



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

NÍZKOPROFILOVÁ TEXTILNÍ ANTÉNA S UMĚLÝM MAGNETICKÝM VODIČEM

LOW-PROFILE TEXTILE ANTENNA WITH ARTIFICIAL MAGNETIC CONDUCTOR

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Vojtěch Zbořil

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida

BRNO 2021

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Elektronika a komunikační technologie**

Ústav radioelektroniky

Student: Vojtěch Zbořil

ID: 195653

Ročník: 3

Akademický rok: 2020/21

NÁZEV TÉMATU:

Nízkoprofilová textilní anténa s umělým magnetickým vodičem

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

V doporučené literatuře se seznámte s koncepcí planárního širokopásmového monopólu napájeného koplanárním vlnovodem a doplněného reflektorem z umělého magnetického vodiče. Zjednodušenou počítačovou simulací ověřte, zda parametry anténní struktury popsané v [1] odpovídají skutečnosti. Anténní strukturu optimalizujte pro použití v kmitočtovém ISM pásmu 5,8 GHz.

Textilní substrát z článku nahraďte trojrozměrnou pleteninou. Navrženou anténní strukturu optimalizujte pro zadaný textilní substrát a technologii sítotisku. Optimalizovanou anténu realizujte a experimentálně ověřte její vlastnosti. Při ověřování se věnujte vlivu deformace textilního substrátu na lidském těle.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] ALEMARYEEN, A.; NOGHANIAN, S.; On-body low-profile textile antenna with artificial magnetic conductor. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2019, vol. 67, no. 6, p. 3649-3656. DOI: 10.1109/TAP.2019.2902632

[2] P. KOVÁCS; Návrh a optimalizace struktur s elektromagnetickým zádržným pásmem. Disertační práce. Brno: VUT v Brně, 2010. Dostupné: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=32416

Termín zadání: 8.2.2021

Termín odevzdání: 27.5.2021

Vedoucí práce: prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida

prof. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.
předseda rady studijního programu

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

Planární nositelná anténa sestává z širokopásmového planárního monopólu, koplanárního vlnovodu a umělého magnetického vodiče. Cílem této práce bylo pomocí simulací porovnání se vzorovou publikací, ověření správnosti jejich dílčích komponent, optimalizace, výroba a měření parametrů antény. V práci jsou uvedeny rozbor jednotlivých komponent, jejich dílčí simulace a následné porovnání se vzorovou publikací. Následně proběhla optimalizace anténní struktury pro použití v kmitočtovém ISM pásmu 5,8 GHz. Pro optimalizaci byla textilní substrát nahrazen trojrozměrnou pleteninou. Optimalizovaná anténa byla realizována a experimentálně ověřena pro použití na lidském těle. Uplatnění této antény se nalézá ve zdravotnictví, sportu, u bezpečnostních a záchranářských složek, ve vojenské sféře a všude, kde je zapotřebí monitorování polohy a zdravotního stavu osob.

Klíčová slova

Planární širokopásmový monopól, koplanární vlnovod, umělý magnetický vodič, perfektní magnetický vodič, perfektní elektrický vodič, fantom

Abstract

Planar wearable antenna consists of planar broadband monopole, coplanar waveguide, and artificial magnetic conductor. The goal of this thesis was, by using simulations and comparisons with a paradigmatic publication, to verify the legitimacy of their subcomponents. This thesis presents analyzes of particular components, their partial simulations and comparison with paradigmatic publication. Subsequently, the antenna structure was optimized for use in the 5.8 GHz ISM frequency band. For optimization, the textile substrate was replaced by a three-dimensional knit. The optimized antenna was realized and experimentally verified for use on the human body. The use of a planar wearable antenna is found in healthcare, sports, security and rescue services, the military and wherever there is a need to monitor the position and health of subjects.

Keywords

Planar broadband monopole, coplanar waveguide, artificial magnetic conductor, perfect magnetic conductor, perfect electric conductor

Bibliografická citace

ZBOŘIL, Vojtěch. *Nízkoprofilová textilní anténa s umělým magnetickým vodičem*. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/128390>. Semestrální práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky. Vedoucí práce Zbyněk Raida.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta:	Vojtěch Zbořil
VUT ID studenta:	195653
Typ práce:	Bakalářská práce
Akademický rok:	2020/21
Téma závěrečné práce:	Nízkoprofilová textilní anténa s umělým magnetickým vodičem

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího závěrečné 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 závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si 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.

V Brně dne: 27.5. 2021

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce prof. Dr. Ing. Zbyňkovi Raidovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc, trpělivost a další cenné rady při zpracování mé bakalářské.

V Brně dne: 27. května 2021

podpis autora

Obsah

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	8
SEZNAM OBRÁZKŮ	9
ÚVOD	10
1. PLANÁRNÍ NOSITELNÁ ANTÉNA.....	12
1.1 PLANÁRNÍ MONOPÓL	12
1.2 NÁVRH PLANÁRNÍHO MONOPOLU PRO SIMULACI.....	13
1.3 MONOPÓL S AMC	15
1.3.1 Dokonalý magnetický vodič (PMC)	15
1.3.2 Umělý magnetický vodič (AMC)	17
1.4 ANTÉNA S KOMPLETNÍ AMC STRUKTUROU	18
1.5 OPTIMALIZACE ANTÉNNÍ STRUKTURY PRO ISM PÁSMO 5,8 GHz	20
1.5.1 Jedna buňka AMC – Jeruzalémský kříž.....	20
1.5.2 Kompletní anténní struktura	21
2. NÁVRH A KONFIGURACE ANTÉNNÍ STRUKTURY.....	23
2.1 ČTVERCOVÝ UMĚLÝ MAGNETICKÝ VODIČ	23
2.2 MODEL VÝSLEDNÉ ANTÉNNÍ STRUKTURY.....	24
2.3 SIMULACE CHARAKTERISTICKÝCH PARAMETRŮ.....	25
3. VÝROBA ANTÉNNÍ STRUKTURY A FANTOMU.....	29
3.1 VÝROBA ANTÉNY	29
3.2 FANTOMY.....	30
3.2.1 Výroba gelového fantomu	30
4. MĚŘENÍ ANTÉNY.....	32
4.1 MĚŘENÍ VE VOLNÉM PROSTORU	32
4.2 MĚŘENÍ V BEZODRAZOVÉ KOMOŘE	33
4.3 MĚŘENÍ S GELOVÝM FANTOMEM.....	34
4.4 MĚŘENÍ OHYBŮ	37
5. ZÁVĚR.....	40
LITERATURA.....	42

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratky:

FEKT	Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
VUT	Vysoké učení technické v Brně
AMC	Artificial magnetic conductor
CPW	Coplanar waveguide
PEC	Perfect electric conductor
PMC	Perfect magnetic conductor
SAR	Specific absorption rate
ISM	Industrial, scientific, medical
HFSS	High-frequency structure simulator
MKP	Metoda konečných prvků
MWS	Microwave studio

Symboly:

ϵ_r	relativní permitivita	[-]
$\tan \delta$	ztrátový činitel	[-]
f	frekvence	[Hz]
s_{11}	činitel odrazu	[dB]
φ	fáze	[°]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1 Planární širokopásmový monopól napájený koplanárním vedením. Rozměry monopólu (v milimetrech) podle [1] jsou: $L = 34$, $W = 27$, $L1 = 15,5$, $L2 = 16,5$, $W1 = 19$, $W2 = 3$, $W3 = 0,4$, $W4 = 11,6$ - Převzato z [1].....	12
Obr. 1.2 Monopól ve volném prostoru napájený vlnovodným portem	14
Obr. 1.3 Kmitočtový průběh velikosti činitele odrazu na vstupu monopólu ve volném prostoru. Simulace v HFSS	15
Obr. 1.4 Monopól s dokonalým magnetickým vodičem jako zemní deskou napájený vlnovodovým portem	16
Obr. 1.5 Kmitočtový průběh velikosti činitele odrazu na vstupu monopólu s dokonalým magnetickým vodičem jako zemní deskou. Simulace v HFSS.....	16
Obr. 1.6, Parametry jedné AMC buňky převzato z [1]. Geometrické rozměry v milimetrech: $A = 17$, $B = 17$, $A1 = 3,5$, $A2 = 5,5$, $A3 = 1,3$	17
Obr. 1.7 Vytvořený model jedné buňky AMC podle obr. 3.3	18
Obr. 1.8 Fáze činitele odrazu s_{11} pro jednu buňku AMC.....	18
Obr. 1.9 Geometrické rozměry kompletní AMC struktury. Parametry jsou udávány v mm: $X = 102$, $Y = 68$. Převzato z [1]	19
Obr. 1.10 Výsledný model monopólu s AMC strukturou	19
Obr. 1.11 Kmitočtový průběh velikosti činitele odrazu na vstupu antény s AMC. Simulace v HFSS	20
Obr. 2.1 Jedna buňka Square AMC	23
Obr. 2.2 Fáze činitele odrazu s_{11} pro jednu buňku Square AMC.....	24
Obr. 2.3 Fáze činitele odrazu s_{11} pro výslednou anténní strukturu	26
Obr. 2.4 Vyzařovací diagram pro E-rovinu na frekvenci $f = 5,8$ GHz - simulace	26
Obr. 2.5 Vyzařovací diagram pro H-rovinu na frekvenci $f = 5,8$ GHz – simulace.....	27
Obr. 2.6 Průběh reálné složky impedance v závislosti na frekvenci	27
Obr. 2.7 Průběh imaginární složky impedance v závislosti na frekvenci.....	28
Obr. 3.1 Vyrobena anténní struktura: a) pohled shora, b) pohled ze zdola, c) pohled ze předu	29
Obr. 4.1 Průběh činitele odrazu s_{11} v závislosti na frekvenci	32
Obr. 4.2 Vyzařovací diagram pro E-rovinu na frekvenci $f = 5,8$ GHz	33
Obr. 4.3 Vyzařovací diagram pro H-rovinu na frekvenci $f = 5,8$ GHz.....	33
Obr. 4.4 a) Gelový fantom v kádince, b) měření s fantomem na polystyrénu tloušťky: b) 10 mm, c) 30 mm.....	34
Obr. 4.5 Průběh činitele odrazu s_{11} v blízkosti fantomu v závislosti na frekvenci ve vzdálenosti a) 0mm, b) 6 mm, c) 10 mm, d) 16 mm, e) 20 mm, f) 30 mm	35
Obr. 4.6 Vzájemné srovnání průběhu činitele odrazu s_{11} v blízkosti fantomu v závislosti na frekvenci ve vzdálenosti 0mm, 6 mm, 10 mm, 16 mm, 20 mm, 30 mm.....	36
Obr. 4.7 Srovnání průběhu činitele odrazu s_{11} v závislosti na frekvenci ve volném prostoru a v blízkosti fantomu (10 mm)	36
Obr. 4.8 Měření ohybů: a) pohled zepředu, b) pohled ze shora, c) pohled ze strany	37
Obr. 4.9 Průběh činitele odrazu s_{11} v závislosti na frekvenci a na úhlu ohybu a) 1 °, b) 2 °, c) 3 °, d) 4 °, e) 5 °, f) 6 °, g) 8 °.....	38
Obr. 4.10 Vzájemné srovnání průběhu činitele odrazu s_{11} v závislosti na frekvenci a na úhlu ohybu: 1 °, 2 °, 3 °, 4 °, 5 °, 6 °, 8 °.....	39

ÚVOD

Tato bakalářská práce se zabývá planární nositelnou anténou, která vychází z článku [1]. Původní návrh je experimentálně ověřen a optimalizován pro výrobu síťotisku. Anténa je realizována a jsou experimentálně ověřeny její vlastnosti, které jsou porovnány s výsledky simulací.

Zmíněná anténa je tvořena planárním širokopásmovým monopólem, který je napájen koplanárním vedením. Anténa je vyrobena z měděné fólie, která je nalepena na textilní substrát.

Pro antény pracující v blízkosti lidského těla jsou důležité tyto parametry:

- vyzařovaná/přijímaná vlna musí být polarizována kolmo k povrchu těla
- z důvodu zamezení pronikání záření do lidského těla je nutno anténu oddělit od tkáně elektricky vodivou vrstvou, tím se zvýší účinnost antény – vliv prostředí se sníží
- jelikož jde o anténu určenou ke komunikaci mezi jednotkou na povrchu těla a jednotkou vzdálenou (off-body communication), musí být směr maxima záření kolmý k povrchu těla (ke tkáni)

Aby bylo minimalizováno vyzařování antény do tkáně uživatele, je mezi povrchu těla a monopól umístěna další textilní vrstva s měděnou periodickou strukturou. Tato periodická struktura plní roli umělého magnetického vodiče (AMC, *artificial magnetic conductor*). Tento vodič odráží elektromagnetickou vlnu s nezměněnou fází, takže planární dipól v blízkosti vyzařuje maximálně ve směru kolmém na tkáň.

První kapitola práce shrnuje obsah článku [1]. Podrobně jsou zde vysvětleny principy, na kterých je anténa založena. Je zde provedena kompletní experimentální realizace navržené nositelné antény a dále její optimalizace pro ISM pásmo 5,8 GHz (5,725 – 5,875 GHz).

Druhá kapitola se zabývá návrhem a konfigurací nově navržené planární nositelné antény. Je zde popsán návrh a kompletní anténní struktura, která je upravena pro výrobu technologie síťotisku.

Třetí kapitola je věnována výrobě planární nositelné antény. Je zde stručně popsána technologie a postup výroby.

Čtvrtou kapitolou je měření reálné planární nositelné antény. Jsou zde zobrazeny výsledky měření antény ve volném prostoru, v bezodrazové komoře, v blízkosti lidského těla (fantom), a také měření při ohybu antény. Následně je provedeno porovnání naměřených hodnot s hodnotami ze simulací a zamyšlení se nad možnými příčinami případných odchylek.

Poslední kapitolou je závěr. Je zde probrán průběh celé práce, shrnutí jednotlivých kapitol, čeho v nich mělo být dosaženo, čeho v nich bylo reálně dosaženo.

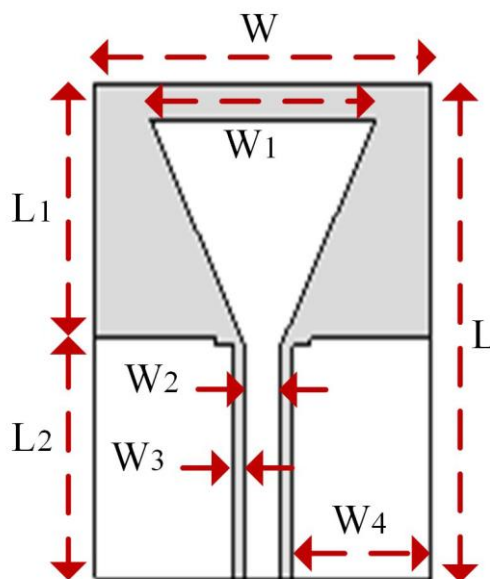
Práce by měla vyústit v realizaci nositelné textilní antény pro komunikaci mezi osobou a vzdálenou jednotkou. Využití tato anténa nalezne ve zdravotnictví (vzdálené sledování zdravotního stavu), v péči o seniory (kontrola životních funkcí), ve sportovních aplikacích (sledování zatížení organismu sportovce), v oděvech záchranářů (monitoring vlivu nebezpečných podmínek) a podobných systémech.

1. PLANÁRNÍ NOSITELNÁ ANTÉNA

1.1 Planární monopól

Planární nositelná anténa je v článku [1] charakterizována následovně.

Jak je znázorněno na obr. 1.1, anténním prvkem je širokopásmový planární monopól napájený koplanárním vlnovodem (CPW, *coplanar waveguide*). Jako substrát byl použit textilní materiál Pellon, s relativní permitivitou $\epsilon_r = 1,08$, ztrátovým činitelem $\tan \delta = 0.008$ a tloušťkou $h = 1,8$ mm.



Obr. 1.1 Planární širokopásmový monopól napájený koplanárním vedením. Rozměry monopólu (v milimetrech) podle [1] jsou: $L = 34$, $W = 27$, $L1 = 15,5$, $L2 = 16,5$, $W1 = 19$, $W2 = 3$, $W3 = 0,4$, $W4 = 11,6$ - Převzato z [1].

Planární širokopásmový monopól je jedním z komponentů, ze kterých výsledná planární nositelná anténa sestává. Vyznačuje se nízkým geometrickým profilem, což je nezbytné, má-li být tento monopól použitelný jako součást nositelné antény, která bude nošena ať už přímo na lidském těle, bude všita do oděvu či bude vložena do doplňků, které bude osoba nosit na sobě. Co se týká jeho konstrukce, monopól sestává z postupně se rozšiřujícího ramene. Díky tomuto designu je dosaženo širokopásmového chování monopólu a celé struktury. Změnou délky jeho ramene dochází k posuvu rezonančního kmitočtu (při zmenšení délky dojde k posuvu k vyšším kmitočtům a při zvětšení k nižším kmitočtům).

Anténa je buzena koplanárním vlnovodem (CPW, *coplanar waveguide*). Díky tomu se dá říci, že vzniká de facto planární realizace dipólu, jelikož rameno nad zemní deskou je zrcadlené na druhou stranu.

Co se týká vyzařování, takto vzniklý dipól vyzařuje maximálně ve směru kolmém na svou osu (osy x a z na obr. 2.1). Je-li anténa přiložena k povrchu těla, je maximum vyzařování směřováno jak směrem nad něj, tak i do lidského těla. Zde vzniká problém, co se zdraví týče. Anténa v blízkosti těla nesmí překročit předepsanou úroveň specifické míry absorpce (SAR, *Specific Absorption Rate*). Ta specifikuje množství elektromagnetického záření absorbovaného lidským tělem. V tomto konkrétním případě se jedná o hodnotu, která činí 1,6 W/kg na 1 gram tkáně, či 2 W/kg na 10 gramů tkáně, a to dle norem IEEE C95.1-1999 a IEEE C95.1-2005 [1]. Aby byly tyto požadavky splněny, a tím tedy bylo potlačeno vyzařování do lidského těla, musí být do struktury výsledné antény reflektor, který vlnu jdoucí k tělu odráží pryč.

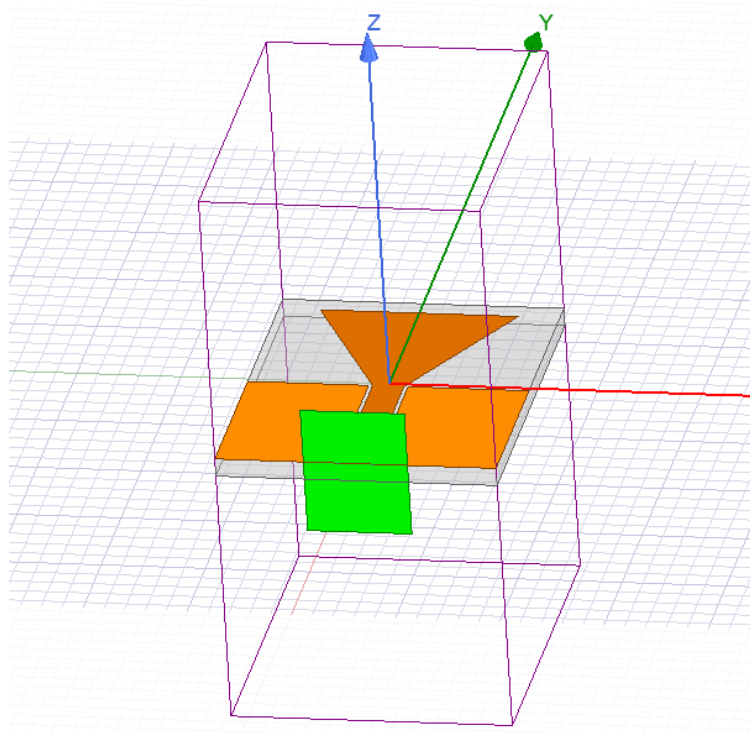
Reflektorem nemůže být elektrický vodič, protože v tomto případě by se přímá a odražená vlna sečetly v protifázi. Došlo by k destruktivní interferenci, přímá a odražená vlna by se navzájem vyrušily a anténa by nevyzařovala ve směru kolmém k substrátu.

Za tímto účelem musí být použit magnetický vodič. Jednou z možností, jak lze magnetický vodič realizovat, je využití periodické struktury, která na rezonančním (pracovním) kmitočtu, vykazuje nulovou fázi činitele odrazu s_{11} [2].

1.2 Návrh planárního monopolu pro simulaci

Planární monopol se zemní deskou a koplanárním vlnovodem (CPW) byl vytvořen v programu ANSYS HFSS, který je součástí softwarového balíku ANSYS Electronics Desktop 2019 R3.7. Software pracuje na principu metody konečných prvků (MKP). Jelikož autorky článku [1] pracovaly v softwaru CST Microwave Studio, proces implementace, design grafů a hlavně hodnoty výstupů se liší. Rozdíly budou rozebrány níže.

Prvním krokem návrhu celého systému bylo vytvořit výše zmíněný planární monopol s parametry přejatými z článku [1]. Monopol je zde simulován ve volném prostoru. To znamená, že je monopol spolu se zemní deskou nanesen na substrát a na jeho vstup je připojen vlnový port. Monopol musí být shora a ohraničen vzduchovým boxem s relativní permitivitou $\epsilon_r = 1$ (reprezentace právě zmíněného volného prostoru). Vzhled vytvořeného modelu je zobrazen na obr. 2.1.



Obr. 1.2 Monopól ve volném prostoru napájený vlnovodným portem

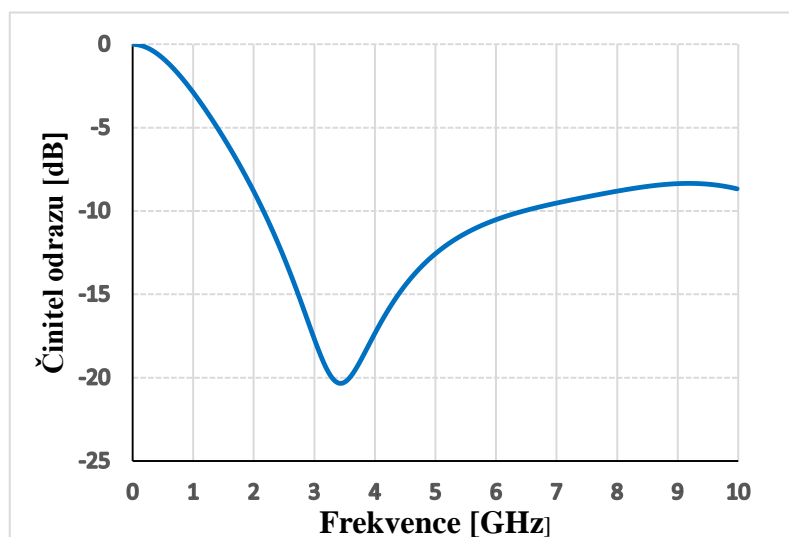
Výstupem vytvořeného modelu má být dle vzoru [1] kmitočtový průběh činitele odrazu na vstupu antény s_{11} . Tento průběh slouží k zjištění impedanční šířky pásma monopólu (tedy v jakém kmitočtovém pásmu vykazuje anténa na svém vstupu činitel odrazu nižší než -10 dB) [3]. S uvedeným impedančním přizpůsobením má anténa pracovat v celém ISM (*industrial, scientific, medical*) pásmu 5,8 GHz (pokud má toto tvrzení platit, musí mít činitel odrazu s_{11} v celé šířce ISM pásma, tedy od 5,725 do 5,875 GHz hodnotu činitele odrazu -10 dB a méně).

Dle vzorové publikace [1] je impedanční šířka pásma (3,6 – 5,95 GHz). Monopól lze tedy prohlásit za širokopásmový.

Obdobně bylo přístupováno k vytvořenému monopólu v prostředí HFSS (viz obr. 2.2). Po provedeném návrhu a ověření správnosti nastavení parametrů pomocí ověřovací funkce v prostředí HFSS byla provedena simulace. Výstupem byl průběh činitele odrazu s_{11} v kmitočtovém pásmu od 0 do 10 GHz. Co se impedanční šířky pásma týče, její hodnota činí 2,16 – 6,46 GHz. To je bezmála o 2 GHz více, než je uváděno v článku [1].

Ovšem co se rezonančního (pracovního) kmitočtu týče, ten je posunut z hodnoty 4,8 GHz na hodnotu 3,43 GHz. K zajištění posunutí rezonančního kmitočtu do vyššího pásma, by bylo zapotřebí zkrátit délku ramene monopólu, čímž by bylo ověření narušeno. Hodnota činitele odrazu s_{11} je na rezonančním kmitočtu zvýšena z hodnoty $-32,5$ dB na $-20,34$ dB. Monopól lze ovšem také nazvat širokopásmovým, dokonce funkčním i na

ISM pásma 2,45 GHz (2,4 – 2,5 GHz). Celkově lze ověření považovat za úspěšné.



Obr. 1.3 Kmitočtový průběh velikosti činitele odrazu na vstupu monopólu ve volném prostoru. Simulace v HFSS

1.3 Monopól s AMC

1.3.1 Dokonalý magnetický vodič (PMC)

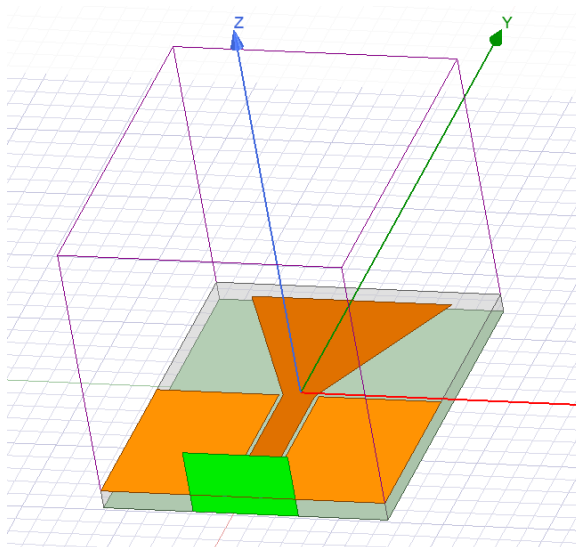
Po úspěšném ověření činitele odrazu s_{11} z kapitoly 2 se nyní budeme věnovat umělému magnetickému vodiči (*Artificial Magnetic Conductor*, AMC).

Prvním krokem je použití dokonalého magnetického vodiče (*Perfect Magnetic Conductor*, PMC), jako demonstrace, proč je zapotřebí použít místo něj umělý magnetický vodič (AMC). Tato demonstrace bude podložena simulací monopólu, kdy bude ze spodní strany Pellon substrátu vytvořena zemní deska s parametry dokonalého magnetického vodiče.

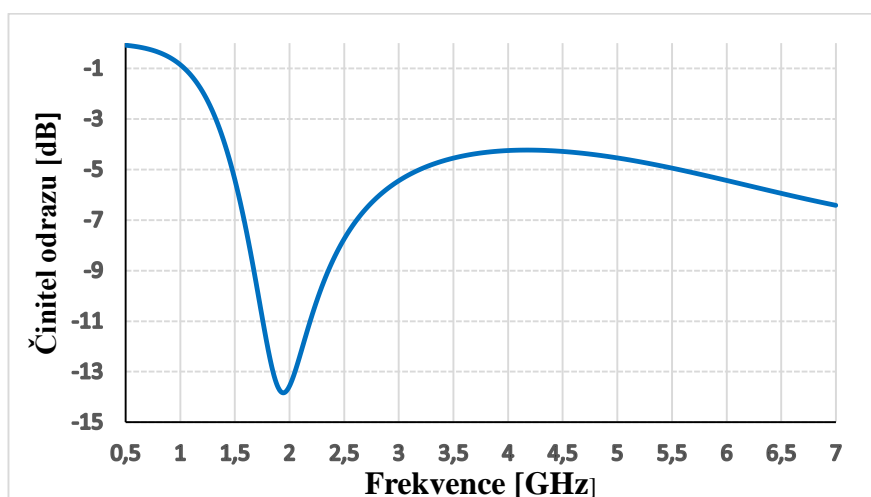
Simulace proběhla opět v programu ANSYS HFSS, respektive ANSYS Electronics Desktop 2019 R3.7. Model monopólu z předchozí kapitoly (viz obr. 2.1) jsem tedy modifikoval:

- Vzduchový box představující volný prostor je umístěn jen nad monopólem a jeho substrátem,
- Vlnový port je zmenšen na polovinu své původní plochy,
- Na spodní stranu substrátu je přidána dokonale magneticky vodivá deska.

Výsledný model je zobrazen na obr. 3.1.



Obr. 1.4 Monopól s dokonalým magnetickým vodičem jako zemní deskou napájený vlnovodovým portem



Obr. 1.5 Kmitočtový průběh velikosti činitele odrazu na vstupu monopólu s dokonalým magnetickým vodičem jako zemní deskou. Simulace v HFSS

Výsledky simulace ukazují markantní rozdíly v kmitočtovém průběhu velikosti činitele odrazu s_{11} monopólu ve volném prostoru vzhledem k monopólu s dokonalým magnetickým vodičem jako zemní deskou. V prvním případě byl rezonanční kmitočet zjištěn na hodnotě 3,43 GHz s hodnotou útlumu -20,34 dB. Co se týče druhého případu, rezonanční kmitočet byl zjištěn na hodnotě 1,94 GHz s hodnotou útlumu -13,83 dB.

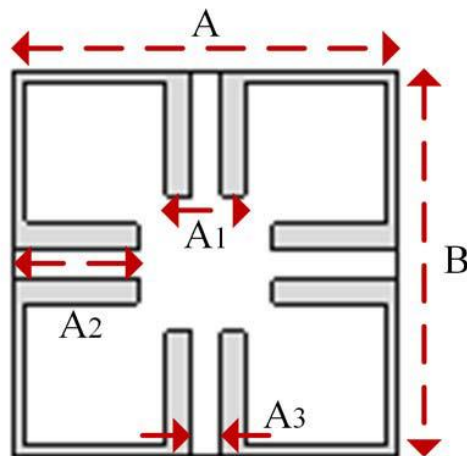
Dále impedanční šířka pásma u prvního případu byla zjištěna v intervalu 2,16 až 6,46 GHz, přičemž u druhého případu impedanční šířka pásma leží v intervalu 1,71 až 2,26 GHz.

GHz. Z toho vyplývá, že takto implementovaná anténa nesplňuje požadavky publikace [1], protože anténa je úzkopásmová, pracuje v okolí rezonančního kmitočtu 1,94 GHz a její impedanční šířka pásma absolutně nepokrývá pásmo ISM 5,8 GHz. Anténa tudíž nesplňuje podmínku širokopásmovosti a v této konfiguraci nemůže být použita.

1.3.2 Umělý magnetický vodič (AMC)

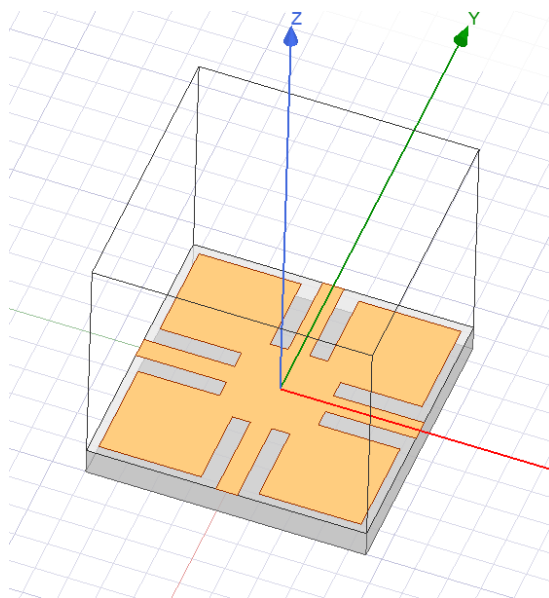
Za účelem správné funkčnosti AMC antény bylo navrženo použití umělého magnetického vodiče (AMC), který jednak plní funkci stínění vyzařovaného elektromagnetického záření v blízkosti těla subjektu, jednak pracuje jako reflektor, který má za účel zajistit správnou funkčnost antény pro danou aplikaci. V tomto konkrétním případě má AMC zajistit širokopásmovost antény, a zároveň má zachovat původní hodnotu rezonančního kmitočtu, která byla zjištěna pro monopól ve volném prostoru. A nakonec má AMC sloužit jako ochrana antény před deformací způsobenou ohybem a kroucením v důsledku nošení v blízkosti lidského těla.

K zjištění správné funkčnosti AMC je zapotřebí ověřit, na jakém kmitočtu má činitel odrazu s_{11} nulovou fázi. Aby AMC struktura správně fungovala v kombinaci s monopólem, musí být nulová fáze činitele odrazu s_{11} pro AMC na kmitočtu rovném rezonančnímu kmitočtu monopólu. K tomu byl vytvořen model jedné buňky AMC, který byl následně simulován v programu ANSYS Electronics Desktop 2019 R3.7. Buňka AMC nese přesné geometrické rozměry podle vzorového článku [1]. Ty jsou ukázány na obr. 3.3.



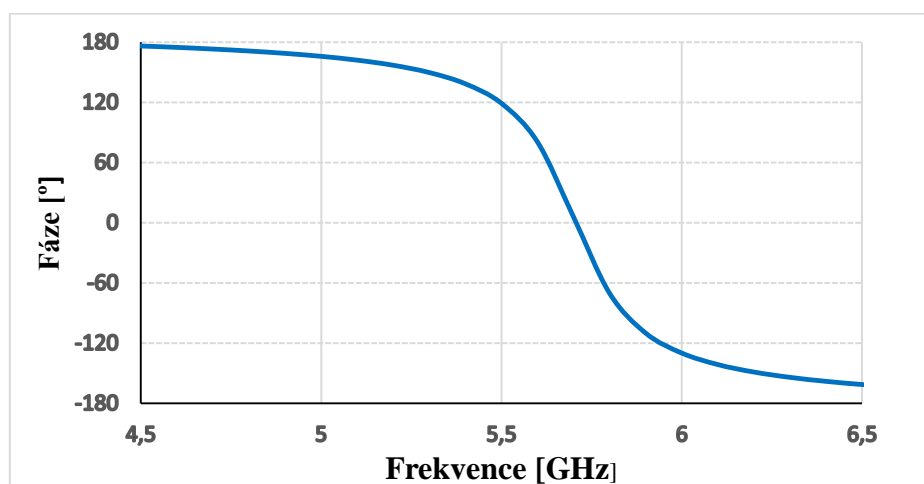
Obr. 1.6, Parametry jedné AMC buňky převzato z [1]. Geometrické rozměry v milimetrech: $A = 17$, $B = 17$, $A1 = 3,5$, $A2 = 5,5$, $A3 = 1,3$

Dále je na obr. 3.4 ukázán model jedné AMC buňky vytvořený k provedení simulace hodnoty fáze činitele odrazu s_{11} .



Obr. 1.7 Vytvořený model jedné buňky AMC podle obr. 3.3

Podle autorek článku [1] byla nulová hodnota fáze činitele odrazu s_{11} zjištěna přesně na 5,8 GHz, čímž by byla dosažena absolutní přesnost pro aplikaci v ISM pásmu pro 5,8 GHz. Provedená simulace nabývá těchto hodnot: Pro jednu buňku AMC je hodnota nulové fáze činitele odrazu s_{11} na kmitočtu 5,71 GHz, což s odchylkou 90 MHz odpovídá tvrzení autorek. Ověření proběhlo úspěšně. K potvrzení pravdivosti simulace je zobrazen průběh fáze činitele odrazu s_{11} pro jednu buňku AMC na obr. 3.5.



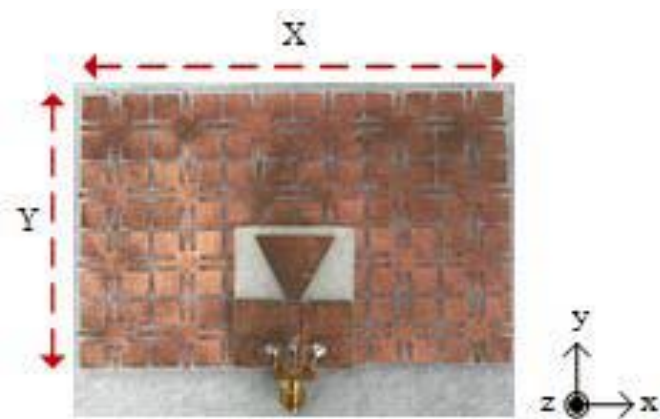
Obr. 1.8 Fáze činitele odrazu s_{11} pro jednu buňku AMC

1.4 Anténa s kompletní AMC strukturou

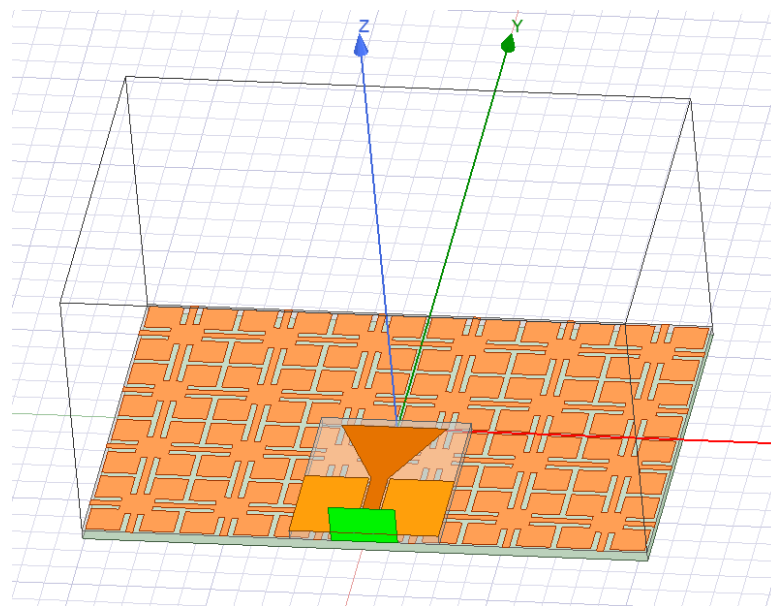
Posledním krokem je ověření integrace monopólu s kompletní AMC strukturou.

Kompletní AMC struktura sestává z 24 (6x4) dílčích buněk, které představují jednu plochu s výřezy podle zadání z článku [1]. Plocha je nanášena na stejný substrát jako monopól, a sice na substrát z textilního materiálu Pellon. Výška substrátu je opět stejná jako u monopólu, tj. $h = 1,8$ mm. Na spodní stranu substrátu je připevněna zemní deska s parametry dokonalého elektrického vodiče (PEC, *Perfect Electric Conductor*). Geometrické rozměry jsou opět totožné s článkem [1]. Rozložení je zobrazeno na obr. 3.6.

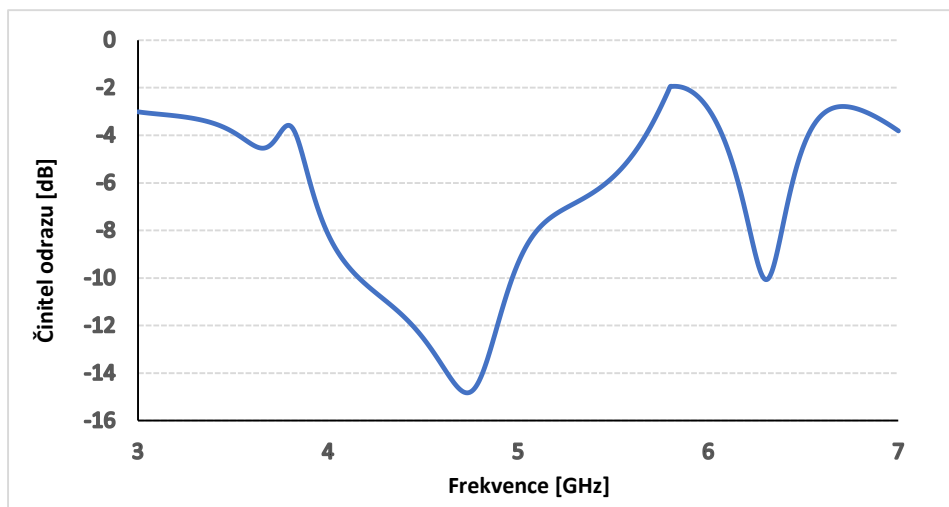
Dále je na horní stranu kompletní AMC struktury, symetricky podél osy y , položen simulovaný monopól se stejnými parametry jako v kapitole 2. Nad celou strukturou je vložen vzduchový box. Vzhled celé struktury je na obr. 3.7.



Obr. 1.9 Geometrické rozměry kompletní AMC struktury. Parametry jsou udávány v mm: $X = 102$, $Y = 68$. Převzato z [1]



Obr. 1.10 Výsledný model monopólu s AMC strukturou



Obr. 1.11 Kmitočtový průběh velikosti činitele odrazu na vstupu antény s AMC. Simulace v HFSS

Co se týče provedené simulace, v kmitočtovém průběhu činitele odrazu s_{11} na vstupu AMC antény bylo dosaženo podobného výsledku jako autorkami z článku [1], a to s rozdílem 170 MHz, kdy v publikovaném grafu [1] nabýval rezonanční kmitočet hodnoty 4,9 GHz, zatímco v ověřovací simulaci bylo dosaženo hodnoty rezonančního kmitočtu na hodnotě 4,73 GHz. V tomto ohledu došlo k úspěšnému ověření [1].

Co se ovšem týká hodnoty velikosti činitele odrazu s_{11} na rezonančním kmitočtu a impedanční šířky pásma, hodnoty se liší oproti publikovanému průběhu z článku [1]. Hodnota útlumu na rezonančním kmitočtu pro činitel odrazu s_{11} na vstupu AMC antény je rovna -14,83 dB, zatímco v článku [1] činí -26,5 dB. U impedanční šířky pásma je problém největší, jelikož zatímco u vzorové simulace z [1] je hodnota 4,3 – 5,9 GHz, čímž plně pokrývá ISM 5,8 GHz pásmo, v případě ověřovací simulace je hodnota impedanční šířky pásma 4,16 – 4,96 GHz, tudíž je zhruba poloviční a navíc nepokrývá chtěné ISM pásmo 5,8 GHz. Ověření se dá prohlásit za hotové.

1.5 Optimalizace anténní struktury pro ISM pásmo 5,8 GHz

Při optimalizaci anténní struktury bylo vycházeno ze struktury na obr. 3.7. V této konfiguraci nebylo dosaženo kýženého výsledku, a sice nebylo pokryto ISM pásmo 5,8 GHz. Proto byla nutnost tuto strukturu optimalizovat.

1.5.1 Jedna buňka AMC – Jeruzalémský kříž

Prvním krokem byla optimalizace AMC struktury na kmitočet 5,8 GHz. Na tomto kmitočtu musí činitel odrazu s_{11} vykazovat nulovou fázi. Aby ovšem AMC struktura pracovala správně, a bylo dosaženo impedanční šířky pásma pro ISM pásmo 5,8 GHz

(5,725 – 5,875 GHz), je dále nutné, aby v tomto intervalu byla fáze činitele odrazu s_{11} co nejbližší k nule. Za tímto účelem byl v programu ANSYS Electronics Desktop, v modulu HFSS, vytvořen model jedné buňky AMC. Všechny vodivé plochy byly definovány jako dokonalý elektrický vodič (PEC).

Nové zjištění parametrů bylo dosaženo přepočtem podle vztahu (1.1)

$$Nrp = \frac{f_1}{f_2} \cdot Prp, \quad (1.1)$$

kde f_1 je hodnota rezonanční frekvence, f_2 je požadovaná hodnota rezonační frekvence, Prp je původní rozměr parametru a Nrp je nový rozměr daného parametru. Jedna buňka AMC je opět položena na Pellon substrát s výškou $h = 1,8$ mm, ovšem délky jeho stran byly přepočítány též podle vzorce 1.1.

1.5.2 Kompletní anténní struktura

Po zajištění správné funkčnosti jedné buňky AMC a monopólu bylo přistoupeno k integraci celé struktury do sebe.

Výsledná anténní struktura sestává z Pellon substrátu, na jehož horní stranu je nanášena AMC struktura 6x4 buněk, přičemž rozměr jedné buňky je dán výpočtem z kapitoly 1.5.1 (délka a šířka substrátu je souhlasná s rozměry AMC struktury 6x4). Ze spodní strany substrátu je, přes celou jeho plochu, nanášena dokonale vodivá elektrická vrstva, sloužící jako reflektor. Na AMC strukturu 6x4 je položen Pellon substrát, na jehož horní stranu je nanášen nízkoprofilový širokopásmový monopól s koplanárním vlnovodem, jehož geometrické parametry jsou uvedeny v tabulce 1.2.

Výsledky simulace nepotvrdili předpoklad, že anténní struktura bude vykazovat rezonanční kmitočty v blízkém okolí 5,8 GHz a že impedanční šířka pásma pokryje ISM pásmo 5,8 GHz. Na základě tohoto zjištění bylo provedeno více iterací s přepočítanými parametry dle vzorce 1.1. I přes provedení značně velkého počtu simulací nebylo dosaženo požadovaných výsledků. Vystaly dva stěžejní problémy:

- Při návrhu bylo vycházeno z článku [1]: Autorky článku přednesly návrh AMC struktury na základě experimentálního měření. Není tedy k dispozici matematický model struktury.
- Druhý problém je v přímé korelaci s prvním. Jelikož nebyl přednesen matematický model struktury, ani bližší popis parametrů a jejich závislost na chování celé struktury, nebylo možné exaktně určit chování při změně parametrů. Z těchto důvodů bylo použito jednoduchého přepočtu (viz vzorec 1.1).

Navrhovaným řešením bylo nahradit původní AMC strukturu, strukturou novou, a to strukturou Square AMC (Square AMC = *Čtvercový umělý magnetický vodič*).

2. NÁVRH A KONFIGURACE ANTÉNNÍ STRUKTURY

Po provedení ověření pravdivosti návrhu anténní struktury z článku [1] a následné optimalizaci této struktury pro kmitočtové ISM pásmo 5,8 GHz, bude pozornost přesunuta k dalším krokům:

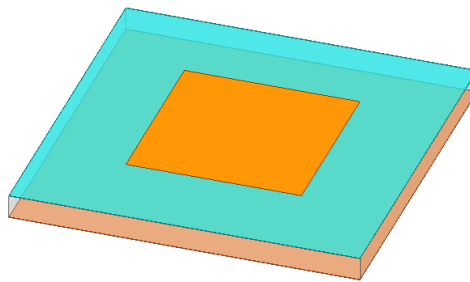
- Nahrazení původní AMC struktury z článku [1] strukturou Square AMC,
- Nahrazení textilního substrátu Pellon trojrozměrnou textilní pleteninou 3D097, na kterou je nanesena fólie PFX701 mat.

2.1 Čtvercový umělý magnetický vodič

Jak bylo řečeno v kapitole 1.5.3, původní AMC strukturu z článku [1] nelze použít pro požadovanou koncepci. Z toho důvodu byla použita struktura nová, a sice Square AMC.

Postup pro ověření správné funkčnosti jedné buňky AMC a kompletní AMC struktury je v kapitole 1.3.2. a 1.4.

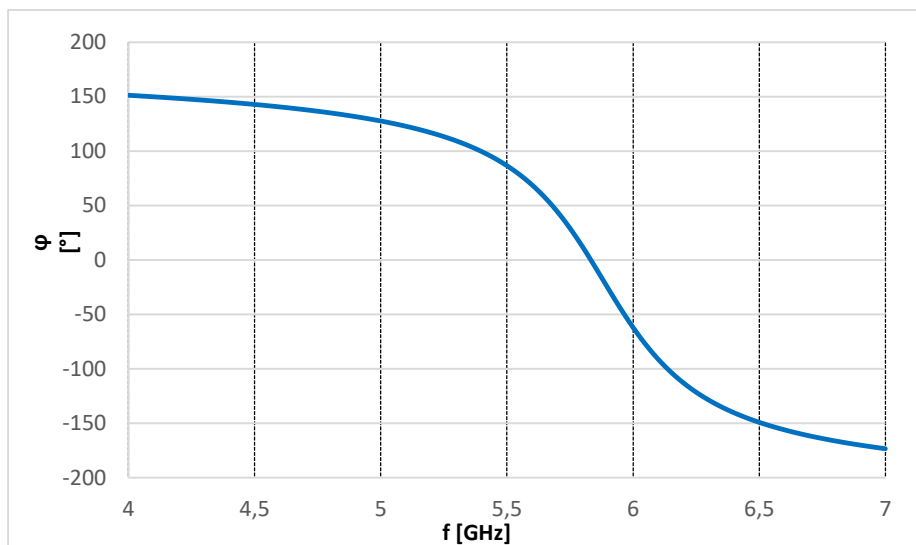
Model jedné buňky Square AMC:



Obr. 2.1 Jedna buňka Square AMC

Uvedená struktura je obdobná se strukturou z kapitoly 1.3.2, s tím rozdílem, že je mezi umělý magnetický vodič a trojrozměrnou textilní pleteninou vložena vyhlazovací fólie. Délka strany AMC - $a_a = 19.04$ mm. Délka strany trojrozměrné pleteniny $a_p = 19.04$ mm a tloušťka $h = 2,59$ mm.

Výsledek simulace je na obrázku 2.2.



Obr. 2.2 Fáze činitele odrazu s_{11} pro jednu buňku Square AMC

Fáze činitele odrazu s_{11} na kmitočtu 5,8 GHz vykazuje hodnotu 12° . Pro celou šířku ISM pásma 5,8 GHz (5,725 – 5,875 GHz) se hodnota fáze činitele odrazu pohybuje v intervalu $\langle 37^\circ; -16^\circ \rangle$. Ověření proběhlo úspěšně.

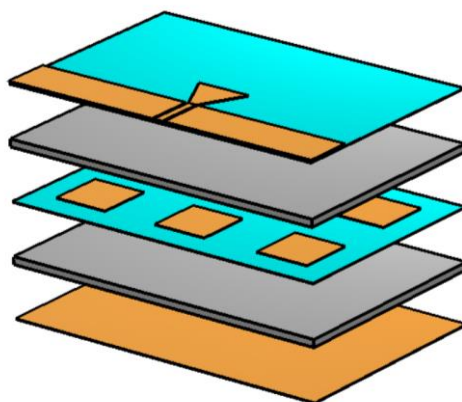
2.2 Model výsledné anténní struktury

Výsledná anténní struktura byla vytvořena v programu ANSYS HFSS. Horní vrstva struktury, kterou pokrývá monopól s koplanárním vlnovodem zůstal nepozměněn vůči původnímu návrhu [1]. Jedinou změnou je délka strany $W4$, která byla prodloužena na konečných 55,2 mm, a to z důvodu pokrytí plochy textilní pleteniny až ke krajům, čímž je zamezeno parazitním jevům.

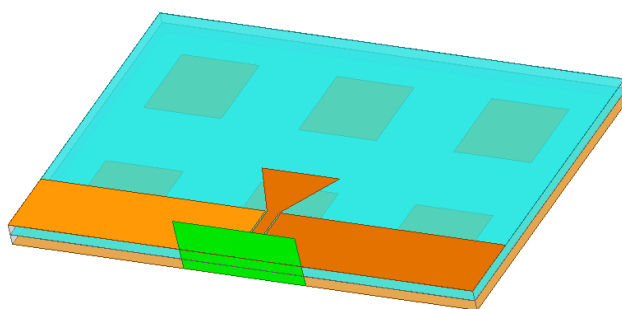
Další vrstvou je fólie PFX701 mat, s relativní permitivitou $\epsilon_r = 3,1$ a tloušťkou $h_{fol} = 0,05$ mm. Ta je nanášena na celou horní plochu trojrozměrné textilní pleteniny 3D097 se souhlasnými geometrickými rozměry s fólií (), co se její délky a šířky týče. Relativní permitivita $\epsilon_r = 1,22$ a tloušťka $h_{tex} = 2,59$ mm. Tímto je vytvořena monopólová struktura.

Co se týče struktury AMC, ta je tvořena šesti čtverci (3x2) s délkou strany $a_{AMC} = 19,04$ mm, přičemž vzdálenost sousedních čtverců je stejná jako parametr a_{AMC} . Takto vytvořená struktura je, stejně jako u monopólu, nanášena na fólii PFX701 mat, která je opět nanášena na trojrozměrnou textilní pleteninu 3D097. Vzdálenost AMC čtverců od přilehlých hran fólie a pleteniny je $a_w = 9,52$ mm. Jak fólie, tak pletenina jsou stejných parametrů jako u monopólové struktury s tou výjimkou, že zde je, na celou plochu spodní strany textilní pleteniny, nanášen reflektor.

Struktura je napájena vlnododovým portem. Všechny vodivé plochy jsou definovány jako dokonalý elektrický vodič (PEC).



Obr. 2.3 Výsledná struktura - CST

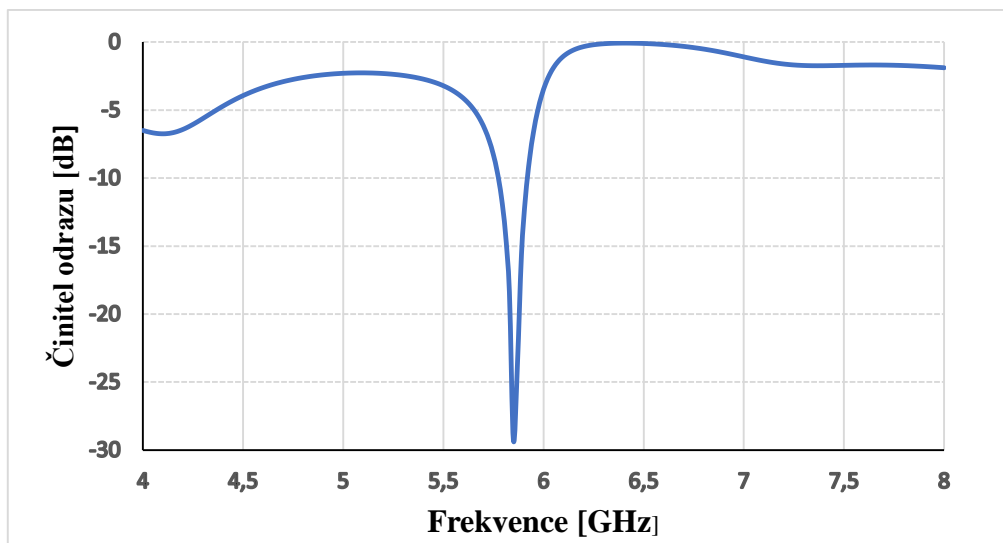


Obr. 2.4 Výsledná struktura - HFSS

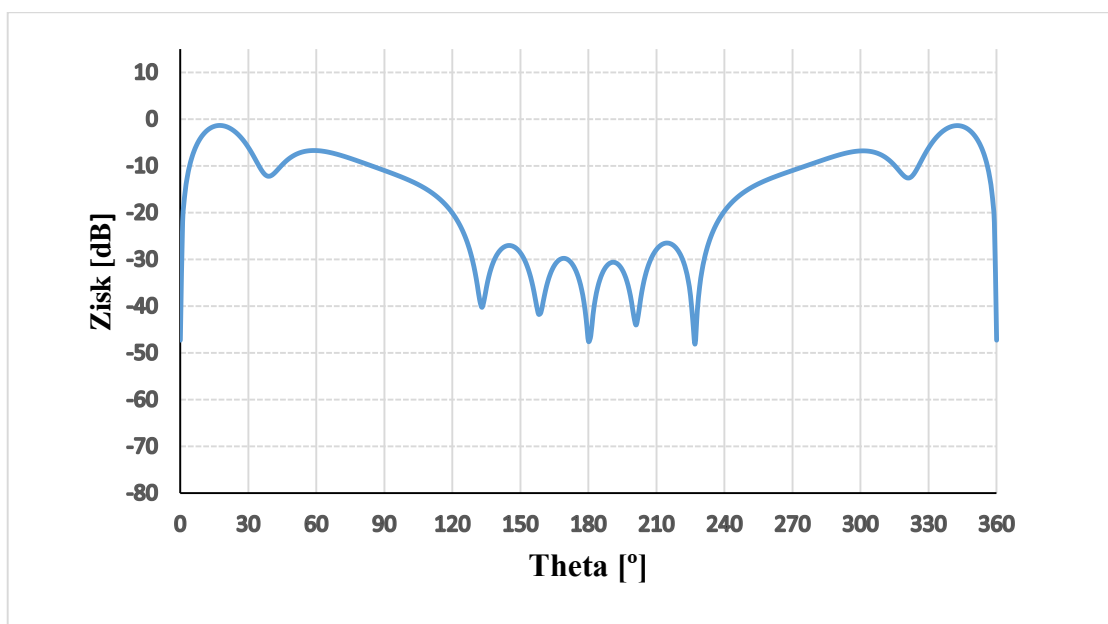
2.3 Simulace charakteristických parametrů

Po vytvoření modelu anténní struktury proběhla simulace v programu ANSYS HFSS.

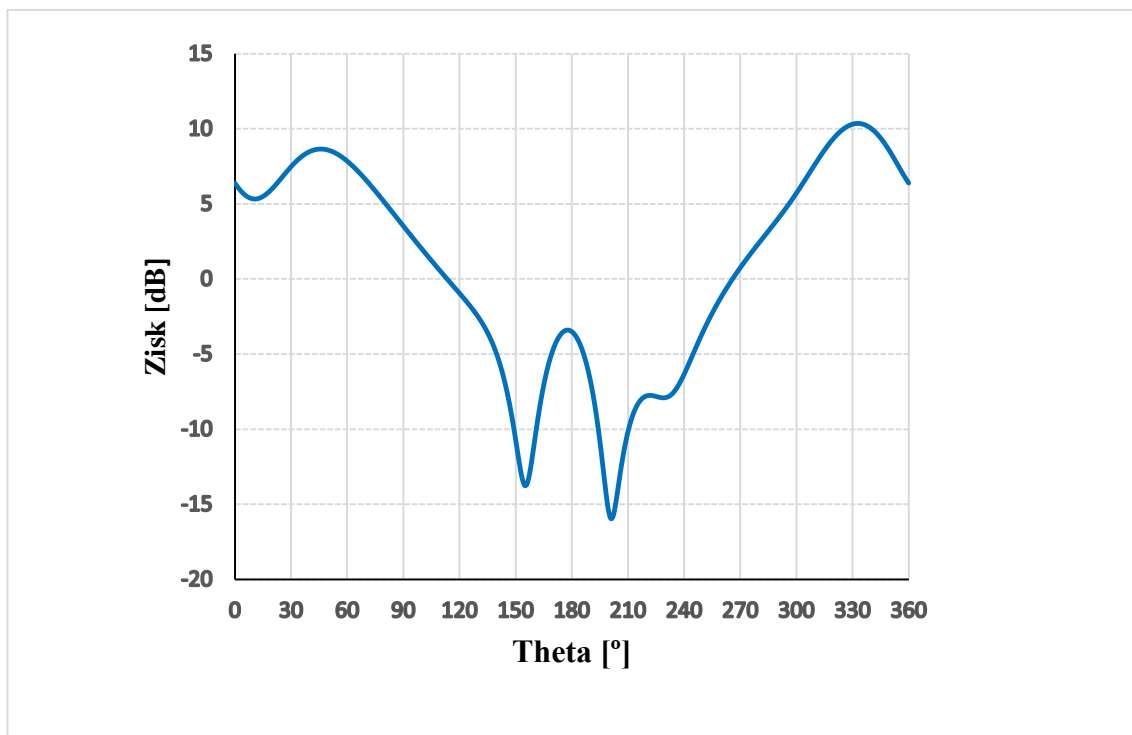
Činitel odrazu s_{11} nabýval největšího útlumu na kmitočtu 5,84 GHz



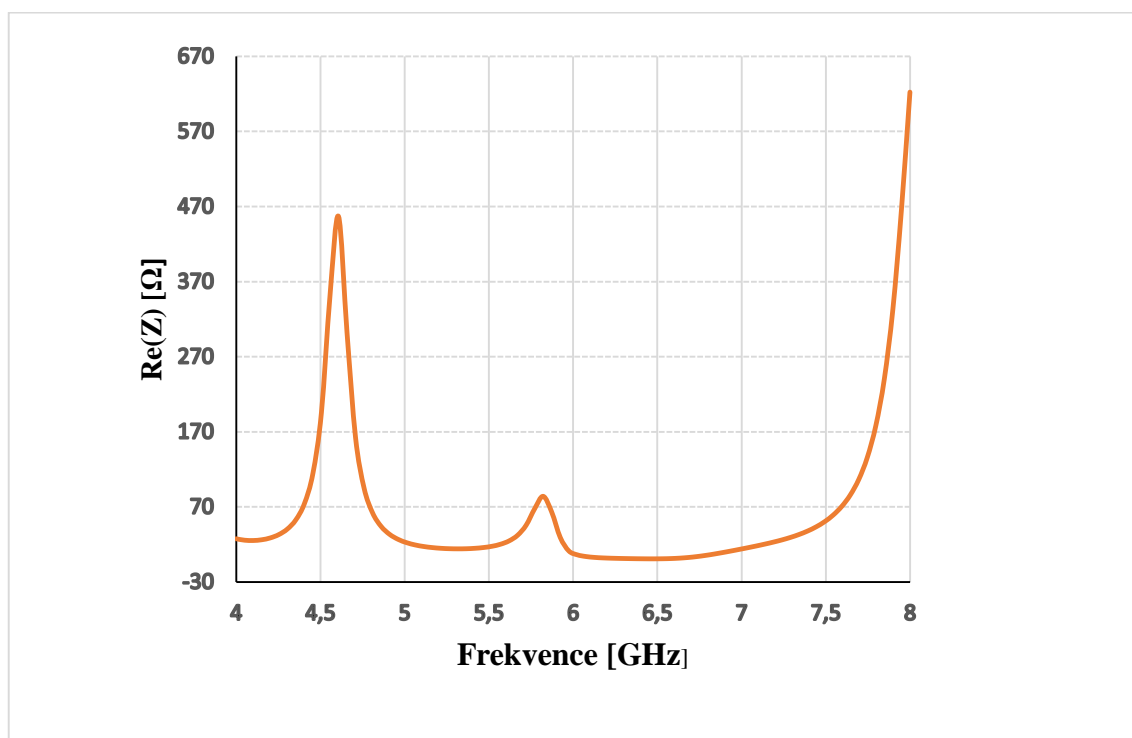
Obr. 2.5 Fáze činitele odrazu s_{11} pro výslednou anténní strukturu



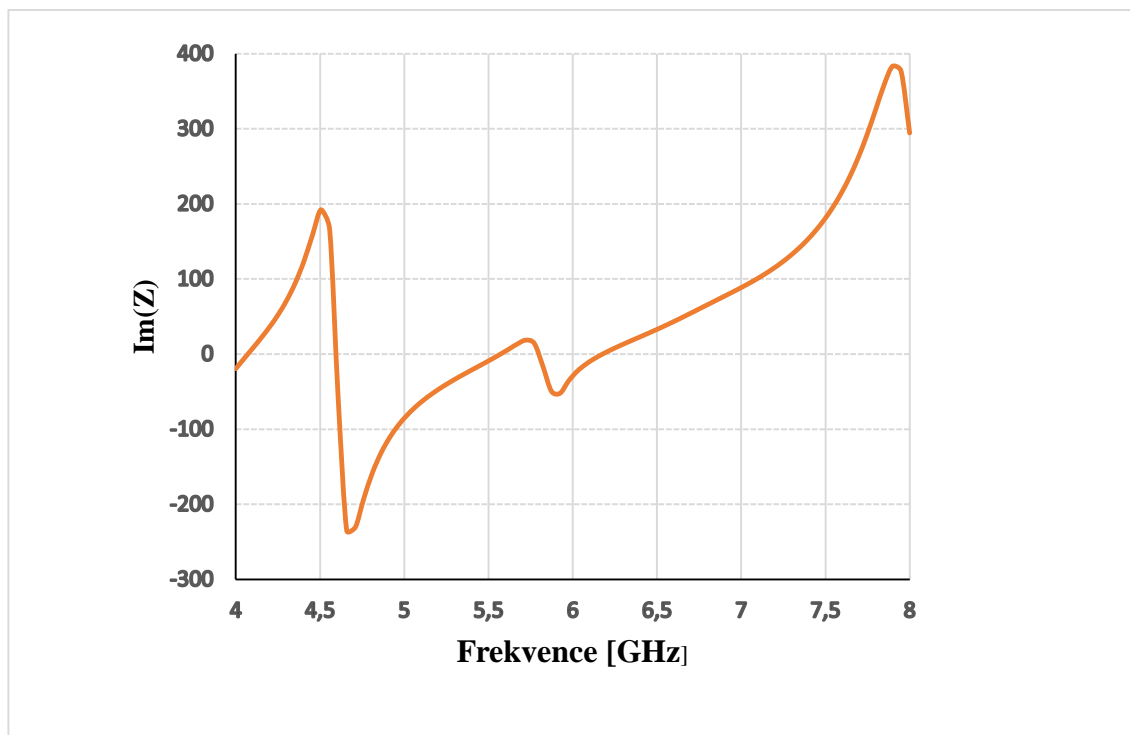
Obr. 2.6 Vyzařovací diagram pro E-rovinu na frekvenci $f = 5,8$ GHz - simulace



Obr. 2.7 Vyzařovací diagram pro H-rovinu na frekvenci $f = 5,8$ GHz – simulace



Obr. 2.8 Průběh reálné složky impedance v závislosti na frekvenci



Obr. 2.9 Průběh imaginární složky impedance v závislosti na frekvenci

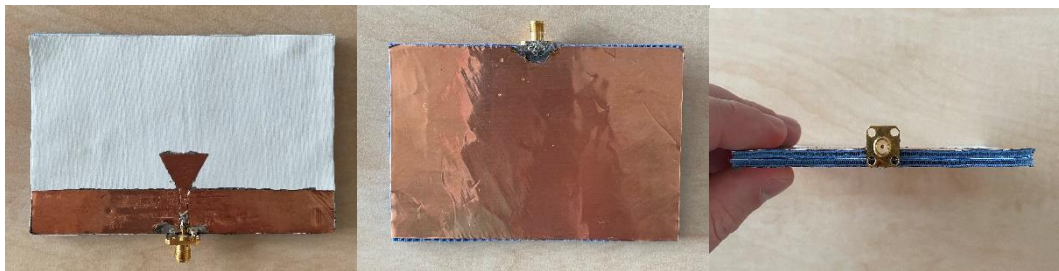
3. VÝROBA ANTÉNNÍ STRUKTURY A FANTOMU

3.1 Výroba antény

Dle zadání měla být anténní struktura optimalizována pro výrobu sítotisku a následně realizována. Anténa byla úspěšně optimalizována pro tuto technologii, ovšem po dohodě s vedoucím bylo přistoupeno k realizaci antény pomocí lepící měděné fólie.

Komponenty pro výslednou výrobu byly vyrobeny ve fakultní dílně VUT FEKT. Vodivé struktury (monopól s koplanárním vlnovodem, čtvercový umělý magnetický vodič, reflektor) byly vytvořeny vyleptáním z měděné lepící fólie podle parametrů modelu z programu ANSYS HFSS. Trojrozměrná textilní pletenina 3D097 je pokryta fólií PFX701 mat, díky které je dosaženo vyhlazení povrchu textilní pleteniny, ale především zabraňuje prosakování stříbrné pasty při výrobě technologií sítotisku.

Kompletování dílčích částí výsledné anténní struktury probíhalo zcela manuálně.



Obr. 3.1 Vyrobená anténní struktura: a) pohled shora, b) pohled ze zdola, c) pohled ze předu

Proces kompletování vypadal následovně:

- Naměření geometrických rozměrů trojrozměrné textilní pleteniny a její následné vystřížení na požadované parametry jak pro monopól s koplanárním vlnovodem, tak pro pro AMC strukturu 3x2,
- Očištění monopólu s koplanárním vlnovodem od lepivé plochy, ze které byl při výrobě vyleptán,
- Nalepení nastříhaných pásků lepící pásky přes plochu monopólu s koplanárním vlnovodem za účelem zachování struktury v požadované vzdálenosti od sebe,
- Přesun a následné nalepení této struktury na textilní pleteninu s fólií,
- Přesun a nalepení AMC struktury podle stejných kroků jako u struktury monopólu,
- Vyříznutí reflektoru a následné nalepení na spodní stranu textilní pleteniny pro AMC strukturu,
- Pokrytí povrchu AMC struktury oboustrannou lepící fólií,
- Nalepení struktur na sebe,

- Napájení konektoru pro propojení nositelné antény s měřicí jednotkou.

Při procesu výroby vyvstalo hned několik problémů. Prvním z nich byla přesnost geometrických rozměrů monopólu s koplanárním vlnovodem a AMC struktury, a to kvůli spojení modelu a reálného zařízení. Mnohé geometrické rozměry modelu byly zaneseny s přesností na setiny milimetrů. Při výrobě bylo ovšem možné zajistit přesnost geometrických rozměrů maximálně v řádech desetin milimetrů.

Dalším problémem byla vzdálenost napájecího pásku od zemnicích desek po obou stranách. Tato vzdálenost hraje roli v impedančním přizpůsobení antény. Požadovaná vzdálenost byla $W/3 = 0,4$ mm, vyrobená byla 0,1 mm. K přiblížení se k požadovanému parametru byl odříznut, pomocí skalpelu, z obou zemnicích desek, měděný pásek se šířkou blíží se k 0,3 mm.

Dále, vystřížení požadovaného rozměru trojrozměrné textilní pleteniny a reflektoru, jelikož se tak dělo pomocí kancelářských nůžek. Nalepení monopólu s koplanárním vlnovodem a AMC struktury na pleteninu. Nepřesnostem bylo částečně zamezeno přelepením jednotlivých částí struktur k sobě, pomocí nastříhaných pásků lepící pásky. Nakonec připájení bronzového konektoru k anténní struktuře.

I přes tyto problémy byla výsledná anténní struktura složena a připravena k testování.

3.2 Fantomy

Při návrhu antény na tělo je nutno brát v potaz její chování v blízkosti lidského těla. Dochází zde k interakci elektromagnetických vln s živou tkání. Za tímto účelem jsou využívány fantomy – ekvivalentní modely živých tkání. Fantomy se dělí na numerické (modelové) a fyzické. Dělení fyzických fantomů se nejčastěji provádí podle stavu po výrobě, a to na:

- Pevné fantomy,
- Gelové fantomy,
- Tekuté fantomy.

Pro zadanou anténní strukturu byl použit gelový fantom reprezentující lidský sval.

3.2.1 Výroba gelového fantomu

Gelový fantom reprezentující chování svalové tkáně na frekvenci 5,8 GHz se skládá z deionizované vody a agarové hmoty. K zajištění správné reprezentace svalových tkání je třeba určit poměr mezi deionizovanou vodou a agarovou hmotou podle vzorce

$$m_{\text{agar}} = V/1.33$$

Postup výroby pro kvádr 20 x 20 x 3 je následující:

- Odvážení 750 g agarové hmoty a následné nastrování na malé kousky, aby se urychlil proces rozvaření,

- Odvážení 997,5 g deionizované vody,
- Vaření vody na lázeň,
- Nastrouhané kousky agarové hmoty vložit do hrnce a následně celý hrnec vložit do vodní lázně,
- Po rozpuštění agaru je do hrnce přilita deionizovaná voda tak, aby nedošlo ke vzniku vzduchových bublin,
- Směs je posléze chvíli prohřívána, aby nabyla parametrů homogenního roztoku.

Výhoda použití gelového fantomu tkví v jednoduchosti přípravy, kterou lze provést i v běžných domácích podmínkách. Vyroběný fantom lze uložit do chladu, aby byl urychlen proces tuhnutí. Díky tomu ho lze použít v řádu jednotek hodin po započetí výroby. Nevýhodou je ovšem nestálost této struktury v čase (mizení vody, napadení houbami aj.).

Gelový fantom uvařený v tomto poměru nabývá relativní permittivity $\epsilon_r = 48$.

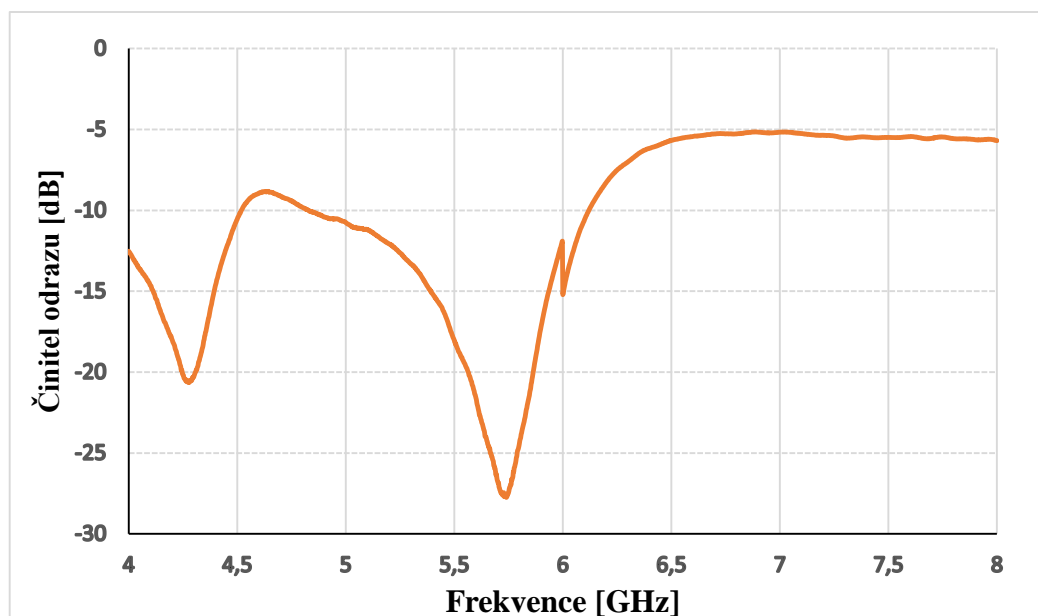
4. MĚŘENÍ ANTÉNY

Po návrhu, a následné výrobě anténní struktury, mohla být pozornost přesunuta na měření parametrů reálné anténní struktury. Cílem bylo experimentálně ověřit charakteristický vlastnosti vyrobené nositelné antény, a poté je porovnat s charakteristickými vlastnostmi modelu antény, které byly získány pomocí simulací. Měření proběhlo ve školní laboratoři uzpůsobené pro měření antén.

Pro měření činitele odrazu s_{11} a impedanční charakteristiky byl použit vektorový analyzátor Rohde & Schwarz s rozsahem 9 kHz - 13.9 GHz ve spojení s koaxiálním kabelem s impedancí $Z = 50 \Omega$. Měření vyzařovacích charakteristik proběhlo v odstíněné bezodrazové komoře.

4.1 Měření ve volném prostoru

Při prvotním měření činitele odrazu s_{11} a impedanční charakteristiky anténa vykazovala diametrálně rozdílné hodnoty, než jaké byly předpokládány. Z toho důvodu došlo k její revizi a následné opravě, která spočívala v opětovném napájení konektoru, zaříznutí hran zemnicích desek a vyhlazení celé horní struktury. Při druhém měření bylo dosaženo průběhů, které jsou zobrazeny níže na obr. 4.1



Obr. 4.1 Průběh činitele odrazu s_{11} v závislosti na frekvenci

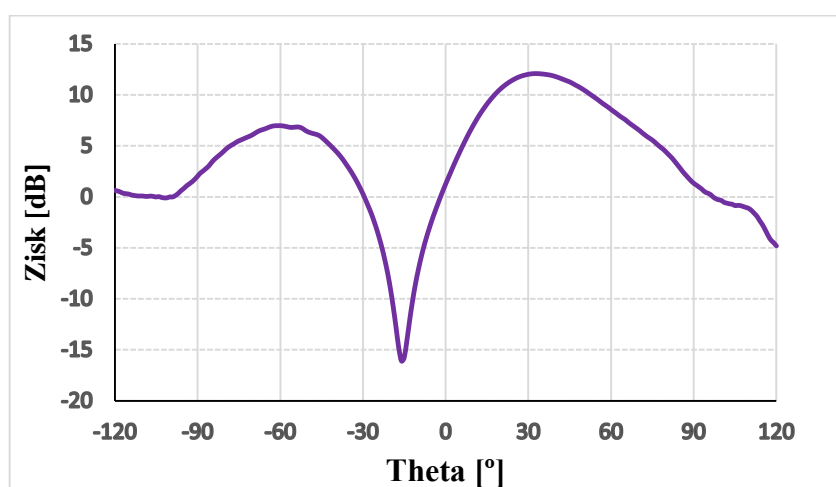
Z výsledku měření lze konstatovat toto: Rezonanční kmitočet f_r se nachází na hodnotě 5,74 GHz s hodnotou činitele odrazu $s_{11} = -27,75$ dB. Impedanční šířka pásma nabývá

hodnoty 1,4 GHz (4,8 – 6,2 GHz) a kompletně pokrývá ISM pásmo 5,8 GHz (5,725 – 5,875 GHz).

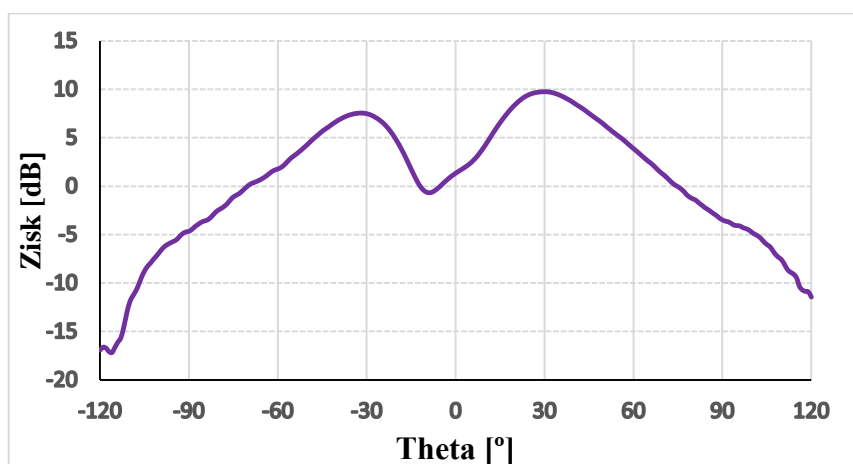
Co se týče impedančního přizpůsobení, reálná složka komplexní impendace vykazuje na kmitočtu 5,8 GHz hodnotu $Re(Z) = 50,4 \Omega$

4.2 Měření v bezodrazové komoře

Měření vyzařovacích charakteristik a zisku nositelné antény bylo provedeno v bezodrazové komoře, díky čemuž bylo zamezeno nežádoucím vlivům, jako jsou odrazy v laboratoři či rušení od ostatních zařízení.



Obr. 4.2 Vyzařovací diagram pro E-rovinu na frekvenci $f = 5,8 \text{ GHz}$



Obr. 4.3 Vyzařovací diagram pro H-rovinu na frekvenci $f = 5,8 \text{ GHz}$

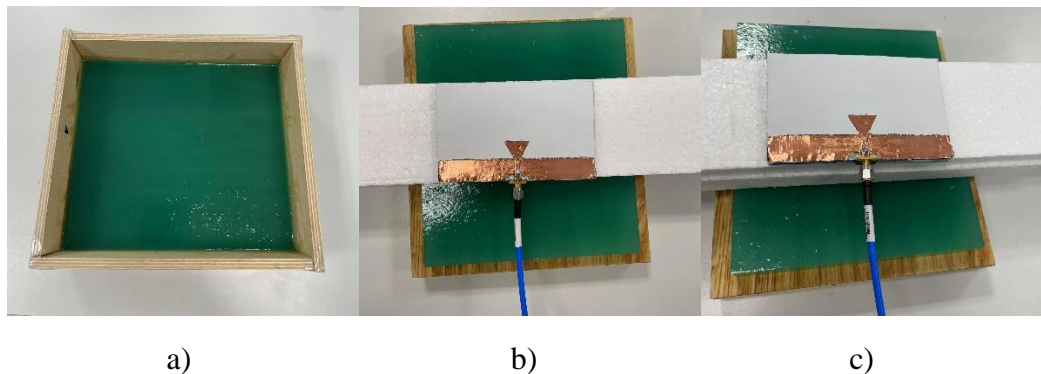
Na obrázcích 4.2 a 4.3 je zobrazen vyzařovací diagram pro rovinu E a pro rovinu H. Anténa vykazuje dva laloky, které vyzařují maximum ve směru $\pm 30^\circ$ v podélné E-rovině a -60° a 30° v příčné H-rovině.

Kvůli konfiguraci, při které byla anténa měřena nebylo možné postihnout celý rádius, a proto je vykreslen průběh od -120 do 120 °.

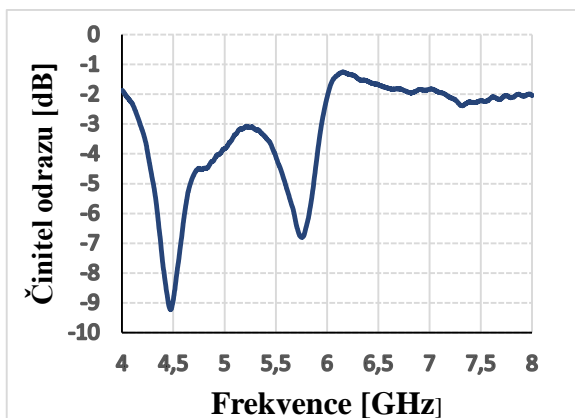
4.3 Měření s gelovým fantomem

Měření probíhalo na fantomu pospaném v kapitole 3.2.1. Gelový fantom reprezentuje svalovou tkáň na kmitočtu $f = 5,8$ GHz, s geometrickými rozměry $20 \times 20 \times 3$ cm a s relativní permitivitou $\epsilon_r = 48$. K měření byly použity kvádry polystyrénu s tloušťkami 0 až 30 mm. Polystyren byl volen záměrně, jelikož jeho relativní permitivita ϵ_r má hodnotu 2,4. Postup měření, i s postupem připravení gelového fantomu k měření, byl následující:

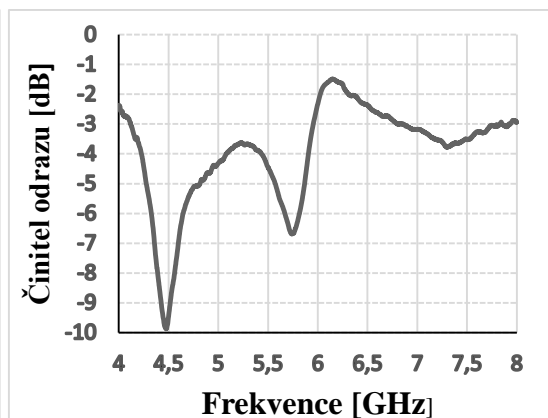
- Odříznutí (odlepení) bočních stran kobercovým nožem od stěn kádinky, aby nedošlo k prasklinám a následnému rozpadnutí fantomu při odstranění bočních stran kádinky,
- Odšroubování šroubů z bočních stěn kádinky, které vytvářely formu fantomu při tuhnutí a zajistily tak jeho výsledný tvar,
- Jemné očištění fantomu, a to kvůli zamezení jeho rozpadu při interakci anténa – fantom, či polystyrén – fantom.
- Po nachystání gelového fantomu je možné přejít k měření charakteristik antény v jeho blízkosti, a to pro vzdálenost 0, 6, 10, 16, 20 až 30 mm dle použitého polystyrénu na fantomu.



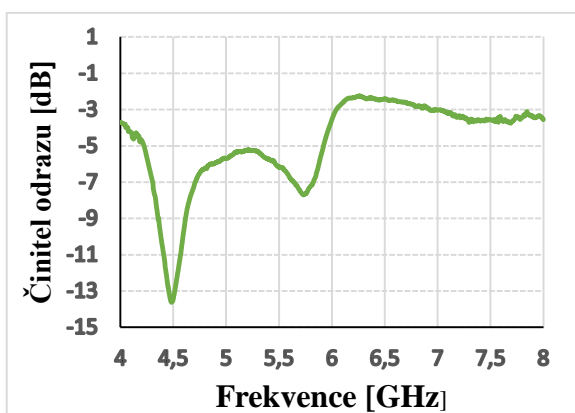
Obr. 4.4 a) Gelový fantom v kádince, b) měření s fantomem na polystyrénu tloušťky: b) 10 mm, c) 30 mm



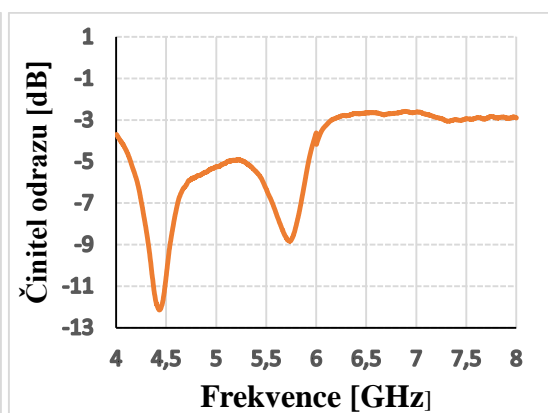
a)



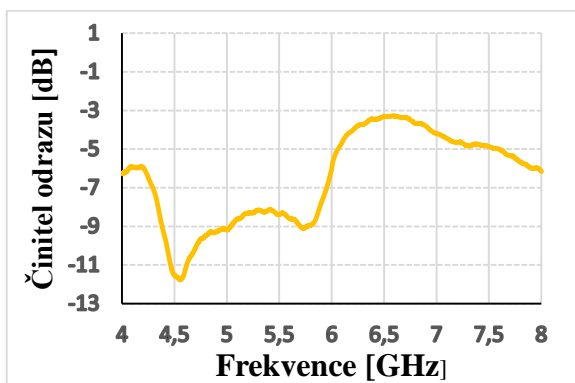
b)



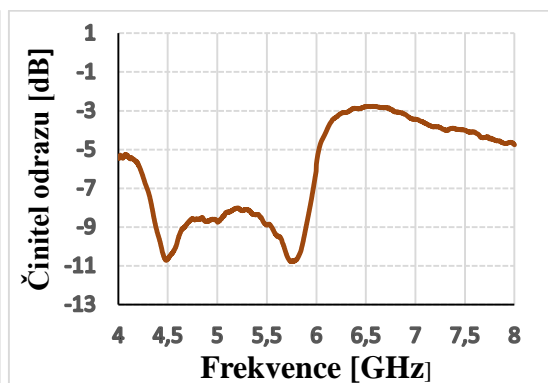
c)



d)

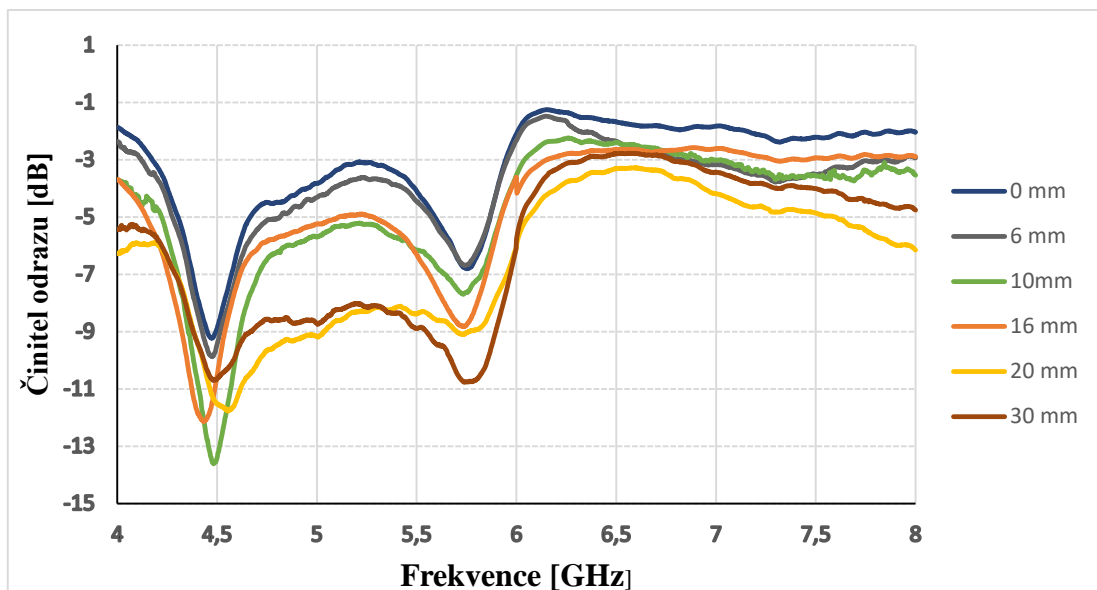


e)



f)

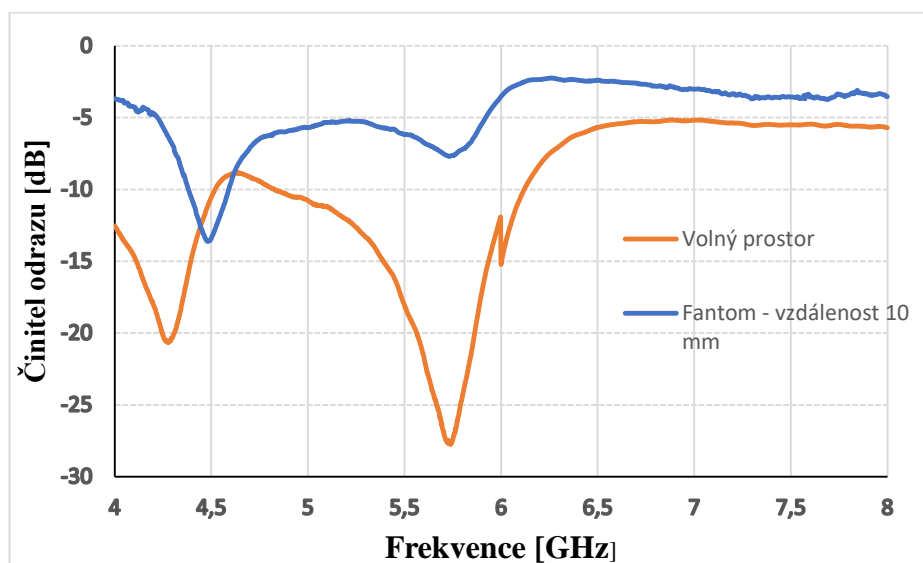
Obr. 4.5 Průběh činitele odrazu s_{11} v blízkosti fantomu v závislosti na frekvenci ve vzdálenosti a) 0 mm, b) 6 mm, c) 10 mm, d) 16 mm, e) 20 mm, f) 30 mm



Obr. 4.6 Vzájemné srovnání průběhu činitele odrazu s_{11} v blízkosti fantomu v závislosti na frekvenci ve vzdálenosti 0 mm, 6 mm, 10 mm, 16 mm, 20 mm, 30 mm

Z výsledků lze zřetelně pozorovat vliv fantomu na průběh činitele odrazu s_{11} a impedanční šířku pásma. Při měření v blízkosti fantomu dochází k rozladění charakteristik. Dochází k většímu útlumu činitele odrazu v okolí frekvence 4,4 GHz. Právě naopak je tomu v okolí 5,8 GHz. Pro měření ve vzdálenosti 0 mm antény od fantomu (přímý kontakt) nabývá činitel odrazu s_{11} hodnot (-9,3 až -1,3 dB) pro frekvence 4 až 8 GHz. Při oddalování antény od fantomu se tomu děje přesně opačně.

Anténa nabývá nejlepších hodnot pro měření v největší vzdálenosti od fantomu (30 mm).



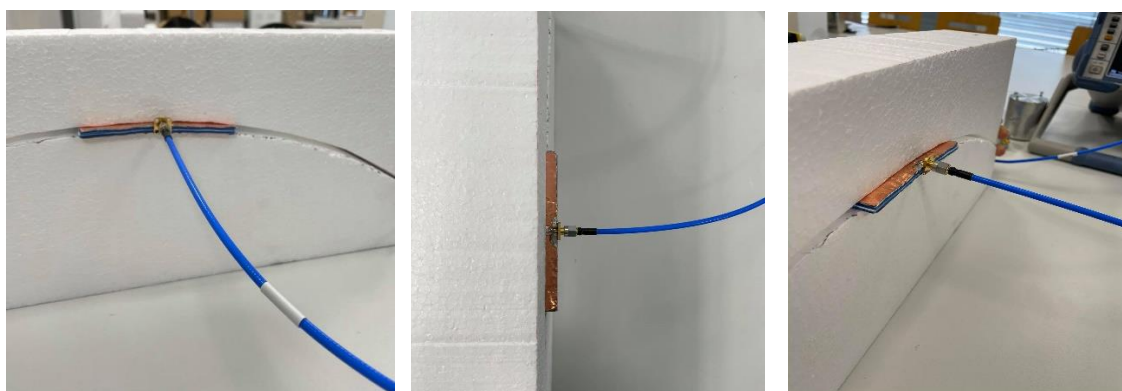
Obr. 4.7 Srovnání průběhu činitele odrazu s_{11} v závislosti na frekvenci ve volném prostoru a v blízkosti fantomu (10 mm)

4.4 Měření ohybů

Jedním z kladených požadavků na nositelnou anténu je odolnost vůči ohybu. Jelikož je anténa, ať už přímo či nepřímo, nošena na těle osob, je třeba vyšetřit, jak se bude v daných situacích chovat.

Měření ohybů probíhalo na polystyrénech s rozdílnými úhly ohybu. Tyto polystyrény byly vyrobeny ručně ve fakultní dílně. Z toho důvodu nejsou výřezy oblouků zcela rovny, ale vyskytují se na nich vlnky s nepravidelnými rozměry v řádech milimetrů. Polystyrény byly seřezány a nabroušeny pod úhlem 1, 2, 3, 4, 5, 6 a 8 stupňů.

Postup měření je následující: Anténní struktura je položena na střed horní vypouklé části polystyrénu. Aby byl zajištěn co nejpřesnější ohyb, je na anténu z horní části přitisknut vyhloubený protikus vypouklé části.

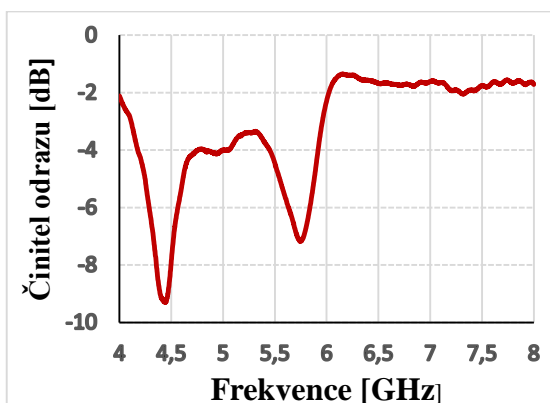


a)

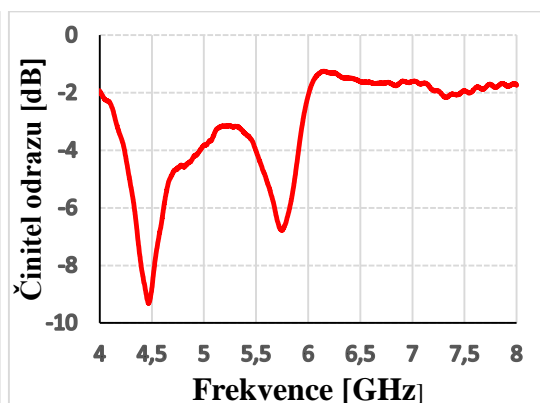
b)

c)

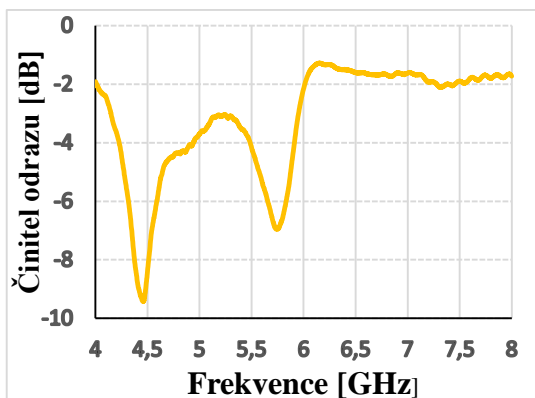
Obr. 4.8 Měření ohybů: a) pohled zepředu, b) pohled ze shora, c) pohled ze strany



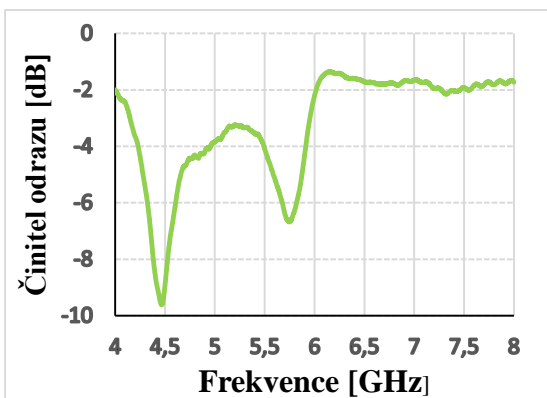
a)



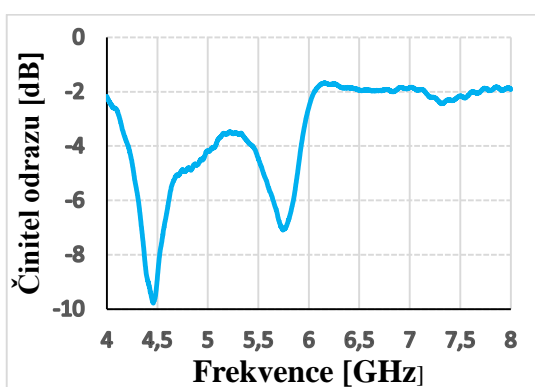
b)



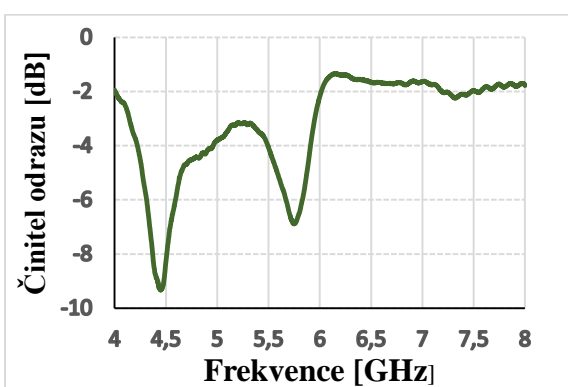
c)



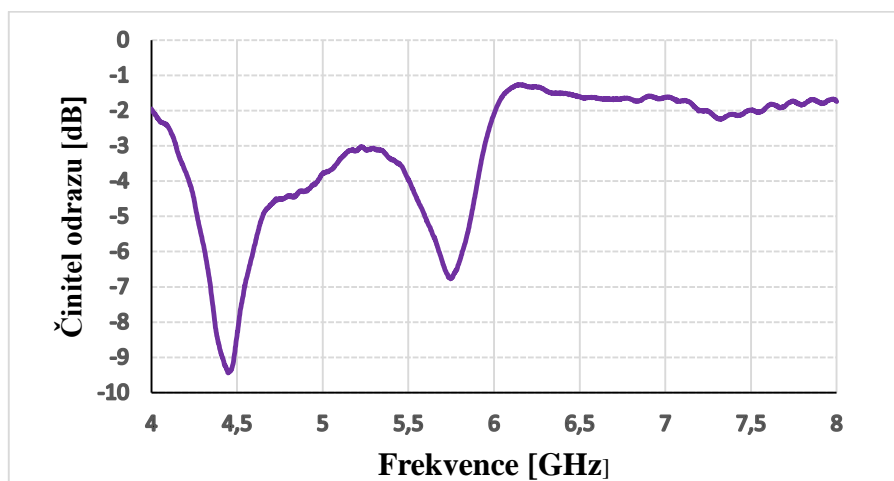
d)



e)

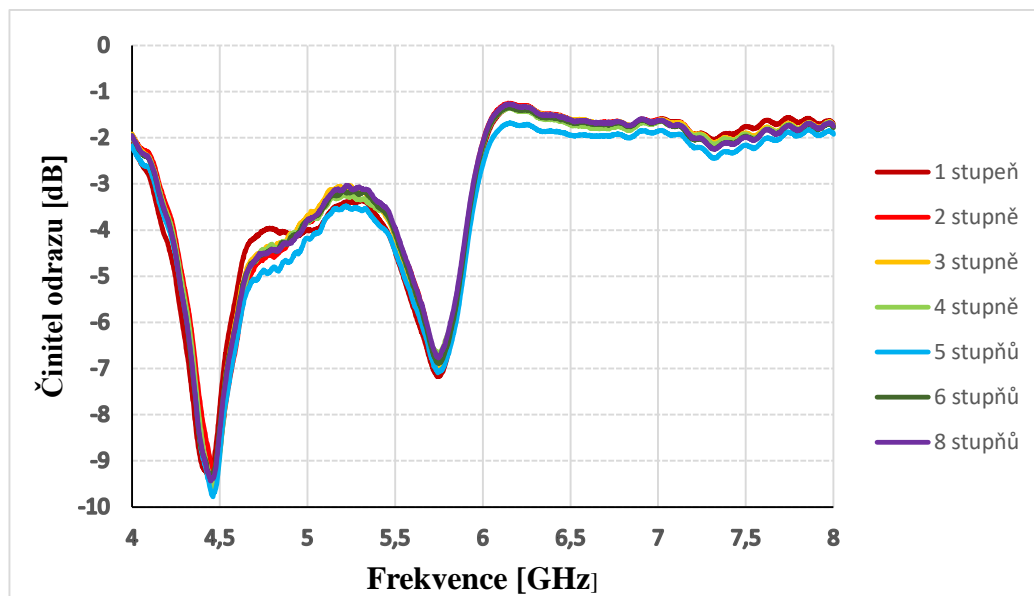


f)



g)

Obr. 4.9 Průběh činitele odrazu s_{11} v závislosti na frekvenci a na úhlu ohybu a) 1° , b) 2° , c) 3° , d) 4° , e) 5° , f) 6° , g) 8°



Obr. 4.10 Vzájemné srovnání průběhu činitele odrazu s_{11} v závislosti na frekvenci a na úhlu ohybu: 1° , 2° , 3° , 4° , 5° , 6° , 8°

Jak je patrné z obrázku, provedení ohybu nemá na anténní strukturu téměř žádný vliv na její parametry, a to na činitel odrazu s_{11} , impedanční šířku pásma.

Díky své struktuře, která, i mimo jiné, sestává z 2 trojrozměrných textilních pletenin, je anténa skoro neohýbatelná. To bylo vyzkoušeno i na válci s ohybem téměř 45° . Kvůli tomuto experimentu byla anténa částečně rozladěna, a proto se hodnota činitele odrazu změnila, jako hodnota impedanční šířky pásma a impedančního přizpůsobení.

5. ZÁVĚR

Cílem této práce bylo pomocí simulací porovnání se vzorovou publikací, ověření správnosti jejich dílčích komponent, optimalizace, výroba a měření parametrů antény.

První kapitola práce shrnuje obsah článku [1]. Podrobně jsou zde vysvětleny principy, na kterých je anténa založena. Je zde provedena kompletní experimentální realizace navržené nositelné antény a dále její optimalizace pro ISM pásmo 5,8 GHz (5,725 – 5,875 GHz).

Druhá kapitola se zabývá návrhem a konfigurací nově navržené planární nositelné antény. Je zde popsán návrh a kompletní anténní struktura, která je upravena pro výrobu technologie síťotisku.

Třetí kapitola je věnována výrobě planární nositelné antény. Je zde stručně popsána technologie a postup výroby.

Čtvrtou kapitolou je měření reálné planární nositelné antény. Cílem bylo experimentálně ověřit charakteristické vlastnosti vyrobené nositelné antény, a poté je porovnat s charakteristickými vlastnostmi modelu antény, které byly získány pomocí simulací. Měření proběhlo ve školní laboratoři uzpůsobené pro měření antén. Pro měření činitele odrazu s_{11} a impedanční charakteristiky byl použit vektorový analyzátor Rohde & Schwarz s rozsahem 9 kHz - 13.9 GHz ve spojení s koaxiálním kabelem s impedancí $Z = 50 \Omega$. Měření vyzařovacích charakteristik proběhlo v odstíněné bezodrazové komoře.

Měření ve volném prostoru:

Rezonanční kmitočet f_r se nachází na hodnotě 5,74 GHz s hodnotou činitele odrazu $s_{11} = -27,75$ dB. Impedanční šířka pásma nabývá hodnoty 1,4 GHz (4,8 – 6,2 GHz) a kompletně pokrývá ISM pásmo 5,8 GHz (5,725 – 5,875 GHz).

Měření v bezodrazové komoře:

Kvůli konfiguraci, při které byla anténa měřena nebylo možné postihnout celý rádius, a proto je vykreslen průběh od -120 do 1

Měření s gelovým fantomem:

Z výsledků lze zřetelně pozorovat vliv fantomu na průběh činitele odrazu s_{11} a impedanční šířku pásma. Při měření v blízkosti fantomu dochází k rozladění charakteristik. Dochází k většímu útlumu činitele odrazu v okolí frekvence 4,4 GHz. Právě naopak je tomu v okolí 5,8 GHz. Pro měření ve vzdálenosti 0 mm antény od fantomu (přímý kontakt) nabývá činitel odrazu s_{11} hodnot (-9,3 až -1,3) pro frekvence 4 až 8 GHz. Při oddalování antény od fantomu se tomu děje přesně opačně.

Anténa nabývá nejlepších hodnot pro měření v největší vzdálenosti od fantomu (30 mm).

Měření ohybů:

Měření ohybů probíhalo na polystyrénech s rozdílnými úhly ohybu. Tyto polystyrény byly vyrobeny ručně ve fakultní dílně. Z toho důvodu nejsou výřezy oblouků zcela rovny, ale vyskytují se na nich vlnky s nepravidelnými rozměry v řádech milimetrů. Polystyrény byly seřezány a nabroušeny pod úhlem 1, 2, 3, 4, 5, 6 a 8 stupňů

Optimalizovaná anténa byla realizována a experimentálně ověřena pro použití na lidském těle. Z výsledků měření je zřejmé, že tato anténa splňuje parametry pro použití na lidském těle. Uplatnění této antény se nalézá ve zdravotnictví, sportu, u bezpečnostních a záchranářských složek, ve vojenské sféře a všude, kde je zapotřebí monitorování polohy a zdravotního stavu osob.

LITERATURA

- [1] ALEMARYEEN, Ala a Sima NOGHANIAN. On-Body Low-Profile Textile Antenna With Artificial Magnetic Conductor. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* [online]. 2019, 67(6), 3649-3656 [cit. 2020-12-13]. ISSN 0018-926X. Dostupné z: doi:10.1109/TAP.2019.2902632
- [2] KOVÁCS, P. *Návrh a optimalizace struktur s elektromagnetickým zádržným pásmem. Disertační práce*. Brno: VUT v Brně, 2010. Dostupné také z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=32416
- [3] RAIDA, Zbyněk a kol. *Multimediální učebnice: Elektromagnetické vlny Mikrovlnná technika* [online]. FEEC VUT Brno, 2010 [cit. 2020-12-13]. Dostupné z: <http://www.urel.feec.vutbr.cz/~raida/multimedia/index.php>