmetr. Z měřicí stupnice atenuátoru můžeme určit poměr stojatých vln (a následně činitel odrazu), což je základem pro naše další počítání. Za pomoci Smithova diagramu nebo uvedených vztahů určíme normovanou impedanci, která je potřebná pro další výpočty a určení výsledné permitivity.

### Postup měření

1) Zkontrolujte zapojení pracoviště podle schématu a seznamte se s obsluhou signálního generátoru. Nastavíme modulaci AM (tlačítko mod). Hloubka modulace bývá 30% (tato hodnota je pouze orientační, hloubka modulace nemá na měření vliv). Frekvenci zvolíme  $f =$

10GHz (měření na 10 GHz signalizováno svítícím tlačítkem CW). Hodnotu můžete nastavit otočným kolečkem nebo pomocí numerické klávesnice. Kolonka LEVEL (POWER LEVEL), vpravo nahoře, nastavíme 10dB (buď pomocí otočného kolečka, nebo na numerické klávesnici). Musí být zapnuté položky RF a CW filter, signalizováno svítící diodou. Na konec měřícího vedení připojíme posuvný píst, na němž nastavíme hodnotu 3,25 mm (tato hodnota je dost důležitá, neboť v této poloze je referenční rovina přesně na konci úseku vlnovodu, jako by byl vlnovod zkratován pevným zkratem). Před samotným měřením je nutné zkontrolovat hloubku zasunutí sondy do vlnovodu. Stupnice na detektoru sondy by měla být na pozici jedna, při větší hodnotě (hloubce zasunutí sondy dovnitř vlnovodu) by docházelo k deformaci pole ve vlnovodu, hloubka vniku sondy totiž ovlivňuje tvar stojatých vln ve vlnovodu. Postranním otočným kolečkem se vyladí dutina do rezonance, otáčíme, dokud nedostaneme maximální výchylku. Poté pomocí atenuátoru upravíme výchylku na hodnotu 10 – 30 mV. Po provedení tohoto nastavení se už do nastavení generátoru nijak nezasahuje, pouze se bude měnit výkon generátoru pro nastavení vhodné výchylky v minimu, ale to až později. Po tomto nastavením se budou pouze do posuvného pístu vkládat vzorky měřeného materiálu a posunovat zkratovací konec pístu.

2) Nejdříve použijeme k zjištění permitivity předložených vzorků metodu, která využívá zkrácení vlnové délky. Na konec vlnovodu připevníme posuvný píst. Píst je v poloze 3,25 mm. Je potřeba na posuvném pístu tuto hodnotu nastavit přesně, jinak bude zjištěna jiná hodnota poloh minim a tím vzniká větší chyba při určování výsledné permitivity. Zkratováním konce vlnovodu vzniknou uvnitř stojaté vlny. Kmitny a uzly stojatého vlnění můžeme lehce najít za pomoci pohyblivé sondy, která nám detekuje elektrické pole uvnitř vlnovodu, a z výchylky na milivoltmetru můžeme určit, kde se nachází kmitna či uzel. Poznamenejte si vzdálenosti od místa zkratu, kde se nachází uzly (pro naše výpočty stačí první dvě polohy minim, není však na škodu si najít více poloh minim). Poté vložíme do posuvného pístu měřený vzorek materiálu (píst posuneme do vzdálenosti  $d = 3,25 \text{ mm} + \text{tloušťka vzorku}$ ). Nyní si opět poznamenejme polohy prvních dvou minim od zkratu. Vložením vzorku měřeného materiálu do vlnovodu došlo k posuvu  $\Delta y$  (viz. Obrázek 16). Určete tuto hodnotu  $\Delta y$ , budete ji dále potřebovat při výpočtech a určení výsledné permitivity.

Dále vložíme do počátku posuvného pístu vzorek s dvojnásobnou tloušťkou (píst posuneme do vzdálenosti  $d = 3,25 \text{ mm} + \text{tloušťka vzorku}$ ). Opět určíme posunutí minim  $\Delta y$  oproti zkratovanému konci vlnovodu. K výpočtu permitivity použijeme vztah (13), zároveň ověříme, že platí rovnost (10).

3) Nyní použijeme k měření vzorků metodu nakrátko – naprázdno. Postup je podobný jako u první metody, zde však hned na začátku měření vložíme vzorek do roviny zkratu. Určíme znovu jako v předchozím bodě poměr stojatých vln (opět si poznačíme posunutí minim  $\Delta y$ ). Polohu minim při zkratované konci bez vzorku již máme změřenou z předchozího bodu. Sondy posuneme do polohy uzlu a nastavíme vhodnou výchylku (zvýšíme podle potřeby výkon generátoru – ne více než 15 dBm). Poté přejděte do kmitny a pomocí atenuátoru

nastavte stejnou výchylku, jaká byla v uzlu. Ze stupnice atenuátoru můžeme odečíst hodnotu útlumu  $\Delta L$ . Nebo lze použít vztah (17). Následně můžeme určit impedanci. Z těchto hodnot a za pomoci vztahů v teoretickém úvodu (20 - 24), se poté určí výsledná permitivita materiálu. Takto postupujeme u všech předložených vzorků.

Poté za pomoci posuvného pístu posuneme rovinu zkratu o  $\lambda_g/4$  od generátoru, nezapomeňte uvážit tloušťku vzorku při posouvání, vzorek však musí zůstat ve stejné poloze, posune se pouze rovina zkratu ( $l = 3,25 \text{ mm} + \text{tloušťka vzorku} + \lambda_g/4$ ). Posuvný píst i s měřeným vzorkem je připevněn stále k měřicímu vedení, pouze za pomoci otočného měřidla na pístu se provede posunutí pístu do příslušné vzdálenosti. Délku ve vlnovodu  $\lambda_g$  se určí jako dvojnásobek vzdálenosti dvou minim (uzlů). Znovu určíme poměr stojatých vln stejným způsobem jako v prvním případě, kdy byl vzorek v počátku.

4) Přehledně zpracujte zprávu týkající se dané problematiky a vyvodte závěr. Diskutujte možné chyby nebo odchylky v měření a výpočtech.

[1] SVAČINA, J., RŮŽIČKA, V., PUNČOCHÁŘ, J., Teorie obvodů V a technika velmi krátkých vln – Laboratorní cvičení. Skriptum FEVUT v Brně, 1980

[2] Raida, Z., Elektromagnetické vedení, vlny a antény – návod pro laboratorní cvičení Měření na vlnovodné lince, <http://www.urel.feec.vutbr.cz/~raida/beva>

# B Měření permitivity materiálů v mikrovlnném pásmu – vzorový protokol

Jméno a příjmení: .....

ID: .....

Datum měření: .....

Spolupracoval: .....

Bodové hodnocení: .....

## **Měřicí přístroje:**

Vlnovod R100

Atenuátor TESLA QFV 222 11

Selektivní milivoltmetr

Vzorek 1 FR4

Vzorek 2 dřevo

1) Určení parametrů bezztrátových materiálů ze zkrácení vlnové délky

Tabulka 1:

vzorek	d [mm]	2d [mm]	$\Delta y_1$ [mm]	$\Delta y_2$ [mm]	$\epsilon_r$
Fr4	3,2	6,4	5,3	17	4,25
dřevo	5,5	11	8	18	3,8

## **Příklad výpočtu:**

### **FR4**

Nejdříve určíme vlnovou délku

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8}{10 \cdot 10^9} = 0,03 \text{ m}$$

Délku vlny ve vlnovodu určíme jako dvojnásobek vzdálenosti dvou minim

$$\lambda_g = 39,8 \text{ mm}$$

Mezní vlnová délka je rovna dvojnásobku většímu z příčných rozměrů vlnovodu R 100

$$\lambda_m = 2a = 2 \cdot 0,02286 = 0,04572 \text{ m}$$

$$\beta_\epsilon = \frac{1}{d_1} \cdot \arctg \left\{ \pm \sqrt{1 - 2 \cdot \frac{\text{tg} \cdot \beta \cdot (d_1 + \Delta y_1)}{\text{tg} \cdot \beta \cdot (2d_1 + \Delta y_2)}} \right\} = \frac{1}{0,00304} \cdot \arctg \left\{ \pm \sqrt{1 - 2 \cdot \frac{\text{tg} \cdot 158 \cdot (0,0032 + 0,0053)}{\text{tg} \cdot 158 \cdot (2 \cdot 0,0032 + 0,017)}} \right\} = 409 \text{ m}^{-1}$$

$$\gamma_\epsilon = j \cdot \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \sqrt{\epsilon_r \cdot \mu_r - \left(\frac{\lambda}{\lambda_m}\right)^2} = j \cdot \beta_\epsilon = j \cdot \frac{2\pi}{\lambda_g} = j \cdot 409$$

$$\gamma = j \cdot \beta = j \cdot \frac{2\pi}{\lambda_g} = j \cdot 157,87$$

Nyní máme všechny potřebné hodnoty pro určení výsledné permitivity, stačí tyto vypočtené hodnoty dosadit do vztahu (13)

$$\epsilon_r = \frac{1}{\mu_r} \cdot \left(\frac{\gamma E}{\gamma}\right) \cdot \left[1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_m}\right)^2 + \left(\frac{\lambda}{\lambda_m}\right)^2\right] = \frac{1}{1} \cdot \left(\frac{409 \cdot i}{158 \cdot i}\right) \cdot \left[1 - \left(\frac{0,03}{0,04572}\right)^2 + \left(\frac{0,03}{0,04572}\right)^2\right] = 4,25$$

Permitivita nám vyšla o něco málo větší, což je způsobeno zřejmě zaokrouhlováním mezivýsledků.

2) Určení komplexní permitivity a permeability ztrátových materiálů metodou nakrátko – naprázdno

Tabulka 2:

vzorek	tloušťka [mm]	PSV Zz	Impedance Zz [Ω]	PSV Zp	Impedance Zp [Ω]	permitivita
dřevo	5,5	1,76	1,1-0,2i	1,7	0,5+0,1i	3,5-0,45i
Fr4	6,15	7,57	0,196-0,69i	26,88	0,04+0,22i	3,96 - 0,34i

### Příklad výpočtu:

#### FR4

Tloušťka vzorku FR4 - ky

$$d = 0,00615 \text{ m}$$

$$PSV = 10^{\Delta L[\text{dB}]/20}$$

$$PSV = 10^{17.58 \text{ dB}/20} = 7,57$$

$$PSV = 10^{28.59 \text{ dB}/20} = 26,88$$

$$\text{Re}[Z_z] = \frac{2 \cdot r}{r^2 + 1 - (r^2 - 1) \cdot \cos \varphi} = \frac{2 \cdot 7,57}{7,57^2 + 1 - (7,57^2 - 1) \cdot \cos(-1,91)} = 0,196$$

$$\text{Im}[Z_z] = \frac{2(r^2 - 1) \cdot \sin \varphi}{r^2 + 1 - (r^2 - 1) \cdot \cos \varphi} = \frac{2 \cdot (7,57^2 - 1) \cdot \sin(-1,91)}{7,57^2 + 1 - (7,57^2 - 1) \cdot \cos(-1,91)} = -0,69$$

$$\text{Re}[Z_p] = \frac{2 \cdot r}{r^2 + 1 - (r^2 - 1) \cdot \cos \varphi} = \frac{2 \cdot 26,88}{26,88^2 + 1 - (26,88^2 - 1) \cdot \cos(2,7)} = 0,04$$

$$\text{Im}[Z_p] = \frac{2(r^2 - 1) \cdot \sin \varphi}{r^2 + 1 - (r^2 - 1) \cdot \cos \varphi} = \frac{2 \cdot (26,88^2 - 1) \cdot \sin(2,7)}{26,88^2 + 1 - (26,88^2 - 1) \cdot \cos(2,7)} = 0,22$$

$$\varphi = 2\beta l_{\text{min}} - (2 \cdot n - 1) \cdot \pi$$

$$\varphi = 2 \frac{2 \cdot \pi}{\lambda_g} \cdot 0,0039 - (2 \cdot 1 - 1) \cdot \pi = -1,91$$

$$\varphi = 2 \frac{2 \cdot \pi}{\lambda_g} \cdot 0,0185 - (2 \cdot 1 - 1) \cdot \pi = 2,7$$

Pro určení výsledné permittivity můžeme použít ještě jeden vztah, při  $\mu_r = 1$  a dosazením do vztahu (18b) dostaneme výraz

$$\epsilon_r = \frac{1}{z_z \cdot Z_p} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{\lambda}{\lambda_m} \right)^2 \right] + \left( \frac{\lambda}{\lambda_m} \right)^2$$

$$\epsilon_r = \frac{1}{(0,196 - 0,69i) \cdot (0,04 + 0,22i)} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{0,03}{0,0457} \right)^2 \right] + \left( \frac{0,03}{0,0457} \right)^2$$

$$\epsilon_r = \underline{\underline{3.9642 - 0.3435i}}$$

$$\text{tg} \delta_{\epsilon} = \frac{\epsilon_r''}{\epsilon_r'} = \frac{0,34}{3,96} = 0,08$$

## **Závěr:**

Prakticky byly vyzkoušeny dvě metody měření relativní permitivity materiálů. Jednalo se o metodu určení permitivity ze zkrácení vlnové délky a metodu nakrátko - naprázdno. Byly proměřeny dva vzorky materiálů, vzorek FR4-ky a vzorek neznámého druhu dřeva. U metody ze zkrácení vlnové délky jsme vycházeli z určených posunů minim, při vložení vzorků různé tloušťky. Druhá metoda, metoda nakrátko – naprázdno, byla o něco pracnější, neboť ze změřeného poměru stojatých vln jsme určovali impedance  $Z_z$  a  $Z_p$ , které jsou stěžejní částí pro určení výsledné permitivity touto metodou. K impedancím jsme dospěli, u vzorku dřeva, podle postupu pro určení impedance dle Smithova diagramu. V tomto případě poměr stojatých vln nebyl příliš velký. U FR4 –ky jsme museli pro určení impedancí použít výpočetní vztahy, protože se jednalo o nízkoztrátový materiál a poměr stojatých vln vycházel příliš velký. Metodou zkrácení vlnové délky byla určena permitivita FR4-ky 4,25. Metodou nakrátko - naprázdno byla určena permitivita Fr4-ky 3.9642 - 0.3435i.

# C Měření permitivity materiálů v mikrovlnném pásmu – šablona vzorového protokolu

Jméno a příjmení: .....

ID: .....

Datum měření: .....

Spolupracoval: .....

Bodové hodnocení: .....

## **Měřicí přístroje:**

Vlnovod R100

Atenuátor.....

Milivoltmetr.....

Vzorek 1 .....

Vzorek 2 .....

## 1) Určení parametrů bezeztrátových materiálů ze zkrácení vlnové délky

Tabulka 1:

vzorek	d [mm]	2d [mm]	$\Delta y_1$ [mm]	$\Delta y_2$ [mm]	$\epsilon_r$



**Příklad výpočtu:**

2) Určení komplexní permitivity a permeability ztrátových materiálů metodou nakrátko – naprázdno

Tabulka 2:

vzorek	tloušťka[mm]	PSV Zz	Impedance Zz [Ω]	PSV Zp	Impedance Zp[Ω]	permitivita

**Příklad výpočtu:**

**Závěr:**

