

## **ABSTRAKT**

Ve své práci se zabývám analyzováním elektrických vlastností látek jako textilního substrátu. Jednotlivé antény na různých substrátech jsem sestrojil a proměřil, následně jsem rozměry antény namodeloval v programu Ansys HFSS a porovnával jsem, které parametry rozmítaných parametrů látky nejvíce odpovídají naměřené skutečnosti. Testoval jsem i vytvořenou tištěnou textilní anténu a výsledky jsem uvedl v závěru.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Planární anténa, textilní substrát, relativní permitivita textilu, tištěná anténa, nažehlovací fólie.

## **ABSTRACT**

In my thesis I am analyzing the electrical properties of substances such as textile substrate. Each antenna on various substrates, I constructed and measured, then I made an antenna in Ansys HFSS with same dimensions and I compared the parameters which swept substance parameters most relevant to the measured reality. I tested also created printed textile antenna and the results I summarize in conclusion.

## **KEYWORDS**

Planar antenna, textile substrate, relative permittivity of textile, printed antenna, iron-on transfer.

TRUBÁK Jan, *Tištěné nositelné antény*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2015, 40 stran, 5 stran příloh. Bakalářská práce. Vedoucí práce: prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Tištěné nositelné antény 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. Dr. Ing. Zbyňku Raidovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne .....

.....

(podpis autora)

# OBSAH

|                                                                          |            |
|--------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>Seznam obrázků</b>                                                    | <b>v</b>   |
| <b>Seznam tabulek</b>                                                    | <b>vii</b> |
| <b>Úvod</b>                                                              | <b>1</b>   |
| <b>1 Látky a povrchové úpravy testované pro aplikaci tištěných antén</b> | <b>2</b>   |
| <b>2 Metody zjišťování relativní permitivity látkové struktury</b>       | <b>6</b>   |
| <b>3 Vzorce pro výpočet rozměrů flíčku</b>                               | <b>8</b>   |
| <b>4 Konstrukce flíčkové antény a porovnání charakteristik s modelem</b> | <b>9</b>   |
| <b>5 Realizace a měření tištěné antény</b>                               | <b>19</b>  |
| <b>6 Závěr</b>                                                           | <b>23</b>  |
| <b>Literatura</b>                                                        | <b>24</b>  |
| <b>Seznam symbolů, veličin a značek</b>                                  | <b>25</b>  |
| <b>Seznam příloh</b>                                                     | <b>26</b>  |

# SEZNAM OBRÁZKŮ

|                                                                                                                                                                                 |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Obr. 1.1: A – Nerovnosti na povrchu látky; B – Zničená látka vlivem tepla při nažehlování .....                                                                                 | 3  |
| Obr. 1.2: A – Bavlna 1 bez nažehlení; B – bavlna 1 s nažehlovací fólií .....                                                                                                    | 3  |
| Obr. 1.3: Bavlna 2 výšky $h = 0,54 \text{ mm}$ s nažehlenou fólií Digiflex – Master .....                                                                                       | 4  |
| Obr. 1.4: Průběh testu voděodolnosti fólie a výsledek testu. ....                                                                                                               | 5  |
| Obr. 1.5: Test pouze s bavlnou 2 bez fólie. ....                                                                                                                                | 5  |
| Obr. 2.1: Určení relativní permitivity materiálu vložení do vlnovodu a změření posuvu kmiten a uzlů stojatého vlnění (tečkovaná čára) vůči prázdnému vlnovodu (plná čára). .... | 6  |
| Obr. 2.2: Uspořádání měřicí soupravy pro měření relativní permitivity .....                                                                                                     | 7  |
| Obr. 4.1: Reálná flíčková anténa s fleece substrátem. ....                                                                                                                      | 10 |
| Obr. 4.2: Porovnání mezi charakteristikami reálnými a simulovanými v Ansys HFSS. ....                                                                                           | 11 |
| Obr. 4.3: Sestrojená anténa na substrátu z jednovrstvé bavlny. ....                                                                                                             | 12 |
| Obr. 4.4: Porovnání mezi charakteristikami reálnými a simulovanými v HFSS pro jednovrstvou bavlnu. ....                                                                         | 12 |
| Obr. 4.5: Vyrobená anténa pro rezonanční frekvenci 5,8 GHz .....                                                                                                                | 13 |
| Obr. 4.6: Model antény pro 5,8 GHz v HFSS.....                                                                                                                                  | 14 |
| Obr. 4.7: Porovnání mezi charakteristikami reálnými a simulovanými v HFSS.....                                                                                                  | 14 |
| Obr. 4.8: Reálná anténa pro frekvenci 6 GHz.....                                                                                                                                | 15 |
| Obr. 4.9: Porovnání mezi charakteristikami reálnými a simulovanými pro model 6 GHz. ....                                                                                        | 16 |
| Obr. 4.10: Reálná anténa pro frekvenci 5 GHz.....                                                                                                                               | 17 |
| Obr. 4.11: Porovnání mezi charakteristikami reálnými a simulovanými pro anténu konstruovanou na 5 GHz. ....                                                                     | 17 |
| Obr. 4.12: Ukázka měření ovlivňování antény lidskou tkání u modelu konstruovaného na 5 GHz .....                                                                                | 18 |
| Obr. 4.13: Ukázka vlivu lidské tkáně na charakteristiku antény .....                                                                                                            | 18 |
| Obr. 4.14: Směrová charakteristika flíčkové antény.....                                                                                                                         | 19 |
| Obr. 5.1: Tištěná anténa na bavlně 2 s nažehlovací fólií Digiflex - Master matná.....                                                                                           | 20 |
| Obr. 5.2: Pokusy o připevnění mědi na stříbrnou barvu. ....                                                                                                                     | 20 |
| Obr. 5.3: Způsob měření tištěné antény. ....                                                                                                                                    | 21 |
| Obr. 5.4: Charakteristiky činitele odrazu tištěné textilní antény. ....                                                                                                         | 21 |

|                                                                             |    |
|-----------------------------------------------------------------------------|----|
| Obr. 0.1: Uspořádání měřící soupravy pro měření relativní permitivity ..... | 27 |
| Obr. 0.2: Vlnovodná linka .....                                             | 28 |

# SEZNAM TABULEK

|                                                                    |   |
|--------------------------------------------------------------------|---|
| Tabulka 3.1: Vstupní a výstupní hodnoty pro skript v Matlabu ..... | 8 |
|--------------------------------------------------------------------|---|

# ÚVOD

Ve své bakalářské práci se věnuji problematice antén, které jsou integrovány do oděvu. Zaměřím se především na charakterizování elektrických vlastností dané látkové struktury. Takové antény jsou stále častěji používány v bezdrátových sítích senzorů, jež jsou rozmístěny po lidském těle, snímají životní funkce sledované osoby a předávají sejmutá data do centrální jednotky k dalšímu zpracování. Hovoříme o bezdrátových sítích na lidském těle (WBAN, *wireless body area network*).

Antény, jež chceme integrovat do oděvu, by měly být levné, nenáročné na výrobu, odolné vůči několikanásobnému praní, lehké a pružné. Důležité jsou samozřejmě i jejich vyzařovací vlastnosti a účinnost.

V současné době se vývoj antén integrovaných do oděvu ubírá dvěma směry: tkané antény a tištěné antény. V případě tkaných antén vzniká vodivá struktura... vetkáváním vodivých vláken (stříbro, měď) do vláken textilních (bavlna, syntetické materiály). Nevýhodou je pracnější výroba, nižší přesnost vytvoření motivu antény a případné problémy s vodivým propojením vodivých vláken. Jako kompromis lze využít anténu vyšívanou vodivou nití do textilního podkladu.

Druhou možností výroby antén pro oděvy je technologie inkoustového tisku. V současné době jsou na trhu k dispozici inkousty, které umožňují tisk kovových, dielektrických, polovodičových a dokonce fotovoltaiických vrstev. Inkoustovým tiskem tak lze vytvořit komplexní anténní systém, který kromě samotného kovového anténního prvku zahrnuje i dielektrický substrát či jednoduché polovodičové obvody. Na závěr je vytištěná anténa pokryta ochrannou vrstvou, která strukturu chrání před praním a vlivy běžného nošení.

Ve své práci se zabývám volbou optimální látky, optimální povrchové úpravy a následným charakterizováním elektrických vlastností této složené látkové struktury. Dále řeším, jak v programu Ansys HFSS vytvořit model tak, aby vypočtené charakteristiky byly shodné s reálnými a současně byl tento model co nejméně náročný na výpočet.

V první části své práce hodnotím vlastnosti jednotlivých látek a jejich vhodnost pro použití se zvolenou povrchovou úpravou. Dále se zabývám vlastnostmi povrchové úpravy. Zaměřuji se jak na vlastnosti vztahující se k běžnému nošení a každodennímu používání, tak na vlastnosti elektrické. Ve třetí části hodnotím různé přístupy ke zjišťování elektrických vlastností a jejich vhodnost pro látkové struktury. Dále porovnávám charakteristiky realizovaných antén a charakteristiky odpovídajících modelů v programu Ansys HFSS. V závěru se věnuji výčtu zjištěných vlastností látkové struktury a antény natisknuté vodivou barvou.

# 1 LÁTKY A POVRCHOVÉ ÚPRAVY TESTOVANÉ PRO APLIKACI TIŠTĚNÝCH ANTÉN

Zvolená látka a povrchová úprava spolu budou pevně spojeny a budou tvořit jeden celek, proto nebudu jejich vlastnosti posuzovat pouze zvlášť, ale vždy je budu hodnotit dohromady jako látkovou strukturu. Látková struktura musí splňovat hned několik kritérií. Látka by měla být běžně používaná v textilním průmyslu. Musí dobře snášet praní a také musí být kompatibilní se zvolenou povrchovou úpravou. Povrchová úprava musí splňovat podobné vlastnosti. Měla by být ohebná, aby při běžném nošení nevadila uživateli, musí být odolná vůči praní. To znamená, že nesmí měnit své vlastnosti již po několika pracích cyklech. Nejdůležitější vlastností je však kompatibilita s tiskovou vodivou barvou, pomocí které se budou vytvářet anténní motivy. Podrobné vlastnosti tiskové stříbrné vodivé barvy můžete vidět v příloze D.

Tato stříbrná barva se nanáší po úzkých proužcích, které svým spojením na podkladu vytvoří požadovaný anténní motiv. Kompatibilitou se tedy rozumí vytvoření dostatečně rovného povrchu na to, aby při tisku nevznikaly nespojitosti, které by mohly nepředvídatelně ovlivnit chování celé antény. Dále fólie musí být vyrobena z materiálu, který je dobře smáčivý pro stříbrnou barvu. Nesmáčivý povrch totiž zabráni rozlití stříbrné barvy a tím nevznikne vodivé spojení jednotlivých proužků, což opět může nepředvídatelně ovlivnit vlastnosti antény.

Jako nejvhodnější kandidát se projevila fólie Digiflex – Master matná od firmy Alphaset. Je to fólie na bázi polyuretanu vysoká 80  $\mu\text{m}$  a je často používána pro vytváření motivů na běžně nošených textiliích (např. triko, kalhoty nebo mikina). Její komerční používání zaručuje, že při dodržení podmínek v datasheetu (příloha 3), bude zachována dostatečná odolnost při praní.

## Testované látky a jejich parametry: Fleece

V návaznosti na svůj semestrální projekt jsem pracoval s materiálem fleece. Materiál fleece je v porovnání s ostatními látkami poměrně vysoký, jeho výška  $h = 3,5 \text{ mm}$ . Jeho struktura je však velice nerovnoměrná a ze zmíněné výšky tvoří poměrně velikou část vzduch. Samotný fleece a jeho stav po pokusu o nažehlení fólie je vidět na Obr. 1.1.

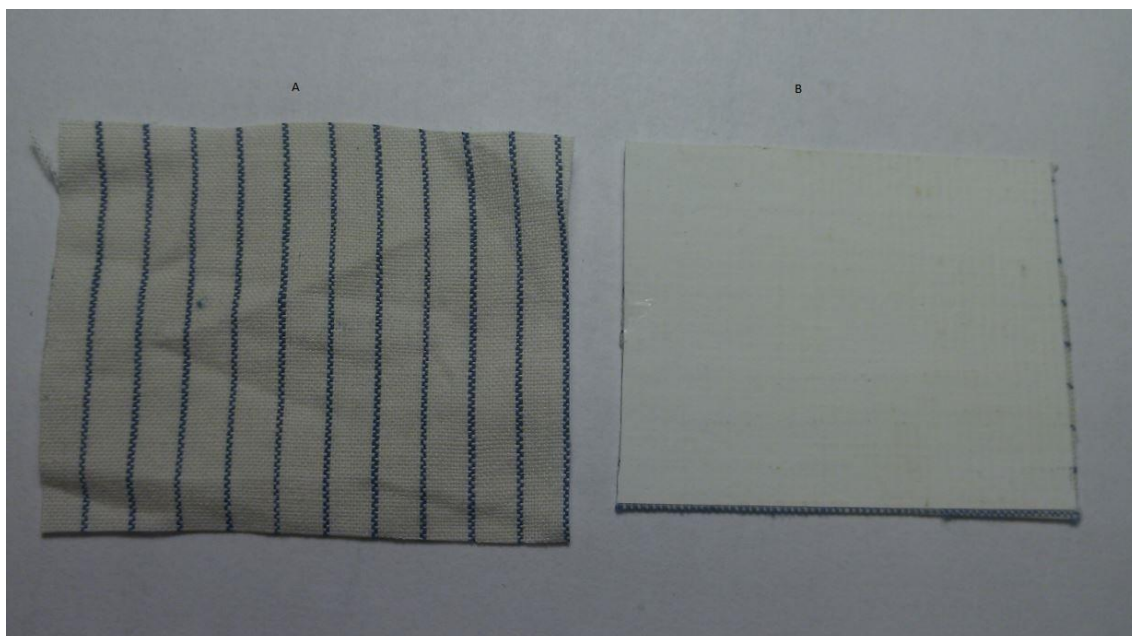


Obr. 1.1: A – Nerovnosti na povrchu látky; B – Zničená látka vlivem tepla při nažehlování

Jak je vidět z Obr. 1.1B, látka je vlivem tepla úplně zničená. Z výsledku tohoto pokusu vyplývá, že látka fleece se nedá s touto povrchovou úpravou použít.

## Bavlna výšky $h = 0,34 \text{ mm}$

Tuto bavlnu výšky  $h = 0,34 \text{ mm}$  budu dále nazývat pracovním názvem bavlna 1. U této látky proběhlo nažehlení bez problémů, jak můžete vidět na Obr. 1.2B. Celá látková struktura splňuje veškeré nároky na každodenní používání. Látka samotná má pouze  $h = 0,34 \text{ mm}$  (Obr. 1.2A) a celá látková struktura  $h = 0,52 \text{ mm}$  (Obr. 1.2B).



Obr. 1.2: A – Bavlna 1 bez nažehlení; B – bavlna 1 s nažehlovací fólií

Další vlastnosti této látkové struktury budou popsány v následujících kapitolách, kde pro tuto látkovou strukturu vytvořím reálnou anténu a její charakteristiky budu porovnávat s charakteristikami simulovanými v programu Ansys HFSS.

## Bavlna výšky $h = 0,56 \text{ mm}$

Bavlnu výšky  $h = 0,56 \text{ mm}$  budu pracovně nazývat bavlna 2. Bavlna 2 je nepatrně vyšší než bavlna 1, výška bavlny 2 je  $h = 0,56 \text{ mm}$ . Bez problému se na ni nažehlila fólie. Po tomto nažehlení měla látková struktura výšku  $h = 0,72 \text{ mm}$ . Látku s nažehlenou fólií můžete vidět na následujícím obrázku Obr.1.3.



Obr. 1.3: Bavlna 2 výšky  $h = 0,54 \text{ mm}$  s nažehlenou fólií Digiflex – Master

Další parametry látky budu testovat v následujících kapitolách, ve kterých budu porovnávat reálné charakteristiky antény s charakteristikami simulovanými v programu Ansys HFSS.

Dále se budu zabývat tím, jak účinně uvedená fólie chrání látku před vlhkostí.

## Ochranné vlastnosti fólie

Nošení textilní antény na lidském těle ji vystavuje situacím, které by mohly ovlivnit vlastnosti látky a tím i vlastnosti celé antény. Jednou z takových situací je navlhnutí látky lidským potem. V souvislosti s touto problematikou jsem provedl test, který zjišťuje, jak je fólie schopna látku před navlhnutím ochránit.

Při testu jsem postupoval následujícím způsobem: Použil jsem papírový kapesníček jako indikátor vlhkosti. Poté jsem vzal látku s jednostranně nažehlenou fólií a postavil na ni láhev plnou vody dnem vzhůru. Provedení i výsledek jsou znázorněné na obrázku Obr. 1.4.



Obr. 1.4: Průběh testu voděodolnosti fólie a výsledek testu.

Po uvedení nádoby do této polohy jsem ji nechal nehybně stát, aby měla voda možnost proniknout skrze fólii. Po 15 minutách jsem nádobu odstranil a na papírovém kapesníčku jsem sledoval, zda voda přes fólii pronikla. Pokus jsem opakoval ještě jednou a tentokrát jsem nádobu ještě stlačil rukou, aby byl tlak působící na fólii ještě větší, ale výsledek dopadl stejně. Jak můžete vidět na obrázku, fólie je zcela nepromokavá. Za normálních podmínek je tedy fólie schopna ochránit látku od přímého navlhnutí potem a zabránit tak změnám elektrických parametrů. Pro porovnání přikládám obrázek Obr. 1.5, kde jsem nádobu s vodou postavil pouze na samotnou látku.



Obr. 1.5: Test pouze s bavlnou 2 bez fólie.

Obrázek je pořízený cca 1 minutu po začátku testu. Je jasné viditelné, že samotná látka nemá žádné voděodolné vlastnosti. Bez použití povrchové úpravy hrozí... nebezpečí navlhnutí a tím nežádaná změna vlastností antény.

Následující kapitola se bude zabývat způsoby zjišťování relativní permitivity látkových struktur.

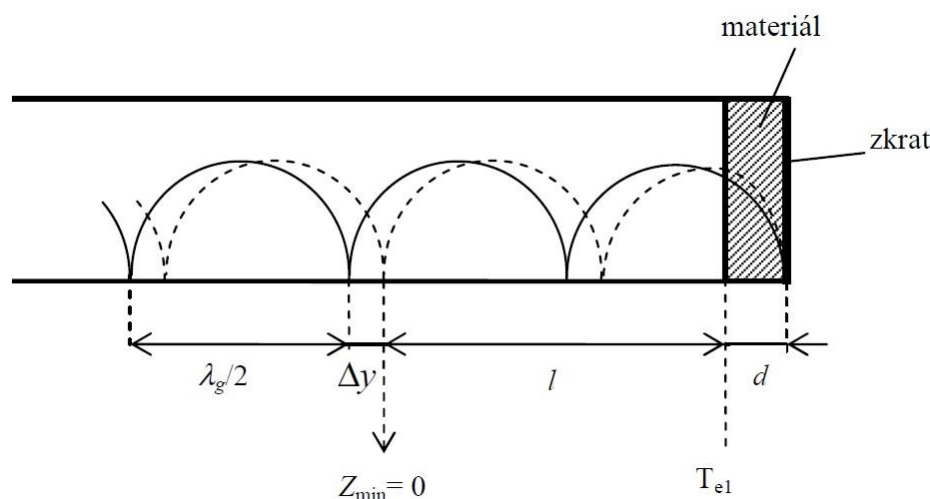
## 2 METODY ZJIŠŤOVÁNÍ RELATIVNÍ PERMITIVITY LÁTKOVÉ STRUKTURY

Přesnost budoucích návrhů textilní antény bude záviset na přesně stanovených parametrech použitých vstupních materiálů. V této části se zabývám vlnovodovou metodou, která určuje relativní permitivitu v závislosti na posunutí minim stojatého vlnění ve vlnovodu, do kterého je látka vložena.

Další metoda je poněkud nepřímá. Využívá změřených charakteristik reálné antény a simulovaných charakteristik odpovídajícího modelu vytvořeného v programu Ansys HFSS.

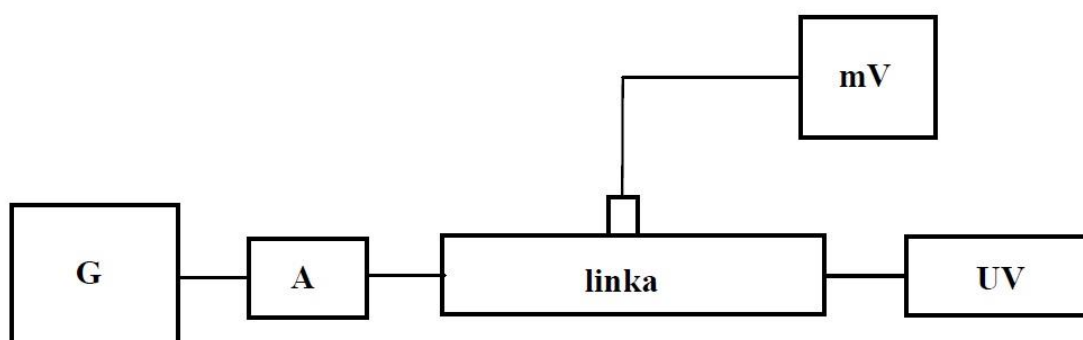
### Vlnovodová metoda

Vzorek měřeného materiálu umístíme do vlnovodu zakončeného zkratem. Je-li permitivita vzorku větší než jedna, dojde ke zkrácení vlnové délky v měřeném materiálu, a tudíž ke změně polohy uzlů a kmiten stojatého vlnění uvnitř vlnovodu (viz Obr. 2.1).



Obr. 2.1: Určení relativní permitivity materiálu vložení do vlnovodu a změření posuvu kmiten a uzlů stojatého vlnění (tečkovaná čára) vůči prázdnému vlnovodu (plná čára).

Měřicí souprava je sestavena z mikrovlnného generátoru G, proměnného atenuátoru A, vlnovodné měřicí linky s obdélníkovým vlnovodem R70 s rozměry  $a = 34,85$  mm a  $b = 15,8$  mm (pracovní pásmo tohoto vlnovodu je od 5,38 do 8,18 GHz) a úseku vlnovodu UV, jehož konec je zkratován, a těsně ke zkratu je umístěn vzorek měřeného materiálu. Napětí na výstupu diodového detektoru sondy linky se měří milivoltmetrem mV (obr 2.2).



Obr. 2.2: Uspořádání měřicí soupravy pro měření relativní permitivity

V posuvném vozíku linky je zabudována sonda, která snímá elektrické pole ve vlnovodu, rezonátor a detektor. Detektor převede vysokofrekvenční napětí indukované v sondě na snadno měřitelné stejnosměrné (nebo nízkofrekvenční) napětí. Při posouvání vozíku se sondou podél vedení se podle intenzity pole v místě sondy mění výstupní napětí detektoru. Tak můžeme najít uzly i kmitny stojatého vlnění a pomocí měřítka na lince určit jejich polohu.

Pro stanovení relativní permitivity tkané látky na kmitočtu 5,8 GHz je nutné nejdříve při zkratovaném úseku vlnovodu stanovit přesnou polohu minima (Obr. 2.1). Je třeba měřit přesně, s využitím nonia na měřítku a souměrně ležících bodů se stejnou výchylkou měřidla (minimum je uprostřed nich). Pak vložíme do vlnovodu vzorek měřeného materiálu o známé délce  $d$  a zaznameneáme novou polohu minima. Stanovíme posuv minima  $\Delta y$ .

Podrobný postup výpočtu... mé naměřené hodnoty a výsledná relativní permitivita určená touto metodou pro materiál fleece jsou uvedeny v příloze A.

## Určení relativní permitivity pomocí Ansys HFSS

Tato metoda je založena na počátečním hrubém odhadnutí relativní permitivity a následné sestavení reálné antény. Parametry reálné antény, tj. rezonanční frekvence, činitel odrazu, hodnoty impedance na vstupu, se změří na vektorovém obvodovém analyzátoru R&S ZVL. Přístroj jsem řádně kalibroval podle návodu uvedeném v [2].

Aby byla simulace v programu Ansys HFSS co nejprůkaznější, musejí být rozměry měřené reálné antény přesně převedeny na simulovaný model. K tomuto účelu jsem jednotlivé antény proměřoval pod mikroskopem, který dokáže měřit s přesností na desetitisíciny. Program HFSS však nedokáže počítat libovolně vytvořené mnohoúhelníky, proto jsem musel hodnoty mírně zaokrouhlovat tak, aby bylo možné anténu v HFSS namodelovat pomocí obdélníků. V programu HFSS se poté provede parametrické rozmítání požadovaného rozměru, v našem případě relativní permitivity. Z porovnání reálných a simulovaných charakteristik se odečte relativní permitivita, pro kterou simulovaný průběh nejlépe kopíruje reálně změřenou charakteristiku.

Ve své práci budu postupovat podle druhého způsobu, protože takto vycházejí

hodnoty relativní permitivity mnohem přesněji a při jejím určování se výsledek opírá o charakteristiky reálné antény. U vlnovodové metody navíc do výpočtu vstupuje hodně chyb způsobených nepřesným odečítáním výšky látky a posuvu minim stojatého vlnění ve vlnovodu.

Následující kapitola se zabývá výpočtem rozměrů motivu flíčku pro zvolenou hodnotu relativní permitivity.

### 3 VZORCE PRO VÝPOČET ROZMĚRŮ FLÍČKU

Aby bylo možné pro vstupní hodnoty rychle získávat potřebné rozměry pro konstrukci mikropáskové flíčkové antény, je vhodné nepostupovat ve výpočtech ručně, ale využít výpočetní techniku. Z tohoto důvodu jsem následující vzorce použil pro vytvoření skriptu v programu Matlab. Potřebné vstupní hodnoty a výsledky vypočítané Matlabem jsou uvedeny v následující tabulce (Tabulka.3.1).

| Vstupní hodnoty                            | Vypočítané rozměry antény      |
|--------------------------------------------|--------------------------------|
| Relativní permitivita $\epsilon_r$ [-]     | Šířka mikropásku $W$ [m]       |
| Požadovaná rezonanční frekvence $f_r$ [Hz] | Délka mikropásku $L$ [m]       |
| Výška zvoleného substrátu $h$ [m]          | Šířka napájecího pásku $w$ [m] |
| Vstupní impedance $Z_0$ [ $\Omega$ ]       | Hloubka zanoření $y_0$ [m]     |

Tabulka 3.1: Vstupní a výstupní hodnoty pro skript v Matlabu

Vzorečky použité ve skriptu v programu Matlab jsou uvedeny níže a převzal jsem je z [1]:

- Určení vlnové délky  $\lambda$ :

$$\lambda = \frac{c}{f_r} \quad (3.1)$$

- Výpočet šířky mikropásku  $W$ :

$$W = \left(\frac{c}{2f}\right) \sqrt{(2/(\epsilon_r + 1))} \quad (3.2)$$

- Výpočet efektivní relativní permitivity  $\epsilon_{ef}$ :

$$\epsilon_{ef} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \frac{1}{\sqrt{1 + 12 \frac{h}{W}}} \quad (3.3)$$

- Výpočet délky rozšířené kvůli rozptylovým polím  $dL$ :

$$dL = h \left( 0,412 \left( \frac{(\epsilon_{ef} + 0,3) \left( \left( \frac{W}{h} \right) + 0,264 \right)}{(\epsilon_{ef} - 0,258) \left( \left( \frac{W}{h} \right) + 0,8 \right)} \right) \right) \quad (3.4)$$

- Výpočet délky flíčku  $L$ :

$$L = \frac{c}{2 f_r \sqrt{\epsilon_{ef}}} - 2dL \quad (3.5)$$

- Pomocné proměnné pro výpočet zanoření do flíčku  $k_0$ ,  $G_1$ ,  $Z_{in}$ :

$$k_0 = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (3.6)$$

$$G_1 = \left(\frac{W}{120\lambda}\right) \left(1 - \left(\frac{1}{24}\right) ((k_0 h)^2)\right) \quad (3.7)$$

$$Z_{in} = \frac{1}{2G_1} \quad (3.8)$$

- Výpočet pro hloubku zanoření  $y_0$ :

$$y_0 = \left(\frac{L}{\pi}\right) \arccos\left(\sqrt{\frac{Z_0}{Z_{in}}}\right) \quad (3.9)$$

- Pomocné proměnné pro výpočet šířky mikropásku A a B:

$$A = \left(\frac{Z_0}{60}\right) \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}} + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \left[0,23 + \frac{0,11}{\epsilon_r}\right] \quad (3.10)$$

$$B = \frac{60 \pi^2}{Z_0 \sqrt{\epsilon_r}} \quad (3.11)$$

- Výpočet rozměrů napájecího mikropásku  $w$ :

$$w = \frac{2h}{\pi} \left\{ B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \left[ \ln(B - 1) + 0,39 - \frac{0,61}{\epsilon_r} \right] \right\} \quad (3.12)$$

Celý skript v programu Matlab je k použití v příloze B.

V následující kapitole se budu věnovat vlastní konstrukci antén, měření jejich charakteristik a simulováním modelů vytvořených v programu Ansys HFSS. V celé kapitole budu aplikovat přístup ke zjišťování relativní permitivity, který jsem popisoval v kapitole 2.

## 4 KONSTRUKCE FLÍČKOVÉ ANTÉNY A POROVNÁNÍ CHARAKTERISTIK S MODELEM

Výroba antény se stříbrným vodivým motivem je poměrně nákladná, proto počáteční modely budu konstruovat jiným způsobem. Jako zemní desku použiji substrát FR4 o rozměrech 4x5 cm potištěnou mědí z jedné strany. Na měděný povrch připevním pomocí oboustranné lepicí pásky zvolenou látkovou strukturu a na ni motiv flíčkové antény opět zhotovený z měděné fólie o výšce  $h = 35 \mu m$ . Celá anténa je poté připájena k SMA konektoru 3,5 mm s mikropáskovým pinem, aby bylo možné jednotlivé antény změřit na vektorovém obvodovém analyzátoru.

V následující části budou prezentovány jednotlivé reálné modely, jejich charakteristiky a srovnání s charakteristikami simulací z HFSS. V závěru kapitoly pak budou předvedeny směrové charakteristiky flíčkové antény a vliv okolního prostředí na průběh charakteristik.

# Fleece:

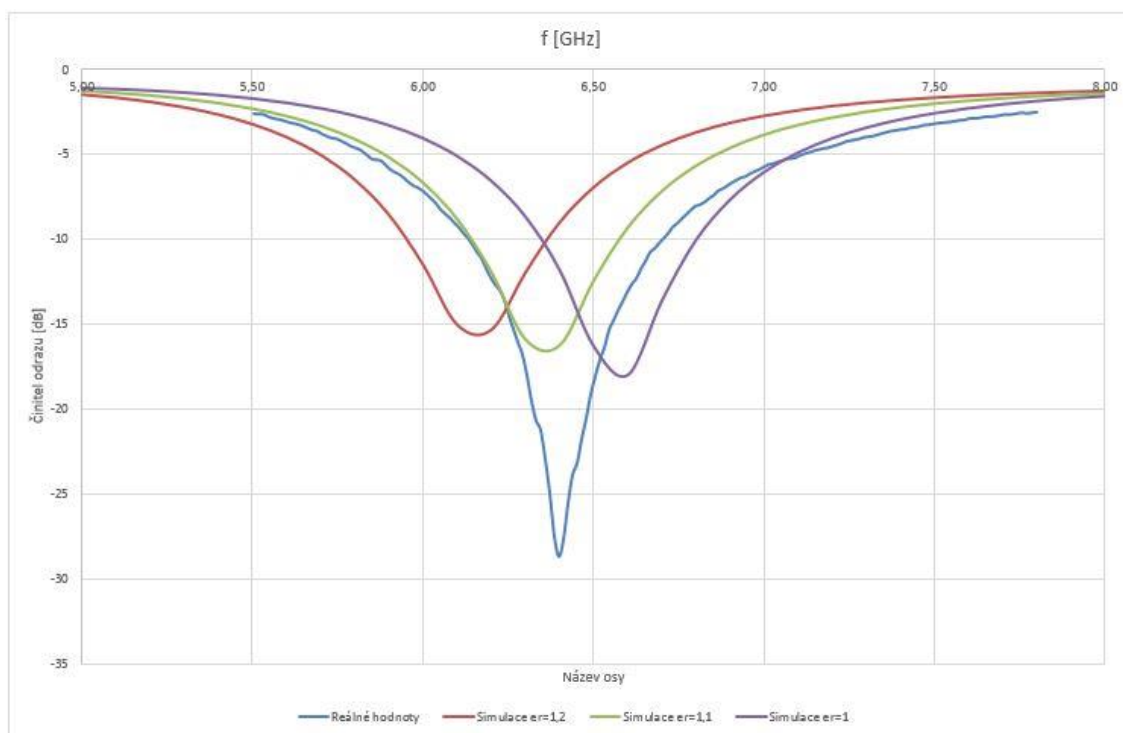
Jako první model jsem použil anténu ze svého semestrálního projektu. Anténa je konstruována z materiálu fleece a bez povrchové úpravy. Rozměry flíčku vytvořené antény změřené pod mikroskopem jsou:

- Šířka flíčku  $W = 19,46 \text{ mm}$
- Délka flíčku  $L = 19,59 \text{ mm}$
- Šířka napájecího mikropásku  $w = 6,22 \text{ mm}$
- Výška látkového substrátu  $h = 3,50 \text{ mm}$



Obr. 4.1: Reálná flíčková anténa s fleece substrátem.

Charakteristiky reálné antény v porovnání se simulovanými můžete vidět na následujícím obrázku (Obr. 4.2). Simulované průběhy jsou 3. Každý průběh představuje charakteristiku činitele odrazu pro jinou hodnotu relativní permitivity. Nejblíže je reálné charakteristice průběh pro relativní permitivitu  $\epsilon_r = 1,1$ . Vlnovodovou metodou byla zjištěna relativní permitivita  $\epsilon_r = 1,5$ . Při použití relativní permitivity 1,5 však anténa rezonovala o 0,6 GHz výše, než byla navržena. Proto vlnovodová metoda není vhodná pro měření relativní permitivity látek jako je fleece, protože neurčitost výšky fleecu a určení posuvu minim vnáší do výpočtu příliš velkou chybu.



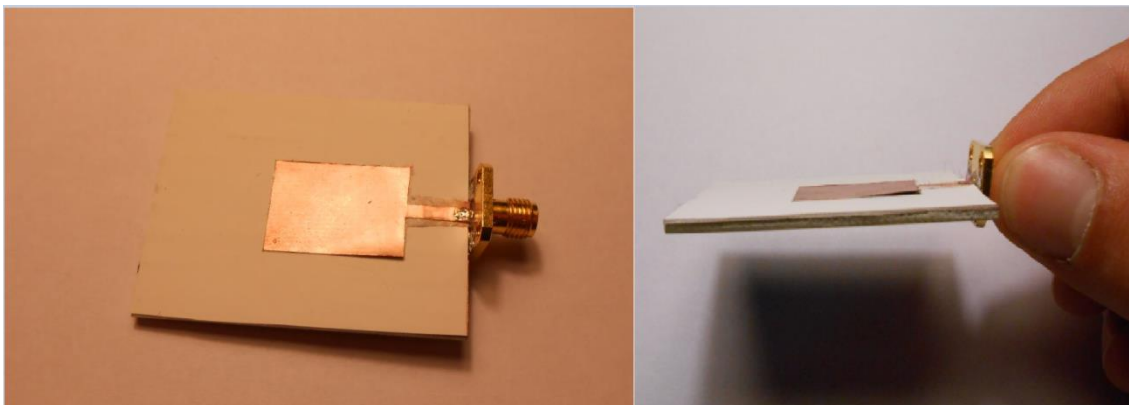
Obr. 4.2: Porovnání mezi charakteristikami reálnými a simulovanými v Ansys HFSS.

Z obrázku je vidět, že činitel odrazu reálné antény je větší než u antény simulované. Tato skutečnost je způsobena tím, že v simulaci se počítá s ideálními vlastnostmi materiálů, zatímco ve skutečnosti jsou materiály ztrátové a to způsobuje, že se zpět do analyzátoru odráží méně energie, což zvyšuje hodnotu činitel odrazu.

Materiál fleece jsem dále netestoval z důvodů, který jsem uvedl v kapitole 1. Jeho povrch je příliš nerovný, takže není vhodný pro nanesení vodivé barvy a není možné na něj nanést nažehlovací fólii bez zničení materiálu.

## Bavlna 1:

Při konstrukci této antény jsem postupoval stejně jako v předchozím případě. Na jednostranný substrát FR4 s rozměry 4x5 cm jsem připevnil látkovou strukturu a na ni motiv flíčkové antény z měděné fólie. Sestrojený model můžete vidět na následujícím obrázku (Obr. 4.3).

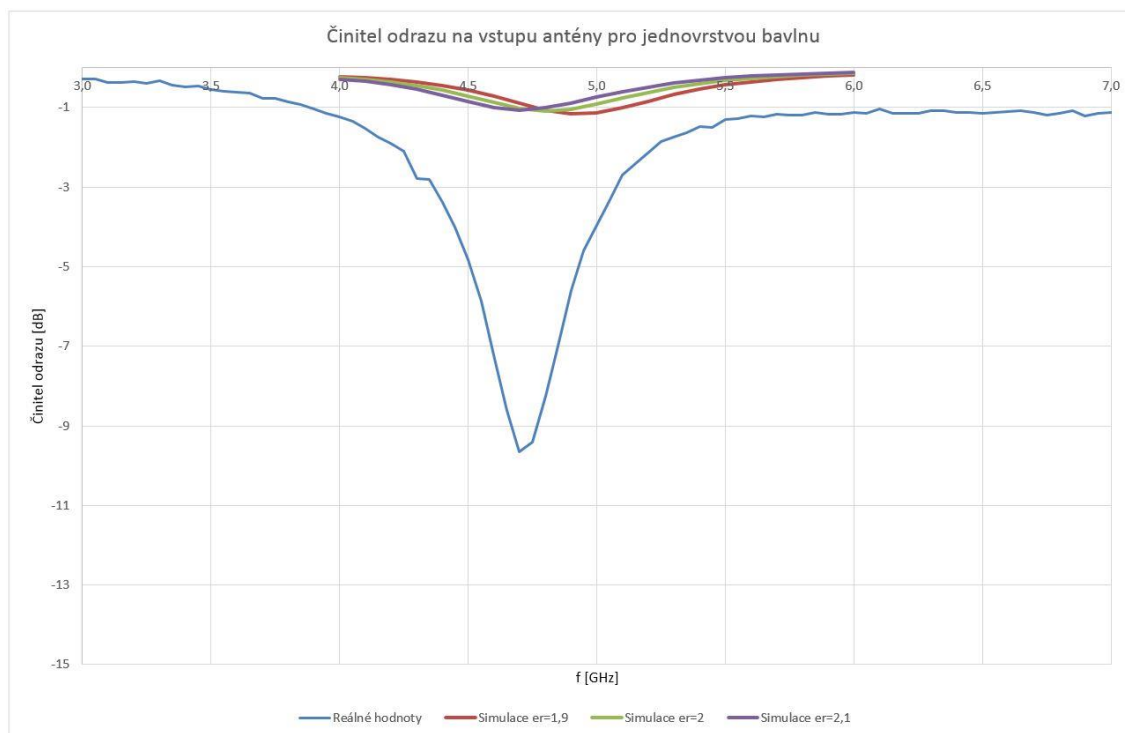


Obr. 4.3: Sestrojená anténa na substrátu z jednovrstvé bavlny.

Rozměry sestrojené antény jsem změřil pod mikroskopem a poté jsem v programu HFSS vytvořil model se stejnými rozměry:

- Šířka flíčku  $W = 15,87 \text{ mm}$
- Délka flíčku  $L = 21,62 \text{ mm}$
- Šířka napájecího mikropásku  $w = 2,46 \text{ mm}$
- Výška látkového substrátu  $h = 0,52 \text{ mm}$

Anténu jsem proměřil a zjistil charakteristiku, která je na Obr. 4.4 společně s charakteristikami z programu Ansys HFSS.



Obr. 4.4: Porovnání mezi charakteristikami reálnými a simulovanými v HFSS pro jednovrstvou bavlnu.

Měření reálné antény ukázalo, že činitel odrazu na vstupu je velice malý. Nedosahuje ani hodnoty -10 dB, která se považuje za minimum pro to, aby anténa mohla správně fungovat. Opravdu malou hodnotu činitele odrazu potvrdila i simulace modelu pro několik hodnot relativní permitivity. V simulaci hodnota činitele odrazu nedosahuje ani -2 dB. Z tohoto důvodu jsem další simulace pro tuto látkovou strukturu neprováděl.

## Bavlna 2

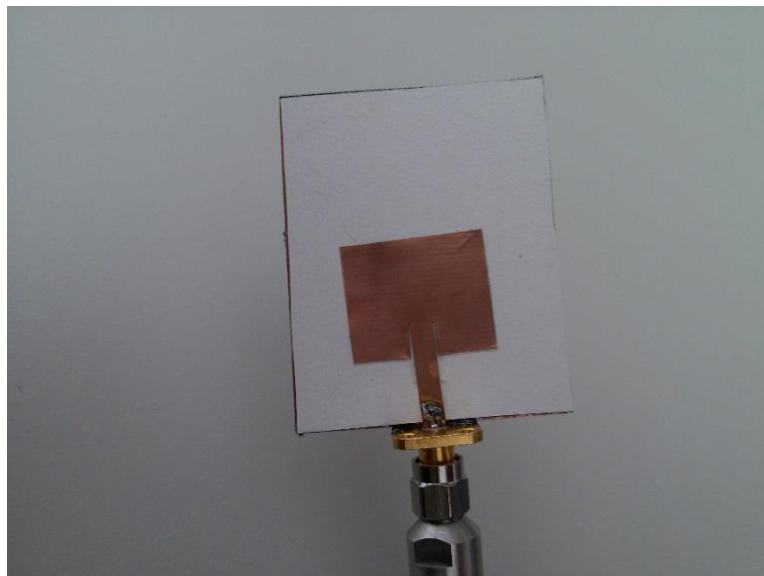
Tato látka společně s povrchovou úpravou pomocí nažehlovací fólie je podle naměřených charakteristik nejvhodnější látkový substrát pro tištěnou anténu. Má všechny vlastnosti popsané v první kapitole, a jak uvidíme níže, vykazuje i dobře předvídatelné chování rezonanční frekvence v souladu s požadovanou hodnotou.

Pro vytvoření první reálné antény jsem předpokládal relativní permitivitu  $\epsilon_r = 2,1$ . Pomocí skriptu v Matlabu byly vypočítány rozměry pro první model podle předpokládané  $\epsilon_r$  s těmito hodnotami:

- Šířka flíčku:  $W = 20,8 \text{ mm}$
- Délka flíčku:  $L = 17,5 \text{ mm}$
- Hloubka zanoření:  $y_0 = 5,3 \text{ mm}$
- Šířka napájecího mikropásku:  $w = 2,3 \text{ mm}$

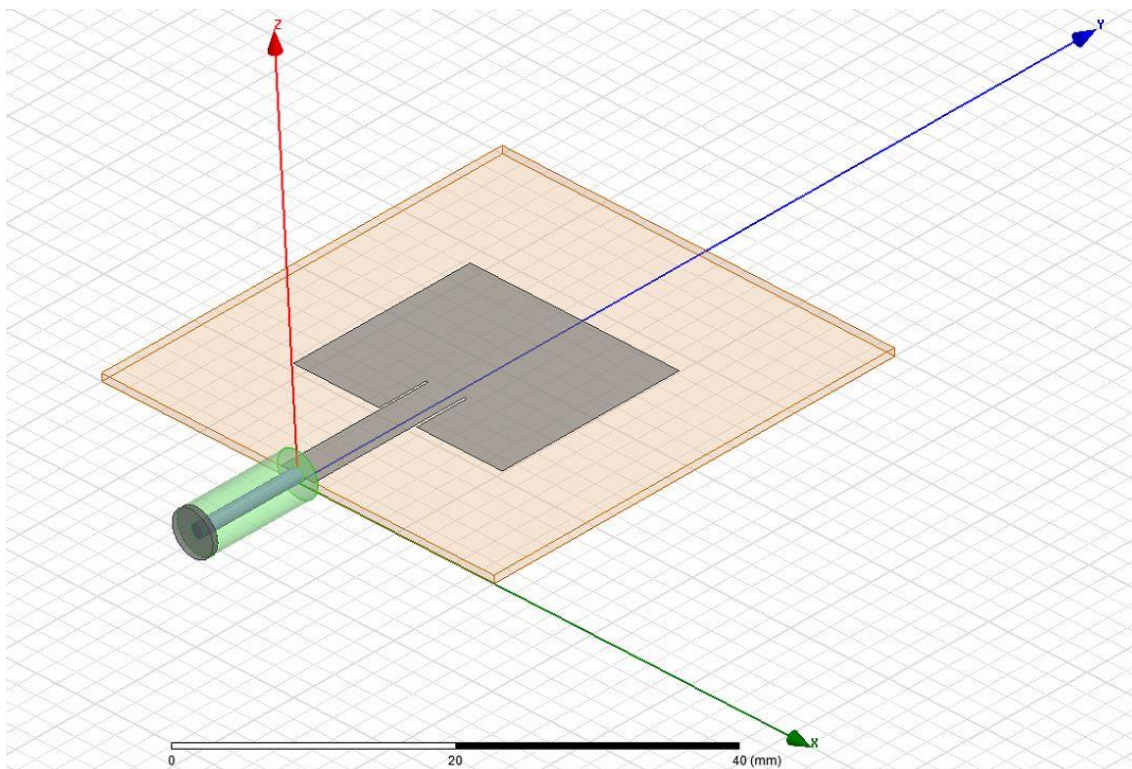
Při výrobě mikropáskového flíčku se vlivem nepřesného rýsování, neurčitosti čáry a nepřesností při stříhání měděné fólie nepodařilo vyrobit motiv přesně podle zadání. Vyrobenou anténu (Obr. 4.5) jsem změřil pod mikroskopem s přesností na setiny milimetru:

- Šířka flíčku:  $W = 21,29 \text{ mm}$
- Délka flíčku:  $L = 17,65 \text{ mm}$
- Hloubka zanoření (vlevo od pásku):  $y_1 = 4,67 \text{ mm}$
- Hloubka zanoření (vpravo od pásku):  $y_2 = 4,97 \text{ mm}$
- Šířka napájecího mikropásku:  $w = 3,36 \text{ mm}$



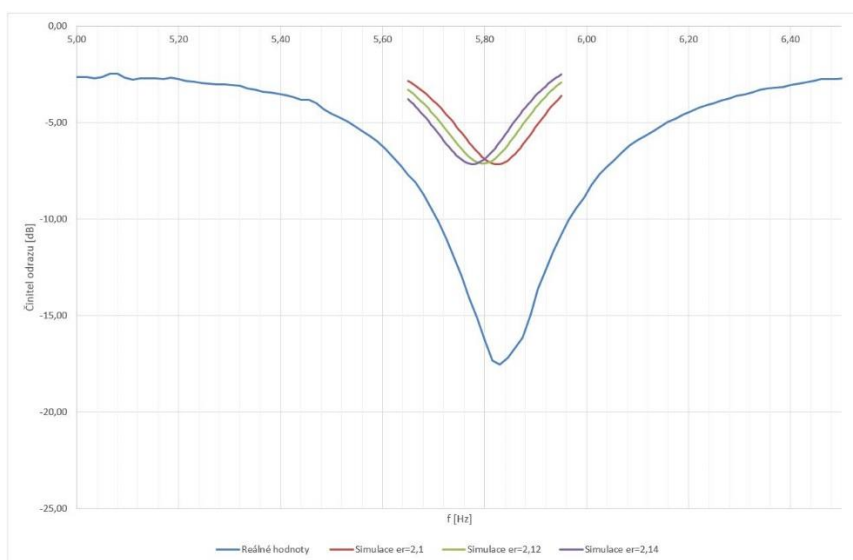
Obr. 4.5: Vyrobená anténa pro rezonanční frekvenci 5,8 GHz

Tyto rozměry jsem přesně přenesl do modelu v HFSS, kde jsem pokračoval simulací s rozmitáním frekvence a relativní permitivity, abych mohl látkové struktuře přiřadit konkrétní hodnotu relativní permitivity. Model v HFSS můžete vidět na následujícím obrázku (Obr. 4.6).



Obr. 4.6: Model antény pro 5,8 GHz v HFSS

Tento model navržený pro rezonanční frekvenci 5,8 GHz jsem proměřil na spektrálním analyzátoru a srovnal s výsledky získanými z programu HFSS. Grafické srovnání charakteristik můžete vidět na následujícím obrázku (Obr. 4.7).



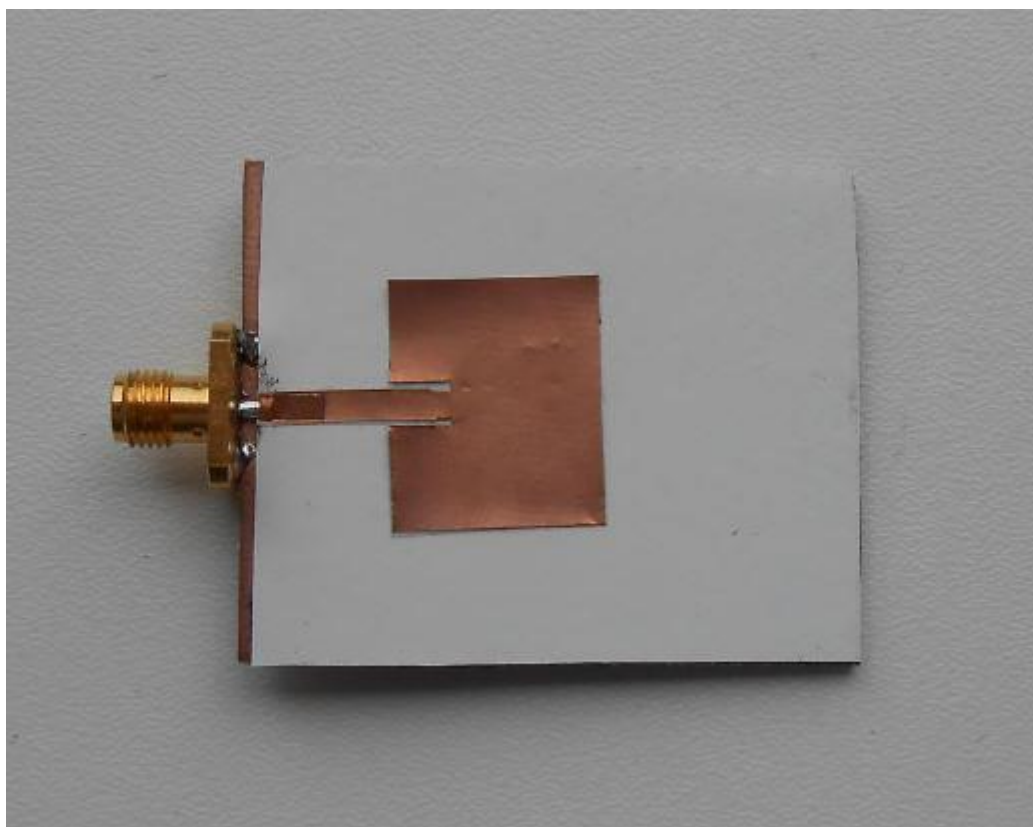
Obr. 4.7: Porovnání mezi charakteristikami reálnými a simulovanými v HFSS.

Na obrázku je vidět, že rezonanční frekvence je těsně nad úrovní 5,8 GHz stejně jako rezonanční frekvence simulovaného průběhu pro relativní permitivitu 2,1. Z těchto údajů vyplývá, že prvotní odhad byl velice přesný. Z toho důvodu jsem vyrobil další model, který jsem navrhoval na rezonanční kmitočet 6 GHz pro relativní permitivitu  $\epsilon_r = 2,1$ . Pro návrh rozměrů flíčku jsem opět použil program napsaný v Matlabu, ze kterého vyšly tyto rozměry:

- Šířka flíčku:  $W = 20,1 \text{ mm}$
- Délka flíčku:  $L = 16,9 \text{ mm}$
- Hloubka zanoření:  $y_0 = 5,1 \text{ mm}$
- Šířka napájecího mikropásku:  $w = 2,3 \text{ mm}$

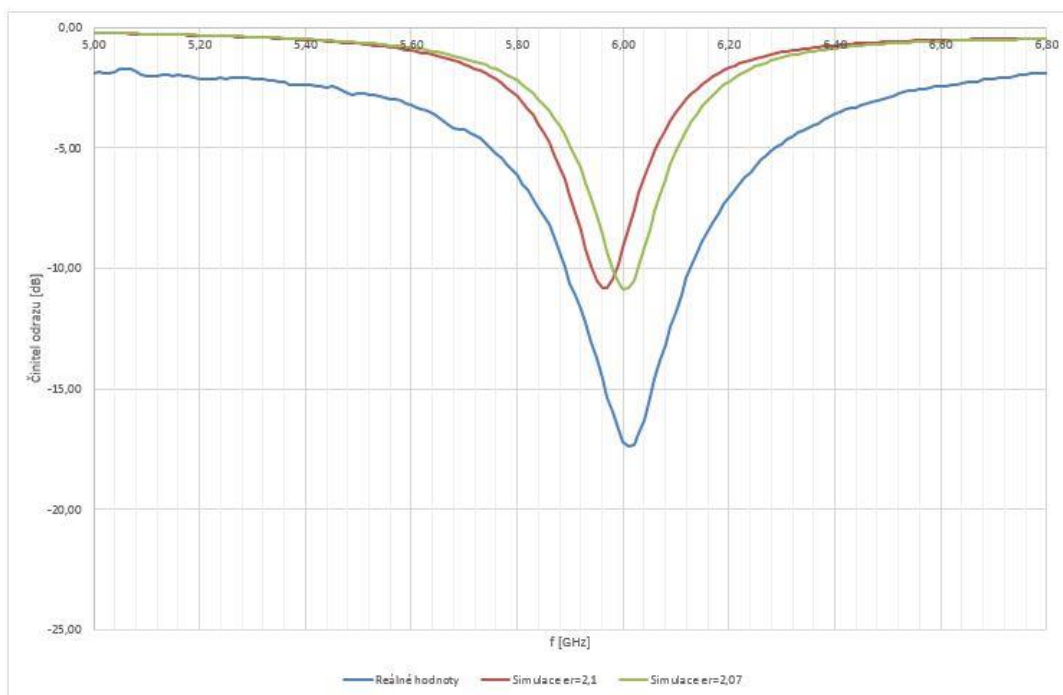
Po sestrojení antény a proměření pod mikroskopem jsem v programu HFSS vytvořil model s těmito rozměry:

- Šířka flíčku:  $W = 20,255 \text{ mm}$
- Délka flíčku:  $L = 17,005 \text{ mm}$
- Hloubka zanoření:  $y_0 = 4,985 \text{ mm}$
- Šířka napájecího mikropásku:  $w = 2,435 \text{ mm}$



Obr. 4.8: Reálná anténa pro frekvenci 6 GHz.

Na následujícím obrázku je porovnání mezi změřenými reálnými charakteristikami a charakteristikami, které byly nasimulovány v HFSS.



Obr. 4.9: Porovnání mezi charakteristikami reálnými a simulovanými pro model 6 GHz.

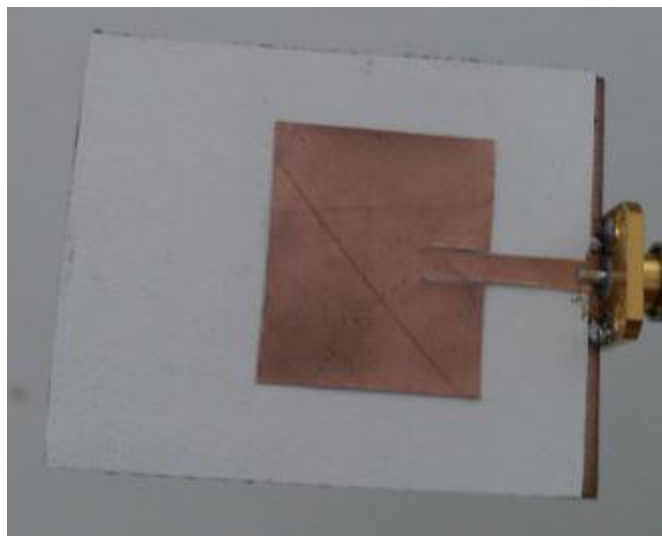
V grafu (Obr. 4.9) je vidět, že vyrobená anténa rezonuje mírně nad frekvencí 6 GHz, na které byla navržena. Nejvíce podobný průběh činitele odrazu je u simulace pro relativní permitivitu  $\epsilon_r = 2,07$ . Na obrázku je znázorněn i průběh charakteristik pro relativní permitivitu 2,1, který ale nerezonuje přesně na frekvenci 6 GHz. Tato skutečnost je pravděpodobně způsobena odchylkou mezi navrženými parametry a parametry sestrojené antény.

Pro další ověření hodnoty relativní permitivity  $\epsilon_r = 2,1$ , jsem sestrojil další anténu konstruovanou na rezonanční kmitočet 5 GHz. Anténa byla opět na substrátu FR4 o rozměrech 4x5 cm s měděným potiskem na jedné straně. Rozměry motivu byly vypočítány takto:

- Šířka flíčku:  $W = 24,1 \text{ mm}$
- Délka flíčku:  $L = 20,3 \text{ mm}$
- Hloubka zanoření:  $y_0 = 6,2 \text{ mm}$
- Šířka napájecího mikropásku:  $w = 2,3 \text{ mm}$

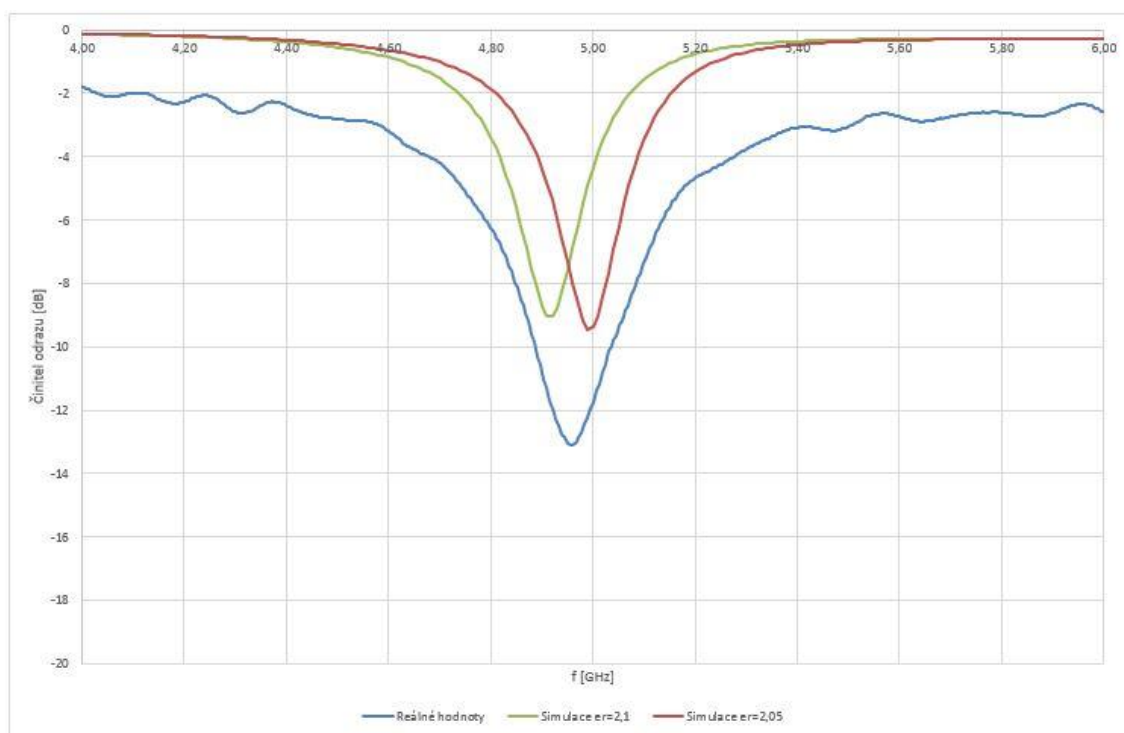
Rozměry změřené pod mikroskopem a namodelované v HFSS:

- Šířka flíčku:  $W = 24,1 \text{ mm}$
- Délka flíčku:  $L = 20,1 \text{ mm}$
- Hloubka zanoření:  $y_0 = 5,8 \text{ mm}$
- Šířka napájecího mikropásku:  $w = 2,9 \text{ mm}$



Obr. 4.10: Reálná anténa pro frekvenci 5 GHz

Porovnání mezi reálnými charakteristikami a simulovanými je znázorněno na dalším obrázku (Obr. 4.11).

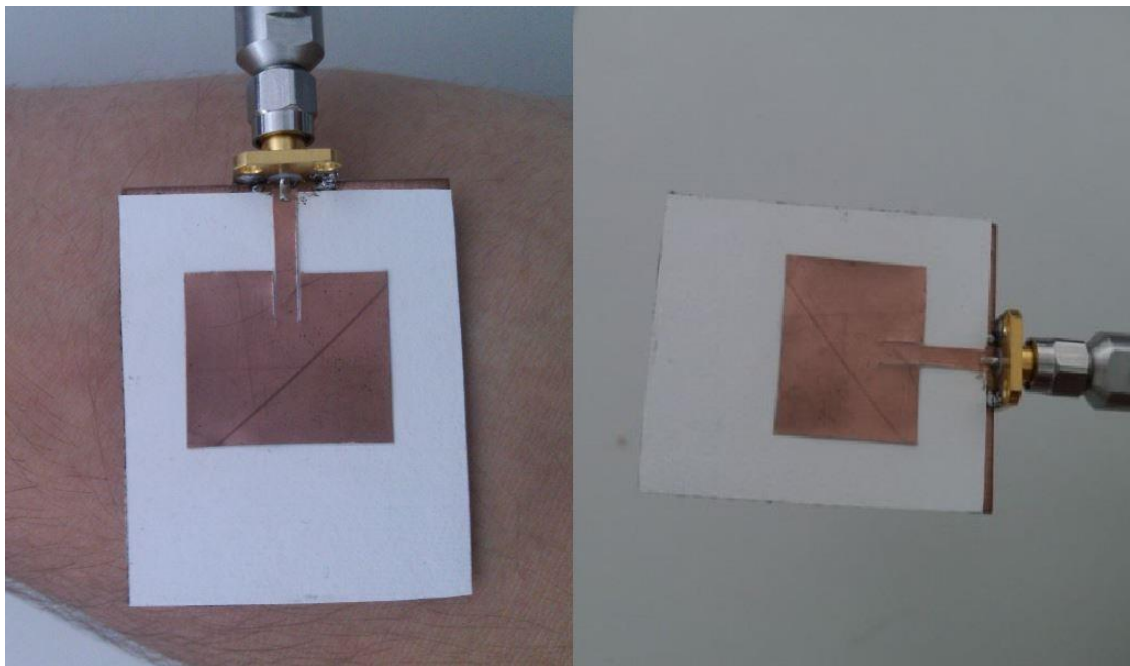


Obr. 4.11: Porovnání mezi charakteristikami reálnými a simulovanými pro anténu konstruovanou na 5 GHz.

Z grafu je možné vyčíst, že relativní permitivita se opět pohybuje mírně pod hodnotou  $\epsilon_r = 2,1$ , stejně jako v obou předchozích případech.

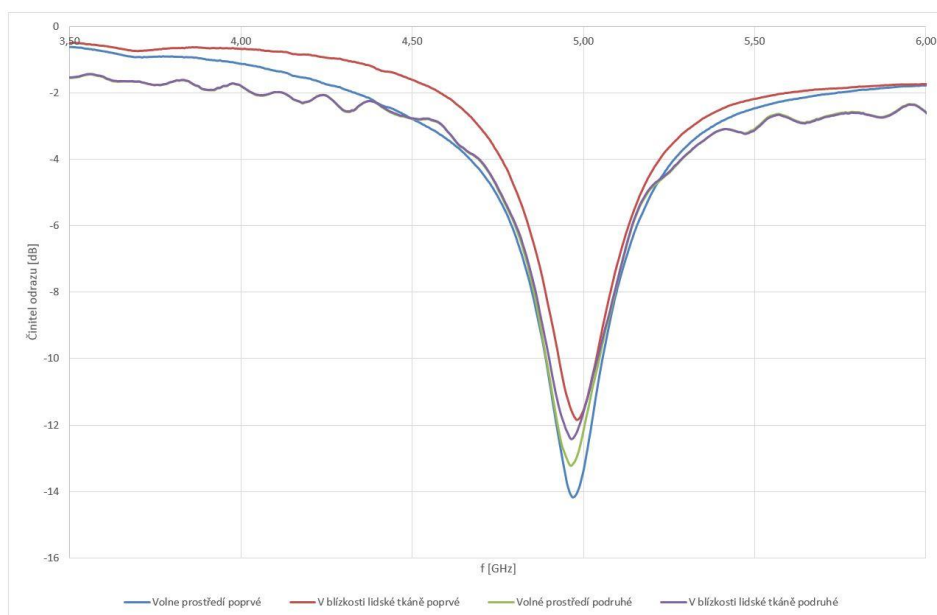
# Vliv okolí na vlastnosti antény

Tištěná textilní anténa bude vždy svou zemní plochou umístěna na lidském těle, nebo v jeho těsné blízkosti. Pro zmapování vlivu lidské tkáně na charakteristiky antény byla provedena série měření: jednou byla anténa umístěna do volného prostoru a podruhé byla uložena na lidskou tkáň (Obr. 4.12).



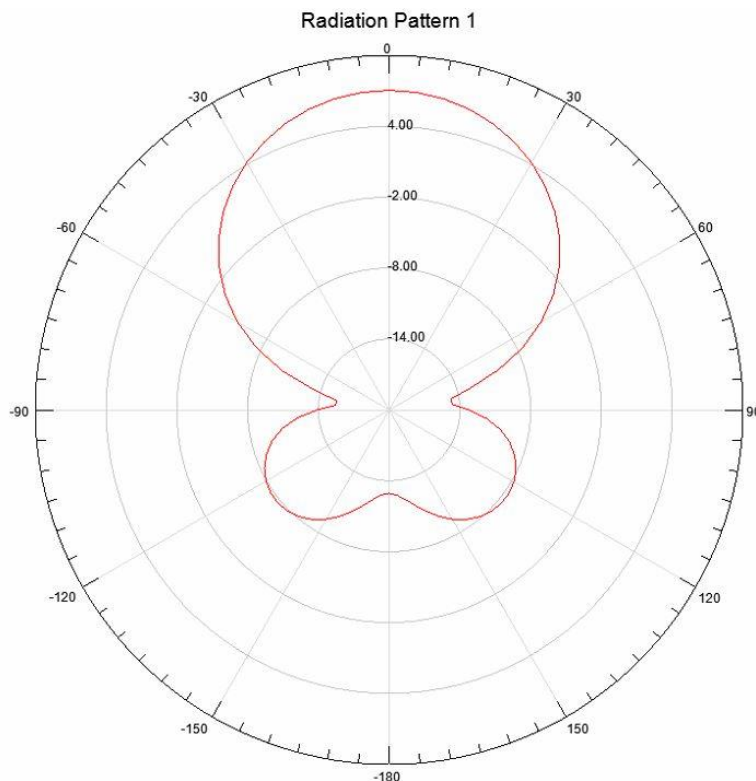
Obr. 4.12: Ukázka měření ovlivňování antény lidskou tkání u modelu konstruovaného na 5 GHz

Pro tyto dva případy jsem zaznamenal průběh charakteristiky činitele odrazu, které můžete vidět na následujícím obrázku (Obr 4.13).



Obr. 4.13: Ukázka vlivu lidské tkáně na charakteristiku antény

Z grafů je vidět, že vliv lidské tkáně za zemní deskou antény je z hlediska ovlivnění charakteristik činitele odrazu téměř zanedbatelný. Toto měření dokazuje, že zemní deska je dostatečně velká, aby dění za touto zemní deskou nemělo na vlastnosti antény významný vliv. Tento výsledek se dal předpokládat i ze směrové charakteristiky fličkové antény, která je znázorněná na Obr. 4.14.



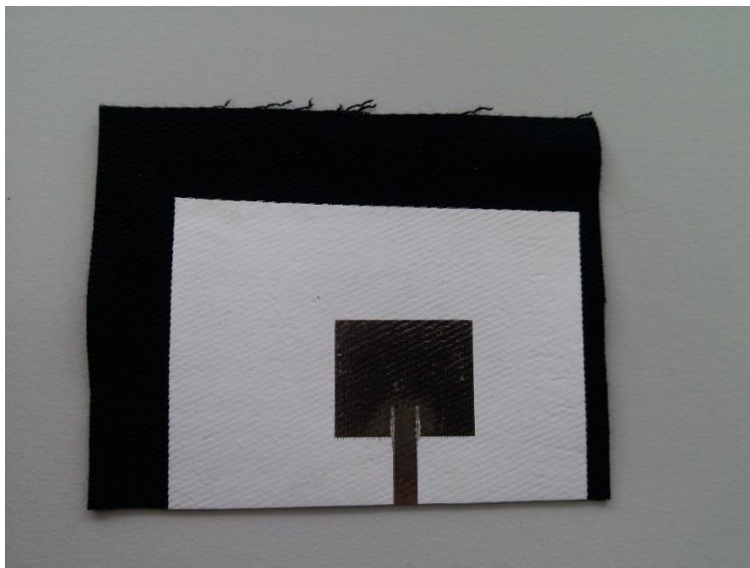
Obr. 4.14: Směrová charakteristika fličkové antény.

## 5 REALIZACE A MĚŘENÍ TIŠTĚNÉ ANTÉNY

Z výsledků předchozích porovnávání reálných antén a simulací provedených v Ansys HFSS můžeme říci, že látková struktura má relativní permitivitu v okolí hodnoty  $\epsilon_r = 2,1$ . Pro zjištění chování látkové struktury potištěné vodivou barvou jsem se rozhodl nechat zhotovit fliček, který má stejné rozměry jako anténa navržená na 5,8 GHz. Upravil jsem pouze zanoření, které jsem sjednotil na hodnotu  $y_0 = 4,67 \text{ mm}$ . Rozměry tištěné antény tedy jsou:

- Šířka fličku:  $W = 21,29 \text{ mm}$
- Délka fličku:  $L = 17,65 \text{ mm}$
- Hloubka zanoření:  $y_0 = 4,67 \text{ mm}$
- Šířka napájecího mikropásku:  $w = 3,36 \text{ mm}$
- Šířka zářezu po straně napájení:  $y_1 = 0,26 \text{ mm}$
- Šířka zářezu po straně napájení:  $y_2 = 0,22 \text{ mm}$

Vyrobená tištěná anténa je na Obr. 5.1. Po vytisknutí antény musely být udělány ještě drobné úpravy. Při tisku se vlivem malé šířky postranních zářezů barva na pár místech slila a musela být manuálně odstraněna. Z toho důvodu má prostor kolem mikropáskového napájení mírně odlišný odstín.



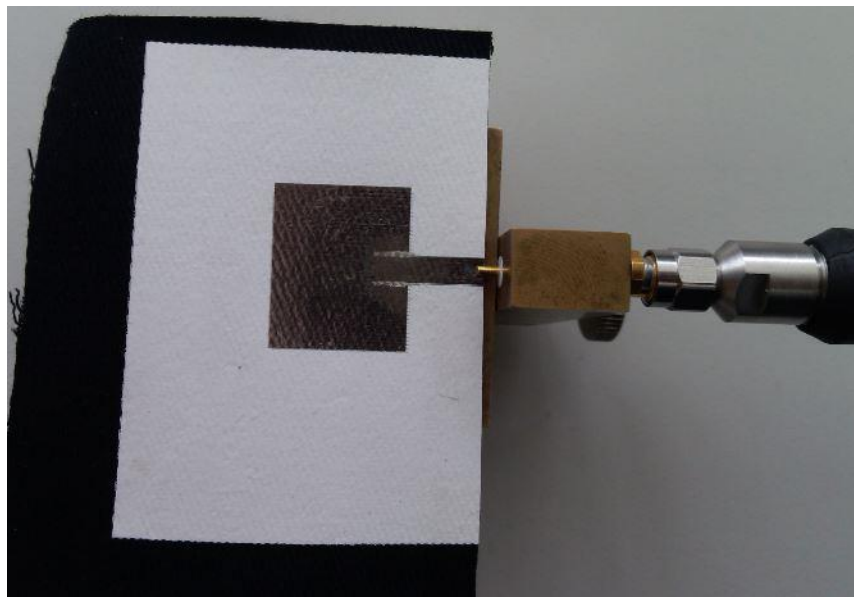
Obr. 5.1: Tištěná anténa na bavlně 2 s nažehlovací fólií Digiflex - Master matná

Měření této antény nebylo možné provést klasickým způsobem, tj. připájením konektoru k motivu. Při pokusu připájet na testovací stříbrnou vodivou barvu konektor, začne nažehlovací fólie vlivem tepla měknout a její struktura se velice rychle rozpadá a tím se celý motiv znehodnocuje. Na několikátý pokus se povedlo ke stříbrné barvě vodivě připájet kus mědi, ale celý proces je velice nejistý a může se snadno stát, že se zničí celý stříbrný motiv. Výsledky pokusu můžete vidět na Obr. 5.2.

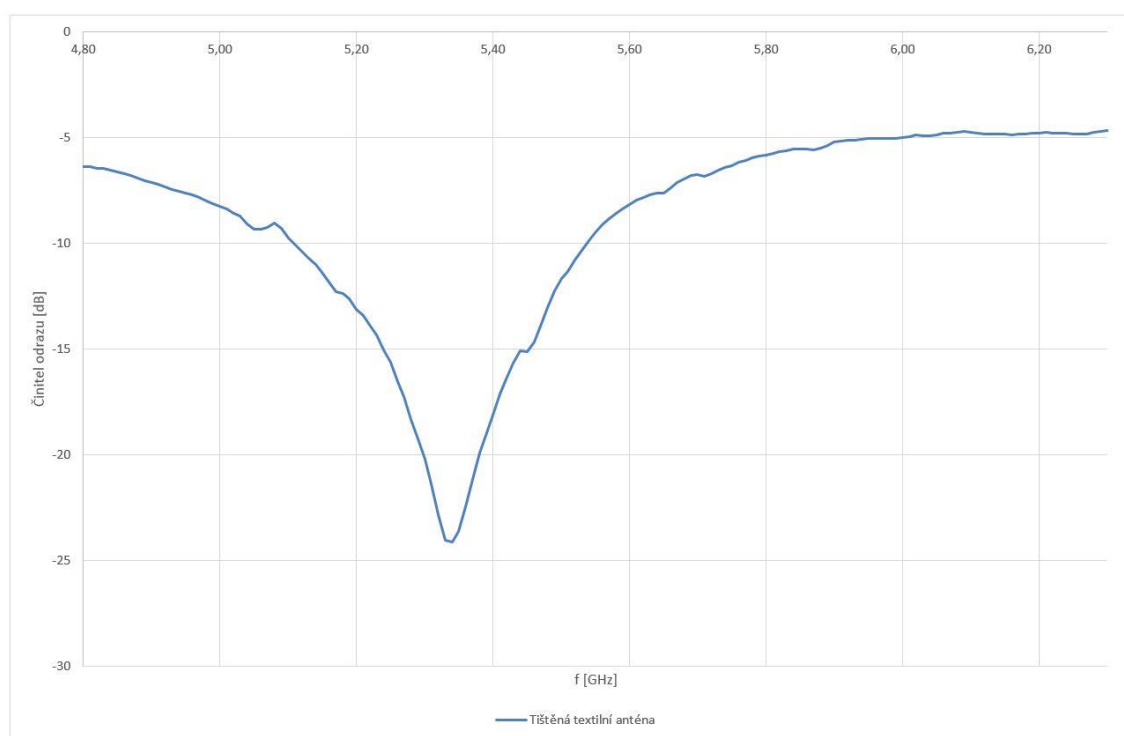


Obr. 5.2: Pokusy o připevnění mědi na stříbrnou barvu.

Z důvodu velkého nebezpečí zničení motivu při pájení konektoru se anténa měřila pomocí speciálního držáku, u kterého je vestavěn 3,5 mm SMA konektor (Obr. 5.3). Látka se stříbrným motivem byla proměřena a byly zjištěny tyto charakteristiky (Obr. 5.4).



Obr. 5.3: Způsob měření tištěné antény.



Obr. 5.4: Charakteristiky činitele odrazu tištěné textilní antény.

Z grafu je vidět, že rezonanční frekvence je vůči předpokladu posunutá o zhruba 0,45 GHz. Tato odchylka je způsobena použitím stříbrné barvy místo měděné fólie. Pro přesné určení parametrů látkové struktury v aplikaci tištěných antén je třeba měřit látkovou strukturu společně v tiskovou vodivou barvou.

Anténa je celkově velice ztrátová. To plyne z vysokého činitele odrazu i mimo rezonanční frekvenci. Činitel odrazu mimo rezonanci je -5 až -6 dB, což odpovídá tomu, že se ztrácí 2/3 výkonu mimo rezonanční frekvenci. U modelů s motivem zhotoveným z měděné fólie se činitel odrazu mimo rezonanční pásmo pohybuje kolem hodnoty -2dB, což značí, že se ztrácí pouze 1/3 výkonu.

Provedl jsem test na kvalitu spojení mezi jednotlivými místy na stříbrném motivu. Testoval jsem klasickým propískáváním, tedy indikací vodivého spojení dvou bodů. Z tohoto testu vyšel stříbrný motiv poměrně špatně. Několikrát se stalo, že bod motivu nebyl vodivě spojen se zbytkem motivu. Na straně zemní desky byl výsledek ještě horší. Vlivem malých nerovností a slabé vrstvy stříbrné barvy vznikalo velice mnoho bodů, které spolu vůbec vodivě spojeny nebyly. Pravděpodobně z tohoto důvodu byly ztráty i mimo rezonanci tak veliké.

Možným řešením tohoto problému je nanesení více vrstev stříbrné barvy ve více směrech tak, aby vznikla síť a jednotlivé poruchy mohly být zastoupeny sousedním spojením.

## 6 ZÁVĚR

Cílem této práce bylo připravit látku pro tisk vodivého motivu a charakterizovat vlastnosti látky tak, aby navržené antény odpovídaly simulacím z programu HFSS. Jako látku jsem zvolil bavlnu ve výšce  $h = 0,54 \text{ mm}$ . Bavlna samotná je na povrchu příliš členitá na to, aby se na ni mohlo tisknout, proto jsem zvolil povrchovou úpravu nažehlením fólie Digiflex – Mater matná. Tato fólie vytváří svým složením vhodný podklad pro tiskovou barvu a zároveň slouží jako ochranná vrstva proti navlhnutí látky a tím změní parametry antény. Takto složené materiály neboli látková struktura, byly použity pro sestavení několika modelů reálných antén.

Tyto modely, společně s modely vytvořenými v programu HFSS, byly použity pro zjištění relativní permitivity látkové struktury. Při testovacích měřeních, kdy byl motiv vytvořen z měděné fólie, vycházela relativní permitivita na hodnotu  $\epsilon_r = 2,1$ . Při této hodnotě relativní permitivity se nejvíce shodovaly charakteristiky naměřené na reálné anténě s charakteristikami simulovanými v programu HFSS u všech vyrobených prototypů.

V rámci práce byl vytvořen první prototyp tištěné antény, který měl rezonovat na frekvenci  $f_r = 5,8 \text{ GHz}$ . Rezonanční frekvence tištěné antény však byla posunutá na frekvenci  $f_r = 5,34 \text{ GHz}$ . Při ověřování kvalit propojení v rámci natištěného motivu se však ukázalo, že některé body nejsou vůbec vodivě spojeny, což ovlivňuje výsledné charakteristiky antény. Stejný problém byl u zemní plochy, kde bylo propojení navázáno pouze na místech se souvislým potiskem. I malé nerovnosti způsobovaly poruchy ve spojení.

Řešením tohoto problému je nanesení více vrstev vodivé tiskové barvy a zajištění opravdu rovného povrchu pro tištěnou oblast.

Výsledkem práce je zjištění, že látková struktura se dá použít jako anténní substrát. Pro dosažení přesnějších výsledků je potřeba odstranit problémy s tiskovou barvou a pokusy provádět s konkrétní technologií výroby celé antény.

# LITERATURA

- [1]** ČERNOHORSKÝ, D., NOVÁČEK, Z., RAIDA, Z. Elektromagnetické vlny a vedení. 2. rozšířené a přepracované vydání. Brno: Nakladatelství VUTIAM, 1999. ISBN 80-214-1261-5.
- [2]** R&S ZVL Vector Network Analyzer, Operating Manual, Rohde & Schwarz, Munich, Germany, 2008.
- [3]** SVAČINA, J., RŮŽIČKA, V., PUNČOCHÁŘ, J., Teorie obvodů V a technika velmi krátkých vln – Laboratorní cvičení. Skriptum FE VUT v Brně, SNTL, Praha 1980.

# SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZNAČEK

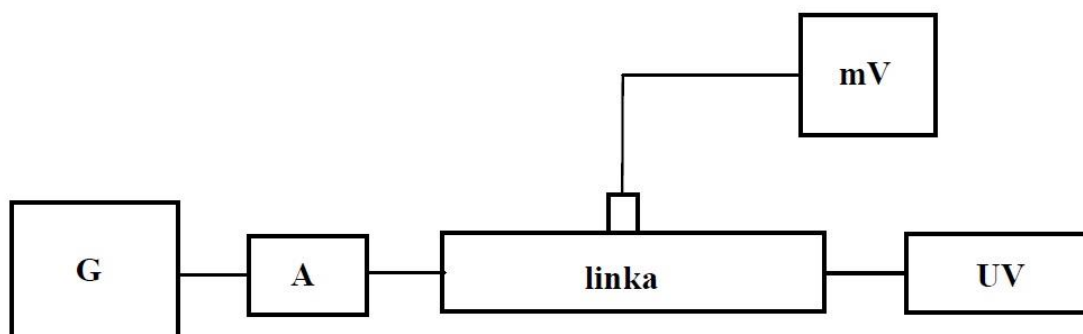
|              |                                                            |
|--------------|------------------------------------------------------------|
| $\lambda$    | vlnová délka [m]                                           |
| $f_r$        | rezonanční frekvence [Hz]                                  |
| $\lambda_d$  | vlnová délka v dielektriku [m]                             |
| $\lambda_g$  | vlnová délka ve vlnovodu [m]                               |
| $c$          | rychlost světla = $3e8$ [m/s]                              |
| $\epsilon_r$ | relativní permitivita                                      |
| $W$          | šířka motivu flíčkové antény [m]                           |
| $L$          | délka motivu flíčkové antény [m]                           |
| $w$          | šířka napájecího mikropásku [m]                            |
| $y_0$        | hloubka zanoření napájecího mikropásku [m]                 |
| $h$          | výška substrátu [m]                                        |
| $Z_0$        | charakteristická impedance koaxiálního kabelu [ $\Omega$ ] |
| $Z_{vst}$    | vstupní impedance flíčkové antény [ $\Omega$ ]             |
| $S_{11}$     | velikost činitele odrazu na vstupu antény [dB]             |
| $Z_{11}$     | impedance na vstupu antény [ $\Omega$ ]                    |
| FEM          | finite element method                                      |
| HFSS         | high frekvenci structural simulator                        |

# SEZNAM PŘÍLOH

|          |                                                                    |           |
|----------|--------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>A</b> | <b>Postup výpočtu relativní permitivity</b>                        | <b>27</b> |
| <b>B</b> | <b>Program v Matlabu pro výpočet rozměrů mikropáskového flíčku</b> | <b>29</b> |
| <b>C</b> | <b>Datasheet nažehlovací fólie</b>                                 | <b>30</b> |
| <b>D</b> | <b>Datasheet tiskové vodivé barvy</b>                              | <b>31</b> |

## A POSTUP VÝPOČTU RELATIVNÍ PERMITIVITY

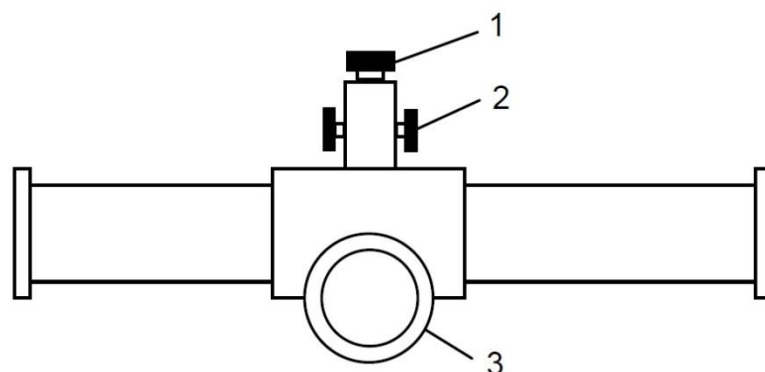
Měřicí souprava je sestavena z mikrovlnného generátoru **G**, proměnného atenuátoru **A**, vlnovodné měřicí linky s obdélníkovým vlnovodem R70 s rozměry  $a = 34,85$  mm a  $b = 15,8$  mm (pracovní pásmo tohoto vlnovodu je od 5,38 do 8,18 GHz) a úseku vlnovodu **UV**, jehož konec je zkratován, a těsně ke zkratu je umístěn vzorek měřeného materiálu. Napětí na výstupu diodového detektoru sondy linky se měří milivoltmetrem **mV** (obr 0.1).



Obr. 0.1: Uspořádání měřicí soupravy pro měření relativní permitivity

V posuvném vozíku linky je zabudována sonda, která snímá elektrické pole ve vlnovodu, rezonátor a detektor. Detektor převede vysokofrekvenční napětí indukované v sondě na snadno měřitelné stejnosměrné (nebo nízkofrekvenční) napětí. Při posouvání vozíku se sondou podél vedení se podle intenzity pole v místě sondy mění výstupní napětí detektoru. Tak můžeme najít uzly i kmitny stojatého vlnění a pomocí měřítka na lince určit jejich polohu.

Před měřením nastavíme do příslušného režimu mikrovlnný generátor. Stisknutím tlačítka **INSTR PRESET** uvedeme tento generátor do definovaného pracovního režimu specifikovaného v návodu k obsluze. Stiskneme tlačítko **CW** pro nastavení kmitočtové nerozmítaného režimu generátoru na pevném kmitočtu. Hodnotu tohoto kmitočtu je možné číst na levém displeji **FREQUENCY** a lze ji měnit pomocí příslušného knoflíku (levého) nebo zadáním číselné hodnoty a měrné jednotky (GHz, MHz) z numerické klávesnice generátoru. Výstupní výkon generátoru nastavíme na hodnotu 10 dBm knoflíkem na zásuvné jednotce nebo zadáním tlačítka, tj. stiskneme **POWER LEVEL -> 10 -> dBm** (hodnota výkonu se čte na displeji **POWER** na zásuvné jednotce). Generátor přitom pracuje v režimu s vnitřní výkonovou stabilizací (na tlačítko **INT** svítí dioda LED - skupina **ALC MODE**). Aby bylo možno detekovat napětí nf. milivoltmetrem, musí být signál generovaný mikrovlnným generátorem amplitudově popř. pulzně modulovaný. Tento modulovaný signál získáme stisknutím tlačítka **MOD** (tlačítko je umístěno na panelu dole uprostřed). Potřebujeme-li v průběhu měření dočasně vypnout mikrovlnný generátor, lze to učinit stiskem tlačítka **RF** umístěného nad N-konektorem s výstupním signálem (**OUTPUT**). Při vlastním měření je nutné zabránit ovlivňování generátoru změnami zátěže. Toho dosáhneme pomocí pevně nastaveného atenuátoru **A** (obr. 0.1).



Obr. 0.2: Vlnovodná linka

Vlnovodná linka má v širší stěně vlnovodu podélnou drážku, kterou do jeho dutiny zasahuje sonda (kolík) pro snímání elektrického pole uvnitř vlnovodu. Hloubku zasunutí sondy je možno měnit otáčením šroubu 1 na vrcholu hlavice sondy (obr. 0.2) Při hlubším zasunutí však dochází k deformaci pole ve vlnovodu a výsledky měření nejsou správné. Proto **její nastavení neměňte**. Sonda se podél vedení posouvá ručním kolečkem (někdy i s jemným posuvem), poloha se určí podle měřítka s noniem. Napětí indukované v sondě se přivádí na dutinový rezonátor a pak na diodový detektor. Jeho výstup je připojen na konektor (BNC) a kabelem pak na vstup nf. milivoltmetru. Dutinu sondy je třeba vyladit do rezonance na kmitočtu měření otáčením knoflíků 2 uprostřed hlavice sondy na maximální výchylku milivoltmetru.

Pro stanovení relativní permitivity tkané látky na kmitočtu 5,8 GHz je nutné nejdříve při zkratovaném úseku vlnovodu stanovit přesnou polohu minima. Je třeba měřit přesně, s využitím nonia na měřítku a souměrně ležících bodů se stejnou výchylkou měřidla (minimum je uprostřed nich). Pak vložíme do vlnovodu vzorek měřeného materiálu o známé délce  $d$  a zaznamenáme novou polohu minima. Stanovíme posuv minima  $\Delta y$ .

Skript z matlabu, podle kterého počítám relativní permitivitu. Vzorce jsou vypsány z [3] a doplněny o mé naměřené hodnoty.

```
d=0.00345; %tloušťka vzorku
fzvol=5.8e+9; %zvolená frekvence
mi0=1.2566e-6; %permeabilita vakua
mir= 1; %relativní permeabilita
a=0.03485; %strana a vlnovodu R70
y1=0.00021; %posun minima, při tloušťce vzorku d
y2=0.00104; %posun minima, při tloušťce vzorku 2d
lambdag= 0.07708 ; %délka vlny ve vlnovodu
c=3*10^8; %rychlost světla
lambda=c/fzvol %vlnová délka
lambdam=2*a; %mezní vlnová délka
beta=(2*pi)/(lambdag) %konstanta šíření
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
pom=1-(lambda/lambdam)^2 %pomocná proměnná pro výpočet
pom2=(lambda/lambdam)^2 %pomocná proměnná pro výpočet
eps=(1/mir)*[(betaE/beta)^2*(pom)+(pom2)] %εr = 1,49
```

## B PROGRAM V MATLABU PRO VÝPOČET ROZMĚRŮ MIKROPÁSKOVÉHO FLÍČKU

```

e_r = 2.1; % relativni permitivita dielektrika odhadnutá panem láčikem
h = 0.72e-3; % vyska dielektrika změřená Trubákem[m]
f = 5.8e9; % frekvence [Hz]
Z0 = 50; % charakteristicka impedance [Ohm]
c = 3e8; % rychlost světla [m/s]

W = (c/(2*f))*(sqrt(2/(e_r+1))) % sirka pasku [m]
e_ef = 0.5*(e_r+1) + 0.5*(e_r-1)/(sqrt(1+12*h/W)); % efektivni permitivita dielektrika
dL = h*(0.412*(((e_ef+0.3)*((W/h)+0.264))/((e_ef-0.258)*((W/h)+0.8)))); % rozšíření kvůli rozptylovým
polím [m]
L = c/(2*f*sqrt(e_ef))-2*dL % slkutečná délka flíčku [m]
lam = c/f; % vlnová délka [m]
k0 = (2*pi)/lam; % pomocná proměná pro výpočet impedance na začátku flíčku
G1 = (W/(120*lam))*(1-(1/24)*((k0*h)^2))
Zin = 1/(2*G1) % vstupní impedance [Ohm]
y0 = (L/pi)*acos(sqrt(Z0/Zin)) % vzdálenost zanoření flíčku [m]
A = (Z0/60)*sqrt(0.5 * e_r + 0.5) + (e_r-1)*(0.23 + 0.11/e_r)/(e_r+1) % konstanta pro vypocet
B = (60*pi*pi)/(Z0*sqrt(e_r)); % konstanta pro vypocet
w = (h*2/pi) * (B-1-log(2*B-1)+ ((e_r - 1)/(2*e_r))*(log(B-1)+0.39 - 0.61/e_r)) % sirka napajeciho pasku
[m]

```

## C DATASHEET NAŽEHLOVACÍ FÓLIE

**ALPHASET**

### DIGIFLEX - MASTER lesk/mat Solvent/Latex

**Fólie:** kvalitní flexová fólie na bázi polyuretanu, 80µm

**Životnost:** lze prát do 80 °C, není odolná proti chemickým čistícím prostředkům,

nutno prát a žehlit naruby a používat pouze jemný prací prášek na barevné prádlo, vhodná do sušičky

**Upotřebení:** potisknutelná solventními i latexovými tiskárnami,

k nažehlování na textilie z bavlny, polyesteru a směsí z bavlny a polyesteru

**Před každým použitím otestovat vhodnost materiálu!**

Fólie není vhodná pro nylon a látky impregnované proti vlhkosti.

Ceny v Kč bez DPH

| Šíře fólie | Barva          | Cena za        | 1-3m   | 4-24m  | 1 role (25bm) |
|------------|----------------|----------------|--------|--------|---------------|
| 50 cm      | PFX701<br>mat  | bm             | 179,00 | 166,00 | 158,00        |
|            |                | m <sup>2</sup> | 357,00 | 332,00 | 316,00        |
|            |                | roli           |        |        | 3.950,00      |
| 75 cm      | PFX701<br>mat  | bm             | 268,00 | 249,00 | 237,00        |
|            |                | m <sup>2</sup> | 357,00 | 332,00 | 316,00        |
|            |                | roli           |        |        | 5.925,00      |
| Šíře fólie | Barva          | Cena za        | 1-3m   | 4-24m  | 1 role (25bm) |
| 50 cm      | PFX700<br>lesk | bm             | 179,00 | 166,00 | 158,00        |
|            |                | m <sup>2</sup> | 357,00 | 332,00 | 316,00        |
|            |                | roli           |        |        | 3.950,00      |
| 75 cm      | PFX700<br>lesk | bm             | 268,00 | 249,00 | 237,00        |
|            |                | m <sup>2</sup> | 357,00 | 332,00 | 316,00        |
|            |                | roli           |        |        | 5.925,00      |

Potřít fólie musí před aplikací dostatečně uschnout!

#### Takto se zpracovává:

1. motiv vytisknout a vyřezat
  2. nechat uschnout
  3. vyseparovat, z nosiče odstranit pomocí přenášecího materiálu FLEXTAPEPT a umístit na textil
  4. aplikovat na nažehl. lisu (cca 17-20 s, 165 °C, střední tlak)
  5. přenášecí materiál odstranit za tepla
- Lze prát do 80 °C.

# D DATASHEET TISKOVÉ VODIVÉ BARVY

**SIGMA-ALDRICH®**

[sigma-aldrich.com](http://sigma-aldrich.com)

3050 Spruce Street, Saint Louis, MO 63103, USA

Website: [www.sigmaaldrich.com](http://www.sigmaaldrich.com)

Email USA: [techserv@sial.com](mailto:techserv@sial.com)

Outside USA: [eurtechserv@sial.com](mailto:eurtechserv@sial.com)

## Product Specification

### Product Name:

Silver, dispersion – nanoparticle, 30–35 wt. % in triethylene glycol monomethyl ether, spec. resistivity 11  $\mu\Omega$ -cm, for printing on plastic films

Product Number: 736465

Ag

### Formula:

Ag

### Formula Weight:

107.87 g/mol

### Storage Temperature:

2 - 8 °C

### TEST

### Specification

Appearance (Color)

Grey

Appearance (Form)

Suspension

ICP Major Analysis

Confirmed

Confirms Silver Component

Proton NMR spectrum

Conforms to Structure

Solid Content

30 - 35 %

Viscosity

Confirmed

Approximately 10-18 cp

Surface Tension (dyn/cm)

35 - 40

Approximately

Assay

Confirmed

Curing Condition: 120–150 Deg C/ 30–60 min

Recommended Retest Period

6 month

Specification: PRD.1.ZQ5.10000023782

Sigma-Aldrich warrants, that at the time of the quality release or subsequent retest date this product conformed to the information contained in this publication. The current Specification sheet may be available at Sigma-Aldrich.com. For further inquiries, please contact Technical Service. Purchaser must determine the suitability of the product for its particular use. See reverse side of invoice or packing slip for additional terms and conditions of sale.

1 of 1